

Transport alternativních forem vodíku – efektivita dané formy, technologická vypěstlost řešení, potenciál nasazení, omezení



Tento výsledek je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci
Programu Národního centra kompetence

NÁZEV VÝSLEDKU

Transport alternativních forem vodíku – efektivita dané formy, technologická vyspělost řešení, potenciál nasazení, omezení

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Alternativní formy skladování a transportu vodíku

ZPRACOVATEL

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (VŠB)

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i. (CDV)

Česká vodíková technologická platforma (HYTEP)

České vysoké učení technické v Praze (ČVUT)

ORLEN Unipetrol RPA s. r. o. (ORLEN)

AUTORSKÝ TÝM

Lukáš Prokop, Ľubomíra Machů, Petra Drímalová (VŠB)

Ondřej Asztalos, Zahra Gholami, Adam Giurg, Beyza Uçar (ORLEN)

Pavel Hruběš, Václav Koleník, Ľubomír Krajňák (ČVUT)

Jan Sochor (HYTEP)

Adéla Svejková, Libor Špička (CDV)

Obsah

1	Úvod	7
2	Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku.....	9
2.1	Obecné informace	9
2.2	Silniční přeprava	11
2.3	Drážní přeprava	23
2.4	Lodní přeprava.....	34
2.5	Potrubní přeprava	44
2.6	Terminály.....	45
2.7	Přepravní trasy	46
2.8	Shrnutí	48
	Použité zkratky	51
	Seznam literatury	52
3	Metan jako alternativní forma přepravy vodíku.....	60
3.1	Obecné informace	60
3.2	Silniční přeprava	64
3.3	Drážní přeprava	76
3.4	Lodní přeprava.....	84
3.5	Potrubní přeprava	90
3.6	Terminály.....	98
3.7	Přepravní trasy	100
3.8	Shrnutí	103
	Použité zkratky	104
	Seznam literatury	105
4	Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku	115
4.1	Obecné informace	115
4.2	Silniční přeprava	117
4.3	Drážní přeprava	123
4.4	Lodní přeprava.....	130
4.5	Potrubní přeprava	137
4.6	Terminály.....	144
4.7	Přepravní trasy	145

4.8	Shrnutí	146
	Použité zkratky	148
	Seznam literatury	149
5	Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku	160
5.1	Obecné informace	160
5.2	Silniční přeprava	161
5.3	Drážní přeprava	170
5.4	Lodní přeprava.....	176
5.5	Potrubní přeprava	181
5.6	Terminály.....	188
5.7	Přepravní trasy	190
5.8	Shrnutí	191
	Použité zkratky	193
	Seznam literatury	194
6	Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku	197
6.1	Obecné informace	197
6.2	Silniční přeprava	199
6.3	Drážní přeprava	205
6.4	Lodní přeprava.....	210
6.5	Potrubní přeprava	213
6.6	Terminály.....	214
6.7	Přepravní trasy	215
6.8	Shrnutí	216
	Použité zkratky	217
	Seznam literatury	218
7	Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku.....	221
7.1	Obecné informace	221
7.2	Silniční přeprava	223
7.3	Drážní přeprava	224
7.4	Lodní přeprava.....	225
7.5	Potrubní přeprava	226
7.6	Terminály.....	232
7.7	Přepravní trasy	234

7.8	Shrnutí	235
	Použité zkratky	236
	Seznam literatury	237
8	Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku	240
8.1	Obecné informace	240
8.2	Silniční přeprava	244
8.3	Drážní přeprava	250
8.4	Lodní přeprava.....	256
8.5	Potrubní přeprava	263
8.6	Terminály.....	272
8.7	Přepravní trasy	274
8.8	Shrnutí	277
	Použité zkratky	279
	Seznam literatury	281
8.9	Přílohy.....	284
9	Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku.....	287
9.1	Obecné informace	287
9.2	Silniční přeprava	291
9.3	Drážní přeprava	300
9.4	Lodní přeprava.....	307
9.5	Potrubní přeprava	317
9.6	Terminály.....	325
9.7	Přepravní trasy	326
9.8	Shrnutí	327
	Použité zkratky	330
	Seznam literatury	332
10	Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku	341
10.1	Obecné informace	341
10.2	Silniční přeprava	344
10.3	Drážní přeprava	351
10.4	Lodní přeprava	356
10.5	Potrubní přeprava.....	361
10.6	Terminály	366

10.7	Přepravní trasy.....	367
10.8	Shrnutí.....	369
	Použité zkratky	372
	Seznam literatury	373
11	Seznam obrázků	376
12	Seznam tabulek	378

1 Úvod

Rozvoj vodíkové ekonomiky je úzce spojen nejen s výrobou a skladováním vodíku, ale také s jeho efektivní distribucí mezi místem výroby a místem spotřeby. V budoucích energetických systémech se předpokládá, že vodík bude často vyráběn v lokalitách s vysokým potenciálem obnovitelných zdrojů energie, zatímco jeho spotřeba bude soustředěna především v průmyslových centrech, dopravních uzlech nebo energetických systémech. To vytváří potřebu spolehlivých a ekonomicky efektivních způsobů přepravy vodíku na různé vzdálenosti a v různých objemech. Transport vodíku tak představuje jeden z klíčových prvků budoucí vodíkové infrastruktury a významný faktor ovlivňující celkovou efektivitu vodíkového hospodářství.

Z hlediska transportu má vodík několik specifických fyzikálních vlastností, které jeho přepravu výrazně komplikují. Při standardních podmínkách má velmi nízkou objemovou hustotu, což znamená, že pro přepravu většího množství energie je nutné využívat technologie umožňující jeho kompresi, zkapalnění nebo chemické navázání v jiných nosičích. Při přímém transportu ve formě plynného vodíku je nutné využívat vysoké tlaky, zatímco přeprava kapalného vodíku vyžaduje extrémně nízké teploty a energeticky náročné procesy zkapalnění. Tyto technologie jsou technologicky relativně vyspělé a v současnosti se využívají v průmyslové praxi, jejich aplikace je však spojena s řadou technických, ekonomických i bezpečnostních omezení.

Vedle těchto konvenčních přístupů se proto stále více pozornosti věnuje alternativním formám transportu vodíku. Tyto technologie využívají různé chemické nebo fyzikální nosiče, které umožňují vodík přepravovat v jiné formě než jako volný plyn nebo kapalinu. Vodík může být například chemicky vázán v metalhydridech, v organických kapalných nosičích vodíku, jako je toluen, nebo v chemických sloučeninách obsahujících vodík, například v methanolu, ethanolu či amoniaku. V některých případech může být transport realizován také prostřednictvím existujících energetických nosičů, jako je metan nebo zemní plyn. Tyto alternativní nosiče mohou nabídnout výhody například v podobě vyšší objemové hustoty energie, jednodušší manipulace, bezpečnějšího transportu nebo možnosti využití stávající dopravní a energetické infrastruktury.

Na druhé straně je nutné zohlednit i specifické technologické a ekonomické aspekty jednotlivých řešení. V případě chemických nosičů je často nutné zajistit dodatečné procesy chemické konverze, které umožňují zpětné uvolnění vodíku v místě jeho využití. Tyto procesy mohou být spojeny s energetickými ztrátami, vyšší technologickou náročností nebo zvýšenými investičními náklady. Výběr vhodné technologie transportu vodíku proto závisí na celé řadě faktorů, mezi které patří zejména přepravní vzdálenost, množství transportovaného vodíku, požadovaná rychlost dodávky, dostupnost infrastruktury, bezpečnostní požadavky a celková ekonomická efektivita.

Různé technologie transportu vodíku proto mohou nacházet uplatnění v odlišných segmentech energetického systému – od lokální distribuce vodíku v rámci regionálních energetických systémů přes zásobování průmyslových podniků až po mezinárodní přepravu vodíku mezi výrobními a spotřebitelskými oblastmi. V praxi tak může docházet ke kombinaci více technologií, které se vzájemně doplňují v rámci širší vodíkové infrastruktury.

Cílem této studie je poskytnout systematický přehled vybraných alternativních forem přepravy vodíku a zhodnotit jejich potenciál z hlediska technologických, ekonomických a environmentálních aspektů. Dokument se zaměřuje na několik typů vodíkových nosičů a technologií, mezi které patří metalhydridy, metan, toluen, plynný vodík, kapalný vodík, směs zemního plynu s vodíkem, amoniak, methanol a ethanol. U jednotlivých technologií jsou analyzovány zejména jejich základní vlastnosti z pohledu přepravy, bezpečnostní aspekty, technologická připravenost, energetická náročnost, ekonomické a ekologické dopady a legislativní rámec.

Součástí hodnocení je také analýza jednotlivých dopravních způsobů, včetně silniční, železniční, lodní a potrubní přepravy, a posouzení jejich vhodnosti pro konkrétní typy vodíkových nosičů. Dokument rovněž zohledňuje existující technické normy, oborové předpisy a legislativní omezení, která mohou ovlivňovat praktické nasazení těchto technologií v dopravních a logistických systémech.

Zvláštní pozornost je věnována možnostem aplikace jednotlivých technologií v podmínkách České republiky, a to s ohledem na dostupnou dopravní infrastrukturu, průmyslové zázemí a strategické cíle rozvoje vodíkové ekonomiky. Hodnoceny jsou také potenciální přepravní trasy a logistické uzly, které mohou v budoucnu tvořit základ infrastruktury pro distribuci vodíku.

Výsledkem této studie je komplexní přehled a srovnání vybraných technologií transportu vodíku, který umožňuje identifikovat jejich hlavní výhody, omezení a potenciál praktického využití. Zpracované informace mohou sloužit jako podklad pro další výzkum, technologický rozvoj i strategické rozhodování v oblasti rozvoje vodíkové infrastruktury a vodíkové mobility v České republice.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2 Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Ľubomíra Machů, Petra Drímalová

VŠB – Technická univerzita Ostrava, CEET, CENET, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

2.1 Obecné informace

2.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Jednou z klíčových charakteristik metalhydridů při jejich přepravě je chemická stabilita. V porovnání se stlačeným plynem nebo zkapalněným vodíkem se hydridy vyznačují relativně nízkou reaktivností a minimálním rizikem úniku plynu do prostředí, jelikož vodík je pevně vázán v krystalové mřížce kovu. To významně zvyšuje bezpečnost přepravy, zejména při delších transportních trasách a při manipulaci v běžných logistických řetězcích [1], [2].

Dalším důležitým parametrem je množství vázaného vodíku na jednotku hmotnosti nebo objemu. Různé typy metalhydridů, například MgH_2 , LaNi_5H_6 nebo TiFeH_2 , vykazují rozdílnou kapacitu ukládání vodíku. Praktická využitelnost pro přepravu se tedy odvíjí nejen od teoretické gravimetrické a volumetrické hustoty vodíku, ale i od kinetiky absorpce a desorpce při provozních podmínkách [3], [4].

Neméně významná je tepelná stabilita a podmínky uvolňování vodíku. Většina metalhydridů vyžaduje určitou teplotu k desorpci vodíku, což může ovlivnit efektivitu při jeho využití v místě určení. Nízkoteplotní hydridy (např. na bázi intermetalických slitin typu LaNi_5) jsou vhodnější pro přepravu a následné uvolňování vodíku v decentralizovaných energetických systémech, zatímco vysokoteplotní hydridy (např. MgH_2) vyžadují speciální podmínky a mohou být ekonomicky méně výhodné pro mobilní aplikace [5], [6].

V neposlední řadě je nutné hodnotit i hmotnostní a objemové parametry samotného nosiče. Metalhydridy bývají obecně těžší než jiné formy ukládání vodíku (např. kapalně organické nosiče – LOHC), což může limitovat jejich využití pro dálkovou přepravu, avšak jejich vysoká bezpečnost a kompaktnost je činí atraktivními pro stacionární a regionální aplikace [7].

V dalším textu je pojem „metalhydridy“ používán ve smyslu technických systémů pro skladování a přepravu vodíku, ve kterých je vodík reverzibilně vázán v kovové matici. Text se tedy nevztahuje na přepravu volného hydridového materiálu, ale na certifikované metalhydridové zásobníkové systémy využívané v praxi.

2.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Pro účely chemické legislativy (CLP) mohou být jednotlivé metalhydridy klasifikovány jako „water-reactive solids“, tedy látky uvolňující hořlavý plyn při kontaktu s vodou. Tato klasifikace se vztahuje na samotné hydridové materiály, nikoli na kompletní zásobní systémy. Pro účely přepravy jsou totiž metalhydridové zásobníky s vodíkem zařazeny pod položku UN 3468, třída 2.1, tedy jako hořlavý plyn vázaný v metalhydridovém loži [1].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

V systému NFPA 704 se metalhydridy označují čtyřpolním „ohnivým diamantem“ (Obrázek 2.1). Červené pole (hořlavost) získává hodnotu 3 – pevné látky, které lze za běžné teploty snadno vznítit. Modré pole (zdraví) se obvykle stanovuje na 1–2 (mírné až střední dráždivé účinky prachu na dýchací cesty a kůži). Žluté pole (reaktivita) je 2, protože tyto hydridy reagují silně s vodou. Bílá sekce obsahuje piktogram „W“ upozorňující na nebezpečnou reakci s vodou [2].



OBRÁZEK 2.1: NFPA OHNIVÝ DIAMANT [10].

Pro minimalizaci rizik při přepravě musí být kontejnery s metalhydridy udržovány v suchu a chráněny před vlhkostí – ideálně v uzavřených, inertních atmosférách (dusík/argon). Doporučuje se aktivní sledování tlaku, teploty a detekce vodíku v prostoru, kde jsou kontejnery skladovány či je s nimi manipulováno. Při manipulaci platí zákazy používání zdrojů tepla či otevřeného ohně. V případě porušení balení a úniku vodíku je nutné zajistit rychlé odvětrání, evakuaci osob a zásah hasicími prostředky podle třídy D (suché prášky na kovové požáry) [3], [4].

Přísné požadavky na dokumentaci zahrnují bezpečnostní list (SDS) s uvedením všech klasifikací, přepravních značek a podrobnými pokyny pro nakládání v nouzových situacích. Veškerá zařízení a kontejnery musí být v souladu s ADR/RID/IMDG, respektive odpovídajících norem ISO pro tlakové nádoby, a obsluhu mohou provádět pouze osoby proškolené v nakládání s reaktivními kovy [5], [6].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.2 Silniční přeprava

2.2.1 Vhodnost přepravy

Silniční přeprava představuje jednu z nejvhodnějších forem transportu metalhydridů zejména na krátké a střední vzdálenosti. Díky vysoké chemické stabilitě většiny intermetalických hydridů je možné je převážet v relativně běžných logistických podmínkách bez významného rizika úniku nebo výbuchu. To je výhodné zejména při zásobování decentralizovaných energetických systémů a malých odběrných míst, kde je spolehlivost a bezpečnost klíčovým faktorem [7], [8].



OBRAZEK 2.2: SILNIČNÍ PŘEPRAVA VODÍKU VE FORMĚ METALHYDRIDŮ – KONTEJNEROVÝ TRAILER SYSTÉMU HYDREXIA [9].

Obrázek 2.2 zobrazuje kontejnerový systém pro silniční přepravu vodíku uloženého ve formě metalhydridů – technologie vhodná pro decentralizované energetické aplikace.

Na úrovni ostrovních řešení je silniční přeprava hydridů obzvláště vhodná. V takových podmínkách je logistika založená na mobilních zásobnících často jedinou realistickou možností, protože nevyžaduje potrubní infrastrukturu ani náročnou kryogenní technologii. Hydridové zásobníky lze snadno dopravit na místo a využít pro dlouhodobé ukládání vodíku [10], [11].

Na úrovni krajů (regionální přeprava) pro přepravu mezi výrobními a distribučními centry v rámci jednoho kraje či regionu (desítky až stovky kilometrů) lze využít standardní nákladní vozy v souladu s ADR pro UN 3468. Tyto předpisy dovolují přepravu větších objemů, řády tun hydridu, uzavřeného v certifikovaných metalhydridových zásobnících splňujících ISO 16111, bez nutnosti speciálních cisternových vozů, přičemž se využívá stávající dopravní infrastruktura a logistické trasy [1], [12].

Na národní úrovni je silniční přeprava metalhydridů vhodná zejména jako doplněk k větším distribučním schémátům (např. potrubní síti nebo železniční přepravě). Díky využití stávající silniční infrastruktury lze zajistit propojení menších odběratelů a regionálních center bez nutnosti rozsáhlých investic do nové infrastruktury. Tímto způsobem mohou metalhydridy podporovat rozvoj

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

národní vodíkové strategie a přispívat k plnění cílů v oblasti dekarbonizace dopravy a energetiky [13].

Na úrovni EU je silniční přeprava metalhydridů vnímána jako doplňkový prvek k hlavním přepravním trasám vodíku plánovaným v rámci iniciativy European Hydrogen Backbone. Zatímco vysokokapacitní vodíková potrubí budou určena pro dálkový transport, silniční doprava v podobě kontejnerů s metalhydridy může sloužit k regionální distribuci a zásobování koncových uživatelů, včetně malých a středních podniků či lokálních energetických sítí. Evropská komise zároveň klade důraz na bezpečnost přepravy v souladu s legislativou ADR a na postupnou harmonizaci předpisů mezi členskými státy [14], [15], [16].

2.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologie ukládání a přepravy vodíku pomocí metalhydridů se v současnosti pohybuje na úrovni TRL 5–7, tedy v mezi fází validace v relevantním prostředí a demonstrací v předoperačním měřítku. To znamená, že existuje řada funkčních prototypů a pilotních projektů, avšak jejich komerční využití je zatím omezené [10], [17].

Na regionální a národní úrovni byly realizovány pilotní projekty využívající silniční přepravu metalhydridových zásobníků pro zásobování průmyslu a menších energetických celků. Tyto aplikace ukazují na technickou proveditelnost, ale současně i na potřebu optimalizace hmotnosti a ekonomiky systému [11], [18].

V rámci EU jsou metalhydridové technologie podporovány v programech Horizon Europe, M-ERA.NET [19] a Clean Hydrogen Partnership, kde jsou zařazeny mezi perspektivní, avšak stále rozvíjené způsoby přepravy a skladování vodíku [15], [20].

2.2.3 Popis druhu přepravy

Přeprava vodíku v metalhydridové (pevné) formě představuje perspektivní alternativu k tradičním metodám využívajícím stlačený nebo kapalný vodík. V metalhydridových systémech je vodík chemicky vázán v pevné matici, což významně snižuje riziko jeho náhlého uvolnění a eliminuje potřebu manipulace s vysokými tlaky či kryogenními teplotami. Tyto vlastnosti zlepšují celkovou bezpečnost, stabilitu i logistickou ovladatelnost během přepravy [21].

Silniční transport metalhydridů se realizuje pomocí tlakových zásobníků nebo modulárních kontejnerů, které obsahují hydridový materiál (např. MgH_2 , $TiFeH_x$ nebo komplexní hydridy typu $NaAlH_4$). V závislosti na aplikaci mohou mít tyto jednotky podobu malých přenosných modulů (řádově jednotky až desítky kilogramů) nebo větších zásobníků používaných v demonstračních či pilotních projektech, kde jejich hmotnost dosahuje desítek až stovek kilogramů [22], [23].

Metalhydridové systémy během přepravy pracují za výrazně mírnějších podmínek než tlakové nebo kryogenní nádoby. Vodík je vázán v pevné struktuře a uvolňuje se až při zvýšené teplotě, typicky v rozsahu 60–300 °C, v závislosti na chemickém složení metalhydridu. Z tohoto důvodu mohou být kontejnery vybaveny topnými okruhy a teplotními senzory určenými k řízení desorpce, nikoli však k zajištění bezpečnosti při samotné přepravě [21].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Plnění a manipulace s metalhydridovým materiálem často vyžadují inertní či vodíkovou atmosféru, zejména u materiálů citlivých na vlhkost nebo kyslík (např. MgH_2 , NaAlH_4), což je standardně zohledněno v technologických postupech. Po hermetickém uzavření zásobníku však může být následná manipulace i transport realizován v běžných podmínkách [21].

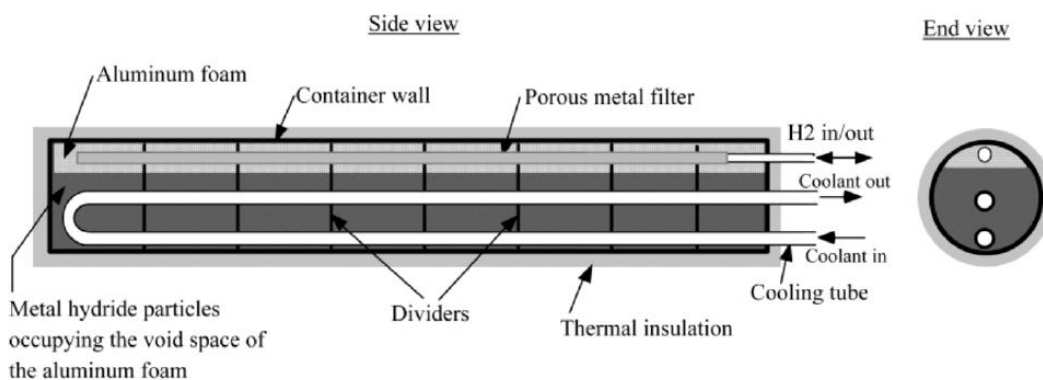
Z bezpečnostního hlediska nabízí metalhydridové systémy několik zásadních výhod: možnost modulárního návrhu, minimální riziko rychlého úniku plynného vodíku a omezený vnitřní tlak. Tyto faktory zvyšují jejich potenciál pro decentralizované a nízkokapacitní aplikace, kde je bezpečnost klíčovým parametrem [21].

Typické konstrukční prvky metalhydridových přepravních modulů

Reálné systémy pro skladování a transport vodíku v metalhydridové formě využívají opakující se konstrukční prvky inspirované výzkumnými a demonstračními zařízeními. Ačkoli v současnosti neexistuje jednotná norma specificky zaměřená na silniční přepravu metalhydridových zásobníků, technické zásady těchto systémů odpovídají požadavkům mezinárodní normy ISO 16111:2018, která vymezuje konstrukční a bezpečnostní kritéria pro přenosné zásobníky s vodíkem absorbovaným v reverzibilním hydridu [24].

Rámová konstrukce

Mechanická struktura zásobníku je obvykle tvořena ocelovým či hliníkovým rámem, do kterého jsou integrovány kazety s metalhydridovým materiálem. Návrh zahrnuje prvky řízení tepelného toku, jako jsou trubkové či deskové výměníky a rozvody teplotnosné kapaliny (voda/glykol), které mohou sloužit jak k ohřevu při desorpci, tak k chlazení při absorpci vodíku. Jedním z nejlépe zdokumentovaných výzkumných a demonstračních příkladů konstrukčního řešení je zásobník Savannah River Technology Center, jehož uspořádání je znázorněno na Obrázek 2.3. Tento zásobník využívá hliníkovou pěnu pro zlepšení tepelné vodivosti lože a koaxiální trubkový výměník typu U-tube integrovaný do středu kazety, který zajišťuje rovnoměrné rozložení teploty v celém objemu metalhydridového lože. Doplňkovou součástí je tepelná izolace obvodové stěny, která omezuje tepelné ztráty a stabilizuje teplotní pole během cyklování [25].



OBRÁZEK 2.3: SCHÉMA ZÁSObNÍKU SAVANNAH RIVER TECHNOLOGY CENTER S HLINÍKOVOU PĚNOU A KOAXIÁLNÍM U-TUBE VÝMĚNÍKEM TEPLA [25].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Rozvodný blok a bezpečnostní armatury

Centrální rozvodný blok zajišťuje řízený tok vodíku mezi zásobníkem a odběrovým systémem. Standardně zahrnuje přívodní a výstupní potrubí, uzavírací ventily, tlakové snímače a přetlakové pojistné prvky. Požadavky tohoto typu jsou v souladu s normou ISO 16111 a rovněž jsou reflektovány v analýzách konstrukce bezpečných metalhydridových zásobníků zaměřených na mechanické napětí a provozní bezpečnost [26].

Tepelná izolace a ochranné pláště

Zásobníky jsou zpravidla vyráběny z nerezové oceli a doplněny tepelně izolačními vrstvami, které omezují tepelné ztráty a chrání metalhydrid před teplotními výkyvy okolí. Experimentální studie prokázaly, že vhodně navržená izolace přispívá ke stabilizaci teplotního profilu při absorpci a desorpci vodíku a zlepšuje dynamiku systému [27].

Řídicí a monitorovací systém

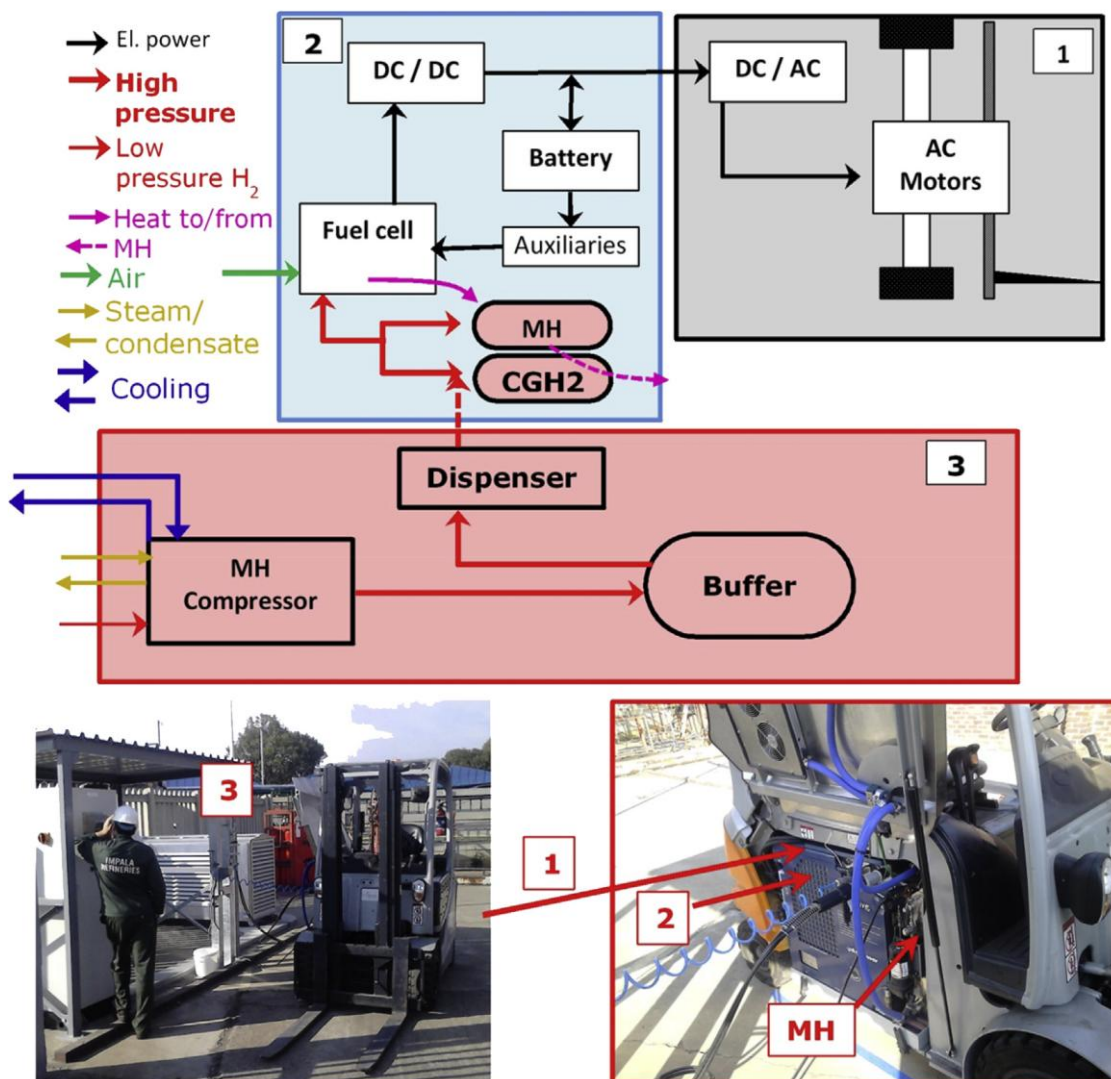
Moderní metalhydridové zásobníky využívají automatizované řídicí jednotky (PLC či mikrořadiče), které průběžně sledují tlak, teplotu a průtok vodíku a zajišťují bezpečný provoz během cyklování. Tyto strategie byly ověřeny například v evropském projektu HYDRIDE4MOBILITY zaměřeném na aplikaci kovových hydridů v užitkových vozidlech a mobilních plnicích jednotkách [28].

Současné aplikační možnosti a limity metalhydridových kontejnerů

Metalhydridové kontejnery určené pro dopravu vodíku se v současnosti uplatňují převážně v pilotních a demonstračních projektech, kde probíhá ověřování jejich technické proveditelnosti a provozní bezpečnosti [28]. Ačkoli lze metalhydridové zásobníky přepravovat pomocí stávající silniční a logistické infrastruktury (v souladu s ADR), specializovaná infrastruktura určená přímo pro rozsáhlou silniční přepravu metalhydridů – zejména standardizované kontejnery, plnicí stanice a manipulační systémy – se stále nachází ve fázi postupného rozvoje.

Obrázek 2.4 znázorňuje systémovou konfiguraci metalhydridového zásobníku v kombinaci s vysokotlakým zásobníkem vodíku (CGH₂) využívaným v pilotních demonstračních aplikacích. Horní schéma ukazuje propojení metalhydridového modulu, CGH₂ zásobníku, kompresoru a distribuční části. Dolní fotografie zachycují reálný prototyp metalhydridového zásobníku (cca 250 kg, využitelné množství H₂ 1,83 kg) integrovaného do vysokozdvížného vozíku a plnicí jednotku používanou pro jeho provoz. Systém reprezentuje aktuální podobu přemístitelných metalhydridových jednotek vhodných pro demonstrační provoz a lokální logistiku vodíku [22].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku



OBRÁZEK 2.4: PŘÍKLAD MODULÁRNÍHO METALHYDRIDOVÉHO ZÁSOBNÍKU A DEMONSTRAČNÍ PLNICÍ STANICE NA VODÍK [23].

Rozsáhlá komerční implementace zatím neprobíhá, a to zejména z důvodu vyšší hmotnosti, nákladů a omezené rychlosti desorpce, které limitují jejich využitelnost v aplikacích s vysokými nároky na dynamiku dodávky vodíku.

Aktuální výzkum tak směřuje ke kombinovaným (hybridním) systémům, které propojují výhody metalhydridových zásobníků s vysokotlakými nádobami. Tato koncepce umožňuje snížit konstrukční nároky, zlepšit flexibilitu systému a optimalizovat celkovou výkonovou charakteristiku zásobníku [22], [29].

2.2.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava vodíku pomocí metalhydridů přináší významné bezpečnostní výhody oproti přepravě stlačeného nebo kapalného vodíku, především díky nižším provozním tlakům a pevné formě

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

skladování. Přesto je třeba dodržet specifická bezpečnostní opatření během manipulace, přepravy i při havarijních situacích [3].

Při nakládání i vykládce je nezbytné zajistit, aby byl dopravní prostředek pevně zajištěn proti pohybu (ruční brzda, klíny pod koly) a všechny příruby, ventily a poklopy byly před manipulací řádně uzavřeny a utěsněny. Doporučuje se provádět tyto operace v suchém, dobře větraném prostoru nebo v inertní atmosféře (dusík/argon), aby se minimalizovalo riziko styku metalhydridu s vlhkostí a vzdušnou parou [30], [31].

V případě úniku vodíku je třeba okamžitě evakuovat oblasti v okruhu minimálně 25 m. V souvislosti s metalhydridovými zásobníky znamená únik vodíku především pomalé uvolňování plynu z hydridového lože nebo těsnění, typicky při poškození kazety či přehřátí. Nejde o náhlý masivní výron jako u vysokotlakých zásobníků, avšak i malé množství vodíku může v uzavřeném prostoru dosáhnout nebezpečné koncentrace, a proto je nutné uplatnit standardní havarijní postupy. Je třeba zajistit nucené odvětrávání a izolovat únik instalací dvojitého pláště potrubí či uzavíratelných zón. Prostor musí být monitorován detektory H_2 , které spustí alarm při překročení bezpečných koncentrací, a připraven by měl být nouzový postup pro uzavření postižené části systému a její bezpečné odvětrání, aby došlo k rychlému snížení koncentrace vodíku pod mez výbušnosti [32], [33].

Při požáru metalhydridů je zásadní nepoužívat vodu, pěnu ani CO_2 , protože voda by vyvolala další uvolňování vodíku a mohlo by dojít k výbuchu, a CO_2 není účinné proti hořícím kovům. Místo toho je třeba použít hasiva třídy D – suché prášky speciálně určené pro kovové požáry (např. grafitové nebo chloridové prášky), či inertní materiály jako suchý písek k udušení plamene a omezení přístupu kyslíku [31].

Veškeré prostory používané pro manipulaci, přepravu a vykládku musí být vybaveny viditelnými bezpečnostními značkami („Only Dry Powder Agent Fire Extinguisher“, zákaz vody) a personál musí být pravidelně školen v postupech první pomoci, evakuace a použití hasicích prostředků třídy D. Dokumentace musí obsahovat přesné pokyny pro nouzové situace včetně telefonních kontaktů na záchranné složky a postupy pro izolaci úniku vody či plynu [31].

2.2.5 Legislativní omezení

Z hlediska přepravy samotných metalhydridů je nutné dodržet přiřazení UN čísel k jednotlivým jmenovitě uvedeným metalhydridům v souladu s ADR. Pokud se jedná o směsi hydridů, případně o materiály s proměnlivým nebo ne zcela známým složením, je nutné uvažovat využití hromadných položek (např. UN 1409 nebo UN 3182). V těchto případech musí být klasifikace podložena laboratorním stanovením příslušných nebezpečných vlastností podle Příručky zkoušek a kritérií (UN Manual of Tests and Criteria), aby mohla být provedena korektní klasifikace pro účely přepravy podle ADR [34], [35].

Jak je uvedeno výše, provedení klasifikace z hlediska ADR není možné bez podrobné znalosti chemického složení a relevantních nebezpečných vlastností přepravované látky nebo směsi. V případě metalhydridových materiálů se navíc v řadě případů jedná o látky a systémy, které jsou dosud ve fázi laboratorního výzkumu nebo pilotních studií, nikoliv o komerčně standardizované

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

produkty. Bez dostupných experimentálních dat nelze provést korektní zařazení do příslušné třídy nebezpečnosti ani přiřadit odpovídající UN číslo v souladu s ADR [34].

UN 3468 se vztahuje výhradně na vodík uložený v metalhydridovém zásobníku nebo systému, který je konstruován jako tlakové nebo funkční zařízení splňující příslušné technické požadavky. Toto UN číslo se nevztahuje na přepravu samotného hydridového materiálu ve formě prášku, granulátu nebo volné náplně. Použití UN 3468 je tedy možné pouze v případě, že je hydrid součástí uzavřeného a certifikovaného systému pro skladování vodíku [36].

Přeprava vodíku ve formě metalhydridů silniční dopravou podléhá přísným požadavkům Evropské dohody ADR (Accord européen relatif au transport international des marchandises dangereuses par route), která stanovuje klasifikaci, balicí režimy a podmínky přepravy nebezpečných věcí. Metalhydridy jsou podle ADR klasifikovány pod číslem UN 3468 – “Hydrogen in a metal hydride storage system”, zařazeným do třídy 2 (plyny), přičemž pro tuto položku není stanovena obalová skupina. Požadavky na obaly a zásobníky jsou v tomto případě stanoveny přímo příslušnými zvláštními ustanoveními ADR a technickými normami pro tlaková a skladovací zařízení [34].

Pro balení a konstrukci zařízení platí balicí pokyn P205, který se používá pro tlakové nádoby obsahující plyn fyzikálně nebo chemicky vázaný v pevném médiu [34], [37]. Norma dále odkazuje na zvláštní ustanovení SP 321 a SP 356, která upřesňují, že metalhydridové systémy musí být vždy součástí schváleného zařízení, jehož návrh a výroba byly posouzeny příslušným orgánem. Takové systémy se považují za “contained in equipment” nebo “packed with equipment” a jejich konstrukce, označení i testování se provádí podle mezinárodní normy ISO 16111:2018 – Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride. Tato norma definuje požadavky na tlakové komponenty, pojistné ventily, uzávěry a bezpečnostní prvky zařízení [38].

Na rozdíl od běžných tlakových nádob nebo svazků lahví (např. UN 1966, vodík hluboce zchlazený, kapalný) není pro UN 3468 povolena přeprava v cisternách, cisternových kontejnerech ani ve „bulk“ režimu [39]. To znamená, že přeprava velkých modulárních jednotek nebo svazků tlakových nádob je možná pouze v případě, že jsou tyto jednotky certifikovány jako „zařízení“ (equipment) splňující požadavky ADR a ISO 16111. Konstrukce musí zaručit, že vodík je bezpečně vázán v kovové matici a systém je hermeticky uzavřen.

Vozidlo, které přepravuje zařízení obsahující vodík v metalhydridové formě, musí být vybaveno oranžovými tabulkami s identifikačním číslem UN 3468, bezpečnostní dokumentací podle kapitoly 5.4 ADR a musí jej obsluhovat personál s platným osvědčením o školení ADR. Pokud se přepravují různé druhy nebezpečných látek, je nezbytné dodržet smíšené nakládací předpisy a přiložit aktuální bezpečnostní list (SDS) pro každý druh nákladu.

Dále je třeba zohlednit tunelová omezení podle části 1.9 ADR. Přeprava vodíku v metalhydridových systémech je klasifikována pod položkou UN 3468 s tunelovým kódem (D), což znamená zákaz průjezdu tunely kategorie D a E, a proto je využití vybraných tunelů při silniční přepravě omezené [34]. Délka tunelu není jediným určujícím parametrem; rozhodující je jeho konstrukce, ventilace a havarijný scénář, jak stanoví technická příloha ADR, část 8.6.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Zvláštní ustanovení SP 356 navíc vyžaduje, aby každé zařízení nebo systém s vodíkem v hydridové formě, který je určen k montáži do vozidel, železničních vozů, lodí či letadel, byl schválen příslušným orgánem země výroby nebo použití. Každá zásilka musí být doprovázena kopií osvědčení o schválení, záznamem o konstrukčním testu a příslušnou dokumentací potvrzující shodu s ISO 16111. Přepravní doklady musí obsahovat identifikaci zařízení, výrobce, provozní tlak a celkové množství uloženého vodíku [24], [40].

Z výše uvedeného vyplývá, že silniční přeprava metalhydridů (UN 3468) je v současné době omezena na schválené kontejnery nebo zařízení s integrovanými zásobníky, které splňují požadavky normy ISO 16111 a balicího pokynu P205. Přeprava volných metalhydridových materiálů nebo hromadných modulárních jednotek bez certifikace zařízení není v rámci ADR povolena.

Pro přepravu menších obalů určených zejména pro napájení palivových článků lze využít UN 3479 „FUEL CELL CARTRIDGES, containing hydrogen in metal hydride“, případně odpovídající varianty „contained in equipment“ nebo „packed with equipment“. Toto zařazení se typicky uplatňuje u komerčně vyráběných kazet nebo zásobníků malého objemu, které jsou určeny pro přímé použití v palivových článcích a splňují specifické konstrukční a bezpečnostní požadavky stanovené ADR [34].

V případě zpětné přepravy „prázdných“ obalů nebo zásobníků, které nebyly vyčištěny a dekontaminovány v souladu s ADR, se na tyto obaly vztahují obdobné povinnosti jako na obaly plné. Teprve po prokazatelném provedení vyčištění a odstranění nebezpečných zbytků lze uvažovat o uplatnění výjimek pro prázdné, nevyčištěné obaly podle příslušných ustanovení ADR [34].

2.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V podmínkách České republiky je silniční přeprava vodíku v metalhydridové formě zatím spíše experimentální. Pro skutečné nasazení metalhydridových transportních modulů by bylo nutné vybudovat specializovaná plnicí a temperační stanoviště – nejlépe v areálech existujících vodíkových plniček nebo u průmyslových zdrojů odpadního tepla (např. u tepláren nebo chemických provozů v Moravskoslezském či Ústeckém kraji) [13].

Hlavní výhodou metalhydridové přepravy je, že vodík je v pevné fázi chemicky vázán v kovové matici — za běžných provozních podmínek to znamená relativně vysokou bezpečnost a nižší riziko náhlého úniku plynu [26], [41]. Nicméně tato výhoda je podmíněná správnou konstrukcí a neporušenou těsností zásobníku: pokud by došlo k mechanickému poškození, vniknutí vlhkosti nebo kyslíku, může hydrid oxidovat a uvolnit vodík — což představuje riziko úniku, požáru (nebo exploze) [4], [42]. Certifikace těchto systémů se nevztahuje na vozidla samotná, ale na metalhydridové zásobníky, které musí splňovat požadavky mezinárodní normy ISO 16111:2018 – Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride [38]. Tato norma stanovuje zkoušky pevnosti, těsnosti a bezpečnostních prvků, které jsou odlišné od požadavků pro tlakové nádoby podle ISO 9809. Vozidla přepravující taková zařízení však nadále podléhají certifikaci podle Evropské dohody ADR [34], která určuje požadavky na konstrukci, označení a obsluhu dopravních prostředků přepravujících nebezpečné věci. Nevýhodou je potřeba dodatečné energetické infrastruktury pro ohřev kazet na 60–200 °C a relativně vyšší investiční

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

náklady na výrobu metalhydridových modulů, které se podle techno-ekonomických studií mohou projevit v mírně vyšších přepravních nákladech ve srovnání se stlačeným vodíkem [43].

Geograficky jsou pro takové řešení nejvhodnější oblasti s hustou sítí silnic, blízkostí průmyslových center a dostupností obnovitelných či nízkoemisních zdrojů tepla. Jako modelový region se v několika studiích jeví Moravskoslezský kraj, kde se kumuluje průmysl a tepelná energetika [43].

Na základě rozhodovacího procesu, který zohledňuje existující infrastrukturu, technologickou připravenost a ekonomické parametry, se doporučuje jako nejperspektivnější řešení vybudovat v ČR středně velké metalhydridové transportní moduly propojené s průmyslovými zdroji odpadního tepla. Tento přístup nabízí optimální kompromis mezi bezpečností, flexibilitou distribuce a náklady, a může sloužit jak regionálním dopravcům, tak strategickým rezervám vodíku pro energetické vyrovnávání [28], [44].

2.2.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost nakládky metalhydridových kontejnerů spočívá především v zajištění tepelné energie potřebné pro absorpci vodíku. U nejrozšířenějších intermetalických metalhydridů (např. LaNi_5 , TiFe) činí entalpie absorpce přibližně 25–30 kJ/mol H_2 , což odpovídá zhruba 3–4 kWh tepla na každý kilogram uloženého vodíku. U lehkých či komplexních metalhydridů jako MgH_2 se tato hodnota může zvýšit až k 60 kJ/mol (cca 8 kWh/kg H_2), v některých případech i více kvůli nutnosti překonat vyšší aktivační bariéry [40]. Tepelná energie je obvykle dodávána pomocí elektrického odporového nebo parního ohřevu integrovaného do přepravního kontejneru. Při nakládce a vykládce je nutné dodržovat zásady bezpečnosti v prostředí s možnou přítomností vodíku (Ex-zóna 2) [28].

Samotná silniční přeprava metalhydridových modulů nevyžaduje kontinuální energetický příkon k udržování tlaku či teploty, protože vodík je vázán v pevném stavu a nevyvíjí se tlak. Modelové výpočty pro modul s hmotností 25 t metalhydridu (≈ 500 kg vodíku) ukazují, že energetická spotřeba během přepravy je cca 0,8 kWh/kg H_2 na 100 km trasy, což odpovídá ztrátám tepla z vozidlového rámu a pomocným systémům regulace teploty [45]. Díky pasivní stabilitě metalhydridu jsou ztráty během transportu prakticky nulové [46].

Vykládka vodíku vyžaduje obdobný přísun tepelné energie jako jeho nakládka. U intermetalických hydridů se tedy pohybujeme opět kolem 3–4 kWh/kg H_2 , zatímco u MgH_2 a lehkých komplexních hydridů to může být až 8–10 kWh/kg H_2 . Energetická bilance cyklu (nakládka + vykládka) tak dosahuje zhruba 6–8 kWh/kg H_2 pro intermetalické systémy a 16–20 kWh/kg H_2 u náročnějších materiálů. Tyto hodnoty jsou vyšší než u stlačeného vodíku či kapalného vodíku, avšak pro sezónní a dlouhodobé uskladnění zůstávají metalhydridy konkurenční díky nulovým ztrátám během skladování a možnosti využití odpadního tepla [47].

2.2.8 Ekonomické aspekty

Celkové náklady silniční přepravy metalhydridů lze rozdělit na investiční a provozní složku. Investiční složka zahrnuje pořízení metalhydridových zásobníků, kontejnerových modulů a podpůrných

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

zařízení (senzorika, regulační systémy, ventilační a chladicí technika). Tyto komponenty musí splňovat přísné bezpečnostní standardy ADR, což zvyšuje počáteční kapitálové náklady [8], [48].

Provozní náklady zahrnují manipulační operace, dopravu a logistickou koordinaci. Při menších objemech nebo regionálním rozvozu mohou být jednotkové náklady vyšší než u rozvodu vodíku potrubní sítí nebo přepravy stlačeného plynu, avšak nároky na novou infrastrukturu jsou výrazně nižší, protože metalhydridové systémy využívají existující silniční síť a lze je napojit na stávající plnicí nebo průmyslové stanice po doplnění temperačního a bezpečnostního vybavení. Výhodou je využití existující silniční sítě a možnost škálování systému podle aktuálních potřeb odběratelů [11].

K nákladům je nutné připočítat i servisní a revizní činnosti, jako jsou pravidelné kontroly těsnosti, kontrola stavu metalhydridového materiálu a regenerace jeho sorpční kapacity po určitém počtu cyklů. Tyto procesy představují nezanedbatelný podíl na dlouhodobých provozních výdajích, avšak přispívají k prodloužení životnosti zásobníků a k bezpečnému provozu [10], [49].

Z hlediska ztrát přepravovaného vodíku jsou metalhydridy velmi efektivní. Vodík je pevně vázán v krystalové struktuře metalhydridu, což minimalizuje jeho ztráty i při delším skladování nebo přepravě [50].

K drobným ztrátám může docházet především v důsledku tepelných výkyvů, které způsobují částečnou desorpci, nebo při netěsnosti ventilových systémů během manipulace. Tyto ztráty jsou však zanedbatelné ve srovnání s jinými formami transportu vodíku a lze je omezit vhodným návrhem kontejnerů, správnou údržbou a kontinuálním monitorováním tlaku a teploty [51], [52].

Ekonomická vhodnost silniční přepravy metalhydridů by se proto nejlépe uplatnila v regionálním měřítku, kde jsou vzdálenosti krátké a přepravní frekvence vysoké. V takových případech se vyšší pořizovací náklady kompenzují nižšími provozními riziky, minimalizovanými ztrátami a vysokou bezpečností. Tato technologie je rovněž atraktivní pro pilotní a demonstrační projekty, kde jsou hlavními cíli spolehlivost a bezpečnost, nikoli maximální přepravní kapacita [13], [18].

Z dlouhodobého pohledu může širší využití hydridové logistiky přispět k decentralizaci vodíkové ekonomiky a ke snížení nákladů na distribuci v oblastech bez potrubní infrastruktury. Kombinace ekonomické stability, nízkých provozních ztrát a vysoké bezpečnostní úrovně činí silniční přepravu metalhydridů potenciálně životaschopnou alternativou za předpokladu snížení investičních nákladů na výrobu a skladování – například prostřednictvím sériové produkce zásobníků, použití levnějších intermetalických slitin nebo optimalizace procesů regenerace hydridového materiálu [28]. Takový přístup může být zvláště vhodný v národních i regionálních podmínkách, kde lze využít existující silniční síť a průmyslové zdroje tepla [16], [21].

2.2.9 Ekologické aspekty

Proces nakládky metalhydridů do přepravních kontejnerů je spojen především s technologickými operacemi plnění pod tlakem a s kontrolou technického stavu zásobníků. Přímé emise skleníkových plynů při těchto činnostech jsou minimální, protože k plnění dochází v uzavřených systémech bez úniku plynného vodíku do ovzduší. Emisní zátěž proto vzniká převážně nepřímo – v souvislosti se

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

spotřebou elektrické energie pro kompresory, čerpadla, manipulační techniku a chladicí systémy [53].

Pokud je tento proces napájen z obnovitelných zdrojů, je jeho uhlíková stopa zanedbatelná. V opačném případě závisí environmentální bilance na emisní intenzitě elektrické energie v daném regionu. V českém kontextu se očekává, že postupné zvyšování podílu OZE sníží nepřímé emise i v této fázi logistického řetězce [16].

Při samotné přepravě metalhydridů vznikají emise především z provozu dopravního prostředku. Tyto emise odpovídají typu motoru, energetické účinnosti vozidla a přepravní vzdálenosti. V současnosti je většina transportů realizována klasickými dieselovými vozidly, nicméně do budoucna se očekává postupné nahrazení spalovacích motorů vodíkovými nebo elektrickými pohony, což výrazně sníží uhlíkovou stopu této činnosti [18], [21].

Významnou ekologickou výhodou přepravy metalhydridů je absence ztrát vodíku odparem či únikem, které by při jiných formách skladování mohly představovat bezpečnostní i environmentální riziko. Na rozdíl od systémů s kapalným vodíkem nevznikají při běžném provozu žádné emise vodíku do ovzduší. Metalhydridové systémy proto vykazují velmi nízkou provozní ekologickou stopu; riziko úniku nebo kontaminace je relevantní pouze při havarijních situacích [31].

Proces vykládky vodíku z metalhydridových zásobníků má obdobný charakter jako fáze nakládky – probíhá v uzavřeném systému za kontrolované teploty a tlaku, přičemž k uvolnění vodíku dochází ohřevem hydridového materiálu. Při tomto procesu nevznikají přímé emise vodíku do okolí; energetická náročnost je dána zdrojem tepla pro desorpci. Pokud je ohřev zajištěn elektřinou z obnovitelných zdrojů (např. solární nebo odpadní teplo z průmyslu), lze celý proces považovat za téměř emisně neutrální. V případě napájení ze sítě však vzniká nepřímá uhlíková stopa odpovídající přibližně 3–4 kg CO₂ na kg H₂, což odpovídá emisím z výroby elektřiny s účinností 100 % [48].

V této fázi rovněž nedochází k tvorbě odpadních plynů ani kapalin. Metalhydridy vykazují dlouhou provozní životnost, obvykle v řádu 1 000–5 000 cyklů bez významné degradace, což snižuje potřebu obnovy materiálu a tím i celkovou environmentální zátěž systému [54].

Z environmentálního hlediska tak silniční přeprava metalhydridů představuje udržitelnou alternativu zejména pro regionální a distribuční aplikace, kde lze využít odpadní teplo nebo obnovitelné zdroje energie. Při napájení z konvenční sítě zůstává uhlíková stopa vyšší, avšak stále nižší než u přepravy stlačeného či kapalného vodíku, a to díky absenci úniků a vysoké energetické účinnosti skladování [31].

2.2.10 Normy, oborové předpisy

Přeprava metalhydridů podléhá přísným mezinárodním i národním normám. Níže jsou uvedeny ty nejrelevantnější.

ISO 16111:2018 – stanovuje požadavky na konstrukci, zkoušky a kvalitu přenosných i stacionárních kontejnerů s metalhydridy do objemu 150 l, včetně tlakových zkoušek a odolnosti proti korozi [53].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

ISO/TS 16111:2006 – upřesňuje laboratorní bezpečnostní postupy, testování netěsností a hodnocení životnosti hydridové náplně [54].

ADR – dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí, kde je vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu klasifikován pod **UN 3468** [12].

TDG (Transportation of Dangerous Goods) – metalhydridy používané pro skladování vodíku mohou být v závislosti na provedení a způsobu použití klasifikovány buď jako UN 3479 – Zásobníky do palivových článků/zásobníky do palivových článků obsažené v zařízení nebo balené se zařízením, obsahující vodík v hydridových kovech, což se vztahuje na malé hydridové kazety s omezeným vnitřním objemem (typicky do 0,120 l na jednotlivou kazetu) a s přísnými konstrukčními požadavky na prevenci úniku, nebo jako UN 3468 – Hydrogen in a metal hydride storage system v případě větších, samostatných skladovacích nebo kontejnerových systémů, které musí splňovat požadavky normy ISO 16111:2018 [34], [37], [38], [55].

Na evropské úrovni CEN/CENELEC připravují technickou zprávu **CEN/TR 17127**, jež bude sjednocovat požadavky na nakládání, skladování a přepravu všech forem vodíku, včetně metalhydridů, a doplňovat je o environmentální aspekty a hodnocení rizik. Tyto normy a předpisy společně zajišťují, že navrhované metalhydridové kontejnery i celé přepravní systémy splňují vysoké standardy bezpečnosti, spolehlivosti a interoperability napříč různými legislativními oblastmi [56], [57].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

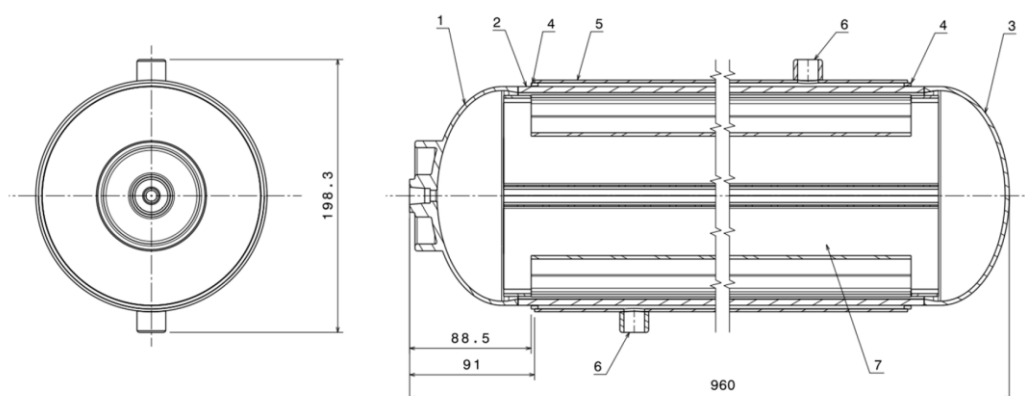
2.3 Drážní přeprava

2.3.1 Vhodnost přepravy

Stejně jako pro silniční přepravu, tak i pro drážní přepravu hydrogenovaných metalhydridů lze rozlišit čtyři úrovně vhodnosti v závislosti na rozsahu distribuce.

Na ostrovní úrovni železniční trasy obvykle nejsou k dispozici nebo vhodné pro převoz vodíku v metalhydridové formě. Především kvůli absenci tratí a omezeným objemům. Místní mikrosítě na malých ostrovech spíše využívají silniční dopravu, kde lze flexibilně dopravit menší kazety bez nutnosti vybudování železniční infrastruktury [28].

Předmětem železniční přepravy metalhydridových systémů nejsou samotné hydridové materiály, ale uzavřené metalhydridové zásobníky s integrovaným tepelným managementem, které lze kontejnerizovat a přepravovat v rámci intermodálních logistických řetězců (viz Obrázek 2.5, Obrázek 2.6).

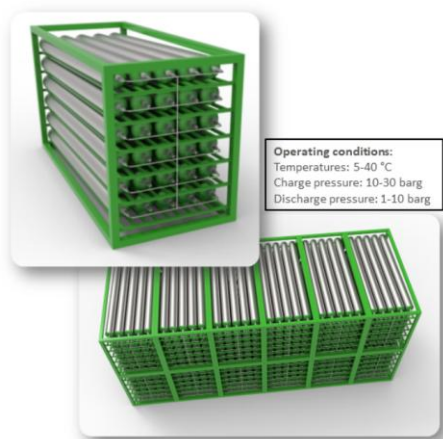


OBRÁZEK 2.5: KONSTRUKČNÍ ŘEZ NÍZKOTLAKOVÉHO METALHYDRIDOVÉHO ZÁSOBNÍKU S INTEGROVANÝM VÝMĚNÍKEM TEPLA, POUŽITÝ JAKO REPREZENTATIVNÍ PŘÍKLAD PŘEPRAVITELNÉHO METALHYDRIDOVÉHO SYSTÉMU [58].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Scalable H₂ Storage System/Metal Hydride

 HYSTORSYS



Depth (m):	1.7
Width (m):	0.7-4.2
Height (m):	0.9 – 1.8
Weight (ton):	2.3 – 27.6
H ₂ capacity (kg):	21 – 252
H ₂ capacity (kWh):	700 – 8400
Density:	approx. 50kg/m ³ *
(*equivalent to 1000bar in gas phase)	

OBRAZEK 2.6: PŘÍKLAD MODULÁRNÍHO METALHYDRIDOVÉHO ZÁSObNÍKU URČENÉHO PRO SKLADOVÁNÍ A PŘEPRAVU VODÍKU V PEVNÉ FÁZI [59].

Na národní úrovni mohou železniční přepravní systémy představovat vhodný způsob, jak propojit centrální výroby vodíku s regionálními distribučními uzly, zejména pro zásobování průmyslových oblastí nebo vodíkových čerpacích stanic. V odborné literatuře je železniční přeprava vodíku v metalhydridové formě zmiňována jako potenciální doplněk k silniční logistice, a to díky vyšší objemové hustotě energie, bezpečnosti a možnosti integrace do intermodálních kontejnerových systémů [46].

Pilotní koncepce, jako např. projekty HyRail a HyShunt, zkoumají možnost využití železničních vozů vybavených kontejnery s metalhydridovými zásobníky pro dopravu vodíku mezi výrobními a distribučními centry. Tyto aplikace jsou zatím v experimentální fázi a jejich realizace je limitována zejména hmotností a konstrukční kapacitou přepravních jednotek, nikoli bezpečností samotných metalhydridů [60].

Z materiálového hlediska dosáhly metalhydridové systémy vysoké úrovně technologické vyspělosti — zejména v oblasti skladovacích materiálů a tepelného řízení, kde jsou dnes dostupné stabilní a opakovaně použitelné intermetalické hydridy (např. TiFe, LaNi₅, MgH₂) [61]. Z hlediska dopravní a logistické integrace se však tato technologie nachází ve fázi výzkumu a demonstračních projektů, například v rámci Hydride4Mobility a dalších evropských iniciativ [28].

Komerční využití metalhydridových zásobníků je zatím omezeno na laboratorní a pilotní přepravu menších množství vodíku, zatímco velkokapacitní aplikace v silniční nebo železniční dopravě nejsou dosud realizovány [60]. V současnosti tak metalhydridová přeprava zůstává v experimentální fázi, s potenciálem využití v budoucích regionálních distribučních sítích a stacionárních úložištích vodíku [46].

Využití železnice na národní úrovni umožňuje přesun velkých objemů vodíku mezi strategickými centry a dlouhodobými zásobními místy (např. průmyslové uzly či podzemní sklady). Díky modulární

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

kontejnerizaci lze na standardní železniční plošinové vozy umístit metalhydridové jednotky s kapacitou až desítek tun H_2 na vlak, což snižuje počet jízd a zlepšuje ekonomiku dopravy. NREL uvádí, že železniční doprava metalhydridových zásobníků vykazuje při dlouhých trasách nižší celkové náklady než silniční varianta díky vyšší efektivitě vlaku [23], [62].

Na úrovni EU (mezinárodní úrovni) jsou metalhydridové kontejnery plně kompatibilní se standardy UIC a RID/ADR pro železniční přepravu nebezpečných věcí. Propojení hlavních evropských koridorů (např. Trans-European Transport Network, TEN-T) umožní přesun zeleného vodíku mezi členskými státy bez nutnosti budování nové infrastruktury. Díky pasivní bezpečnosti a nízkým ztrátám se metalhydridy jeví jako perspektivní řešení pro přepravu vodíku na stovky až tisíce kilometrů po železnici [63], [64].

2.3.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologickou úroveň připravenosti pro železniční přepravu vodíku v metalhydridové formě lze rozdělit do několika fází.

Na úrovni TRL 1–3 probíhá základní výzkum materiálů a konceptů kontejnerizace pro kolejové aplikace. Ověřují se základní chemicko-fyzikální vlastnosti vybraných metalhydridů, jejich stabilita při vibracích a nárazech typických pro provoz na železnici a laboratorní testy absorpce/desorpce ve zjednodušených modelech vagónu [65].

V TRL 4–6 dochází k pilotním zkouškám prototypových transportních kazet a modulů v relevantním prostředí. Výzkumníci budují menší testovací stanice na vlečných vozech, kde se hodnotí tepelná řízení při nakládce a vykládce, monitoruje se chování konstrukce během jízd po trati a testují se bezpečnostní ventily a pojistné systémy v reálných podmínkách. Tyto studie využívají stovky kilogramů metalhydridového materiálu, aby se ověřila škálovatelnost řešení a jeho integrace s mechanikou železničního vozidla [66].

Komerční nasazení metalhydridových systémů pro železnici (TRL 8–9) zatím dosaženo nebylo. Ačkoli existují pokročilé prototypy – například demonstrační mini-vlaky pro 4–6 cestujících a důlní lokomotiva s MH zásobníky – dostupná literatura neuvádí žádné plné ani dlouhodobé nasazení v běžném železničním provozu [23], [46]. Rozsáhlejší využití metalhydridů v železniční logistice zatím nenastalo a probíhající projekty se soustředí převážně na validaci konstrukčních konceptů, vibrační stabilitu a teplotní řízení během přepravy.

Technologie je připravena k pilotním implementacím v logistických koridorech a mezi terminály, nicméně konečné schválení a zahájení sériového provozu metalhydridových vlakových souprav se očekává až po dokončení standardizace kontejnerových modulů, homologace podle RID/ADR a ekonomickém ověření řešení ve větším měřítku.

Na základě dostupných dat lze současnou technologickou připravenost železniční přepravy vodíku v metalhydridové formě zařadit přibližně do rozmezí TRL 4–6, tedy mezi ověřené experimentální prototypy a pilotní demonstrace v relevantním prostředí, avšak bez trvalého komerčního provozu.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.3.3 Popis druhu přepravy

Železniční přeprava metalhydridů představuje perspektivní způsob transportu vodíku ve formě pevných nosičů, vhodný pro střední až dlouhé vzdálenosti a větší objemy přepravovaného média. Oproti silniční dopravě umožňuje efektivnější využití kapacity přepravních jednotek, nižší energetické náklady na jednotku přepravovaného vodíku a menší ekologickou stopu. V současné době se nachází v demonstrační a poloprovozní fázi vývoje, avšak její základní technické principy a infrastruktura jsou již definovány [10], [17].

Existují dvě hlavní varianty železniční přepravy metalhydridových zásobníků. První z nich je modulární kontejnerová přeprava, kdy jsou metalhydridové zásobníky umístěny v standardizovaných kontejnerech (např. ISO 20' nebo 40'), které lze snadno překládat mezi železniční a silniční dopravu. Tento koncept umožňuje tzv. intermodální logistiku, kdy tentýž kontejner může být přepravován vlakem, lodí nebo kamionem bez nutnosti překládky obsahu. Takový přístup výrazně zjednodušuje manipulaci a zvyšuje bezpečnost přepravy [11], [15].

Druhou variantou je specializovaná železniční cisterna pro pevné nebo kombinované formy vodíku. Tyto vozy jsou navrženy pro přepravu většího množství hydridového materiálu a mohou být vybaveny aktivním chladicím systémem a teplotní regulací, která zabraňuje samovolné desorpci vodíku. Používají se především v průmyslových aplikacích, kde je nutné dopravovat vodík ve větších objemech mezi výrobními závody a distribučními centry [49].

Přeprava metalhydridů po železnici podléhá podobným bezpečnostním požadavkům jako silniční přeprava podle dohody ADR, avšak v železniční dopravě jsou tyto podmínky specifikovány v systému RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí. Ten stanovuje podmínky pro konstrukci vozů, zabezpečení nákladu, kontrolu těsnosti a provozní teploty během přepravy. Zásobníky musí být odolné proti vibracím, nárazům a kolísání teploty, přičemž je požadována i pasivní nebo aktivní ochrana proti přehřátí [67].

Železniční infrastruktura navíc umožňuje nižší frekvenci nakládek a vykládek při zachování velkých objemů přepravy, což snižuje počet manipulačních operací a tím i riziko úniku nebo poškození materiálu. Přeprava je řízena prostřednictvím automatizovaných monitorovacích systémů sledujících tlak, teplotu a úroveň nasycení hydridového média v reálném čase [68].

Rozšířenost železniční přepravy metalhydridů je zatím velmi omezená. Probíhají však první pilotní projekty zaměřené na ověření technické a ekonomické proveditelnosti tohoto řešení, zejména v Německu, Rakousku a Švýcarsku, kde již existují logistické uzly pro vodíkovou dopravu a překládku. Evropské iniciativy jako Clean Hydrogen Partnership a Shift2Rail podporují výzkum v oblasti vodíkových logistických systémů včetně využití metalhydridových kontejnerů [69].

V České republice by bylo možné železniční přepravu metalhydridů integrovat do regionálních distribučních schémat – například mezi průmyslovými oblastmi s výrobou vodíku (např. Litvínov, Ostrava, Ústí nad Labem, Kralupy nad Vltavou) a odběrnými místy v rámci krajských energetických center. Výhodou je existující železniční infrastruktura, vysoká přepravní kapacita a kompatibilita s evropskou železniční sítí TEN-T [69].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.3.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnostní zajištění železniční přepravy metalhydridů představuje zásadní podmínku pro její provozní uplatnění. Tato opatření musí odpovídat požadavkům RID, které určují podmínky pro balení, značení, přepravní prostředky, nakládku, vykládku a nouzové postupy [67].

Proces nakládání metalhydridových kontejnerů na železniční vozy probíhá výhradně v certifikovaných terminálech určených pro manipulaci s nebezpečnými látkami. Nakládací prostory musí být vybaveny mechanickými zvedacími systémy s přesnou kontrolou stability, aby nedošlo k nárazu nebo deformaci kontejneru. Každý přepravní modul musí být vizuálně zkontrolován – zejména ventilační systémy, pojistné ventily a těsnost připojovacích armatur [67].

Během přepravy musí být kontejnery pevně zajištěny na plošinových vozech s protiskluzovou úpravou a odolnými upevňovacími prvky. RID vyžaduje, aby byly přepravní jednotky vybaveny teplotními senzory a přetlakovými ventily, které zajišťují automatické uvolnění vodíku při překročení mezní teploty a tím zabráňují explozi. Vozy musí být opatřeny označením nebezpečnosti, UN číslem látky a nouzovými pokyny pro zásahové složky [68].

Při vykládce se uplatňuje stejný režim jako při nakládce – kontroluje se teplota, tlak a neporušenost kontejneru. Vykládka se provádí pouze na vyhrazených kolejích s dostatečným větráním a protipožární ochranou. Obsluha musí používat osobní ochranné prostředky (antistatický oděv, ochranné rukavice, brýle, bezpečnostní obuv) a být proškolená podle kapitoly 1.3 RID (školení osob zapojených do přepravy nebezpečných věcí) [70].

Únik vodíku z metalhydridů při železniční přepravě může nastat v důsledku mechanického poškození kontejneru, přehřátí nebo selhání ventilačního systému. Prvním krokem při řešení úniku je okamžité zastavení vlaku a uzavření prostoru kolem poškozeného vozu. Následuje zajištění perimetru, uzemnění kolejové části a odpojení elektrických napájecích systémů, aby se zabránilo vznícení vodíku. Metalhydridy samy o sobě neuvolňují velké množství vodíku, avšak při zvýšení teploty může docházet k jeho desorpci [49], [71].

Při požáru železničního vozu s metalhydridovými zásobníky je hlavním rizikem přehřátí materiálu a prudká desorpce vodíku. Tato situace může vést k explozi nebo tlakovému uvolnění plynu. Proto se doporučuje okamžité zastavení přepravy, evakuace okolí a zahájení chlazení z bezpečné vzdálenosti. Zásahová strategie spočívá v pasivním ochlazování kontejnerů vodní mlhou (nikoli proudem vody) za současného monitorování teploty. Pokud se oheň rozšíří na okolní vagóny, musí být izolovány a ochlazovány, aby se zabránilo sekundárnímu šíření. Veškeré zásahy musí probíhat v koordinaci s dispečinkem železniční sítě a s ohledem na elektrické zabezpečení tratě [4].

Vhodná hasiva:

- suché práškové hasicí prostředky (třída D), které nevedou elektrický proud a nereagují s metalhydridem,
- inertní plyny (argon, dusík) pro vytvoření ochranné atmosféry kolem kontejneru,
- vodní mlha s nízkým průtokem k ochlazování kovových plášťů kontejnerů (nikoli přímé hašení metalhydridu) [17], [72].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Nevhodná hasiva:

- voda ve formě proudu (může reagovat s metalhydridem a generovat vodík),
- pěnové a halonové prostředky (nízká účinnost, riziko chemické reakce),
- CO₂ ve větších objemech (nevhodný při vysoké teplotě – riziko rozšíření požáru) [17], [72].

2.3.5 Legislativní omezení

Legislativní rámec železniční přepravy metalhydridů je určován především systémem RID. Tento předpis definuje podmínky bezpečné přepravy nebezpečných látek po železnici, včetně technických požadavků na balení, konstrukci přepravních prostředků, značení, dokumentaci a provozní režimy. Jeho dodržování je povinné pro všechny dopravce a provozovatele, kteří přepravují látky klasifikované jako nebezpečné, mezi něž vodík v zásobníkovém systému metalhydridu spadá [33].

Metalhydridy nejsou v systému RID uvedeny jako samostatná skupina, protože jsou klasifikovány podle konkrétních chemických sloučenin (např. UN 1414, 1427, 1437, 2010, 2463). Pro účely přepravy vodíku se však nepoužívá klasifikace jednotlivých metalhydridů, nýbrž systémové označení UN 3468 – Vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu, které je určeno přímo pro metalhydridové zásobníky absorbující vodík. V případě malých zásobníků určených k napájení zařízení, zejména palivových článků, se však uplatňuje klasifikace UN 3479 – Zásobníky do palivových článků, obsažené v zařízení nebo balené se zařízením, obsahující vodík v hydridech kovů, přičemž obě klasifikace se řídí standardní metodikou hodnocení nebezpečnosti podle RID [23], [46], [60], [73].

Další povinností vyplývající z RID je zajištění, aby každý kontejner nebo přepravní jednotka byly vyrobeny, homologovány a pravidelně revidovány. To zahrnuje zejména odolnost proti vibracím, kolísání teplot a mechanickému namáhání, které je v železničním provozu významnější než u silniční dopravy [67].

Je nutné respektovat také hmotnostní limity železničních vozů a maximální zatížení kolejové infrastruktury podle národních předpisů. Tyto limity jsou určeny traťovou třídou, technickým stavem tratě a kategorií železničního vozidla a mohou mít vliv na počet přepravních modulů, které lze v jednom vlaku bezpečně přepravit. Pro metalhydridy, které mají vyšší hustotu než jiné formy vodíku, je tento aspekt zvláště významný, protože zásobníky mají relativně vysokou hmotnost [74].

RID je v České republice implementováno prostřednictvím směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/68/ES, která upravuje vnitrostátní i přeshraniční přepravu nebezpečných věcí. Národní úprava doplňuje požadavky RID o specifické povinnosti dopravců, správců infrastruktury a provozovatelů terminálů, zejména v oblasti bezpečnostních zón, provozních pravidel na vlečkách a přístupu k dopravním bodům. Všechny přepravní jednotky musí být zároveň registrovány a schváleny podle českých drážních technických standardů, aby byla zaručena jejich kompatibilita s tuzemskou železniční sítí [75].

2.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Aplikovatelnost železniční přepravy metalhydridových zásobníků v České republice vychází z existující rozsáhlé železniční infrastruktury, která je schopna přepravovat těžké a objemné náklady, mezi něž metalhydridové moduly patří. Železniční dopravní systém ČR se vyznačuje vysokou

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

nosností, stabilitou a integrací do evropských logistických koridorů, což činí přepravu metalhydridových zásobníků vhodnou pro výrobu, distribuci a regionální zásobování vodíkem. Tato forma logistiky umožňuje přesun většího počtu modulů najednou, a tím může podporovat bezpečné a efektivní zásobování průmyslu, vodíkových center a energetických zařízení [69], [75].

Česká republika disponuje širokou sítí železničních tratí, překladišť a terminálů, které jsou již nyní schopny manipulovat s těžkými kontejnery určenými pro nebezpečné látky podle RID. Tato infrastruktura zahrnuje i modernizované terminály na evropských koridorech TEN-T, které jsou připravené pro intermodální provoz. Z hlediska kompetencí existují v ČR výzkumné a průmyslové subjekty (např. ÚJV Řež), které mají zkušenosti s vodíkovými technologiemi, sorpčními materiály a bezpečností vodíkových systémů, a mohou tak podporovat zavádění metalhydridových zásobníků do železniční logistiky [67], [69].

Strategické dokumenty, zejména Vodíková strategie ČR, počítají s rozvojem vodíkových center, tzv. vodíkových údolí, především v Moravskoslezském, Ústeckém a Středočeském kraji. Tato centra mohou sloužit jako klíčové uzly pro nakládku, vykládku, servis a skladování metalhydridových zásobníků a propojit železniční logistiku s výrobou a spotřebou vodíku [69].

Kromě existující infrastruktury by bylo nutné doplnit železniční systém o specializované prvky zohledňující specifické vlastnosti metalhydridových zásobníků. Patří sem terminály vybavené měřicími a bezpečnostními systémy (monitoring teploty, tlaku, detekce H_2) a zařízení pro regeneraci metalhydridových modulů (test kapacity, kontrola integrity, revize) [76].

Dalším krokem je vytvoření standardizovaných intermodálních rozhraní umožňujících snadný přechod metalhydridových kontejnerů mezi železničními vagóny a silniční dopravou bez zásahu do obsahu. Zavedení jednotných technických a procesních standardů by výrazně zvýšilo bezpečnost, efektivitu i interoperabilitu v rámci evropských logistických řetězců [72], [75].

Významnou výhodou je možnost přepravovat velké množství metalhydridových zásobníků najednou, což je výhodné při regionálním a meziregionálním zásobování vodíkem. Metalhydridy mají stabilní formu, což zvyšuje bezpečnost přepravy a minimalizuje riziko rozsáhlého úniku při mimořádných událostech. Železnice navíc nabízí nízkou energetickou náročnost na jednotku přepraveného nákladu a vysokou provozní predikovatelnost [66], [68].

Za nevýhodu lze považovat nižší technologickou zralost metalhydridových kontejnerů určených pro železniční přepravu, jelikož v současnosti neexistují sériově vyráběné a standardizované jednotky určené pro tento typ transportu. To snižuje možnosti okamžité komercializace a vyžaduje další vývoj. Železnice jako přepravní metoda je nejvýhodnější pro střední až velké vzdálenosti. Pro krátké lokální přesuny zůstává efektivnější silniční doprava [66].

Česká republika díky své husté železniční síti, průmyslové tradici a geografické poloze představuje vhodné prostředí pro implementaci železniční přepravy metalhydridových zásobníků. Průmyslové regiony s vysokou spotřebou energie mohou využít metalhydridy jako bezpečný, stabilní a logisticky efektivní nosič vodíku. Železnice v tomto kontextu umožní propojení výrobců, skladovacích míst a odběratelů v rámci intermodálního distribučního systému [77].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Na základě současných znalostí lze železniční přepravu metalhydridových zásobníků doporučit jako vhodné řešení pro meziregionální i nadregionální (evropskou) logistiku mezi vodíkovými uzly, průmyslovými podniky a energetickými sektory. Méně vhodná je pro lokální krátké přepravy nebo aplikace vyžadující minimální hmotnost.

2.3.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost železniční přepravy metalhydridových zásobníků zahrnuje tři hlavní fáze: nakládku, samotnou přepravu a vykládku. Každá z těchto fází má svůj specifický energetický profil, který souvisí s hmotností metalhydridových modulů, charakterem železniční infrastruktury a použitou manipulační technikou.

Před samotnou nakládkou na železniční vůz probíhá plnění metalhydridových modulů vodíkem, které má z hlediska energetické bilance stejnou logiku jako plnění v silniční přepravě – výsledný množství obsah vodíku je dán kapacitou konkrétního hydridového materiálu a typicky u demonstračních modulů činí přibližně 1,8–2,0 kg H₂ na jeden 250 kg zásobník [22], [23]. Toto plnění probíhá na specializovaném stanovišti s řízením teploty a tlaku, nikoli během nakládky samotného kontejneru na železniční vůz.

Nakládka metalhydridových zásobníků do železničních vozů následně vyžaduje použití těžké manipulační techniky, typicky mostových jeřábů, portálových jeřábů nebo vysokozdvizných vozíků s vysokou nosností. Energetická náročnost této fáze je ovlivněna zejména hmotností kontejnerů, jednak potřebou zajištění stabilních podmínek manipulace podle požadavků RID (např. opatrná manipulace, plynulé zdvihy, přesná stabilizace nákladu). Přímá energetická spotřeba je závislá na typu manipulační techniky, jejím výkonu a délce nakládací operace. Další energetické požadavky mohou souviset s provozem bezpečnostních prvků, jako je monitorování teploty nebo ventilace prostoru během manipulace. Tyto systémy jsou však energeticky nenáročné ve srovnání s jeřábovou technikou samotnou [17], [64], [78].

Železniční přeprava je ve srovnání se silniční logistikou výrazně energeticky efektivnější na jednotku přepravované hmotnosti. Přeprava těžkých metalhydridových zásobníků je vhodná právě díky vysoké účinnosti železničních souprav, optimálnímu valivému odporu a možnosti převézt velké množství zásobníků najednou. Energetická náročnost této fáze závisí na typu trakce – elektrická trakce představuje výrazně vyšší energetickou účinnost než dieselová a zároveň umožňuje využívat bezemisní energii v případě obnovitelných zdrojů. Metalhydridové kontejnery nevyžadují během přepravy aktivní chlazení nebo ohřev, pokud je jejich konstrukce správně navržena. Pasivní tepelná stabilita snižuje spotřebu energie tím, že nevyžaduje napájení chladicích nebo regulačních systémů, které jsou běžné u jiných forem přepravy vodíku (např. kryogenní kapalný vodík). Většina energetické spotřeby tak přímo souvisí pouze s pohonem vlaku [64], [68].

Pro představu lze uvést orientační hodnotu spotřeby elektrické nákladní lokomotivy na hlavních evropských tratích, která se po zohlednění rekuperace pohybuje přibližně kolem 15–20 kWh na vlakový kilometr, tedy zhruba 1 500–2 000 kWh na 100 km [79], [80]. Pokud vlak přepravuje přibližně 30 vagónů s celkovým množstvím okolo 30 tun vodíku, odpovídá energetická náročnost samotného železničního pohonu přibližně 0,05–0,07 kWh na kilogram přepravovaného vodíku na 100 km. Tato

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

hodnota ilustruje výrazně vysokou energetickou efektivitu železniční přepravy ve srovnání se silniční logistikou.

Vykládka metalhydridových zásobníků probíhá obdobně jako jejich nakládka, opět za použití jeřábů nebo manipulačních vozíků. Energetická náročnost je obdobná – je určena hmotností zásobníků, výkonem manipulační techniky a délkou operace. Vykládka metalhydridových zásobníků je čistě mechanická operace srovnatelná s manipulací jiných těžkých kontejnerů a nevyžaduje žádné speciální tepelné nebo tlakové procesy. Energetické vstupy mohou být spojeny s provozem diagnostických systémů při vykládce (kontrola teploty kontejneru, monitorování integrity zásobníku), avšak ty představují marginální spotřebu. Celkově lze říct, že energetická náročnost této fáze je nízká a limitována především mechanickou manipulací [68], [78].

2.3.8 Ekonomické aspekty

Ekonomické posouzení železniční přepravy metalhydridových zásobníků zahrnuje především náklady na přepravu a provozní ztráty během manipulace a transportu. Metalhydridy se vyznačují vysokou stabilitou a minimálními ztrátami vodíku, avšak jejich vyšší hmotnost a technické požadavky zásadně ovlivňují ekonomickou stránku železniční logistiky.

Náklady na železniční přepravu metalhydridových zásobníků se skládají z investičních a provozních složek. Investiční část zahrnuje pořizovací cenu samotných metalhydridových kontejnerů, které jsou technologicky složitější než běžné tlakové nádoby. Tyto kontejnery musí splňovat náročné konstrukční požadavky RID, včetně mechanické odolnosti, teplotní stability a bezpečnostních prvků, což se promítá do vyšších pořizovacích nákladů. Provozní náklady odpovídají především železničnímu tarifu, poplatkům za dopravní cestu a nákladům na manipulaci v terminálech. Díky vysoké nosnosti železničních vozů je však možné přepravovat velké množství zásobníků současně, což zlepšuje ekonomiku nákladní přepravy na delší vzdálenosti. Železnice navíc vykazuje nižší náklady na energii na jednotku hmotnosti v porovnání se silniční dopravou, zejména pokud je využita elektrická trakce [63], [67], [68].

Metalhydridové zásobníky mají ve srovnání s kapalným vodíkem zásadní výhodu v tom, že během skladování a přepravy prakticky nedochází k odparu ani úniku. Vodík je pevně vázán v krystalické matici metalhydridu, což znamená, že se neuvolňuje samovolně ani při dlouhodobém skladování, pokud nejsou překročeny teplotní limity. Tyto charakteristiky významně snižují finanční ztráty spojené s manipulací i transportem a v železniční dopravě, kde jsou přepravní časy delší, je tato vlastnost obzvláště výhodná. Potenciální ztráty vznikají především při nadměrném zahřátí zásobníku nebo v případě mechanického poškození při manipulaci. Úniky vodíku jsou u metalhydridových zásobníků za normálních podmínek minimální díky pevné chemické vazbě vodíku v hydridové matici. Pasivní bezpečnostní prvky, jako jsou přetlakové ventily či teplotní pojistky, slouží k ochraně zásobníku při abnormálních stavech – při aktivaci mohou umožnit kontrolované uvolnění vodíku, avšak neovlivňují běžné provozní ztráty. Z ekonomického hlediska jsou tedy ztráty vodíku při železniční přepravě metalhydridových zásobníků zanedbatelné a nemají zásadní vliv na provozní náklady [11], [49], [68].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.3.9 Ekologické aspekty

Ekologické aspekty železniční přepravy metalhydridových zásobníků jsou příznivé, zejména díky vysoké energetické účinnosti železnice a velmi nízkým ztrátám vodíku během přepravy. Celková environmentální bilance je ovlivněna třemi klíčovými oblastmi – emisní náročností nakládky, přepravy a vykládky [81].

Nakládka metalhydridových zásobníků probíhá obdobně jako u jiných těžkých kontejnerových jednotek a je realizována pomocí mostových či portálových jeřábů nebo vysokozdvížných vozíků. Energetická a emisní zátěž této operace je dána zejména mechanickou prací manipulační techniky. Metalhydridové moduly jsou již před nakládkou plněny vodíkem na specializovaném stanovišti, takže vlastní manipulace nevyžaduje žádné teplotní ani tlakové procesy [22], [82]. V moderních terminálech se navíc stále častěji používají elektrické manipulační stroje, což snižuje lokální emise produkované nakládkou [60]. Celková energetická náročnost nakládky je v porovnání s vlastní železniční přepravou zanedbatelná; detailní hodnoty spotřeby trakce jsou uvedeny v kapitole 2.3.7.

Železniční doprava patří mezi nejméně emisní formy přepravy těžkých nákladů po souši. Elektrifikované tratě umožňují využití elektrické trakce, která se vyznačuje nízkou emisní stopou, přičemž skutečná uhlíková náročnost závisí na aktuálním energetickém mixu v elektrizační soustavě. Pro orientaci lze uvést, že typická spotřeba elektrické nákladní lokomotivy na hlavních evropských tratích činí po odečtení rekuperace přibližně 15–20 kWh na vlakový kilometr, tedy okolo 1 700 kWh na 100 km [79], [80]. Při emisním faktoru elektrické energie 0,477 kg CO₂/kWh [83] odpovídá tato spotřeba zhruba 811 kg CO₂ na 100 km. Pokud vlak přepravuje přibližně 30 t vodíku, představuje to pouze 0,027 kg CO₂ na 1 kg přepravovaného H₂ na 100 km, což potvrzuje mimořádně nízkou uhlíkovou stopu železniční přepravy. I v případě dieselové trakce je železnice ekologičtější než silniční doprava díky nízkému valivému odporu, vysoké energetické účinnosti a možnosti přepravovat velké objemy nákladu v jediné soupravě [81], [84].

Vykládka metalhydridových zásobníků má obdobnou emisní charakteristiku jako jejich nakládka. Emise vznikají primárně provozem manipulační techniky, nikoliv vlastností přepravovaného média. Metalhydridové moduly jsou v této fázi již stabilní, neprobíhá v nich absorpce ani desorpce vodíku, a proto vykládka nevyžaduje žádné technické procesy, jako je odvětrávání, chlazení či práce s tlakovými systémy. Tím se eliminuje riziko sekundárních emisí nebo úniku vodíku do atmosféry.

Energetická náročnost vykládky je tedy dána téměř výhradně mechanickou prací manipulačních zařízení, obdobně jako při nakládce. Vykládací terminály, které jsou vybaveny elektrickými nebo hybridními manipulačními stroji, mohou dosahovat velmi nízké emisní náročnosti. Environmentální dopady lze dále minimalizovat využitím obnovitelné energie a efektivních logistických postupů [81].

2.3.10 Normy, oborové předpisy

Normy a oborové předpisy pro železniční přepravu vodíku v metalhydridové formě vycházejí z existujících standardů pro kontejnery i drážní dopravu nebezpečných látek a jsou harmonizovány s mezinárodními předpisy OSN. Mezi hlavní patří:

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

ISO 16111:2018 – stanovuje požadavky na konstrukci, tlakové zkoušky, materiály a kontrolu kvality přenosných a stacionárních metalhydridových kazet o objemu 150 l. Ačkoli norma není primárně zaměřena na železnici, její požadavky na bezpečné plnění, těsnění a odolnost proti korozi jsou plně aplikovatelné i pro drážní kontejnery [53].

ISO/TS 16111:2006 – upřesňuje laboratorní bezpečnostní postupy, testování netěsností a hodnocení životnosti hydridové náplně, které jsou relevantní zejména z hlediska dlouhodobé spolehlivosti metalhydridových zásobníků při opakované železniční přepravě a manipulaci [54].

RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí, kde je vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu klasifikován pod **UN 3468 – Vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu**, přičemž tento režim je určen především pro větší, samostatné metalhydridové skladovací nebo kontejnerové systémy splňující požadavky na konstrukci, schválení a značení podle RID [12], [67], [85]. V případě malých metalhydridových zásobníků určených k napájení zařízení, zejména palivových článků, je v systému RID relevantní rovněž klasifikace UN 3479 – Zásobníky do palivových článků, obsažené v zařízení nebo balené se zařízením, obsahující vodík v hydridech kovů, která se vztahuje na kazetová řešení s omezeným vnitřním objemem [34].

TDG (Transportation of Dangerous Goods Regulations) – vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu spadají pod UN 3468 podléhají přísným limitům vnitřního objemu a konstrukčním požadavkům na prevenci úniku. U menších hydridových kazet určených pro palivové články je analogicky uplatňována klasifikace UN 3479, což umožňuje adaptaci železničních kazet i mimo evropský kontext [12], [55].

Na evropské úrovni připravuje **CEN/CENELEC CEN/TR 17127** technickou zprávu, která sjednotí požadavky na nakládku, skladování a přepravu vodíku včetně metalhydridů v železničních koridorech TEN-T, a doplní je o environmentální hodnocení a řízení rizik. Vzhledem k nízkým provozním emisím železniční dopravy má tento způsob přepravy metalhydridů významný potenciál z hlediska udržitelné logistiky vodíkových technologií. Tyto normy a předpisy společně zajišťují, že konstrukce železničních kontejnerů, způsoby balení i provozní postupy splňují vysoké standardy interoperability, bezpečnosti a udržitelnosti napříč mezinárodními i národními železničními sítěmi [56], [57].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.4 Lodní přeprava

2.4.1 Vhodnost přepravy

Lodní doprava představuje perspektivní možnost přepravy vodíku v metalhydridové formě především díky své vysoké kapacitě, nízké energetické náročnosti a kompatibilitě s kontejnerovými systémy (viz Obrázek 2.7). Jsou technicky velmi dobře slučitelné s lodní dopravou, která je charakteristická dlouhými přepravními časy a důrazem na bezpečnost a stabilitu nákladu [46].



OBRAZEK 2.7: PALUBNÍ ULOŽENÍ KONTEJNERŮ NA KONTEJNEROVÉ LODI [86].

Národní úroveň – na území České republiky se možnosti lodní přepravy metalhydridových zásobníků odvíjejí od využitelnosti vnitrozemských vodních cest (zejména Labe a Vltavy). Vnitrozemská plavidla mohou efektivně přepravovat těžké kontejnerové jednotky napojené na přístavy v Ústí nad Labem, Lovosicích nebo Děčíně, odkud je možné pokračovat do Německa a dále na evropskou vodní síť. Pro národní úroveň je lodní přeprava vhodná zejména pro přesun velkého množství hydridových zásobníků mezi výrobními podniky, centrálními sklady a exportními terminály. V rámci ČR jsou však možnosti limitovány sezónností splavnosti Labe a kapacitním profilem vodních cest, takže lodní přeprava na národní úrovni není vhodná [58].

Úroveň EU – na úrovni EU je lodní přeprava metalhydridových zásobníků potenciálně vhodná díky napojení na rozsáhlou síť vnitrozemských vodních cest (Rýn, Dunaj, kanálové systémy) a velkým kapacitám přístavních terminálů pro manipulaci s nebezpečným zbožím. EU dlouhodobě podporuje

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

přesun nákladu ze silnic na vodní dopravu v rámci politiky TEN-T, což zvyšuje ekonomickou i ekologickou atraktivitu lodní přepravy. Využitelnost lodní dopravy však v evropském kontextu významně limituje geografická dostupnost splavných tratí, což ji činí vhodnou spíše pro specifické koridory než pro plošné nasazení. Metalhydridové kontejnery jsou z hlediska bezpečnosti velmi kompatibilní s přepravou po řekách i moři, jelikož nevyžadují chlazení ani vysokotlaké systémy, což snižuje technické a bezpečnostní nároky přístavních terminálů. Lodní přeprava je zároveň schopna doručit velké objemy vodíku v pevné formě mezi evropskými vodíkovými huby, průmyslovými centry a přístavy napojenými na další logistické řetězce [58], [87].

Mezikontinentální úroveň – lodní přeprava je nejvhodnější variantou pro mezikontinentální transport metalhydridů, protože jako jediný dopravní mód umožňuje ekonomicky efektivní přesun velmi velkého objemu materiálu na tisíce kilometrů. Metalhydridové zásobníky mohou být standardizovány jako ISO kontejnery, což umožňuje snadné začlenění do globálních kontejnerových řetězců bez zvláštních přepravních úprav. Velké námořní přístavy (Rotterdam, Hamburk, Antverpy, Singapur, Busan) disponují kompletním vybavením pro manipulaci s kontejnerizovaným nebezpečným zbožím a představují vhodné uzly pro import/export hydridových zásobníků mezi kontinenty [88].

2.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Úroveň technologické připravenosti (TRL) lodní přepravy metalhydridových zásobníků je výsledkem kombinace dvou faktorů: technologické vyspělosti samotných metalhydridových systémů a připravenosti lodní infrastruktury na manipulaci s těžkými kontejnerizovanými nebezpečnými materiály. Lodní doprava je dlouhodobě založena na standardizovaných ISO kontejnerech, což umožňuje rychlou integraci i nových typů nákladů, mezi něž mohou patřit i metalhydridové zásobníky, pokud splňují požadavky přepravních předpisů [89].

Metalhydridové zásobníky určené pro průmyslové skladování a transport vodíku jsou již v pokročilé fázi vývoje, avšak jejich využití v globální logistice je stále ve fázi pilotních projektů. Z hlediska lodní přepravy odpovídá technologická připravenost metalhydridových kontejnerů přibližně úrovni TRL 5–6, což odráží skutečnost, že systémy jsou funkčně ověřené v relevantním prostředí, nicméně jejich certifikace a standardizované použití v mezinárodních přepravních režimech (IMO/IMDG, ADN) se teprve rozvíjí. Toto zařazení je podloženo existencí prototypových a demonstračních aplikací, avšak nikoli komerčně nasazených jednotek [58].

Metalhydridová technologie je obecně považována za střední až vyšší úroveň TRL ve stacionárním skladování, avšak její aplikace v lodní přepravě vyžaduje další kroky v oblasti certifikace, bezpečnostních zkoušek a standardizace přepravních rámců, zejména podle mezinárodních předpisů IMO/IMDG a ADN [72], [73], [74].

Lodní přeprava je z hlediska technologické připravenosti na vysoké úrovni, protože infrastruktura kontejnerových přístavů je vysoce standardizovaná a již nyní zpracovává široké spektrum nebezpečného zboží (chemikálie, zkapalněné plyny, tlakové nádoby, bateriové kontejnery).

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Metalhydridové zásobníky mohou být integrovány do standardních ISO kontejnerů nebo speciálních přepravních rámců, což usnadňuje jejich certifikaci a manipulaci [88], [89].

Z hlediska TRL je tedy lodní sektor připraven technologii přijmout okamžitě po dokončení nezbytné certifikace, protože kontejnerová logistika, zvedací zařízení, informační systémy a bezpečnostní protokoly jsou již plně kompatibilní s manipulací těžkých a nebezpečných nákladů.

2.4.3 Popis druhu přepravy

Lodní přeprava metalhydridových zásobníků představuje potenciálně vhodný způsob transportu velkých objemů vodíku na národní, evropské i mezikontinentální úrovni. Tento druh přepravy kombinuje vysokou kapacitu, nízkou energetickou náročnost a kompatibilitu se standardními kontejnerovými systémy, které tvoří základ globální námořní i vnitrozemské dopravy. Hydridové zásobníky lze přepravovat jako kontejnerizovaný náklad bez nutnosti zásadních úprav plavidel, což usnadňuje jejich začlenění do existujících logistických řetězců [68], [69].

Pro přepravu hydridových zásobníků lze využít tři základní typy plavidel:

Kontejnerové lodě – nejčastější varianta pro mezikontinentální i evropskou přepravu. Metalhydridové zásobníky lze umístit do ISO kontejnerů, což umožňuje efektivní manipulaci a intermodální provoz [70], [71].

Říční a kanálové lodě (vnitrozemská plavidla) – využívané zejména v Evropě (Rýn, Dunaj, Labe). Umožňují dopravu těžkých kontejnerů do vnitrozemských průmyslových center [68], [69].

Ro-ro a Lo-lo plavidla – vhodná pro přepravu kontejnerů umístěných na návěsech nebo v přepravních rámech s možností přímého naložení na palubu [71].

Každá varianta plavidla se liší v kapacitě, způsobu manipulace a dostupnosti. Metalhydridové zásobníky lze v lodní dopravě technicky využít, avšak jejich nasazení je v současnosti limitováno požadavky předpisů IMDG a ADN. Pro jednotky UN 3468 (vodík v kovovém hydridu) tyto předpisy stanovují povinnou přepravu výhradně na palubě, omezené možnosti stohování a požadavek na zajištění přirozeného větrání prostoru. Z tohoto důvodu nelze metalhydridy označit za obecně nejlépe přizpůsobitelný nosič vodíku pro lodní dopravu, ale spíše za řešení vhodné pro specifické logistické scénáře, zejména v rámci menších specializovaných přepravních toků [36], [58], [90], [91].

Podmínky přepravy metalhydridů jsou definovány mezinárodními bezpečnostními předpisy, zejména IMO/IMDG pro námořní přepravu a ADN pro vnitrozemské vodní cesty. Tyto předpisy zahrnují požadavky na:

- správné značení kontejnerů a klasifikaci nebezpečného zboží,
- mechanickou odolnost nádob, rámců a jejich kotvení,
- zajištění teplotní stability zásobníků,
- prevenci kontaktu s vodou a vlhkostí pouze u reaktivních hydridů jiných tříd (např. UN 1414, 1427); tato povinnost se nevztahuje na UN 3468,

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- zajištění přirozeného větrání prostoru, ve kterém jsou kontejnery umístěny (pro UN 3468 výhradně „on deck only“) [72], [73], [74].

Lodě určené pro přepravu kontejnerů využívají standardizované kontejnerové rámy, twist-locks a palubní zásobníkové plochy umožňující bezpečné kotvení kontejnerů. Metalhydridové zásobníky mohou být přepravovány:

- v běžných ISO kontejnerech,
- ve speciálních kontejnerech se zesílenými rámy a monitorovací technikou,
- v otevřených přepravních rámech, pokud je nutné zajistit odvod tepla nebo přístup pro monitoring [70].

Konstrukce kontejnerů musí splňovat normy ISO a zároveň být v souladu s IMDG. Lodní přeprava nevyžaduje speciálně upravená plavidla, protože většina moderních kontejnerových lodí je projektována pro přepravu nebezpečných látek v souladu s IMO požadavky [70], [71], [72].

Lodní přepravní infrastruktura patří mezi nejrozšířenější logistické systémy na světě. Kontejnerová doprava tvoří více než 80 % globálních přepravních objemů a velké přístavy (Rotterdam, Hamburk, Antverpy, Singapur) disponují kompletním vybavením pro manipulaci s nebezpečným nákladem, včetně zón pro IMO třídy, monitoringu teploty a specializovaných zásahových týmů [69], [72].

V Evropě je rozsáhlá síť vnitrozemských vodních cest (Dunaj, Rýn, Mosela, Labe), která umožňuje potenciálně efektivní přepravu metalhydridů mezi přístavy a vnitrozemskými průmyslovými centry. V podmínkách ČR je využitelnost omezena splavností Labe, nicméně existuje napojení na přístavy v Hamburku a Rotterdamu [68].

2.4.4 Bezpečnostní opatření

Metalhydridové zásobníky jsou při námořní přepravě klasifikovány jako UN 3468, třída 2.1 (hořlavý plyn). Umisťují se výhradně na palubu (stowage category D) a vztahuje se na ně EmS F-D, S-U, stejně jako na jiné formy baleného vodíku. Při nakládce je nezbytné používat manipulační zařízení umožňující jemné a přesné manévrování s kontejnery, jako jsou portálové nebo kontejnerové jeřáby. Kontejnery musí být zvedány plynule, bez nárazů a prudkých změn směru. Před nakládkou se provádí vizuální kontrola jejich fyzického stavu a integrity tlakových a ventilačních prvků. Součástí nakládací procedury je i měření teploty metalhydridových zásobníků, zejména pokud byly delší dobu vystaveny přímému slunečnímu záření. Pracoviště musí být vybaveno senzorikou pro detekci vodíku a účinným větráním, aby se zabránilo hromadění možných stopových úniků. Všechny osoby podílející se na manipulaci musí být školeny pro práci s nebezpečným zbožím podle IMO a IMDG [30], [31], [36].

Během samotné přepravy je kladen důraz především na stabilní kotvení kontejnerů podle ISO norem a pravidel IMDG. Metalhydridové zásobníky klasifikované jako UN 3468 musí být podle IMDG Code umístěny výhradně na otevřené palubě, kde je zajištěno přirozené větrání a minimalizace rizika akumulace vodíku. Přeprava v podpalubí není dovolena [12], [92].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Kontejnery musí být chráněny před přehřátím, zejména při umístění na horní palubě vystavené slunečnímu záření. Pro přepravu se využívají standardní ISO kontejnery, případně otevřené nebo ventilované přepravní rámy, pokud je nutné zajistit odvod tepla nebo průběžné sledování teploty zásobníků [92]. Monitorování teploty může být prováděno ručně nebo pomocí integrovaných senzorů.

Námořní i vnitrozemská plavidla přepravující nebezpečné látky musí být podle IMO vybavena prostředky pro havarijný zásah, včetně inertizace, izolace postiženého nákladu a rychlého uvolnění paluby v případě incidentu [92], [93].

Vykládka se provádí obdobně jako nakládka, přičemž se opět kontroluje fyzický stav kontejneru a jeho teplota. Kontejnery se vykládají v kontrolovaném prostředí, kde jsou přítomna detekční zařízení a kde je zajištěno dostatečné větrání. Vykládka nesmí probíhat v blízkosti otevřených plamenů nebo jiných zdrojů zapálení. Přístavní terminály musí mít vypracované havarijní a únikové plány podle IMDG a ADN, včetně postupů pro rychlou izolaci prostoru v případě mimořádné události [30], [31], [36].

V případě úniku vodíku z metalhydridového zásobníku je nutné okamžitě zastavit veškerou manipulaci a vymezit bezpečnostní zónu. Aktivují se detektory plynů a prostor se intenzivně odvětrává. Pokud se jedná o únik způsobený přehřátím, je nezbytné zásobník ochladit, obvykle pomocí vodní mlhy nebo směrovaného proudu vzduchu. Přímý proud vody se nepoužívá, aby nedošlo k narušení konstrukce kontejneru nebo k prudkému tepelnému šoku. Vznik úniku musí být řešen odborně, přičemž zásah vykonává posádka proškolená podle IMO pravidel nebo specializovaná havarijní jednotka [32], [33], [36].

Pokud dojde k požáru, postupuje se podle nouzových pokynů uvedených v IMO EmS Guide (Schedules F-D a S-U), které se vztahují na látky klasifikované jako UN 3468. Prioritou je ochlazování kontejneru vodní mlhou, aby se zabránilo tepelnému uvolňování vodíku. Hašení probíhá jemným vodním sprejem nebo inertními plyny, které omezují šíření požáru bez rizika další reakce s vodíkem. Pěnová hasiva nejsou vhodná, protože jsou neúčinná pro vodíkové požáry a mohou snižovat možnost odvětrání. Během požáru nesmí být kontejner otevírán, protože manipulace by mohla zvýšit rychlost uvolňování vodíku nebo umožnit náhlý přístup kyslíku do prostoru s vysokým teplotním gradientem [94].

2.4.5 Legislativní omezení

Metalhydridy pro námořní i vnitrozemskou vodní dopravu podléhají speciálním přepravním předpisům podle ADN a IMDG.

Přeprava vodíku ve formě metalhydridů je omezena především vysokou hmotností zásobníků, nikoliv jejich energetickou hustotou. Metalhydridové nádrže mají velmi vysokou objemovou hustotu uloženého vodíku (často srovnatelnou nebo vyšší než tlakové zásobníky při 200 bar), avšak jejich nízká gravimetrická účinnost vede k vysoké hmotnosti celého kontejneru. To snižuje jeho užitečné zatížení a omezuje počet metalhydridových kontejnerů, které lze naložit na loď podle maximální

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

přípustné hmotnosti paluby (IMDG/ISO pravidla). Tato omezení jsou významná zejména u mezikontinentálních tras, kde je kapacita plavidla limitujícím faktorem [70], [71].

Některé metalhydridové materiály (např. LiH , MgH_2 nebo NaAlH_4) jsou samy o sobě klasifikovány ve třídách 4.2 nebo 4.3. Při přepravě v uzavřeném metalhydridovém zásobníku však celý systém podléhá jednotné klasifikaci UN 3468, třída 2.1, a vztahují se na něj odpovídající bezpečnostní požadavky.

Z toho důvodu se na tyto zásilky vztahují požadavky stanovené pro plyny třídy 2.1 podle IMDG Code, včetně konstrukčních požadavků na zásobníkové systémy a jejich umístění na palubě, nikoli přiřazení obalových skupin.

Při vnitrozemské vodní přepravě je třeba dodržet pravidla ADN, která rovněž stanovují požadavky na konstrukci a materiálové provedení zásobníkových systémů, včetně tlakových zkoušek, protipožárních opatření, hasicích systémů a povinného školení personálu [91], [95].

2.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V České republice dosud neexistuje žádná komerční infrastruktura pro lodní přepravu vodíku v metalhydridové formě. Vnitrozemská vodní doprava je však z hlediska legislativy i technických požadavků potenciálně využitelná, zejména na Labi a Vltavě, kde se nachází klíčový přístav Ústí nad Labem představující důležité železniční a říční logistické centrum [68], [71].

Podle Národního akčního plánu čisté mobility [96], [97] se v kontextu vodíkové infrastruktury řeší především silniční a železniční přeprava, avšak plán uvádí také možnost budoucího využití logistických uzlů v Ústeckém kraji pro dovoz nebo vývoz vodíku po Labi. Dokument však neobsahuje návrh na výstavbu vodíkových čerpacích nebo dobíjecích stanic určených přímo pro lodní dopravu, proto není vhodné spojovat infrastrukturu NAP s lodním provozem [96], [97].

Pro pilotní nasazení metalhydridových kontejnerů by byla nejvhodnější oblast Ústí nad Labem, která je jediným českým přístavem s přímým napojením na zahraniční vodní cestu (Labe – Hamburk) a disponuje skladovacími a manipulačními areály vhodnými pro integraci bunkeringových nebo manipulačních terminálů [68], [71].

Pro realizaci metalhydridového bunkeringu by bylo nutné vybudovat v Ústí nad Labem terminál s inertní atmosférou a tepelnými systémy pro řízení absorpce a desorpce, podobně jako u terminálů na kapalné či stlačené plyny. Tyto terminály by měly být umístěny v areálech říčního přístavu a v návaznosti na železniční a silniční logistické trasy, aby se minimalizovaly náklady na manipulaci a překládku [70], [71].

Hlavní výhody metalhydridové přepravy – pasivní bezpečnost, absence boil-off ztrát, možnost dlouhodobé stabilní přepravy bez aktivní ventilace či chlazení – jsou pro říční přepravu příznivé. Provozní omezení však vyplývají z:

- **vodoreaktivních vlastností některých hydridů** → nutnost manipulace pouze v inertním prostředí (MgH_2 , NaAlH_4),
- **technické hmotnosti zásobníků**, což ovlivňuje celkovou nosnost lodí na mělkých úsecích Labe,

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- **požadavků ADN**, které omezují manipulaci a skladování nebezpečných látek ve veřejných přístavech,
- nutnosti zajištění dohledového a monitorovacího systému pro kontrolu teploty při dlouhodobé plavbě [68], [76], [77].

Geograficky je ČR vnitrozemský stát, proto by metalhydridové kontejnery připlouvaly do ČR primárně zahraniční lodní dopravou přes přístavy Hamburk a Rotterdam, následně by pokračovaly po Labi do Ústí nad Labem. Přeprava by tak byla využitelná spíše pro:

- **export metalhydridů** do německých či nizozemských logistických a průmyslových center,
- **import vodíku vázaného v MH** v rámci přeshraničních demonstračních projektů.

Ekonomická proveditelnost je v současnosti limitována splavností Labe, která je sezónně omezená, a absencí národní strategie pro vodíkovou lodní přepravu.

2.4.7 Energetická náročnost

Celkovou energetickou bilanci ovlivňují tři hlavní fáze logistického cyklu – nakládka, samotná přeprava a vykládka – přičemž každá fáze má odlišné technické a provozní charakteristiky.

Nakládka metalhydridových zásobníků probíhá v přístavech pomocí kontejnerových jeřábů, portálových jeřábů nebo speciálních manipulačních rámců. Energetická náročnost nakládky souvisí výhradně s mechanickou manipulací kontejneru, zatímco procesy plnění, ohřevu či chlazení metalhydridových modulů probíhají mimo logistický proces a nejsou součástí nakládky. Přístavní jeřáby jsou obvykle elektrické, často napojené na energetické systémy umožňující rekuperaci při spouštění zátěže, což snižuje celkovou spotřebu energií. Nakládka metalhydridů nevyžaduje žádné klimatizační, tlakové ani stabilizační systémy. Energetická náročnost manipulace je tak soustředěna výhradně na mechanický pohon nakládací techniky a provoz pomocné sensoriky (detekce vodíku, osvětlení, větrání) [46], [47], [58].

Samotná lodní přeprava je z hlediska energetických nároků jednou z nejúspornějších forem dopravy. Na jednotku přepravované hmotnosti nebo objemu je spotřeba energie výrazně nižší než v silniční či železniční dopravě, a to díky hydrodynamickým a kapacitním výhodám velkých námořních plavidel i vnitrozemských lodí. Přeprava metalhydridových zásobníků nevyžaduje aktivní systém chlazení nebo cirkulace tepla, protože hydridy jsou stabilní v širokém teplotním rozsahu [88], [89], [98].

Vykládka má podobný charakter jako nakládka, tedy je energeticky náročná převážně v důsledku provozu kontejnerových jeřábů a manipulační techniky. Energetické požadavky na vykládku jsou ovlivněny rozsahem manipulace a hmotností zásobníků, nikoliv jejich chemickou povahou. Diagnostické systémy používané během vykládky (monitoring teploty, kontrola integrity) mají velmi nízkou energetickou spotřebu. Stejně jako při nakládce neexistují žádné energeticky náročné procesy spojené se stabilizací nebo odvětráváním zásobníků, což výrazně odlišuje metalhydridové zásobníky od jiných vodíkových forem využívaných v přepravě. Celkově tak vykládka představuje pouze malý podíl energetické bilance lodního transportu [47], [58].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.4.8 Ekonomické aspekty

Náklady na lodní přepravu metalhydridových zásobníků se skládají ze tří hlavních složek: nákladů na přístavní manipulaci, námořních či říčních tarifů a poplatků spojených s bezpečnostními standardy IMDG a ADN. Přístavní náklady vyplývají zejména z manipulace kontejnerovými jeřáby, zajištění bezpečnostních opatření a z provozu monitorovacích technologií. Tyto náklady jsou srovnatelné s běžnými manipulačními operacemi pro nebezpečné zboží a nejsou specificky navýšeny přítomností metalhydridů, jelikož ty nevyžadují speciální tlaková zařízení ani kryogenní infrastrukturu. Tarify lodní přepravy jsou výrazně nižší než tarify letecké nebo často i silniční dopravy ve vztahu k přepravované hmotnosti, zejména při transportu na dlouhé vzdálenosti. Vysoká nosnost lodí umožňuje přepravu velkého množství hydridových zásobníků najednou, což vede k významnému snížení jednotkových nákladů. Lodní doprava navíc profitovala v posledních letech ze zvyšující se efektivity plavidel a jejich postupné modernizace směrem k úspornějším a ekologičtějším pohonům [36], [89], [91], [95].

Dalším ekonomickým faktorem je možnost intermodální přepravy. Hydridové zásobníky mohou být snadno překládány mezi lodě, železniční vagóny a silniční návěsy bez dodatečných investic do speciálních nádob či manipulačních rámců, což výrazně snižuje náklady na celé logistické cykly [36].

Jednou z největších ekonomických výhod metalhydridových zásobníků je prakticky nulová míra ztrát během přepravy. Na rozdíl od kryogenního kapalného vodíku, kde dochází k přirozenému odpařování (boil-off), jsou metalhydridy pevné materiály, které udržují vodík vázaný v krystalické struktuře. Během přepravy proto nedochází k samovolnému uvolňování vodíku ani při delších časech transportu, což má zásadní pozitivní dopad na ekonomickou efektivitu. Potenciální ztráty mohou nastat pouze ve výjimečných situacích, jako je mechanické poškození zásobníku nebo jeho přehřátí. Tyto události jsou však díky robustní konstrukci hydridových kontejnerů a bezpečnostním opatřením podle IMDG extrémně vzácné. Provozní ztráty při lodní přepravě metalhydridů se tak pohybují na úrovni zanedbatelné, což odlišuje tuto formu přepravy od alternativních technologií vodíkových nosičů [36], [99].

2.4.9 Ekologické aspekty

Nakládka a vykládka metalhydridových zásobníků vodíku je energeticky náročná hlavně kvůli potřebě řízené tepelné výměny. Pro absorpci vodíku je nutné zásobníky chladit, zatímco při jeho desorpci je nutné je zahřívat. Optimalizace tepelného managementu pomocí integrovaných výměníků tepla (tzv. intenzifikátorů) dokáže výrazně snížit spotřebu energie během plnění i desorpci [58], [99].

Samotná lodní přeprava vodíku v metalhydridech je relativně ekologicky příznivá, protože vodík je během přepravy vázán v pevném skupenství, což eliminuje odpary a snižuje riziko úniků. Na rozdíl od kapalného či stlačeného vodíku zde nejsou potřeba složité systémy pro udržení vysokého tlaku nebo extrémně nízké teploty, což snižuje celkovou spotřebu energie během přepravy. Hmotnost hydridových zásobníků sama o sobě zpravidla nezvyšuje energetickou náročnost lodní přepravy, protože námořní i vnitrozemská plavidla jsou navržena pro maximální využití své nosnosti a spotřeba paliva je mnohem více ovlivněna odporem vody, rychlostí plavby a použitým lodním palivem než

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

variabilitou hmotnosti nákladu. Nicméně lodní doprava jako celek je environmentálně zatížena použitím těžkých topných olejů nebo lodní motorové nafty, které dominují emisní bilanci přepravy bez ohledu na druh přepravovaného nákladu [71], [80], [81].

2.4.10 Normy, oborové předpisy

Lodní přeprava metalhydridů představuje důležitý článek mezinárodní logistiky vodíkových technologií, zejména při dálkovém transportu zásobníkových systémů a zařízení mezi kontinenty nebo v rámci vnitrozemských vodních cest. Legislativní a normativní rámec této přepravy vychází z mezinárodně harmonizovaných předpisů pro nebezpečné věci a klade důraz na bezpečnost, prevenci úniků a řízení rizik v uzavřeném lodním prostředí.

ADN – Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách – ADN stanovuje pravidla pro přepravu nebezpečných látek po vnitrozemských vodních cestách, včetně klasifikace, balení a bezpečnostních opatření. Vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu je klasifikován pod **UN 3468, třída 2.1 (hořlavý plyn), bez obalové skupiny**, přičemž přeprava se řídí speciálními ustanoveními 321 a 356 a balicím pokynem P205 [100]. V případě malých metalhydridových zásobníků určených k napájení zařízení, zejména palivových článků, je relevantní rovněž klasifikace UN 3479 – Zásobníky do palivových článků, obsažené v zařízení nebo balené se zařízením, obsahující vodík v hydridech kovů, která se vztahuje na kazetová řešení s omezeným množstvím vodíku [34].

TDG (Transportation of Dangerous Goods Regulations) – Kanadské předpisy TDG upravují přepravu nebezpečných věcí všemi druhy dopravy a vycházejí z mezinárodních pravidel OSN a IMDG Code. **Tyto předpisy rozlišují přepravu metalhydridů podle jejich systémového uspořádání analogicky k UN 3468 a UN 3479**, a proto mohou sloužit jako referenční rámec při exportu metalhydridů mimo EU [101].

IMDG Code – International Maritime Dangerous Goods Code – IMDG Code je hlavní mezinárodní norma pro námořní přepravu nebezpečných věcí a je závazná podle úmluvy SOLAS. Vodík v zásobníkovém systému hydridu kovu je klasifikován pod **UN 3468, třída 2.1 (hořlavý plyn)**, bez obalové skupiny, se zvláštními ustanoveními **321 a 356** a balicím pokynem **P205** [92]. Pro malé hydridové kazety určené k napájení palivových článků IMDG Code rovněž umožňuje použití klasifikace UN 3479, a to včetně variant „contained in equipment“ a „packed with equipment“ [34].

SOLAS / FSS Code – Úmluva SOLAS stanovuje povinnost řídit se IMDG Code při přepravě nebezpečných látek po moři, zatímco FSS Code určuje požadavky na požární ochranu, detekci a ventilaci na lodích. Tyto předpisy se vztahují i na kontejnery s metalhydridy, přičemž zvláštní pozornost je věnována řízení rizika akumulace hořlavých plynů v uzavřených prostorech lodí [102].

EmS Guide (Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods) – EmS Guide obsahuje nouzové postupy při požárech a únicích pro látky podle IMDG Code; pro **UN 3468** platí pokyny **F-D a S-U** určující postup při hašení a úniku [94]. Tyto postupy jsou obdobně aplikovatelné i na zásilky klasifikované pod UN 3479, pokud obsahují vodík v hydridech kovů.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

MARPOL (Annex VI) – Předpis MARPOL se nezabývá samotnými nebezpečnými látkami, ale omezuje emise z lodních motorů; environmentální dopad přepravy metalhydridů tak závisí hlavně na typu použitého paliva [103]. V kombinaci s vysokou bezpečností metalhydridového skladování lze lodní přepravu považovat za environmentálně efektivní způsob dálkového transportu vodíku vázaného v pevné fázi.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.5 Potrubní přeprava

Potrubní přeprava vodíku ve formě metalhydridů není technicky možná, neboť se jedná o pevné materiály vyžadující speciální zásobníky.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.6 Terminály

Terminály určené pro manipulaci, skladování a přepravu metalhydridových zásobníků představují kritický prvek budoucí vodíkové logistiky, neboť umožňují bezpečné a efektivní napojení jednotlivých forem dopravy – silniční, železniční i lodní. V současné době však ve střední Evropě ani v České republice neexistují specializovaná zařízení určená výhradně pro manipulaci s metalhydridy. Důvodem je skutečnost, že jejich technologické využití ve velkém měřítku se teprve rozvíjí a komerční aplikace v oblasti dopravy vodíku zatím nepřekročily pilotní fázi. Přesto je možné identifikovat řadu průmyslových, logistických a chemických lokalit, které díky své infrastruktuře, bezpečnostním systémům a napojení na dopravní síť již dnes splňují podmínky pro budoucí integraci metalhydridových zásobníků [11], [104].

V českém prostředí lze za potenciálně vhodné terminály považovat především větší vnitrozemské logistické areály s intermodální funkcí. Jedná se například o terminály v Mělníku, Lovosicích či Děčíně, které mají nejen kapacitu pro manipulaci s těžkými kontejnery, ale také napojení na železniční i lodní dopravu. Díky tomu by mohly sloužit jako centrální distribuční uzly pro metalhydridové zásobníky importované či exportované po Labi nebo přepravované do vnitrozemí železnic. Tyto terminály již dnes manipulují s chemickým a nebezpečným nákladem, což znamená, že personál, zařízení a bezpečnostní protokoly jsou do značné míry kompatibilní s požadavky kladenými na metalhydridy [13], [75], [76].

Významnou roli mohou v budoucnu sehrát také velké průmyslové podniky, zejména petrochemický a chemický sektor. Areály jako ORLEN Unipetrol v Litvínově, Spolana v Neratovicích nebo Synthos v Kralupech disponují robustní technickou infrastrukturou, rozsáhlými skladovacími plochami a přísnými bezpečnostními systémy pro práci s toxickými, stlačenými nebo hořlavými látkami. Jelikož se zde běžně pracuje s vodíkem nebo příbuznými chemikáliemi, představují tyto chemické komplexy přirozená místa, kde by bylo možné integrovat terminály metalhydridových zásobníků. Jejich silnou stránkou je rovněž přímé napojení na vlečky a blízkost hlavních průmyslových koridorů, což je činí vhodnými pro roli centrálních uzlů budoucí vodíkové infrastruktury [105], [106], [107].

Pokud jde o evropský rámec, terminály schopné manipulovat s metalhydridovými zásobníky by se nacházely především v hlavních přístavech jako Rotterdam, Hamburk nebo Antverpy, které představují největší logistická centra pro chemický průmysl a manipulaci s nebezpečnými látkami na kontinentu. Tyto přístavy mají všechny nezbytné certifikace a technologie k tomu, aby dokázaly pracovat s novými druhy vodíkových nosičů včetně těch pevné formy. Pro evropský trh s vodíkem se proto dá očekávat, že právě zde vzniknou první specializované terminály pro metalhydridy, které budou propojeny se železničními a silničními sítěmi členských států [15], [16], [52], [57].

Ve střednědobé perspektivě lze předpokládat, že metalhydridové terminály vzniknou v souladu s evropskou vodíkovou strategií v regionech označených jako „vodíkové údolí“ – typicky severní Čechy, Ostravsko nebo Velká Paříž a Porúří v Německu. Česká republika plánuje vybudování několika vodíkových hubů napojených na průmyslové provozy a energetickou infrastrukturu. Tyto lokality by byly schopné zajistit jak dlouhodobé skladování hydridových zásobníků, tak jejich distribuci z/do okolních států prostřednictvím železnice [13], [15], [69], [77].

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.7 Přepravní trasy

Vzhledem k tomu, že metalhydridy nejsou dosud využívány v komerční velkoobjemové logistice vodíku, neexistují reálné příklady běžně provozovaných přepravních tras. Využití metalhydridových zásobníků se však postupně dostává do pilotních projektů v Evropě a Asii, což umožňuje definovat teoreticky realistické a technicky proveditelné logistické trasy, které odpovídají fyzikálním vlastnostem hydridů, dostupné infrastrukturu a současnému stavu vodíkové ekonomiky. Níže uvedené modelové trasy reflektují existující mezinárodní logistické řetězce pro chemický průmysl, upravené pro manipulaci s pevnými vodíkovými nosiči v podobě metalhydridů.

Mezikontinentální přeprava z Austrálie do Evropy

Jednou z nejreálnějších mezikontinentálních přepravních tras metalhydridů by byl export z oblastí s levným obnovitelným vodíkem, například z Austrálie, kde vznikají rozsáhlé projekty na výrobu zeleného vodíku z fotovoltiky a větru. Metalhydridové zásobníky by byly plněny v průmyslové oblasti Pilbara nebo v Queenslandu, následně naloženy v kontejnerové podobě v přístavu Port Hedland nebo Fremantle na námořní kontejnerové lodě. Náklad by se transportoval do přístavů Rotterdam nebo Hamburk, které disponují vyspělou infrastrukturou pro nebezpečné látky a nejvyšší úrovní certifikace dle IMO. Z evropských přístavů by zásobníky pokračovaly železniční dopravou do centrálních logistických terminálů, například do Duisburgu, Antverp či Lipska, odkud by se následně silničními soupravami rozvážely do vodíkových hubů po celé EU. Tato trasa odpovídá současným kontejnerovým tokům a technicky umožňuje bezpečné a dlouhodobé skladování vodíku bez odpařovacích ztrát.

Evropská distribuční trasa – Norsko → Německo → Česká republika

Norsko je jedním z nejperspektivnějších evropských dodavatelů zeleného vodíku díky rozsáhlé výrobě z obnovitelných zdrojů. Metalhydridové zásobníky plněné v průmyslových areálech u Narviku, Osla nebo Bergen by byly expedovány do evropských přístavů, nejčastěji Hamburku nebo Bremerhavenu, pomocí krátkých námořních spojení (tzv. short-sea shipping). Z Hamburku by zásobníky pokračovaly po železnici přes Magdeburg a Dresden do logistických center v severních Čechách, například Děčín-Loubí, Lovosice nebo Mělník. Tato místa by sloužila jako překladiště, odkud by se metalhydridové kontejnery distribuovaly silniční dopravou k odběratelům v průmyslových regionech – Litvínov, Kralupy nad Vltavou, Ostrava nebo Plzeň. Trasa je plně realizovatelná, protože navazuje na stávající dopravní infrastrukturu pro chemický průmysl.

Vnitroeurospáská trasa – Itálie → Rakousko → Česká republika

V Itálii probíhá dynamický rozvoj fotovoltických vodíkových projektů v oblastech Puglia, Basilicata a Sicilie. Kovové hydridy plněné v jihovýchodní Itálii by se nejprve přepravily silniční dopravou do železničního terminálu v Tarantu nebo Bari, následně železnici přes Brennerský koridor do Innsbrucku a dále do Lince. Odtud by zásilky pokračovaly do Českých Budějovic nebo Horního Dvořiště, kde by byly přeloženy na silniční vozidla a dopraveny do odběratelských závodů v České republice. Tato trasa ilustruje možnost využití metalhydridů v rámci evropských vnitrozemských toků bez nutnosti námořní dopravy – plně intermodální řešení vhodné pro střední vzdálenosti.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Domácí distribuční trasa – severní Čechy → Ostravsko → Slovensko

V případě domácí nebo regionální distribuce by metalhydridové zásobníky byly přepravovány z významných chemických center v severních nebo středních Čechách (Litvínov, Neratovice, Kralupy) nejprve silniční dopravou do intermodálního terminálu v Lovosicích nebo Praze-Uhřetěvesi. Zde by byly naloženy na železniční vozy a odeslány směrem na Moravu, například do logistického centra Ostrava-Paskov, odkud by byly dál distribuovány silniční dopravou do průmyslových podniků v Moravskoslezském kraji nebo k odběratelům na Slovensku (Žilina, Trenčín). Tato trasa představuje typické použití metalhydridů v regionálních dodavatelských řetězcích.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

2.8 Shrnutí

Metalhydridy představují perspektivní, vysoce bezpečnou a stabilní formu ukládání a přepravy vodíku, umožňující jeho transport v pevné chemicky vázané podobě. Zásadní výhodou je jejich nízká reaktivita, minimální riziko úniku vodíku a vysoká provozní bezpečnost, vyplývající z pevného zakotvení vodíku v krystalické mřížce kovů. Při přepravě není nutné udržovat tlak či teplotu, což zjednodušuje manipulaci i logistické procesy. Metalhydridy také nevykazují ztráty odparem – vodík se neuvolňuje během přepravy či skladování, což výrazně zlepšuje energetickou účinnost i ekonomiku dlouhodobého uskladnění.

SWOT analýza metalhydridů jako nosiče vodíku pro účely přepravy je uvedena na Obrázek 2.8.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Vysoká bezpečnost přepravy – vodík vázaný v pevné kovové mřížce. Minimální riziko úniku plynu za normálních logistických podmínek (s neporušeným a certifikovaným systémem). Možnost použití konvenčních systémů ADR pro reaktivní kovy. Bezpečné zacházení v uzavřených systémech s inertní atmosférou. Vhodné pro regionální a ostrovní logistiku.	Vysoká hmotnost nosiče, nevhodný pro dlouhé vzdálenosti. Nutnost tepelného managementu při výdeji vodíku (ohřev kazet typicky ~60–200 °C; podle typu hydridu až ~300 °C). Náročné tepelné řízení systému (plnění/výdej). Nízká gravimetrická kapacita některých hydridů. Vyšší investiční náklady a vyšší jednotkové náklady přepravy oproti některým alternativním nosičům (závisí na případu a měřítku). Složitost manipulace – nutnost specializovaného personálu.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Podpora decentralizovaných energetických systémů. Vývoj certifikovaných kontejnerů a mobilních modulů. Vhodné doplňkové řešení k plynovodní síti. Rostoucí poptávka po bezpečné regionální distribuci vodíku.	Reaktivita s vodou – riziko v případě poškození obalu. Složitá certifikační procesy podle norem ADR/ISO. Omezená TRL (5–7) – je nutné další ověření v praxi.

OBRÁZEK 2.8: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY METALHYDRIDŮ JAKO NOSIČE VODÍKU.

Pro silniční přepravu představují metalhydridy vhodnou volbu především v regionálním měřítku, kde umožňují efektivní zásobování menších odběrných míst. Mobilní metalhydridové moduly lze snadno přepravovat pomocí standardních vozidel splňujících ADR, přičemž bezpečnostní rizika jsou minimální díky pasivní stabilitě náplně. Na vyšších úrovních distribuce, jako je národní nebo evropská, mohou metalhydridové kontejnery sloužit zejména jako doplňkový logistický prvek, který rozšiřuje flexibilitu distribučních systémů bez nutnosti budování nové infrastruktury. Technologická připravenost silniční přepravy dosahuje úrovně TRL 5–7, což odpovídá pilotním až demonstračním projektům.

Významně se může uplatnit také železniční přeprava, která je díky své nízké energetické náročnosti a vysoké kapacitě vhodná pro dlouhé vzdálenosti a velké objemy přepravovaného vodíku. Intermodální přeprava v rámci standardních ISO kontejnerů umožňuje snadný přesun mezi železniční a silniční dopravou bez překládky obsahu. Metalhydridové moduly jsou kompatibilní se systémem RID pro přepravu nebezpečných věcí, a ačkoliv zatím nebyly nasazeny v masovém měřítku, první pilotní projekty probíhají zejména v Německu, Rakousku a Švýcarsku. ČR disponuje rozsáhlou železniční sítí, modernizovanými terminály a průmyslovou základnou, která umožňuje postupné zavádění železniční hydridové logistiky. Tato forma přepravy poskytuje bezpečné řešení

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

pro meziregionální transport mezi vodíkovými uzly, průmyslovými podniky či energetickými zařízeními. Pro ucelené porovnání jednotlivých druhů dopravy z hlediska jejich vhodnosti pro přepravu metalhydridových zásobníků uvádí Tabulka 2.1 základní rozdíly mezi silniční, železniční a lodní logistikou.

TABULKA 2.1: POROVNÁNÍ PŘEPRAVNÍCH MÓDŮ PRO METALHYDRIDY – SILNICE, ŽELEZNICE, LODĚ.

Kritérium	Silniční přeprava	Železniční přeprava	Lodní přeprava
Bezpečnost	Vysoká při malých a středních modulech; nízké tlaky; nejvyšší riziko vychází z manipulace a vlhkosti.	Velmi vysoká; nízké provozní tlaky; stabilní teplotní režim; vhodné pro přepravu velkých objemů.	Vysoká; požadavek „on deck only“ (IMDG); výborné odvětrání; nejnižší riziko akumulace vodíku.
Kapacita přepravy	Nízká až střední (jednotky tun metalhydridu na soupravu).	Vysoká (desítky tun metalhydridu na soupravu).	Velmi vysoká (stovky tun metalhydridu na loď; omezeno hmotností a pravidly stowage).
Rychlost dopravy	Nejvyšší flexibilita, nejrychlejší pro krátké vzdálenosti.	Střední; stabilní, ale pomalejší než silnice.	Nejnižší; dlouhé přepravní časy, zejména mezikontinentální.
Ekonomika provozu	Nejvyšší náklady na jednotku přepravovaného H ₂ ; výhodou je flexibilita a nízké fixní náklady.	Velmi dobrá ekonomika pro střední a dlouhé trasy; nízké náklady na tkm.	Nejlepší ekonomika při přepravě velkých objemů na dlouhé vzdálenosti; nejnižší náklady na tkm.
TRL	TRL 5–7 (pilotní až demonstrační provoz; existují funkční moduly).	TRL 4–6 (pilotní prototypy; zatím bez komerčního nasazení).	TRL 5–6 (funkční prototypy; nutná certifikace dle IMDG/ADN).
Legislativní náročnost	ADR: jasně definovaná pravidla; tunelový kód (D); přeprava povolena pouze ve schválených zařízeních dle ISO 16111.	RID: přísnější vibrační a mechanická kritéria; nutná homologace a pravidelné revize.	IMDG/ADN: nejpřísnější režim; „on deck only“; EmS F-D / S-U; specifické požadavky na větrání, kotvení a uložení.
Typické využití	Regionální distribuce, ostrovní provoz, menší energetická centra.	Meziregionální logistika, zásobování hubů, přeprava velkých objemů.	Mezikontinentální přeprava a velkoobjemová logistika v přístavních koridorech.

Lodní přeprava je nejvýhodnějším a nejekonomičtějším způsobem transportu velkých objemů metalhydridů zejména při mezikontinentálních trasách. Výhodou je možnost integrace metalhydridových zásobníků do standardizovaných kontejnerových systémů, které jsou přirozenou

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

součástí globální námořní i vnitrozemské dopravy. Evropské říční systémy, například Rýn nebo Dunaj, nabízejí vysokou propustnost pro kontejnerizovaný náklad a jsou vybaveny terminály schopnými manipulace s nebezpečnými látkami. Metalhydridy navíc nevyžadují kryogenní technologie ani vysokotlaké systémy, což zjednodušuje certifikaci a snižuje rizikové scénáře. Technologická připravenost lodní přepravy je vysoká, protože současná kontejnerová infrastruktura může metalhydridové zásobníky přijmout prakticky bez úprav.

Energetická bilance manipulace s metalhydridy je ovlivněna zejména tepelnými požadavky na absorpci a desorpci vodíku. Intermetalické hydridy typicky vyžadují 3–4 kWh/kg H₂ pro nasycení i uvolnění vodíku, zatímco komplexnější materiály, jako MgH₂, mohou potřebovat až dvojnásobek. Samotná přeprava má však minimální energetické nároky, protože nedochází k aktivní regulaci tlaku či teploty během transportu. V železniční dopravě je navíc energetická účinnost na přepravní jednotku velmi příznivá. Ekonomické aspekty jsou ovlivněny hlavně vyšší hmotností metalhydridových zásobníků a velmi vysokou počáteční investicí do kontejnerů, nicméně provozní náklady jsou stabilní a ztráty vodíku zanedbatelné.

Z ekologického hlediska představují metalhydridy výrazně příznivou technologii. Nakládka i vykládka probíhají v uzavřených systémech bez emisí vodíku a přeprava neprodukuje sekundární emise odpařeného média jako například u kapalného vodíku. Celkové environmentální dopady se tak soustředí především na energetické vstupy používané manipulační techniky a samotného dopravního prostředku. Železniční doprava zde vyniká nízkou uhlíkovou stopou, zejména při využití elektrické trakce. Lodní doprava zase nabízí mimořádně nízké emise na tunokilometr přepravovaného materiálu.

Celkově lze metalhydridové systémy označit za bezpečnou a technicky slibnou formu skladování vodíku, která nabízí vysokou stabilitu, minimální ztráty a dobrou kompatibilitu s existující infrastrukturou. Jejich využití v přepravě vodíku však zatím naráží na ekonomické a energetické požadavky spojené s ohřevem a chlazením, což omezuje jejich komerční nasazení zejména ve větších logistických řetězcích. Největší potenciál proto mají v lokálních a regionálních distribučních systémech, například při propojení průmyslových oblastí, energetických uzlů a vodíkových center, kde mohou představovat flexibilní a bezpečný nosič vodíku pro specifické aplikace vodíkové ekonomiky.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
ATEX	Výbušné atmosféry
CENELEC /CEN	Evropský výbor pro normalizaci v elektrotechnice
CLP	Klasifikace, označování a balení
CNG	Stlačený zemní plyn
ČR	Česká republika
ES	Evropský standard
EU	Evropská unie
IGF	Mezinárodní kodex bezpečnosti pro lodě používající plyny nebo jiná paliva s nízkou teplotou vzplanutí
IMDG	Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečného zboží po moři
IMO	Mezinárodní námořní organizace
ISO	Mezinárodní organizaci pro normalizaci
LOHC	Kapalné organické nosiče
LQ	Omezené množství
MH	Metalhydridy
NFPA	Národní asociace požární ochrany
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PG	Obalová skupina
PLC	Programovatelný logický automat
RID	Mezinárodní železniční řád pro přepravu nebezpečného zboží
SDS	Bezpečnostní list
TDG	Přeprava nebezpečného zboží
TEN-T	Transevropská dopravní síť
TRL	Technologická připravenost systému
UIC	Mezinárodní svaz železnic

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Linde, "Safety Datasheet – Hydrogen, compressed," 2013.
- [2] H. Tanaka, K. Tokoyoda, M. Matsumoto, Y. Suzuki, T. Kiyobayashi, and N. Kuriyama, "Hazard assessment of complex hydrides as hydrogen storage materials," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 7, pp. 3210–3218, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2009.01.064.
- [3] I. Martinček, J. Jandačka, and M. Malcho, "METAL HYDRIDE HYDROGEN STORAGE AS A SAFE ALTERNATIVE TO TRADITIONAL HYDROGEN STORAGE METHODS," *System Safety: Human – Technical Facility – Environment*, vol. 6, no. 1, pp. 218–226, Dec. 2024, doi: 10.2478/CZOTO-2024-0024.
- [4] A. Rosino Messa *et al.*, "Risk Management in a Containerized Metal Hydride Storage System," *Hydrogen Safety*, vol. 1, no. 1, pp. 33–45, Sep. 2024, doi: 10.58895/HYSAFE.10.
- [5] Výzkumný ústav bezpečnosti práce, "Metodika systému řízení BOZP a prevence pracovních rizik ve státní organizaci s více než 500 zaměstnanci," Praha, Nov. 2019.
- [6] Zákony pro lidi, "Nařízení vlády o vyhrazených technických tlakových zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti." [Online]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2022-192?utm>
- [7] L. Schlapbach and A. Züttel, "Hydrogen-storage materials for mobile applications," *Nature*, vol. 414, no. 6861, pp. 353–358, Nov. 2001, doi: 10.1038/35104634; KWRD.
- [8] A. Züttel, "Materials for hydrogen storage," *Materials Today*, vol. 6, no. 9, pp. 24–33, Sep. 2003, doi: 10.1016/S1369-7021(03)00922-2.
- [9] HYDREXIA, "Hydrogen storage breakthrough is here with Hydrexia's Metal Hydride Technology," LinkedIn. Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/hydrogen-storage-breakthrough-here-hydrexias-metal-hydride-technology/>
- [10] M. V. Lototsky, V. A. Yartys, B. G. Pollet, and R. C. Bowman, "Metal hydride hydrogen compressors: A review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 11, pp. 5818–5851, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2014.01.158.
- [11] P. Preuster, A. Alekseev, and P. Wasserscheid, "Hydrogen storage technologies for future energy systems," *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, vol. 8, no. Volume 8, 2017, pp. 445–471, Jun. 2017, doi: 10.1146/ANNUREV-CHEMBIOENG-060816-101334/1.
- [12] HazMat Tool, "UN 3468: Hydrogen in a metal hydride storage system or Hydrogen in a metal hydride storage system packed with equipment." [Online]. Available: <https://www.hazmattool.com/info.php?a=Hydrogen+in+a+metal+hydride+storage+system+or+Hydrogen+in+a+metal+hydride+storage+system+contained+in+equipment+or+Hydrogen+in+a+metal+hydride+storage+system+packed+with+equipment&b=UN3468&c=2.1>

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [13] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, “Vodíková strategie České republiky,” Jul. 2021.
- [14] Evropský parlament a rada evropské unie, “Směrnice Evropského parlamentu a rady o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se zařízení a ochranných systémů určených k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu,” Mar. 2014.
- [15] European Commission, “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe,” Jul. 2020. [Online]. Available: <https://www.eu2018.at/calendar-events/political-events/BMNT->
- [16] G. Amber, “A EUROPEAN HYDROGEN INFRASTRUCTURE VISION COVERING 28 COUNTRIES,” Apr. 2022. [Online]. Available: <https://www.ehb.eu/maps>
- [17] A. Züttel, “Hydrogen storage methods,” Apr. 2004. doi: 10.1007/s00114-004-0516-x.
- [18] Birol Fatih, “The Future of Hydrogen.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [19] M-ERA.NET, “Home - M-ERA.NET.” Accessed: Dec. 18, 2025. [Online]. Available: <https://www.m-era.net/>
- [20] Clean Hydrogen Partnership, “Clean Hydrogen – WORK PROGRAMME 2023,” 2023.
- [21] A. S. Mekonnin, K. Waclawiak, M. Humayun, S. Zhang, and H. Ullah, “Hydrogen Storage Technology, and Its Challenges: A Review,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/catal15030260.
- [22] J. Bellosta von Colbe *et al.*, “Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 15, pp. 7780–7808, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.104.
- [23] W. A. Amos, “Costs of Storing and Transporting Hydrogen,” Nov. 1998. [Online]. Available: <http://www.doe.gov/bridge/home.html>
- [24] Y. Yang *et al.*, “Development of Standards for Hydrogen Storage and Transportation,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Oct. 2020. doi: 10.1051/e3sconf/202019402018.
- [25] S. A. Gadre, A. D. Ebner, S. A. Al-Muhtaseb, and J. A. Ritter, “Practical Modeling of Metal Hydride Hydrogen Storage Systems,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 42, no. 8, pp. 1713–1722, 2003.
- [26] N. Klopčič, I. Grimmer, F. Winkler, M. Sartory, and A. Trattner, “A review on metal hydride materials for hydrogen storage,” Nov. 20, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.est.2023.108456.
- [27] A. Souahlia, H. Dhaou, F. Askri, S. Mellouli, A. Jemni, and S. Ben Nasrallah, “Experimental study and characterization of metal hydride containers,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 4952–4957, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.074.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [28] V. A. Yartys *et al.*, “HYDRIDE4MOBILITY: An EU HORIZON 2020 project on hydrogen powered fuel cell utility vehicles using metal hydrides in hydrogen storage and refuelling systems,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 72, pp. 35896–35909, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.190.
- [29] Z. Xie, Q. Jin, G. Su, and W. Lu, “A Review of Hydrogen Storage and Transportation: Progresses and Challenges,” Aug. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17164070.
- [30] National Archives, “Loading and Unloading.” [Online]. Available: https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-I/subchapter-C/part-177/subpart-B?utm_source=chatgpt.com
- [31] Hydrogen Tools, “Metal Hydride Storage.” [Online]. Available: https://h2tools.org/bestpractices/chemical-and-metal-hydride-hydrogen-storage/metal-hydride-storage?utm_source=chatgpt.com
- [32] CAMEO Chemicals, “METAL HYDRIDES, WATER-REACTIVE.” [Online]. Available: https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/3592?utm_source=chatgpt.com
- [33] Korean Register, “Guidelines on Safe Loading/Unloading Operation for Hydrogen Carrier,” 2024.
- [34] United Nations Economic Commission for Europe, *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR)*, vol. 1, no. 2. 2023. [Online]. Available: <https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage>
- [35] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, “Manual of Tests and Criteria.” [Online]. Available: <https://unece.org/transport/publications/manual-tests-and-criteria-rev7>
- [36] International Maritime Organization, “International Maritime Dangerous Goods Code,” London, 2006.
- [37] ADR Book, “UN 3468 - HYDROGEN IN A METAL HYDRIDE STORAGE SYSTEM.” [Online]. Available: <https://adrbook.com/en/2017/UN/3468>
- [38] International Organization for Standardization, “ISO 16111:2018 - Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/67952.html>
- [39] ADR Tool, “UN 3468 - ADR goods calculator.” [Online]. Available: <https://adr-tool.com/2838/un-3468>
- [40] F. Heubner *et al.*, “In-operando stress measurement and neutron imaging of metal hydride composites for solid-state hydrogen storage,” *J. Power Sources*, vol. 397, pp. 262–270, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.06.093.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [41] L. Mulky *et al.*, “An overview of hydrogen storage technologies – Key challenges and opportunities,” *Mater. Chem. Phys.*, vol. 325, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.matchemphys.2024.129710.
- [42] H. B. Khan and T. Zhang, “Metal hydride hydrogen storage risk assessment: A review,” Sep. 01, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2025.117273.
- [43] D. Poul, X. Jia, M. Pavlas, and P. Stehlík, “Model Development and Implementation of Techno-Economic Assessment of Hydrogen Logistics Value Chain: A Case Study of Selected Regions in the Czech Republic,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 7, Apr. 2025, doi: 10.3390/en18071741.
- [44] M. Lototskyy *et al.*, “Hydrogen refuelling station with integrated metal hydride compressor: Layout features and experience of three-year operation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 8, pp. 5415–5429, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.133.
- [45] D. Chabane, M. Ibrahim, F. Harel, A. Djerdir, D. Candusso, and O. Elkedim, “Energy management of a thermally coupled fuel cell system and metal hydride tank,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 50, pp. 27553–27563, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.247.
- [46] C. Drawer, J. Lange, and M. Kaltschmitt, “Metal hydrides for hydrogen storage – Identification and evaluation of stationary and transportation applications,” Jan. 30, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2023.109988.
- [47] N. İ. Beyazit, “Comparative Study of Hydrogen Storage and Metal Hydride Systems: Future Energy Storage Solutions,” May 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/pr13051506.
- [48] UNECE, “Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road.” [Online]. Available: <https://unece.org/transport/standards/transport/dangerous-goods/adr-2023-agreement-concerning-international-carriage>
- [49] B. Sakintuna, F. Lamari-Darkrim, and M. Hirscher, “Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 32, no. 9, pp. 1121–1140, Jun. 2007, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2006.11.022.
- [50] I. P. Jain, C. Lal, and A. Jain, “Hydrogen storage in Mg: A most promising material,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 5133–5144, May 2010, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2009.08.088.
- [51] EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION, “GASEOUS HYDROGEN INSTALLATIONS,” Brussels, 2021. [Online]. Available: www.eiga.eu
- [52] EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION, “HYDROGEN OVERVIEW-DISTRIBUTION, STORAGE, APPLICATIONS,” Brussel, 2024. [Online]. Available: www.eiga.eu
- [53] INTERNATIONAL STANDARD, “Transportable gas storage devices — Hydrogen absorbed in reversible metal hydride,” Geneva, Aug. 2018.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [54] International Organization for Standardization, “Dangerous Goods List and Limited Quantities Exceptions,” Memphis, 2007.
- [55] Minister of Justice, “Transportation of Dangerous Goods Regulations.” [Online]. Available: https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/regulations/sor-2001-286/page-31.html?utm_source=chatgpt.com
- [56] European Commission, “Equipment for potentially explosive atmospheres (ATEX).” [Online]. Available: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/mechanical-engineering/equipment-potentially-explosive-atmospheres-atex_en?utm_source=chatgpt.com
- [57] European clean hydrogen alliance, “Roadmap on Hydrogen Standardisation,” Mar. 2023.
- [58] M. Lázár *et al.*, “A Newly Proposed Method for Hydrogen Storage in a Metal Hydride Storage Tank Intended for Maritime and Inland Shipping,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/jmse11091643.
- [59] Hystorsys, “Modular Metal Hydride Hydrogen Storage System.” [Online]. Available: <https://www.hystorsys.no/mh-storage/>
- [60] G. Scarpati, E. Frasci, G. Di Ilio, and E. Jannelli, “A comprehensive review on metal hydrides-based hydrogen storage systems for mobile applications,” Nov. 15, 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2024.113934.
- [61] T. Villuendas, C. Montañés, A. Gómez, A. C. Alarcón, M. D. Storch de Gracia, and J. Sánchez-Laínez, “Advancing in the decarbonized future of natural gas transmission networks through a CFD study,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 35, pp. 15832–15844, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.03.055.
- [62] S. Barberis, M. Rivarolo, and L. Magistri, “Retrofitting of a hybrid propulsion shunting locomotive equipped with Fuel Cell and Metal Hydrides storage,” in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics, 2024. doi: 10.1088/1742-6596/2893/1/012073.
- [63] M. D. Allendorf, L. Klebanoff, V. Stavila, and M. Witman, “SANDIA REPORT Assessment of Materials-Based Options for On-Board Hydrogen Storage for Rail Applications,” 2023. [Online]. Available: <https://classic.ntis.gov/help/order-methods/>
- [64] A. Nqodi, T. C. Mosetlhe, and A. A. Yusuff, “Advances in Hydrogen-Powered Trains: A Brief Report,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 18, Sep. 2023, doi: 10.3390/en16186715.
- [65] Government of Canada, “Technology Readiness Level (TRL).” [Online]. Available: <https://ised-isde.canada.ca/site/clean-growth-hub/en/technology-readiness-level-trl-assessment-tool>
- [66] A. Boretti, “Technology readiness level of hydrogen storage technologies for transport,” *Energy Storage*, vol. 6, no. 1, Feb. 2024, doi: 10.1002/est2.546.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [67] Intergovernmental Organisation for International Carriage by Rail, “R I D Convention concerning International Carriage by Rail (COTIF) Appendix C-Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID),” Nov. 2022.
- [68] European Union Agency for Railways, *Report on railway safety and interoperability in the EU*, 2022. Publications Office of the European Union, 2022.
- [69] František Nantl, “NOVÉ NAŘÍZENÍ EU K ROZVOJI SÍTĚ TEN-T A DALŠÍ DOPRAVNÍ SEKTOROVÉ STRATEGIE 3. FÁZE,” *Urbanismus a územní rozvoj*, no. 5, 2024.
- [70] European Industrial Gases Association AISBL, “EIGA 15.21 Gaseous Hydrogen Installations.” [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/658164224/EIGA-15-21-Gaseous-Hydrogen-Installations>
- [71] Chris LaFleur, “Global Hydrogen Safety Codes and Standards.” [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/597012610/Global-Hydrogen-Safety-Codes-and-Standards>
- [72] Hydrogen Tools, “Safety Planning Guide for Hydrogen Projects,” May 2025.
- [73] D. Nozharova, “HyLAW Horizontal Position Paper Transport and Distribution of Compressed Hydrogen by Road Quantity and Pressure Limitations.”
- [74] G. Hui-li and C. Rong-chang, “Research on Limited Quantities and Excepted Quantities in Transportation of Dangerous Goods,” *China Safety Science Journal*, 2010.
- [75] Ministerstvo dopravy ČR, “Směrnice o pozemní přepravě nebezpečných věcí,” Sep. 2008.
- [76] Ministerstvo dopravy ČR, “Železniční infrastruktura.” [Online]. Available: <https://md.gov.cz/Dokumenty/Drazni-doprava/Zeleznicni-infrastruktura>
- [77] z. s. Moravskoslezský Vodíkový Klastř, “STRATEGIE ROZVOJE VODÍKOVÝCH TECHNOLOGIÍ,” 2024.
- [78] M. W. Menezes, D. R. Simmons, S. Winberg, R. Baranwal, P. Hoffman, and S. L. Genatowski, “U.S. Department of Energy Hydrogen Program Plan,” Nov. 2020.
- [79] International union of railways, “Activity report,” 2021.
- [80] DB Cargo, “Railways,” *DB Cargo customer magazine*, vol. 4, p. 48. [Online]. Available: www.dbcargo.com/newsletter
- [81] European Union Agency for Railways, *Rail environmental report*. Publications Office of the European Union, 2024.
- [82] W. A. Amos, “Costs of Storing and Transporting Hydrogen,” Nov. 1998. [Online]. Available: <http://www.doe.gov/bridge/home.html>
- [83] European Environment Agency, “Annual European Union greenhouse gas inventory 1990-2021 and inventory report 2023,” Apr. 2023.

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [84] International Energy Agency, “The Future of Rail – Opportunities for energy and the environment,” 2019. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [85] J. Lundin and L. Antonsson, “Road tunnel restrictions – Guidance and methods for categorizing road tunnels according to dangerous goods regulations (ADR),” *Saf. Sci.*, vol. 116, pp. 170–182, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.ssci.2019.03.004.
- [86] J. P. Rodrigue, “The geography of transport systems,” *The Geography of Transport Systems*, pp. 1–402, Apr. 2024, doi: 10.4324/9781003343196.
- [87] European Commission, “Trans-European Transport Network (TEN-T) - Mobility and Transport.” [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/infrastructure-and-investment/trans-european-transport-network-ten-t_en
- [88] M. Weikl and A. Peschel, “Industrial view on hydrogen carriers for intercontinental transport,” Dec. 01, 2023, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cogsc.2023.100843.
- [89] UN Trade and Development (UNCTAD), “Review of Maritime Transport.” [Online]. Available: <https://unctad.org/rmt2022>
- [90] International Maritime Organization, “ADOPTION OF AMENDMENTS TO THE INTERNATIONAL MARITIME DANGEROUS GOODS (IMDG) CODE,” May 2008.
- [91] United Nations Economic Commission for Europe, “European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways,” vol. 1, p. 671, 2022.
- [92] International Maritime Organization, “IMDG Code – 2022 Edition: International Maritime Dangerous Goods Code,” *IMDG Code*, Dec. 2022, doi: 10.62454/KN200E.
- [93] International Maritime Organization, “Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods (EmS) Guide.” [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/ems-guide.aspx>
- [94] International Maritime Organization, “CARRIAGE OF DANGEROUS GOODS INTERNATIONAL MARITIME DANGEROUS GOODS (IMDG) CODE REVISED EMERGENCY RESPONSE PROCEDURES FOR SHIPS CARRYING DANGEROUS GOODS (EMS GUIDE),” London, Jun. 2024.
- [95] United Nations Economic Commission for Europe, *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways*, vol. 2. 2022.
- [96] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, “Národní akční plán čisté mobility | MPO.” [Online]. Available: <https://mpo.gov.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/narodni-akcni-plan-ciste-mobility--167456/>
- [97] Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, “Informace o plnění aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility (NAP CM) za rok 2022.” [Online]. Available: <https://mpo.gov.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/informace-o-plneni-aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility-nap-cm-za-rok-2022--277995/>

Metalhydridy jako alternativní forma přepravy vodíku

- [98] T. Cepowski and A. Drozd, "Measurement-based relationships between container ship operating parameters and fuel consumption," *Appl. Energy*, vol. 347, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121315.
- [99] T. Brestovič *et al.*, "Operating parameters at hydrogen leak from a metal hydride container applied in automotive industry and pressure effects of an explosion on the environment," Sep. 15, 2019, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.molliq.2019.111206.
- [100] United Nations Economic Commission for Europe, *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways (ADN)*, vol. 1. 2025.
- [101] Government of Canada, "Transportation of Dangerous Goods Regulations." [Online]. Available: <https://tc.canada.ca/en/corporate-services/acts-regulations/list-regulations/transportation-dangerous-goods-regulations>
- [102] International Maritime Organization, "International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974." [Online]. Available: [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx)
- [103] MARPOL, "International Convention for the Prevention of Pollution from Ships," 2015.
- [104] M. Hirscher, *Handbook of Hydrogen Storage*. Wiley-VCH, 2010.
- [105] ORLEN Unipetrol, "Obnovitelný vodík je cestou k trvalé udržitelnosti." [Online]. Available: https://www.orlenunipetrol.cz/cs/Media/RozhovoryAProjevy/Stranky/20230926_Obnovitelny_vodik_Maciej_Romanow_.aspx
- [106] ORLEN Unipetrol, "Dekarbonizace." [Online]. Available: https://www.orlenunipetrol.cz/cs/zodpovedna_firma/zivotni-prostredi/dekarbonizace/Stranky/default.aspx
- [107] Synthos, "Smlouva s NCBR o spolufinancování inovativního vodíkového projektu." [Online]. Available: <https://www.synthosgroup.com/cz/smlouva-s-ncbr-o-spolufinancovani-inovativniho-vodikoveho-projektu/>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3 Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Adéla Svejková, Libor Špička

Centrum dopravního výzkumu, v. v. i., Líšeňská 33a, 636 00 Brno

3.1 Obecné informace

Metan je nejjednodušší uhlovodík a současně hlavní složka zemního plynu. Slouží tedy již dlouhou dobu jako významný zdroj energie v řadě průmyslových i domácích aplikací. Jedná se také o významný skleníkový plyn, nicméně v kontextu dekarbonizace energetiky je v určitých formách považován za potenciální nástroj pro snižování emisí. Vyniká vysokou energetickou hustotou na objemovou jednotku, což z něj činí vhodnou alternativu pro mobilitu i decentralizovanou výrobu energie. Velkou výhodou je rovněž možnost využívat již existující infrastrukturu pro skladování, přepravu a distribuci, čímž se výrazně snižují náklady na zavedení metanu do nových energetických řešení. V kontextu cirkulární ekonomiky roste zájem o obnovitelný metan, který vzniká z biologických nebo syntetických zdrojů a umožňuje snížení emisí skleníkových plynů. Metan se tak ukazuje nejen jako osvědčený nosič energie, ale také jako vhodný nástroj pro přechod k udržitelnějšímu energetickému mixu budoucnosti.

Syntetický metan vzniká přes Sabatierovu reakci (tzv. metanizace), při které se vodík (H_2) slučuje s oxidem uhličitým (CO_2) za vzniku metanu (CH_4) a vody (H_2O). Tato reakce probíhá za přítomnosti katalyzátoru, nejčastěji na bázi niklu (Ni), při teplotách okolo 300–400 °C a tlaku typicky 20–30 bar. Reakční mechanismus lze vyjádřit rovnicí (3.1).



V tomto případě hovoříme o metanu vyrobeném technologií Power-to-Gas (P2G) a výsledný plyn má prakticky shodné vlastnosti s fosilním zemním plynem a lze jej po úpravě výhřevnosti (přidáním propanu) vtlačet do stávající plynárenské infrastruktury. Technologie P2G umožňuje dlouhodobou akumulaci energie v chemicky stabilní podobě a přispívá k dekarbonizaci plynárenství.

Pokud je vodík získán elektrolýzou vody za použití obnovitelné energie a oxid uhličitý pochází z nebiologického či atmosférického zdroje a současně nepřekračuje emisní limit a splňuje metodiku výpočtu emisí podle Delegovaného nařízení (EU) 2023/1184, spadá do kategorie RFNBO (Renewable Fuel of Non-Biological Origin). Tento syntetický plyn pak nabízí možnost dlouhodobého a flexibilního ukládání obnovitelné energie.

Syntetický metan lze stejně jako zemní plyn přepravovat ve dvou základních formách: v plynném (CNG) nebo kapalném stavu (LNG)¹. Výběr vhodné přepravy závisí na celé řadě technických, ekonomických a infrastrukturních faktorů. Rozhodnutí, zda využít plynný nebo zkapalněný metan má významný dopad nejen na technické řešení systému, ale také na ekonomiku celého provozu, neboť zkapalnění metanu vyžaduje komplexní zařízení, která ochladí plyn na požadovanou teplotu,

¹ Pro zjednodušení jsou v textu používány zkratky CNG a LNG, které označují jak zemní, tak syntetický metan v obou formách (stlačený plyn a kapalina).

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

což je energeticky a finančně náročný proces. Náklady narůstají také následně při skladování a distribuci. Oproti tomu plynný metan lze snadno dopravovat a skladovat v existující plynovodní síti nebo v tlakových nádobách za relativně nízkou cenu. Obecně platí, že kapalná forma metanu je využívána méně často než plynná, zejména kvůli vyšším nákladům a technologické náročnosti. Na druhou stranu se jedná o flexibilnější záložní řešení vhodné pro dlouhé vzdálenosti a regiony bez plynovodů.

3.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Chemická stabilita a ostatní chemicko-fyzikální vlastnosti

Molekula metanu má čtyři silné kovalentní vazby C–H (~450 kJ/mol), což přispívá k jeho vysoké stabilitě. Za běžných přepravních a skladovacích podmínek (teplota, tlak) je syntetický metan velmi stabilní a nereaguje ani nepodléhá polymeraci, oxidaci či samovolnému rozkladu. Nevyžaduje stabilizační příměsi ani zvláštní podmínky, což z něj činí vhodné médium pro dlouhodobé uskladnění energie.

Nízká hustota v plynném stavu (~0,656 kg/m³) vyžaduje pro potřeby přepravy a skladování stlačení (200–250 bar). Pro zkapalnění musí být ochlazen na přibližně –162 °C, což je hodnota, která odpovídá jeho bodu varu při atmosférickém tlaku. Tím dojde k výraznému snížení objemu (cca 600x), což je výhodné především pro lodní nebo nákladní přepravu. Při této teplotě je tlak nasycených par přibližně 1 atmosféra, proto je přeprava zkapalněného metanu možná za nízkého tlaku, ale vyžaduje velmi účinnou tepelnou izolaci. Nedostatečná izolace vede k odpařování kapaliny (tzv. boil-off gas), které je třeba odvádět, spalovat nebo znovu zkapalnit. Z hlediska manipulace je syntetický metan ve formě zkapalněného plynu výhodný díky své velmi nízké dynamické viskozitě (cca 0,1 mPa.s při –160 °C) a relativně nízké hustotě (přibližně 0,42 g/cm³), což usnadňuje jeho čerpání v rámci kryogenních systémů.

Množství vázaného vodíku

Syntetický metan (CH₄) obsahuje čtyři atomy vodíku, které tvoří přibližně 25 % jeho hmotnosti – v praxi to znamená, že 1 kg metanu odpovídá zhruba 250 g vodíku. Tyto vlastnosti z něj činí účinný chemický nosič vodíku, zejména v kontextu dlouhodobého skladování a přepravy. Pro dopravní a energetické účely lze využít jeho stlačenou formu (~250 bar) s objemovou hustotou vodíku až 40 kg H₂/m³ nebo zkapalněný metan, který vzniká zchlazením na přibližně –162 °C. V kapalném skupenství může metan dosahovat vodíkové objemové hustoty až 57 kg H₂/m³. Díky nižším nárokům na chlazení a přibližně trojnásobné energetické hustotě ve srovnání s vodíkem představuje kapalný metan zajímavou variantu pro dálkovou přepravu a distribuci vodíku v navázané formě.

3.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Stlačený metan

Čistý metan je bezbarvý plyn bez zápachu. Jeho relativní hustota ke vzduchu je 0,55. Je tedy výrazně lehčí a při úniku stoupá vzhůru. Metan je vysoce těkavý a extrémně hořlavý plyn, který vytváří výbušné směsi se vzduchem i při velmi nízkých koncentracích (5–15 % obj.). Díky velmi nízké

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

minimální zápalné energii může dojít k jeho vznětu i při kontaktu s malým zdrojem jiskry. Taktéž při kontaktu s oxidačními činidly může dojít k prudké chemické reakci (vznícení nebo výbuch). Metan je dle nařízení (ES) č. 1272/2008 o klasifikaci, označování a balení látek a směsí (CLP) klasifikován jako plyn pod tlakem ve formě stlačeného plynu, což představuje varování podle kódu H280 – Obsahuje plyn pod tlakem; při zahřívání může vybuchnout. Zároveň jde o hořlavý plyn kategorie 1, což je nejvyšší stupeň hořlavosti, a je označen jako nebezpečný podle kódu H220 – Extrémně hořlavý plyn. Prevence se řídí podle kódu P210, kdy je nutné látku chránit před teplem, jiskrami, otevřeným ohněm a horkými povrchy. V blízkosti je také zakázáno kouřit. Podle kódu P377 se požár unikajícího plynu nehasí, pokud nelze bezpečně zastavit únik. Pokud to lze bezpečně, je nutné odstranit všechny možné zdroje zapálení [1].

Metan ve formě stlačeného plynu je pro účely přepravy klasifikován pod UN číslem 1971 (kódy přidělené nebezpečným látkám a předmětům, které se přepravují v mezinárodní dopravě; uděluje OSN) a jeho oficiální název je *Methan, stlačený*. Při přepravě se řídí pokyny pro balení P200 (standardní pokyny pro tlakové nádoby). Látka musí být označena výstražnou značkou pro hořlavé plyny – třída 2 (symbol plamene). Podle předpisů ADR (Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí) a RID (předpisy pro mezinárodní přepravu nebezpečných věcí po železnici) je metan zařazen do následující klasifikace:

- Třídy 2 – plyny
- Bez obalové skupiny (není rozlišena míra nebezpečnosti obalem),
- Klasifikační kód: 1F – značí hořlavý plyn, který je stlačený,
- Číslo nebezpečnosti: 23, kde 2 označuje plyn a 3 hořlavost.

Pro přepravu v tunelech platí kód omezení B/D, což znamená, že omezení závisí na množství a druhu vozidla (např. některé tunely mohou zakázat vjezd vozidel přepravujících metan v určitém množství) [1].

V rámci IMDG kódu (International Maritime Dangerous Goods Code), který se vztahuje na přepravu nebezpečných látek po moři, je metan zařazen do třídy 2.1, což označuje hořlavé plyny. V případě mimořádných událostí se postupuje podle tzv. EMS kódů (doporučené nouzové postupy). Pro metan jsou stanoveny dva:

- F-D, který se týká požárních situací a doporučuje např. hašení pomocí vodní mlhy z bezpečné vzdálenosti a pokud možno uzavřít přívod plynu.
- S-U, který se vztahuje k únikům látky. V takové situaci je potřeba evakuovat osoby z ohroženého prostoru a zabránit vstupu do oblastí s nahromaděným plynem a použít vhodné osobní ochranné prostředky, neboť vzniká riziko výbuchu nebo udušení v důsledku vytěsnění kyslíku.

Také podle IATA předpisů (International Air Transport Association), které se vztahují na leteckou přepravu, je metan zařazen do třídy 2.1 jako hořlavý plyn. Vzhledem k extrémní hořlavosti a možnosti tvorby výbušné směsi se vzduchem je přeprava letecky povolena pouze za velmi přísných bezpečnostních podmínek [1].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Klasifikace metanu podle normy NFPA 704 (tzv. ochranný diamant) říká, že:

- **Zdravotní riziko** (modrá část č. 2) – metan může způsobit dočasné zdravotní potíže nebo zbytková zranění, pokud je vdechován ve vyšších koncentracích (zejména v uzavřených prostorech).
- **Hořlavost** (červená část č. 4) – metan snadno hoří, při běžných podmínkách se rychle nebo úplně odpaří a může se velmi rychle vznítit, jedná se tedy o vysoce hořlavou látku.
- **Nestabilita** (žlutá část č. 0) – metan je za běžných podmínek stabilní, a to i při požáru – nejedná se o látku, která by byla sama o sobě reaktivní nebo explozivní.
- **Zvláštní rizika** (bílá část) – není specifikováno [2].

Zkapalněný metan

Čistý zkapalněný metan je velmi specifický produkt a je také méně častěji využíván oproti stlačené plynné formě. Obecně je považován za látku s vysokým rizikem vznícení a vznikem omrzlin. Podle nařízení (ES) č. 1272/2008 (CLP) je klasifikován jako nebezpečná chemická látka, která spadá do kategorie hořlavých plynů 1A, což znamená, že je extrémně hořlavý. Současně je zařazen mezi plyny pod tlakem – zchlazené zkapalněné plyny, což se týká jeho skupenství při velmi nízkých teplotách. Bývá označován symboly GHS02 (plamen) a GHS04 (láhev s plynem) a vztahují se k němu věty o nebezpečnosti s označením H220 – extrémně hořlavý plyn a H281 – obsahuje zchlazený zkapalněný plyn; může způsobit kryogenní popáleniny nebo zranění. Obdobně jako u stlačené plynné formy zde platí pokyn č. 210, kdy má být metan uchováván mimo dosah tepla, horkých povrchů, jisker, otevřeného ohně a jiných zdrojů zapálení. S ohledem na zchlazení zde platí pokyn č. P282, který říká, že mají být používány chladově izolační rukavice, ochranný obličejový štít nebo ochranné brýle [3].

Specifikace IMDG kódu je totožná jako u stlačené plynné varianty. Je označován UN číslem 1972. Předpisy ADR/RID se liší v klasifikačním kódu, kdy zkapalněná verze má přidělený kód 3F, který značí hořlavý zkapalněný plyn s nebezpečím účinku při vdechnutí a číslem nebezpečnosti 223, kde první 2 značí plyn, druhá 2 značí nebezpečí výbuchu při prudké změně teploty nebo tlaku (kryogenní kapalina) a 3 označuje hořlavost.

Norma NFPA 704 říká, že z hlediska zdravotního rizika je označen hodnotou 2, což znamená, že může způsobit dočasné zneschopnění nebo reziduální poranění při intenzivní expozici. V oblasti hořlavosti je klasifikován hodnotou 4, která udává, že látka velmi snadno hoří – buď se rychle odpařuje nebo se zcela odpaří při běžném atmosférickém tlaku a okolní teplotě. Z hlediska stability má hodnotu 0, která znamená, že je za normálních podmínek stabilní, a to i v případě požáru [4].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.2 Silniční přeprava

3.2.1 Vhodnost přepravy

Silniční přeprava metanu je obecně považována za velmi flexibilní a snadno dostupnou. Její hlavní výhodou je nezávislost na pevné infrastruktuře, což znamená nižší počáteční investiční náklady – například není nutné budovat potrubní síť. Díky tomu je možné zahájit přepravu rychle, což je výhodné zejména v počátečních fázích projektů nebo při zásobování nových lokalit. Je však důležité si uvědomit, že množství metanu přepravované silniční dopravou je např. ve srovnání s potrubní přepravou výrazně menší. V rámci silniční přepravy je také důležité dbát na dodržování přísných bezpečnostních předpisů, neboť přeprava hořlavé látky má specifická rizika.

Při výběru vhodného druhu přepravy je nutné zohlednit mimo jiné vzdálenost mezi bodem výroby a spotřeby, přítomnost nebo nepřítomnost infrastruktury, množství přepravované látky a také účel použití.

Ostrovň řešení

V případě ostrovňho řešení se jedná o lokální, nezávislý energetický systém, kde jsou výroba, skladování i spotřeba energie soustředěny v konkrétní lokalitě. Často nejsou tyto energetické „ostrovňy“ připojeny ani k rozsáhlé síti. Vzdálenost mezi výrobcem a odběratelem je tedy krátká až nulová a systém je často energeticky soběstačný. Příkladem může být řešení, kdy městské zařízení k energetickému využívání odpadů (ZEVO) vyrábí vodík, který je v tom samém městě využíván dopravním podnikem.

Silniční přeprava stlačeného plynného metanu je v rámci ostrovňho řešení obecně vhodnou volbou, pokud je v dané lokalitě přeprava vůbec nutná (spotřeba se v ideálním případě může uskutečňovat přímo v místě výroby – v jednom areálu), ale její efektivita záleží na konkrétních podmínkách. Hlavními důvody, proč silniční přeprava dává v tomhle případě smysl, je především již zmiňovaná krátká vzdálenost mezi výrobou a spotřebou, kdy na krátké trasy je silniční přeprava velmi efektivní a nepotřebuje trvalé vedení (např. potrubí). Důležitá je v tomto případě také škálovatelnost a nízká vstupní investice, kdy lze dodávané množství snadno upravovat podle měnící se spotřeby, což je ideální pro pilotní nebo rozvíhající se provoz. Z uvedených pozitiv vyplývá také nezávislost na složité infrastruktuře, která by vyžadovala dlouhé povoloovací procesy (např. pro výstavbu potrubí) a díky tomu může být přeprava v tomto případě zahájena velmi rychle. Přepravovaný metan lze přímo na místě přeměnit na vodík pomocí zařízení pro parní reforming. Běžná silniční cisterna určená pro CNG může převézt objem odpovídající přibližně 0,5–0,8 t vodíku vázaného ve formě CH₄, a to bez potřeby tlakových či kryogenních systémů specifických pro čistý vodík [5].

Limitujícími faktory v tomto případě může být objem přepravované látky a četnost dopravy. Pokud by bylo přepravováno velké množství metanu, byla by silniční přeprava logisticky náročná a nákladná. Důležité je také zmínit bezpečnost a regulaci, kdy silniční přeprava hořlavého plynu podléhá přísným pravidlům, a může tak být v městském prostředí problematická, např. kvůli omezením vjezdu nebo manipulace. Je také vhodné zvážit dlouhodobou udržitelnost, protože

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

rozšiřujícím se projektům roste spotřeba. V takovém případě je vhodnější stacionární (zásobníky, technologie výroby apod.) nebo potrubní řešení.

Zkapalněný metan bývá standardně využíván pro delší přepravy. Důvodem je vysoká energetická hustota, která umožňuje přepravovat velké množství energie najednou. Pro ostrovní řešení není tahle varianta první volbou, ale za určitých okolností může být vhodná i v tomto případě. Takovými okolnostmi může být např. situace, kdy je již kapalná forma k dispozici v rámci města nebo u velkých odběratelů při neexistenci potrubí apod.

Úroveň krajů

V kontextu krajské přepravy, tedy při vzdálenostech v řádu desítek až stovky kilometrů mezi místem výroby a spotřeby, představuje silniční doprava syntetického metanu flexibilní a škálovatelné řešení zejména tam, kde není ekonomické nebo technicky efektivní budovat plynovodní připojení. Pro tyto účely lze využít obě formy přepravy: plynný stlačený metan a nákladnější variantu ve formě zkapalněného metanu. Každá z forem má své specifické vlastnosti a provozní nároky, které ovlivňují vhodnost nasazení v konkrétním logistickém a odběratelském prostředí. Plynná forma je vhodná zejména pro menší nebo středně velké spotřebitele s častější frekvencí zásobování a tam, kde je možné využít i mobilní zásobníky bez rozsáhlé infrastruktury. Naopak přeprava zkapalněného metanu je vhodná tam, kde dochází k odběru většího množství energie nebo je požadována nižší frekvence zásobování při zachování vysokého objemu na jednu přepravní jednotku. Stále však platí potřeba kryogenní techniky, tepelná izolace, řízení boil-off gas efektu (BOG) a vyšší investiční nároky na vybavení místa odběru.

Na úrovni krajů umožňuje silniční síť flexibilní zásobování více distribučních uzlů syntetickým metanem. Centrální výroby (např. P2G jednotky u OZE) mohou vyrábět CH_4 a dopravovat jej cisternami do decentralizovaných míst, kde je cílem např. snížení CO_2 v dopravě [6].

Příkladem fungujícího modelu je německý projekt STORE&GO ve Falkenhagenu, kde byl provozován P2G metanační pilot o výkonu 1 MW, produkující syntetický metan dodávaný do plynárenské sítě, což prokázalo technickou proveditelnost regionální distribuce a skladování syntetického metanu [7].

Národní úroveň

Silniční přeprava syntetického metanu je na národní úrovni vhodná pro menší objemy, regionální distribuci a flexibilní nasazení, zejména v počátečních fázích rozvoje infrastruktury. Pro dlouhodobé a rozsáhlé využití je však vhodné uvažovat o kombinaci s potrubní nebo železniční dopravou, která je efektivnější z hlediska nákladů, emisí i bezpečnosti.

Úroveň EU

Silniční přeprava syntetického metanu představuje flexibilní doplněk k tradiční potrubní infrastruktuře. Zatímco potrubní přeprava je efektivní pro velkoobjemový a kontinuální tok plynu mezi hlavními uzly, silniční přeprava umožňuje cílené zásobování decentralizovaných míst, která nejsou napojena na plynárenskou síť. Tento způsob distribuce je vhodný zvláště v počátečních fázích rozvoje trhu s obnovitelnými plyny, při pilotních projektech nebo v regionech s omezenou

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

infrastrukturou. Výhodou je nízká vstupní investice a vysoká logistická flexibilita, nevýhodou pak nižší přepravní kapacita a vyšší emise z dopravy.

3.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Katalytická metanizace dosáhla úrovně technologické připravenosti 7–9, s komerčním provozem na velkých technologických celcích [8] [9].

Transport syntetického metanu po silnici – ať už ve formě CNG nebo LNG, využívá zcela zavedené, komerčně ověřené technologie s úrovní technologické připravenosti TRL 9. Nejde tedy o experimentální přístup, ale o hotové řešení připravené k okamžitému nasazení. Vzhledem k tomu, že syntetický metan má téměř shodné fyzikálně-chemické vlastnosti jako zemní plyn, je možné pro jeho přepravu beze změn využít stávající infrastrukturu – cisternová vozidla, zásobníky i čerpací stanice určené pro CNG či LNG. Stejně tak při jeho vykládce se uplatňují dlouhodobě ověřené průmyslové technologie, které zahrnují sofistikované systémy redukce tlaku, tepelné kompenzace, automatizace a přísné bezpečnostní standardy přizpůsobené specifikům transportu syntetického metanu [10].

3.2.3 Popis druhu přepravy

Silniční přeprava SNG využívá plně zavedené technologie běžně používané pro přepravu zemního plynu. V závislosti na délce trasy, objemu a místních provozních podmínkách se využívají dvě základní formy přepravy: stlačený nebo zkapalněný syntetický metan.

V první variantě se SNG nejčastěji přepravuje ve speciálních návěsích – tzv. tube trailerech (viz Obrázek 3.1). Ty obsahují svazky válcových tlakových lahví (obvykle 9–12), s pracovními tlaky kolem 25 MPa (250 bar). Typické tube trailery mají vodní objem ~22–26 m³ a přepravují 6 000–9 000 Nm³ plynu [11] [12]. Další variantou jsou modulární kontejnery s tlakovými lahvemi (MEGC kontejnery, Obrázek 3.2), které umožňují přepravu CNG po silnici, železnici i lodí, a jsou tedy vhodné pro multimodální přepravu. Objem i kapacita je srovnatelná s tube trailery [13]. Pro lokální rozvoz nebo menší odběratele jsou pak vhodné paletové systémy (menší svazky) [14].

Technické uspořádání tube traileru:

- Svazek 6–12válcových tlakových lahví připevněných k pevnému rámu nebo přímo k návěsu,
- pojistné a přetlakové ventily, manometry, teploměry, pojistné membrány, automatické uzávěry [15].

Technické uspořádání modulárních kontejnerů s tlakovými lahvemi:

- Kontejner navržen podle normy ISO 668,
- vertikální válce,
- rozvod a ventily: nerezové sběrné potrubí, TPRD/tlakový bezpečnostní kotouč, manometry,
- kondenzátová linka: pro odvodu a údržbu [16].

Technické uspořádání paletových menších svazků:

- Vertikální lahve na železném rámu,

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- nerezový rozvod s hlavním ventilem, manometry, sekčními ventily a možností dip-tube vypouštění (odběr média zespodu lahve pomocí ponořené trubice), přetlakové ventily,
- manipulační prvky: zvedací body, vidlicové otvory [17] [18] [19].



OBRÁZEK 3.1: TUBE TRAILER [20].



OBRÁZEK 3.2: MEGC KONTEJNER S TLAKOVÝMI LAHVEMI (OTEVŘENÝ DESIGN) [21].

Druhým způsobem je přeprava LNG pomocí kryogenních cisteren (Obrázek 3.3) s vakuově izolovanými nádržemi o objemu cca 40–60 m³, kde je metan udržován při teplotě kolem -160 °C. Díky vysoké hustotě lze v jedné dodávce přepravit ekvivalent ~215–340 MWh na cisternu, což významně přesahuje kapacitu CNG. Kryogenní cisterny splňují požadavky ADR (třída 2), jsou vybaveny vícestupňovou izolací, tlakovými ventily a čerpadly řízeného přenosu kapaliny [22] [23].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Technické uspořádání cisteren pro přepravu LNG:

- Dvouvrstvá konstrukce nádrže: vnitřní tlaková nádoba z nerezové oceli a vnější ocelový tank (vakuově izolovaný plášť), mezi pláště je vakuová mezera s perlitovou izolací nebo vícevrstvou metalizovanou fólií,
- bezpečnostní ventily,
- ventil BOG (odvádí odpařený metan do zásobníku nebo motoru – v případě LNG trucku),
- plnicí a výdejní ventily,
- LNG čerpadlo nebo pneumatické vytlačování (LNG je vytlačován plynnou fází),
- měřicí a ovládací systémy (hladinoměr, tlakoměr, teploměr, řídicí jednotka),
- podvozek a rám (pro silniční cisternu): návěs, ochranný rám, zemnění a ATEX zóna [24] [25] [26].



OBRÁZEK 3.3: KRYOGENNÍ CISTERNA NA PŘEPRAVU LNG [27].

Infrastruktura pro CNG a LNG je v Česku i v Evropě dobře rozvinutá. V ČR je k dispozici přes 200 veřejných CNG stanic a minimálně 6 stanic s LNG [28].

Díky těmto sítím může SNG využívat stávající plnicí a distribuční infrastrukturu bez potřeby zásadních úprav, proto je i rozšířenost přepravních prostředků velmi vysoká.

3.2.4 Bezpečnostní opatření

Klíčová bezpečnostní opatření jsou zakotvena v zákoně č. 250/2021 Sb. o bezpečnosti práce v souvislosti s provozem vyhrazených technických zařízení a o změně souvisejících zákonů a navazujících předpisů pro plnění tlakových nádob plyny. Přestože je LNG kapalný, všechny právní požadavky pro plyn platí i pro něj.

Plnění tlakových nádob nebo cisteren mohou provádět pouze odborně způsobilé organizace a osoby, které mají platné oprávnění a vhodné vybavení k plnění [29], které musí být prováděno na vyhrazených tlakových zařízeních (nádrže, kompresory) splňujících požadavky nařízení vlády č. 192/2022 Sb., o vyhrazených technických tlakových zařízeních a požadavcích na zajištění jejich

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

bezpečnosti [30]. Plnicí místo musí mít schválené tlakové zařízení a plnicí systémy, monitorovací systémy (tlak, teplota), bezpečnostní ventily, technické vybavení umožňující plnění a revize podle požadavku §8. Vyhrazená zařízení podléhají pravidelným revizím a zkouškám technického stavu a evidenci u pověřené organizace [29].

Z hlediska ADR platí při plnění a přepravě CNG/LNG, že plnění může probíhat pouze v certifikovaném zařízení, kde plnicí tlak je nižší než pracovní tlak nádoby a je zajištěna ochrana proti přeplnění. Plnění cisterny musí být kontrolováno (ručně nebo automaticky) a před plněním se musí zkontrolovat stav uzávěrů, přetlaky v nádobě, teplotní podmínky CNG/LNG, uzemnění a ochrana proti statické elektřině. Cisterny musí být schváleny podle ADR, TPED (směrnice 2010/35/EU o přenosných tlakových zařízeních) nebo UN předpisů a musí mít bezpečnostní ventily, přetlakový ventil, uzavírací ventily s možností nouzového uzavření a konstrukci odolnou vůči kryogenní teplotě. Nádrže a vozidla musí být označena tabulkami podle UN čísla (oranžová tabule s číslem nebezpečnosti) a výstražnými štítky (červený diamant s plamenem). Řidiči i personál musí mít ADR školení (třída 2) a také být vyškolení na plnicí systém, úniky, požární ochranu a havárie [31] [32].

Před vykládkou CNG se musí zkontrolovat tlaková nádoba, spoje, ventily, uzávěry a ověřit, že příjemce má zařízení schopné odběru CNG (dostatečný tlakový rozdíl nebo kompresor). Je požadováno uzemnění přepravní jednotky i plnicího bodu; je zakázáno kouření, jiskření a vstup nepovolaných osob. Používají se vysokotlaké hadice a samočinné ventily, které odolají mechanickému rázu, mají bezpečnostní pojistky proti odtržení a musí být certifikované podle ČSN EN ISO 16964 nebo ČSN EN 12266-1. Pokud tlak CNG převyšuje tlak v zásobníku, používá se tlaková redukce ve více stupních s integrovaným ohřevem plynu, aby nedocházelo ke kondenzaci a zamrznutí armatur. Všechny procesy musí být monitorovány a nouzové uzávěry okamžitě přístupné. Nutný je dozor kvalifikované osoby po celou dobu vykládky [29] [30] [31].

Vykládku LNG může provádět opět pouze osoba s odbornou způsobilostí a může se provádět na k tomu určeném místě (s ochranným pásmem). LNG cisterna i výdejní systém musí být uzemněny, spojení musí být testovatelné a potvrzené před zahájením vykládky. Připojení musí být provedeno hadicemi s certifikací pro kryogenní média a před spuštěním zkontrolována těsnost. Armatury musí být přístupné a ovladatelné z bezpečné vzdálenosti a vybaveny havarijním vypínáním. LNG se vykládá tlakovým přetlačováním nebo čerpadlem a oba systémy musí monitorovat teplotu, tlak a průtok, aby nedošlo k přetlaku či zamrznutí potrubí [29] [30] [32].

Při plnění a vykládání cisterny musí být motor vozidla vypnutý, pokud není použit jako hnací jednotka pro čerpadlo. Je zakázáno kouření, používání otevřeného ohně a jakékoli činnosti, které mohou způsobit jiskru. Pro plnění i vykládku musí být vytvořeno ochranné pásmo bez veřejného provozu a s řízeným přístupem. Vozidlo přepravující CNG/LNG musí být buď pod stálým dohledem, nebo zaparkováno na hlídaném nebo zabezpečeném místě mimo obydlenou oblast [33].

V případě úniku CNG je nutné vyklidit prostor, zajistit náležitou ventilaci, zvážit riziko nebezpečí výbuchu a odstranit všechny možné zdroje vznícení. Dále je nutné monitorovat koncentraci unikajícího produktu a zamezit úniku do kanalizace, sklepů a šachet nebo tam, kde by mohla být akumulace nebezpečná. Dokud nebude atmosféra bezpečná, je nutné používat dýchací přístroj.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

V případě požáru CNG je prioritou, pokud je to možné bez ohrožení zasahujících osob, zastavit únik plynu. Dokud únik nelze zastavit, plyn se nehasí – je vhodné jej nechat bezpečně vyhořet, aby se předešlo vzniku výbušné směsi. Současně je nutné izolovat prostor a ochlazovat nádobu, aby se zabránilo přehřátí a případné explozi. Dále je nutné odstranit všechny iniciační (zapalovací) zdroje. K hašení okolních materiálů lze použít vodu, suchý prášek nebo pěnu. Nevhodným hasivem je oxid uhličitý [34].

Při úniku LNG je, stejně jako u CNG, nutné (pokud to lze provést bezpečně) izolovat místo úniku, odstranit možné zdroje zapálení, zajistit dostatečné větrání, chránit zasahující osoby (zejména proti kryogennímu chladu a vdechnutí plynů) a sledovat koncentraci plynné fáze [35].

Při požáru LNG hoří plynná fáze vzniklá odpařením kapaliny – plamen může být málo viditelný a šířit se při zemi. Z toho důvodu je nezbytné prostor izolovat a pokud nelze zastavit únik, nehasit hořící plyn, ale nechat jej bezpečně vyhořet. Okolní zařízení je třeba ochlazovat a zabránit úniku látky do kanalizace. K hašení okolních materiálů lze použít suchý prášek nebo oxid uhličitý. Příímý vodní proud je nevhodný, protože může rozšířit hořící plyn. Jemná vodní mlha nebo sprcha se však může použít k regulaci spalování – například k rozředění nebo ochlazení zplodin, pokud dochází k nedokonalému spalování a vzniku oxidu uhelnatého (CO) [35].

3.2.5 Legislativní omezení

Silniční přeprava SNG, ať už ve formě stlačeného plynu (CNG – UN 1971) nebo zkapalněného plynu (LNG – UN 1972), podléhá nejen všeobecným pravidlům ADR, ale také českým národním technickým a dopravním předpisům, které upravují hmotnostní a rozměrové limity silničních vozidel.

Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) stanovuje základní pravidla pro konstrukci, označení a provoz vozidel přepravujících nebezpečné plyny. Syntetický metan se přepravuje pod následujícími klasifikacemi:

- UN 1971 – Metan stlačený (CNG), třída 2, kód nebezpečnosti 23
- UN 1972 – Metan zkapalněný (LNG), třída 2, kód nebezpečnosti 22

Obě skupenství spadají do:

- Třídy 2 – plyny,
- klasifikačního kódu 3F (LNG) a 1F (CNG),
- identifikačního kódu nebezpečí 223 – hořlavý plyn.
- Tunelový kód B/D:
 - Přeprava v cisternách: Průjezd zakázán v tunelech kategorií B, C, D a E.
 - Jiná přeprava: Průjezd zakázán v tunelech kategorií D a E.

Při posuzování přepravy metanu je nezbytné rozlišit, zda se jedná o přepravu v cisternách podle definice ADR – tedy v cisternových vozidlech, pojízdných cisternách, odnímatelných cisternách a cisternových kontejnerech, bateriových vozidlech nebo jednotkách MEGC. Nebo se jedná o tzv. jinou přepravu, která zahrnuje přepravu v obalech, jako jsou sudy, kanystry, IBC, tlakové lahve či svazky lahví, a řídí se odlišnými pravidly (viz předcházející odstavec).

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Při přepravě metanu ve formě LNG nebo CNG se na vozidla vztahují tunelová omezení podle nařízení ADR. Pokud se však vozidlo vrací stejnou trasou prázdné, rozlišuje se, zda jsou obaly či cisterny vyčištěné a odplyněné – nevyčištěné zůstávají nebezpečným nákladem a tunelová omezení nadále platí, zatímco vyčištěné a odplyněné již nepodléhají ADR a mohou projet libovolným tunelem.

Pro tyto látky platí povinnost použití schválených tlakových nádob nebo kryogenních cisteren konstruovaných podle požadavků směrnice 2010/35/EU (TPED) a příslušných norem – např. ČSN EN 13530-2 pro vakuově izolované cisterny LNG a ČSN EN ISO 9809-1/2/3 pro ocelové tlakové nádoby na CNG. Podle nařízení ADR musí mít vozidla převážející CNG/LNG oranžové identifikační tabule s černým číslem nebezpečnosti nahoře a UN číslem látky dole. Na bocích cisterny nebo přepravní jednotky musí být umístěny diamantové výstražné štítky s piktogramem plamene. Doplnkové značené vozidel (nejsou povinná podle ADR) se řídí podle mezinárodní normy ISO 17840-4 [33].

Dle vyhlášky č. 209/2018 Sb., o hmotnostech, rozměrech a spojitelnosti vozidel, je nejvyšší povolená hmotnost u jízdních souprav v České republice 48 tun. Maximální délka jízdní soupravy s návěsem je 16,5 m, výška 4,08 m a šířka 2,55 m [36].

3.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Přeprava syntetického metanu je v České republice technicky možná a právně povolená, protože využívá identické logistické a bezpečnostní rámce jako přeprava zemního plynu ve formě CNG/LNG. Z pohledu právních předpisů je SNG klasifikován shodně jako zemní plyn, a proto není potřeba vyvíjet zcela nové přepravní technologie – klíčové je využít a případně doplnit stávající infrastrukturu.

V oblasti silniční dopravy působí řada tuzemských i mezinárodních dopravců, kteří disponují potřebnou technikou pro přepravu plyných paliv. K dispozici jsou jak tube trailery pro přepravu CNG, tak kryogenní cisterny určené pro přepravu LNG. Mezi významné dodavatele a provozovatele těchto technologií patří například společnosti Air Products, Messer nebo výrobce specializovaných návěsů Chart Ferox.

Síť plnicích stanic pro CNG je v Česku dobře rozvinutá. K dispozici je více než 200 veřejných CNG stanic, a to nejen ve velkých městech, ale i v menších regionech. Tyto stanice provozují mimo jiné společnosti E.ON, Innogy, SEFE nebo Bonett [28].

LNG infrastruktura je v ČR sice zatím omezená, ale reálně existuje a postupně se rozvíjí. Aktuálně je k dispozici minimálně 8 LNG plnicích stanic, které provozují firmy jako GasNet, Shell nebo Eurowag. Mezi hlavní lokality patří například Jazlovce, Kaplice nebo Nýřany [28].

Z hlediska technického zázemí je v České republice dostupná i celá škála zařízení potřebných pro bezpečnou a efektivní manipulaci s plynými a kryogenními médii. K dispozici jsou výrobci a dodavatelé cisternových vozidel, čerpadel, ventilů, detekčních systémů i bezpečnostních prvků, jako například společnosti Chart, GCE, SIAD nebo Tedom.

Tato infrastruktura tvoří výchozí základ pro zavedení silniční přepravy SNG, přičemž při plánovaném rozšíření by ji bylo nutné vhodně doplnit zejména o plnicí body přímo napojené na zdroje SNG (P2G),

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

kryogenní zásobníky a výdejní místa pro zkapalněný syntetický metan. Taktéž je třeba zajistit systém sledovatelnosti původu SNG, podobně jako u biometanu. Z hlediska geografie je SNG vhodné použít pro decentralizované zásobování menších provozů nebo těžko dostupných oblastí a odběrných míst jako doplňkový vodíkový vektor, kde přímá distribuce vodíku není provozně či ekonomicky efektivní.

3.2.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost silniční přepravy SNG se odvíjí od formy, ve které je plyn přepravován – tedy jako stlačený metan (CNG) nebo zkapalněný metan (LNG). Každý režim přepravy vyžaduje jiný přístup k nakládce, transportu i vykládce, což se přímo promítá do celkové energetické bilance celého logistického řetězce.

Nakládka

Při přepravě ve formě CNG je syntetický metan stlačován na pracovní tlak 200–250 bar, typicky pomocí víceetapových kompresorů, přičemž:

Energetická náročnost komprese:

- 0,12–0,15 kWh/Nm³ stlačovaného metanu [37].

Při přepravě ve formě LNG je nutné syntetický metan zkapalnit na teplotu cca -160 °C.

Energetická náročnost zkapalnění:

- 0,23–0,46 kWh/kg CH₄, což odpovídá přibližně 0,12–0,33 kWh/Nm³ stlačovaného metanu [38].

Přeprava

Přeprava syntetického metanu po silnici vyžaduje energii především na pohon vozidla. Průměrná spotřeba naftového tahače pro CNG je 30–35 l/100 km, což činí 294–343 kWh/100 km [39]. U tahače převážejícího LNG je spotřeba nafty o něco vyšší. Podle studie Transport & Environment je v rozmezí 40–42 litrů na 100 km. Energetická spotřeba se pohybuje mezi 393–416 kWh/100 km [40].

Vykládka

CNG:

- Přetlakové vypouštění (pasivní vyrovnání tlaků) – plyn proudí ze soupravy do zásobníků díky vyššímu tlaku ve vozidle:
 - energetická náročnost je téměř nulová.
- Aktivní vykládka – pomocí kompresoru – pokud zásobník nebo síť je na vyšším tlaku, používá se přídavný booster kompresor:
 - spotřeba energie je cca 0,1–0,2 kWh/kg CH₄ [41].
- Přepouštění zbytkového plynu do hořáků nebo spalování v bezpečnostním zařízení (v případě nemožnosti plného přenosu (typicky kvůli rozdílu tlaků):
 - ztráta paliva, nikoliv spotřeba energie.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

LNG:

- Přetlaková vykládka (tlakem par) – není nutné použití čerpadla.
- Aktivní vykládka – kryogenní čerpadlo (ponorné nebo externí):
 - spotřeba energie je cca 0,02 kWh/kg LNG [42].

3.2.8 Ekonomické aspekty

Náklady na přepravu

Náklady na přepravu zahrnují především náklady na palivo, provoz a údržbu tahače, manipulaci s plynem a ztráty během přepravy.

Přímé provozní náklady:

- Tahač s CNG návěsem (tube trailer):
 - spotřeba nafty 30–35 l/100 km,
 - palivové náklady při průměrné ceně nafty (1. pol. 2025) 28,4 Kč bez DPH činí 852–994 Kč/100 km [39].
- Tahač s LNG cisternou:
 - spotřeba nafty 40–42 l/100 km,
 - palivové náklady při průměrné ceně nafty (1. pol. 2025) 28,4 Kč bez DPH činí 1 136–1 193 Kč/100 km [40].
- Provoz a údržba tahače (dle dopravce)²:
 - Osobní náklady na řidiče,
 - pojištění,
 - odpisy a údržba tahače, návěsu,
 - zisk, režie atd.

Ztráty během přepravy:

- CNG
 - Při přepravě prakticky nulové.
 - Při vykládce – zbytkový tlak v lahvích, ztráty 0,5–2,0 %, pokud systém nevyužívá další opatření [43].
 - Při přepravovaném množství 9 000 Nm³ CH₄ činí hmotnost nákladu 6 426 kg. Ztráta při vykládce (zbytkový tlak) pak představuje 32,13–128,50 kg CH₄ (0,5–2,0 %).
 - Výrobní náklady na výstupu z technologie – tedy bez obchodní marže, DPH a distribučních poplatků činí ≈ 200–300 €/MWh a jednotná tržní cena v ČR není stanovena. [44]
 - Spodní výhřevnost CH₄ LHV=13,8889 kWh/kg (=0,0138889 MWh/kg)
 - **0,5 %:** 32,13 kg × 0,0138889 MWh/kg = 0,4463 MWh.
 - **2 %:** 128,5 kg × 0,0138889 MWh/kg = 1,7847 MWh.
 - Ztráta při zbytkovém tlaku:

² Tyto náklady jsou pro CNG a LNG podobné a nevstupují do porovnání.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

0,5 % (32,13 kg) → 89,25 € – 133,88 €.

2,0 % (128,5 kg) → 356,94 € – 535,42 €.

- LNG

- Odpar – BOG: dochází k odparu kvůli tepelné zátěži – typicky 0,10–0,15 % den [45].
- Při přepočtu pro cisternu převážející 62 m³, tj. přibližně 26 040 kg CH₄.
- Výrobní náklady na výstupu z technologie – tedy bez obchodní marže, DPH a distribučních poplatků činí ≈ 200–300 €/MWh a jednotná tržní cena v ČR není stanovena.
- Spodní výhřevnost CH₄ LHV=13,8889 kWh/kg (=0,0138889 MWh/kg)
 - **0,10 %:** 26,04 kg × 0,0138889 MWh/kg = 0,3617 MWh.
 - **0,15 %:** 39,06 kg × 0,0138889 MWh/kg = 0,5425 MWh.
 - Finanční ztráta:
 - 0,10 % (26,04 kg) → 72,34 € – 108,51 €.**
 - 0,15 % (39,06 kg) → 108,51 € – 162,77 €.**

3.2.9 Ekologické aspekty

Silniční přeprava SNG s sebou nese ekologickou zátěž především v podobě emisí skleníkových plynů, které vznikají jednak přímou spotřebou energie, jednak úniky metanu, jehož globální oteplovací potenciál je podle IPCC přibližně 28x vyšší než CO₂ [46].

Emisní náročnost nakládky

Kompresní fáze (pro CNG formu) je relativně energeticky úsporná, avšak není zanedbatelná. Pro dosažení tlaku 250 bar se uvádí energetická náročnost 0,12–0,15 kWh/Nm³ (=0,00012–0,00015 MWh/Nm³) [37]. Tato spotřeba odpovídá produkci 0,0504–0,0630 kg CO₂/Nm³ stlačeného metanu, pokud je elektřina dodávána ze standardního energetického mixu, kde je stanovena hodnota emisního faktoru na 0,42 t CO₂/MWh (=420 kg CO₂/MWh) [47].

Zkapalnění (pro LNG formu) je energeticky náročnější. Spotřeba energie pro zkapalnění 1 kg metanu se pohybuje v rozmezí 0,23–0,46 kWh/kg CH₄, což vede k produkci 0,0966–0,1932 kg CO₂/kg CH₄ stlačeného metanu [37].

Emisní náročnost přepravy

Přeprava se realizuje nejčastěji naftou poháněnými tahači, které v případě převozu CNG vykazují spotřebu 30–35 l/100 km. Při hodnotě emisního faktoru 2,64 kg CO₂ na litr nafty dochází při přepravě CNG k produkci 79,2–92,4 kg CO₂/100 km. Přeprava LNG spotřebuje 40–42 l/100 km a dochází k produkci 105,6–110,88 kg CO₂/100 km [48] [49].

Emisní náročnost vykládky

Emisní náročnost vykládky syntetického metanu je v případě CNG při spotřebě energie 0,1–0,2 kWh/kg CH₄ 0,0420–0,0840 kg CO₂/kg paliva. V případě LNG je spotřeba energie 0,02 kWh/kg CH₄ a hodnota emisní náročnosti pak činí 0,0084 kg CO₂/kg paliva.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.2.10 Normy, oborové předpisy

ADR – mezinárodní dohoda OSN, která stanovuje pravidla pro klasifikaci nebezpečných látek (včetně CNG, LNG, vodíku), balení, označování a dokumentaci zásilek, konstrukci a vybavení vozidel přepravujících nebezpečné věci, školení řidičů a bezpečnostních opatření při přepravě, zákaz vjezdu do tunelů a dalších omezených oblastí [33].

Směrnice 2010/35/EU (TPED) – Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních [50].

ČSN 07 8304 – Tlakové nádoby na plyny – Provozní pravidla.

ČSN EN ISO 9809–1,2,3 – normy pro konstrukci a zkoušení ocelových tlakových lahví používaných v CNG přepravě [51] [52] [53].

ČSN EN 13530–1,2 – technické normy pro kryogenické nádoby (konstrukce, výroba, kontrola a zkoušení [54] [55].

ČSN EN ISO 21009-2 – Kryogenické nádoby – Stabilní vakuově izolované nádoby – Část 2: Provozní požadavky [56].

Vyhláška č. 209/2018 Sb. – Stanovuje požadavky na hmotnost, rozměry a spojitelnost vozidel [36].

ČSN EN ISO 4126-1 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 1: Pojistné ventily [57].

ČSN EN ISO 4126-2 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 2: Bezpečnostní zařízení s průtržnou membránou [58].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.3 Drážní přeprava

3.3.1 Vhodnost přepravy

Železniční přeprava syntetického metanu, ať už ve formě stlačeného nebo zkapalněného plynu představuje doplňkovou alternativu ke klasické silniční logistice především na delších trasách a pro velkoobjemové zásobování. V současné době existují pilotní projekty, které tento způsob dopravy metanu testují, avšak běžný komerční provoz zavedený není [59].

V případě ostrovních a mikrogridových řešení je využitelnost železnice omezená, a to zejména z důvodu nutnosti přítomnosti železniční infrastruktury, jako jsou vlečky, překladiště a přístupové koleje k místu spotřeby. V podmínkách ČR jsou taková místa zpravidla odříznutá od železniční sítě a vyžadují dodatečné investice do překládacích a skladovacích zařízení. V izolovaných lokalitách bez přímého napojení na plynovodní infrastrukturu by železniční doprava SNG mohla sehrát roli např. v zásobování průmyslových podniků, větších bioplynových stanic nebo decentralizovaných kogeneračních jednotek. Řešení je vhodné spíše pro specifické aplikace s vysokou spotřebou a nízkou frekvencí. Výhodné je využití MEGC kontejnerů (Multiple Element Gas Container), které umožňují intermodální přepravu CNG po železnici. Tyto kontejnery lze snadno přemístit ze železničních vozů na silniční podvozky, čímž se zvyšuje flexibilita zásobování [60].

Na mezikrajské úrovni představuje přeprava syntetického metanu technicky proveditelný a environmentálně příznivý způsob distribuce plynu, zejména tam, kde existují vhodná překladiště nebo vlečkové systémy. V kombinaci s centralizovaným zdrojem SNG (např. P2G jednotka napojená na železniční síť) může být železniční přeprava efektivní volbou pro hromadné dodávky v rámci regionu. Výhodou je v tomto případě možnost agregace dodávek na jednom vlaku, nižší zatížení silniční infrastruktury a využití stávajících areálů a vleček.

Železniční přeprava SNG je vhodná především pro pravidelnou, velkoobjemovou mezinárodní přepravu, zejména pokud existuje přímé železniční spojení mezi výrobcem a odběratelem nebo překladištěm. Česká republika disponuje hustou železniční sítí, přičemž řada průmyslových zón, rafinérií, skladů nebo energetických center je přímo napojena na železnici. V rámci dopravních koridorů TEN-T existuje možnost přepravy i na střední vzdálenosti s minimální potřebou překládky.

V evropském měřítku představuje železniční přeprava metanu velmi vhodný způsob přepravy na střední a delší vzdálenosti, především mezi přístavy, průmyslovými centry, zásobníky a odběrateli. Síť koridorů TEN-T propojuje LNG terminály, zásobníky plynu, průmyslové zóny a rozvojové oblasti obnovitelných plynů. Výhodná je možnost využití intermodálních terminálů a železničních logistických center pro překládku a skladování LNG/CNG (např. Ostrava-Paskov). Z hlediska evropských klimatických cílů a rozvoje vodíkového hospodářství představuje železnice klíčový přepravní kanál [61].

3.3.2 Úroveň technologické připravenosti

CNG se přepravuje ve vysokotlakých kontejnerech nebo tlakových lahvích, které jsou umístěny na speciálních železničních vozech, zatímco přeprava LNG probíhá v kryogenních kontejnerech typu T75, které umožňují dlouhodobé udržení nízkých teplot. Oba typy kontejnerů jsou certifikovány dle

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

RID/ADR/IMDG, čímž splňují požadavky pro železniční přepravu nebezpečných látek. Tyto kontejnery jsou komerčně dostupné, běžně používané v mezinárodní přepravě a byly nasazeny i v pilotních železničních přepravách LNG mezi přístavy a vnitrozemím. Technologická připravenost pro tyto systémy dosahuje úrovně TRL 8–9.

Moderní cisterny jsou vybaveny tlakovými a teplotními senzory, GPS modulem a telemetrickými jednotkami, které umožňují monitorování přepravy v reálném čase. Tyto systémy byly testovány a nasazeny v provozních podmínkách, TRL se pohybuje na úrovni 7–8.

Intermodální terminály v rámci TEN-T sítě jsou schopny manipulovat s LNG/CNG kontejnery pomocí portálových jeřábů a speciálních podvozků. Přestože technika samotná je dostupná, chybí často standardizované zázemí pro kryogenní manipulaci, což snižuje celkovou TRL této komponenty na úroveň 6–7.

Evropská železniční přeprava nebezpečných látek, včetně metanu, je regulována prostřednictvím RID (Řád pro mezinárodní přepravu nebezpečných věcí). RID definuje nejen typové schválení kontejnerů, ale i požadavky na školení, značení a havarijní opatření. Z hlediska legislativní připravenosti je železniční přeprava metanu plně funkční a odpovídá TRL 9 [62] [63] [64].

3.3.3 Popis druhu přepravy

Metan je po železnici přepravován buď v plynné, nebo zkapalněné podobě.

- Stlačený metan (CNG) – přepravuje se při vysokém tlaku (200–300 bar), bez změny skupenství.
- Zkapalněný metan (LNG) – přepravuje se jako kryogenní kapalina při teplotách kolem -162 °C.

Oba typy se přepravují jako nebezpečné látky třídy 2.1 (hořlavé plyny) v souladu s pravidly RID. Přeprava metanu po železnici podléhá přísným technickým a legislativním podmínkám: RID upravuje typy obalů, cisternových vozů, značení a nouzová opatření. V případě intermodální přepravy je nutné dodržet také podmínky ADR. Například kontejnery jsou naloženy na vlak a přepraveny do vnitrozemského terminálu, kde jsou následně přeloženy na kamiony. V takovém případě musí obal, značení, dokumentace a konstrukce vyhovovat oběma režimům – RID i ADR. Přeprava vyžaduje speciálně vyškolený personál, zabezpečené tratě, pravidelné kontroly a dokumentaci v souladu s RID/ADR.

Přeprava CNG:

- **MEGC kontejnery** – svazek tlakových lahví 200–300 bar, ISO rám 20' nebo 40', potrubní systém s ventily, regulátory a bezpečnostními prvky [65] [66].
- **Tlakové cisternové vozy** s pracovním tlakem 200–300 bar (ocelová tlaková nádoba, plnicí a výpustná zařízení, podvozky a rám, brzdový systém, přetlakové pojistky, bezpečnostní ventily) [67].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Přeprava LNG:

- **ISO T75 kryogenní kontejnery** s vakuovou izolací (dvojitá stěna, vakuová izolace, bezpečnostní pojistné ventily, tlakové a teplotní senzory, kontrolní ventily, tzv. trycock, systém pro budování tlaku) – snadno přeložitelné mezi vlakem, kamionem i lodí, (Obrázek 3.4) [68] [69].
- **Kryogenní železniční cisterny** (dvojitá ocelová stěna s vakuovou izolací, plnicí a výpustná zařízení, podvozky a rám, brzdový systém, bezpečnostní prvky, Obrázek 3.5) – není kontejnerového typu – určeny výhradně pro železniční přepravu [70].



OBRÁZEK 3.4: KRYOGENNÍ KONTEJNER TYPU T75 [72].



OBRÁZEK 3.5: KRYOGENNÍ ŽELEZNIČNÍ CISTERNY [71].

Technologie používaná na intermodálních terminálech

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Intermodální terminály jsou technologicky velmi sofistikovaná místa, kde se zajišťuje překládka přepravních jednotek mezi různými druhy dopravy. Jsou zde využívány:

- Překládací zařízení (portálové jeřáby, čelní nakladače, systémy horizontální překládky – bez nutnosti zvedání),
- posunovací lokomotivy,
- doplňkové technologie – systémy sledování a řízení, uzemňovací systémy [73].

Česká republika už má k dispozici technologie (speciální cisternové vozy, MEGC kontejnery, ISO T75 kontejnery), které umožňují přepravu metanu po železnici, ale zatím chybí ucelený systém, infrastruktura a pravidelný provoz, které by je umožnily použít v širším komerčním měřítku. Neexistují žádné pravidelné, komerčně provozované vlakové linky pro metan v ČR – chybí nabídka a stabilní odběratelé. V ČR existuje několik terminálů (např. Ostrava-Paskov, Lovosice, Brno-Heršpice, Uhřetěves), které mají kapacity pro nebezpečné látky, ale aktuálně pro přepravu metanu nejsou využívány.

3.3.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava metanu po železnici spadá do režimu přepravy nebezpečných věcí dle řádu RID. Metan je klasifikován jako hořlavý plyn (třída 2), a proto, obdobně jako u silniční přepravy, vyžaduje přísná bezpečnostní opatření během nakládky, přepravy i vykládky. Silniční a železniční přeprava metanu mají totožné bezpečnostní pokyny, ale existují i rozdíly ve způsobu manipulace, školení a přístupu. Hlavní rozdíly spočívají ve flexibilitě použití (kamion vs. vlak), specifických pokynech pro řidiče u silniční přepravy a monitorování procesů při železniční přepravě. Flexibilnější silniční přeprava nese vyšší rizika v oblasti manipulace s plyny, protože řidiči jsou přímo odpovědní za bezpečnost a údržbu během jízdy. Železniční přeprava je logisticky náročnější, ale má lepší možnosti monitorování a bezpečnosti díky centralizovaným systémům a školeným operátorům.

3.3.5 Legislativní omezení

Jak už bylo zmíněno, přeprava SNG po železnici spadá do režimu přepravy nebezpečných věcí dle Řádu RID. Tento řád stanovuje požadavky na klasifikaci, konstrukci přepravních prostředků, značení, dokumentaci a provozní limity. Dopravci, kteří přepravu realizují, se řídí zákonem č. 266/1994 Sb., o dráhách.

Obdobně jako u silniční přepravy je metan klasifikován jako:

- UN 1971 – Metan stlačený (CNG), třída 2, kód nebezpečnosti 23.
- UN 1972 – Metan zkapalněný (LNG), třída 2, kód nebezpečnosti 22.

Jsou povoleny pouze cisternové vozy, cisternové kontejnery, MEGC kontejnery a přemístitelné cisterny vyrobené z kovových materiálů a schválené dle RID.

Nejvyšší povolené zatížení kolejí závisí na typu trati (traťové třídy A–D), typu kolejnic a dalších faktorech. Např. na železničních tratích třídy D, které odpovídají hlavním tratím, je nejvyšší přípustné zatížení na jednu nápravu stanoveno na 22,5 tuny. Tato hodnota představuje klíčový parametr pro provozovatele železniční dopravy při plánování přeprav. Dopravce je povinen na

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

základě tohoto limitu a konstrukčních parametrů vozidla (zejména počtu náprav a hmotnosti prázdného vozu – tzv. tara) vypočítat maximální přípustnou ložnou hmotnost. Podrobné požadavky a klasifikace zatížitelnosti tratí jsou uvedeny v normě ČSN EN 15528 [74].

Stejně jako při silniční přepravě metanu je i v případě přepravy po železnici nutné dodržovat požadavky směrnice TPED 2010/35/EU, která upravuje bezpečnostní standardy a postupy posuzování shody pro přepravitelná tlaková zařízení v rámci železniční dopravy podle dohody RID [75].

3.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V současnosti jsou pro železniční dopravu k dispozici přepravní jednotky, které jsou certifikované podle RID a mohou být použity pro přepravu těchto plynů v intermodálních operacích. Specializované jeřáby a překladiště existují v několika terminálech, jako jsou Terminal Brno, Ostrava-Paskov nebo Lovosice, ale většina těchto terminálů není plně optimalizována pro masovou přepravu LNG nebo CNG. I když Česká republika má infrastrukturu pro železniční manipulaci s plynnými palivy, není dostatečně široce rozvinutá. Terminály, které by umožňovaly pravidelnou efektivní manipulaci s těmito kontejnery, zatím nejsou kompletní a rozšířené na celostátní úrovni. Intermodální terminály jsou vybaveny pro manipulaci s kontejnery, ale zatím neexistuje jednotný systém, který by zajišťoval efektivní přesuny mezi železnicí, silnicí a přístavy pro plně rozvinutou přepravu plynných paliv v komerčním měřítku. Bezpečnostní standardy a požární systémy jsou implementovány na některých překladištích, ale kontrola úniku a monitorování emisí je stále předmětem dalšího zlepšování. Dlouhodobé skladování LNG vyžaduje přísná opatření, aby se předešlo úniku nebo změně tlaku v kontejnerech.

Oproti silniční přepravě je železniční přeprava v některých oblastech v nevýhodě:

- Technické požadavky: železniční doprava čelí přísnějším technickým specifikacím (např. tiché brzdové systémy, zabezpečovače ETCS a digitální spřáhla).
- Infrastruktura: Silniční síť je rozsáhlejší a flexibilnější, což umožňuje přímé spojení mezi výrobcí a zákazníky.
- Kapacita infrastruktury: Současná železniční síť je plně využita a potřebuje rozšíření.
- Flexibilita: Železniční doprava není tak pružná jako silniční, protože je závislá na pevných trasách a jízdních řádech.
- Dostupnost: Není vždy dostupná přímo u výrobců nebo koncových zákazníků, což může vyžadovat dodatečnou manipulaci.
- Zpoplatnění: Železniční dopravní cesty jsou zpoplatněny na každý metr kolejí, zatímco silniční infrastruktura není v takové míře zpoplatněna.
- Priorita osobní dopravy: Železniční nákladní doprava je často omezena výlukami a předností osobní dopravy, což často snižuje její konkurenceschopnost.

Obecně je tento druh přepravy metanu geograficky vhodný pro průmyslové regiony, s chemickou výrobou, dobrou železniční dostupností a potřebou alternativního zásobování energií. Z pohledu výroby vodíku je železniční přeprava metanu v ČR geograficky vhodná zejména pro regiony

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

s přebytky obnovitelné elektřiny, přístupem k CO₂ a napojením na plynárenskou a železniční infrastrukturu.

3.3.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost nakládky a vykládky metanu je z technologického hlediska obdobná jak pro železniční, tak i pro silniční přepravu. V obou případech se využívají srovnatelné tlakové systémy, kompresory a bezpečnostní zařízení. Rozdíly v energetické efektivitě se projevují až ve fázi vlastní dopravy [76]. Pro účely této studie jsou využity totožné hodnoty pro nakládku a vykládku jako pro silniční přepravu. Odhadovaná spotřeba energie je:

- Nakládka: 0,12–0,15 kWh/Nm³ CH₄.
- Vykládka: 0,1–0,2 kWh/kg CH₄.

Dále je uvažována přeprava metanu železniční dopravou s využitím elektrické trakce, a to z důvodu jejího dominantního podílu na tomto typu přepravy v České republice. Měrná energetická náročnost této formy dopravy činí 0,036 kWh/tkm, zatímco u motorové trakce dosahuje hodnoty 0,120 kWh/tkm. Průměrná hodnota měrné energetické náročnosti nákladní železniční dopravy je stanovena na 0,044 kWh/tkm [76].

Při hodnocení celkové energetické bilance železniční přepravy metanu je vhodné zohlednit nejen samotný proces přepravy, ale také energetické vstupy spojené s intermodální manipulací. Tato složka zahrnuje veškeré operace spojené se samotnou nakládkou, překladem a vykládkou nákladu mezi jednotlivými druhy dopravy a její hodnota závisí na typu použité manipulační techniky, výšce zdvihu a stupni automatizace terminálu.

3.3.8 Ekonomické aspekty

Základní nákladovou položkou je trakční energie, jejíž cena se v posledních letech výrazně mění v závislosti na trhu s elektřinou a palivy. K tomu se připočítávají poplatky za použití dopravní cesty, které se podle metodiky Správy železnic mohou lišit v závislosti na poškozujících účincích vozidla na kolejovou infrastrukturu. Přeprava metanu je typicky nákladní doprava s vysokou hmotností, což znamená, že hrubé tunové kilometry budou hlavním faktorem ovlivňujícím výši tohoto poplatku [77].

Mechanismus odpařování LNG je u železniční přepravy identický se silničním. Přestože jsou konstrukční a materiálové vlastnosti nádrží obdobné, provozní podmínky železniční přepravy mohou vést k mírně vyšší míře odparu z důvodu:

- Delší přepravní vzdálenosti, které prodlužují dobu vystavení LNG teplotním vlivům.
- Více zastávek a manipulací v terminálech, které mohou narušit teplotní stabilitu nádrží.

Z ekonomického hlediska představuje odpar (BOG) významnou ztrátu, pokud není efektivně využit. Moderní železniční systémy přepravy LNG proto stále častěji integrují technologie pro zpětné zkapalnění nebo využití BOG jako paliva, čímž se snižují provozní náklady a zvyšuje se energetická efektivita přepravy [78].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Při přepravě CNG po železnici nedochází k BOG ztrátám, ale ke ztrátám odpouštěním, které vznikají při zvýšení teploty okolí a následnému nárůstu tlaku v nádrži (delší stání na slunci). Přetlakové ventily pak automaticky uvolňují malé množství plynu, aby se zabránilo poškození nádrže. Kromě toho dochází opět ke ztrátám při přečerpávání, zejména při připojování hadic, odvzdušňování potrubí a vyrovnávání tlaku mezi nádržemi.

V celkové energetické bilanci přepravního řetězce tvoří také významnou složku náklady spojené s terminálovými operacemi. Zahrnují náklady na infrastrukturu, manipulaci s nákladem, skladování a provozní náklady. Cenu za dopravu po železnici lze orientačně spočítat pomocí Kalkulačky ceny za použití dráhy jízdou vlakem na webových stránkách <https://provoz.spravazeleznic.cz/kalkulacka/>.

3.3.9 Ekologické aspekty

V případě LNG i CNG jsou procesy plnění do cisteren nebo tlakových lahví technologicky a energeticky obdobné bez ohledu na to, zda je následná přeprava realizována po silnici nebo po železnici. Kryogenní technologie používané při plnění LNG vyžadují značné množství energie pro udržení extrémně nízkých teplot, zatímco plnění CNG je spojeno s vysokotlakou kompresí. Tyto procesy jsou tedy z hlediska emisí skleníkových plynů (zejména CO₂ a metanu) srovnatelné pro oba druhy dopravy.

Hlavním faktorem ovlivňujícím spotřebu energie při železniční přepravě metanu je provoz lokomotivy. Spotřeba elektrické energie závisí především na hmotnosti vlaku, profilu trati a provozních podmínkách. U nákladních vlaků přepravujících LNG nebo CNG se spotřeba elektrické trakce pohybuje v rozmezí 1 500 až 2 000 kWh na 100 km. Hodnota emisního faktoru elektřiny je v České republice stanovena na 0,42 t CO₂/MWh. Při spotřebě 2 MWh na 100 km tak železniční přeprava metanu vyprodukuje přibližně 0,68 tuny CO₂ na 100 km.

Emisní náročnost vykládky je pak totožná jako u silniční přepravy.

3.3.10 Normy, oborové předpisy

RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí.

Směrnice 2010/35/EU (TPED) – Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních [50].

ČSN EN ISO 9809–1,2,3 – Normy pro konstrukci a zkoušení ocelových tlakových lahví používaných v CNG přepravě [51] [52] [53].

ČSN EN ISO 21009–2 – Kryogenické nádoby – Stabilní vakuově izolované nádoby – Část 2: Provozní požadavky [56].

ČSN EN ISO 4126–1 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 1: Pojistné ventily [57].

ČSN EN ISO 4126-2 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 2: Bezpečnostní zařízení s průtržnou membránou [58].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

ČSN EN IEC 60079–10–1 ed.3 – Výbušné atmosféry – Část 10–1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry [79].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.4 Lodní přeprava

3.4.1 Vhodnost přepravy

Na národní úrovni lodní přeprava metanu není vhodná. Česká republika nemá přímý přístup k moři. Jedinou možností je transport po řekách, které však čelí nízké splavnosti a nedostatečné infrastruktuře. Vhodněji se jeví transport v rámci Evropy, kdy by mohly být využity řeky jako Rýn nebo Dunaj, avšak tento druh přepravy ani zde není běžný. Na tomto místě je opět nutné zohlednit kapacitní omezení, kdy řeky nejsou vždy vhodné pro přepravu velkých tankerů nebo opět čelí nedostatečné infrastruktuře. Jiná situace nastává v případě přepravy na mezikontinentální úrovni, kdy je lodní přeprava metanu zcela zásadní a umožňuje efektivní transport LNG mezi kontinenty.

3.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologie lodní přepravy metanu se nachází na různých úrovních technologické připravenosti v závislosti na typu přepravy a míře komerčního využití. Nejvyspělejší je přeprava zkapalněného metanu pomocí námořních tankerů, která dosahuje úrovně TRL 9. Tato technologie je plně komerčně využívána a existuje rozsáhlá globální flotila LNG tankerů a přeprava probíhá v souladu se standardizovanými bezpečnostními normami a provozními předpisy.

Naopak, přeprava CNG po moři a řekách se nachází na úrovni TRL 6–7. Tato technologie je zatím využívána především v rámci pilotních projektů a prototypových řešení, zejména pro menší objemy a specifické geografické oblasti. Chybí zde široká standardizace a komerční rozšíření [80].

Specifickou kategorií je intermodální přeprava LNG po evropských řekách, která dosahuje úrovně TRL 7–8. Technologie je ověřena v provozu na vybraných vodních cestách (Rýn, Dunaj), kde již fungují pilotní projekty a infrastruktura pro překládku LNG. Přesto zatím nedošlo k plošnému rozšíření ani k jednotné standardizaci napříč evropským říčním systémem [81].

3.4.3 Popis druhu přepravy

CNG

ISO kontejnery s CNG – standardní 20'–40' kontejnery, uvnitř kterých jsou tlakové nádoby naplněné CNG. Nakládají se na běžné kontejnerové lodě, stejně jako jakýkoli jiný kontejnerový náklad. Mezi výhody tohoto typu přepravy patří možnost intermodální přepravy, flexibilita a nižší náklady na infrastrukturu. Mezi nevýhody patří omezená kapacita, která činí tento způsob vhodným spíše pro kratší vzdálenosti, a jsou zde kladeny také vyšší nároky na manipulaci a bezpečnost při překládce. Lze také využít MEGC kontejnery, které obsahují sadu válcových tlakových lahví v ocelovém rámu.

Vedle ISO a MEGC kontejnerů existují ještě specializované lodě, tzv. carryery, které jsou navrženy výhradně pro přepravu CNG. Tyto lodě mají integrované tlakové nádoby v trupu, které jsou pevně zabudované do konstrukce lodi. Výhodami tohoto prostředku je vysoká kapacita, efektivní přeprava na střední vzdálenosti (např. mezi ostrovy nebo pobřežními státy) a rychlé nakládání/vykládání bez nutnosti překládky kontejnerů. V současnosti se však jedná o řešení v rámci několika pilotních projektů (např. GASVESSEL, VOTRANS) [82] [83].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

LNG

LNG tankery jsou lodě navrženy výhradně pro přepravu velkých objemů LNG. Jejich konstrukce je přizpůsobena extrémním teplotám a bezpečnostním požadavkům. Rozlišují se tyto typy [84]:

- **Membránové tankery** – nejrozšířenější typ, s tenkou kovovou membránou a izolačními vrstvami. Vysoká efektivita a bezpečnost.
- **Typ Moss** – s kulovými nádržemi, méně efektivní, ale robustní.
- **Prizmatické tankery** – s hranatými nádržemi, vhodné pro specifické trasy.
- **Semi-membránové tankery** – kombinace výše uvedených systémů.

Tyto tankery mají obvykle dvojité trup, pokročilé systémy pro manipulaci s nákladem (čerpadla, kompresory, výparníky) a bezpečnostní prvky jako inertní plynové systémy a hasicí zařízení. Kapacita těchto tankerů se nejčastěji pohybuje v rozmezí 210 000–266 000 m³.

LNG tankery jsou globálně rozšířené a tvoří samostatnou kategorii v námořní dopravě. Rozsáhlá je také síť terminálů po celém světě. V Evropě jsou klíčovými terminály v Rotterdamu, Zeebrugge, Barceloně, Gdaňsku aj.

Stejně jako u přepravy CNG i zde existuje možnost přepravovat zkapalněný metan v ISO kontejnerech. Opět se však jedná o řešení vhodné pro menší objemy a regionální přepravu.

3.4.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava CNG a LNG pomocí ISO kontejnerů probíhá na běžných kontejnerových lodích, které nejsou speciálně navrženy pro přepravu plynu, a proto bezpečnostní opatření vycházejí především z konstrukce samotného kontejneru a jeho umístění. U CNG se jedná o tlakové nádoby, kde hlavní riziko spočívá v mechanickém poškození nebo úniku pod vysokým tlakem, zatímco LNG je extrémně studený a při úniku se rychle odpařuje, což může vést k výbuchu nebo asfyxii. Běžné kontejnerové lodě nemají integrované systémy pro detekci úniku, inertizaci ani požární ochranu specifickou pro plyn, a proto je klíčové, aby bezpečnostní opatření byla implementována na úrovni kontejneru. V tomto případě se jedná o přepravu běžnými kontejnerovými loděmi. V případě přepravy speciálními LNG nebo CNG tankery, integrované systémy existují.

Pro námořní dopravu metanu v ISO kontejnerech není nutné, aby loď splňovala ADN předpisy, ale musí vyhovovat mezinárodním předpisům IMO (např. IGC a IGF Code) a IMDG Code pro bezpečnou přepravu nebezpečných látek. Pro vnitrozemskou přepravu metanu (na řekách a kanálech v Evropě) musí loď splňovat předpisy ADN, což zahrnuje specifické požadavky na bezpečnost a konstrukci plavidla.

LNG tankery

- **Opatření při nakládce a vykládce**
 - Nádrže musí být inertizovány (např. dusíkem) a předchlazeny, aby se zabránilo prudkému odpařování LNG při kontaktu s teplejším povrchem.
 - Před každou operací se provádí kontrola zařízení, komunikace mezi lodí a terminálem a ověření dokumentace nákladu.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- Posádka lodi musí komunikovat s terminálem min. 72 hodin před příjezdem, aby bylo možné připravit zařízení a personál [85].
- **Opatření během přepravy**
 - Dvojitý trup lodi chrání nádrže před poškozením při kolizi.
 - Kontinuální monitoring teploty, tlaku a koncentrace plynů je prováděn pomocí senzorů.
 - V nákladových prostorech se udržuje atmosféra bez kyslíku, aby se zabránilo vzniku výbušné směsi.
 - Balastní systémy udržují stabilitu lodi během přepravy a kompenzují změny hmotnosti nákladu [86].
- **Opatření v případě úniku**
 - Sensory pro metan a tlakové změny okamžitě identifikují únik a uzavírací ventily se automaticky aktivují při detekci úniku a izolují postiženou část systému.
 - Odvětrávací systémy směřují plyn mimo pracovní prostory.
 - V případě úniku se aktivují bezpečnostní protokoly a evakuační plány [86].
- **Opatření v případě požáru**
 - Systémy detekují plameny i zvýšenou teplotu a aktivují se automatické hasicí systémy v nákladových prostorech, strojovnách a na palubě.
 - Posádka je školená na zvládnutí požáru LNG, včetně použití vhodných hasiv.
 - Vhodná hasiva: suchý prášek, inertní plyny (vytěsňují kyslík a zabraňují hoření), vodní mlha (ochlazuje okolí a snižuje riziko šíření požáru).
 - Nevhodná hasiva: přímý proud vody, pěnová hasiva [86].

CNG carryery

- **Opatření při nakládce a vykládce**
 - Plyn musí být před nakládkou dehydratován a zbaven síry, CO₂ a dalších nečistot a je stlačen na 300 bar pomocí palubních kompresorů.
 - Po naplnění jsou všechny ventily mezi potrubím a nádržemi uzavřeny, aby se zabránilo nechtěnému úniku.
 - Nákladové prostory a potrubní tunely jsou inertizovány dusíkem [87].
- **Opatření během přepravy**
 - Používají se kompozitní válce typu 3 (nerezová vložka a uhlíková vlákna), testované a certifikované podle pravidel ABS pro CNG lodě [88].
 - Součástí palubního vybavení jsou systémy pro detekci tlaku, teploty a úniku plynu.
- **Opatření v případě úniku**
 - Používají se senzory pro detekci metanu a poklesu tlaku.
 - Automatické ventily umožňují izolaci postižené části systému.
 - V případě úniku se aktivují evakuační protokoly [88].
- **Opatření v případě požáru**
 - Lodě jsou vybaveny aktivními i pasivními systémy požární ochrany (např. vodní clony, hasicí systémy).
 - Posádka je školená na zvládání požárních situací a použití vhodných hasiv.
 - Vhodná hasiva: suchý prášek, inertní plyny, vodní mlha.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- Nevhodná hasiva: přímý proud vody, pěnová hasiva [88].

3.4.5 Legislativní omezení

Přeprava metanu, zejména ve formě LNG, podléhá přísným mezinárodním legislativním rámcům, které zajišťují bezpečnost, ochranu životního prostředí a efektivní manipulaci s touto vysoce hořlavou látkou. Klíčové předpisy zahrnují IMDG kód pro námořní dopravu a ADN dohodu. V předchozí kapitole již byly podrobně rozebrány bezpečnostní požadavky kladené na plavidla určená pro přepravu metanu. Oba dokumenty klasifikují LNG a CNG jako hořlavé plyny a stanovují přísné požadavky na typ plavidla, bezpečnostní vybavení a odbornou způsobilost posádky. Na lodích, které převážejí metan, musí být náklad (plyn v kontejnerech) umístěn podle určitých pravidel, která upravují jeho umístění v rámci lodního trupu. Podle požadavků IMO pro umístění nákladu by kontejnery s LNG neměly být umístěny přímo vedle jiných hořlavých materiálů, motorizovaných zařízení nebo elektrických panelů, které by mohly být zdrojem jiskření nebo vysoké teploty. Kontejnery s CNG musí být rovněž umístěny v oblastech chráněných před nadměrným teplem a daleko od míst s vysokým rizikem mechanického poškození.

3.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika nemá přímý přístup k moři, což zásadně ovlivňuje možnosti přímé lodní přepravy metanu. Přesto existuje strategické napojení na evropskou síť vodních cest – Labská vodní cesta, která je splavná pro plavidla o nosnosti až 1 200 tun a propojuje ČR s přístavy v Německu a dále s Rotterdamem či Antverpami. Rozhodující podmínkou je však její splavnost v závislosti na výskytu sucha a tím nízké hladiny.

Pro přímé využití lodní přepravy LNG/CNG v rámci ČR by bylo nutné vybudovat specializované přístavy, modernizovat plavební infrastrukturu a zajistit také legislativu pro přepravu nebezpečných plynů po vnitrozemských vodních cestách [89].

3.4.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost lodní přepravy metanu je výrazně ovlivněna formou přepravovaného plynu. LNG je energeticky náročnější, ale umožňuje přepravu velkých objemů na dlouhé vzdálenosti. CNG je méně náročné, ale méně efektivní z hlediska objemové hustoty. Volba mezi LNG a CNG závisí na konkrétním logistickém scénáři, dostupné infrastruktuře a požadavcích na energetickou efektivitu.

Nakládka

Kryogenní manipulace s LNG vyžaduje udržování teplot kolem -162 °C. Taktéž přečerpávání probíhá pomocí speciálních čerpadel odolných vůči nízkým teplotám. Spotřebu energie zvyšují také bezpečnostní systémy (inertizace, detekce úniku) [90].

U CNG spotřebovává energii plnění tlakových nádob, avšak jedná se o technologicky jednodušší proces než u LNG.

Přeprava

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Jedním z hlavních energetických výdajů je samotný pohon lodě. Lodě určené pro přepravu LNG jsou obvykle velké tankery, které spotřebovávají značné množství paliva – desítky až stovky tun denně. Tato spotřeba závisí na velikosti lodi, rychlosti plavby, vzdálenosti a povětrnostních podmínkách. Energie je obvykle získávána spalováním těžkého paliva nebo přímo odpařeného LNG (BOG), což umožňuje částečně využít přepravovaný plyn jako zdroj energie. I přesto je energetická náročnost vysoká – přeprava na vzdálenost několika tisíc kilometrů může představovat spotřebu energie v řádu stovek megawatthodin [91].

Udržování nízké teploty u LNG vyžaduje aktivní chlazení a kvalitní izolaci. Vyšší spotřeba paliva narůstá kvůli hmotnosti a technologickému vybavení. Naopak odpařený plyn (boil-off) může být využit jako palivo pro pohon lodí [90].

Vykládka

LNG je přečerpáván do zásobníků kryogenními čerpadly. V tomto případě může navíc dojít k energetickým ztrátám vlivem odparu (pokud není využit) [90].

U vykládky CNG spotřeba energie zahrnuje provoz kompresních stanic a monitorování tlaku a teploty [92].

3.4.8 Ekonomické aspekty

Náklady na přepravu jsou ovlivněny řadou faktorů – od ceny pronájmu tankerů přes provozní náklady až po ztráty způsobené odparem plynu během přepravy.

Cena přepravy se v posledních letech výrazně zvýšila. Odhadem se průměrná sazba za přepravu LNG těmi nejefektivnějšími tankery pohybuje kolem 313 tisíc dolarů za den (efektivnější plavidla mají vyšší cenu za pronájem). U méně efektivních lodí se jedná o částku zhruba 277 tisíc dolarů za den [93]. Tyto náklady zahrnují pronájem plavidla, palivo pro pohon, obslužný personál, pojištění a přístavní poplatky a technologické systémy pro manipulaci s LNG.

Kromě přímých nákladů je nutné započítat také ztráty způsobené odpařováním (BOG), kdy i přes pokročilé technologie dochází k odpařování části nákladu. Moderní LNG tankery jsou vybaveny systémy pro zpětné zkapalnění BOG, které umožňují odpařený plyn znovu zkapalnit a vrátit do nádrží. Tím se minimalizují ztráty a zvyšuje se ekonomická efektivita přepravy. Ztráty způsobené tímto efektem mohou představovat až několik procent z celkového přepravovaného objemu, což při vysokých cenách LNG znamená statisícové až milionové ztráty během jedné plavby. Efektivní nakládání s odpary je proto klíčové nejen z hlediska bezpečnosti, ale také ekonomiky provozu [94] [95].

Přeprava metanu pomocí ISO a MEGC kontejnerů v sobě zahrnuje náklady na pronájem kontejneru, které se odhadují podle velikosti zhruba na 50 dolarů za den, a přepravní náklady, jejichž cena je odhadována ve výši 0,2 dolaru na km za přepravu kontejneru lodí [96] [97].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.4.9 Ekologické aspekty

Lodní přeprava metanu je z hlediska emisní náročnosti ovlivněna formou přepravovaného plynu. LNG vyžaduje kryogenní podmínky, což vede k vysoké spotřebě energie a emisím CO₂ při nakládce, přepravě i vykládce. Navíc dochází k odpařování části nákladu (BOG), který může být využit jako palivo, vrácen zpátky do nádrží nebo odvětráván, což představuje riziko emisí metanu, který má výrazně vyšší oteplovací potenciál než CO₂. Naproti tomu CNG nevyžaduje chlazení, čímž se snižují provozní emise, ale jeho stlačování a manipulace mohou vést k únikům metanu. Celkově má CNG nižší emisní náročnost během přepravy, zatímco LNG je efektivnější pro větší objemy, ale vyžaduje důsledné řízení emisí metanu.

Kromě emisí spojených s formou přepravovaného metanu je důležité zohlednit také emise vznikající přímo během plavby jako důsledek spalování paliva v lodních motorech, kdy rozhodujícími faktory jsou délka trasy a rychlost plavby.

3.4.10 Normy, oborové předpisy

European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways (ADN) – Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách.

International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code – Informace o přepravě nebezpečného zboží po moři (IMDG kód).

International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code) – Kodex zaměřený na bezpečnost při používání plynů nebo jiných paliv s nízkým bodem vzplanutí.

Směrnice 2010/35/EU o přepravitelných tlakových zařízeních (TPED) – vztahuje se na tlakové lahve pro CNG.

International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) – Mezinárodní úmluva o zabránění znečištění z lodí.

Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods (EmS) Guide – Průvodce postupy pro reakci na mimořádné události pro lodě přepravující nebezpečné zboží.

International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS) – Mezinárodní úmluva o bezpečnosti lidského života na moři.

IBC Code – Mezinárodní předpis pro stavbu a vybavení lodí přepravujících nebezpečné chemikálie ve velkém.

International Gas Carrier (IGC) Code – Mezinárodní předpis pro přepravu plynů.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.5 Potrubní přeprava

3.5.1 Vhodnost přepravy

Syntetický metan se vyznačuje kompatibilitou s existujícími zemními plynovody. Tím umožňuje snadnou integraci do stávající infrastruktury, což je podstatné z hlediska ekonomických a ekologických benefitů.

U ostrovních řešení je infrastruktura plynovodů často omezená, což činí klasickou potrubní přepravu metanu méně vhodnou. Nicméně syntetický metan zde představuje efektivní způsob, jak snížit závislost na dovážených fosilních palivech. P2G technologie mohou využít lokální obnovitelné zdroje (např. solární a větrnou energii) k výrobě metanu, který může být distribuován v menších potrubních systémech. Tím se zvyšuje energetická bezpečnost a snižuje uhlíková stopa. Při rozhodování o budování plynovodů nebo dovozu metanu pro ostrovní řešení je klíčové zvážit náklady a technické aspekty spojené s plynovody oproti flexibilitě a závislosti spojené s jeho dovozem.

V regionech s hustou sítí menších plynovodů je potrubní přeprava metanu technicky i ekonomicky vhodná. Syntetický metan zde může hrát významnou roli v přechodu k nízkouhlíkovým energetickým systémům.

Na národní úrovni je potrubní přeprava metanu široce rozšířená. Rozsáhlé distribuční sítě umožňují efektivní přepravu plynu z centrálních zdrojů, jako jsou zásobníky nebo P2G zařízení. Syntetický metan může být bez větších technických úprav přepravován stávajícími potrubími, což je klíčové pro stabilitu a nezávislost energetického trhu. Tato adaptabilita podporuje dekarbonizaci bez nutnosti rozsáhlých investic do nové infrastruktury.

Evropská unie disponuje jednou z nejkomplexnějších plynovodních sítí na světě. Potrubní přeprava metanu zde hraje zásadní roli v propojení energetických trhů. Syntetický metan umožňuje přeshraniční obchod s energií a optimalizaci využití obnovitelných zdrojů napříč členskými státy.

Na mezikontinentální úrovni čelí potrubní přeprava metanu technickým a ekonomickým výzvám, zejména kvůli vzdálenostem a nutnosti podmořských vedení. Možnosti výstavby nových mezikontinentálních plynovodů jsou omezené, avšak syntetický metan může být klíčovým prvkem dlouhodobé energetické stability v rámci mezinárodní spolupráce.

3.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologie potrubní přepravy zemního plynu je dlouhodobě zavedená a dosahuje nejvyšší úrovně TRL 9. Infrastruktura je rozsáhlá, standardizovaná a provozovaná v komerčním měřítku po celém světě. Systémy zahrnují vysokotlaké dálkové plynovody, kompresní stanice, monitorovací systémy a bezpečnostní prvky. Výzvou zůstává modernizace starších potrubí a jejich adaptace na nové typy plynů. Samotná přeprava syntetického metanu může využívat stávající plynovody bez nutnosti technických úprav, což odpovídá TRL 9.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.5.3 Popis druhu přepravy

Plynárenská infrastruktura v České republice je tvořena nejen dálkovými plynovody, ale i řadou podpůrných technologických zařízení, která zajišťují bezpečný a efektivní provoz celé soustavy. Mezi tyto objekty patří předávací stanice (vnitrostátní i hraniční), kompresní stanice, regulační stanice, zařízení na úpravu a čištění plynu a podzemní zásobníky. Plyn se potrubím pohybuje díky udržovanému tlaku, který zajišťují kompresní stanice rozmístěné přibližně každých 100 km. Podle provozního tlaku se plynovody dělí na nízkotlaké (do 5 kPa), středotlaké (5 kPa až 0,4 MPa), vysokotlaké (0,4 MPa až 4 MPa) a velmi vysokotlaké (4 MPa až 10 MPa). Preferovaným způsobem výstavby je podzemní vedení, nadzemní varianty se využívají pouze tam, kde je to technicky nebo ekonomicky výhodnější, případně tam, kde je potřeba snadný přístup k potrubí [98].

Přepravní potrubí je obvykle vyrobeno z vysokopevnostní oceli s antikorozní ochranou, avšak pro distribuční síť v městském prostředí nebo pro rekonstrukce stávajících vedení se používají také potrubí z polyetylénu s vysokou odolností proti šíření trhlin. Průměr se pohybuje od několika desítek centimetrů až po více než metr, v závislosti na požadované kapacitě, a potrubí je povětšinou uloženo pod zemí. Potrubí používané pro přepravu metanu tvoří rozsáhlou infrastrukturu rozdělenou na několik druhů:

- Sběrné potrubí vedoucí od těžebních míst,
- přepravní potrubí pro dálkové přenosy,
- distribuční potrubí dodávající metan až ke koncovým spotřebitelům.

Kompresní stanice jsou rozmístěny v pravidelných intervalech a slouží k udržení požadovaného tlaku v potrubí. Bez těchto stanic by docházelo k poklesu tlaku, a tím i ke snížení rychlosti a efektivity přepravy. V České republice existuje pět hlavních kompresních stanic zemního plynu, které zajišťují správný tlak v tranzitní a vnitrostátní přepravní síti a spravuje je společnost NET4GAS, s.r.o. Tyto stanice se nacházejí v Břeclavi, Kouřimi, Kralicích nad Oslavou, Otvicích a Veselí nad Lužnicí.

Monitoring a bezpečnostní opatření jsou zajišťovány pomocí senzorových systémů, které sledují tlak, teplotu a potenciální úniky, přičemž automatická uzavírací zařízení umožňují okamžitou reakci na jakoukoliv havárii [99] [100].

K vyrovnání spotřeby odběru zemního plynu z plynárenské sítě slouží zásobníky. Pro podzemní skladování zemního plynu se využívají tři typy zásobníků [101]:

- Kavernové (ve skalních masivech nebo vrstvách soli).
- Akviferní (porézní vodonosné vrstvy).
- Ložiskové (vyčerpaná přírodní ložiska ropy nebo zemního plynu).

3.5.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnost potrubní přepravy zemního plynu je založena na integrovaném řízení rizik v celém životním cyklu potrubí – od plánování trasy přes výstavbu a provoz až po havarijní připravenost. Trasy se volí mimo hustě osídlené oblasti a geohazardní zóny (záplavy, sesuvy půdy apod.), potrubí se dimenzuje na maximální povolený provozní tlak a používají se odolné materiály s víceúrovňovou

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

antikorozií ochranou. Proti přetlaku a únikům jsou instalovány pojistné ventily, úseková členění potrubí a možnost spouštění inspekčních prostředků [102].

Stanice a zařízení jsou navrženy podle:

- ATEX (soubor předpisů Evropské unie, které upravují požadavky na zařízení a ochranné systémy určené pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu),
- SIL standardů (Metodika pro navrhování, hodnocení a certifikaci bezpečnostních systémů).

Dále jsou vybaveny detekcí plynu, ventilací, požární ochranou a nouzovým odstavením, doplněny o kybernetickou i fyzickou ochranu. Během výstavby se kontrolují svary, provádí se tlakové zkoušky, sušení a inertizace [103] [104].

V provozu zajišťuje bezpečnost SCADA dohled, víceúrovňová detekce úniků (hmotnostní bilance, akustika, metanové senzory, odorace) a pravidelná fyzická inspekce uvnitř potrubí. Prevence poškození třetími stranami zahrnuje vytyčování a hlídky. Havarijní připravenost je zajištěna havarijními plány, rychlou izolací, řízeným odplyněním a následnou analýzou [105].

Bezpečnost podporují metodiky:

- HAZID (Hazard Identification) – identifikace nebezpečí v rané fázi návrhu nebo provozu zařízení,
- HAZOP (Hazard and Operability Study) – analýza provozních odchylek v technologických procesech),
- Bow-tie – nástroj pro analýzu příčin a následků,
- QRA (Quantitative Risk Analysis) – kvantitativní posouzení rizik k vyhodnocení pravděpodobnosti dopadů rizikových událostí,
- princip ALARP (As Low As Reasonably Practicable) – riziko musí být sníženo na takovou úroveň, která je technicky a ekonomicky rozumná [106] [107].

Při požáru nesmí být hašen požár vycházející z potrubí, pokud není uzavřen přívod plynu. Prioritou je izolace úseku potrubí a řízení odplynění.

Vhodná hasiva:

- chemický prášek (ABC), CO₂, halotron nebo jiné čisté plyny, vodní mlha.

Nevhodná hasiva:

- Voda, pěnová hasiva, písek nebo hlína [108].

3.5.5 Legislativní omezení

Potrubní přeprava zemního plynu je v České republice i Evropské unii regulována komplexním souborem právních předpisů a norem, jejichž cílem je zajištění bezpečnosti, spolehlivosti a ochrany životního prostředí. Legislativa se vztahuje nejen na samotné potrubí, ale i na provoz kompresorových stanic, regulačních zařízení, monitorovacích systémů a řízení havarijních situací.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Plynárenská zařízení v České republice jsou podle energetického zákona chráněna speciálními pásmy, která slouží k zajištění jejich bezpečného a spolehlivého provozu. Tato pásma se dělí na ochranná a bezpečnostní [109].

Ochranné pásmo je definováno jako prostor vymezený svislými rovinami ve vodorovné vzdálenosti od obrysu zařízení. Energetický zákon stanovuje následující rozsahy:

- **Technologické objekty:** 4 metry na každou stranu.
- **Sondy zásobníku plynu:** 30 metrů od osy ústí.
- **Zásobníky plynu:** 30 metrů od vnějšího oplocení.

Bezpečnostní pásma mají za cíl chránit zdraví, životy a majetek osob v případě havárie. Jejich velikost závisí na typu zařízení:

- **Zásobníky plynu (mimo sondy):** 250 m od okraje areálu.
- **Sondy zásobníku:** 80–150 m podle provozního tlaku.
- **Tlakové zásobníky zkapalněných plynů:** 20–300 m podle objemu.
- **Plynojemy:** 30–50 m podle objemu.
- **Plnírny plynů:** 100 m.
- **Zkapalňovací stanice:** 100 m.
- **Odpařovací stanice:** 100 m.
- **Kompresorové stanice:** 200 m.
- **Regulační stanice:** 10–20 m podle tlaku.

Maximální dovolený pracovní tlak je stanoven na základě pevnostních a tlakových testů, které zajišťují, že potrubí odolá běžnému provoznímu tlaku, a je regulován technickými normami, projektovými pravidly, bezpečnostními požadavky a účelem použití potrubí.

Materiály, ze kterých jsou potrubí vyráběna, musí mít certifikaci od příslušných orgánů. Tyto materiály musí odolávat korozivním látkám a efektům UV záření, které ovlivňují jejich životnost [30] [110].

Potrubí musí být pravidelně kontrolována pomocí pokročilých technologií, jako jsou inteligentní písty, které dokážou zjistit vnitřní poškození a tenčící se stěny potrubí [111]. Provozovatelé plynovodů musí mít havarijní plány zahrnující evakuaci, řízení úniku, koordinaci s IZS a informování veřejnosti [109].

Před výstavbou plynovodu je vyžadováno posouzení vlivu na životní prostředí (EIA), které zahrnuje ochranu přírody, vodních zdrojů a minimalizaci emisí.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Využití metanu jako nosiče vodíku představuje jednu z technicky realizovatelných cest pro zásobování vodíkem v České republice. Česká republika disponuje rozsáhlou sítí plynovodů pro přepravu zemního plynu, která je provozována zejména společnostmi Net4Gas (přepravní soustava) a GasNet (distribuční soustava). Distribuční síť GasNet zahrnuje čtyři regionální soustavy (Severozápadní Čechy, Východní Čechy, Severní Morava, Jižní Morava) s provozními tlaky až do 4 MPa [112]. V současné době tedy existuje rozsáhlá plynárenská infrastruktura a také zkušenosti s reformováním zemního plynu na vodík. Vybudovat by se však musela zařízení pro reformování metanu a CCS technologie (zachycování a ukládání uhlíku). Výhodami tohoto řešení je tedy využití stávající plynovodní sítě bez nutnosti rozsáhlých úprav. Nevýhodami jsou vysoké náklady na reformery a CCS technologie.

3.5.7 Energetická náročnost

Plyn se přepravuje vysokotlakým potrubím a ztráty tlaku vlivem tření a výškových rozdílů se kompenzují kompresními stanicemi, které plyn periodicky stlačují. Energetická náročnost tedy spočívá hlavně v práci kompresorů. Potrubní přeprava má velmi nízkou energetickou náročnost na jednotku přepravní práce – nižší než silniční či železniční přeprava paliv. Energetickou náročnost ovlivňuje průměr potrubí (větší průměr – nižší spotřeba energie), délka a profil trasy (delší a členitější – více kompresních stanic), tlakový režim, kvalita povrchu v potrubí a také teplota plynu. Zahraniční zdroje udávají, že spotřeba kompresorových stanic je přibližně 3 až 5 % přepravovaného plynu [113].

3.5.8 Ekonomické aspekty

Výstavba plynovodů je kapitálově velmi náročná a výsledná částka závisí na průměru potrubí, požadovaném tlaku a geologických podmínkách trasy. Významnou složkou investic tvoří také kompresní stanice, které udržují potřebný tlak v síti. Provozní náklady jsou již podstatně nižší než investiční. Zásadní položkou je spotřeba plynu/el. energie na pohon turbín v kompresních stanicích. Další provozní náklady představují mzdy, údržba, opravy a provoz systémů monitoringu a řízení. Kromě přímé spotřeby plynu na pohon kompresorů se v potrubní dopravě objevují také ztráty způsobené netěsnostmi, ztráty technologické (např. při údržbě potrubí) a ztráty z důvodu poškození infrastruktury. Dodavatel plynu QUANTUM, a.s. uvádí, že tyto ztráty činí přibližně 1,7 % z dopravovaného množství plynu [114].

Jednou z hlavních výhod syntetického metanu je jeho plná kompatibilita s existujícími plynovody, kompresními stanicemi a regulačními prvky. To výrazně snižuje investiční náklady, protože není nutné budovat novou infrastrukturu. Náklady se tak soustředí především na provozní stránku přepravy. Přímé vyčíslení nákladů na potrubní přepravu syntetického metanu zatím není běžně dostupné, ale lze uvažovat podobné náklady jako u zemního plynu (pokud je syntetický metan vtlačěn do stávající distribuční sítě). Náklady zahrnují poplatky za přepravu a distribuci, ztráty netěsnostmi a monitoring kvality plynu. Hlavní rozdíl spočívá v ceně samotné komodity, kdy syntetický metan je v současnosti až 5x–9x dražší než zemní plyn (cena syntetického metanu k roku 2025 ≈ 200–300 €/MWh bez marže/DPH/distribučních poplatků). Distribuce zemního plynu pak představuje regulovanou službu, jejímž cílem je zajistit transport plynu až k jednotlivým konečným

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

odběratelům. Ceny jsou každoročně určovány Energetickým regulačním úřadem (ERÚ), který vydává cenová rozhodnutí, která stanovují výši poplatků za distribuci pro jednotlivé kategorie odběratelů a regiony. Přehled hodnot regulované složky ceny zemního plynu v závislosti na velikosti odběru, platný od druhého pololetí roku 2025, je uveden v Tabulka 3.1.

TABULKA 3.1: CENÍK REGULOVANÉ SLOŽKY CENY ZEMNÍHO PLYNU V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI ODBĚRU [115].

ROČNÍ ODBĚR (v MWh)		CENA ZA REGULOVANÉ SLUŽBY	
Od	Do (včetně)	Jednotková cena [Kč/MWh]	Měsíční platba v Kč
0	1,89	862,17 [712,54]	126,41 [104,47]
1,89	7,56	472,43 [390,44]	187,47 [154,93]
7,56	15	428,28 [353,95]	213,95 [176,82]
15	25	394,70 [326,20]	253,30 [209,34]
25	45	330,27 [272,95]	383,15 [316,65]
45	63	270,44 [223,50]	599,60 [494,54]
ROČNÍ ODBĚR (V MWh)		CENA ZA REGULOVANÉ SLUŽBY	
Od	Do (včetně)	Jednotková cena [Kč/MWh]	Kapacitní platba [Kč/MWh]
63	630	200,42 [165,64]	184,54 [152,51]

Regulovaná služby zahrnují cenu za:

- Přepravu plynu (doprava plynu od vstupních bodů do ČR až na předávací místa regionálním distributorům),
- distribuci plynu (doprava plynu od předávací stanice přes středotlaké a nízkotlaké sítě až do domácností),
- poplatek na činnost operátora trhu (OTE+ERÚ).

Domácnosti mají menší odběr, proto platí vyšší distribuční poplatky. Firmy a velcí odběratelé patří do jiných tarifních kategorií a distribuční poplatky jsou nižší než u domácností, protože jejich odběr je stabilnější a vyšší. Velké firmy a průmysl navíc často odebírají plyn přímo z vysokotlaké sítě a v takovém případě mohou platit jen přepravní poplatky a nikoli distribuční. Regulovaná složka u velkoodběratelů tvoří menší podíl na konečné ceně oproti domácnostem.

3.5.9 Ekologické aspekty

Vtláčení syntetického metanu do přepravní soustavy obvykle nevyžaduje energeticky náročné procesy, pokud je výroba metanu lokalizována v blízkosti vstupního bodu do sítě. K únikům během vtláčení může dojít v případě, pokud nejsou zařízení správně utěsněna nebo pokud jsou provozována nesprávně.

Přeprava potrubím je energeticky efektivní, avšak vyžaduje udržování tlaku pomocí kompresních stanic, které mohou být zdrojem emisí, zejména pokud používají plyn také jako palivo. V případě elektrického pohonu z obnovitelných zdrojů lze emise výrazně snížit. Je však potřeba počítat

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

s emisním faktorem CO₂, který je stanoven u elektřiny bez certifikátu na hodnotu 0,42 t CO₂/MWh [47]. Další úniky během přepravy mohou nastat v důsledku netěsností ve spojích a ventilech.

Vtláčení syntetického metanu na koncovém místě je spojeno s minimálními emisemi, pokud nedochází k únikům. V případě následné konverze metanu zpět na vodík (např. pomocí reformátoru) je nutné zohlednit emise vzniklé při reformingu, zejména oxid uhličitý, pokud není zachytáván.

Celkově lze ekologickou bilanci potrubní přepravy syntetického metanu výrazně ovlivnit volbou energetického mixu pro kompresní stanice a technologiemi pro následné využití metanu. Při využití obnovitelné elektřiny a zachytávání CO₂ lze dosáhnout téměř bezemisního přepravního řetězce.

3.5.10 Normy, oborové předpisy

Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon).

Zákon č. 67/1960 Sb., o výrobě, rozvodu a využití topných plynů (plynárenský zákon).

Nařízení vlády č. 191/2022 Sb., o vyhrazených technických plynových zařízeních a požadavcích na zajištění jejich bezpečnosti.

ČSN 73 6005 (736005) Prostorové uspořádání vedení technického vybavení.

Vyhláška č. 488/2021 Sb., o podmínkách připojení k plynárenské soustavě.

Nařízení (EU) 2024/1787 o snižování emisí v odvětví energetiky.

ČSN EN 12007-1 – Zařízení pro zásobování plynem – Plynovody s nejvyšším provozním tlakem do 16 bar včetně – Část 1: Obecné funkční požadavky.

ČSN EN 1594 – Zařízení pro zásobování plynem. Plynovody s nejvyšším provozním tlakem nad 16 bar – Funkční požadavky.

ČSN EN 13942 (450025) – Naftový a plynárenský průmysl – Potrubní přepravní systémy – Potrubní armatury.

ČSN EN ISO 15589-1 (038392) – Naftový, petrochemický a plynárenský průmysl – Katodická ochrana potrubních dopravních systémů – Část 1: Potrubí na souši.

ČSN EN 61511-1 (180303) – Funkční bezpečnost – Bezpečnostní přístrojové systémy pro sektor průmyslových procesů – Část 1: Požadavky na systémy hardwaru a softwaru, struktura, definice.

ČSN EN IEC 62443-2-4 – Bezpečnost systémů pro průmyslovou automatizaci a řízení – Část 2–4: Požadavky na program bezpečnosti pro poskytovatele služeb IACS.

TPG 700 02 – Stanovení technického stavu nízkotlakých a středotlakých plynovodních sítí z oceli.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

TPG 700 03 – Podmínky pro provádění pracovních činností a umísťování staveb v ochranných pásmech plynárenských zařízení a pro umísťování staveb v bezpečnostních pásmech plynových zařízení.

TPG 700 04 – Stanovení technického stavu vysokotlakých plynovodů. Diagnostické metody.

TPG 702 04 – Plynovody a přípojky z oceli s nejvyšším provozním tlakem do 100 bar včetně.

TPG 702 01 – Plynovody a přípojky z polyetylenu.

TPG 702 11 – Čištění a sušení plynovodů všech tlakových úrovní po výstavbě.

TPG 703 01 – Průmyslové plynovody.

TPG 905 01 – Základní požadavky na bezpečnost provozu plynárenských zařízení.

TPG 913 01 – Kontrola těsnosti plynovodů a plynovodních přípojek.

TPG 920 21 – Protikorozní ochrana v zemi uložených ocelových zařízení. Volba izolačních systémů.

TPG 920 22 – Protikorozní ochrana v zemi uložených ocelových plynových zařízení. Provoz a údržba zařízení aktivní ochrany.

TPG 920 23 – Ochrana kovových objektů a zařízení proti atmosférické korozi.

TPG 920 26 – Katodická ochrana potrubí uložených v zemi.

TPG 938 01 – Detekční systémy pro zajištění provozu před nebezpečím úniku hořlavých plynů.

Vyhláška č. 488/2021 Sb., o podmínkách připojení k plynárenské soustavě.

HAZID / HAZOP – identifikace a analýza rizik.

ALARP (As Low As Reasonably Practicable) – princip snižování rizik.

Bow-tie – vizualizace příčin, následků a bezpečnostních bariér.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.6 Terminály

V České republice v současnosti neexistují komerční terminály pro SNG, nicméně většina stávajících infrastruktury a skladovací zařízení pro zemní plyn je z technického hlediska vhodná i pro manipulaci se SNG.

Hraniční předávací stanice zemního plynu

Klíčové uzly v přepravní soustavě zemního plynu, které zajišťují přechod plynu mezi jednotlivými státy. Slouží k objemovému a kvalitativnímu měření plynu.

Vstupní body do přepravní soustavy:

- Lanžhot (hranice se Slovenskem)
- Hora Svaté Kateřiny (hranice s Německem)
- Olbernhau (Německo)
- Waidhaus (Německo)

Výstupní body z přepravní soustavy:

- Waidhaus (Německo)
- Olbernhau (Německo)
- Hora Svaté Kateřiny (ČR)
- 84 vnitrostátních předávacích stanic pro dodávky tuzemským partnerům

Tyto stanice umožňují nejen tranzitní přepravu plynu pro zahraniční partnery, ale i vnitrostátní distribuci pro regionální plynárenské společnosti.

Podzemní zásobníky plynu

Slouží k vyrovnávání sezónních rozdílů mezi výrobou a spotřebou. V letních měsících se do nich ukládají přebytky plynu, které jsou následně využívány v zimním období, kdy dochází k odběrovým špičkám.

RWE Gas Storage CZ

- Dolní Dunajovice
- Tvrdonice
- Štamberk
- Lobodice
- Třanovice
- Háje

MND Energy Storage

- Uhřetice

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Moravia Gas Storage

- Dambořice

SPP Storage

- Dolní Bojanovice

Celková uskladňovací kapacita těchto šesti zásobníků činí 2 055 milionů m³ zemního plynu. ČR v současnosti nedisponuje vlastním vnitrostátním LNG terminálem. Důvodem je především geografická poloha bez přímého přístupu k moři. Z toho důvodu je ČR závislá na LNG terminálech v zahraničí. V reakci na energetickou krizi a snahu o diverzifikaci dodávek zemního plynu se ČR zapojila do využívání terminálů v Eemshaven (Nizozemsko). Na rok 2027 je plánováno spuštění LNG terminálu ve Stade (Německo), kde má ČR zajištěnou kapacitu 2 miliardy m³ ročně [116].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.7 Přepravní trasy

Díky technické kompatibilitě SNG se zemním plynem může Česká republika využít existující infrastrukturu a přepravní trasy pro jeho dovoz. To výrazně snižuje náklady na přechod k obnovitelným plynům a umožňuje rychlejší integraci těchto paliv do energetického mixu. Přehled hlavních plynovodů s významem pro Českou republiku, které lze z hlediska infrastruktury považovat za relevantní i pro potenciální přepravu syntetického metanu, je uveden v Tabulce 3.2.

Plynovody

TABULKA 3.2: PLYNOVODY S VÝZNAMEM PRO ČR.

Název plynovodu	Geografická lokace původu komodity	Přeprava do EU	Trasa	Přeprava do místa užití v ČR
1 Nord Stream 1 a 2	Rusko (Vyborg, Ust'-Luga)	Podmořské plynovody, 1 224 km a 1234 km	po dně Baltského moře do Německa	NET4GAS
2 Bratrství (Sojuz)	Rusko (Orenburg, Urengoj)	Plynovod 4 000 km	Rusko-Ukrajina-Slovensko	NET4GAS
3 OPAL	Rusko	Plynovod 470 km	Německo	NET4GAS
4 Gazela	Rusko	Plynovod 166 km	Česko-Německo	NET4GAS
5 Jamal	Rusko	Plynovod 1672 km	Rusko-Bělorusko-Polsko	NET4GAS
6 Baltic Pipe	Norsko	Plynovod 900 km	Norsko-Dánsko-Polsko	NET4GAS

Ad 1) Detailní popis: Plynovody Nord Stream 1 a 2

Plynovody vedoucí z Ruska po dně Baltského moře do německého Lubminu a následně do dalších evropských zemí včetně ČR. Vedou vedle sebe a jsou součástí stejného celkového systému pro dodávky plynu z Ruska do Evropy. Nord Stream 1 byl uveden do provozu v roce 2011 a na evropskou plynovodní síť je napojen prostřednictvím plynovodů OPAL (směřujícího do ČR) a NEL (směřujícího do severního Německa). Jeho maximální přepravní kapacita je až 167 milionů m³ denně. Nord Stream 2 byl dokončen v roce 2021, ale kvůli geopolitickým událostem nebyl nikdy uveden do komerčního provozu. V září 2022 byly oba plynovody vážně poškozeny sabotáží a od té doby je i Nord Stream 1 neaktivní.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Ad 2) Detailní popis: Plynovod Bratrství (Sojuz)

Jedná se o jeden z nejstarších a nejvýznamnějších plynovodních systémů pro přepravu zemního plynu z Ruska do střední a západní Evropy. Z Ruska putuje přes Ukrajinu a Slovensko do ČR. Vstupní bod do ČR je HPS Lanžhot, odkud plyn pokračuje dál přes české území. V tomto bodě má kapacitu 50 miliard m³ ročně. Z ČR je plyn dále distribuován do Rakouska a Německa. Jeho význam se kvůli geopolitickým změnám a snahám o diverzifikaci dodávek snížil. Od roku 2025, kdy vypršela a nebyla prodloužena smlouva o tranzitu zemního plynu přes Ukrajinu mezi Ukrajinou a Ruskem, je tok trvale uzavřen. Stále však zůstává důležitou součástí evropské energetické infrastruktury.

Ad 3) Detailní popis: Plynovod OPAL

Tento plynovod je klíčovou součástí evropské plynárenské infrastruktury propojující podmořský plynovod Nord Stream s evropskou přenosovou sítí, a je tak klíčovým článkem pro přepravu plynu z Ruska do střední a západní Evropy. V německém Lubminu se připojuje na plynovod Nord Stream a končí na hranicích mezi Německem a ČR, kde se dále napojuje na český plynovod Gazela. OPAL tedy slouží jako vnitrozemské pokračování Nord Streamu 1 a umožňuje přímou přepravu plynu z Ruska do střední Evropy bez nutnosti tranzitu přes Ukrajinu nebo Slovensko. Jeho maximální roční kapacita je 35 miliard m³ za rok. Po ukončení dodávek plynu z Ruska je však využíván minimálně. Stále je však klíčovým prvkem pro energetickou bezpečnost a diverzifikaci dodávek, neboť rozšiřuje možnosti dodávek mimo tradiční trasy.

Ad 4) Detailní popis: Plynovod Gazela

Plynovod Gazela je klíčová vysokotlaká tranzitní trasa pro přepravu zemního plynu přes území ČR. Jeho hlavním účelem je umožnit tranzit plynu z německého plynovodu OPAL do české přepravní soustavy a dále do západní Evropy. Začátek je v Brandově na severu Čech, kde se napojuje na plynovod OPAL. Odtud vede přes západní Čechy až k Waidhausu na hranici s Bavorskem. Celková délka plynovodu je 166 km, průměr DN 1400 a je navrženo pro provozní tlak 85 bar, což umožňuje přepravu až 33 miliard m³ plynu ročně.

Ad 5) Detailní popis: Plynovod Jamal

Plynovod Jamal–Evropa je jednou z hlavních historických tras pro přepravu zemního plynu z Ruska do západní Evropy. Jeho výstavba byla zahájena v 90. letech 20. století s cílem diverzifikovat přepravní cesty mimo Ukrajinu. Trasa plynovodu vede přes Bělorusko, Polsko a končí v Německu, kde se napojuje na plynovod JAGAL. Není přímo propojen s českou plynárenskou soustavou, avšak čas od času z něj ČR v minulosti plyn v menší míře odebírala. Tok plynu tímto plynovodem byl však kvůli geopolitickým a jiným problémům zastaven.

Ad 6) Detailní popis: Plynovod Baltic Pipe

Plynovod Baltic Pipe je strategický evropský projekt, který propojuje Norsko, Dánsko a Polsko a vytváří nový koridor pro dodávky zemního plynu do střední a východní Evropy. Jeho hlavním cílem je diverzifikace dodávek plynu a snížení závislosti na ruském plynu. Jeho kapacita je 10 miliard m³ za rok. Do ČR proudí plyn tímto plynovodem nepřímou přes Slovensko, a to díky novému propojení mezi Polskem a Slovenskem (plynovodní interkonektor).

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Terminály na LNG

Dovoz LNG do České republiky v současnosti probíhá prostřednictvím terminálu Eemshaven. Od roku 2027 je plánováno spuštění německého terminálu ve Stade, kde má Česká republika rezervovanou kapacitu 2 miliardy m³ ročně. Historicky bylo využito i terminálu v chorvatském Krku a dále připadají v úvahu např. polský terminál Świnoujście nebo Wilhelmshaven v Německu. Přehled hlavních LNG terminálů, které mají nebo mohou mít význam pro dovoz plynu do České republiky, včetně způsobu přepravy do vnitrozemí a napojení na českou plynárenskou soustavu, je uveden v Tabulka 3.3.

TABULKA 3.3: LNG TERMINÁLY S VÝZNAMEM PRO ČR.

Geografická lokace původu komodity	Přeprava do EU	Přeprava do vnitrozemských terminálů	Přeprava do místa uskladnění v ČR	Přeprava do místa užití
USA, Katar, Afrika, Jižní Amerika	Tanker-regazifikace LNG v terminálu	Eemshaven (Nizozemsko)	Nizozemská síť- Německo-Brandov/Hora Svaté Kateřiny	NET4GAS
USA, Katar, Nigérie, Alžírsko	Tanker-regazifikace LNG v terminálu	Stade (Německo)	Německá síť-Brandov/Hora Svaté Kateřiny/Waidhaus	NET4GAS

Ad1) Detailní popis: Terminál Eemshaven (Nizozemsko)

Jedná se o klíčový bod pro dovoz LNG do Česka. Společnost ČEZ si zde zajistila přepravní kapacitu až do roku 2027. Do roku 2025 do tohoto uzlu připlulo 64 lodí, které si objednala společnost ČEZ, a bylo tak do Česka dovezeno 5,8 miliardy m³ plynu. Více než 90 % tankerů naložilo LNG v USA. Tankery s LNG plují přes Atlantik do nizozemského přístavu Eemshaven, kde je umístěn plovoucí LNG terminál tvořený dvěma loděmi: Energos Igloo a Eemshaven LNG. LNG je přečerpán z tankerů do plovoucího terminálu, kde probíhá zpětné zplyňování. Poté je plyn vtlačen do nizozemské plynárenské sítě, která je propojena s německou a následně s českou (typicky přes hranici u Hory Svaté Kateřiny) [117].

Ad 2) Detailní popis: Terminál Stade

Stavba terminálu Stade byla zahájena v roce 2024 a plný provoz se očekává v roce 2027. Jedná se o pevninský terminál, který leží na Labi nedaleko Hamburku. LNG sem bude dováženo tankery především z USA, ale také z Kataru, Nigérie, Alžírsko a dalších producentů. Po zpětném zplynění bude plyn vtlačen do německé přenosové soustavy, odkud bude dále proudit do ČR [116].

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

3.8 Shrnutí

Volba vhodného způsobu dopravy SNG závisí na konkrétních podmínkách přepravy, objemu, vzdálenosti a dostupné infrastruktuře. Z hlediska kompatibility infrastruktury je SNG plně slučitelná se stávajícími systémy pro zemní plyn, což umožňuje jeho využití v existujících potrubních sítích, zásobnících i kompresních stanicích. Tato kompatibilita výrazně usnadňuje jeho integraci do současného energetického systému a podporuje jeho využití jako obnovitelné alternativy k zemnímu plynu.

Souhrnná SWOT analýza přepravy metanu je uvedena na Obrázek 3.6.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Kompatibilita s existující infrastrukturou: Lze využít stávající plynovody, návěsy/cisterny a plnicí stanice pro CNG/LNG bez zásadních úprav. Vysoká energetická hustota: Kapalný metan má cca 2,4 x vyšší objemovou energetickou hustotu než kapalný vodík, což zvyšuje efektivitu přepravy. Chemická stabilita: Metan je za běžných podmínek stabilní, nevyžaduje speciální stabilizační příměsi. Technologická připravenost: TRL 9 pro přepravu (silniční, železniční, potrubní), TRL 7–9 pro metanizaci. Flexibilita přepravy: Možnost silniční, železniční, lodní i potrubní doprav.	Náročnost výroby: Sabatierova reakce vyžaduje zvýšený tlak, zdroj CO₂ a odvod tepla. Vyšší náklady na výrobu: Cena syntetického metanu je 5–9× vyšší než cena zemního plynu (≈ 200–300 €·MWh⁻¹). Bezpečnostní rizika: Hořlavý plyn, výbušné směsi se vzduchem, nutnost přísných bezpečnostních opatření. Ztráty při přepravě: Boil-off gas u LNG, zbytkový tlak u CNG (0,5–2 %).
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Dekarbonizace energetiky a dopravy: Pokud splní všechny podmínky EU pro RFNBO, spadá do této kategorie. Rozvoj P2G technologií: Integrace přebytků OZE do plynárenské soustavy. Evropské klimatické cíle: Podpora infrastruktury pro obnovitelné plyny (TEN-T, LNG terminály). Intermodální přeprava: MEGC kontejnery umožňují kombinaci silniční a železniční dopravy. Možnost exportu/importu: Lodní přeprava LNG na dlouhé vzdálenosti.	Regulační omezení: ADR/RID/IMDG, tunelové kódy, bezpečnostní zóny. Konkurence jiných nosičů vodíku: Amoniak, kapalný vodík, LOHC... Proměnlivost cen elektřiny: Náklady na výrobu SNG závislé na ceně obnovitelné energie. Metanové úniky: Vysoký GWP (28× CO₂), riziko negativního dopadu na klima. Investiční náročnost LNG infrastruktury: Kryogenní technologie, terminály, izolace.

OBRÁZEK 3.6: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY METANU JAKO NOSIČE VODÍKU.

Pro dálkovou přepravu velkých objemů na pevnině je nejefektivnější využití potrubí, které nabízí nízké provozní náklady a stabilní dodávky. V případě mezinárodní přepravy přes oceány je nejvhodnější lodní doprava ve formě LNG. Železniční doprava představuje kompromis mezi kapacitou a flexibilitou, zejména tam, kde není dostupná potrubní síť. Silniční doprava cisternovými vozy je nejvhodnější pro lokální distribuci a zásobování menších odběratelů.

Rozhodování o vhodném alternativním nosiči pro transport vodíku je komplexní proces, který závisí na několika klíčových faktorech. Mezi hlavní patří náklady na výrobu samotného nosiče, náklady na jeho dopravu včetně požadavků na bezpečnost a infrastrukturu a náklady na zpětnou konverzi nosiče na čistý vodík v místě spotřeby. Dále je nutné zohlednit také náklady na skladování, které se liší podle fyzikálních vlastností nosiče.

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ABS	Americký úřad pro klasifikaci lodí (American Bureau of Shipping)
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
BOG	Plyn vzniklý odpařováním (Boil-of-Gas)
CNG	Stlačený zemní plyn/syntetický metan
EMS kódy	Kódy nouzových postupů
HPS	Hraniční předávací stanice
IATA	Mezinárodní asociace leteckých dopravců
IGC kód	Mezinárodní kód pro konstrukci a vybavení lodí přepravujících zkapalněné plyny v cisternách
IGF kód	Mezinárodní kód bezpečnosti pro lodě používající plyny nebo jiná paliva s nízkým bodem vzplanutí
IMDG kód	Mezinárodní námořní kód pro přepravu nebezpečného zboží
IMO	Mezinárodní námořní organizace
IPCC	Mezivládní panel pro změnu klimatu
IZS	Integrované záchranné složky
LNG	Zkapalněný zemní plyn/syntetický metan
MEGC	Víceprvkový plynový kontejner
NFPA	Národní asociace požární ochrany
P2G	Technologie přeměny elektřiny na plyn (Power-to-Gas)
RFNBO	Obnovitelná paliva nebiologického původu
RID	Předpisy pro mezinárodní přepravu nebezpečných věcí po železnici
SCADA	Systém pro dohled, řízení a sběr dat (Supervisory control and Data Acquisition)
SNG	Syntetický metan
TPED	Směrnice Evropského parlamentu a Rady o přepravitelných tlakových zařízeních

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] *Methan-bezpečnostní list* [online]. B.m.: SIAD. 3. červen 2025. Dostupné z: <https://www.siad.com/documents/261220/0/methan.pdf/cc489a97-bd9c-f386-77e0-452f122b38b6>
- [2] NOAA. *METHANE | CAMEO Chemicals | NOAA* [online]. [vid. 2025-06-02]. Dostupné z: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/8823>
- [3] *Safety Data Sheet* [online]. B.m.: MESSER. 5.6. Dostupné z: https://applications.messergroup.com/documents/1764088/60988776/Methan_tiefkalt_verfl%C3%BCssigt_D-CH4-078B_english.pdf
- [4] NOAA. METHANE, REFRIGERATED LIQUID (CRYOGENIC LIQUID). *CAMEO Chemicals* [online]. 6. červen 2025. Dostupné z: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/3872>
- [5] BOSSEL, Ulf a Baldur ELIASSON. *Energy and the Hydrogen Economy* [online]. B.m.: Alternative fuels data center. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/hyd_economy_bossel_eliasson.pdf
- [6] KÖNIG, Sebastian, Quentin BCHINI, Russel MCKENNA, Wolfgang KÖPPEL, Michael BACHSEITZ, Jörg ENTREISS, Meinhard RYBA, Julia MICHAELIS, Annette ROSER a Karin SCHAKIB-EKBATAN. Analysing the regional potential and social acceptance of power-to-gas in the context of decentralized co-generation in Baden-Württemberg. *Journal of Energy Storage* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X1730422X>
- [7] Green Methane Pilot Plants Starts Up. *Chemical Processing* [online]. Dostupné z: <https://www.chemicalprocessing.com/processing-equipment/reaction-synthesis/article/11312596/green-methane-pilot-plant-starts-up-chemical-processing>
- [8] RÖNSCH, Stefan, Jens SCHNEIDER, Steffi MATTHISCHKE, Michael SCHLÜTER, Manuel GÖTZ, Jonathan LEFEBVRE, Praseeth PRABHAKARAN a Siegfried BAJOHR. Review on methanation – From fundamentalsto current projects. *FUEL*. nedatováno, 2016(166), 276–296.
- [9] TES. *The 4 Pillars of e-NG* [online]. Dostupné z: <https://cdn.sanity.io/files/1zkfj8c9/production/fe9edd24d51cb4d0ddccffc1828f6e40078c7a5f.pdf>
- [10] GENOVESE, M., O. CORIGLIANO, F. PIRAINO a P. FRAGIACOMO. E-fuels infrastructures for heavy-duty applications: Case study of a refueling facility based on green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. nedatováno, 2025(144). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925015757>
- [11] *Česká technická norma ČSN EN ISO 11120* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-11120-078525-165959.html>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

[12] 40FT 12-tube 9000Nm3 250bar CNG Tube Skid Containers. *Minwen Cryogenic Solutions* [online]. Dostupné z: https://bl-cryo.com/e_products/show/?58-20ft-and-40ft-CNG-H2-tube-skid-Container-58.html=&utm

[13] GAZNET. *MEGC/Multi Element Gas Container* [online]. Dostupné z: <https://megccng.com/energy/megc-multi-element-gas-containers/?utm>

[14] PWENT. *Gas cylinder bundle* [online]. Dostupné z: <https://pwent.eu/en/gas-cylinder/>

[15] MADE-IN-CHINA. *CNG Tube Skid Trailer 40FT CNG Tube Trailer Station CNG Tube Skid Trailer Composite CNG Tube Trailer* [online]. Dostupné z: <https://jshuayan.en.made-in-china.com/product/VOzfLXAYvlt/China-CNG-Tube-Skid-Trailer-40FT-CNG-Tube-Trailer-Station-CNG-Tube-Skid-Trailer-Composite-CNG-Tube-Trailer.html?utm>

[16] EKC. *CNG Cascades and Bundles* [online]. Dostupné z: <https://www.ekcuae.com/products/cng-cascades-and-bundles/?utm>

[17] VÍTKOVICE CYLINDERS. *Stacionární svazky pro CNG a jiné technické plyny* [online]. Dostupné z: <https://www.vitkovicencylinders.cz/products-and-services/kopie-aplikace-cng?utm>

[18] PWENT. *Gas cylinder* [online]. Dostupné z: <https://pwent.eu/en/gas-cylinder/>

[19] G-Stor Pro Bundle-Gas Transportation. *LUXFER gas cylinders* [online]. Dostupné z: <https://www.luxfercylinders.com/product/g-stor-pro-bundle/>

[20] GAS EQUIPMENT 4 SALE. *High Pressure Tube Trailer - Type 1, 2400 psi, water volume 699 cu ft. Retested 12/2023 - Nitrogen, CNG, Hydrogen ...* [online]. Dostupné z: <https://www.gasequipmentforsale.com/listings/5902731-used-high-pressure-tube-trailer-type-1-2400-psi-water-volume-699-cu-ft-retested-12-2023-nitrogen-cng-hydrogen>

[21] PFC PICO FLOW CONTROLS. *„Virtual pipeline“ - Transport of CNG with MEGC* [online]. Dostupné z: <https://pfc.hr/virtual-pipeline-transport-of-cng-with-megc/>

[22] VPS. *EUROTANK Cryo-Container 57,5m³ LNG* [online]. Dostupné z: <https://www.vpsr.cz/media/cache/file/9f/11.-EUROTANK-Kryo-Container-574m345ft.-Swap-Body-LNG-SSSS.pdf>

[23] SIAD. *Bezpečnostní list Metan* [online]. Dostupné z: https://www.siad.com/cs/bezpecnost/bezpecnostni-list-materialu?p_p_id=com_liferay_sheet_portlet_SecuritySheetPortlet_INSTANCE_T7lbJDQJQNxs&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-3&p_p_col_count=2&_com_liferay_sheet_portlet_SecuritySheetPortlet_INSTANCE_T7lbJDQJQNxs_filename=00078_GAS_CZ.pdf

[24] *LNG Transport* [online]. B.m.: National grid. Dostupné z: https://firstresponder.ngridsafety.com/ngrid-panel-review/module7/story_html5.html

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- [25] *Tanks and cryogenic equipment* [online]. B.m.: Lapesa. Dostupné z: https://www.lapesa.es/sites/default/files/catgnl-en-07_0.pdf?utm
- [26] MISRA, JP. *Design, Operation and Safety Aspects of LNG Road Transportation and LNG satellite stations* [online]. Dostupné z: <https://www.fipi.org.in/assets/pdf/post-pdf/JP%20Misra.pdf?utm>
- [27] CHART. *Kryogenické přepravní přívěsy* [online]. Dostupné z: <https://cz.chartindustries.com/Products/Cryogenic-Transport-Trailers>
- [28] CNG+. *Mapa CNG stanic v ČR* [online]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/cerpaci-a-plnici-stanice.html>
- [29] *Zákon o bezpečnosti práce v souvislosti s provozem vyhrazených technických zařízení a o změně souvisejících zákonů* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-250?utm>
- [30] *Nařízení vlády č. 191/2022 Sb., o vyhrazených technických tlakových zařízeních* [online]. Dostupné z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/narizeni-vlady-o-vyhrazenych-tlakovych-zarizenich/?utm>
- [31] *UN 1971* [online]. B.m.: ADR BOOK. Dostupné z: <https://adrbook.com/en/2017/UN/1971>
- [32] *UN 1972* [online]. B.m.: ADR BOOK. Dostupné z: <https://adrbook.com/en/2017/UN/1972>
- [33] EVROPSKÁ HOSPODÁŘSKÁ KOMISE. *ADR Dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí* [online]. Dostupné z: [https://md.gov.cz/getattachment/Dokumenty/Silnicni-doprava/Nakladni-doprava-a-mezinarodni-osobni-doprava/Nakladni-doprava-\(1\)/Preprava-nebezpecnych-veci-dohoda-adr/Dohoda-ADR-2025/ADR-2025_komplet.pdf.aspx](https://md.gov.cz/getattachment/Dokumenty/Silnicni-doprava/Nakladni-doprava-a-mezinarodni-osobni-doprava/Nakladni-doprava-(1)/Preprava-nebezpecnych-veci-dohoda-adr/Dohoda-ADR-2025/ADR-2025_komplet.pdf.aspx)
- [34] LINDE. *Bezpečnostní list Methan stlačený nebo Zemní plyn stlačený* [online]. Dostupné z: <https://ebedox.cz/wp-content/uploads/2022/02/Metan-zemni-plyn.pdf>
- [35] GAS INNOVATIONS. *SAFETY DATA SHEET Liquefied Natural Gas (LNG)* [online]. Dostupné z: https://gasinnovations.com/wp-content/uploads/Gas_Innovations_LNG_SDS-Revision-08-22-2024.pdf?utm
- [36] *Vyhláška č. 209/2018 Sb., o hmotnostech, rozměrech a spojitelnosti vozidel* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-209>
- [37] IEA BIOENERGY. *Technologies for Flexible Bioenergy* [online]. Dostupné z: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/08/Task-44-Technologies-for-Flexible-Bioenergy.pdf>
- [38] AL-BREIKI, Mohammed a Yusuf BICER. *Liquified hydrogen vs. liquified renewable methane: Evaluating energy consumption and infrastructure for sustainable fuel* [online]. nedatováno, 350. Dostupné

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236123013923?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=9594fac3dfa6f994

[39] DOPRAVNÍ NOVINY. *Tahače Iveco, MAN, Mercedes-Benz a Scania změřily své síly* [online]. Dostupné z: <https://www.dnoviny.cz/silnicni-doprava/tahace-iveco-man-mercedes-benz-a-scania-zmerily-sve-sily>

[40] TRANSPORT & ENVIRONMENT. *LNG trucks: a dead end bridge. Emissions testing of a diesel- and a gas-powered long-haul truck* [online]. Dostupné z: https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202109_TE_LNG_trucks_a_dead_end_bridge_final.pdf

[41] CNG Compressor. *Adekom KompRESSoren* [online]. Dostupné z: <https://www.adekom.com/product/detail/index310.html>

[42] CRYOSTAR. *Magstar 260/5-H* [online]. Dostupné z: https://cryostar.com/datasheet/datasheet/Datasheet_MAGSTAR_2024.pdf

[43] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO. *Hydrogen Transport and Storage cost Report* [online]. Dostupné z: <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/659e600b915e0b00135838a6/hydrogen-transport-and-storage-cost-report.pdf>

[44] RADOSITS, Frank, Amela AJANOVIC a Simon PRATSCHNER. Costs and Perspectives of Synthetic Methane and Methanol Production Using Carbon Dioxide from Biomass-based Processes. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sdewes.org/jsdewes/pid12.0484>

[45] BAROUDI, Hisham Al, Adeola AWOYOMI, Kumar PATCHIGOLLA, Jonnalagadda KRANTHI a E.J. ANTHONY. A review of large-scale CO₂ shipping and marine emissions management for carbon capture, utilisation and storage. *Applied Energy* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/boil-off>

[46] IPCC. *IPCC Global Warming Potential Values* [online]. Dostupné z: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf>

[47] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. *Hodnota emisního faktoru CO₂ z výroby a spotřeby elektřiny* [online]. Dostupné z: https://mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2025/6/Methodika-CO2_2_2024.pdf

[48] IPCC. *Mobile Combustion* [online]. Dostupné z: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf

[49] SAJDL, Jan. Výpočet emisí CO₂. *Autolexicon* [online]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/vypocet-emisi-co2>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

[50] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/35/EU* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0035>

[51] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 9809-1 *Lahve na plyny - Znovuplnitelné bezešvé ocelové lahve na plyny - Návrh, konstrukce a zkoušení - Část 1: Lahve ze zušlechtěné oceli s mezí pevnosti v tahu menší než 1 100 MPa* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-9809-1-078521-165941.html>

[52] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 9809-2 (078521) *Lahve na plyny - Znovuplnitelné bezešvé ocelové lahve na plyny - Návrh, konstrukce a zkoušení - Část 2: Lahve ze zušlechtěné oceli s mezí pevnosti v tahu 1 100 MPa nebo větší* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-9809-2-078521-165944.html>

[53] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 9809-3 (078521) *Lahve na plyny - Návrh, konstrukce a zkoušení znovuplnitelných bezešvých ocelových lahví a velkoobjemových lahví na plyny - Část 3: Lahve a velkoobjemové lahve z normalizačně žíhané oceli*

[54] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 13530-1 (697230) *Kryogenické nádoby - Velké přepravní vakuově izolované nádoby - Část 1: Základní požadavky* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-13530-1-697230-217359.html>

[55] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 13530-2 (697230) *Kryogenické nádoby - Velké přepravní vakuově izolované nádoby - Část 2: Konstrukce, výroba, kontrola a zkoušení* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-13530-2-697230-217361.html>

[56] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 21009-2 (697258) *Kryogenické nádoby - Stabilní vakuově izolované nádoby - Část 2: Provozní požadavky*

[57] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 4126-1 *Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku - Část 1: Pojistné ventily* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-4126-1-134310-167510.html>

[58] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN ISO 4126-2 *Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku - Část 2: Bezpečnostní zařízení s průtržnou membránou* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-4126-2-134310-167516.html>

[59] BARTOŠOVÁ. Místo plynovodu vlak? LNG lze přivést do Česka i po železnici. *Ekonomický deník* [online]. Dostupné z: <https://ekonomickydenik.cz/misto-plynovodu-vlak-lng-lze-privezt-do-ceska-i-po-zeleznici/>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- [60] MYKHAILO, Illich Fyk a A.M. SHENDRYK. Natural Gas Container Transportation: the Alternative Way to Solve the World's Energy Transportation Problems. *European Researcher* [online]. nedatováno, 71. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/291824087_Natural_Gas_Container_Transportation_the_Alternative_Way_to_Solve_the_World's_Energy_Transportation_Problems
- [61] ACI EUROPE. *ACI EUROPE POSITION Trans-European Transport Network (TEN-T) Revision* [online]. Dostupné z: <https://www.aci-europe.org/downloads/resources/ACI%20EUROPE%20TEN-T%20revision%20Position%20Paper%20December%202022.pdf>
- [62] EUROPE'S RAIL. Solutions catalogue. *Europe's Rail* [online]. Dostupné z: https://rail-research.europa.eu/solutions-catalogue/?p_asid=3&p_asp_data=1&filters_initial=1&filters_changed=1&qtranslate_lang=0¤t_page_id=17657&asp_event_mode=&asp_s=
- [63] SCOTT, Nason. *LNG on the Rails* [online]. Dostupné z: <https://files.chartindustries.com/LNG%20on%20the%20Rails%20-%20Gastech%202019.pdf>
- [64] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. *Preparing for LNG by Rail Tank Car: A Readiness Review*. Wahington, DC: The National Academies Press, nedatováno.
- [65] VÍTKOVICE CYLINDERS. *Skladování a přeprava technických plynů* [online]. Dostupné z: <https://www.vitkovicencylinders.cz/products-and-services/industrial-gas-storage>
- [66] ADR. *Část 7 Ustanovení o podmínkách přepravy, nakládky, vykládky a manipulace* [online]. Dostupné z: https://md.gov.cz/getattachment/Dokumenty/Silnicni-doprava/Nakladni-doprava-a-mezinarodni-osobni-doprava/Nakladni-doprava-%281%29/Dohoda-ADR-2019/12_ADR-2019_Cast_7.pdf.aspx
- [67] HAVLÍK, Jiří. *Brzdový systém cisternového železničního vozu* [online]. B.m., 2023. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/111143/F2-BP-2023-Havlik-Jiri-BP_Havlik_online_final.pdf?sequence=-1
- [68] AIR LIQUIDE. *20 feet T75 cryogenic ISO tank* [online]. Dostupné z: <https://offshore-energies.airliquide.com/sites/aloffshore/files/2025-01/ohs-20-feet-t75-cryogenic-iso-tank-brochure-12.24-sd.pdf>
- [69] EXSIF. *T75 Cryogenic Tank Container* [online]. Dostupné z: <https://www.exsif.com/wp-content/uploads/2023/05/T75-Cryogenic-Tank-Container.pdf>
- [70] GATX. *Zagkks / GATX type 7498* [online]. Dostupné z: <https://www.gatx.eu/railcar/zagkks-gatx-type-7498/>
- [71] DELAWARE CURRENTS. *LNG Rail Tank Cars* [online]. Dostupné z: <https://delawarecurrents.org/2021/02/12/lng-rail-tank-cars-the-few-and-the-unknown/>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- [72] SINOCLEANSKY. *Kryogenní nádrž na kontejnery ISO* [online]. Dostupné z: <https://www.sinocleansky.com/cs/Cryogenic-iso-tank-container/t75-iso-tank>
- [73] INTERREG CENTRAL EUROPE – CHEMMULTIMODAL. Multimodální doprava. *Chemmultimodal* [online]. Dostupné z: <https://chemmultimodal.upce.cz/3.html>
- [74] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 15528 (736330) *Železniční aplikace - Traťové třídy zatížení pro určení vztahu mezi dovoleným zatížením infrastruktury a maximálním zatížením vozidly* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-15528-736330-224423.html>
- [75] EUROPEAN UNION. *DIRECTIVE 2010/35/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 June 2010 on transportable pressure equipment and repealing Council Directives 76/767/EEC, 84/525/EEC, 84/526/EEC, 84/527/EEC and 1999/36/EC* [online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/35/oj/eng#>
- [76] EGÚ BRNO, MPO a EFEKT. *Možnosti energetických úspor na železnici v prostředí ČR* [online]. Dostupné z: https://efekt.gov.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/moznosti-energetickych-uspor-na-zeleznici-v-prostredi-cr_1.pdf
- [77] SPRÁVA ŽELEZNIC. *Prohlášení o dráze celostátní a drahách regionálních* [online]. Dostupné z: https://www.spravazeleznic.cz/documents/50004227/163491491/cj079749_Prohl%C3%A1%C5%A1en%C3%AD+2025_CaR_5+zm%C4%Bna_web.pdf/9de8052b-749f-4b6f-9af4-129409e85b5b
- [78] WARTSILA. *BOG Reliquefaction for LNG Terminals* [online]. Dostupné z: https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/ogi/lng-solutions/bog-handling-lng-terminals.pdf?sfvrsn=f12a5643_7
- [79] ČESKÁ AGENTURA PRO STANDARDIZACI. ČSN EN IEC 60079-10-1 ED.3 (332320) *Výbušné atmosféry - Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů - Výbušné plynné atmosféry* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iec-60079-10-1-ed-3-332320-244432.html>
- [80] DNV AS. *DNV Technology Progress Report 2021* [online]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/517973624/DNV-Technology-Progress-Report-2021#page=40>
- [81] EUROPEAN COMMISSION. *Assessment of potential of maritime and inland ports and inland waterways and of related policy measures, including industrial policy measures* [online]. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/4ec82fa8-0dc6-11eb-bc07-01aa75ed71a1>
- [82] WHITE, C.N., S.M. MCCLURE, S.J. ROWE a D.A. FRIIS. *CNG CARRIERS APPLIED TO REMOTE MARGINAL GAS FIELD DEVELOPMENTS* [online]. Dostupné z: <https://acma-inc.com/assets/cng-carriers-applied-to-remote-marginal-gas-field-developments.pdf>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- [83] MOUZAKIS, Panagiotis S. *Compressed Natural Gas (CNG) Carrier Design* [online]. Dostupné z: https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/46908/PostGrad_Mouzakis012.pdf?sequence=1
- [84] Different Types and Sizes of LNG Carriers. *Maritime page* [online]. Dostupné z: <https://maritimepage.com/types-and-sizes-of-lng-carriers/>
- [85] CASEY, Jessica. *Handling LNG* [online]. B.m.: LNG industry. Dostupné z: <https://www.lngindustry.com/special-reports/09012024/handling-lng/>
- [86] IMO. *Resolution MSC.370(93)* [online]. Dostupné z: <https://www.mardep.gov.hk/filemanager/en/share/msnote/pdf/msin1547anx1.pdf>
- [87] GASVESSEL. *Documentation providing a master hazard register and a framework for quantitative risk assessment* [online]. Dostupné z: <https://www.gasvessel.eu/wp-content/uploads/2019/06/D8.2-Documentation-providing-a-master-hazard-register-and-a-framework-for-quantitative-risk-assessment.pdf>
- [88] *CNG Transportation under the GASVESSEL project perspective* [online]. Dostupné z: https://www.gasvessel.eu/wp-content/uploads/2018/11/ABS-presentation-EMGC2019_Powerpoint16-9.pdf
- [89] PĽAVBA A VODNÍ CESTY. *Labská dohoda schválená Parlamentem ČR!* [online]. Dostupné z: https://www.rvc.gov.cz/admin-data/storage/get/394-vcap_2-2024.pdf
- [90] ELENGY. *LNG CARGO TRANSFER CALCULATION METHODS AND ROUNDING-OFFS* [online]. Dostupné z: <https://www.elengy.com/sites/default/files/contents/document/notecalculatationandroundingoffscargotransferaugust20220.pdf>
- [91] TODTMANN, Feliks. Ne, 20 tankerů LNG nespotřebuje na cestě z USA do Evropy tolik paliva jako všechna auta na světě za rok. *Na pravou míru* [online]. Dostupné z: <https://napravoumiru.afp.com/doc.afp.com.329T9JC>
- [92] WAGNER, Jan V. a Steven van WAGENSVELD. *Marine Transportation of Compressed Natural Gas A Viable Alternative to Pipeline or LNG* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/241784033_Marine_Transportation_of_Compressed_Natural_Gas_A_Viable_Alternative_to_Pipeline_or_LNG
- [93] O ENERGETICE.CZ. *Sazby za přepravu LNG se zvyšují, Evropa to může pocítit ve vyšší ceně plynu* [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/sazby-za-prepravu-lng-se-zvysuji-evropa-to-muze-pocitit-ve-vyssi-cene-plynu>
- [94] SHIPROPE. *What is Boil-Off Gas (BOG) and How is it Managed?* [online]. Dostupné z: <https://shiprope.com/what-is-boil-off-gas-bog-and-how-is-it-managed/>
- [95] WÄRTSILÄ. *A new standard of BOG management* [online]. Dostupné z: <https://www.wartsila.com/insights/article/a-new-standard-of-bog-managment>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

- [96] IRSA. Rent ISO Tank for Export | Cost, Logistics, Safety & Documentation. *IRSA logistics* [online]. Dostupné z: <https://irsalogistics.com/rent-iso-tank-for-export/>
- [97] KUDLÁČEK, Patrik. *Rostoucí náklady na lodní přepravu mohou zvyšovat inflaci – od minulého roku se zdražila až o 664 %* [online]. Dostupné z: <https://finex.cz/rostouci-naklady-na-lodni-prepravu-vyvolavaji-obavy-z-inflace-5-nejvyznamnejsich-duvodu-proc-se-jejich-cena-v-dohledne-dobe-nesnizi/>
- [98] O ENERGETICE.CZ. *Plynárenství v ČR - dodávka plynu a základní statistiky* [online]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plynarenstvi/plynarenstvi-v-cr-dodavka-plynu-zakladni-statistiky>
- [99] DARSALIYA, N.M., R.R. FARUKHSHINA a Z.E. SADDIK. Transportation of hydrogen by main gas pipelines as a methane-hydrogen mixture. *Extrica* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.extrica.com/article/23097>
- [100] WITKOWSKI, Andrzej, Andrzej RUSIN, Mirosław MAJKUT a Katarzyna STOLECKA. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. nedatováno. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308016118301698>
- [101] Podzemní zásobníky plynu (PZP). *Muzeum naftového dobývání a geologie* [online]. Dostupné z: <https://muzeumropy.cz/podzemni-zasobniky-plynu-pzp/>
- [102] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *API Standards: International usage report* [online]. Dostupné z: https://www.api.org/-/media/apiwebsite/products-and-services/2025_intnl-usage_report_web-final.pdf
- [103] EU. *Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/34/EU ze dne 26. února 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se zařízení a ochranných systémů určených k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu (přepracované znění)* [online]. Dostupné z: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=SB&CP=32014L0034>
- [104] NENVITECH. *What is SIL* [online]. Dostupné z: <https://www.nenvitech.com/news/what-is-sil/>
- [105] ARYA, Adarsh. *Pipeline Integrity Management* [online]. Dostupné z: <https://ijisrt.com/assets/upload/files/IJISRT22APR1295.pdf>
- [106] CCPS. *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures* [online]. 3. vyd. USA: John Wiley and Sons Inc., nedatováno. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=fw5vuel7EA0C&printsec=frontcover&hl=cs#v=onepage&q&f=false>
- [107] UIJT DE HAAG, P.A.M. a B.J.M. ALE. *Guidelines for quantitative risk assessment* [online]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), nedatováno. Dostupné z: <https://content.publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/documents/PGS3/PGS3-1999-v0.1-quantitative-risk-assessment.pdf>

Metan jako alternativní forma přepravy vodíku

[108] BOZP.CZ. *Hasicí přístroj. Jaké jsou druhy a který v jaké situaci použít* [online]. Dostupné z: <https://www.skolenibozp.cz/aktuality/druhy-hasici-pristroju/>

[109] *Zákon č. 458/2000 Sb., Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>

[110] ČSN EN 15001-2 (386420) *Zařízení pro zásobování plynem - Plynovody s provozním tlakem vyšším než 0,5 bar pro průmyslové využití a plynovody s provozním tlakem vyšším než 5 bar pro průmyslové a neprůmyslové využití - Část 2: Podrobné funkční požadavky pro uvádění do provozu* [online]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-15001-2-386420-253231.html>

[111] HLINČÍK, Tomáš, Ondřej PROKEŠ a Daniel TENKRÁT. Ježkování – moderní nástroj k údržbě a diagnostice plynovodů. *Paliva* [online]. 2012. Dostupné z: <https://paliva.vsch.cz/cz/archiv-clanku/detail/15>

[112] GASNET. *Obecné informace - Mapa distribuční soustavy* [online]. Dostupné z: <https://www.gasnet.cz/distribucni-soustava/informace-o-soustave/obecne-informace>

[113] ELSHIEKH, T.M. Optimization of Fuel Consumption in Compressor Stations [online]. nedatováno. Dostupné z: https://www.spe.org/media/filer_public/c3/5d/c35dfecf-a891-40b6-8399-88f840f65c7c/15_spe173888.pdf

[114] QUANTUM A.S. *Q-Info 01* [online]. Dostupné z: https://www.hornismrcne.cz/files/quantum-zpravodaj-2023-12-22-aktuality/q-info_01_mail-1.pdf

[115] *Cenová nabídka za regulované služby distribuce zemního plynu od MND*

[116] VLÁDA ČESKÉ REPUBLIKY. Vláda plní své programové prohlášení a Česko posiluje dlouhodobou energetickou bezpečnost v LNG. ČEZ získal kapacitu v německém terminálu Stade. *Vláda České republiky* [online]. Dostupné z: <https://vlada.gov.cz/cz/media-centrum/aktualne/vlada-plni-sve-programove-prohlaseni-a-cesko-posiluje-dlouhodobou-energetickou-bezpecnost-v-lng--cez-ziskal-kapacitu-v-nemeckem-terminalu-stade-210491/tmplid-47/#>

[117] SKUPINA ČEZ. *LNG terminál v nizozemském Eemshavenu slaví tři roky. Připlulo do něj 64 lodí s plynem určeným pro Česko. Většinou z USA, žádná z Ruska* [online]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/nextcez/cs/pro-media/tiskove-zpravy/lng-terminal-v-nizozemskem-eemshavenu-slavi-tri-roky.-priplulo-do-nej-64-lodi-s-plynem-urcenym-pro-cesko.-vetsinou-z-usa-zadna-z-ruska-225062>

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4 Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Petra Drímalová, Ľubomíra Machů

VŠB – Technická univerzita Ostrava, CEET, CENET, 17. listopadu 2172/15, 708 00 Ostrava-Poruba

4.1 Obecné informace

4.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Toluen je již dlouho považován za důležitý chemický produkt, který nachází široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích, například při výrobě barev, laků a rozpouštědel. V posledních letech se však vědecká komunita a průmysl zaměřily na jeho potenciál jako takzvaného kapalného organického nosiče vodíku (LOHC). Vodík je obecně vnímán jako jeden z nejperspektivnějších nosičů energie budoucnosti, neboť má vysokou hustotu energie na jednotku hmotnosti. Jeho praktické využití však naráží na komplikace spojené s bezpečným a ekonomicky výhodným skladováním či přepravou [1], [2].

Kapacita ukládání vodíku v kapalné fázi toluenu, resp. jeho nasycené formy methylcyklohexanu (MCH), je jednou z klíčových technických vlastností pro logistiku. MCH nabízí objemovou hustotu až $47 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$, což je zhruba 1,5x více než u kapalného vodíku (LH_2) a 8x více než u vodíku stlačeného na 700 bar. Díky tomu lze na jeden cisternový vůz přepravit výrazně větší množství vodíku, aniž by bylo nutné používat extrémně masivní tlakové nádoby nebo kryogenní izolaci [3], [4].

Chemická stabilita nosiče je pro přepravu zásadní. Aromatické jádro toluenu je velmi inertní vůči polymerizaci i oxidaci za běžných transportních podmínek ($-20 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+50 \text{ }^\circ\text{C}$). Po hydrogenaci na MCH se stabilita zvyšuje, protože MCH je za okolní teploty a tlaku termodynamicky stabilní kapalina bez sklonu k výbuchu či samooxidaci. Žádné vedlejší produkty ani rozkladné sloučeniny se nevytvářejí při standardním skladování po dobu několika měsíců až let [5], [6].

Další výhodou je nízká viskozita a relativně malá hustota MCH, která usnadňuje čerpání i manipulaci s kapalným nosičem v běžných cisternách. Bod varu MCH je nižší než u toluenu, ale stále zajišťuje, že při okolní teplotě nevznikají nebezpečné výpary. V uzavřených cisternách tak lze provozovat jednoduché pasivní odvětrávání. Tyto vlastnosti společně umožňují vybudování logistických tras, jež vyžadují minimální úpravy standardní infrastruktury pro přepravu ropných produktů [6], [7].

4.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

MCH i toluen jsou v rámci evropské chemické legislativy zařazeny jako hořlavé kapaliny kategorie Flam. Liq. 2 podle nařízení (ES) č. 1272/2008 (CLP), s bodem vzplanutí pod $23 \text{ }^\circ\text{C}$ (MCH $19 \text{ }^\circ\text{C}$, toluen $-4 \text{ }^\circ\text{C}$). Tato klasifikace vyžaduje pro obě kapaliny zvláštní obaly s označením „hořlavina“ a při přepravě dokumentaci upravující manipulaci s materiálem kategorie UN 2296 (MCH) a UN 1294 (toluen) [8], [9], [10].

Podle NFPA 704, standardu pro rychlou identifikaci chemických nebezpečí, mají toluen a MCH shodné profily:

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Zdraví (modrá) 1 – průměrné dráždivé účinky.

Hořlavost (červená) 3 – velmi hořlavé páry.

Reaktivita (žlutá) 0 – chemicky stabilní za normální teploty a tlaku.

Speciální upozornění (bílé pole) není uvedeno žádné zvláštní riziko [11], [12].

Obě látky podléhají dále předpisům ADR/RID pro silniční a železniční přepravu. Cisterny musí mít ventilační systémy s tlakovými pojistkami, elektrostatické uzemnění a v blízkosti plnicích míst se vymezují EX zóna 1 či 2 podle směrnice ATEX (2014/34/EU). Veškeré armatury a hadice musí být certifikovány pro tlaky až 5 bar a teploty do 80 °C, aby se minimalizovalo riziko netěsností a výbuchu páry [9], [10], [13].

Z hlediska toxikologického nebezpečí toluen patří mezi látky STOT RE 2 (chronické poškození nervové soustavy při dlouhodobé expozici) a Asp. Tox. 1 (riziko aspirace při požití). MCH je méně toxický (STOT SE 3 – dráždí dýchací systém), avšak i u něj vyžadují přechodné koncentrace par nad 200 ppm v pracovním ovzduší použití odsávacích systémů a respirátorů třídy A (EN 14387) [14], [15].

Při vykládce a překládce se doporučuje temperovat obě kapaliny nad bodem vzplanutí, aby se zabránilo kondenzaci vodní páry a vzniku potenciálně výbušné směsi. Doporučená manipulační teplota je mezi 20 °C a 30 °C. Zařízení musí být vybaveno bezpečnostními přetlakovými ventily a kontinuálním monitoringem koncentrace par pomocí infračervených senzorů. Pro případ úniku je nutné připravit havarijní plán v souladu se Směrnicí Seveso III bis (Directive 2024/1230), a to včetně záchytných jímek a aktivních sorpčních základů pod nádržemi [16].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.2 Silniční přeprava

4.2.1 Vhodnost přepravy

Použití toluenu a MCH jako nosičů vodíku v rámci technologie LOHC se jeví jako mimořádně vhodné řešení pro silniční přepravu vodíku na krátké až střední vzdálenosti. Jejich kapalná forma za běžných teplotních a tlakových podmínek znamená, že přeprava může probíhat pomocí stávající infrastruktury – především autocisternami běžně používanými pro přepravu ropných produktů. To významně snižuje náklady spojené s vybudováním nových logistických systémů a zároveň umožňuje rychlou integraci do stávajících dodavatelských řetězců [17], [18].

Pro ostrovní a mikrosíťová řešení je silniční přeprava LOHC v podobě cisteren s MCH ideální volbou (Obrázek 4.1). Díky využití stávajících ADR-certifikovaných cisternových kontejnerů lze projekt rychle instalovat i v odlehlých lokalitách, aniž by bylo nutné stavět drahé vysokotlaké nebo kryogenní stanice [9], [10], [19].



OBRÁZEK 4.1: SILNIČNÍ PŘEPRAVA VODÍKU V TOLUENU [20].

Na úrovni krajů poskytuje silniční síť flexibilitu pro dodávky „nabitého“ LOHC do více distribučních uzlů, kde je cisternou dopravován MCH do centrálních dehydrogenačních stanic. Regionální pilotní projekt HySTOC ukázal, že díky standardizovaným ADR cisternám lze efektivně zásobovat průmyslová centra napříč kraji bez dalšího přizpůsobení silniční logistiky [9], [10], [21].

Pro národní rozměr je silniční přeprava LOHC výhodná tam, kde chybí plošná vodíková síť či potrubí. Velkokapacitní cisterny mohou distribuovat tisíce tun MCH ročně mezi výrobními elektrolyzéry a průmyslovými odběrateli či strategickými sklady [22], [23], [24].

Ve vzdálenější evropské dimenzi funguje silniční přeprava LOHC jako doplněk k železniční a lodní dopravě. Díky harmonizovaným pravidlům ADR 2025 je možné designovat dlouhé silniční trasy napříč státy bez nutnosti měnit cisternové vozy či dokumentaci. Pro evropské dodávky mezi jihovýchodem (přebytky OZE) a střední Evropou poskytují LOHC cisternové trasy rychlou alternativu tam, kde ještě neexistují plynovody čistého vodíku [17], [18].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologická připravenost systému (TRL) toluen–MCH se dnes nachází v pokročilé fázi, ale její úroveň se výrazně liší podle jednotlivých článků řetězce. Silniční přeprava LOHC dnes dosahuje TRL 8–9 u samotné logistické infrastruktury, protože cisterny na aromatické kapaliny jsou v petrochemii nasazeny desítky let a odpovídají všem normám ADR/RID. Standardní cisternové vozy s objemem 30 000 l pro toluen i MCH jsou schválené pro přepravu nebezpečných látek, včetně elektrostatického uzemnění a tlakového odvětrávání. V oblasti řízení a monitoringu (SCADA, detekce par) dosahuje silniční logistika TRL 8, neboť technologie úniku a ochrany proti výbuchu jsou běžně integrované do provozů chemických skladů [21], [23], [25], [26].

Mobilní dehydrogenační jednotky určené k on-board či lokální dehydrogenaci MCH dosahují dnes TRL 7–8. Pilotní dodávky provozují kontejnery s denní kapacitou stovek kilogramů H₂, včetně kompletního tepelného a řídicího systému. Pro komerční nasazení v regionálních sítích chybí ještě několik finálních certifikací a optimalizace start-stop cyklů [27], [28].

Kompletní integrační řetězce „elektrolýza – LOHC – silniční přeprava – dehydrogenace“ jsou aktuálně na TRL 6–7, jak dokládá projekt HySTOC, který spojuje elektrolyzéry, cisternovou logistiku a centrální dehydrogenační stanici v reálné provozní síti. Závěrečná fáze plného komerčního provozu ve více než gigawattovém měřítku zatím chybí, ale probíhající konsorcia připravují větší piloty [21], [29], [30], [31].

4.2.3 Popis druhu přepravy

Silniční přeprava LOHC využívá především cisternové vozy typu LGBF, navržené pro kapalné hořlavé látky. Tyto vozy mají vnitřní nerezovou nádrž s objemem kolem 30 000 l, vybavenou tlakově pojistnými ventily a elektrostatickým uzemněním. Pro LOHC se běžně používá pasivní ventilace s aktivním filtrem, která udržuje tlak v cisterně na úrovni maximálně 0,2 bar nad atmosférickým, a tím zabraňuje úniku par. Na čelní a zadní části vozu jsou instalována jiskrově bezpečná čerpadla s kapacitou až 200 m³/h pro rychlé vykládání a nakládání MCH či toluenu [21], [32], [33].

Existují dvě hlavní varianty přepravy LOHC:

Klasické cisternové dodávky – mezi výrobními či skladovacími uzly. Jedná se o lineární trasy, kde každá cisterna vozí vždy „nabitě“ MCH k odběrateli a zpět „vybitý“ toluen.

Intermodální kontejnery (swap-body) – standardizované kontejnery s LOHC nádrží, jež lze překlápět mezi silničním vozidlem, železničním vagónem či lodním kontejnerem. Tato varianta zajišťuje maximální flexibilitu a minimalizuje dobu stání vozidel [34], [35].

Podmínky pro přepravu zahrnují teplotní rozsah –20 °C až +50 °C, při němž zůstávají fyzikálně-chemické vlastnosti LOHC v bezpečných mezích. Vozidlo musí být vždy vybaveno EX zónovými štítky pro zónu 1 (pára) a 2 (možná přítomnost páry), a personál musí disponovat platným ADR průkazem pro látky třídy 3. Trasy se plánují tak, aby se minimalizovala délka jízd v husté městské zástavbě

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

a maximalizovaly jízdy po hlavních komunikacích se záchytnými prostory pro nouzové odstavení vozidla [9], [10], [34], [35].

Typické uspořádání přepravního prostředku pro LOHC:

- nerezová spirálovitá nádrž s termální izolací (50 mm minerální vata),
- integrovaný SCADA systém pro monitoring tlaku, teploty a detekci úniků par,
- přetlakové bezpečnostní ventily a vzduchové filtry s aktivním uhlím,
- modulární čerpadlo se zpětným ventilem a pojistným tlakoměrem,
- ochranné rámy a sady pro nouzové uzavření ven [36], [37], [38].

Silniční přeprava LOHC je rozšířená v petrochemických regionech. Nasazení LOHC cisteren se rychle rozšiřuje díky pilotním projektům [28], [29].

4.2.4 Bezpečnostní opatření

Toluen a MCH jsou klasifikovány jako hořlavé kapaliny (UN 1294 a UN 2296), což vyžaduje zavedení přísných bezpečnostních opatření během nakládky, přepravy i vykládky [9], [10].

Při nakládání LOHC (toluen či MCH) je nezbytné zajistit, aby veškerý personál disponoval odpovídajícím vzděláním a ADR průkazem pro třídu hořlavin 3. Cisterny musí být elektrostaticky uzemněny před připojením hadic a je nutné používat jiskrově bezpečná čerpadla. Veškeré ventily a spoje se ověřují na netěsnosti pomocí detektorů par, případně sajících sond, aby se zabránilo unikání hořlavých par do pracovní zóny [34], [39].

Během přepravy platí zákaz kouření a provozování otevřeného ohně v okolí cisterny. Vozidlo musí být vybaveno hasicími přístroji a nouzovým odvětráváním cisterny, které se aktivuje automaticky při překročení tlaku 0,3 bar. Řidič pravidelně kontroluje ukazatele tlaku a teploty na palubním SCADA panelu a v případě neobvyklého růstu parametrů provede okamžité odstavení a informování dispečinku [25], [36].

Při vykládce se používají uzavřené kompaktní připojovací systémy (dry-break couplings), které minimalizují kontaktní plochu a riziko úniku. Pro zachyt kapalin v prostoru překladiště jsou instalovány záchytné vany o objemu minimálně 110 % největšího naloženého objemu. Všechny povrchy pod cisternou musí být nepropustné a opatřené absorpčními sorbenty vhodnými na ropné produkty. V případě úniku se zasažená oblast okamžitě opláchne suchými sorbenty a odpadní sorbent se sbírá do uzavřených nádob pro pozdější likvidaci jako nebezpečný odpad [39].

V případě požáru LOHC platí, že vodní mlha a pěnová hasiva typu AR-AFFF jsou nejvhodnějšími prostředky pro potlačení plamenného hoření kapalin na povrchu. CO₂ lze použít pro izolaci menších požárů. Suchý prášek (ABC) má omezenou účinnost u silných ropných požárů a nesmí se používat u hlubších požárů v záchytných vanách, kde by došlo k prudkému rozvíření hořících kapalin. Po uhašení je nutné ochlazovat okolní nádrže mlhou, aby se zabránilo přehřátí konstrukcí a opětovnému vzplanutí [40], [41].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.2.5 Legislativní omezení

Silniční přeprava LOHC podléhá nejen všeobecným pravidlům ADR, ale i národním dopravním předpisům o hmotnostech a rozměrech vozidel. Podle ADR 2025 je pro kapaliny třídy 3, tedy i toluen (UN 1294) a MCH (UN 2296), maximální objem nádrže pro jednu cisternu omezen na 60 000 l při tlakovém limitu 0,5 bar nad atmosférickým. Pro větší objemy musí být náklad rozdělen mezi více vozidel nebo použity speciální soupravy se schválením příslušného správního orgánu [9], [10].

České technické předpisy doplňují ADR o omezení celkové hmotnosti soupravy. Maximální povolená hmotnost tahače a návěsu spolu je stanovena na 48 000 kg, přičemž na hnací nápravu tahače má připadat více než 11 500 kg a na návěs maximálně 10 000 kg. Překročení těchto limitů vyžaduje zvláštní povolení (např. povolení k provozu na přetížené silnici) nebo rozložení nákladu na více vozidel [42].

Dalším legislativním omezením je hmotnostní objemová hustota LOHC. Protože MCH má vyšší hustotu než běžné palivo, nádrž o objemu 30 000 l může vážit až 24,6 t bez obsahu kapaliny a s nákladem dosáhne hrubé hmotnosti přes 50 t, což by překročilo národní limit. V praxi proto cisterny pro LOHC neplní úplný objem. Běžně se využívá max. 80 % plnicího objemu, aby nedocházelo k přetížení a zároveň zbyl prostor pro tepelnou dilataci kapaliny [19], [43].

Pro řidiče a dopravce platí povinnost mít platné ADR osvědčení, pravidelné přezkoušení každých 5 roků a školení o nákládce a reakci na havarijní situace. Každá cisterna musí nést bezpečnostní tabulky (oranžové tabulky s oranžovým číslem nebezpečnosti a UN číslem) a kompletní přepravní doklady (nákladní list, bezpečnostní listy). Nedodržení těchto požadavků je sankcionováno pokutou a zákazem dalšího provozu vozidla [42].

Konečně, digitální tachografy a systém e-TOLL evidují trasu i dobu jízdy, přičemž dopravce musí zajistit, aby množství LOHC nenarušilo hmotnostní limity pro příslušnou kategorii silnic (např. 40 t na dálnici D1, 18 t na místních komunikacích). Porušení může vést ke ztrátě bodů na řidičském průkazu a vysokým sankcím v rámci silničního provozu [42].

4.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika disponuje rozsáhlou sítí ADR-certifikovaných cisternových vozů a moderní silniční infrastrukturou, která je vhodná pro přepravu kapalných aromatických nosičů vodíku [42].

Chybějícím článkem zůstává průmyslový dehydrogenační blok, který by dokázal přijímat „nabité“ cisterny s MCH a uvolňovat vodík pro národní síť. Studie odhaduje investici do takového zařízení na 35–45 mil. EUR za kapacitu 10 t H₂/den, přičemž optimální umístění vidí v chemických areálech v Ústeckém nebo Moravskoslezském kraji, kde je přístup k odpadnímu teplu z tepláren a hutí [44], [45].

Geograficky je Česká republika rozdělena na oblast severozápadní s vysokým potenciálem odpadního tepla z uhelných elektráren a jihovýchodní, kde rostou přebytky fotovoltaické energie. EGÚ Brno doporučuje model, kdy se MCH tankuje na jihozápadě a vlakově či silničními cisternami dopravuje k dehydrogenaci na severu, čímž se minimalizují přepravní emise a maximalizuje využití OZE [46].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Výhodou tohoto řešení je synergie s existující infrastrukturou. Cisterny, silnice i odběrná místa (průmyslové parky, vodíkové čerpací stanice) mohou fungovat za stávajících podmínek. Naopak hlavní nevýhodou jsou vysoké kapitálové náklady na dehydrogenační blok a potřeba legislativního schválení pro zásobování devíti regionů, který potvrzuje konkurenceschopnost LOHC při objemech nad 1 GWh jen za předpokladu využití odpadního tepla [47].

Rozhodovací proces pro doporučení LOHC pro české sezónní zásobování vodíkem vedl k závěru, že systém toluen–MCH je nejvhodnější pro sezónní akumulaci přebytků OZE, především z jihovýchodu, a jejich transport do průmyslových center na severu. Klíčem k úspěchu je uzavřít smlouvy na odběr odpadního tepla, legislativně umožnit dočasné využití stávajících ropných tanků a nasadit specializované ADR cisterny v rámci pilotního konsorcia, které usiluje o 20 % pokrytí poptávky po vodíku do roku 2035 [48].

4.2.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost silniční přepravy systému LOHC s využitím toluenu a MCH má několik specifických dimenzí. Samotný transport kapalin autocisternami je relativně energeticky nenáročný a srovnatelný s přepravou běžných ropných produktů. Výraznější energetické vstupy však souvisejí s procesy hydrogenace a dehydrogenace, které se odehrávají před a po přepravě [17], [49].

Energetická náročnost nakládky LOHC je primárně tvořena čerpáním kapaliny do cisterny a nutností udržet ji nad bodem varu, aby nevznikaly přehnané tlaky. Studie uvádějí, že čerpací jednotka spotřebuje přibližně 0,02 kWh elektrické energie na každý kilogram přepravované kapaliny (tj. přibližně 0,8 kWh na tunu) při typickém průtoku 150 m³/h a tlakovém rozdílu 0,2 bar. Přídavné topení k udržení teploty okolo 25 °C pak přidává dalších cca 0,005 kWh/kg při výparně-kondenzátorovém okruhu, pokud není k dispozici odpadní teplo [50], [51], [52].

Během přepravy je hlavním spotřebitelem energie spalovací motor tahače. Pro cisternu s nákladem 30 t MCH dosahuje specifická spotřeba přibližně 0,04 kWh na kilogram přepraveného nosiče na 100 km (cca 4 MJ/tkm), tedy při vzdálenosti 300 km spotřebuje vůz na přepravu jedné tuny LOHC okolo 0,12 kWh. V přepočtu na čistý vodík (47 kg H₂/m³) to znamená energetickou náročnost okolo 2,5 kWh/kg H₂ na 300 km trasy [53], [54].

Vykládka u zákazníka či dehydrogenační stanice obnáší zpětné čerpání toluenu a opětovné předeheřtí na provozní teplotu (kolem 25 °C). Energetický požadavek je obdobný jako při nakládce – 0,02 kWh/kg na pumpování plus 0,005 kWh/kg na temperaci (pokud není k dispozici rekuperované teplo), tedy dohromady okolo 0,025 kWh/kg LOHC [51], [55], [56].

4.2.8 Ekonomické aspekty

Z ekonomického hlediska představuje LOHC technologie s toluenem konkurenční alternativu k přepravě vodíku ve zkapalněné nebo stlačené formě. Hlavními výhodami jsou nízké logistické náklady díky použití stávající infrastruktury, možnost opětovného využití LOHC kapaliny, a také nižší náklady na bezpečnostní systémy oproti vysokotlakým nebo LH₂ systémům [17], [57].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Náklady na silniční přepravu LOHC se skládají z fixní částky za pronájem či amortizaci cisterny (0,10 EUR/kg H₂ na 300 km) a variabilní položky za palivo (0,05 EUR/kg H₂ na 300 km). Kompletní servis včetně řidiče, pojistného a mýtného vychází na zhruba 0,18 EUR za kilogram vodíku doručeného 300 km daleko [34], [58].

K hlavním provozním ztrátám patří únik par. Díky těsným cisternám a tlakovému řízení se reálně ztrácí méně než 0,05 % objemu týdně. Tedy z 30 000 l nádrže maximálně 15 l MCH, což odpovídá 0,7 kg H₂. Náklady na doplnění těchto ztrát jsou zanedbatelné, okolo 0,001 EUR/kg H₂ [59].

4.2.9 Ekologické aspekty

Z hlediska životního prostředí nabízí systém LOHC s toluenem několik výhod, ale i určitá ekologická rizika.

Ekologická náročnost nakládky a vykládky LOHC spočívá především v elektrické energii potřebné k čerpání a temperaci kapaliny. Při využití průměrného evropského energetického mixu jsou emise z těchto operací nízké, řádově desítek gramů CO₂ na kilogram vodíku, což činí manipulaci v logistickém řetězci zanedbatelnou v porovnání s ostatními částmi dodavatelského řetězce [34], [50], [51], [52].

Silniční přeprava LOHC tahačem generuje emise přibližně kolem stovky gramů CO₂ na kilogram vodíku pro středně dlouhé trasy (cca 300 km). To je zhruba srovnatelné nebo nižší než emise spojené s vysokotlakým či LH₂ transportem vodíku, čímž LOHC představuje ekologicky příznivou volbu pro silniční přepravu na regionální i národní vzdálenosti [55].

Studie životního cyklu ukazují, že při využití obnovitelné energie pro hydrogenaci a při nasazení biopaliv pro silniční přepravu je možné snížit uhlíkovou stopu až o 51 % oproti konvenčním scénářům přepravy vodíku [60].

Na druhou stranu je třeba vzít v úvahu i environmentální rizika spojená s případnými úniky toluenu, který je klasifikován jako toxická a potenciálně karcinogenní látka. V případě havárie by mohl kontaminovat půdu či vodní zdroje. Proto je důležitá implementace preventivních opatření, jako jsou záchytné vany, monitoring úniku a havarijní plány [52], [61].

4.2.10 Normy, oborové předpisy

Přeprava toluenu a MCH podléhá přísným mezinárodním i národním normám.

ADR 2025 – základní předpis pro silniční přepravu nebezpečných věcí, který definuje požadavky na cisternové vozy, značení, obaly, dokumentaci a školení řidičů. Týká se klasifikace toluenu (UN 1294) i MCH (UN 2296) a stanovuje postupy pro nouzové situace [9], [10].

UN TDG 23 – doporučené mezinárodní modelové předpisy Organizace spojených národů, na nichž ADR a RID staví. Harmonizuje klasifikaci, obalové skupiny a bezpečnostní tabulky pro LOHC látky [62].

NFPA – americký standard pro přepravu kapalných hořlavin železnicí a silnicí. Uvádí doporučení pro konstrukci a protipožární opatření u cisteren, jež lze adaptovat i pro evropské LOHC vozy [11], [12].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.3 Drážní přeprava

4.3.1 Vhodnost přepravy

Drážní přeprava (Obrázek 4.2) LOHC ve formě toluenu a MCH představuje z hlediska přepravní kapacity, provozní bezpečnosti a nákladové efektivity atraktivní variantu především pro střední a dlouhé vzdálenosti. Obě látky jsou kapalné za běžných podmínek, což umožňuje použití konvenčních železničních cisteren určených pro přepravu hořlavých kapalin. Výhodou je vysoká přepravní kapacita [18], [33].



OBRAZEK 4.2: DRÁŽNÍ PŘEPRAVA VODÍKU V TOLUENU [63].

Pro ostrovní a mikrosíťová řešení je železniční doprava méně relevantní kvůli potřebě kolejí a terminálů s vhodnou polohou. Nicméně tam, kde existují úzkorozchodné nebo speciální vlečky (např. u odlehlých těžebních či průmyslových areálů), lze využít LOHC-swap-body kontejnery přepravované po lokální vlečce až k malému dehydrogenačnímu modulu. Tento přístup je však spíše okrajový a vyžaduje investice do nakládacích zařízení na obou koncích trati [64], [65].

Na regionální úrovni je železnice ideální pro časté a objemné dodávky LOHC mezi elektrolyzéry a centrálními dehydrogenačními stanicemi. Umožňuje efektivní posun stovek tun MCH týdně bez zácp na silnicích a s nižšími emisemi na tunokilometr ve srovnání se silniční dopravou. Projekt HySTOC úspěšně demonstroval, že sdílené swap-body kontejnery lze překlápet mezi nákladními vozy a železničními vagóny, což výrazně zkracuje dobu manipulace a náklady na logistiku [29], [66].

Pro národní měřítko zabezpečuje železnice spolehlivou páteřní síť pro přepravu tisíců tun MCH ročně. Díky standardizovaným cisternovým vagónům s objemy okolo 60 m³ a rychlému překlápění do silničních swap-body lze flexibilně distribuovat LOHC napříč republikou, aniž by bylo třeba budovat nové silniční kapacity [65].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Ve vzdálenější evropské dimenzi tvoří železnice páteř mezinárodních dodávek LOHC. Železniční koridory TEN-T umožňují spojení přístavů nebo terminálů v jižní Evropě s průmyslovými oblastmi ve střední a severní Evropě bez překládání do lodí. Standardizace v rámci RID 2025 zaručuje jednotné bezpečnostní postupy a sjednocené vagóny-cisterny, které se nemusí přizpůsobovat národním variantám, a zkracuje dobu tranzitu i administrativní náklady [18], [67].

4.3.2 Úroveň technologické připravenosti

Z technologického hlediska je LOHC přeprava po železnici plně připravena k nasazení, neboť všechny klíčové komponenty systému – tankové vozy, ventilační a plnicí zařízení, bezpečnostní protokoly – již existují a jsou odzkoušené v praxi. Samotný koncept LOHC byl demonstrován v několika velkých projektech (např. Chiyoda v Japonsku), které lze snadno rozšířit na železniční přepravu, a to díky shodě požadavků s přepravou jiných uhlovodíkových kapalin [26], [28].

Železniční cisternové vozy pro kapalné hořlaviny, které v LOHC logistice přepravují toluen i MCH, dosáhly TRL 8–9. Tyto vozy jsou dlouhodobě certifikovány dle RID/ADR, běžně se vyrábějí a provozují ve státních i soukromých železničních společnostech a jejich technické parametry (objem, tlak, ventilační zařízení) odpovídají požadavkům pro látky UN 1294 a UN 2296 [9], [10], [68].

Intermodální swap-body kontejnery s LOHC nádržemi, umožňující plynulé překládání mezi železnicí a silnicí, jsou na úrovni TRL 7–8. Demonstrátory od Hydrogenious LOHC Technologies i projekt HySTOC provozují standardizované kontejnery s výměnnou nádobou pro MCH, které již úspěšně prokázaly funkčnost v pilotních sítích. Chybí však ještě masové nasazení v komerčním provozu napříč více železničními operátory [21], [29].

Kompletní řetězec „elektrolýza – LOHC – železnice – dehydrogenace“ je dnes hodnocen na TRL 6–7. Národní i nadnárodní projekty validují segmenty přepravy a překládky, ale dosud postrádají plně komerční provoz v gigawattovém rozsahu. Klíčovou překážkou je koordinace mezi výrobcí MCH, železničními operátory a dehydrogenačními terminály pro dosažení dostatečné frekvence a kapacity vlakových spojů [65], [67].

4.3.3 Popis druhu přepravy

Drážní přeprava LOHC využívá primárně cisternové vagóny navržené pro kapalné hořlaviny třídy 3. Tyto vagóny mají obvykle vnitřní objem kolem 60 m³, tlakové ventily nastavené na 0,5 bar nad atmosférickým tlakem a integrované elektrostatické uzemnění. Nádrže jsou často opatřeny vnitřními spirálovitými trubkami pro krouživé míchání a tepelnou izolací, která minimalizuje proměny teploty při delších trasách. Pro monitoring se instalují snímače tlaku a teploty s propojením na palubní SCADA, což zajišťuje včasné varování před netěsnostmi či nadměrným tlakem [37], [69].

Vedle klasických vagónů existují intermodální swap-body kontejnery. Jsou to ISO kontejnery vybavené LOHC nádrží (30–40 m³), které lze snadno překlápat mezi vagóny a silničními podvozky. Tento systém výrazně zkracuje dobu překládky a umožňuje flexibilní propojení železniční trasy s poslední mílí silniční dopravy. Pilotní provozy HySTOC i Hydrogenious potvrdily, že swap-body kontejnery dosahují vysoké využitelnosti (> 90 % času v oběhu) a sníží nutný počet vagónů [21], [29], [65].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Podmínky pro přepravu LOHC po železnici zahrnují zejména teplotní rozsah od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a manipulaci v kolejových terminálech vybavených antistatickými prkny a pojistnými ventily. Každý vagón musí být označen oranžovými tabulkami podle RID a osazen bezpečnostními ventily, které při překročení tlaku 0,7 bar automaticky odlehčí plyn. Vlaky s nebezpečným nákladem obvykle vyžadují štítky „RID“ a doprovodný dokument s mimořádným jízdním řádem, aby se zabránilo průjezdu tunelem či citlivými úseky bez povolení [32], [35], [68].

Typické uspořádání přepravního prostředku pro LOHC dráhu:

- cisternový vůz (tank car) s dvojitou ocelovou stěnou a izolací, objem okolo 60 m^3 ,
- SCADA modul se senzory tlaku, teploty, polohy ventilu a detekcí úniku,
- přetlakové ventily a sorpční filtry na odvětrávání,
- elektrické rozvody Ex pro pohon čerpadel a monitorovacích systémů,
- záchytná vana ve stanicích pro případ nouzového vypuštění [34], [37].

Drážní cisterny na kapalné aromáty jsou rozšířené po celé Evropě, zejména v průmyslových koridorech (Rijn–Ruhr, Petrochemie Itálie, Benelux), kde již existují stovky vagónů pro toluen. Swap-body kontejnery se rychle zavádějí v projektech EHB a TEN-T koridorech, což umožňuje LOHC dodatky bez budování nové drážní infrastruktury. V Česku jsou v přípravě první pilotní spoje mezi Litvínovem a Ostravou s LOHC kontejnery, které budou překládány v dehydrogenačním terminálu v Bohumíně [67].

4.3.4 Bezpečnostní opatření

Stejně jako u silniční přepravy i v železniční dopravě je toluen klasifikován jako hořlavá kapalina s toxickými vlastnostmi. Z tohoto důvodu musí být železniční cisterny vybaveny detekčními systémy na úniky, přetlakovými ventily a sekundárními obaly. Nehody tohoto typu přepravy mohou mít vážné následky, ale riziko výbuchu je podstatně nižší než u přepravy stlačeného vodíku [34].

Při nakládání LOHC do cisternových vagónů musí být zajištěno pevné kotvení vagónu a zvýšená pozornost věnovaná elektrostatickému uzemnění. Veškeré napojení plnicích hadic se provádí suchými spojkami (dry-break couplings), které minimalizují riziko úniku kapalin či par. Personál musí používat antistatické oděvy a zóny nakládky musí být označeny jako Ex Zóna 1 pro možné výskyty par toluenu či MCH [39].

Během přepravy se uplatňují přísné kontroly tlaku a těsnosti. Každý vagón je vybaven přetlakovými ventily a systémy pro monitoring netěsností, napojenými na palubní SCADA. Vlaky s LOHC nákladem mají povinný doprovod „žlutou tabulkou“ a přednostní trasu v jízdních řádech, aby se minimalizovala doba, po kterou jsou cisterny v cisternových kolejích či tunelech [37], [67].

V případě úniku LOHC (kapaliny či par) se okamžitě aktivuje havarijní protokol:

- uzavření ventilu cisterny z vnějšího ovládacího panelu,
- nasazení sorpčních sorbentů pro ropné produkty pod vagónem a izolace úniku bariérovými zábranami,
- odsazení vlaku na stanici s vybavenou záchytnou jímkou a provedení dekontaminace pomocí suchých sorbentů a neutralizace kapalin [39].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

V případě požáru LOHC cisterny platí stejná doporučení jako pro silniční cisterny. Primární hasivo je vodní mlha pro ochlazení okolních konstrukcí a alkohol-rezistentní pěna (AR-AFFF) k potlačení plamenného hoření na povrchu kapaliny. CO₂ se používá pouze pro malé požáry v uzavřených prostorech. Práškové ABC není vhodné pro větší ropné požáry, protože může rozházet hořící kapalinu a zhoršit situaci. Po uhašení je nutné pokračovat v mlžení vodní mlhou pro prevenci re-vzplanutí a monitorovat teplotu cisterny infračervenými senzory [40], [41].

4.3.5 Legislativní omezení

Drážní přeprava LOHC podléhá RID 2025, které specifikuje maximální objem cisternových vozů na kapalné hořlavé látky (UN 1294, UN 2296) na 60 m³ na jeden vůz při maximálním provozním přetlaku do 0,5 bar nad atmosférickým. Pro vyšší objemy je nutné povolení příslušného národního úřadu pro přepravu nebezpečných věcí a často se řeší formou řetězení více vagónů ve vlakové soupravě [9], [10], [68].

V České republice RID omezuje maximální hmotnost jednotlivého cisternového vozu na 80 000 kg a stanovuje povinnost pravidelných technických kontrol každé 2 roky. Pro vlaky s nebezpečným nákladem je dále vyžadována smlouva o přepravě nebezpečného zboží mezi provozovatelem dráhy a odesílatelem, včetně jmenování bezpečnostního poradce pro železniční přepravu (GPV) [43], [68].

Každý cisternový vůz musí nést oranžové tabulky RID s číslem nebezpečnosti “33” (hoření kapalin) a UN číslem 1294 (toluen) nebo 2296 (MCH). Dokumentace k nákladu (bezpečnostní list a nákladní list) musí být po celou dobu přepravy přístupná strojvedoucímu a doprovodnému personálu. Nedodržení značení či doprovodných dokladů vede k zákazu jízdy soupravy až do nápravy nedostatků [9], [10], [68].

Pro tranzit skrze tunely a podzemní úseky platí omezení na tzv. “tunnel restriction codes”. Většina tank carů LOHC spadá do kódu D (umožňuje průjezd většinou tunelů), nicméně pro úseky s kódem C mohou být vyžadována doprovodná vozidla s hasiči nebo můstek pro hasicí zařízení [70].

Strojvedoucí a doprovod musí mít platné osvědčení GPV, stejnou kvalifikaci jako při silniční přepravě, a absolvovat pravidelné přeškolení podle směrnice RID každých 5 let. Kolejová vozidla i technické zařízení (ventily, držáky hadic) podléhají únikovým testům tlaku a hermetičnosti minimálně jednou za 24 měsíců [67], [68].

4.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika disponuje hustou sítí železničních tratí a významnou kapacitou cisternových vozů provozovaných Českými drahami Cargo a soukromými operátory. Stávající vozový park pro kapalné chemikálie lze relativně snadno adaptovat na LOHC nádrže, protože technické parametry (objem, tlak, ventilační zařízení) odpovídají požadavkům RID pro toluen i MCH. Díky tomu není třeba zásadně rozšiřovat vozový park ani budovat nové železniční kapacity. Stačí vybavit několik terminálů pro překládku swap-body kontejnerů a zabezpečit standardní železniční sklady [68], [71].

Chybějícím článkem pro plnohodnotnou drážní LOHC logistiku je terminál s dehydrogenačním blokem u železniční vlečky. Nejvhodnější lokalitou by byla průmyslová zóna v Teplicích nebo Ostravě,

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

kde je přístup k odpadnímu teplu z tepláren a hutí a zároveň dobrá železniční konektivita. Náklady na výstavbu takového terminálu se odhadují na 40–50 mil. EUR včetně propojení na železniční síť, technologického vybavení a bezpečnostních systémů [67].

Mezi výhody drážní přepravy LOHC patří zejména:

- vysoká kapacita a nízké jednotkové náklady při dlouhých trasách – jeden vlak může přepravit ekvivalent stovek tun vodíku,
- nízké emise CO₂ na tunokilometr díky efektivním dieselovým lokomotivám a možnostem elektrifikace tratí,
- bezpečnost – železniční přeprava udržuje cisterny v pevných kolejích, minimalizuje riziko dopravních nehod ve srovnání se silnicí [18], [33].

Na druhé straně nevýhody zahrnují:

- potřebu terminálových kapacit s vybavením pro rychlou překládku cisteren-swapů a dehydrogenaci,
- nižší flexibilitu vůči silniční dopravě v poslední míli, bez kombinace se swap-body kontejnery je nutné používat vlečky nebo kombinované přepravy,
- kolejové úseky s omezenou kapacitou a konkurenčním využitím pro jiné komodity mohou zpomalit logistiku LOHC [21], [29].

Geografická specifika České republiky přináší dva hlavní scénáře:

Severní hospodářský koridor (Ústecko–Ostravsko) – využití odpadního tepla a lepší přístup k průmyslovým odběratelům [65], [67].

Jihovýchodní koridor (Brno–Břeclav) – transport letních přebytků fotovoltaiky ve formě MCH k centrálnímu terminálu na severu, s následnou distribucí vodíku pro zimní provoz [65], [67].

V rozhodovacím procesu pro doporučení LOHC dráhy jako alternativního nosiče vodíku se podle modelu EGÚ Brno ukázalo, že kombinace železnice pro dlouhé vzdálenosti a silnice pro poslední míli přináší optimální poměr kapitálových investic a provozních nákladů při zachování vysoké bezpečnosti i nízkých emisí. LOHC drážní přeprava je proto doporučena jako klíčový pilíř sezónního a strategického skladování vodíku v ČR [46].

4.3.7 Energetická náročnost

Z pohledu přímé spotřeby energie je drážní přeprava LOHC (toluenu a MCH) energeticky efektivnější než silniční přeprava, a to především díky nižšímu tření ocelových kol na ocelových kolejích a možnosti přepravovat větší objem nákladu najednou. Spotřeba energie na tunokilometr (tkm) je v případě železniční přepravy přibližně o 60–80 % nižší než u silniční dopravy [17], [49].

Energetická náročnost nakládky LOHC do cisternových vozů zahrnuje čerpání kapaliny do vagonu a temperaci nad bodem varu. Moderní čerpadla spotřebují řádově desítky wattů na kilogram přepravované kapaliny, což představuje velmi nízkou energetickou položku v rámci celého logistického řetězce. Díky možnosti využít elektrickou energii z terminálových zdrojů, často

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

s částečnou rekuperací tepla, jsou emise z nakládky zanedbatelné vůči provozu vlaku či silniční manipulaci [72], [73].

Samotná přeprava po železnici je z hlediska energetické náročnosti jednou z nejefektivnějších forem dopravy. Lokomotiva táhnoucí vlak cisternových vozů s LOHC spotřebuje pro středně dlouhé trasy (200–500 km) energii odpovídající jednotkám gramů dieselu na tunokilometr. V přepočtu na kilogram vodíku v MCH to znamená energetickou náročnost nižší, než odpovídá silniční dopravě, a díky elektrifikovaným tratím může být dále snižována [74], [75], [76], [77].

Energetická náročnost vykládky LOHC je obdobná nakládce. Proces zpětného čerpání toluenu vyžaduje použití stejného čerpadlového systému a temperačního okruhu, čímž se celková spotřeba energie pro nakládku i vykládku souhrnně pohybuje v řádu desítek wattů na kilogram LOHC. Tento dílčí energetický vstup je typicky nižší než 5 % celkové energie spotřebované na přepravu, a proto na celkovou energetickou bilanci drážní přepravy LOHC prakticky nemá rozhodující vliv [18], [19], [78].

4.3.8 Ekonomické aspekty

Náklady na drážní přepravu LOHC se skládají z pronájmu či amortizace cisternových vozů a poplatků za vozokm v železniční síti. Při středně dlouhých trasách (200–500 km) vycházejí jednotkové náklady na doručený kilogram vodíku z LOHC přibližně na 0,12–0,15 EUR/kg H₂, což je ve srovnání s náklady silniční dopravy či potrubím velmi konkurenceschopné. Tato úspora plyne zejména z vyšší kapacity vlaku, nižších poplatků za tunokilometr a efektivnějšího využití lokomotiv [78].

Provozní ztráty v podobě odparu či úniků jsou u železničních cisteren minimalizovány díky robustní konstrukci a řízenému odvětrávání. Typicky dochází k méně než 0,03 % objemových ztrát LOHC měsíčně, což představuje ekonomicky zanedbatelnou částku (řádově stovky eur na vagón ročně) a zahrnuje náklady na doplnění i likvidaci zachycených par či kapalin [79], [80].

Celkově drážní přeprava LOHC nabízí díky vysoké hustotě nákladu a nízkým manipulačním nákladům ekonomicky výhodné řešení pro středně i dlouhodobé dodávky vodíku. Při sladění objemů, frekvencí i využití swap-body kontejnerů lze dosáhnout úspor až 20 % oproti silniční dopravě stejného objemu H₂, zejména na trasách nad 300 km [19], [81].

4.3.9 Ekologické aspekty

Z ekologického hlediska patří železniční přeprava LOHC mezi nejšetrnější formy dopravy. Emise CO₂ na tunokilometr jsou u železnice v průměru 3–5x nižší než u silniční dopravy. Pokud jsou vlaky poháněny elektřinou z obnovitelných zdrojů, lze tento faktor ještě výrazně snížit, což přispívá ke splnění klimatických cílů EU [60].

Železnice má také nižší hlučnost, menší dopady na dopravní zácpy a nižší počet nehod. Riziko environmentální havárie (např. úniku toluenu do půdy nebo vody) je menší než u silniční dopravy, zejména kvůli řízenému provozu na vyhrazených tratích a přítomnosti specializovaných bezpečnostních protokolů [60].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Z hlediska celého životního cyklu LOHC technologie má drážní doprava potenciál stát se klíčovým nástrojem pro nízkouhlíkovou přepravu vodíku v rámci evropského Green Deal.

4.3.10 Normy, oborové předpisy

Přeprava toluenu a MCH podléhá přísným mezinárodním i národním normám.

RID 2025 – základní evropská regulace pro železniční přepravu nebezpečných věcí, stanovující požadavky na konstrukci cisternových vozů (objem, tlak, ventilační zařízení), označování i dokumentaci pro látky UN 1294 (toluen) a UN 2296 (MCH) [9], [10], [68].

UIC Leaflet 620 R1 – pravidla Mezinárodní železniční unie pro bezpečnou přepravu hořlavých kapalin cisternovými vozy, včetně technických specifikací pro ventily, uzávěry a manipulační rozhraní v terminálech [82].

UN TDG 23 (Model Regulations) – vzorová pravidla OSN, na jejichž základě jsou harmonizovány RID a ADR. Definují klasifikaci, obalové a technické požadavky pro LOHC látky [62].

TSI OPE – evropská norma upravující provozní podmínky a bezpečnostní postupy pro vlaky s nebezpečným nákladem, včetně trasování, jízdních řádů a nouzová reakce plánů pro LOHC vlaky [83].

EN 14025 – specifikace pro tlakové cisternové vagóny, zahrnující materiály nádrže, svařování a zkoušky těsnosti relevantní pro LOHC přepravu [84].

EN 60079 (ATEX) – elektrotechnické normy pro zařízení v potenciálně výbušném prostředí, aplikované na čerpadla a monitorovací systémy na vagonech a v terminálech [13].

ISO 11120 – standard pro tlakové nádoby a cisternové moduly, který zajišťuje, že pojistné ventily a sekundární uzávěry LOHC vozů splňují mezinárodní požadavky [85].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.4 Lodní přeprava

4.4.1 Vhodnost přepravy

Toluen a MCH jako LOHC jsou mimořádně vhodné pro námořní přepravu díky svým fyzikálním vlastnostem. Jsou kapalné za běžných teplot a tlaků, nevytvářejí vysoký tlak jako plyný vodík a nejsou náchylné k výbuchu jako vodík stlačený či zkapalněný. Díky tomu je možné je bezpečně přepravovat pomocí běžných chemických tankerů, které se již dnes používají pro přepravu ropných produktů, což významně snižuje investiční nároky [26] (viz Obrázek 4.3).



OBRAZEK 4.3: LODNÍ PŘEPRAVA VODÍKU V TOLUENU [86].

Na národní úrovni se lodní přeprava LOHC uplatní zejména na vnitrozemských vodních cestách, kde je možné využít stávající systém říční plavby pro cisternové čluny upravené na přepravu MCH či toluenu. Projekt SPERA Hydrogen v Bruneji–Japonsku prokázal, že tankery s LOHC zvládnou bez ztrát i plavbu ve stísněných kanálech a přístavech, přičemž odpadní teplo z lodního motoru lze efektivně využít k temperaci nákladu [28].

Na úrovni Evropské unie se lodní tratě propojují s klíčovými petrochemickými přístavy (Rotterdam, Antwerpen, Le Havre) a umožňují rychlé dodávky MCH do terminálů přiléhajících k železnici či silnicím. Studie DNV identifikovala koridory Severního moře–Středozeří jako nejvhodnější pro LOHC, kde díky temperované přepravě i pasivní izolaci nedochází k boil-off ztrátám a logistika využívá interoperabilitu cisternových kontejnerů.

Pro mezikontinentální přepravu LOHC poskytují tankery významnou výhodu nad LH_2 . Nejsou potřeba kryogenní izolace ani složitá tlaková výbava. Pilotní projekt SPERA Hydrogen přepravil více než 200 t MCH mezi Brunejí a Japonskem bez jakýchkoliv emisních nebo boil-off ztrát během cesty trvající několik týdnů. Ekonomické modely Applied Energy ukazují, že při dostatečné velikosti tankeru (20 000–30 000 m³) a nízké ceně LOHC může být cena přepraveného vodíku konkurenceschopná vůči dovozu komprimovaného či kapalného vodíku z domácích zdrojů [26], [28].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologie LOHC dosahuje v oblasti námořní přepravy vysoké úrovně technologické připravenosti. Kromě reálných demonstrací (např. Chiyoda) existují také modelové a ekonomické studie mezinárodních projektů mezi Portugalskem a Nizozemskem, které potvrzují, že přeprava LOHC po moři je jak technicky proveditelná, tak ekonomicky konkurenceschopná [28], [71].

Tankery s LOHC nákladem dosahují dnes TRL 7–8. Pilotní plavby SPERA Hydrogen v letech 2020–2021 prokázaly technickou funkčnost a bezpečnost lodní přepravy tisíců tun MCH na mezikontinentálních trasách bez boil-off ztrát a nutnosti kryogenní izolace [28].

Intermodální cisternové kontejnery určené pro loď – silnice/železnici (swap-body) jsou na úrovni TRL 6–7. Demo projekt ověřil integraci kontejnerů do existujících námořních kontejnerových lodí bez nutnosti rozsáhlých stavebních úprav překladišť [71].

Integrované logistické řetězce „elektrolýza – LOHC – tanker – dehydrogenace“ jsou na TRL 6. Konsorcia jako European Hydrogen Backbone a projekt DNV vyvíjejí detailní plánování tras a terminálů, avšak plně komerční linky ještě nebyly spuštěny [87].

Využití odpadního tepla z lodních motorů pro temperaci LOHC a rekuperaci tepla z výfuků je potvrzeno na TRL 7 prostřednictvím demonstračních instalací na vybraných tankerech, ale širší nasazení v námořní flotile je stále ve fázi pilotů [71].

4.4.3 Popis druhu přepravy

Námořní přeprava LOHC probíhá v chemických tankerech, které přepravují kapaliny třídy 3 (hořlavé kapaliny). Tyto tankery nevyžadují speciální tlakové ani kryogenní systémy. Díky kapalně podobě toluenu a MCH lze využít stávající flotilu bez úprav, což snižuje náklady a zvyšuje flexibilitu [17].

Varianty přepravy:

Klasické LOHC tankery – velkokapacitní oceánské lodě přestavěné na přepravu MCH/toluenu v objemech 10 000–30 000 m³. Nádrže jsou uspořádány do bloků s nezávislými topnými smyčkami, umožňujícími udržovat náklad na optimální teplotě bez boil-off ztrát. Tento koncept prokázal provoz SPERA Hydrogen tanker v trasách Brunej–Japonsko [28].

Menší pobřežní a říční čluny – specializované cisternové čluny pro vnitrozemskou vodní dopravu, objem typicky 1 000–5 000 m³. Umožňují přímé zásobování přístavů a průmyslových terminálů na vnitrozemských tocích a kanálech [88].

Intermodální LOHC kontejnery – ISO kontejnery (30–40 m³) instalované na palubě běžných kontejnerových lodí. Výhodou je schopnost využít stávající kontejnerové řetězce bez výrazných úprav lodí či překladišť [88].

Podmínky pro přepravu:

Teplota a tlak – kapalný LOHC se běžně přepravuje při okolní teplotě (–20 °C až +50 °C) a mírném přetlaku do 0,5 bar nad atmosféricky (pasivní odvětrávání s tlakovými ventily). Pro udržení stability

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

a rychlých cyklů nakládky/vykládky se často využívají parní nebo elektrické ohřívací smyčky integrované do nádrží [34], [35].

Bezpečnostní zóny – přístavy i paluby tankerů musí respektovat klasifikaci EX Zona 1 pro manipulaci s hořlavými páry. Veškerá čerpadla a přístroje musí být v provedení Ex d IIB T3 [34], [35].

Typické uspořádání přepravního prostředku:

- izolované ocelové nádrže s kapacitou 10–30 000 m³, rozdělené na menší sekce pro zajištění stability lodi,
- topné okruhy (parní nebo elektrické) po obvodu každé nádrže, k udržení teploty 20–30 °C a zabránění kondenzaci par,
- SCADA systém pro dálkový monitoring teploty, tlaku a průtoku, napojený na můstek kapitána i přístavní dispečink.
- přetlakové ventily a aktivní uhlíkové filtry pro řízené odvětrávání a zachycení jakýchkoli výparů,
- přebytečné teplo z lodních hlavních a pomocných motorů často zpětně využíváno k temperaci nádrže [28], [34], [37].

Rozšířenost infrastruktury:

Hlavní petrochemické přístavy – Rotterdam, Antwerpen, Le Havre, Göteborg již disponují terminály schopnými manipulovat s LOHC tankery díky stávající ropné infrastruktuře. Překládací jeřáby pro intermodální kontejnery i parní ohřívací přípojkys jsou běžně instalovány [89], [90].

Globální trasy – SPERA Hydrogen demonstrovaly, že tankery LOHC mohou přepravovat bez speciální kryogenní výbavy, a otevírají tak nové trhy pro dovoz zeleného vodíku do zámoří i mezi kontinenty [28].

Tato různorodost variant a kompatibilita s existující lodní infrastrukturou dělá z lodní přepravy LOHC klíčový prvek budoucí globální vodíkové ekonomiky, schopný efektivně pokrýt potřeby národních, evropských i mezikontinentálních dodávek [17].

4.4.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnostní aspekty námořní přepravy LOHC jsou příznivější než při transportu LH₂ nebo stlačeného vodíku. Toluen a MCH jsou sice hořlavé, ale nevyžadují vysoký tlak ani extrémní chlazení, čímž se snižuje riziko exploze. Nehody by mohly vést ke znečištění moře toxickými látkami, proto jsou lodě vybaveny dvouplášťovými nádržemi a systémy pro zachytávání úniků. Kromě toho platí přísné požadavky na protipožární systémy, ventilaci, monitorování plynů a posádku vyškolenou podle normy IGF Code pro lodní přepravu hořlavých kapalin [91].

Při nakládání LOHC na tanker se používají suché rychlospojky (dry-break couplings), které minimalizují riziko úniku kapalin či par. Veškeré kovové části potrubí a nástavby musí být elektrostaticky uzemněny a personál vybaven antistatickými oděvy a obuví. Zóny nástupu na palubu a manipulace s LOHC jsou označeny jako EX Zóna 1, kde je třeba používat jiskrově bezpečné nástroje a zařízení [39].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Během plavby je paluba vybavena SCADA systémem sledujícím tlak a teplotu v každé LOHC nádrži. V případě nárůstu tlaku nad nastavenou mez automaticky otevírají přetlakové ventily, které vedou páry přes aktivní uhlíkové filtry zpět do systému nebo do bezpečného odvětrání. Řídicí můstek je navíc vybaven alarmy pro okamžitou reakci kapitána a technické posádky [36].

V případě úniku kapaliny či par se postupuje podle lodního havarijního plánu – okamžité uzavření postižené sekce nádrže, evakuace pracovníků z ohrožené zóny, nasazení sorpčních sorbentů a bariérových zábran pod únikové místo. Posádka musí být vyškolená pro práci v dýchacích přístrojích a mít k dispozici IR kamery pro lokalizaci úniku v těžko přístupných místech [39].

Při požáru LOHC platí, že primární prostředek je vodní mlha k chlazení okolních konstrukcí a potlačení uvolněných par. Sekundární prostředek je alkohol-rezistentní pěna AR-AFFF k uhašení plamenného hoření na povrchu kapaliny. Nelze použít suchý prášek ABC u velkých požárů, protože může rozházet hořící kapalinu a zhoršit šíření plamenů. CO₂ je vhodný pouze pro malé lokální požáry v uzavřených kabinách, nikoli pro otevřené hladiny LOHC. Po uhašení se doporučuje pokračovat v mlžení vodní mlhou k prevenci re-vzplanutí [40], [41].

Pro zajištění bezpečnosti je posádka pravidelně školená v simulacích úniků a požárů LOHC podle IMO Model Course 1.21 a musí absolvovat recertifikaci minimálně každé 3 roky. Tanker technicky podléhá inspekčním tlakových nádrží a ventilačních systémů před každou plavbou a plní požadavky ISM Code pro řízení bezpečnostních rizik na lodích [92].

4.4.5 Legislativní omezení

Legislativní rámec lodní přepravy LOHC vychází především z Mezinárodního námořního kodexu pro nebezpečné zboží (IMDG Code), který klasifikuje toluen (UN 1294) i MCH (UN 2296) jako třídu 3 – hořlavé kapaliny. Pro jeden tanker IMDG stanovuje maximální objem nádrže na 60 000 l při přetlaku do 0,5 bar a vyžaduje označení F-E, S-D a příslušné bezpečnostní listy. Doplnujícím předpisem pro vnitrozemské plavby je Evropská dohoda o přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách (ADN), která omezuje kapacitu jediné cisterny na 200 m³ a požaduje inertní odvětrávání, elektrostatické uzemnění i tlakové ventily [9], [10], [93].

Konstrukce a vybavení LOHC tankerů musí rovněž splňovat SOLAS (Mezinárodní úmluva o bezpečnosti lidského života na moři), zejména kapitulu II-2, která definuje požadavky na protipožární ochranu, oddělení nádrží a evakuační cesty posádky. Při nakládce a vykládce platí omezení MARPOL Annex II, které reguluje čištění nádrží a zabraňuje úniku chemikálií do moře. LOHC látky spadají do kategorií X–Z a pro jejich manipulaci je nezbytná podrobná inspekční zpráva o stavu nádoby před vykládkou [94], [95].

V rámci EU spadají terminály pro nakládku LOHC tankerů pod směrnici Seveso III (2012/18/EU), pokud jejich kapacita překročí 50 t hořlavé kapaliny, což zakládá povinnost zpracovat havarijní plán a podrobit se pravidelným inspekčním. V České republice tyto předpisy doplňuje Vyhláška MD ČR 398/2020 Sb. a Zákon č. 254/2001 Sb. (o vodní dopravě), které upravují místní limity hmotnosti a provozní povinnosti kapitána i provozovatele [96].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Pro řízení chemických havárií na moři se navíc používá norma ISO 13702, která specifikuje havarijní vybavení a školení posádky při úniku kapalin či požáru na palubě. Nedodržení jakékoli z výše uvedených regulací může vést k zákazu plavby, vysokým mezinárodním i národním sankcím a výraznému omezení logistického řetězce LOHC [97].

4.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V českých podmínkách je lodní přeprava LOHC zejména otázkou využití vnitrozemských vodních cest a napojení na mořské koridory. Na vnitrozemí existují klíčové přístavy v Děčíně, Ústí nad Labem a Pardubicích, které by stačilo vybavit suchými doky a párou temperovanými přípojkami pro LOHC čluny. Tyto přístavy již dnes přijímají cisternové čluny s petrochemickými produkty a disponují vlečkami až k průmyslovým areálům, takže by bylo možné zavést přímou linku LOHC člunů pro přepravu MCH mezi jihovýchodem Čech a severočeským průmyslovým regionem [98].

Pro námořní přepravu by české společnosti musely uzavřít partnerství s terminály v přístavech Hamburk, Rotterdam či Antverpy, kde už je infrastruktura pro LOHC tankery připravena. Z Českých Budějovic či Prahy by se pak transport realizoval železnicí nebo silnicí do těchto přístavů, přičemž by se využily stávající swap-body kontejnery kompatibilní jak s lodními, tak drážními přepravními prostředky [45], [98].

Hlavní výhodou je, že Česká republika nevyžaduje stavbu nových mořských terminálů. Stačilo by rozšířit stávající vnitrozemské přístavy o zařízení pro temperaci LOHC a o překládací jeřáby pro swap-body kontejnery. To výrazně snižuje kapitálové náklady a zkracuje dobu implementace oproti budování celé kryogenní infrastruktury či tlakových láhví. Zároveň lze dopravit velké objemy vodíku najednou, což podporuje ekonomiku rozsahu pro sezónní i strategické zásobování [67], [98].

Naopak nevýhodou zůstává závislost na kombinaci více druhů dopravy – LOHC čluny či tankery, železnice a silnice – což vyžaduje precizní koordinaci logistického řetězce. Dále je nutné investovat do automatizace překládacích uzlů a školení personálu pro práci s LOHC ve vodním prostředí, včetně bezpečnostních postupů podle ADN a SOLAS [94], [96].

Geograficky je ČR výhodně situována u mezinárodních vodních cest Labe a Dunaj–Vltava, což umožňuje přímé napojení na hlavní evropské lodní koridory. Rozhodovací proces EGÚ Brno doporučuje jako pilotní trasu spojení Přelouč–Hamburk s následnou distribucí železnicí do plzeňského a moravského regionu, čímž se minimalizují překládky a maximalizuje využití LOHC kapacity [46].

4.4.7 Energetická náročnost

Námořní přeprava LOHC je vysoce efektivní z hlediska spotřeby energie. Velkokapacitní tankery dokážou přepravovat obrovské objemy LOHC při relativně nízké energetické náročnosti na tunokilometr. Ekonomické studie udávají, že náklady na dopravu vodíku ve formě LOHC mezi Portugalskem a Nizozemskem se pohybují mezi 0,28–0,34 €/kg H₂ [71].

Energetická náročnost nakládky a vykládky LOHC na tanker je primárně určena spotřebou elektrické energie čerpadel a temperačních okruhů, které udržují kapalinu na optimální teplotě. Díky využití

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

energeticky úsporných parních či elektrických topných smyček a moderních čerpadel je tento dílčí proces velmi efektivní a tvoří jen malou část celkové energetické bilance řetězce. Ve výsledku jde většinou o jednotky procent z celkové energie spotřebované během celé přepravy [50], [69].

Samotná plavba tankerem je z hlediska energetické náročnosti mimořádně efektivní. Moderní lodní motory dosahují spotřeby kolem 70–120 g paliva na tunokilometr nákladu. V přepočtu na kilogram LOHC to znamená řádově desítky wattů na kilometr a při mezikontinentálních trasách (např. Brunej–Japonsko) je energetický vstup na kilogram vodíku v LOHC vzhledem k velkým objemům přepravovaných nádrží zanedbatelný [99], [100].

Celkové energetické nároky vykládky u cílového přístavu se opět blíží těm při nakládce. Jde o podobné čerpací a temperační operace a v proporci k energetické náročnosti plavby představují jen malé navýšení celkové spotřeby energie za dodávku. Díky možnosti rekuperace tepla z lodních motorů na palubě se navíc část energie pro temperaci zpětně získává, což dále snižuje uhlíkovou i energetickou stopu celého procesu [100], [101].

4.4.8 Ekonomické aspekty

Náklady na lodní přepravu LOHC zahrnují charter tankeru, palivo, manipulaci v přístavech a poplatky za využití přístavní infrastruktury. Ekonomické modely ze studie DNV ukazují, že průměrné náklady na přepravu jedné tuny MCH z jihovýchodní Asie do Evropy činí zhruba 30–40 EUR/t MCH, což odpovídá 0,6–0,8 EUR/kg H_2 v LOHC cyklu. Tyto náklady jsou srovnatelné nebo nižší než u alternativního dovozu LH_2 , pokud nebereme v úvahu vysoké investice do kryogenní infrastruktury [17], [87].

Pro vnitrozemskou říční dopravu jsou jednotkové náklady ještě nižší – kolem 15–20 EUR/t MCH, díky nižší spotřebě paliva člunů a nižším poplatkům za vodní cestu. Při přepočtu na kilogram vodíku v LOHC ($47 \text{ kg } H_2/m^3$) to znamená dodatečné logistické náklady kolem 0,3–0,4 EUR/kg H_2 , což dává vnitrozemské plavbě konkurenční výhodu pro národní a regionální trasy [102], [103].

Provozní ztráty v podobě odparu či úniku LOHC kapaliny na tankeru jsou minimální, pilotní plavby SPERA Hydrogen potvrdily, že boil-off nebo fugitive emissions prakticky nenastávají díky pasivní izolaci a řízenému odvětrávání. Roční objemové ztráty obvykle nepřesahují 0,02 % přepravovaného objemu a náklady na doplnění těchto ztrát jsou ekonomicky zanedbatelné [28].

Celkové logistické náklady (charter, palivo, manipulace, ztráty) se tedy při mezikontinentálních dodávkách podílejí na LCOH LOHC svým dílem zhruba 10–15 %, což je v souladu s cílovými hranicemi pro konkurenční dovoz vodíku bez nutnosti budování nových vysokotlakých ani kryogenních skladovacích systémů [89].

4.4.9 Ekologické aspekty

Ekologické přínosy LOHC spočívají zejména v nižších emisích skleníkových plynů oproti jiným druhům vodíkové přepravy. Pokud je celý cyklus poháněn obnovitelnými zdroji, lze emise omezit na 0,55–2,95 kg CO_2/GJ , což je výrazně méně než při použití fosilních paliv [71].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Emisní náročnost nakládky a vykládky LOHC je díky elektrickým nebo parním temperačním okruhům a moderním čerpadlům velmi nízká. Veškeré energie spotřebované při těchto operacích lze často částečně rekuperovat z odpadního tepla z lodních motorů nebo terminálových systémů, takže emise CO₂ spojené s nakládkou i vykládkou dosahují jen zanedbatelné úrovně ve stovkách gramů na tunu LOHC [104], [105].

Během plavby tankerem je lodní doprava jedním z nejekologičtějších způsobů přepravy nákladu na dlouhé vzdálenosti. Moderní lodní motory s vysokou účinností produkují řádově desítky gramů CO₂ na tunokilometr nákladu, což v kontextu LOHC znamená emise měřené ve stogramových hodnotách na kilogram vodíku při trasách přes několik tisíc kilometrů [106], [107].

Celkové emisní zatížení vzdálených lodních spojů LOHC (nakládka + přeprava + vykládka) se pohybuje výrazně pod 0,1 kg CO₂ na kilogram vodíku, což je významně nižší hodnota než u alternativních metod dovozu stlačeného vodíku nebo LH₂. Díky možnosti využití nízkosírného paliva a postupné elektrifikaci přístavních operací představuje lodní LOHC přeprava ekologicky jednu z nejšetrnějších variant pro globální dodávky vodíku [108], [109], [110].

4.4.10 Normy, oborové předpisy

Přeprava LOHC po moři se řídí následujícími předpisy:

IMDG Code (Amdt 41-24) – mezinárodní námořní kodex pro nebezpečné zboží, který klasifikuje toluen (UN 1294) a MCH (UN 2296) jako třídu 3 („hořlavé kapaliny“), definuje maximální objem nádrží na 60 000 l při provozním přetlaku do 0,5 bar a požadavky na označení F-E, S-D [9], [10], [93].

SOLAS Chap. II-2 – úmluva o bezpečnosti lidského života na moři, kapitola o požární ochraně, která stanovuje konstrukční požadavky na oddělení nádrží, protipožární zóny a evakuační cesty posádky LOHC tankerů [111].

MARPOL Annex II – mezinárodní úmluva o ochraně moře před znečištěním z lodí. Reguluje čištění nádrží a vypouštění chemikálií kategorií X–Z, včetně LOHC kapalných nosičů [95].

Seveso III (2012/18/EU) – směrnice EU o prevence průmyslových havárií. Přístavy manipulující nad 50 t hořlavých kapalin musejí mít havarijní plán, zachytné systémy a pravidelné inspekce [112].

ISO 13702 (2015) – mezinárodní norma pro řízení havárií chemických látek na moři, stanovuje havarijní vybavení a školení posádky pro případ úniku LOHC kapalin či požáru [97].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.5 Potrubní přeprava

4.5.1 Vhodnost přepravy

Přenos LOHC kapalin potrubím je přirozeným rozšířením existující petrochemické infrastruktury, neboť toluen a jeho hydrogenovaná forma MCH mohou proudit při okolní teplotě a tlaku v běžných ocelových potrubích (Obrázek 4.4) [17], [69], [113].



OBRÁZEK 4.4: POTRUBNÍ PŘEPRAVA VODÍKU V TOLUENU [114].

Na ostrovních či mikrosíťových instalacích se potrubí využívá spíše v malém rozsahu mezi elektrolyzérem, hydrogenačním a dehydrogenačním blokem bez nutnosti složitých čerpadlových stanic. Pro vzdálenosti do několika stovek metrů nabízí nejvyšší efektivitu a spolehlivost [115].

Na regionální úrovni se potrubí ukazuje jako vhodné pro propojení chemických areálů a dehydrogenačních terminálů v rámci jednoho kraje. Studie EHB doporučuje konverzi stávajících ropovodů pro transport MCH mezi centrálními skladovacími uzly a lokálními distribučními stanicemi, čímž se snižují náklady na logistiku i manipulační ztráty [71], [116].

Na národní úrovni lze potrubím zajistit páteřní síť pro LOHC s celostátním dosahem. Díky minimálnímu tlakovému pnutí a odolným materiálům se citlivé úseky potrubí snadno přizpůsobí přepravě LOHC, a to i v klimaticky náročných regionech. Národní model H2SEZON potvrzuje, že potrubní přenos MCH mezi jižní a severní částí země nabízí nejnižší jednotkové logistické náklady a stabilní dodávky bez závislosti na dopravních kapacitách silnic či kolejí [22], [49].

V evropském měřítku by propojení LOHC potrubními koridory mohlo sloužit jako „kapalné vodíkové potrubí“ paralelně k čistému vodíku. EHB navrhuje napojení přístavů s dovozem MCH na vnitrozemské terminály, kde by se LOHC potrubí napojilo na stávající ropné a chemické sítě. Takové řešení by maximalizovalo využití existující infrastruktury a minimalizovalo stavební náklady i dobu realizace [71], [113].

Pro mezikontinentální úvahy potrubí není praktické, vzhledem k nutnosti podmořských a transkontinentálních tras. V těchto případech zůstávají vhodnější tankery LOHC (viz kapitola 4.4). Nicméně pro pobřežní přenos mezi přístavy v rámci jednoho kontinentu by podmořské potrubí pro LOHC mohlo nabídnout stabilní alternativu k lodní dopravě, pokud by se ukázalo ekonomicky výhodnější při vysokých objemech a dlouhodobém provozu [36], [113].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologická připravenost potrubní přepravy LOHC je vysoká v tom smyslu, že nejsou potřeba nové druhy materiálů, ventilů nebo čerpadel, protože veškeré vybavení odpovídá konvenčním ropným aplikacím [18].

Potrubní infrastruktura pro přepravu kapalných aromátů, včetně toluenu, dosahuje v průmyslu TRL 9, neboť ocelové ropovody a chemické potrubní sítě jsou v trvalém provozu desítky let. Přímé převedení stávajících ropovodů pro LOHC látky tedy nevyžaduje zásadní technologický vývoj, jen úpravu materiálů a těsnění [17], [33], [69].

Specifické segmenty potrubí či propojení mezi elektrolyzéry, hydrogenačními a dehydrogenačními jednotkami, které dosud neexistují, se nacházejí na úrovni TRL 7–8. Pilotní projekty, například studie EHB, validují koncepci přepojení ložných uzlů MCH na chemické a ropné sítě, avšak plně integrované dehydrogenační potrubní okruhy čekají na svou demonstraci v reálném provozu [110], [116].

Komplexní řetězec „elektrolýza – hydrogenace – potrubní přeprava – dehydrogenace“ je dnes hodnocen na TRL 6, protože sice existují pilotní hydrogenační a dehydrogenační jednotky i potrubní vedení, ale chybí rozsáhlá síť reálných propojení v měřítku kraje či státu [22], [115].

Využití podmořského potrubí pro LOHC jako stabilní alternativy k lodní dopravě je dnes na úrovni TRL 4–5. I když koncept existuje v technických studiích, chybí licencované projekty a regulační rámec pro dlouhodobý podmořský provoz LOHC kapaliny [71], [117].

4.5.3 Popis druhu přepravy

Přeprava LOHC potrubím se provádí buď prostřednictvím dedikovaných potrubních větví, nebo přepojením stávajících ropovodů. V prvním případě lze navrhnout ocelová potrubí vhodného průměru (typicky DN 200–400) vedoucí přímo od hydrogenačního bloku k dehydrogenační jednotce, přičemž jsou opatřena izolací a tepelnými výhřevnými kabely k udržení teploty 20–30 °C a zamezení tvorby kondenzátů nebo rozkladu LOHC kapaliny [17], [117].

Variantou je repurposing běžných ropovodů, kde se po vyčištění potrubí a výměně těsnění převede transport z ropných produktů na LOHC kapaliny. Tento přístup minimalizuje stavební náklady a čas realizace, protože koridory i technická opatření (čerpací stanice, ventily, pigovací zařízení) jsou již vybudovány [17], [117].

Podmínky pro přepravu LOHC potrubím jsou relativně nenáročné. Tlak se udržuje v běžných rámech 1–5 bar, což umožňuje použití standardních beztlakých či nízkotlakých armatur. Teplota potrubí se reguluje kombinací pasivní izolace a lokálních topných systémů, aby LOHC kapalina neztratila požadované vlastnosti ani při venkovních teplotách pod 0 °C. Pro čištění a kontrolu potrubí se využívá pigging, při němž protlačené čistící „povidla“ odstraňují usazeniny a kontrolují integritu potrubí optickými sondami [36], [113], [117].

Typické uspořádání přepravního řetězce zahrnuje sérii čerpadlových stanic každých 20–30 km, kde se obnovuje tlak a kontroluje kvalita LOHC kapaliny. Čerpadla jsou vybavena filtrací na 1–5 µm, aby se zabránilo zanášení katalyzátorů v dehydrogenační jednotce. Trubní vedení se napojuje na

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

skladovací nádrže a dehydrogenační reaktor pomocí rychlospojek a uzavíracích armatur v provedení Ex d IIB T3 pro zóny s možným výskytem par LOHC [115].

Potrubní infrastruktura pro LOHC je ve vyspělých petrochemických regionech rozšířená zejména díky adaptaci stávajících ropovodů. V Evropě se na trasách mezi Rotterdamem, Antwerpami a středními průmyslovými areály plánuje repurposing části ropovodů pro MCH a rovněž se připravují pilotní linky v České republice spojující jihovýchodní fotovoltaické centrály s dehydrogenačním terminálem na severu. Potenciál podmořských LOHC potrubních tras, například v Severním moři, je zatím na úrovni studií, ale pro budoucí propojení ostrovních větrných farem s pevninou představuje atraktivní možnost [26], [71], [113].

4.5.4 Bezpečnostní opatření

I když potrubní přeprava LOHC představuje nižší riziko než přeprava vodíku v plynné nebo kapalné podobě, stále je nutné respektovat skutečnost, že toluen i MCH jsou hořlavé kapaliny třídy 3 [36], [39].

Při nakládání LOHC do potrubního systému se nejprve provádí tlaková a těsnostní zkouška trasy, aby se zamezilo netěsnostem. Vstupní čerpací stanice jsou vybaveny suchými spojkami (dry-break couplings) a antistatickými ventily, které minimalizují tvorbu jisker při napojování. Veškeré manipulace s LOHC kapalinou probíhají pod stálým přetlakem okolo 2–3 bar a personál používá osvědčení pro přepravu nebezpečných látek třídy 3 [39], [116].

Během provozu potrubí se kontinuálně sledují tlak a teplota v čerpadlových stanicích i podél trasy pomocí SCADA systému s připojením k opravárenskému dispečinku. Všechny ventily a spoje jsou opatřeny detektory úniku par, které v případě poklesu tlaku či nálezu hořlavých par iniciují automatické uzavření dotčené větve potrubí a aktivaci havarijního čerpadla pro bezpečné přesměrování toku [37], [67].

V případě úniku LOHC kapaliny či par je první krok izolace postižené sekce uzavřením příslušných uzávěrů. Následně se přivede inertní plyn (dusík) na zbylé části potrubí, aby se odstranily zbytkové výpary, a zkontroluje se integrita potrubí pomocí piggingu. Uniklé LOHC se zachytí v zachytných nádržích u čerpacích stanic a odváží k likvidaci podle klasifikace ADR třídy 3 [36], [39].

Při požáru v okolí potrubí je nejdůležitější ochladit potrubí vysokotlakou vodní mlhou, aby se zabránilo tepelnému poškození materiálu a možnému výbuchu. Pro hašení vlastního LOHC se používá alkohol-rezistentní pěna AR-AFFF, která vytvoří ochranný film na povrchu kapaliny. CO₂ je vhodný pouze pro menší požáry u uzavřených armatur, suchý prášek ABC lze použít pro izolované úseky, ale u masivních úniků může zhoršit situaci rozházením hořící kapaliny [40], [41].

4.5.5 Legislativní omezení

Legislativní rámec potrubní přepravy LOHC je definován především Směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU (PED), která upravuje navrhování, výrobu a zkoušení tlakových zařízení a potrubních sítí pro přepravu nebezpečných kapalin při tlacích do 100 bar. Všechny části

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

potrubního systému pro toluen a MCH (armatury, potrubí, čerpadla) musí nést značku „CE“ a být opatřeny moduly zkoušek dle PED, včetně zkoušky pevnosti a těsnosti [118], [119].

Pro elektrické a řídicí systémy v okolí potrubí platí Směrnice ATEX 2014/34/EU, jež stanovuje požadavky na zařazení zón s možným výskytem hořlavých par (např. Zóna 1 podél tras potrubí, Zóna 2 v blízkosti čerpacích stanic), a typ ochrany zařízení (Ex d, Ex i, Ex t) [13], [113].

Kvalitu materiálů a postupy svařování potrubí pro LOHC řeší ČSN EN 13480 (Metalické průmyslové potrubní systémy), která definuje kritéria pro výběr materiálů odolných vůči aromátům a teplotám do 50 °C, a ČSN EN 1594, jež je často aplikována analogicky pro kapaliny s podobnými provozními podmínkami [104], [120], [121].

Na úrovni bezpečnosti práce se využívá Směrnice 92/58/EHS (signalizační zařízení na pracovištích), která vyžaduje vyznačení tras potrubí barvou a štítky „Hořlavina“ či „CHC“ (chemická kapacita), a Nařízení REACH (EC 1907/2006), upravující registraci a hodnocení chemických látek. Toluen i MCH musí být uvedeny v databázi spolu s posouzením rizik při dlouhodobé expozici a úniku [122], [123].

V České republice doplňuje evropské předpisy Zákon č. 254/2001 Sb. (o vodách) pro průchod potrubí chráněnými oblastmi, včetně povinnosti analýzy rizik a vytvoření provozních řádů pro interní cesty LOHC. Nedodržení těchto směrnic a nařízení může mít za následek stavební zákazy, pokuty či uzavření provozu potrubí [96].

4.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V České republice existuje rozsáhlá síť ropovodů a chemických potrubí provozovaných společnostmi jako MERO a IKL, která by mohla být relativně snadno adaptována pro přepravu LOHC kapalin. Klíčovými koridory jsou například ropovody z přístavu v Ingolstadtu na východ a z Drážďan do Litvínova, jež procházejí průmyslovými centry Ústeckého a Moravskoslezského kraje. Pro plné využití LOHC by bylo třeba v těchto koridorech doplnit několik čerpadlových stanic a upravit úseky potrubí výměnou těsnění a armatur za materiály odolné vůči aromatickým kapalinám, jak uvádí studie EHB [124], [125].

Hlavní výhodou takového řešení je využití stávající infrastruktury, která minimalizuje kapitálové investice i dobu realizace oproti výstavbě nových potrubí. Potrubní doprava LOHC navíc zajišťuje kontinuální a stabilní dodávky vodíku bez závislosti na dopravních kapacitách silnic či železnice, a díky nízkému provoznímu tlaku (1–5 bar) i relativně nízkým provozním nákladům [2], [126].

Mezi nevýhody patří nutnost koordinace provozu s existujícími ropnými a chemickými toky, riziko koroze potrubí v místech s delší stagnací LOHC a potřeba pravidelných inspekcí a piggingu pro zajištění kvality kapaliny. Geograficky je pro ČR specifické členění na severní průmyslové regiony s přebytkem tepla (vhodné pro dehydrogenaci), a jižní území s rostoucí fotovoltaickou výrobou, kde by hydrogenace na LOHC probíhala [127], [128].

V rozhodovacím procesu, kombinujícím ekonomické modely a dostupnost infrastruktury, odborníci doporučili jako pilotní projekt propojení hydrogenačního uzlu v Záluží u Litvínova s dehydrogenační stanicí u Ostravy. Tento model by umožnil zpracovat letní přebytky zeleného vodíku z fotovoltaiky

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

v jižních Čechách a po potrubí je dopravit do průmyslové zóny s přebytkem odpadního tepla, čímž by se minimalizovaly ztráty a maximalizoval celkový energetický i ekonomický přínos. Pokud by tento pilot potvrdil předpoklady, potrubní síť LOHC by se mohla stát páteří sezónního i strategického zásobování vodíkem v rámci České republiky [24], [116], [129], [130].

4.5.7 Energetická náročnost

Potrubní přeprava LOHC patří k energeticky nejefektivnějším způsobům dopravy kapalin na střední a dlouhé vzdálenosti. Spotřeba energie na přepravu tuny látky je podstatně nižší než u silniční nebo železniční dopravy, zejména díky plynulému proudění bez zrychlování a brzdění [49].

Energetická náročnost nakládky LOHC do potrubí je tvořena primárně spotřebou elektrické energie pro čerpání kapaliny a temperaci potrubí tak, aby se udržela provozní teplota okolo 20–30 °C. Moderní odstředivá čerpadla s účinností nad 70 % spotřebují jen několik wattů na tunu LOHC na každý kilometr potrubí, což představuje zanedbatelnou část celkové energetické bilance řetězce. Temperační systémy (parní či elektrické výhřevné kabely) doplňují tuto spotřebu o jednotky procent z energie potřebné pro vlastní čerpání, přičemž lze využít odpadní teplo z technologických procesů v blízkosti čerpacích stanic [113], [131], [132].

Samotná přeprava LOHC potrubím je vysoce energeticky efektivní. Udržení hydraulického tlaku v rozmezí 1–5 bar nevyžaduje kontinuální dodávku energie, kromě doplňkového čerpání na řadě pumpovacích stanic rozmístěných obvykle po každých 20–30 km. Celková energie spotřebovaná čerpáním na trasu stovek kilometrů se tak pohybuje ve stovkách kilowatthodin na tunu LOHC, což v přepočtu na kilogram vodíku představuje hodnoty výrazně nižší než u silniční či železniční dopravy [133], [134].

Vykládka, tedy přepojení potrubí na dehydrogenační jednotku a zpětné čerpání toluenu, vykazuje obdobnou energetickou náročnost jako nakládka. Díky výkonným čerpadlům a možnosti rekuperace tlakového spádu je tento kroku náročný jen minimálně a nepřesahuje několik procent z celkových energetických vstupů na dodání kilogramu vodíku. Tato nízká energetická náročnost potrubní přepravy LOHC výrazně přispívá k její atraktivitě z hlediska energetické efektivity a udržitelnosti [49], [128].

4.5.8 Ekonomické aspekty

Ekonomická efektivita potrubní přepravy LOHC spočívá v nízkých provozních nákladech na jednotku přepravovaného vodíku. Podle studie činí pravidelná doprava MCH potrubím náklady kolem 0,10–0,15 EUR na kilogram vodíku na vzdálenost 200 km, což zahrnuje amortizaci potrubních tras, energii pro čerpací stanice a údržbu systému. Oproti silniční nebo železniční dopravě je tak potrubí díky kontinuálnímu provozu a vysoké kapacitě výrazně levnější [113], [116], [135].

Provozní ztráty ve formě odparu či úniků LOHC v potrubí jsou minimální, neboť tlak v síti je nízký a použité materiály (ocelové trubky s vhodnými těsněními) zabraňují difuzi látek. Praktické zkušenosti ukazují, že objemové ztráty nepřekračují 0,01 % ročně, což je v přepočtu zanedbatelná část nákladů na doplnění a likvidaci zachycených LOHC kapalin [136].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Celkově tedy potrubní přeprava LOHC přináší nejnížší logistické náklady a nejmenší ztráty mezi všemi způsoby dopravy vodíku uloženého v kapalných organických nosičích, což ji staví do role preferovaného řešení pro střední a dlouhé vzdálenosti v rámci industriálních a národních sítí [116], [128], [129].

4.5.9 Ekologické aspekty

Potrubní přeprava LOHC je ekologicky příznivější než přeprava stlačeného vodíku nebo LH₂. Díky kapalně formě a stabilitě obou látek (toluenu i MCH) nedochází k výrazným ztrátám látky do okolí a není nutné využívat energii na chlazení či kompresi. Tím se minimalizují přímé i nepřímé emise CO₂ v celém přepravním řetězci [56], [129].

Ekologická zátěž nakládky a vykládky LOHC potrubím je díky použití účinných elektrických čerpadel a temperačních systémů velmi nízká. Spotřeba energie na tyto operace představuje jen zlomek emisí spojených se samotnou přepravou, přičemž moderní čerpadla dosahují vysoké účinnosti a řada tepla se vrací zpět do systému díky rekuperaci z okolních procesů [17], [105], [137].

Během provozu potrubí jsou emise CO₂ spojeny zejména s výrobou elektrické energie pro čerpací stanice. V regionálním evropském mixu to představuje desítky gramů CO₂ na tunokilometr LOHC, respektive pouhé gramy CO₂ na kilogram vodíku přepravovaného v potrubí. Díky nízkému tlaku a stabilnímu toku kapaliny jsou tyto emise výrazně nižší než u silniční či železniční dopravy a přispívají k nízké celkové uhlíkové stopě potrubního řešení [19], [69], [129].

Celkově se ekologická náročnost potrubní přepravy LOHC (nakládka + transport + vykládka) pohybuje v řádu několika gramů CO₂ na kilogram vodíku, což dělá z tohoto způsobu dodávky jednu z nejšetrnějších možností v rámci logistických variant pro LOHC [105], [129], [137].

4.5.10 Normy, oborové předpisy

Pro potrubní přepravu toluenu a MCH v České republice platí legislativa vztahující se k chemickým produktovodům.

PED 2014/68/EU – stanovuje požadavky na navrhování, výrobu a zkoušení tlakových zařízení a potrubních sítí pro přepravu kapalných nebezpečných látek při tlacích do 100 bar. Veškeré potrubní prvky (trubky, armatury, čerpadla) musí nést značku CE a projít moduly zkoušek podle PED [118], [119].

ATEX 2014/34/EU – upravuje požadavky na elektrická a řídicí zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu (zóny podél tras potrubí LOHC jsou zpravidla Zóna 1 pro hořlavé páry), včetně volby typu ochrany (Ex d, Ex i) [13].

ČSN EN 13480 – evropská norma pro metalické průmyslové potrubní systémy, klade důraz na výběr materiálů a konstrukční detaily odolné vůči aromatickým uhlovodíkům jako toluen/MCH [121].

ČSN EN 1594 – specifikace pro potrubí pro dopravu plynu, analogicky aplikovaná na kapaliny při nízkém tlaku. Stanovuje zkoušky pevnosti, těsnosti a kvalitu svařovaných spojů [120].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

ISO 3183 – mezinárodní norma pro výrobu ocelových potrubních trubek pro přepravu ropy a plynu, často využívaná i u LOHC systémů kvůli podobným provozním podmínkám [138].

REACH (EC) 1907/2006 – nařízení Evropské unie zabývající se registrací, hodnocením a omezováním chemických látek. Toluen i MCH musí být registrovány s hodnocením rizik pro dlouhodobou expozici a možné úniky [123].

Směrnice 92/58/EHS – vytyčuje signalizační a bezpečnostní značení na pracovištích, včetně označení tras potrubí “Hořlavina” a “CHC” (chemická kapalina), které jsou povinné podél LOHC vedení [122].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.6 Terminály

Významní producenti a skladovací kapacity:

ORLEN Unipetrol RPA (Litvínov a Kralupy nad Vltavou) – největší producent vodíku v České republice, s roční produkcí přibližně 80 000 tun. Disponuje rozsáhlými skladovacími kapacitami pro ropné produkty, které by mohly být adaptovány pro LOHC technologie [139].

Spolchemie (Ústí nad Labem) – produkuje přibližně 2 200 tun vodíku ročně pomocí chlor-alkalické elektrolýzy. Vysoká čistota produkovaného vodíku a stávající infrastruktura pro manipulaci s chemickými látkami činí tuto lokalitu vhodnou pro LOHC aplikace [140].

DEZA (Valašské Meziříčí) – významný producent chemických látek, s potenciálem pro integraci LOHC technologií do stávajících procesů [140].

Synthos (Kralupy nad Vltavou) – chemický závod s infrastrukturou pro manipulaci s kapalnými chemikáliemi, potenciálně vhodný pro LOHC skladování a distribuci [140].

Silniční a železniční přeprava

Logistická centra v okolí Prahy a Brna – tato centra mají kapacity pro skladování a distribuci chemických produktů, což je vhodné pro silniční přepravu LOHC [140], [141].

Železniční terminály v Ostravě, Pardubicích a Ústí nad Labem – tyto terminály jsou důležitými přepravními uzly pro průmyslové oblasti a disponují infrastrukturou pro manipulaci s chemickými látkami, což je výhodné pro železniční přepravu LOHC [140], [141].

Lodní přeprava

Přístav Děčín – největší český říční přístav na Labi, s potenciálem pro přepravu chemických látek do Německa [140], [141].

Přístav Lovosice – disponuje infrastrukturou pro manipulaci s kapalnými náklady, vhodný pro LOHC [140], [141].

Potrubní přeprava

Česká vodíková páteřní síť ZÁPAD – projekt společnosti NET4GAS, který plánuje využití stávajícího plynovodu pro přepravu vodíku mezi Německem a ČR. Přestože se tento projekt zaměřuje na plyný vodík, existuje potenciál pro budoucí rozšíření na přepravu LOHC, zejména pokud se technologie stane komerčně dostupnou [140], [141].

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.7 Přepravní trasy

Perský záliv – Česká republika

MCH se vyrábí hydrogenací toluenu v moderních petrochemických závodech ve Spojených arabských emirátech. Tanker plující trasou Sharjah–Rotterdam (cca 8 000 km) udrží náklad při okolní teplotě bez boil-off ztrát díky pasivní izolaci a temperaci výfukovým teplem z lodních motorů. V Rotterdamu probíhá překládka LOHC tanků na cisternové železniční vozy, které přepraví MCH do Bohumína (cca 1 200 km). Odsud plyne potrubím do Ostravy, kde se v dehydrogenačním bloku obnovuje toluen a uvolňuje vodík. Poslední úsek k průmyslovým odběratelům se řeší kamionovou dopravou v rámci města.

Egypt (Ain Sokhna) – Česká republika

V přístavu Ain Sokhna na Suezském průplavu se MCH vyrábí z čistého vodíku z egyptských fotovoltaických parků. Tanker překoná Středozemní moře a přijede do Antverp (cca 4 500 km), kde je náklad přeložen na železniční vagóny směřující do terminálu v Přerově (cca 1 000 km). Odtud silniční cisterny dopraví MCH do Ostravy (cca 80 km), kde se v místním dehydrogenačním bloku získává vodík pro průmyslové využití a další dodávky do teplárny.

Dogger Bank offshore – Česká republika

Z plovoucích větrných farem u Dogger Bank na Severním moři je vodík přeměněn na MCH přímo na plavidle a tankery jej převezou do přístavu Hull. Odtud tankerová loď dopluje do Rotterdamu (600 km). Následuje přeprava potrubím (cca 250 km) přímo do terminálu v Litvínově, kde se LOHC okruh propojí s českou sítí. Krátký potrubní přivaděč (50 km) pak vede MCH do hydrogenačního uzlu v Záluží a poslední úsek (15 km) překonají silniční cisterny k lokálnímu elektrolyzáru.

Severní Evropa (Rotterdam) – Česká republika

V Rotterdamu je LOHC připraveno pro evropské sítě. Železniční vagóny LOHC následně dopraví MCH do terminálu v Litvínově (cca 800 km), kde swap-body kontejnery překládá moderní jeřábový systém. Z Litvínova je potrubím vedeno do sousedního Záluží, kde se nachází elektrolyzáru a hydrogenační jednotka. Tento okruh vytváří uzavřený cyklus pro lokální sezónní skladování vodíku.

Jihovýchodní Čechy – Ostrava

V oblasti s rostoucí fotovoltaickou výrobou v Jihomoravském kraji se vodík vyrábí během léta elektrolytickým způsobem v Záluží. Potrubím (cca 200 km) se MCH přepravuje do hydrogenační jednotky v Litvínově, poté dalším potrubím (cca 150 km) do dehydrogenace v Ostravě, kde se využívá odpadní teplo z elektráren. Konečná kamionová linka (cca 25 km) zajišťuje zásobení teplárny v centru Ostravy. Tento model maximálně využívá stávající infrastrukturu a nabízí nejnížší logistické náklady pro sezónní přenos zeleného vodíku.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

4.8 Shrnutí

Toluen se v průmyslu tradičně využívá jako rozpouštědlo, avšak nově se prosazuje i jako kapalný organický nosič vodíku (LOHC). Proces spočívá v hydrogenaci toluenu na methylcyklohexan (MCH), který díky vysoké objemové hustotě uloženého vodíku (až 47 kg H₂/m³) umožňuje efektivní skladování a přepravu vodíku za běžných podmínek. Po dopravě lze MCH dehydrogenovat zpět na toluen, čímž se uvolní čistý vodík připravený k dalšímu využití.

Souhrnná SWOT analýza přepravy vodíku ve formě toluenu je uvedena na Obrázek 4.5.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Plná kompatibilita se stávající infrastrukturou (nádrže, potrubí). Vysoká objemová hustota vodíku – až 47 kg H₂/m³ (více než LH₂). Vysoká úroveň TRL (8–9) – technologie je průmyslově ověřená. Možnost intermodální přepravy (silniční, železniční, lodní). Není potřeba vysokotlakých ani kryogenních systémů.	Hořlavost a toxicita toluenu a MCH. Riziko emisí a kontaminace v případě úniku. Energetická zátěž během regenerace MCH → toluen. Vysoká hmotnost nákladu cisteren omezuje objemy. Nutnost přísného dodržování předpisů ADR.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Evropská harmonizace ADR (2025) usnadňuje přeshraniční logistiku. Rychlá integrace do dodavatelského řetězce vodíku. Podpora projektů LOHC v EU (HySTOC, EHB). Vývoj intermodálních výměnných kontejnerů.	Zvýšené legislativní požadavky (ATEX, Seveso, ADR). Kolísání cen ropy a aromatických látek. Konkurence levnějších alternativ (stlačený H₂). Možné bezpečnostní incidenty během přepravy.

OBRÁZEK 4.5: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY TOLUENU JAKO NOSIČE VODÍKU.

Fyzikálně-chemické vlastnosti toluenu a MCH výrazně usnadňují manipulaci i logistiku. Aromatické jádro toluenu je inertní a produkty hydrogenace tvoří stabilní kapalinu s poměrně nízkou viskozitou, jež nevyžaduje žádné speciální kryogenní zařízení. Díky tomu mohou existující cisternové soupravy pro chemické kapaliny přepravovat zásoby vodíku bez nutnosti zásadní úpravy infrastruktury.

Z hlediska bezpečnosti oba LOHC podléhají kategorizaci jako hořlavé kapaliny, s bodem vzplanutí –4 °C u toluenu a 19 °C u MCH. Přísné požadavky ADR/RID vyžadují cisterny s ventilačními pojistkami, elektrostatickým uzemněním a armaturami certifikovanými pro tlak do 5 bar a teplotu do 80 °C. Pro případ úniku je nutné disponovat záchytnými jímkami a sorpčními materiály, zatímco provozovatelé musí mít připravený havarijný plán.

Silniční přeprava LOHC je realizovatelná pomocí autocisteren o objemu až 30 000 l, které jednoznačně převyšují kapacitu tradičního stlačeného vodíku. Na vzdálenost zhruba 300 km se energetická náročnost pohybuje kolem 3 kWh na kilogram dodaného vodíku, přičemž přepravní náklady činí cca 0,18 EUR/kg H₂. Mobilní dehydrogenační jednotky („Mobile Release Units“) umožňují flexibilní uvolňování vodíku přímo na místě spotřeby, což přispívá k optimalizaci logistického řetězce.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Železniční doprava LOHC přináší další úspory, neboť swap-body kontejnery laditelné pro standardní železniční vozy mohou pojmut až 100 m³ kapaliny, a jsou tak vhodné pro intermodální přepravu. Jednotkové náklady se pohybují mezi 0,12–0,15 EUR/kg H₂ na vzdálenosti 200–500 km a ztráty par jsou minimální (méně než 0,03 % měsíčně). Technologie drážní přepravy dosahuje vyspělosti TRL 8–9, což umožňuje rychlou implementaci.

Mezikontinentální lodní přeprava kapalných nosičů probíhá bez nutnosti kryogenní izolace, jak ukázal projekt SPERA Hydrogen. Chemické tankery s objemem 20 000–30 000 m³ bezpečně dopravují MCH bez boil-off ztrát a cenově konkurenčně s alternativami, jako je kapalný nebo stlačený vodík. Námořní TRL se pohybuje na úrovni 7–8, což potvrzuje připravenost technologie na komerční využití.

Energetická bilance LOHC zahrnuje nejen přepravní spotřebu, ale i náklady na hydrogenaci a dehydrogenaci. Při optimalizaci procesů a využití obnovitelných zdrojů lze dopravní energetickou náročnost snížit, čímž LOHC doprava představuje pouze cca 10 % celkových nákladů na dodávku vodíku (LCOH). Parciální ztráty při skladování jsou nepatrné, což předurčuje LOHC k dlouhodobé akumulaci sezónních přebytků obnovitelné energie.

Ekologický dopad LOHC přístupu je významně nižší než u tradiční silniční či železniční dopravy stlačeného vodíku. Emise CO₂ silničního transportu činí zhruba 100 g/kg H₂ na 300 km, zatímco železnice nabízí 3–5x nižší hodnoty. Při využití biopaliv a elektřiny z OZE lze uhlíkovou stopu dalších operací dokonce redukovat až o 51 %.

V českém kontextu disponujeme robustní silniční i železniční infrastrukturou a ADR-certifikovanými cisternami, např. v areálu ORLEN Unipetrol. Chybí ovšem průmyslové dehydrogenační bloky, jejichž investiční náklady se odhadují na 35–50 mil. EUR. Strategické umístění těchto zařízení v Ústeckém či Moravskoslezském kraji by umožnilo využít dostupné odpadní teplo a logistické uzly pro distribuci vodíku v rámci střední Evropy.

Celkově LOHC založený na toluenu a MCH nabízí bezpečnou, energeticky i ekonomicky výhodnou platformu pro transport a skladování vodíku. Díky kompatibilitě se stávající infrastrukturou a minimálním ztrátám představuje perspektivní řešení pro rozvoj udržitelné vodíkové ekonomiky.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Přeprava nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Popis: Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
AR-AFFF	Vodná filmotvorná pěna odolná vůči alkoholu
ATEX	Výbušné atmosféry
CLP	Klasifikace, označování a balení
ČÚBP	Český úřad bezpečnosti práce
EHB	Evropská vodíková páteř
GPV	Osvědčení odborné způsobilosti pro přepravu nebezpečných věcí
IGF	Mezinárodní kodex bezpečnosti pro lodě používající plyny nebo jiná paliva s nízkou teplotou vzplanutí
IMDG	Mezinárodní námořní nebezpečné zboží
ISM	Mezinárodní bezpečnostní management
LCOH	Vyrovnané náklady na vodík
LH ₂	Tekutý vodík
LOHC	Kapalné organické nosiče vodíku
MARPOL	Mezinárodní úmluva o zabránění znečištění z lodí
MCH	Methylcyklohexan
NFPA	Národní asociace požární ochrany
OPE	Provoz a řízení dopravy
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PED	Směrnice pro tlaková zařízení
REACH	Registrace, hodnocení, autorizace a omezování chemických látek
RID	Mezinárodní železniční řád pro přepravu nebezpečného zboží
SCADA	Dohledová kontrola a získávání dat
SOLAS	Mezinárodní úmluva o bezpečnosti lidského života na moři
TDG	Přeprava nebezpečného zboží
TEN-T	Transevropská dopravní síť
TPG	Technická pravidla v oboru plynových zařízení
TRL	Technologická připravenost systému
TSI	Index dopravních služeb
UIC	Identifikační kód jednotky

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] P. C. Rao and M. Yoon, "Potential liquid-organic hydrogen carrier (Lohc) systems: A review on recent progress," *Energies (Basel)*., vol. 13, no. 22, Nov. 2020, doi: 10.3390/en13226040.
- [2] A. Lin and G. Bagnato, "Revolutionising energy storage: The Latest Breakthrough in liquid organic hydrogen carriers," Apr. 18, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.146.
- [3] A. Oda *et al.*, "Pt single atom alloyed sub-1 nm thick Fe overlayer on supported Cu nanoparticles for methylcyclohexane dehydrogenation," *J. Mater. Chem. A Mater.*, vol. 12, no. 34, pp. 22655–22667, Jul. 2024, doi: 10.1039/d4ta03453h.
- [4] R. Aslam, K. Müller, M. Müller, M. Koch, P. Wasserscheid, and W. Arlt, "Measurement of Hydrogen Solubility in Potential Liquid Organic Hydrogen Carriers," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 61, no. 1, pp. 643–649, Jan. 2016, doi: 10.1021/acs.jced.5b00789.
- [5] M. Usman, D. Cresswell, and A. Garforth, "Detailed reaction kinetics for the dehydrogenation of methylcyclohexane over pt catalyst," Jan. 11, 2012. doi: 10.1021/ie201539v.
- [6] E. Gianotti, M. Taillades-Jacquín, J. Rozière, and D. J. Jones, "High-Purity Hydrogen Generation via Dehydrogenation of Organic Carriers: A Review on the Catalytic Process," *ACS Catal.*, vol. 8, no. 5, pp. 4660–4680, May 2018, doi: 10.1021/acscatal.7b04278.
- [7] M. Wakisaka and M. Kunitake, "Direct electrochemical hydrogenation of toluene at Pt electrodes in a microemulsion electrolyte solution," *Electrochem. commun.*, vol. 64, pp. 5–8, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.elecom.2016.01.001.
- [8] Európsky parlament a rada Európskej únie, "Nariadenia o klasifikácii, označovaní a balení látok a zmesí, o zmene, doplnení a zrušení smerníc 67/548/EHS a 1999/45/ES a o zmene a doplnení nariadenia (ES) č. 1907/2006," Dec. 2008.
- [9] ADR Tool, "UN 1294 - TOLUENE." [Online]. Available: <https://adr-tool.com/664/un-1294>
- [10] ADR Tool, "UN 2296 - METHYLCYCLOHEXANE." [Online]. Available: <https://adr-tool.com/1537/un-2296>
- [11] US Hazmat Storage, "What Is NFPA 30 Compliant Storage?" [Online]. Available: <https://ushazmatstorage.com/what-is-nfpa-30-compliant-storage/>
- [12] J. Cebak, "NFPA 704," 2017.
- [13] Európsky parlament a rada Európskej únie, "Smernice o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se zařízení a ochranných systémů určených k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu," Feb. 2014.
- [14] Agency for toxic substances and disease registry, "Toxicological Profile for Toluene." [Online]. Available: <https://wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=161&tid=29>

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [15] K. Koga and Y. Ohmiya, "Potentiation of Toluene Toxicity by Hepatic Enzyme Inhibition in Mice," *The Journal of Toxicological Science*, vol. 3, pp. 25–30, 1978.
- [16] Európsky parlament a rada Európskej únie, "Nařízení, kterým se mění nařízení (ES) č. 80/2009, (EU) č. 996/2010 a (EU) č. 165/2014, pokud jde o některé požadavky na podávání zpráv v oblasti silniční dopravy a letectví," Apr. 2024. [Online]. Available: <http://data.europa.eu/eli/C/2024/1589/oj>.
- [17] M. C. S. Carvalho, J. Marques, H. A. Matos, and J. F. O. Granjo, "Long-distance hydrogen delivery using a toluene-based liquid organic hydrogen carrier system," in *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 50, Elsevier B.V., 2021, pp. 1647–1652. doi: 10.1016/B978-0-323-88506-5.50255-2.
- [18] J. Jangir and B. R. Jagirdar, "Unveiling the Potential of Heterogeneous Systems for Reversible Hydrogen Storage in Liquid Organic Hydrogen Carriers," Mar. 03, 2025, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/cssc.202402018.
- [19] P. Preuster, C. Papp, and P. Wasserscheid, "Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Toward a hydrogen-free hydrogen economy," *Acc. Chem. Res.*, vol. 50, no. 1, pp. 74–85, Jan. 2017, doi: 10.1021/acs.accounts.6b00474.
- [20] Vallely Tankers, "ADR Tipping Tanker." [Online]. Available: https://www.vallelytankers.com/new_tankers/adr-tanker-2/
- [21] Hydrogenious LOHC Technologies, "Carrying the new energy world. Handling hydrogen as an oil." [Online]. Available: <https://hydrogenious.net/>
- [22] M. Byun, A. Lee, S. Cheon, H. Kim, and H. Lim, "Preliminary feasibility study for hydrogen storage using several promising liquid organic hydrogen carriers: Technical, economic, and environmental perspectives," *Energy Convers. Manag.*, vol. 268, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.116001.
- [23] K. Müller, R. Aslam, A. Fischer, K. Stark, P. Wasserscheid, and W. Arlt, "Experimental assessment of the degree of hydrogen loading for the dibenzyl toluene based LOHC system," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 47, pp. 22097–22103, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.09.196.
- [24] H. Li, X. Zhang, C. Zhang, Z. Ding, and X. Jin, "Application and Analysis of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) Technology in Practical Projects," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.3390/en17081940.
- [25] Sigma-Aldrich, "SAFETY DATA SHEET," Saint Louis, May 2014.
- [26] A. H. Tullo, "Organics Challenge Ammonia as Hydrogen Carriers," *ACS Cent. Sci.*, vol. 8, no. 11, pp. 1471–1473, Nov. 2022, doi: 10.1021/acscentsci.2c01272.
- [27] M. R. Usman, "Hydrogen storage methods: Review and current status," Oct. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.rser.2022.112743.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [28] Chiyoda Corporation, “Contributing to the Realization of a Hydrogen Society through Technology that delivers Optimal Solutions.” [Online]. Available: <https://www.chiyodacorp.com/en/service/lowcarbon/hydrogen/>
- [29] HySTOC – Clean Hydrogen Partnership, “Hydrogen supply and transportation using liquid organic hydrogen carriers.” [Online]. Available: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/projects-dashboard/projects-repository/hystoc_en
- [30] D. D. Papadias and R. K. Ahluwalia, “Toluene-MCH as a Two-Way Carrier for Hydrogen Transmission and Storage,” 2058.
- [31] Z. Xie, Q. Jin, G. Su, and W. Lu, “A Review of Hydrogen Storage and Transportation: Progresses and Challenges,” Aug. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17164070.
- [32] UNECE, “ADR 2025 - Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road.” [Online]. Available: <https://unece.org/adr-2025-files>
- [33] Z. He *et al.*, “High-purity hydrogen production from dehydrogenation of methylcyclohexane catalyzed by zeolite-encapsulated subnanometer platinum-iron clusters,” *Nature Communications*, vol. 16, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41467-024-55370-z.
- [34] H. J. Chae *et al.*, “Quantitative Risk Assessment of a Liquid Organic Hydrogen Carriers-Based Hydrogen Refueling Station,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 41, no. 5, pp. 1311–1327, May 2024, doi: 10.1007/s11814-024-00124-2.
- [35] S. OBARA, “Energy efficiency of a hydrogen supply system using the reaction cycle of methylcyclohexane-toluene-hydrogen,” *Mechanical Engineering Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 17-00062-17–00062, 2018, doi: 10.1299/mej.17-00062.
- [36] E. T. Tükez and A. KAYA, “SCADA System for Next-Generation Smart Factory Environments,” *ICONTECH INTERNATIONAL JOURNAL*, vol. 6, no. 1, pp. 48–52, Mar. 2022, doi: 10.46291/icontechvol6iss1pp48-52.
- [37] A. Heller, M. H. Rausch, P. S. Schulz, P. Wasserscheid, and A. P. Fröba, “Binary Diffusion Coefficients of the Liquid Organic Hydrogen Carrier System Dibenzyltoluene/Perhydrodibenzyltoluene,” *J. Chem. Eng. Data*, vol. 61, no. 1, pp. 504–511, Jan. 2016, doi: 10.1021/acs.jced.5b00671.
- [38] Z. Abdin, C. Tang, Y. Liu, and K. Catchpole, “Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers,” *iScience*, vol. 24, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.isci.
- [39] T. Suzuki, Y. ichiro Izato, and A. Miyake, “Identification of accident scenarios caused by internal factors using HAZOP to assess an organic hydride hydrogen refueling station involving methylcyclohexane,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 71, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104479.
- [40] LCF – Langchao Fire, “AQUEOUS FILM FORMING FOAM AFFF 1%.” [Online]. Available: https://www.firefightings.com/details/aqueous-film-forming-foam-afff-1/?gad_source=1&gad_campaignid=21927409135&gbraid=0AAAAABugzSDbcRIAxCzgulO5fpTZjSA

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

Aj&gclid=Cj0KCQjwlrVBBhDnARIsAHEQgOQ9bF_SPuKLCOQ9www0Gk0L1MaNqXuMzKkV7tmgQrqLD41vWhASSDcaAgyiEALw_wcB

- [41] Juda Trading, “ABC suchý chemický prášek.” [Online]. Available: <https://cz.fluorined-chemical.com/fire-extinguishing-agent/abc-dry-chemical-powder.html>
- [42] Zákony pro lidi, “209/2018 Sb. Vyhláška o hmotnostech, rozměrech a spojitelnosti vozidel.” [Online]. Available: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-209?utm_source=chatgpt.com
- [43] T. Zhu, R. Wang, Z. Chen, F. Ji, Y. Dong, and M. Yang, “Synthesis of Bifunctional Ru-Pd Catalysts Following the Double Reduction Method: Hydrogenation/Dehydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers,” 2022.
- [44] CEZ Group, “CEZ Group 2024 Annual Financial Report I. Activity Report,” 2024.
- [45] Ministry of Industry and Trade of the Czech Republic, “The Czech Republic’s Hydrogen Strategy,” 2021.
- [46] EGÚ Brno, “Příběhy energetiky.” [Online]. Available: <https://www.egu.cz/pribeh-y-energetiky/>
- [47] MAF CZ, “Resource Adequacy Assessment of the Power Grid of the Czech Republic until 2040”.
- [48] Rosen, “Hydrogen – Competence for a Sustainable Future.” Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.rosen-group.com/en/business-fields/future-fuels/hydrogen?gad_source=1&gad_campaignid=15561686074&gbraid=0AAAAAC5A8cGAsIGmPHbSOVziTuaVLMxBQ&gclid=Cj0KCQjwxJvBBhDuARIsAGUgNfiBP1hzPX3Bal1LV7EOyeaznwt73mVOUDkhAPI0JuSDidrcDpiNQYaAoyeEALw_wcB
- [49] Á. Bárkányi, B. L. Tarcsay, L. Lovas, T. Méré, T. Chován, and A. Egedy, “Future of hydrogen economy: simulation-based comparison of LOHC systems,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 26, no. 5, pp. 1521–1536, May 2024, doi: 10.1007/s10098-023-02528-w.
- [50] F. D’Ambra and G. Gébel, “Literature review: state-of-the-art hydrogen storage technologies and Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) development,” 2023, *Editions Technip*. doi: 10.2516/stet/2023029.
- [51] J. Lee, M. Usman, S. Park, S. Lee, and M. H. Song, “Development of Dehydrogenation System for Liquid Organic Hydrogen Carrier with Enhanced Reaction Rate,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/app14135803.
- [52] T. M. Narayanan, G. He, E. Gençer, Y. Shao-Horn, and D. S. Mallapragada, “Role of Liquid Hydrogen Carriers in Deeply Decarbonized Energy Systems,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 33, pp. 10768–10780, Aug. 2022, doi: 10.1021/acssuschemeng.2c00909.
- [53] S. Singh *et al.*, “Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector,” Jul. 18, 2015, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.rser.2015.06.040.
- [54] F. Wang *et al.*, “Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality,” Nov. 28, 2021, *Cell Press*. doi: 10.1016/j.xinn.2021.100180.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [55] P. Preuster, A. Alekseev, and P. Wasserscheid, "Hydrogen Storage Technologies for Future Energy Systems," vol. 8, p. 36, 2025, doi: 10.1146/annurev-chembioeng.
- [56] T. H. Le, N. Tran, and H. J. Lee, "Development of Liquid Organic Hydrogen Carriers for Hydrogen Storage and Transport," Jan. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ijms25021359.
- [57] M. Raab, S. Maier, and R. U. Dietrich, "Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 21, pp. 11956–11968, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.213.
- [58] M. M. Distel *et al.*, "Large-Scale H₂ Storage and Transport with Liquid Organic Hydrogen Carrier Technology: Insights into Current Project Developments and the Future Outlook," Feb. 01, 2025, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/ente.202301042.
- [59] L. Li, M. Yang, Y. Dong, P. Mei, and H. Cheng, "Hydrogen storage and release from a new promising Liquid Organic Hydrogen Storage Carrier (LOHC): 2-methylindole," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 36, pp. 16129–16134, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.04.240.
- [60] H. H. Cho, V. Strezov, and T. J. Evans, "Life cycle assessment of renewable hydrogen transport by liquid organic hydrogen carriers," *J. Clean. Prod.*, vol. 469, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143130.
- [61] M. D. Chilunda, S. A. Talipov, and E. J. Biddinger, "Carbon footprint comparison of liquid organic hydrogen carriers cycled thermochemically and electrochemically," Nov. 11, 2024. doi: 10.26434/chemrxiv-2024-7f2l6-v2.
- [62] United Nations, "Transport of dangerous goods," 2023.
- [63] Railway Pro, "UWC delivers new tank cars to Khimprom." [Online]. Available: <https://www.railwaypro.com/wp/uwc-delivers-new-tank-cars-to-khimprom/>
- [64] P. Kotek, B. T. Tóth, and A. Selei, "Designing a future-proof gas and hydrogen infrastructure for Europe – A modelling-based approach," *Energy Policy*, vol. 180, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.enpol.2023.113641.
- [65] I. Kountouris, R. Bramstoft, T. Madsen, J. Gea-Bermúdez, M. Münster, and D. Keles, "A unified European hydrogen infrastructure planning to support the rapid scale-up of hydrogen production," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-49867-w.
- [66] B. Fatih, "The Future of Hydrogen – Analysis – IEA." [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [67] Ministerstvo dopravy ČR, "Transevropské dopravní sítě (TEN-T)." [Online]. Available: [https://md.gov.cz/Dokumenty/Strategie/TEN-T-a-dalsi-doprava/Transevropske-dopravni-site-\(TEN-T\)](https://md.gov.cz/Dokumenty/Strategie/TEN-T-a-dalsi-doprava/Transevropske-dopravni-site-(TEN-T))

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [68] Intergovernmental Organisation for International Carriage by Rail, “Convention concerning International Carriage by Rail (COTIF) Appendix C-Regulation concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID),” Jan. 2025.
- [69] H. S. Alghamdi *et al.*, “Catalysts for Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): Efficient Storage and Transport for Renewable Energy,” Nov. 01, 2024, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/tcr.202400082.
- [70] GOV.UK, “Transporting dangerous goods: ADR tunnel categories.” [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/transporting-dangerous-goods-adr-tunnel-categories/adr-tunnel-categories>
- [71] J. Godinho, R. Hoefnagels, C. G. Braz, A. M. Sousa, and J. F. O. Granjo, “An economic and greenhouse gas footprint assessment of international maritime transportation of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers,” *Energy*, vol. 278, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.127673.
- [72] O. Rakhimov, S. Eshev, M. Rakhmatov, I. Saidov, F. Boymurodov, and I. Rayimova, “Improved pump for transporting liquid feed mixtures through pipes on farms,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, May 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202126304046.
- [73] F. Böing and A. Regett, “Hourly CO₂ emission factors and marginal costs of energy carriers in future multi-energy systems,” *Energies (Basel)*, vol. 12, no. 11, Jun. 2019, doi: 10.3390/en12122260.
- [74] W. Li, S. Zhao, K. Li, Y. Xing, Q. Li, and W. Yao, “GSOANR-based multi-objective train trajectory optimization,” *International Journal of Rail Transportation*, vol. 12, no. 4, pp. 733–748, 2024, doi: 10.1080/23248378.2023.2194684.
- [75] P. Gołębiowski, M. Jacyna, and A. Stańczak, “The assessment of energy efficiency versus planning of rail freight traffic. A case study on the example of Poland,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185629.
- [76] C. Wang, J. Cai, G. Cheng, J. Wang, and D. Tang, “Numerical Investigations of Tribological Characteristics of Biomimetic-Textured Surfaces,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/su151713054.
- [77] G. M. Scheepmaker, R. M. P. Goverde, and L. G. Kroon, “Review of energy-efficient train control and timetabling,” Mar. 01, 2017, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044.
- [78] X. Feng, H. Zhang, Y. Ding, Z. Liu, H. Peng, and B. Xu, “A review study on traction energy saving of rail transport,” 2013. doi: 10.1155/2013/156548.
- [79] B. Kalmykov and S. Danilov, “Improvement of equipment for top loading of petroleum products,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Aug. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202341305002.
- [80] J. Dai, Y. Qin, C. Wang, J. Zhu, and J. Zhu, “Research on Stability Control Technology of Hazardous Chemical Tank Vehicles Based on Electromagnetic Semi-Active Suspension,” *Actuators*, vol. 12, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/act12080333.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [81] D. Teichmann, W. Arlt, and P. Wasserscheid, "Liquid Organic Hydrogen Carriers as an efficient vector for the transport and storage of renewable energy," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 23, pp. 18118–18132, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.08.066.
- [82] International Union of Railways, "Exceptional consignments – Regulations concerning the preparation and management of exceptional consignments," 2016.
- [83] European Union Agency for Railways, "Operation and Traffic Management TSI." [Online]. Available: https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability/operation-and-traffic-management-tsi_en
- [84] Technické Normy ČSN, "ČSN EN 14025 - Nádrže pro přepravu nebezpečného zboží – Kovové tlakové nádrže – Konstrukce a výroba." [Online]. Available: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-14025-699025-217525.html#>
- [85] Technické Normy ČSN, "ČSN EN ISO 11120 - Lahve na přepravu plynů – Znovuplnitelné bezešvé ocelové velkoobjemové lahve na plyny s vodním objemem mezi 150 litry a 3000 litry – Návrh, konstrukce a zkoušení." [Online]. Available: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-11120-078525-165959.html#>
- [86] Hydrogenious LOHC Technologies, "Easy and efficient: We utilize conventional liquid-fuel infrastructure." [Online]. Available: <https://hydrogenious.net/how/>
- [87] DNV, "Maritime Forecast to 2050." Accessed: Jan. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast/>
- [88] M. Lázár *et al.*, "A Newly Proposed Method for Hydrogen Storage in a Metal Hydride Storage Tank Intended for Maritime and Inland Shipping," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/jmse11091643.
- [89] T. Liu and H. Wang, "Evaluating the Service Capacity of Port-Centric Intermodal Transshipment Hub," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/jmse11071403.
- [90] M. Gonzalez-Aregall, K. Cullinane, and I. Vierth, "A review of port initiatives to promote freight modal shifts in europe: Evidence from port governance systems," Jun. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/su13115907.
- [91] O. B. Inal, "Decarbonization of shipping: Hydrogen and fuel cells legislation in the maritime industry," *Brodogradnja*, vol. 75, no. 2, 2024, doi: 10.21278/brod75205.
- [92] IMO – International Maritime Organization, "Model Course on Personal Safety and Social Responsibilities." [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/398172162/Model-Course-1-21-Personal-Safety-and-Social-Responsibilities>
- [93] Ministerstvo dopravy ČR, "IMDG – Informace o přepravě nebezpečného zboží po moři." [Online]. Available: <https://md.gov.cz/Dokumenty/Namorni-urad-CR/Informace-namorniho-uradu-verejnosti/Informace-o-preprave-nebezpecneho-zbozi-po-mori?returl=/Dokumenty/Namorni-urad-CR/Informace-namorniho-uradu-verejnosti>

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [94] IMO – International Maritime Organization, “International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS).” [Online]. Available: [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx)
- [95] “Annex II - Regulations for the Control of Pollution by Noxious Liquid Substances in Bulk.” [Online]. Available: https://www.marpoltraininginstitute.com/MMSKOREAN/MARPOL/Annex_II/index.htm
- [96] Zákony pro lidi, “Zákon o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon).” [Online]. Available: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254>
- [97] Technické Normy ČSN, “ČSN EN ISO 13702 – Naftový a plynárenský průmysl – Kontrola a zmírňování požárů a explozí příbřežních produkčních zařízení – Požadavky a návod.” [Online]. Available: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-iso-13702-450010-205863.html#>
- [98] Aster J, “Inland Navigation on the Elbe River Waterway in the EU 25.”
- [99] S. Lim, J. Park, J. Lee, D. Lee, and J. Oh, “Carbon Dioxide Emission Characteristics and Operation Condition Optimization for Slow-Speed and High-Speed Ship Engines,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 14, Jul. 2024, doi: 10.3390/app14146134.
- [100] T. Szelangiewicz and K. Żelazny, “Average Fuel Consumption by a Ship on a Sales Line in Statistical Weather Conditions,” *New Trends in Production Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 573–579, Oct. 2018, doi: 10.2478/ntpe-2018-0072.
- [101] H. S. Alghamdi *et al.*, “Catalysts for Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs): Efficient Storage and Transport for Renewable Energy,” *Chemical record*, Nov. 2024, doi: 10.1002/TCR.202400082.
- [102] M. Schoeneich, M. Habel, D. Szatten, D. Absalon, and J. Montewka, “An Integrated Approach to an Assessment of Bottlenecks for Navigation on Riverine Waterways,” *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/w15010141.
- [103] P. Durajczyk and N. Drop, “Possibilities of using inland navigation to improve efficiency of urban and interurban freight transport with the use of the river information services (RIS) system-case study,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 21, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217086.
- [104] E. Southall and L. Lukashuk, “Hydrogen Storage and Transportation Technologies to Enable the Hydrogen Economy: Liquid Organic Hydrogen Carriers: Overview and perspectives on liquid organic hydrogen carriers technology,” *Johnson Matthey Technology Review*, vol. 66, no. 3, pp. 246–258, Jul. 2022, doi: 10.1595/205651322X16415717819428.
- [105] M. Markiewicz *et al.*, “Environmental and health impact assessment of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) systems-challenges and preliminary results,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 1035–1045, Mar. 2015, doi: 10.1039/c4ee03528c.
- [106] N. Goicoechea and L. M. Abadie, “Optimal slow steaming speed for container ships under the eu emission trading system,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 22, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14227487.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [107] A. Kelmalis, D. F. Lekkas, K. Moustakas, and S. Vakalis, "Assessing the emissions of short sea international shipping: a case study of the Mytilini-Ayvalik route," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 30, no. 54, pp. 115496–115505, Nov. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-30595-5.
- [108] A. Chapman, D. Hoa Nguyen, H. Farabi-Asl, K. Itaoka, K. Hirose, and Y. Fujii, "Hydrogen Penetration and Fuel Cell Vehicle Deployment in the Carbon Constrained Future Energy System," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 10, no. 4, pp. 409–416, Dec. 2020, doi: 10.1049/IET-EST.2020.0014.
- [109] L. D. Cortez, C. V. Tapia-Bastidas, E. Alava, J. Hidalgo' Crespo, and J. L. Amaya Rivas, "Hydrogen Integration for Achieving Net-Zero Emissions with Plug-in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, May 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202453005006.
- [110] D. Acharya, D. Ng, and Z. Xie, "Recent advances in catalysts and membranes for mch dehydrogenation: A mini review," Dec. 01, 2021, *MDPI*. doi: 10.3390/membranes11120955.
- [111] International Maritime Organization, "CONSTRUCTION – FIRE PROTECTION, FIRE DETECTION AND FIRE EXTINCTION – Summary of SOLAS chapter II-2." [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/summaryofsolaschapterii-2-default.aspx>
- [112] Európsky parlament a rada Európskej únie, "Smernica o kontrole nebezpečenstiev závažných havárií s prítomnosťou nebezpečných látok, ktorou sa mení a dopĺňa a následne zrušuje smernica Rady 96/82/ES," Jul. 2012.
- [113] M. Niermann, S. Timmerberg, S. Drünert, and M. Kaltschmitt, "Liquid Organic Hydrogen Carriers and alternatives for international transport of renewable hydrogen," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110171.
- [114] TÜV SÜD Slovakia, "Vodíkové potrubia – bezpečnosť a certifikácia prepravy vodíka." [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/sk-sk/temy/vodik/vod%C3%ADkove-sluzby,-ktore-prinasaju-bezpecnost-vasim-napadom/vodikove-potrubia>
- [115] Y. Sekine and T. Higo, "Recent Trends on the Dehydrogenation Catalysis of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC): A Review," *Top. Catal.*, vol. 64, no. 7–8, pp. 470–480, Jul. 2021, doi: 10.1007/s11244-021-01452-x.
- [116] N. Tsogt, D. Q. Gbadago, and S. Hwang, "Exploring the potential of liquid organic hydrogen carrier (LOHC) system for efficient hydrogen storage and Transport: A Techno-Economic and energy analysis perspective," *Energy Convers. Manag.*, vol. 299, p. 117856, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2023.117856.
- [117] Y. Kwak *et al.*, "Hydrogen production from homocyclic liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Benchmarking studies and energy-economic analyses," *Energy Convers. Manag.*, vol. 239, p. 114124, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2021.114124.
- [118] H. Floriánová and A. Matěják, "Pravidla pro aplikaci směrnice 2014/68/EU (PED) – tlaková zařízení," 2017.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [119] Evropský parlament a rada evropské unie, “Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2014/68/EU ze dne 15. května 2014 o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh.” [Online]. Available: <https://esipa.cz/sbirka/sbsrv.dll/sb?DR=AZ&CP=02014L0068-20140717>
- [120] Česká technická norma, “ČSN EN 1594 – Zařízení pro zásobování plynem – Plynovody s nejvyšším provozním tlakem nad 16 bar – Funkční požadavky.” [Online]. Available: <https://nahledy.normy.biz/n.php?i=94511>
- [121] Technické Normy ČSN, “ČSN EN 13480-1 – Kovová průmyslová potrubí – Část 1: Všeobecně.” [Online]. Available: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-13480-1-130020-166889.html#>
- [122] RADA EVROPSKÝCH SPOLEČENSTVÍ, “Směrnice o minimálních požadavcích na bezpečnostní nebo zdravotní značky na pracovišti (devátá samostatná směrnice ve smyslu čl. 16 odst. 1 směrnice 89/391/EHS),” Jun. 2007.
- [123] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE, “Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1907/2006 o registraci, hodnocení, povolování a omezování chemických látek, o zřízení Evropské agentury pro chemické látky, o změně směrnice 1999/45/ES a o zrušení nařízení Rady (EHS) č. 793/93, nařízení Komise (ES) č. 1488/94, směrnice Rady 76/769/EHS a směrnic Komise 91/155/EHS, 93/67/EHS, 93/105/ES a 2000/21/ES,” Dec. 2006.
- [124] Mero ČR, “The IKL oil pipeline.” [Online]. Available: https://mero.cz/en/operation/the-ikl-oil-pipeline/?utm_source=chatgpt.com
- [125] Mero ČR, “MERO ČR replaced the control system of the IKL crude oil pipeline after 16 years. It will ensure the most state-of-the-art control elements and strengthen the security of crude oil transportation to the Czech Republic.” [Online]. Available: https://mero.cz/en/mero-cr-replaced-the-control-system-of-the-ikl-crude-oil-pipeline-after-16-years-it-will-ensure-the-most-state-of-the-art-control-elements-and-strengthen-the-security-of-crude-oil-transportation-to-t/?utm_source=chatgpt.com
- [126] M. J. Zhou, Y. Miao, Y. Gu, and Y. Xie, “Recent Advances in Reversible Liquid Organic Hydrogen Carrier Systems: From Hydrogen Carriers to Catalysts,” Sep. 12, 2024, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1002/adma.202311355.
- [127] C. Oragwu, D. Molyneux, L. Lawal, S. Ameh, and C. N. Limited, “SPE-207147-MS Overcoming Challenges of Pigging the Unpiggable Pipelines,” 2021. [Online]. Available: <http://onepetro.org/SPENAIC/proceedings-pdf/21NAIC/2-21NAIC/D021S010R002/2457832/spe-207147-ms.pdf/1>
- [128] E. Spatolisano *et al.*, “Assessing opportunities and weaknesses of green hydrogen transport via LOHC through a detailed techno-economic analysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 703–717, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.040.
- [129] C. Wulf *et al.*, “Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options,” *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 431–443, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.180.

Toluen jako alternativní forma přepravy vodíku

- [130] M. Reuß, T. Grube, M. Robinius, P. Preuster, P. Wasserscheid, and D. Stolten, "Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model," *Appl. Energy*, vol. 200, pp. 290–302, 2017, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.050.
- [131] C. Krieger, K. Müller, and W. Arlt, "Coupling of a Liquid Organic Hydrogen Carrier System with Industrial Heat," *Chem. Eng. Technol.*, vol. 39, no. 8, pp. 1570–1574, Aug. 2016, doi: 10.1002/ceat.201600180.
- [132] D. Pashchenko, "Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) in the thermochemical waste heat recuperation systems: The energy and mass balances," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 67, pp. 28721–28729, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.208.
- [133] Ya. V. Grudz, R. B. Stasyuk, and M. Ya. Krill, "Research on energy efficiency of operation of city gas networks," *Oil and Gas Power Engineering*, no. 2(32), pp. 29–34, Dec. 2019, doi: 10.31471/1993-9868-2019-2(32)-29-34.
- [134] M. wei Fan, C. chu Ao, and X. rong Wang, "Comprehensive method of natural gas pipeline efficiency evaluation based on energy and big data analysis," *Energy*, vol. 188, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116069.
- [135] M. A. Maqbool, J. Khan, M. H. Hamayun, F. Ahmed, and M. Hussain, "Optimal retrofitting of MCH-Toluene dehydrogenation system: Energy and technoeconomic analysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 286, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117049.
- [136] R. Xiao, T. Zayed, M. A. Meguid, and L. Sushama, "Understanding the factors and consequences of pipeline incidents: An analysis of gas transmission pipelines in the US," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 152, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107498.
- [137] J. Bollmann *et al.*, "A path to a dynamic hydrogen storage system using a liquid organic hydrogen carrier (LOHC): Burner-based direct heating of the dehydrogenation unit," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 3, pp. 1011–1023, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.09.234.
- [138] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA, "ČSN EN ISO 3183 – Naftový a plynárenský průmysl – Ocelové trubky pro potrubní přepravní systémy," Feb. 2014.
- [139] ORLEN Unipetrol, "ORLEN Unipetrol is set to perform a regular turnaround of the petrochemical plant in Litvínov in April and May." [Online]. Available: https://www.orlenunipetrol.cz/en/media/pressreleases/Pages/ORLEN-Unipetrol-is-set-to-perform-a-regular-turnaround-of-the-petrochemical-plant-in-Litvinov-in-April-and-May.aspx?utm_source=chatgpt.com
- [140] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, "Vodíková strategie ČR – aktualizace 2024," Jul. 2024.
- [141] J. Sochor, "CESTOVNÍ MAPA VODÍKOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ V ČESKÉ REPUBLICE," Jun. 2023.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5 Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Adam Giurg

ORLEN Unipetrol RPA s.r.o., Záluží 1, 436 70 Litvínov

5.1 Obecné informace

5.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Plynný vodík je stabilní látka, která se přepravuje v tlakových lahvích. Lahve mohou být samostatně nebo spojeny do svazků. Další možností přepravy je vodíkový trailer, kde jsou lahve napevno připevněné k návěsu. Tlakové úrovně pro přepravu jsou běžně 200 až 500 bar. Hustota vodíku pro různé tlakové úrovně je zobrazena v Tabulka 5.1.

Pro přepravu většího množství vodíku se nejčastěji používají vodíkové trailery, které mají vodní objem tlakových lahví od 20 do 45 m³. Celkové množství vodíku je 300 až 1 400 kg. Plynný vodík se do traileru naplní pomocí kompresorů či přepuštěním ze stacionárních zásobníků s vyšším tlakem. Vypouštění se obvykle děje pouze rozdílem tlaků.

TABULKA 5.1: HUSTOTY VODÍKU PŘI RŮZNÝCH TLACÍCH A TEPLOTĚ 15 °C.

Tlak [bar]	Hustota H ₂ [kg/m ³]
200	14,94
300	21,15
500	31,63

5.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Plynný vodík se již běžně dopravuje bez speciálních omezení. Jedná se o hořlavý plyn, takže při manipulaci je potřeba dodržovat běžné bezpečnostní postupy, jako je uzemnění, nemít v blízkosti zdroj ohně, tepla či statické elektřiny atd. Také se jedná o stlačený plyn, takže se musí dbát na správné tlakové úrovně, aby nedošlo k přetlakování. K tlakovým nádobám se také pojí povinnosti pravidelných kontrol.

V případě úniku plynného vodíku nedochází k přímému toxickému ohrožení lidí, protože vodík není toxický. Ve volném a dobře větraném prostoru se unikající vodík díky své nízké hustotě obvykle rychle rozptýlí, čímž se snižuje pravděpodobnost vzniku výbušné atmosféry. Riziko požáru či výbuchu však nelze zcela vyloučit, zejména v uzavřených nebo špatně větraných prostorech, kde se může vodík hromadit u stropu. Při velkém úniku a přítomnosti zápalného zdroje může dojít k zapálení unikajícího proudu a vzniku tzv. jet fire; největší riziko představuje oblast v bezprostřední blízkosti místa úniku.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.2 Silniční přeprava

5.2.1 Vhodnost přepravy

Plynný vodík je sice technicky možné přepravovat na velké vzdálenosti, nicméně z ekonomického hlediska se spíše vyplatí transport na menší vzdálenosti a pro menší až střední objemy. Za ekonomicky výhodnou se obvykle považuje přeprava na vzdálenosti zhruba do 150 km [1], konkrétní limit však závisí na typu soupravy, využití její kapacity, ceně vodíku a zvoleném logistickém řešení. Rozvoj trailerů s kompozitními zásobníky umožňuje přepravovat větší množství vodíku, a tím prodlužovat i ekonomicky únosnou přepravní vzdálenost. Pro ostrovní řešení a regionální distribuci (např. na úrovni krajů) je proto přeprava plynného vodíku velmi vhodná, zatímco na národní úrovni může sloužit jako doplňkový způsob tam, kde není k dispozici potrubní infrastruktura.

5.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Vodíkové trailery s ocelovými lahvemi na tlak 200 bar jsou běžně využívány již desetiletí, takže toto řešení dosahuje úrovně technologické připravenosti TRL 9. Řešení s kompozitními lahvemi zatím není tolik rozšířené a stále lze některé části optimalizovat, zejména při provozu v nižších tlacích. Kompozitní lahve mají omezení na minimální tlak či je nutné dodržovat odlišné podmínky od provozu ve vyšších tlacích, to se projevuje například nižšími průtoky plynu. Toto může působit problémy při vysoušení lahví, při zavodňování traileru po předchozím použití dusíku či při přepouštění do nízkotlakých zásobníků.

Složitější může být také zajištění správného proplachu propojovacích částí mezi trailerem a plnicí stanicí, a to vzhledem k odlišnému zapojení, jako je např. oddělení vstupního a výstupního ventilu. V neposlední řadě může být problém i horší tepelná vodivost kompozitního materiálu, která může při vysoké okolní teplotě zhoršovat odvod tepla a působit problémy nárůstem teploty vodíku při jeho plnění. Kromě horšího odvodu tepla mají kompozitní lahve také nižší maximální provozní teplotu, která může být pouze 65 °C. Tyto rozdíly oproti ocelovým lahvím kladou vyšší nároky na provoz a návrh systému, a je proto stále nezbytné konkrétní řešení optimalizovat. Z tohoto důvodu lze uvažovat úroveň technologické připravenosti TRL 8.

5.2.3 Popis druhu přepravy

Přepravu plynného vodíku lze realizovat v tlakových lahvích, svazcích lahví nebo vodíkovém traileru. Tlakové lahve se používají převážně pro přepravu vodíku jako technického plynu pro laboratorní účely. Pro mobilitu je potřeba převážet podstatně větší množství, které se řeší svazky lahví či nejčastěji trailery. Rozdíl je, že u traileru jsou svazky lahví napevno připevněny k návěsu nebo k MEGC kontejneru umístěnému na návěsu.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Svazek lahví je sestava menších tlakových nádob (viz Obrázek 5.1), které jsou propojené do jedné či více sekcí, ukotvených v konstrukci na paletovém systému. Celý systém lze přemísťovat pomocí vysokozdvizných vozíků, takže u zákazníka je možné jednoduše měnit prázdný svazek za plný (kus za kus). Objemy takových sestav se obvykle pohybují v rozmezí od 0,6 do 2,5 m³. Kromě různých velikostí jednotlivých svazků je velmi flexibilní i jejich počet na vozidle, což umožňuje během jednoho závozu rozvézt více svazků různým zákazníkům. Tento způsob je proto vhodný zejména pro menší odběratele s nižší spotřebou vodíku, bez nutnosti dosahovat co největších přepravovaných objemů při jednom závozu.



OBRAZEK 5.1: SVAZKY TLAKOVÝCH LAHVÍ OD SPOLEČNOSTI VÍTKOVICE CYLINDERS [2].

Vodíkové trailery mají obvykle objem od 20 do 45 m³. Díky tomu se hodí na zavážení většího množství vodíku. Největší rozdíl oproti přepravě ve svazcích lahví spočívá v přepouštění vodíku do stacionárního zásobníku. Trailery mají obvykle minimálně 6 sekcí, což umožňuje postupné naplnění zásobníku na vyšší tlak. Pokud by byla jen jedna sekce, tlaky by se vyrovnaly na nižší hodnotě. V posledních letech se často u vodíkové infrastruktury využívají trailery jako vstupní zásobník, takže místo přepouštění se na stanici jednoduše připojí plný trailer a prázdný se odpojí. Tím se podstatně zkrátí doba závozu a zároveň se využije větší množství vodíku než při přepouštění do vysokotlakého skladování (kolem 200 bar). Pro kompresor na stanici je navíc výhodou vyšší vstupní tlak než u nízkotlakého skladování. Toto řešení je výhodnější pro velké množství vodíku, jelikož při malých odběrech by kapacita drahého traileru nebyla dostatečně využita.

Vodíkové trailery mohou mít menší množství větších lahví (viz Obrázek 5.2), nebo naopak velké množství malých lahví (viz Obrázek 5.3 a Obrázek 5.4). Malé lahve mohou být orientovány horizontálně nebo vertikálně a konkrétní uspořádání se liší podle výrobce. Na obrázcích jsou zobrazeny standardní řešení ve velikosti 40' (viz Obrázek 5.3 a Obrázek 5.4), nicméně výrobci nabízejí i velikosti 20', 30' a 45' či zvýšené verze [3]. Tato provedení tak nabízejí široký rozptyl objemů v závislosti na konkrétním řešení.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku



OBRÁZEK 5.2: VODÍKOVÝ TRAILER – TZV. BATERIOVÝ [4].



OBRÁZEK 5.3: VODÍKOVÝ TRAILER S MALÝMI LAHVEMI ORIENTO VANÝMI HORIZONTÁL NĚ [5].



OBRÁZEK 5.4: VODÍKOVÝ TRAILER S MALÝMI LAHVEMI ORIENTO VANÝMI VERTIKÁL NĚ [6].

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Pro transport plyného vodíku se nejběžněji používá tlaková hladina 200 bar, přičemž tlakové nádoby jsou zpravidla ocelové. Ve svazcích se používají ocelové lahve pro vyšší tlaky, avšak u trailerů nelze toto řešení použít, jelikož by kvůli tloušťce stěny trailer narážel na hmotnostní limity pro silniční provoz. Pro vyšší tlaky se proto používají kompozitní lahve, které jsou výrazně lehčí. V poslední době se výrazně rozšiřuje nabídka trailerů s kompozitními lahvemi pro tlaky od 300 do 500 bar [3, 6]. Tyto trailery mají často i větší objem tlakových lahví, což v kombinaci s vyššími tlaky zajišťuje přepravu výrazně většího množství vodíku.

Do běžných 40' vodíkových trailerů s ocelovými lahvemi se vejde 300 až 350 kg vodíku. Do vodíkových trailerů s kompozitními lahvemi na 300 bar se vejde přibližně 600 až 850 kg vodíku a pro provedení na 500 bar asi 1 100 až 1 250 kg vodíku. Do prodlouženého a zvýšeného traileru na 500 bar se může vejít až 1 400 kg vodíku.

5.2.4 Bezpečnostní opatření

Vodík je hořlavý plyn, takže při nakládce a vykládce je nezbytné uzemnit vodíkový trailer a v okolí nesmí být zdroj ohně, tepla, statické elektřiny či jiný zdroj, který by mohl iniciovat zapálení vodíku. Při připojení traileru je vždy nezbytné propláchnout připojovací hadici a odstranit z ní vzduch pro zajištění kvality vodíku. V některých případech se propojovací hadice nejdříve propláchne dusíkem, to zajistí lepší vysušení hadice, a vodík tak nepřijde do kontaktu s kyslíkem, což je z bezpečnostního hlediska výhodnější. Směs vodíku a vzduchu/dusíku se běžně vypouští přes komínek, který musí být umístěn tak, aby nehrozilo zapálení vodíku a nebyly ohroženy osoby ani majetek.

Při malých únicích vodík díky nízké hustotě rychle stoupá vzhůru. V otevřeném prostoru je proto pravděpodobnost překročení limitu hořlavosti (4 obj. %) velmi nízká.

Při neřízeném úniku plyného vodíku dochází často k jeho zapálení. Při expanzi se vlivem Joule-Thomsonovu jevu vodík zahřívá a při expanzi z vysokých tlaků může být nárůst teploty dostatečný k jeho samovznícení. Vzhledem k tomu, že pro zapálení vodíku stačí nízká iniciační energie, může ke vzplanutí dojít i vlivem mechanického podnětu (např. o hranu). K těmto případům může dojít jen při velké netěsnosti, a tedy při velkém průtoku.

V případě požáru se vodík nehasí, ale jen se ochlazuje okolí a vodními clonami se omezuje vodíkový plamen. Vodíkový plamen je špatně viditelný. Čistý vodík má bezbarvý plamen nebo mírně namodralý. Proto je vhodné využít termokamery, které plamen zachytí. Pokud je to možné, uzavře se přívod vodíku k místu úniku. Pokud to možné není, trailer se odtáhne na volné prostranství, kde se nechá vodík vyhořet. [7]

5.2.5 Legislativní omezení

Pro silniční dopravu vodíku platí dohoda ADR [8]. V ní jsou specifikovaná pravidla pro transport vodíku (UN 1049, vodík, stlačený). ADR nelimituje množství ani tlak vodíku. Pro tlakové lahve je nejzásadnější certifikace TPED (Směrnice 2010/35/EU o přepravitelných tlakových

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

zařízeních) [9], která se zabývá bezpečnostními požadavky a postupem posuzování shody pro přepravitelná tlaková zařízení používaná výhradně pro přepravu nebezpečných věcí (třída 2) v rámci EU. S touto certifikací se celosvětově vyrábí tlakové lahve do maximálně 500 bar.

U přepravy plynného vodíku je největší limitace hmotnost tlakových nádob. Vozidla o celkové hmotnosti 40 t vozí jen stovky kg vodíku, takže drtivá většina hmotnosti je „železo“. Limitující je tedy národní legislativa na maximální zatížení silnice. Tato maximální hmotnost limituje množství tlakových nádob, a tím i množství přepravovaného vodíku. Toto je důvod proč se vodíkové trailery s ocelovými lahvemi dimenzují pouze na 200 bar. Pro vyšší tlaky je nezbytné použít lehčí kompozitní lahve.

5.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Plynný vodík je již v ČR přepravován pomocí tlakových lahví, svazků tlakových lahví a trailerů s ocelovými i kompozitními lahvemi. Jedná se tedy o běžné a dostupné řešení, které lze podle potřeby libovolně rozšířit. Za hlavní omezení v ČR lze považovat nedostatek plnicích stanic na vyšší tlaky než 200 bar. Pro plnění trailerů nad 200 bar by bylo nutné vybudovat novou plnicí stanici s kompresory na vyšší tlaky.

Protože u plynného vodíku nedochází k přeměně na jinou formu, je jeho distribuce jednodušší a lze ji relativně snadno rozšiřovat navyšováním plnicí kapacity a počtu závozu. Omezujícím faktorem zde zpravidla není technologická minimální velikost odběru.

5.2.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost nakládky je spojena s elektrickou energií na kompresi plynného vodíku a jeho chlazení. Vstupní tlak je nejčastěji několik desítek bar. Tento tlak může být dodáván přímo z elektrolyzátoru, nebo v případě elektrolyzátoru s výstupem na atmosférický tlak je součástí výroby i první komprese. Jak pro potrubí, tak pro nízkotlakové zásobníky je potřeba přibližně 30–50 bar. Energetická náročnost komprese z tlaku 30 bar(g) na různé tlakové hladiny pro přepravu je uvedena v Tabulka 5.2.

TABULKA 5.2: ENERGETICKÁ SPOTŘEBA PRO KOMPRESI VODÍKU ZE VSTUPNÍHO TLAKU 30 BAR(G) NA RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ.

Výstupní tlak [bar]	Energetická spotřeba [kWh/kg H ₂]
200	1,62
300	1,95
500	2,39

Pozn.: Pro výpočet komprese byl využit program Aspen [10], účinnost elektromotoru byla zvolena 87 % a pro chlazení byl zvolen koeficient výkonu 2,7.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Energetická náročnost přepravy je spojena pouze se spotřebou tahače. V dnešní době jsou nejběžnější dieselové tahače. U přepravy vodíku je důležité, že samotný vodík tvoří jen malou část celkové hmotnosti soupravy, většinu hmotnosti představuje tahač, návěs a tlakové nádoby. Nákladní vozidlo proto jezdí prakticky vždy jako plné, což znamená vyšší spotřebu paliva. Spotřeba podle zkušenosti provozovatelů může být až 40 l/100 km. Nafta má výhřevnost 44 MJ/kg, což je asi 12,2 kWh/kg a 10,2 kWh/l. Energetická spotřeba je tedy asi 4 kWh/km. V případě vodíkového tahače se spotřebou 10 kg H₂/100 km by energetická spotřeba byla asi 3,3 kWh/km. Hodnotu energetické spotřeby je ještě potřeba vztáhnout na množství přepraveného vodíku. To je závislé na velikosti vodíkového traileru, tlakové úrovni a množství vyloženého vodíku, které je závislé na tlakové úrovni stacionárního zásobníku, kam se přepouští vodík, či případně na zbytkovém tlaku při výměně traileru nebo svazků lahví. Příklady přepraveného množství a energetické spotřeby na různých tlakových hladinách jsou uvedeny v Tabulka 5.3.

Vykládka plynného vodíku se nejčastěji provádí pouhým přepouštěním vodíku, kde hnací silou je rozdílný tlak v traileru a stacionárním zásobníku. Druhou možností je výměna traileru nebo svazku lahví. Ani jedna z možností prakticky nespotřebovává energii, popřípadě je její spotřeba zanedbatelná.

TABULKA 5.3: PŘÍKLADY MNOŽSTVÍ PŘEVEZENÉHO PLYNNÉHO VODÍKU (M) A ENERGETICKÁ SPOTŘEBA NAFTY (E) PRO RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ.

Tlaková úroveň [bar]	Nízkotlak nebo výměna		Vysokotlak	
	m [kg]	E [kWh/100 km/kg H ₂]	m [kg]	E [kWh/100 km/kg H ₂]
200	270	1,5	130	3,1
300	540	0,7	340	1,2
500	850	0,5	670	0,6

Pozn.: Při přepouštění do nízkotlakého zásobníku je počítáno se zbytkovým tlakem 40 bar a do vysokotlakého 120 bar. Při výměně traileru nebo svazků je počítáno se zbytkovým tlakem 40 bar.

5.2.8 Ekonomické aspekty

Náklady na nakládku plynného vodíku jsou spojeny s kompresí. Jedná se tedy o investiční a provozní náklady na plnicí stanici. Investiční náklady jsou především na kompresory a provozní náklady jsou spojeny především hlavně s elektrickou energií pro kompresory a chlazením. Energetická náročnost komprese je uvedena v Tabulka 5.3.

Náklady na přepravu a vykládku jsou spojeny s investičními náklady na vodíkový trailer, nebo svazky lahví, a tahač. Dále provozními náklady jsou především spojeny s provozem tahače. Finální náklady jsou velmi závislé na množství přepravovaného vodíku a vzdálenosti.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Přepravovaná množství pro různé tlakové hladiny jsou uvedena v Tabulka 5.3. Podstatná je i četnost závozu, protože významná část nákladů má fixní charakter.

Při přepravě plynného vodíku nedochází k odparu či úniku. Nicméně ke ztrátám vodíku dochází vždy při připojení během nakládky a vykládky. Jsou způsobeny zejména proplachem, analýzou čistoty vodíku a odtlačováním. Tyto úkony vyžadují přibližně konstantní množství vodíku v jednotkách kg, a to bez ohledu na to, zda probíhá přepouštění, nebo výměna traileru či svazků. Proto jsou ztráty procentuálně nižší při přepravě většího množství vodíku (viz Tabulka 5.4).

TABULKA 5.4: ZTRÁTA PLYNNÉHO VODÍKU PŘI NAKLÁDCE A VYKLÁDCE PRO RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ PŘEPRAVY.

Tlaková úroveň [bar]	Ztráta při nakládce/vykládce	
	Nízkotlak nebo výměna [%]	Vysokotlak [%]
200	0,75	1,5
300	0,4	0,6
500	0,25	0,3

Další ztráty mohou být způsobeny netěsnostmi v jakékoliv části řetězce. K těm může dojít při špatném dotažení spoje či vlivem teplotní roztažnosti materiálů při větší změně teploty. Je snaha, aby tyto ztráty byly nulové, proto probíhá pravidelné měření úniků. Množství úniků se může významně lišit a nelze je snadno předpovědět, jelikož k nim může docházet naprosto nahodile, proto s těmito ztrátami není počítáno.

5.2.9 Ekologické aspekty

Emisní náročnost nakládky je spojena především se spotřebou elektrické energie pro kompresi (Tabulka 5.2), a proto závisí na emisní stopě použité elektřiny. Při využití elektřiny z obnovitelných zdrojů lze emise uvažovat jako nulové. Pro kompresi lze využívat i elektrickou energii s garancí původu, jelikož technologie mimo výrobu vodíku nepodléhají přísným podmínkám evropské legislativy (jako např. nutnost PPA kontraktů pro výrobu obnovitelného vodíku). V případě využití elektřiny ze sítě bez certifikátů má elektřina v ČR emisní stopu 340 g CO₂/kWh podle statistik MPO za rok 2024 [11] a 477 g CO₂/kWh podle Evropské legislativy na výpočet úspory emisí [12], která vychází z dat za rok 2020 a zahrnuje i nepřímé emise. Tato hodnota je závazná i pro výpočet emisí obnovitelného vodíku.

Emisní náročnost přepravy je dána především emisemi tahače. V případě využití vodíkového či elektrického tahače jsou lokální emise nulové. Nicméně v praxi se v současnosti používají převážně dieselové tahače. Emise nafty jsou podle Evropské legislativy 95,1 g CO₂/MJ = 3,95 kg CO₂/kg = 3,3 kg CO₂/l [12]. Se spotřebou tahače 40 l/100 km je emisní stopa přepravy 1,32 kg CO₂/km. V Tabulka 5.5 jsou uvedeny příklady emisních stop vztažených na kg vodíku pro různé tlakové úrovně.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 5.5: PŘÍKLADY MNOŽSTVÍ PŘEVEZENÉHO PLYNNÉHO VODÍKU (M) A EMISNÍ STOPA NAFTY (E) PRO RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ.

Tlaková úroveň [bar]	Nízkotlak nebo výměna		Vysokotlak	
	m [kg]	e [kg CO ₂ /100 km/kg H ₂]	m [kg]	e [kg CO ₂ /100 km/kg H ₂]
200	270	0,49	130	1,02
300	540	0,24	340	0,39
500	850	0,16	670	0,20

Pozn.: Při přepouštění do nízkotlakého zásobníku je počítáno se zbytkovým tlakem 40 bar a do vysokotlakého 120 bar. Při výměně traileru nebo svazků je počítáno se zbytkovým tlakem 40 bar.

Emisní náročnost vykládky je prakticky nulová, jelikož nedochází k uvolňování emisí nebo spotřebě energie. Zanedbatelné množství emisí může vznikat při výměně svazků lahví. Toto bezvýznamné množství není bráno v potaz.

5.2.10 Normy, oborové předpisy

ADR – Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí.

TPED Výroba a provoz přepravitelných tlakových zařízení – směrnice rady Evropské unie 2010/35/EU.

ČSN ISO 19880-1 – Plynný vodík – Čerpací stanice – Část 1: Obecné požadavky.

ČSN 34 2710 – Elektrická požární signalizace – Projektování, montáž, užívání, provoz, kontrola, servis a údržba.

ČSN EN ISO 4126-1 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 1: Pojistné ventily.

ČSN EN ISO 4126-2 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 2: Bezpečnostní zařízení s průtržnou membránou.

ČSN EN IEC 60079-10-1 ed.3 – Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry.

ČSN 73 6060 – Čerpací stanice pohonných hmot.

ČSN EN ISO 9809-1 – Lahve na plyny – Návrh, konstrukce a zkoušení zovuplnitelných bezešvých ocelových lahví a velkoobjemových lahví na plyny – Část 1: Lahve a velkoobjemové lahve ze zušlechtěné oceli s mezí pevnosti v tahu menší než 1 100 MPa.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

ČSN EN ISO 9809-2 – Lahve na plyny – Návrh, konstrukce a zkoušení znovuplnitelných bezešvých ocelových lahví a velkoobjemových lahví na plyny – Část 2: Lahve a velkoobjemové lahve ze zušlechtěné oceli s mezí pevnosti v tahu 1 100 MPa nebo větší.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.3 Drážní přeprava

5.3.1 Vhodnost přepravy

Drážní přeprava plyného vodíku je principiálně podobná silniční přepravě. Rozdíl je především v množství vodíku, které je možné přepravit najednou. Díky větší kapacitě přepravy je možné plyný vodík ekonomicky i technicky dopravovat na delší vzdálenosti. Nevýhodou je limitace místa nakládky a vykládky. Z tohoto pohledu je drážní přeprava vhodná spíše pro transport vodíku z místa centralizované výroby do chemických továren či distribučního centra, ze kterého bude vodík dále přepravován jiným způsobem. Drážní přeprava tedy není vhodná pro ostrovní řešení či úroveň krajů. Vhodnější je pro přepravu na národní úrovni či v rámci sousedních států.

5.3.2 Úroveň technologické připravenosti

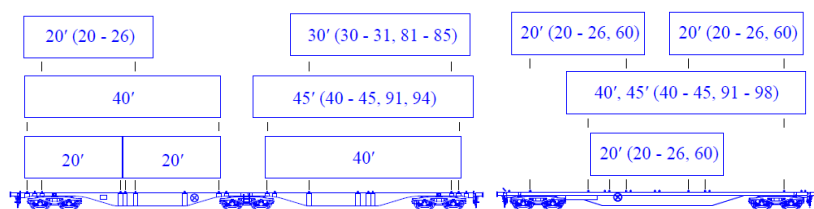
Plyný vodík není běžně přepravován pomocí drážní přepravy, takže úroveň technologické připravenosti (TRL) je nižší než u silniční přepravy. Nicméně pravidla pro přepravu plyného vodíku po železnici jsou velmi podobná pravidlům pro silniční přepravu. Nejvyšší TRL má přeprava v tlakových lahvích zabudovaných v ISO kontejnerech, které lze běžně po železnici přepravovat. Z toho důvodu je u tohoto řešení TRL 7. Speciální železniční vozy pro přepravu vodíku, obdobně jako u silniční přepravy, se v praxi téměř nevyužívají, a proto je zde TRL nízké. Vzhledem k tomu, že by šlo o obdobný systém, lze předpokládat TRL přibližně v rozmezí 5–6.

5.3.3 Popis druhu přepravy

Nejběžnější možnost přepravy plyného vodíku po železnici je v ISO kontejnerech. Tlakové nádoby s vodíkem v těchto kontejnerech lze naložit na klasické intermodální vozy (viz Obrázek 5.5). Princip je podobný jako u přepravy ISO kontejnerů na podvalníku při silniční přepravě. Největší rozdíl spočívá v možnostech zatížení vozu. U železniční přepravy je hmotnostní omezení podstatně méně limitující.

Výhodou drážní přepravy je možnost nakonfigurovat přepravu přesně podle konkrétní trasy a hmotnosti ISO kontejnerů. Díky tomu lze lépe využít maximální nosnost kontejnerů, což umožňuje uvažovat i o použití ocelových lahví pro tlaky vyšší než 200 bar. Nicméně vzhledem k tomu, že drážní přeprava se typicky kombinuje se silniční přepravou, je zpravidla výhodnější zvolit takovou konfiguraci, která je optimální pro oba způsoby přepravy.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku



OBRÁZEK 5.5: PŘÍKLADY INTERMODÁLNÍCH VOZŮ S MOŽNOSTMI NALOŽENÍ ISO KONTEJNERŮ [13].

Další výhodou drážní přepravy je možnost přepravovat až 30 vozů najednou, což znamená významné navýšení celkového přepravovaného množství vodíku, a tím i snížení nákladů. Při drážní přepravě s možností překládání je nutné zajistit adekvátní upevnění tlakových lahví, které musí být navrženo na vyšší míru nárazů a manipulace.

Teoreticky je možné použít i jiné uspořádání či konstrukci přepravního prostředku. Ale vzhledem k tomu, že se vodík nyní přepravuje z centralizovaných výroby v jiných formách (amoniak, methanol atp.), železniční síť limituje možnosti přepravy ke koncovému uživateli a nutnosti vysokých investic, je přeprava plyného vodíku přes železnici nepravděpodobná.

5.3.4 Bezpečnostní opatření

Nakládka a vykládka plyného vodíku v drážní přepravě je totožná se silniční přepravou, a proto jsou i bezpečnostní opatření obdobná jako v kapitole 5.2.4. Rozdílem je spojení více vozů do jedné soupravy, což klade vyšší nároky na bezpečnost při manipulaci. Celkové množství vodíku je podstatně větší a existuje vyšší riziko, že případný požár ovlivní více vozů. To má za následek limitaci míst, kde může náklad s plyným vodíkem stát. Odstupové vzdálenosti jsou proto větší než v případě silniční přepravy.

5.3.5 Legislativní omezení

Pro drážní přepravu platí řád RID [14]. V něm jsou specifikována pravidla pro transport vodíku (UN 1049, vodík, stlačený). Tato pravidla jsou téměř totožná s pravidly pro silniční přepravu (viz kapitola 5.2.5). Navíc jsou u drážní přepravy požadovány tlumící prvky energie na vozech. Vozy musí být schopny pohltit energii o velikosti nejméně 800 kJ na každém konci vozu. Pohlcení energie plastickou deformací musí nastat až za podmínek, které jsou mimo rozsah normálního železničního provozu (nárazová rychlost je větší než 12 km/h, nebo síla vyšší než 1 500 kN) [14].

Stejně jako pro silniční přepravu je i pro drážní přepravu zásadní certifikace TPED (Směrnice 2010/35/EU o přepravitelných tlakových zařízeních) [9], která stanovuje bezpečnostní požadavky a postup posuzování shody pro přepravitelná tlaková zařízení používaná výhradně

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

pro přepravu nebezpečných věcí (třída 2) v rámci Evropské Unie. V praxi se s touto certifikací celosvětově vyrábějí tlakové lahve do tlaků 500 bar.

Maximální hmotnost ISO kontejneru je 30,4 t. Samotný 20' kontejner má hmotnost 2,2 t a 40' kontejner 3,8 t. Z toho vyplývá, že u 40' kontejneru může být hmotnost nákladu až 26,6 t a u 20' kontejneru až 28,2 t. V případě 40' kontejneru obvykle náklad nelimituje maximální zatížení vozu, takže lze využít celých 26,6 t pro náklad.

U 20' kontejneru záleží na jeho rozložení na voze. Pokud je na voze jen jeden kontejner, je možné využít celých 28,2 t pro náklad. V případě dvou kontejnerů na jednom voze již může docházet k omezení hmotnosti z důvodu maximálního zatížení náprav nebo únosnosti vozu. Zde záleží zejména na traťové třídě trasy. V případě traťové třídy D k limitaci nedochází. Ale u trati s traťovou třídou B již může být v kontejneru náklad jen kolem 24,5 t. Konkrétní hodnoty záleží na konkrétním typu vozu a trase.

5.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Plynný vodík není v ČR přepravován drážní dopravou. Pro intermodální dopravu by však bylo možné železnici využít jako jednu část přepravního řetězce, kdy by se plyný vodík přepravoval v ISO kontejnerech. V takovém případě by bylo třeba zajistit pouze překladiště.

V případě plnění v ČR by bylo nutné vybudovat plnicí stanici v blízkosti kolejí a pro vykládku by bylo naopak třeba vybudovat stáček místo. Jelikož doprava je limitována kolejemi a zároveň je výhodnější převážet větší množství, byla by tato doprava vhodná jen pro konkrétní řešení poptávky vodíku pro průmyslové areály. Takové řešení je však nutné porovnat i s jinými formami dopravy vodíku, které lze pro tento účel rovněž využít.

5.3.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost nakládky je spojena se spotřebou elektrické energie na kompresi plynného vodíku a jeho chlazení. Vstupní tlak je nejčastěji v řádu několika desítek bar. Tento tlak může být dodáván přímo z elektrolyzátoru, nebo je, v případě elektrolyzátoru s výstupem na atmosférický tlak, součástí systému i první komprese. Jak pro potrubí, tak pro nízkotlakové zásobníky je potřeba přibližně 30–50 bar. Energetická náročnost komprese z tlaku 30 bar(g) na různé tlakové hladiny pro přepravu je uvedena v Tabulka 5.2.

Energetická náročnost přepravy je spojena převážně se spotřebou lokomotivy. Na hlavních tazích se v dnešní době využívají elektrické lokomotivy, které jsou schopny vést soupravu až o 30 vozech. Dieselové lokomotivy mají nižší výkon, takže se využívají 1 až 4 lokomotivy současně podle přepravované hmotnosti a převýšení trasy, jejich výhodou je možnost přepravy i mimo elektrifikované trasy. Pro zjednodušení je dále uvažováno s elektrickou lokomotivou. Elektrická lokomotiva má podstatně větší účinnost a umožňuje rekuperaci energie, přičemž tato energie je ve výpočtech odečtena od spotřeby. Stejně jako u silniční přepravy i zde tvoří drtivou většinu hmotnosti vozy a ISO kontejnery s tlakovými lahvemi,

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

zatímco samotný plyný vodík má zanedbatelnou hmotnost. Proto je uvažována spotřeba lokomotivy s plným nákladem při cestě tam i zpět.

Spotřeba elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace byla počítána v rozmezí 1 600–1 700 kWh/100 km v závislosti na celkové hmotnosti. Hodnotu energetické spotřeby je ještě třeba vztáhnout na množství přepraveného vodíku, které závisí na tlakové úrovni a konkrétním rozložení kontejnerů. Pro výpočty byly využity 200 bar ocelové lahve ve 20' kontejneru, 300 bar kompozitní lahve ve 40' kontejneru a 500 bar kompozitní lahve ve 40' kontejneru. Při dopravě je počítáno s přepravou 30 vozů a u 20' kontejnerů jsou dva kontejnery na voze. Příklady přepraveného množství a energetické spotřeby na různých tlakových hladinách jsou uvedeny v Tabulce 5.6.

TABULKA 5.6: PŘÍKLADY MNOŽSTVÍ PŘEVEZENÉHO PLYNNÉHO VODÍKU (M) A ENERGETICKÁ SPOTŘEBA ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY (E) PRO RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ.

Tlaková úroveň [bar]	m [t]	E [kWh/100 km/kg H ₂]
200	14,1	0,12
300	21,6	0,074
500	33,6	0,048

Pozn.: Počítáno s výměnou kontejneru, takže zbytkový tlak je 40 bar. Počet vozů 30. 200 bar 20' kontejnery s ocelovými lahvemi, 300 a 500 bar 40' kontejnery s kompozitními lahvemi.

Vykládka plynného vodíku se může realizovat pouhým přepouštěním vodíku, kde hnací silou je rozdílný tlak v tlakových lahvích a stacionárním zásobníku. Druhou možností je výměna celého ISO kontejneru. Ani jedna z možností prakticky nespotřebovává energii či je spotřebovaná energie naprosto zanedbatelná.

5.3.8 Ekonomické aspekty

Náklady na nakládku plynného vodíku jsou spojeny s kompresí, tedy s investičními a provozními náklady na plnicí stanici. Největšími investičními náklady jsou především kompresory a provozní náklady jsou pak spojeny především se spotřebou elektrické energie na kompresi a chlazení. Energetická náročnost komprese je v Tabulce 5.2. Dále můžou nastat další náklady na manipulaci s kontejnery či řazení vozů.

Náklady na přepravu a vykládku jsou spojeny s investičními náklady na kontejnery na vodík nebo svazy lahví a lokomotivu. Provozní náklady jsou následně spojeny především s provozem lokomotivy. Celkové náklady jsou výrazně závislé na množství přepravovaného vodíku

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

a přepravní vzdálenosti. Přepravovaná množství pro různé tlakové hladiny jsou uvedena v Tabulka 5.6. Kromě jednotlivé přepravy je podstatná i četnost přeprav, protože velká část nákladů má fixní charakter.

Při přepravě plyného vodíku nedochází k odparu ani úniku, avšak ke ztrátám dochází při připojení a odpojení během nakládky a vykládky. Tyto ztráty jsou obdobné nehledě na přepouštění či výměnu. Ztráty jsou způsobeny zejména proplachem, analýzou vodíku a odtlačováním. Pro tyto úkony je vždy potřeba přibližně stejné množství vodíku (v nízkých jednotkách kg) bez ohledu na přepravované množství. Proto procentuálně dochází k menším ztrátám při převozu většího množství vodíku v jedné kontejnerové jednotce (viz Tabulka 5.4).

Další ztráty mohou být způsobeny netěsnostmi v jakékoliv části řetězce. K těm může dojít při nedostatečném dotažení spoje či vlivem teplotní roztažnosti materiálů při větší změně teploty. Cílem je, aby tyto ztráty byly nulové, a proto je nutné provádět pravidelná měření úniků. Vzhledem k tomu, že rozsah úniků se může významně lišit a jejich vznik je obtížně předvídatelný (mohou nastat nahodile), nejsou tyto ztráty do výpočtů zahrnovány.

5.3.9 Ekologické aspekty

Emisní náročnost nakládky je spojena především se spotřebou elektrické energie pro kompresi, která je uvedena v Tabulka 5.2. Emisní náročnost tedy závisí na emisní stopě použité elektřiny. V případě využití obnovitelných zdrojů energie jsou emise nulové. Pro kompresi lze využívat i elektrickou energii s garancí původu, jelikož technologie mimo vlastní výrobu vodíku nepodléhají tak přísným legislativním podmínkám jako výroba obnovitelného vodíku. V případě využití elektřiny ze sítě bez certifikátů má elektřina v ČR emisní stopu 340 g CO₂/kWh podle statistik MPO za rok 2024 [11] a 477 g CO₂/kWh podle Evropské legislativy na výpočet úspory emisí [12], která vychází z dat za rok 2020 a zahrnuje i nepřímé emise. Tato hodnota je závazná i pro výpočet emisí obnovitelného vodíku. Další emise mohou být spojeny s manipulací kontejnerů či řazení vozů.

Emisní náročnost přepravy je závislá především na emisích lokomotivy, které jsou dány spotřebou elektřiny. V případě využití elektřiny s garancí původu mohou být emise nulové. V případě využití elektřiny bez garancí původu je emisní stopa 477 g CO₂/kWh podle Evropské legislativy. Spotřeba elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace byla počítána v rozmezí 1 600–1 700 kWh/100 km v závislosti na celkové hmotnosti. V Tabulka 5.7 jsou uvedeny příklady emisních stop vztažených na kg vodíku pro různé tlakové úrovně.

TABULKA 5.7: PŘÍKLADY MNOŽSTVÍ PŘEVEZENÉHO PLYNNÉHO VODÍKU (M) A EMISNÍ STOPA ELEKTŘINY (E) PRO RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ.

Tlaková úroveň [bar]	m [t]	e [g CO ₂ /100 km/kg H ₂]
200	14,1	57,5

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

300	21,6	35,3
500	33,6	22,7

Pozn.: Je počítáno se zbytkovým tlakem 40 bar v nádobách.

Emisní náročnost vykládky je spojena převážně s manipulací kontejnerů. Toto množství energie je v přepočtu na kg velmi nízké, takže není bráno v potaz.

5.3.10 Normy, oborové předpisy

RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí.

TPED – Výroba a provoz přepravitelných tlakových zařízení – směrnice rady Evropské unie 2010/35/EU.

ČSN ISO 19880-1 – Plynný vodík – Čerpací vodík – Čerpací 1: Obecné požadavky.

ČSN 34 2710 – Elektrická požární signalizace – Projektování, montáž, užívání, provoz, kontrola, servis a údržba.

ČSN EN ISO 4126-1 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 1: Pojistné ventily.

ČSN EN ISO 4126-2 – Bezpečnostní pojistná zařízení proti nadměrnému tlaku – Část 2: Bezpečnostní zařízení s průtržnou membránou.

ČSN EN IEC 60079-10-1 ed.3 – Výbušné atmosféry – Část 10-1: Určování nebezpečných prostorů – Výbušné plynné atmosféry.

ČSN EN ISO 9809-1 – Lahve na plyny – Návrh, konstrukce a zkoušení znovuplnitelných bezešvých ocelových lahví a velkoobjemových lahví na plyny – Část 1: Lahve a velkoobjemové lahve ze zušlechtěné oceli s mezí pevnosti v tahu menší než 1 100 MPa.

ČSN EN ISO 9809-2 – Lahve na plyny – Návrh, konstrukce a zkoušení znovuplnitelných bezešvých ocelových lahví a velkoobjemových lahví na plyny – Část 2: Lahve a velkoobjemové lahve ze zušlechtěné oceli s mezí pevnosti v tahu 1 100 MPa nebo větší.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.4 Lodní přeprava

5.4.1 Vhodnost přepravy

Lodní přeprava se nejčastěji využívá pro mezikontinentální přepravu velkého množství dané komodity. Plynný vodík se však lodní dopravou běžně nepřepravuje, protože má velmi nízkou hustotu. Jelikož ČR nemá přístup k moři a vnitrozemské vodní cesty jsou pro lodě splavné jen v omezených termínech, a navíc pouze na krátkých úsecích, lze uvažovat pouze o přepravě mezi kontinenty. Lodní přeprava by se teoreticky dala využít pro intermodální dopravu ISO kontejnerů s vodíkem. Dále do vnitrozemí by se vodík musel dopravovat jiným způsobem.

5.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Plynný vodík se běžně lodní dopravou nepřepravuje, takže TRL je nižší než pro silniční dopravu. Pravidla pro přepravu plynného vodíku po vnitrozemských vodních cestách i po moři jsou velmi podobná pravidlům pro silniční přepravu. Nejvyšší TRL má přeprava v tlakových lahvích zabudovaných v ISO kontejnerech, které lze běžně po vodě přepravovat. Z tohoto důvodu je TRL 7. Speciální plavidla určená pro přepravu plynného vodíku se v praxi nevyužívají a kvůli charakteru přepravy se jejich využití nepředpokládá ani do budoucna.

5.4.3 Popis druhu přepravy

Nejběžnější možností přepravy plynného vodíku po vodě je v ISO kontejnerech. Tlakové nádoby s vodíkem v těchto kontejnerech lze naložit na kontejnerové lodě nebo jiný typ plavidla umožňující přepravu kontejnerů.

Princip je podobný jako u přepravy ISO kontejnerů na vozech při železniční přepravě, s tím rozdílem, že na lodi může být další náklad včetně nebezpečného zboží, které může limitovat možnosti uložení kontejneru. U lodní přepravy není limitována hmotnost, ale nosnost samotného kontejneru. Příkladem může být největší kontejnerová loď MSC Irina, která má kapacitu 24 346 TEU (standardní jednotka odpovídající 20' kontejneru) a výtlač přes 230 000 t [15, 16]. Z předchozí kapitoly je jasné, že ocelové lahve lze vložit do 20' kontejneru a kompozitní mohou být v 40' kontejneru. Limitující je tedy pouze uložení kontejnerů na loď, což je specifické pro každou plavbu podle dalšího přepravovaného zboží.

Výhodou lodní přepravy je možnost převážet velké množství vodíku najednou a využívat tlakové hladiny od 200 do 500 bar. Nevýhodou je nezbytnost kombinovat dopravu s dalším typem přepravy, což zpravidla znamená i nutnost používat kontejnery, které mohou být přepravovány i po silnici. Jelikož je při lodní dopravě nezbytné kontejnery přemisťovat, musí být zajištěno adekvátní upevnění tlakových lahví, navržené na zvýšenou míru nárazů a manipulace.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.4.4 Bezpečnostní opatření

Nakládka a vykládka plynného vodíku v lodní přepravě by spočívala pouze v mechanickém naložení a vyložení kontejneru. Samotné plnění a vypuštění kontejneru by se realizovalo na jiných místech a bylo by typicky navázáno na silniční přepravu, takže by odpovídalo postupu nakládky a vykládky popsanému v kapitole 5.2 Silniční přeprava.

Kontejnery s plynným vodíkem na lodi musí být alespoň 2,4 m od potenciálního zdroje zapálení [17]. V případě přepravy vodíku po vnitrozemských vodních cestách by každý člen posádky měl mít ochranné brýle, pár ochranných rukavic, jeden ochranný oděv a pár ochranných bot [18]. Součástí výbavy lodě musí být také přístroj pro detekci plynů s návodem na použití tohoto přístroje a vhodný dýchací přístroj, závislý na okolním vzduchu [18].

V případě přepravy v podpalubí musí být prostor větraný. Při naložení se musí změřit koncentrace vodíku. V případě překročení 10 % spodní meze hořlavosti musí ventilátory jet na plný výkon. Další měření musí být provedeno po jedné hodině a výsledky měření musí být zaznamenány písemně. [18]

Bezpečnostní opatření a reakce na mimořádné události pro lodě přepravující nebezpečné zboží jsou uvedeny v dokumentech SOLAS, EmS a MFAG [19-21]. Předpis IMDG přímo odkazuje na nouzový plán pro požár v dokumentu EmS. V případě požáru je nezbytné chladit nádrže velkým množstvím vody, aby nedošlo k výbuchu. Samotný plamen by se neměl hasit. V případě požáru pod palubou je nutné zastavit větrání a uzavřít poklopy, poté použít stacionární hasicí systém nebo vytvořit vodní sprchu. Náklad vystavený ohni by se měl odstranit, pokud je to možné. V každém případě je nutné hořící nádrže i další náklad vystavený požáru udržovat v chladu vodou po dobu několika hodin. [20]

5.4.5 Legislativní omezení

ADN řeší dopravu nebezpečného nákladu po vnitrozemských vodních cestách [18] a IMDG přepravu po moři [17]. Oba dokumenty dovolují přepravu plynného vodíku. Jelikož plynný vodík je lehký plyn, není toxický a není látkou znečišťující moře, je většina pravidel podobných jako pro silniční či železniční dopravu. Rozdíly jsou především u vybavení posádky či konkrétních požadavků na bezpečnost. Většina těchto pravidel je již popsána v předchozí kapitole.

Požadavky na plavidla přepravující vodík a na umístění nákladu jsou pro vodní dopravu specifické. Plynný vodík může být přepravován na nákladní nebo osobní lodi, a to při omezení počtu osob na palubě (maximálně 25 osob, nebo 1 osoba na 3 m délky lodi). Z toho vyplývá, že na palubě nemůže být vysoký počet osob a osoby přítomné na palubě by měly mít odpovídající znalosti pro převoz nebezpečných věcí po vodě. Plynný vodík může být přepravován na palubě nebo v podpalubí, které je odvětrávané. [17]

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Největší specifikum lodní přepravy je omezení přepravy s dalšími látkami. Pro plyný vodík je uvedeno, že musí být uložen odděleně od chlóru. Další omezení se týkají celé bezpečnostní třídy 2.1, kam patří plyný vodík. V případě přepravy plynného vodíku společně s jinými nebezpečnými látkami stanovují pravidla odstupy mezi jednotlivými náklady. Největší odstupové vzdálenosti jsou požadovány od výbušnin (třídy 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6) a infekčních látek (třída 6.2). Od těchto látek musí být vodík oddělen podélně celým skladištěm nebo nákladovým prostorem. Od ostatních tříd stačí menší rozestupy, případně žádné rozestupy nejsou vyžadovány. [17]

5.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Plynný vodík není v ČR přepravován pomocí lodní přepravy a kvůli geografické poloze ČR zde lodní přepravu v praxi nelze využít. Pro přepravu plynného vodíku navíc neexistuje běžně využívaný typ specializované lodi určený přímo pro tuto přepravu. Reálně tak přichází v úvahu pouze intermodální přeprava v kontejnerech v rámci EU, přičemž následná doprava do ČR by musela být zajištěna jiným způsobem.

5.4.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost lodní přepravy je spojena pouze s energetickou spotřebou lodě, jelikož samotná nakládka a vykládka plynného vodíku by probíhala v rámci běžné manipulace s ostatními kontejnery, a nelze ji proto vyčlenit samostatně. Jelikož pro přepravu plynného vodíku neexistuje běžně používaná speciální loď, nelze stanovit konkrétní energetickou spotřebu pro přepravu plynného vodíku. Navíc u kontejnerových lodí by byl vodík pouze jednou z mnoha přepravovaných komodit, a proto nelze energetickou spotřebu plavidla jednoznačně přiřadit pouze k přepravě vodíku.

5.4.8 Ekonomické aspekty

Náklady na lodní přepravu plynného vodíku nelze přesně stanovit, protože pro jeho přepravu neexistují běžně využívaná specializovaná plavidla a jejich využití se nepředpokládá ani do budoucna. Ekonomiku lodního úseku je proto možné posuzovat pouze jako součást standardní kontejnerové přepravy. Jelikož by lodní doprava tvořila jen jednu část intermodální přepravy, je nutné do celkových nákladů počítat i s dalšími navazujícími typy přepravy, které jsou popsány v předchozích kapitolách (5.2 a 5.3). Při samotné přepravě plynného vodíku lodí by nedocházelo ke ztrátám vodíku. Nicméně při další manipulaci a následné dopravě by docházelo ke stejným ztrátám popsaným v předchozích kapitolách.

5.4.9 Ekologické aspekty

Emisní náročnost na lodní přepravu plynného vodíku nelze přesně stanovit, protože pro jeho přepravu neexistují běžně využívaná specializovaná plavidla a jejich využití se nepředpokládá ani do budoucna. Emise by bylo možné uvažovat pouze v rámci přepravy kontejnerů.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Vzhledem k tomu, že loď přepravuje mnoho dalších komodit, nelze emise jednoznačně vztáhnout pouze k přepravě vodíku. Jelikož by lodní přeprava byla spojena s dalším typem přepravy, byla by emisní náročnost nakládky a vykládky stejná jako v předchozích kapitolách. Vodík není jedovatý a zároveň není klasifikovaný jako znečišťující látka pro moře, takže při úniku by nepředstavoval specifické environmentální riziko ve smyslu znečištění mořského prostředí.

5.4.10 Normy, oborové předpisy

ADN – Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách.

IMDG – Mezinárodního předpisu pro přepravu nebezpečného zboží po moři (International Maritime Dangerous Goods Code).

MARPOL – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships.

SOLAS – International Convention for the Safety of Life at Sea.

EmS – Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods Guide.

MFAG – Medical First Aid Guide for Use in Accidents Involving Dangerous Goods.

ECE/TRANS/180/Add.13 – Globální technický předpis o vozidlech s pohonem vodíkem a palivovými články.

ISO/TS 15869:2009 – Plyný vodík a směsi plyného vodíku – Palivové nádrže pozemních vozidel.

Nařízení (ES) č. 79/2009 – Nařízení Evropského parlamentu a Rady ze dne 14. ledna 2009 o schvalování typu motorových vozidel na vodíkový pohon a o změně směrnice 2007/46/ES.

Nařízení (EU) č. 406/2010 – Nařízení Komise z 26. dubna 2010, kterým se provádí Nařízení (ES) č. 79/2009 Evropského parlamentu a Rady ze dne 14. ledna 2009 o schvalování typu motorových vozidel na vodíkový pohon.

TPED Výroba a provoz přepravitelných tlakových zařízení – směrnice rady Evropské unie 2010/35/EU.

Předpis OSN č. 134 – Jednotná ustanovení pro schvalování motorových vozidel a jejich částí z hlediska bezpečnostních vlastností vozidel poháněných vodíkem (HFCV).

CSA B51 Část 2:2014 – Řád pro kotle, tlakové nádoby a tlaková potrubí – Část 2: Požadavky na vysokotlaké láhve sloužící pro uložení paliva v motorovém vozidle.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

ISO 19078:2013 – Láhve na plyn – Kontrola instalace lahví a revize vysokotlakých lahví instalovaných ve vozidlech pro uložení zemního plynu používaného jako palivo v motorových vozidlech).

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.5 Potrubní přeprava

5.5.1 Vhodnost přepravy

Plynný vodík je vhodný pro potrubní přepravu na většině úrovní. Výhodou je škálovatelnost velikosti potrubí, která zajišťuje možnost přepravovat velké rozmezí množství vodíku na různé vzdálenosti. Prakticky se nejčastěji používá potrubní přeprava především u ostrovních řešení a současně se plánuje na úrovni EU. U mezikontinentální přepravy přichází v úvahu pouze propojení geograficky blízkých kontinentů (např. Afriky a Asie).

Pro ostrovní řešení se používají menší průměry potrubí, které přepraví množství vodíku přesně pro daný účel. Výhodou je kontinuální přeprava, možnost přepravit větší množství než jinými druhy přepravy, nízké ztráty a také široké rozmezí tlaků. Tlaková hladina může být optimalizována podle konkrétního využití vodíku.

Pro dlouhé vzdálenosti (typicky nad 1 000 km) je výhodnější využít potrubí s velkým průměrem, na které bude připojeno více výrobců i odběratelů. Velká kapacita potrubí může významně snížit náklady na přepravu vodíku. Nevýhodou je nezbytnost potrubí naplnit velkým množstvím vodíku a provozovat je při vysokých průtocích.

Na úrovni krajů a na národní úrovni se potrubní přeprava plynného vodíku příliš nehodí, jelikož větší vzdálenosti oproti ostrovnímu řešení ztěžují situaci s pozemky a zároveň menší vzdálenosti oproti EU úrovni zvyšuje náklady na přepravu. Přesto lze i pro tyto úrovně využít napojení na páteřní (EU) potrubí. Samozřejmě jen na specifických místech nedaleko od tohoto potrubí. Z páteřního potrubí lze následně přivést menší přípojně potrubí k odběrateli nebo od výrobce vodíku, typicky v řádu jednotek kilometrů až nízkých desítek kilometrů.

5.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Úroveň TRL závisí na konkrétním typu potrubní přepravy. V případě ostrovního řešení je TRL 9, jelikož tato přeprava se již běžně využívá a díky menším průměrům potrubí a kratším vzdálenostem lze využít i dražších materiálů. To zajišťuje možnost přepravy vysoce čistého vodíku a přepravu s nízkými ztrátami.

Na úrovni EU či úrovni mezikontinentální je TRL nižší. Pro tuto přepravu jsou dvě možnosti, výstavba nového potrubí nebo úprava existujícího potrubí na zemní plyn. U stávajícího potrubí na zemní plyn záleží na konkrétním úseku. Některá novější potrubí jsou pro vodík vhodná, jiná je potřeba upravit a některé části nemusí být pro vodík vůbec vhodné. TRL u této přepravy je v rozmezí 6–7. Největší neznámé jsou ztráty vodíku a kvalita vodíku. Hodnoty těchto dvou parametrů bude možné určit až s prvními reálnými aplikacemi. Je pravděpodobné, že pro zvýšení TRL bude potřeba optimalizovat některé části systému.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.5.3 Popis druhu přepravy

Plynný vodík se přepravuje v potrubích o průměrech od jednotek milimetrů až po přibližně 1,5 m v závislosti na konkrétní aplikaci. V případě malých průměrů může být potrubí z nerezové oceli. S rostoucím průměrem se používají levnější ocelové materiály nebo polyetylen.

Ocelové potrubí je nejběžnější, jelikož má nejširší využitelnost. Ocel je vhodná pro potrubí vedené nad i pod zemí a lze ji využít v širokém rozmezí tlaků. Běžné tlaky v potrubí jsou v nižších desítkách bar, ale mohou dosahovat i stovek bar. Takto vysoké tlaky se používají převážně v konkrétních ostrovních řešeních, kde je požadováno dodání vodíku při těchto tlacích.

Polyetylenové potrubí má oproti oceli lepší těsnost, vyšší odolnost proti korozi a má hladší povrch, což snižuje tření, čímž se zvyšuje průtok při stejných podmínkách. Nevýhodou je možnost použití potrubí jen do tlaků 12 bar. Dále se etylenové potrubí používá převážně pod zemí, jelikož UV záření způsobuje degradaci materiálu.

5.5.4 Bezpečnostní opatření

V případě potrubní přepravy plynného vodíku nedochází k nakládce a vykládce. Přeprava potrubím je spojitý proces, což oproti ostatním způsobům přepravy snižuje počet manipulací, a tím i bezpečnostní rizika. Konkrétní bezpečnostní opatření pro přepravu záleží na velikosti potrubí a jeho uložení. Potrubí může být uloženo pod zemí či pod hladinu moře. V těchto případech nemůže při netěsnosti dojít k zapálení vodíku, ale na druhou stranu se těžko identifikují úniky vodíku či stav potrubí. Pro ČR je většina potrubí vedená pod zemí, zatímco u ostrovních řešení s menšími průměry potrubí je většina instalací nadzemních, umístěných na potrubních mostech.

V případě malých úniků nehrozí vážné riziko, jelikož plyný vodík má velmi nízkou hustotu a rychle uniká směrem nahoru. Dokonce je u vodíku těžké lokalizovat tyto úniky. Při velkém úniku je riziko zapálení vodíku a vytvoření jet fire. Pro zapálení vodíku stačí nízká iniciační energie, takže může dojít k zapálení i pouze mechanickým impulzem (např. o hranu) a v případě vysokých tlaků v potrubí i ohřátím díky expanzi plynu. U menších potrubí pro ostrovní řešení může být potrubí vedeno v blízkosti dalších potrubí a jiných objektů. I u velkých průměrů mohou být vedena potrubí vedle sebe se stejným či jiným médiem. V těchto případech je potřeba dodržovat ochranná pásma.

Případný požár plynného vodíku se řeší jako u jiných typů přeprav. Velkým množstvím vody se chladí okolí a případně se vodní clonou může omezovat dopad plamene. Nejdůležitější je zajistit, aby případný požár nezpůsobil škody na dalším potrubí s hořlavými médii. U potrubí je největší rozdíl v kontinuálním přívodu vodíku, takže není možné nechat vodík dohořet. Je potřeba uzavřít přívod plynu do potrubí.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.5.5 Legislativní omezení

Legislativní podmínky a povinnosti pro provoz potrubní přepravy plyného vodíku jsou uvedeny v Energetickém zákoně (Zákon č. 458/2000 Sb.) [22], do kterého byl vodík nedávno doplněn. Principiálně však zákon upravuje pravidla pro plyn obecně, takže podmínky pro vodík nejsou specificky upravovány. Zákon specifikuje účastníky trhu na výrobce plynu, provozovatele přepravní soustavy, provozovatele distribuční soustavy, provozovatele zásobníků, obchodníky, zákazníky a operátora trhu. Pro potrubní přepravu jsou relevantní požadavky na provozovatele přepravní a distribuční soustavy.

U potrubí musí být dodržováno ochranné pásmo. Plynárenská zařízení jsou chráněna ochrannými pásmy k zajištění jejich bezpečného a spolehlivého provozu. U tlaku do 4 bar v zastavěném území obce je ochranné pásmo 1 m na obě strany, mimo zastavěné území 2 m na obě strany. U tlaku 4 až 40 bar je to 2 m a nad 40 bar je to 4 m na obě strany. [22]

Další omezení pro potrubí je bezpečnostní pásmo. Bezpečnostní pásma jsou určena k zamezení nebo zmírnění účinků případných havárií plynových zařízení a k ochraně života, zdraví, bezpečnosti a majetku osob. Bezpečnostní pásmo kolem potrubí závisí na tlaku a průměru potrubí, viz Tabulka 5.8. V tomto pásmu nemůže být umístěna žádná stavba s výjimkou veřejně prospěšných staveb, pokud to technické a bezpečnostní podmínky umožní a nedojde-li k ohrožení života, bezpečnosti nebo zdraví osob. [22, 23]

TABULKA 5.8: BEZPEČNOSTNÍ PÁSMO KOLEM POTRUBÍ V ZÁVISLOSTI NA TLAKU A PRŮMĚRU POTRUBÍ [23].

	do DN 100	DN 100–300	DN 300–500	DN 500–700	nad DN 700
4–40 bar	8 m	10 m	15 m	20 m	20 m
> 40 bar	8 m	15 m	70 m	110 m	160 m

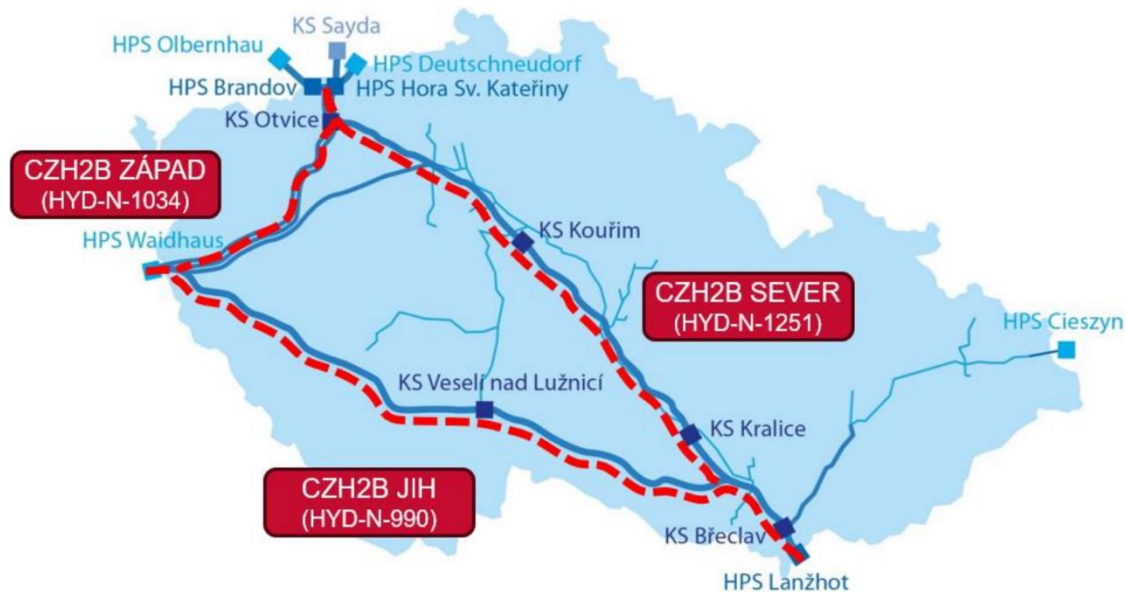
5.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V případě ostrovních řešení je vždy nutné vybudovat nové potrubí na přepravu plyného vodíku. Výhodou je možnost navrhnout optimální parametry potrubí pro konkrétní projekt. V rámci jednoho areálu či sousedních lokalit je vybudování potrubní trasy snadné. V případě delší vzdálenosti je potřeba brát v úvahu vlastnictví pozemků mezi lokalitami výroby a spotřeby vodíku. To může být největší limitace potrubní přepravy. Každá trasa je individuální, a tudíž nelze obecně říct, jak snadno lze potrubní trasa vybudovat.

Pro potrubní přepravu na úrovni EU, případně pro připojení k této soustavě, lze využít stávající plynárenskou infrastrukturu. Na Obrázek 5.6 je zobrazena hlavní česká plynárenská přepravní síť, která je na všech trasách zdvojená či ztrojená, což technicky umožňuje vyčlenit jednu linii pro přepravu čistého vodíku. Jelikož od roku 2021 výrazně klesá množství přepraveného zemního plynu, je možné jednu linii využít i z kapacitního hlediska [24]. Společnost NET4GAS, která je provozovatelem přepravní sítě, pracuje na zajištění české vodíkové páteřní sítě. Do

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

roku 2030 by síť v ČR měla být připravena na přepravu čistého vodíku. V plánech po roce 2030 je i další rozšíření plynovodů na čistý vodík, např. napojení na severní Moravu [25]. Konkrétní rozvoj bude záležet na vývoji poptávky, parametrech regulačního rámce a dostupném financování. Prioritou do roku 2030 je západní a severní koridor.



OBRÁZEK 5.6: ČESKÁ PLYNÁRENSKÁ PŘEPRAVNÍ SÍŤ NET4GAS [25].

Přestavba stávajících potrubních koridorů na přepravu čistého vodíku je v ČR realizovatelná. Nicméně některé komponenty je potřeba upravit, některé vyměnit a některé části je potřeba ještě důkladněji zanalyzovat [26]. Přestavba stávajícího potrubí vyjde podstatně levněji než novostavba a není potřeba řešit pozemky. Naopak stavba nových potrubí je nákladná a problematická. I s využitím liniového zákona není stavba nových tras v dohledné době reálná. Nicméně v případě velkého rozvoje poptávky po vodíku je přeprava plynného vodíku potrubím jednou z možných cest. Bez velké poptávky budeme limitováni pouze existujícími trasami a jejich přílehlým okolím.

5.5.7 Energetická náročnost

V případě potrubní přepravy plynného vodíku nedochází k nakládce a vykládce. Samotná přeprava je způsobena rozdílem tlaku, proto je potřeba zvýšit tlak kompresí. Energetická náročnost přepravy plynného vodíku potrubím je tedy spojena s kompresí. V případě ostrovního řešení, kde může být tlak v potrubí od desítek do stovek bar, je energetická spotřeba v širokém rozmezí podle vstupního a výstupního tlaku kompresoru. V tomto případě jsou kompresory poháněny elektrickou energií. Příklady energetické spotřeby pro vstupní tlaky 0,5 a 30 bar(g) a různé výstupní tlaky jsou uvedeny v Tabulce 5.9. Jelikož v tomto případě se jedná o kratší vzdálenosti, tak tlaková hladina je volena tak, aby i po tlakové ztrátě v potrubí

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

byl tlak na konci potrubí dostatečný. Z toho důvodu je energetická náročnost typicky dána jednou kompresí.

V případě velkých potrubí je tlak nižší a vzdálenost delší. Vstupní komprese z výroby do potrubí může být obdobná jako u výše uvedených informací, zejména pokud je vodík vyráběn na nízkém tlaku a je nutný vyšší kompresní poměr. Na delších trasách je potřeba mít kompresorové stanice, které zajistí tok plyného vodíku v celé délce potrubí. Běžně jsou kompresorové stanice umísťovány po 100 až 200 km. V kompresorové stanici dojde zpět k navýšení tlaku po tlakové ztrátě při proudění vodíku v potrubí. Tím se zajistí dostatečný a rovnoměrný tok vodíku v celém potrubí.

TABULKA 5.9: ENERGETICKÁ SPOTŘEBA PRO KOMPRESI VODÍKU ZE VSTUPNÍHO TLAKU 0,5 A 30 BAR(G) NA RŮZNÉ TLAKOVÉ ÚROVNĚ.

Výstupní tlak [bar]	Energetická spotřeba [kWh/kg H ₂]	
	Vstupní tlak 0,5 bar(g)	Vstupní tlak 30 bar(g)
45	2,86	0,30
200	4,18	1,62
300	4,51	1,95
500	4,94	2,39

Pozn.: Pro výpočet komprese byl využit program Aspen [10], účinnost elektromotoru byla zvolena 87 % a pro chlazení byl zvolen koeficient výkonu 2,7.

U přepravy zemního plynu se běžně využívají turbodmychadla s nízkým kompresním poměrem (do 1,5), která využívají část přepravovaného plynu pro pohon kompresorů. Podle max. výkonu kompresních stanic v ČR a max. kapacity přepravovaného plynu je na kompresi spotřeba asi 0,3–0,4 % přepravovaného plynu, což odpovídá zhruba 50 Wh/kg zemního plynu. Tato nízká hodnota je způsobena nízkým rozdílem vstupního a výstupního tlaku.

Pro přepravu čistého vodíku bude nutné vybudovat nové kompresní stanice. Jelikož vodík má nižší viskozitu než zemní plyn, tak tlaková ztráta bude nižší. Na druhou stranu vodík má podstatně nižší hustotu, což bude znamenat vyšší energetické náklady na kompresi čistého vodíku v přepočtu na kilogram. Otázkou zůstává, jestli nepůjde využít zemní plyn pro kompresi vodíku, což by mohlo znamenat pouze úpravy dmychadlové části v turbodmychadle.

5.5.8 Ekonomické aspekty

Ekonomické aspekty přepravy plyného vodíku potrubím jsou dány převážně investicemi do potrubí a kompresorů a dále provozními náklady spojenými zejména s provozem kompresorů. Součástí investice do potrubí je také potrubní most či uložení do země. V některých případech je nutné zohlednit i náklady na výkup či pronájem pozemků.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

U ostrovních řešení je obtížné spočítat obecnou cenu, jelikož záleží na velikosti potrubí, tlaku a potrubní trase. Výhodou může být, že v areálech je často k dispozici potrubní most nebo lze alespoň část trasy vést po stávajících koridorech.

U tranzitní potrubní přepravy se uvádí ceny 2,5–5 Kč/kg/1 000 km přes vnitrozemí a 5–7,5 Kč/kg/1 000 km přes moře [27, 28]. Tyto hodnoty platí pro stávající potrubí. V případě nového potrubí by cena za přepravu byla vyšší. Také je potřeba si uvědomit, že uvedené rozsahy ceny přepravy jsou platné jen za předpokladu využití celé kapacity potrubí nebo alespoň většiny kapacity. Kdyby se stalo, že výroba obnovitelného vodíku nedosáhne předpokládaných hodnot, může být i přeprava podstatně dražší.

V případě využití vodíku pro mobilitu bude potřeba vodík z potrubí pravděpodobně přečistit, protože zatím není jasné, jaká čistota vodíku bude v potrubí. Provozovatelé přepravní soustavy se raději drží konzervativní varianty čistoty vodíku na úrovni 98 %. Je pravděpodobné, že reálná čistota bude i vyšší, nicméně skoro jistě nebude dosahovat požadované čistoty pro mobilitu s palivovými články 99,97 % (mol.). Kromě této hodnoty je potřeba splnit i limity pro konkrétní látky (např. dusík, argon, kyslík, voda, oxid uhličitý a uhelnatý, metan, uhlovodíky, helium, sirné sloučeniny atd.) [29]. Čištění tak může představovat další náklad až 20 Kč/kg vodíku.

Ztráty vodíku z potrubí v ostrovním řešení jsou zanedbatelné, jelikož potrubí není příliš dlouhé a většinou je přístupné, takže případné netěsnosti lze relativně snadno identifikovat. V tranzitním potrubí nelze úniky zcela eliminovat. U potrubí zemního plynu jsou ztráty asi 1,5 %. V případě vodíku bude v nejlepším případě ztráta stejná a je pravděpodobné, že kvůli menší velikosti molekuly budou úniky i o něco větší.

5.5.9 Ekologické aspekty

Emisní náročnost přepravy plynného vodíku potrubím je spojena pouze s kompresí. V případě ostrovních řešení jde o emise elektřiny, která napájí kompresory. Spotřeba energie pro kompresory je uvedena v Tabulka 5.9. Emisní náročnost tedy závisí na emisní stopě použité elektřiny. V případě využití obnovitelných zdrojů energie jsou emise nulové. Pro kompresi lze využívat i elektrickou energii s garancí původu, jelikož technologie mimo výrobu vodíku nepodléhají přísným legislativním podmínkám pro výrobu obnovitelného vodíku. V případě využití elektřiny ze sítě bez certifikátů má elektřina v ČR emisní stopu 340 g CO₂/kWh podle statistik MPO za rok 2024 [11] a 477 g CO₂/kWh podle Evropské legislativy na výpočet úspory emisí [12], která bere data z roku 2020 a zahrnuje i nepřímé emise. Tato hodnota (477 g CO₂/kWh) je závazná i pro výpočet emisí obnovitelného vodíku.

V případě tranzitní přepravy vodíku potrubím bude emisní náročnost záležet na typu a provozu kompresních stanic. Při využití kompresorů poháněných elektrickou energií bude energetická spotřeba jako v případě ostrovního řešení pro nízký rozdíl vstupního a výstupního tlaku. Tyto emise budou každých 100 až 200 km. Při využití turbodmychadel poháněných samotným

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

obnovitelným vodíkem budou emise téměř nulové. Při využití zemního plynu budou emise pouze v desítkách gramů oxidu uhličitého na kilogram vodíku.

5.5.10 Normy, oborové předpisy

ČSN 38 6405 – Plynová zařízení. Zásady provozu.

TPG 700 02 – Stanovení technického stavu nízkotlakých a středotlakých plynovodních sítí z oceli.

TPG 700 03 – Podmínky pro provádění pracovních činností a umísťování staveb v ochranných pásmech plynárenských zařízení a pro umísťování staveb v bezpečnostních pásmech plynových zařízení.

TPG 700 04 – Stanovení technického stavu vysokotlakých plynovodů.

TPG 702 01 – Plynovody a přípojky z polyethylenu.

TPG 702 04 – Plynovody a přípojky z oceli s nejvyšším provozním tlakem do 100 bar.

TPG 702 11 – Čistění a sušení plynovodů všech tlakových úrovní po výstavbě.

TPG 703 01 – Průmyslové plynovody.

TPG 905 01 – Základní požadavky na bezpečnost provozu plynárenských zařízení.

TPG 913 01 – Kontrola těsnosti a činnosti spojené s řešením úniků plynu na plynovodech a plynovodních přípojkách.

TPG 920 21 – Protikorozní ochrana v zemi uložených ocelových zařízení. Volba izolačních systémů.

TPG 920 22 – Protikorozní ochrana v zemi uložených ocelových plynových zařízení. Provoz a údržba zařízení aktivní ochrany.

TPG 920 23 – Ochrana kovových objektů a zařízení proti atmosférické korozi.

TPG 920 26 – Katodická ochrana potrubí uložených v zemi.

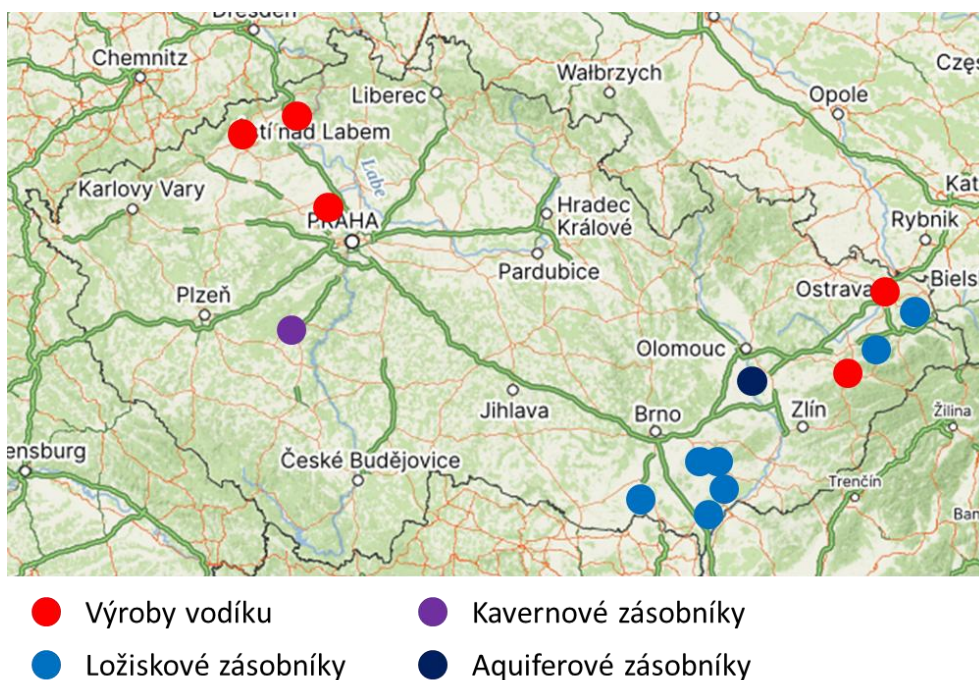
TPG 938 01 – Detekční systémy pro zajištění provozu před nebezpečím úniku hořlavých plynů.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.6 Terminály

V případě mezikontinentální přepravy plynného vodíku lze využít pouze kontejnerovou přepravu, což by prakticky znamenalo možnost využití kteréhokoliv přímořského terminálu (např. Rotterdam, Hamburk, Antverpy, Barcelona, Fos-sur-Mer, Brunsbüttel, Wilhelmshaven, Lubmin atd.). Většina těchto přístavů má možnost kontejner přeložit na železniční nebo silniční přepravu. Tato intermodální přeprava plynného vodíku není příliš ekonomicky výhodná. Teoreticky by bylo možné pustit vodík do potrubí, ale na to není žádný terminál přizpůsoben. Větší pozornost se soustředí na převoz amoniaku a jeho následné krakování na vodík, který bude dále přepravován do vnitrozemí potrubím. Nicméně to je již jiná alternativní forma, která do této části nepatří.

U plynného vodíku jsou významnější tuzemské terminály. V ČR je 5 lokalit (Kralupy nad Vltavou, Litvínov, Ostrava, Ústí nad Labem a Valašské Meziříčí), kde se vyrábí vodík (viz Obrázek 5.7). Největší množství vodíku se vyrábí v Litvínově. Část produkce vodíku se zde dočišťuje na kvalitu pro mobilitu a současně je zde plnicí stanice pro vodíkové trailery, takže je již nyní možné z této lokality přepravovat vodík pro mobilitu po silnici. V ostatních lokalitách je podstatně méně vodíku, kvalita vodíku obvykle neodpovídá požadavkům pro mobilitu a v těchto lokalitách není k dispozici technologie pro nakládku. Pokud by se vodík z těchto míst měl využívat pro mobilitu, bylo by potřeba vybudovat technologii na dočištění vodíku a plnicí stanici či potrubí.



OBRÁZEK 5.7: LOKALITY VÝROB VODÍKU A PODZEMNÍCH STRUKTUR V ČR.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

V ČR nejsou nyní významné skladovací kapacity plynného vodíku. Kromě malého množství pro ostrovní řešení se ani neplánuje stavba velkoobjemových zásobníků. Teoreticky jediná možnost je skladování v podzemních strukturách. V ČR je celkově 9 lokalit s podzemními zásobníky na zemní plyn, viz Obrázek 5.7. Nejvíce je ložiskových zásobníků v 7 lokalitách (Dambořice, Dolní Bojanovice, Dolní Dunajovice, Štramberk, Třanovice, Tvrdonice a Uhřice), jedna lokalita s kavernovými zásobníky (Háje) a jedna lokalita s aquiferovými zásobníky (Lobodice) [24]. Možnost využití těchto zásobníků na vodík není zatím ověřena a je pravděpodobné, že některé ani pro vodík vhodné nebudou. V případě, že v budoucnu bude zprovozněna česká vodíková páteřní síť a některý zásobník bude vhodný pro vodík, je možné, že se může plynný vodík přepravovat právě z jednoho či více zásobníků popsaných výše a zobrazených na Obrázek 5.7.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.7 Přepravní trasy

Přepravní trasy pro mezikontinentální přepravu by teoreticky mohly být přes intermodální přepravu ISO kontejnerů s využitím lodní přepravy do jakéhokoli přímořského terminálu a odtud do ČR po železnici či silnici. Taková přeprava by ekonomicky nedávala smysl, takže je pravděpodobné, že v případě plyného vodíku nebudou tyto trasy nikdy využity.

Přepravní trasy po EU by v případě plyného vodíku mohly být od výrobců nebo terminálů pomocí železniční nebo potrubní přepravy. V případě většího množství by ekonomicky větší smysl dávalo využití páteřní potrubní sítě na vodík, která se připravuje. Původní plán byl vybudovat síť do roku 2030, ale v poslední době se řeší zpoždění některých částí. Takže je pravděpodobné, že některé úseky budou až v roce 2032 a některé ještě později.

V případě plyného vodíku je nejvíce pravděpodobné využití tuzemských dopravních cest po silnici. Zde je nejpravděpodobnější přeprava z míst výroby vodíku (viz Obrázek 5.7) do kteréhokoli místa v ČR. Silniční přeprava je velmi flexibilní, takže spotřeba plyného vodíku, respektive přepravní trasy, mohou být velmi různorodé. V případě zprovoznění potrubní sítě a připojení na páteřní síť EU mohou být v budoucnu relevantní i přepravní trasy přes potrubí (viz Obrázek 5.6) s využitím podzemních zásobníků (viz Obrázek 5.7).

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

5.8 Shrnutí

Plynný vodík je možné přepravovat všemi typy přepravy. Nicméně kvůli jeho fyzikálním vlastnostem je přeprava plynného vodíku nejvýhodnější pro tzv. „poslední míli“ po silnici. Tato přeprava je již v dnešní době běžně využívána. Největšími výhodami jsou možnost přepravy i malých množství a volnost pro cílové lokality. To se nejvíce hodí především pro závoz čerpacích vodíkových stanic. Limitace přepravy po silnici je hlavně ve vzdálenosti a převozu většího množství vodíku. SWOT analýza plynnému vodíku v rámci přepravy je uvedena na Obrázek 5.8.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Jednoduchý řetězec: Bez výroby a rozkladu další formy. Flexibilita využití: Lze rovnou využít v řetězci vodíkové mobility. Kompatibilita: Lze využít pro zavážení existujících stanic v ČR. Chemická stabilita: Vodík je za běžných podmínek stabilní. Technologická připravenost: TRL 8–9 pro silniční přepravu. Široké možnosti: Přeprava v širokém rozmezí tlaků, možnost volby optimální tlakové úrovně.	Bezpečnostní rizika: Hořlavý plyn, výbušné směsi se vzduchem (4–75 obj. %), nutnost přísných bezpečnostních opatření. Ztráty při nakládce a vykládce: Proplachy připojovacích potrubí. Nízké využití převáženého množství: Zbytkový tlak v traileru. Nízká hustota: 14,94 kg/m ³ při 200 bar, 31,63 kg/m ³ při 500 bar. Vysoké tlaky: Přeprava 200–500 bar. Nároky na materiály a riziko úniků. Technologická připravenost: TRL 5–7 pro železniční, lodní a potrubní přepravu.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Dekarbonizace energetiky a dopravy: Pokud splní všechny podmínky EU pro RFNBO. Rozvoj P2G technologií: Využití přebytků OZE, stabilizace sítě a možnost přepravy této energie. Evropské klimatické cíle: Podpora infrastruktury pro obnovitelné plyny.	Konkurence jiných nosičů vodíku: Amoniak, kapalný vodík, methanol, LOHC... Proměnlivost cen elektřiny: Náklady na výrobu jsou závislé na ceně obnovitelné energie. Dostupnost energie: Nízké využití elektrolyzéru v ČR. Investiční náročnost trailerů: Vysoké tlaky.

OBRÁZEK 5.8: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY PLYNNÉHO VODÍKU.

Železniční přeprava vodíku je vhodná spíše pro průmyslové využití, kde je potřeba větších množství a obvykle je dostupná železniční síť. Další možností by mohla být přeprava do distribučních center, kde by se překládaly ISO kontejnery na silniční přepravu v rámci intermodální přepravy.

Lodní přeprava vodíku se nyní nerealizuje a je pravděpodobné, že ani v budoucnu se tato přeprava nerozvine. Teoreticky je možné využít přepravu ISO kontejnerů v rámci klasické přepravy kontejnerovými loděmi. To ale není příliš dobré řešení na převoz velkého množství vodíku. V tomto druhu přepravy budou mít vždy větší výhody alternativní formy (kapalný vodík, amoniak, methanol a ethanol), které se přepravují ve velkých objemech speciálními loděmi.

Do budoucna se jako vhodná varianta jeví přeprava potrubím na velké vzdálenosti ze zemí s lepšími podmínkami pro obnovitelné zdroje do zemí s horšími geografickými podmínkami, jako je ČR. Výhodná bude především při možnosti využití stávajících potrubí na zemní plyn. Podmínkou pro využití této přepravy je významný rozvoj výroby obnovitelného vodíku a jeho

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

využití. Tato přeprava plynného vodíku může být také spojena s přepravou alternativní formy lodí do Evropského terminálu, kde bude reformována na vodík, který bude vtlačén do potrubní sítě.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
ČR	Česká republika
EmS	Průvodce postupy pro reakci na mimořádné události pro lodě přepravující nebezpečné zboží (Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods Guide)
EU	Evropská Unie
IMDG	Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečného zboží po moři (International Maritime Dangerous Goods Code)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
ISO kontejner	Standardizovaná přepravní jednotka
MARPOL	Mezinárodní úmluva o zabránění znečištění z lodí (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)
MEGC	Vícečlánkový kontejner na plyn (Multiple-Element Gas Container)
MFAG	Průvodce první lékařské pomoci při nehodách s nebezpečným zbožím (Medical First Aid Guide for Use in Accidents Involving Dangerous Goods)
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky
PPA	Smlouva o nákupu elektřiny (Power Purchase Agreement)
RID	Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí
SOLAS	Mezinárodní úmluva o bezpečnosti lidského života na moři (International Convention for the Safety of Life at Sea)
TEU	Jednotka objemu ekvivalentní 20' kontejneru (Twenty-foot Equivalent Unit)
TPED	Výroba a provoz přepravitelných tlakových zařízení – směrnice rady Evropské unie 2010/35/EU
TRL	Úroveň technologické připravenosti (Technology Readiness Level)

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Vodíková strategie České republiky. 2021, Ministerstvo průmyslu a obchodu.
- [2] Vítkovice Cylinders, Svazky lahví. Cylinders Holding.
- [3] Calvera Hydrogen. 10.12.2025]; Available from: <https://www.calvera.es/equipment/hydrogen/>.
- [4] Tuček, V., Optimalizovaná řešení pro zásobování vodíkem, in Forum elektromobilita 2022. 12.10.–14.10.2022.
- [5] Cylinders Holding. 11.12.2025]; Available from: <https://www.vitkoviccylinders.cz/products-and-services/containers-and-trailers>.
- [6] Hexagon Purus. 12.12.2025]; Available from: <https://hexagonpurus.com/our-solutions/infrastructure/wycarrier-de>.
- [7] Teplý, Z., Požáry otevřených technologických zařízení v chemickém a petrochemickém průmyslu. 1st ed. 2001: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství v Ostravě. 68.
- [8] Dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR). 2022, New York a Geneva: Evropská hospodářská komise – Výbor pro vnitrozemskou dopravu.
- [9] Directive 2010/35/EU of the European Parliament and of the Council of 16 June 2010 on transportable pressure equipment. 2010; Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/35/oj/eng>.
- [10] Aspen HYSYS, version 15. Aspen Tech.
- [11] Hodnota emisního faktoru CO₂ z výroby a spotřeby elektřiny. 2025; Available from: https://mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2025/6/Metodika-CO2_2_2024.pdf.
- [12] Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185. 2023; Available from: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj.
- [13] ČD Cargo, a.s. Nejvhodnější vozy pro nákladní přepravu zboží. 15.12.2025]; Available from: <https://www.cdcargo.cz/aplikace/katalog-nakladnich-vozu/>.
- [14] Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí (RID). 2025.
- [15] Kontejnerová loď MSC Irina: kolos světových oceánů. 2024 15.12.2025]; Available from: <https://hz-containers.com/cs/news/kontejnerova-lod-msc-irina-kolos-svetovych-oceanu/>.

Plyný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

- [16] Krupičková, M. 10 největších kontejnerových lodí na světě v roce 2023. 2023 15.12.2025]; Available from: <https://www.easycargo3d.com/cs/blog/10-nejvetsich-kontejnerovych-lodi-na-svete-v-roce-2023/>.
- [17] Mezinárodního předpisu pro přepravu nebezpečného zboží po moři (IMDG). 2018: International Maritime Organization.
- [18] Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách (ADN). 2020, New York a Geneva: Evropská hospodářská komise – Výbor pro vnitrozemskou dopravu.
- [19] International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). 1974; Available from: [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas),-1974.aspx).
- [20] Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods (EmS Guide). 2024 15.12.2025]; Available from: https://www.imorules.com/MSCCIRC_1588_ANN.html.
- [21] Medical First Aid Guide for Use in Accidents Involving Dangerous Goods (MFAG). 1998 15.12.2025]; Available from: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/mfag.aspx>.
- [22] Zákon č. 458/2000 Sb.: Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů, in Energetický zákon. 2000: Česká republika.
- [23] Zákon č. 131/2015 Sb.: Zákon, kterým se mění zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. 2015: Česká republika.
- [24] Roční zpráva o provozu plynárenské soustavy České republiky 2023. 2023, Energetický regulační úřad.
- [25] Desetiletý plán rozvoje přepravní soustavy 2025-2034. 2024, NET4GAS, s.r.o.
- [26] Šlepr, R., Výzvy konverze přepravní infrastruktury na vodík, in Hydrogen Days 2024. 20.3 – 22.3.2024: Praha, Česká republika.
- [27] Šabata, O., Czech Hydrogen Backbone for connecting Europe and kickstarting Czech H2 economy, in Hydrogen Days 2024. 20.3 – 22.3.2024: Praha, Česká republika.
- [28] Smousavi, S., Challenges and Opportunities with Europe's Hydrogen Backbone, in Hydrogen and Fuel Cells Energy Summit. 1.10. – 2.10.2024: Valencie, Španělsko.

Plynný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

- [29] Úřad pro technickou normalizaci, m.a.s.z., ČSN EN 17124 (697281) Vodíkové palivo – Specifikace produktu a zajištění kvality pro čerpací stanice s výdejem plynného vodíku – Aplikace palivových článků s protonvýměnnou membránou (PEM) pro vozidla. 2022

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6 Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Jan Sochor

Česká vodíková technologická platforma z.s., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež

6.1 Obecné informace

6.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Zkapalněný vodík je jednou z fyzikálních forem vodíku, která je využívána pro přepravu vodíku zpravidla na delší vzdálenosti v porovnání s plynnou formou. Forma přepravy vodíku ve formě kapaliny je rozšířena především v USA, kde jsou obecně vzdálenosti mezi výrobami a spotřebiteli vodíku vyšší v porovnání s Evropou, a vychází z vesmírného programu NASA, který zkapalněný vodík používal jako palivo pro rakety [1]. Výhodou zkapalněného vodíku je jeho energetická hustota na objem, která v případě zkapalnění dosahuje hodnoty 70,8 kg na 1 m³, více než dvakrát tolik, co skladování vodíku při 500 barech (viz Tabulka 6.1). Běžný trailer na zkapalněný vodík v USA přepraví až 3 500 či více kg vodíku [2]. Hustota zkapalněného vodíku je oproti dalším kapalinám velmi nízká, v porovnání s vodou je na úrovni 1/14.

TABULKA 6.1: HUSTOTY VODÍKU PŘI RŮZNÝCH TLACÍCH A TEPLOTĚ 15 °C.

Tlak /Zkapalnění[bar]	Hustota H ₂ [kg/m ³]
200	14,94
300	21,15
500	31,63
Zkapalněný vodík	70,8

Zkapalněný vodík má řadu výhod oproti dalším potenciálním formám dopravy, především nižší risk v případě nekontrolovaného úniku vodíku (zkapalněný vodík hoří ve formě bleskového požáru, nikoliv tryskového požáru), menší riziko znečištění vodíku ve skladovací nádrži a vyšší množství přepraveného množství na m³ v porovnání s plynným vodíkem [3]. Zásadní nevýhodou a technologickou výzvou je fakt, že zkapalnit vodík vyžaduje značné množství energie, se současnými technologiemi přibližně 10–13 kWh (tedy okolo 30 % samotné energie obsažené na 1 kg vodíku v závislosti na velikosti zkapalňovače) [4]. Číslo 10–13 kWh je v tomto textu uvažováno pro 15 tunové zkapalňovače. Kapalný vodík je skladován při teplotě -252,9 °C. K odparu nicméně vždy vzhledem k fyzikálním vlastnostem dochází. Ztráty při přepravě zkapalněného vodíku v kryogenním stavu (trailerech) dosahují běžně okolo 1 % [5]. V rámci přepravy jsou skladovací nádrže konstruovány tak, aby dokázaly obstát při vyšších tlacích, které se uvnitř nádrže budují kvůli postupnému odparu.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Vodík je nejlehčím plynem, který lze lehce zapálit s ohledem na velmi nízkou iniciační energii k tomu potřebnou. Zásadní potíží je vysoká výbušnost a téměř neviditelnost plamene. Z hlediska biologických efektů je vodík bez zápachu a chuti [6]. Podobně jako hélium je možné jej v kapalném stavu udržet jen při velmi nízkých teplotách (okolo $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$). Z hlediska fyzikálních vlastností existuje molekulární vodík ve dvou spinových izomerech podle orientace jaderných spinů protonů. Vodík je při pokojové teplotě tvořen ze 75 % ortho izomery a 25 % para izomery. Při jeho zkapalňování dochází k přeměně směsi z ortho na para, což produkuje reakční teplo při konverzi, která když není řízená, zvyšuje nestabilitu zkapalněného vodíku a musí být mírněna [7]. Při nesprávním poměru ortho a para izomerů dochází k většímu odpařování [8]. Právě odpařování je jedním ze zásadních bezpečnostních aspektů, které je nutné aktivně řešit, protože vyžaduje využití speciálních kryogenních zařízení pro jeho přepravu a zacházení. Zkapalněný vodík, stejně jako chladný odpar vodíku může způsobit při nesprávném zacházení popáleniny. Zkapalněný vodík může zkondenzovat vzdušnou vlhkost a zatvrdnout (například ve ventilech), což vyžaduje speciální zacházení [9]. Při úniku zkapalněného vodíku dochází ke zkapalnění vzduchu v okolí, což může vést s ohledem na vlhkost vzduchu ke kondenzaci vlhkosti a tvorbě oblak bílého dýmu, která mohou potenciálně i vybuchnout [10]. Vzhledem k potenciálu nebezpečí jsou zpravidla hasičské úkony prováděny při únicích tak, že záchranné složky uzavřou přilehlou oblast a nechají vodík unikat do okolní atmosféry, dokud nedojde k úplnému vyprázdnění dané skladovací nádrže. V uzavřených prostorech kromě rizika zahoření hrozí, že vodík nahradí v dané místnosti kyslík, což může vést k riziku udušení. I u zkapalněného vodíku je potřeba počítat s možností křehnutí ocelových konstrukcí při kontaktu atomárního vodíku s materiálem, který není pro vodík vhodný (hydrogen embrittlement). Tento aspekt je důležité sledovat především v částech, kde dochází k přenosu vodíku z nádrže ven či opačně.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.2 Silniční přeprava

6.2.1 Vhodnost přepravy

Zkapalněný vodík je dnes přepravován zejména v USA, ale i v Evropě především na delší vzdálenosti. Trailery se zkapalněným vodíkem standardně přepravují okolo 3,5 tuny vodíku, jedná se o násobně vyšší množství v porovnání s plynným skupenstvím. Výhodou je také fakt, že kapalný vodík lze přečerpávat podobně jako fosilní paliva v plné výši kapacity nádrže, na rozdíl od plynného vodíku, kde při vyrovnání tlaků mezi dvěma nádržemi a kvůli riziku imploze není možné kapacitu traileru využít na 100 %. Vhodnost přepravy zkapalněným vodíkem je ve většině studií uvažována při přepravě na vzdálenost nad 150 km. Vedle využití produktovodu se jedná o ekonomicky nejschůdnější cestu, jak vodík v čisté formě přepravovat. Studie Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs od UC Davis Institute of Transportation Studie z roku 2024 odhaduje, že při dovozu okolo 700 km je cena za přepravu 1 kg zkapalněného vodíku oproti plynnému takřka 4x nižší i při využití trailerů či MEGC kontejnerů s kapacitou okolo 600–800 kg vodíku [11]. Tuto zdánlivou výhodu nicméně podřívá fakt, že při zkapalnění vodíku dochází ke spotřebě více než 30 % energie obsažené ve vodíku samotném. Vyšší spotřebu při zkapalnění dohání zkapalněný vodík nižší spotřebou energie na čerpací stanici oproti plynnému vodíku (v případě čerpání kapalného vodíku do kryogenní nádrže vozidla). Do celkové efektivity distribuce je nutné v porovnání s plynným vodíkem započítat navíc výstavbu zkapalňovačů (které mohou jen na CAPEXu přidat na výsledné ceně vodíku okolo 3,4 €), nákup kryogenních trailerů (v závislosti na lokalitě a technologii se cena pohybuje od 1,3 – 2,6 milionů €), odpar a ventilace vodíku (přibližně 1 % ztráty denně) a cenu čerpací stanice na zkapalněný vodík (která by měla být nižší řádově o minimálně třetinu oproti podobné na plynný vodík).

6.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Vodíkové kryogenní trailery jsou běžně využívány již desetiletí, takže toto řešení má TRL 9. Kryogenní ISO kontejnery zatím nejsou tolik běžné a stále lze některé části optimalizovat, jedná se o TRL 6–7. Zkapalňovače jsou dnes již také na úrovni TRL 8–9, vyvíjí se i nové způsoby zkapalňování s využitím magnetů, které mají výrazně nižší TRL, ale potenciálně jsou schopné zkapalňovat při nižších výrobních kapacitách. Obecně při výstavbě zkapalňovačů lze dosáhnout vyšší energetické účinnosti výstavbou větších výroben. Nižší TRL v celém řetězci zkapalněného vodíku mají větší stacionární úložiště zkapalněného vodíku, případně úložiště v námořní přepravě.

6.2.3 Popis druhu přepravy

Zkapalněný vodík se zpravidla přepravuje trailery o kulovitém tvaru (kvůli dosažení co nejlepších hodnot pro nízký odpar). Odpar vodíku je patrně největší komplikací při transportu kryogenní kapaliny. Většina trailerů či MEGC kontejnerů je konstruována s cílem zamezit odpařování vodíku prostřednictvím zvýšené, standardně vakuové izolace, či zesílením opláštění, kde mobilní skladovací nádrž dokáže udržet vyšší tlak bez rizika exploze. Přepravováno je standardně okolo 3 500 až 4 500 kg vodíku (Obrázek 6.1) v rámci jednoho traileru.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Alternativou mohou být kryogenní ISO kontejnery schopné pojmout okolo 3 tun vodíku, které mohou být naloženy na řadu dalších dopravních prostředků v rámci intermodální dopravy.



OBRÁZEK 6.1: TRAILER SPOLEČNOSTI PLUG POWER SCHOPNÝ PŘEPRAVIT AŽ 4,5 TUNY VODÍKU [12].

6.2.4 Bezpečnostní opatření

Některá opatření při nakládání se zkapalněným vodíkem jsou podobná jako v případě plynného. Podrobný popis bezpečnostních opatření při nakládce a vykládce vodíku nabízí dokument EIGA 06/19 od Evropské asociace technických plynů. Standardní postup je vizuální inspekce traileru, uzemnění vodíkového traileru a zajištění okolí s ohledem na potenciální zdroj ohně, tepla či statické elektřiny, který by mohl iniciovat zahoření vodíku.

Před připojením traileru k vykládce je vždy nezbytné propláchnout připojovací hadici standardně dusíkem či jiným inertním plynem, aby se předešlo zatuhnutí nechtěných látek v hadici a připojovacích armaturách. To se dělá standardně kvůli zajištění bezpečnosti při kontaktu vodíku se vzduchem. Na rozdíl od plynného vodíku hluboce zmražený plynný vodík může tvořit rezidua v místě úniku před tím, než dojde k jeho vystoupaní po zahřátí. Následně při malých únicích vodíku, vodík rychle uniká nahoru díky velmi nízké hustotě. Díky tomu je velmi nízká pravděpodobnost přesáhnutí limitu hořlavosti (4 obj. %) v otevřeném prostoru. Po připojení traileru ke skladovací nádrži musí být vyškolená obsluha vždy přítomná pro případ potenciálních problémů. Během zacházení s vodíkem je nutné, aby personál vozidla nosil ochranné prostředky na ruce, oči, helmu, boty a nehořící oblečení. Po přečerpání vodíku je nutné hadice opět inertizovat.

Při neřízeném úniku plynného vodíku může dojít k jeho zapálení. Při expanzi se díky Joule-Thomsonovu jevu vodík zahřívá. Při úniku kapalného vodíku dochází k zmražení okolního vzduchu

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

a vznikají oblaka bílého dýmu. Potenciálně v uzavřených prostorech hrozí riziko udušení. Při zahoření takového mraku odpařovaného vodíku hrozí riziko výbuchu.

V případě požáru se vodík nehasí, ale jen se ochlazuje okolí a vodními clonami se omezuje vodíkový plamen (pokud vznikne). Klíčové je nehasit požár namířením vody na pojistný ventil a ventilaci). Vodíkový plamen je špatně viditelný. Čistý vodík má bezbarvý plamen nebo mírně namodralý. Proto je dobré využít termokamery, které plamen zachytí. V případě, že je to možné, tak se uzavře přívod vodíku k místu úniku. Když to není možné, tak se trailer odtáhne na volné prostranství a nechá vodík vyhořet. V případě zkapalněného vodíku může docházet k ventilování vodíku v otevřeném prostoru. Takovýto vodík může zahořet, a tak je nezbytné udržovat odstupové vzdálenosti minimálně 15 metrů od frekventovaných míst, kde se shromažďují lidé.

6.2.5 Legislativní omezení

Pro silniční dopravu vodíku platí dohoda ADR. V ní jsou specifikovaná pravidla pro transport vodíku (UN1966, vodík, hluboce zchlazený, kapalný). Zkapalněný vodík je převážen standardně v kryogenních trailerech, které jsou vícevrstvé, vyráběné z austenitické nerezové oceli či standardní oceli s vakuovou izolací. Alternativou jsou kryogenní ISO kontejnery. Omezení pro přepravu zkapalněného vodíku obvykle vychází z hmotnostních limitů platných v dané zemi. Detailní popis bezpečnostních aspektů přepravy vodíku po silnici popisuje dokument EIGA 06/19, který zmiňuje, že zacházení se zkapalněným vodíkem je možné jen pokud je zajišťováno certifikovanou autoritou a profesionály [9].

6.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

K datu psaní této studie není na území ČR přepravován vodík v kapalně formě. To je dáno především tím, že vodík je ve většině případů ve větších objemech spotřebováván v místě výroby. Větší objemy v řádech jednotek tun denně se standardně k jednotlivým zákazníkům nedováží trailery, a tak nikdy nevznikla nutnost řešit otázku zásobování vodíku jinak než trailery s plyným vodíkem o kapacitách v nižších stovkách kg.

V případě úvahy nad vytvářením řetězce a aplikací kapalného vodíku v ČR by musela vzniknout poptávka především ze strany koncových uživatelů, zejména plnicí infrastruktury pro nákladní vozidla, jejíž uzásobitelnost by se vzrůstajícím počtem nákladních automobilů mohla být omezena fyzikálními možnostmi plyného vodíku. V principu je ale dnes možné využít zásobování kapalným vodíkem i pro výdej vodíku v plyné formě s využitím kryokompresorů [13]. Na straně výroby je potřeba k nákladům na výstavbu připočíst i zkapalňovače vodíku, které standardně fungují o kapacitách od 15 tun denně a výše, navzdory tomu, že se dnes již vyvíjí menší kapacity. Data od DOE z roku 2019 předpokládají cenu zkapalňovače od 50 po 800 milionů dolarů (1,18 miliardy až 18,8 miliardy Kč) pro výroby od 6 do 200 tun denně [14]. Značnou nevýhodou je navíc energetická spotřeba zkapalňování, která se u větších výroben pohybuje okolo 30 % energie obsažené v samotném vodíku [15]. Vzhledem k vysoké investiční i provozní náročnosti je cena za výdej vodíku prostřednictvím hodnotového řetězce zkapalněného vodíku dle řady studií v roce 2024 na úrovni okolo 7,77 dolarů za každý kg vodíku pro samotné zkapalnění. Aby bylo budování celého hodnotového řetězce realizovatelné, musí být cena za zkapalnění v budoucnu výrazně snížena

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

a poptávka stabilně na úrovni desítek až stovek tun denně. Pro případ rozjezdu vodíkového hospodářství se zdá být využití zkapalněného vodíku méně optimální v porovnání s plynným vodíkem.

6.2.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost zkapalnění vodíku a jeho následná přeprava je zatížena řadou ztrát vycházející z faktu, že kapalina je přepravována při teplotách okolo $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ke zkapalnění vodíku je potřeba přibližně 10–13 kWh energie a ztráty při přepravě jsou okolo 1 %. Vzhledem k tomu, že vodíkové trailery jsou dimenzovány tak, aby byly vakuové či vydržely větší tlak lze předpokládat, že první den jízdy nedojde k žádnému odparu. Následující dny je ale vhodné počítat pesimisticky s odparem okolo 1 % denně.

V principu se budou ztráty v celém řetězci od nákladu až po vykládku zkapalněného vodíku pohybovat podle jednotlivých tras v rámci maximálně jednotek % vodíku a budou odvislé od vzdálenosti, kterou kamion denně najede. Průměrný denní nájezd s ohledem na pravidla Nařízení (ES) č. 561/2006 o době řízení, přestávkách a odpočinku se bude v uvažovaných scénářích pohybovat okolo 700 km denně (9 hodin jízdy) s realistickými předpoklady a s ohledem na evropský provoz. Jedno procentní odpar vodíku v tomto scénáři nastane až na trasách, které jsou delší než 700 km. Na 100 km pak ztráta vodíku přepočteně vychází na 0,041 %. Na čerpací stanici je nicméně značnou výhodou využitelnost nízké teploty pro výdej vodíku jednak prostřednictvím kompresorů k tomu navržených, nebo při zplynování vodíku je možné ušetřit energii pro chlazení vodíku.

Energetická náročnost přepravy je spojena hlavně se spotřebou tahače. V dnešní době jsou nejběžnější dieselové tahače. Jelikož samotný náklad vodíku je zanedbatelný oproti hmotnosti vozidla, jezdí nákladní vozidlo prakticky jako plné, což znamená vyšší spotřebu paliva. Spotřeba může být až 35 l/100 km (lepší spotřeba s ohledem na nižší hmotnost návěsu především při cestě zpět v porovnání s plynným vodíkem). Nafta má výhřevnost 44 MJ/kg, což je asi 12,2 kWh/kg a 10,2 kWh/l. Energetická spotřeba je tedy asi 3,57 kWh/km. V případě vodíkového tahače se spotřebou asi 8 kg H_2 /100 km by energetická spotřeba byla asi 2,64 kWh/km. Hodnotu energetické spotřeby je ještě potřeba vztáhnout na množství přepraveného vodíku. To je závislé na velikosti vodíkového traileru, kdy v tomto uvažovaném scénáři je přepravováno 3 500 kg a vychází pro kapalný vodík lépe v porovnání s plynným.

Při přepravě 3,5 tuny vodíku je hodnota vztažená na 1 kg každých 100 km přepravy přibližně 0,102 kWh (Tabulka 6.2).

TABULKA 6.2: HODNOTA VZTAŽENÁ NA 1 KG VODÍKU A NA 100 KM PRO 3500 KG VODÍKU.

	Hodnota vztažená na 1 kg vodíku a na 100 km pro 3 500 kg vodíku
Naftový tahač	0,102 kWh
Vodíkový tahač	0,075 kWh

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.2.8 Ekonomické aspekty

Náklady na nakládku kapalného vodíku jsou spojeny se ztrátami při zacházení s vodíkem. Jedná se tedy o investiční a provozní náklady na nakládce vodíku, při přepravě a na plnicí/čerpací stanici. Investiční náklady na samotné trailery se pohybují v rozmezí od 1,5 do 3 milionů dolarů (35–70 milionů Kč). Cena plnicí stanice schopné vydat denně 2 až 4 tuny vodíku (v kapalné formě) se pohybuje v USA okolo 6 milionů dolarů (141 milionů Kč). Oproti plynnému vodíku je cena na množství vydaného vodíku nižší.

Náklady na přepravu a vykládku jsou spojeny s investičními náklady na vodíkový trailer a tahač. Dále provozní náklady jsou především spojeny s provozem tahače. Finální náklady jsou velmi závislé na množství přepravovaného vodíku a vzdálenosti. Kromě jednoho závozu je podstatné, jak často se zaváží, jelikož velká část nákladů jsou fixní náklady.

V době psaní této analýzy se nepodařilo zjistit ekonomické aspekty spojené s nakládkou a vykládkou kapalného vodíku.

6.2.9 Ekologické aspekty

Emisní náročnost nakládky je spojena především se spotřebou elektrické energie pro zkapalnění a ztráty při zacházení s vodíkem. Emisní náročnost tedy závisí na emisní stopě použité elektřiny. V případě využití obnovitelných zdrojů energie jsou emise nulové. Pro snížení emisí s ohledem na výpočet emisí RFNBO je nicméně nezbytné počítat se zasmluvněním elektřiny například u zkapalňovače za podobných podmínek jako pro výrobu RFNBO. V případě využití elektřiny ze sítě bez plnění podmínek má elektřina v ČR emisní stopu 340 g CO₂/kWh podle statistik MPO za rok 2024 a 477 g CO₂/kWh podle aktu v přenesené pravomoci k výrobě RFNBO, která bere data z roku 2020 a počítá i s nepřímými emisemi. Tato hodnota je závazná pro výpočet emisí obnovitelného vodíku.

Emisní náročnost přepravy je závislá především na přímých emisích z tahače. V případě využití vodíkového či elektrického tahače jsou emise nulové. Nicméně v dnešní době jsou prakticky využívány pouze dieselové tahače. Emise nafty jsou podle Evropské legislativy 95,1 g CO₂/MJ = 3,95 kg CO₂/kg = 3,3 kg CO₂/l. Se spotřebou tahače 35 l/100 km je emisní stopa přepravy 1,155 kg CO₂/km.

Pro výpočet emisní stopy je nezbytné počítat se spotřebou elektrické energie v rámci zkapalňování na úrovni okolo 10 kWh na 1 kg vodíku, což v případě emisí ze sítě přidá ke každému kg vodíku až 4,77 kg CO₂, tedy hodnotu, která výrazně převyšuje povolených 3,38 kg CO₂ na 1 kg vodíku požadovaných po RFNBO. Pro výpočet emisí je zároveň nutné brát v úvahu emise z čerpací stanice, které se ale v případě zkapalněného vodíku pohybuje do 1 kWh na 1 kg vodíku [16].

6.2.10 Normy, oborové předpisy

Mezinárodní normy a oborové předpisy jsou jedním z problematických aspektů kryogenních technologií využívajících zkapalněný vodík. Normy se liší v závislosti na tom, zda se týkají přepravy, skladování či koncového využití zkapalněného vodíku. Většina norem u zkapalněného vodíku se zaměřuje především na design, testování a provoz jednotlivých součástí kryogenních zařízení.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Většina standardů se nachází v ISO formátu. Pro přepravu vodíku jsou nejdůležitější již výše zmíněný dokument EIGA 06/19 a ISO 13984:1999 (viz Tabulka 6.3). Dokument EIGA specifikuje bezpečností protokoly skladování, zacházení a distribuce zkapalněného vodíku, včetně distribuce vodíku po silnici, vodě či vlakem. ISO 13984:1999 definuje protokoly plnění zkapalněného vodíku. Mezinárodně uznávanou publikací pro normy spojené se skladováním zkapalněného vodíku je i CGA H-3-2024 od Compressed Gas Association. Pro přepravu vodíku platí podmínky ADR. Tyto dokumenty jsou klíčové a ukazují na fakt, že zkapalněný vodík v současnosti není příliš rozšířenou formou vodíku a standardy nejsou dostatečně mezinárodně rozšířeny.

TABULKA 6.3: PŘEHLED TECHNICKÝCH NOREM A OBOROVÝCH PŘEDPISŮ PRO ZKAPALNĚNÝ VODÍK.

Standard	Název	Na co se zaměřuje
CGA H-3-2024	Standard for cryogenic hydrogen storage	Vakuum izolované skladovací tanky
EIGA 06/19	Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen	Na podmínky zacházení se zkapalněným vodíkem
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí	Přepravu nebezpečných věcí po silnicích
ISO 13985:2006	Liquid hydrogen – Land vehicle fuel tanks	Na normy plnění pozemních vozidel, zaměřené na bezpečnost
ISO 20421–1:2019 a ISO 20421–2:2019	Cryogenic vessels – Large transportable vacuum insulated vessels – Part 1: Design, fabrication, inspection and testing	Na design, výrobu, inspekci a testování mobilních kryogenních nádrží
NFPA 55	Compressed gases and cryogenic fluids code	Na skladování zkapalněného vodíku v USA
ISO 14687:2025	Hydrogen fuel quality — Product specification	Specifikace kvality vodíku pro pozemní vozidla
ISO/TR 15916:2015	Basic considerations for the safety of hydrogen systems	Základní požadavky pro vodíkové systémy v kapalně či plynné formě

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.3 Drážní přeprava

6.3.1 Vhodnost přepravy

Drážní přeprava zkapalněného vodíku je odlišná od silniční dopravy a zaměřená více na intermodalitu využívaného přepravního média. Zásadním rozdílem je možnost přepravit v rámci jedné cesty výrazně vyšší množství vodíku v porovnání se silnicí, ale také řada bezpečnostních faktorů, které je nutné při provozu brát v potaz. Základní legislativou omezující přepravu po železnici je Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečného zboží (RID), který klasifikuje kapalný vodík jako nebezpečnou látku. Podle dokumentu EIGA 06/19 je v případě přepravy kapalného vodíku po železnici nutné využívat takové skladovací zařízení, které je schopné bez nutnosti ventilace zvládnout předpokládanou cestu + dalších 24 hodin. To ukazuje, že oproti plynnému vodíku je zásadním problémem ventilace vodíku. Drážní doprava je potenciálně vhodná pro delší vzdálenosti a jako taková se pro úroveň krajů a ostrovní systémů nehodí.

6.3.2 Úroveň technologické připravenosti

Kapalný vodík není běžně přepravován v rámci drážní přepravy. O zkapalněném vodíku v rámci drážní dopravy se uvažuje jako o médiu pro potenciální pohon. Potenciální způsob přepravy po železnici je ve formě kryogenních ISO kontejnerů. Vzhledem k tomu, že se kapalný vodík primárně převážá po silnici lze jeho TRL předpokládat na úrovni 6.

6.3.3 Popis druhu přepravy

V současnosti k přepravě zkapalněného vodíku po železnici prakticky nedochází a návrhy na přepravu zkapalněného vodíku jsou ve fázi základních studií, nikoliv reálných a ozkoušených projektů. To je dáno především nízkým počtem zkapalňovačů v Evropě, kterých v roce 2019 bylo po celé Evropě pouhých 3 [17]. Lze předpokládat, že jejich počet se příliš od roku 2019 nezvýšil kvůli nízké poptávce po přepravě vodíku na delší vzdálenosti v Evropě. Pokud se studie zaměřují na využití kapalného vodíku v dopravě, většinou se zaměřují na samotná vozidla a využití zkapalněného vodíku jako paliva, nikoliv na jeho přepravu na delší vzdálenosti, viz studie společnosti SAG s názvem Liquid hydrogen as attractive energy storage solution for railway applications [18]. Zkapalněný vodík by se nicméně patrně přepravoval prostřednictvím kryogenních ISO kontejnerů, které je možné volně naložit na trailer i na železnici. Podle společnosti Linde by první mohly být k dispozici již v roce 2026 a budou stavěny tak, aby zvládly udržet kapalný vodík bez nutnosti ventilace vodíku po dobu 7 až 30 dnů (tzn. budovány pro větší tlak). Nejzásadnější komplikací i nadále je především faktor ventilace vodíku, což může vzhledem k tunelům způsobovat řadu problémů při realizaci takovéto formy přepravy.

6.3.4 Bezpečnostní opatření

Nakládka a vykládka kapalného vodíku v drážní přepravě je totožná se silniční přepravou. Proto i bezpečnostní opatření jsou stejná jako v kapitole 6.2.4. Jediný rozdíl je, že se spojuje více vozů, což klade vyšší nároky na bezpečnost při manipulaci. Zásadním aspektem je dle dokumentu EIGA zajištění schopnosti skladovacího systému udržet vodík pod požadovaným tlakem po dobu cesty +

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

24 hodin bez nutnosti jej ventilovat. EIGA zároveň podotýká, že vzhledem k povaze drážní dopravy nelze předpokládat možnost měření tlaku skladovacího zařízení a tento faktor by měl být diskutován s národním drážním operátorem (Správa železnic v ČR).

Při přepravě zkapalněného vodíku je klíčové zajistit dostatečnou ochranu kontejnerů. Přemístitelné kontejnery musejí být chráněny proti poškození při nárazech nebo převrácení, pokud již jejich konstrukce není provedena tak, aby těmto situacím sama odolala. Z hlediska bezpečnosti je zásadní i vybavení kontejnerů dvěma nezávislými pružinovými zařízeními pro vyrovnávání tlaku. Tato zařízení se automaticky otevírají při dosažení maximálního dovoleného provozního tlaku, plně se otevřou při jeho překročení o deset procent a po snížení tlaku se opět uzavírají. Musí být konstruována tak, aby odolala dynamickým silám, které mohou při přepravě vzniknout, včetně pohybu samotné kapaliny.

Velká pozornost je věnována i stupni naplnění. Při plnění je nutné zohlednit nejen plánovanou dobu přepravy, ale také možná zpoždění, aby nedošlo k nadměrnému nárůstu tlaku uvnitř kontejneru. Obsah nesmí při zvýšení teploty zaplnit více než 95 až 98 procent jejího vnitřního objemu při teplotě, která odpovídá otevíracímu tlaku pojistného ventilu. Tím se minimalizuje riziko přetlaku a následné havárie.

Pro železniční přepravu musí být kontejnery podrobeny nárazovým zkouškám. Pokud tyto zkoušky nejsou provedeny, je nutné kontejnery jasně označit nápisem „ŽELEZNIČNÍ DOPRAVA ZAKÁZÁNA“, a to přímo na jejich plášti i na identifikačním štítku. Všechny plnicí a vypouštěcí přípojky, včetně přípojek v plynné fázi, musejí být dále vybaveny rychlouzavíratelnými automatickými ventily, které musí být instalovány co nejblíže ke kontejneru, aby se v případě potřeby omezil únik plynu

6.3.5 Legislativní omezení

Pro drážní dopravu vodíku platí dohoda RID. V ní jsou specifikovaná pravidla pro transport vodíku (UN 1966, vodík, hluboce zchlazený, kapalný). Zkapalněný vodík je převážen standardně v kryogenních trailerech, které jsou vícevrstvé, vyráběné z austenitické nerezové oceli či standardní oceli s vakuovou izolací. Pravidla jsou téměř totožná s pravidly pro silniční dopravu. Navíc jsou u drážní přepravy požadovány tlumící prvky energie na vozech. Vozy musí být schopny pohltit energii o velikosti nejméně 800 kJ na každém konci vozu. Pohlčení energie plastickými deformacemi musí nastat až za podmínek, které jsou mimo rozsah normálního železničního provozu (nárazová rychlost je větší než 12 km/h, nebo síla vyšší než 1 500 kN).

Výrobci kryogenních ISO kontejnerů určených pro kapalný vodík je obvykle certifikují na maximální celkovou hmotnost okolo 36 tun. Tato hodnota představuje součet hmotnosti samotného kontejneru, izolace, technického vybavení a maximálního množství přepravovaného vodíku. Předpisy RID/ADR ale nestanovují jednu konkrétní hranici hmotnosti pro přepravu kapalného vodíku. Spíše určují konstrukční požadavky na cisterny, pravidla pro plnění a bezpečnostní prvky, jako jsou limity plnicího stupně či tlakové pojistky. Znamená to, že i když je kontejner z výroby schválen na zhruba 36 tun, skutečná povolená hmotnost při přepravě závisí na dalších faktorech.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Rozhodující roli hrají technická omezení železniční infrastruktury a samotných vozů. Evropské předpisy, včetně technických specifikací pro interoperabilitu, stanovují maximální zatížení na nápravu, které se obvykle pohybuje na úrovni 22,5 tuny, přičemž některé tratě a vozy umožňují i 25 tun na nápravu. Právě tato omezení určují, jak těžký kontejner může být při přepravě skutečně naložen. V českém prostředí se používají stejné standardy jako jinde v Evropě – většina tratí je projektována na 22,5 tuny na nápravu, modernizované koridorové úseky umožňují zatížení až 25 tun. Před samotnou přepravou je tedy nutné ověřit konkrétní parametry trati u Správy železnic a podle toho případně přizpůsobit stupeň naplnění kontejneru.

Z praktického hlediska lze brát zhruba 36 tun jako konstrukční a certifikační maximum, avšak skutečná povolená hmotnost se musí vždy podřídít jak technickým limitům vozů a tratí, tak i pravidlům RID/ADR, která stanovují bezpečné podmínky pro přepravu kapalného vodíku.

6.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Kapalný vodík není v ČR přepravován pomocí drážní dopravy. Pro intermodální dopravu by se dala drážní doprava použít jako část dopravy, kde by se kapalný vodík přepravoval přes ISO kontejnery, tento koncept ale prozatím nebyl nikde do hloubky rozpracován. Zde by bylo potřeba pouze překladiště.

V případě plnění v ČR by bylo potřeba vybudovat plnicí stanici v blízkosti kolejí. Pro vykládku by zase bylo potřeba vybudovat stáčecí místo. Jelikož doprava je limitována kolejemi a zároveň je výhodnější převážet větší množství, byla by tato doprava vhodná jen pro konkrétní řešení poptávky vodíku pro průmyslové areály. Nicméně toto řešení se již musí porovnávat i s jinými formami vodíku, které pro tento účel lze také použít.

6.3.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost zkapalnění vodíku a jeho následná přeprava je zatížena řadou ztrát vycházejících z faktu, že kapalina je přepravována při teplotách okolo -252 °C. Ke zkapalnění vodíku je potřeba přibližně 10–13 kWh energie a ztráty při přepravě mohou být pro ISO kontejnery pravděpodobně podobné silniční přepravě [19]. Ztráty nicméně mohou být minimalizovány zpětným odchytem vodíku případ od případu. V principu se budou ztráty v celém řetězci od nákladu až po vykládku zkapalněného vodíku pohybovat podle jednotlivých tras v rámci jednotek % vodíku, a to s ohledem na nutnost ventilovat vodík kvůli budování tlaku, ke kterým bude docházet vlivem manipulace s vodíkem.

Energetická náročnost přepravy je spojena převážně se spotřebou lokomotivy. Na hlavních tazích se v dnešní době využívají převážně elektrické lokomotivy, které jsou schopny převézt 30 vozů. Dieselové lokomotivy mají nižší výkony, takže se využívá 1 až 4 lokomotivy najednou podle přepravované hmotnosti a převýšení trasy. Výhodou je možnost přepravy i mimo elektrifikované trasy. Pro zjednodušení je dále počítáno s elektrickou lokomotivou. Elektrická lokomotiva má podstatně větší účinnost a může vracet elektřinu z rekuperace. Tato energie je ve výpočtech odečtena od spotřeby. Stejně jako u silniční dopravy i zde je drtivá většina hmotnosti způsobena

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

vozy a ISO kontejnery, kapalný vodík má relativně zanedbatelnou hmotnost. Proto je počítáno se spotřebou lokomotivy s plným nákladem při cestě tam i zpět.

Spotřeba elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace je odhadovaná v rozmezí 1 600–1 700 kWh/100 km podle celkové hmotnosti. Hodnotu energetické spotřeby je ještě potřeba vztáhnout na množství přepraveného vodíku. Jako příklad lze využít přepočty z kapitoly plyný vodík s rozdílem množství přepravovaného vodíku. V případě využití technologie společnosti Linde, kdy kryogenní ISO kontejner 40' převezí až 3040 kg vodíku na jednom vozu. Jedna lokomotiva je schopná potenciálně vézt až 30 vozů, dohromady je tedy možné přepravit až 91 200 kg vodíku.

Při přepravě 91,2 tuny vodíku je hodnota při využití elektrické lokomotivy (spotřeba 1 700 kWh na 100 km) vztažená na 1 kg každých 100 km přepravy přibližně (Tabulka 6.4).

TABULKA 6.4: HODNOTA VZTAŽENÁ NA 1 KG VODÍKU A NA 100 KM PRO 91 200 KG VODÍKU.

	Hodnota vztažená na 1 kg vodíku a na 100 km pro 91 200 kg vodíku
Elektrická lokomotiva	0,018 kWh

6.3.8 Ekonomické aspekty

Náklady na převoz kapalného vodíku jsou spojeny se ztrátami při jeho přepravě a při jeho zkapalnění. Společně s tím je nezbytné do ekonomické rozvahy zahrnout investiční náklady na ISO kontejnery. Pro zjednodušení nejsou předpokládány žádné náklady na překládku kapalného vodíku, protože kontejnery, kterými je kapalný vodík přepravován, lze v rámci intermodální dopravy jednoduše přeložit. Cena kryogenních ISO kontejnerů nebyla zjištěna rešerší, nicméně po expertním zhodnocení bude v rámci studie uvažováno s přibližně poloviční cenou dolní hranice traileru na kapalný vodík, tedy 750 tisíc dolarů (17,25 milionů Kč) za ISO kontejner schopný přepravit až 3 040 kg kapalného vodíku.

6.3.9 Ekologické aspekty

Emisní náročnost nákladky je spojena především se spotřebou elektrické energie pro zkapalnění a ztráty při přepravě s vodíkem. Emisní náročnost tedy závisí na emisní stopě použité elektřiny v procesu výroby vodíku. V případě využití obnovitelných zdrojů energie jsou emise nulové. Pro snížení emisí s ohledem na výpočet emisí RFNBO je nicméně nezbytné počítat se zasmluvněním elektřiny například u zkapalňovače za podobných podmínek jako pro výrobu RFNBO. V případě využití elektřiny ze sítě bez plnění podmínek má elektřina v ČR emisní stopu 340 g CO₂/kWh podle statistik MPO za rok 2024 a 477 g CO₂/kWh podle aktu v přenesené pravomoci k výrobě RFNBO, která bere data z roku 2020 a počítá i s nepřímými emisemi. Tato hodnota je závazná pro výpočet emisí obnovitelného vodíku.

Emisní náročnost přepravy je závislá především na emisích lokomotivy, které jsou dány spotřebou elektřiny. V případě využití elektřiny s garancí původu mohou být emise nulové. V případě využití elektřiny bez garancí původu je emisní stopa 477 g CO₂/kWh podle Evropské legislativy. Spotřeba elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace byla počítána v rozmezí 1 600–1 700 kWh/100 km

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

podle celkové hmotnosti nákladu. Při předpokladu dopravy na 100 km a prostým vynásobením emisí kWh elektrické sítě v ČR je emisní náročnost přepravy na 100 km 736–810 kg CO₂ na 100 km, níže je uveden přepočet na 1 kg vodíku (Tabulka 6.5).

TABULKA 6.5: HODNOTA VZTAŽENÁ NA 1 KG VODÍKU A NA 100 KM PRO 91 200 KG VODÍKU.

	Hodnota vztažená na 1 kg vodíku a na 100 km pro 91 200 kg vodíku
Emisní stopa na 1 kg vodíku ze 100 km přepravy	8,4 – 8,9 g CO ₂ n

6.3.10 Normy, oborové předpisy

Standard	Název	Na co se zaměřuje
CGA H-3-2024	Standard for cryogenic hydrogen storage	Vakuum izolované skladovací tanky
RID	Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí	Přeprava nebezpečných věcí drážní dopravou
EIGA 06/19	Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen	Na podmínky zacházení se zkapalněným vodíkem
ISO 13985:2006	Liquid hydrogen – Land vehicle fuel tanks	Na normy plnění pozemních vozidel, zaměřené na bezpečnost
ISO 20421–1:2019 a ISO 20421–2:2019	Cryogenic vessels – Large transportable vacuum insulated vessels – Part 1: Design, fabrication, inspection and testing	Na design, výrobu, inspekci a testování mobilních kryogenních nádrží
NFPA 55	Compressed gases and cryogenic fluids code	Na skladování zkapalněného vodíku v USA
ISO 14687:2025	Hydrogen fuel quality — Product specification	Specifikace kvality vodíku pro pozemní vozidla
ISO/TR 15916:2015	Basic considerations for the safety of hydrogen systems	Základní požadavky pro vodíkové systémy v kapalně či plynné formě

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.4 Lodní přeprava

6.4.1 Vhodnost přepravy

Lodní přeprava se nejčastěji využívá pro mezikontinentální přepravu a kapalný vodík je jednou z potenciálních forem vodíku, která se v řadě analýz objevuje. Nicméně jelikož ČR nemá přístup k moři a řeky jsou pro lodě splavné jen v omezených místech, a navíc pouze krátké části řek, tak je lodní doprava pro přepravu kapalného vodíku z pohledu ČR irelevantní.

6.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Přeprava kapalného vodíku pomocí lodní dopravy je z hlediska TRL v současnosti na úrovni 6, a to s ohledem na fakt, že jsou již prototypy testovány v provozu či plánovány na několika trasách po celém světě, zejména ale v kontextu oceánských tras. Nejvýznamnějším je loď společnosti Kawasaki Heavy Industries s názvem Suiso Frontier o kapacitě 1 250 m³ (88,5 t H₂) jež testovala v roce 2022 přepravu kapalného vodíku na vzdálenosti 9 000 km [20] (Obrázek 6.2). Původním cílem společnosti Kawasaki byla komercializace v příštím desetiletí. Řada firem počítá s potenciálem škálovat objem převáženého kapalného vodíku na úroveň až 160 000 m³ (11,3 kt H₂), ale za předpokladu, že po vodíku bude poptávka zaoceánských plateb a převážení vodíku mezi kontinenty, je o kapalném vodíku uvažováno především v kontextu využití jako paliva [21].

6.4.3 Popis druhu přepravy

Prototypy designované pro přepravu kapalného vodíku jsou zpravidla lodě se skladovacími nádržemi v kulovitém tvaru, které zajišťuje lepší vlastnosti pro minimalizaci odparu vodíku a zlepšují bezpečnost vzhledem k zvyšování tlaku uvnitř nádrží po vzoru LNG lodí. Pro případ převážení vodíku o menších objemech, které jsou vhodné pro nakládku i vykládku, je uvažováno i nad skladováním vodíku v kryogenních ISO kontejnerech. Tento typ přepravy a kontejnery k tomu určené nabízí i česká společnost Chart Industries [22].



OBRÁZEK 6.2: SUIISO FRONTIER Z ROKU 2022 OD KAWASAKI HEAVY INDUSTRIES.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.4.4 Bezpečnostní opatření

Nakládka a vykládka kapalného vodíku v lodní přepravě je velmi podobná té v železniční. Proto i bezpečnostní opatření jsou podobná jako v případě železniční a silniční přepravy. Zásadním aspektem je dle dokumentu EIGA zajištění schopnosti skladovacího systému udržet vodík pod požadovaným tlakem po dobu cesty + 24 hodin bez nutnosti jej ventilovat. EIGA zároveň podotýká, že zásadní dohodou regulující lodní dopravu je ADN – Mezinárodní předpisy pro přepravu nebezpečných věcí na vnitrozemských vodních cestách a IMDG – Informace o přepravě nebezpečného zboží po moři (International Maritime Dangerous Goods Code).

ADN řeší dopravu nebezpečného nákladu po vnitrozemských vodních cestách a IMDG po moři. Oba dokumenty dovolují přepravu kapalného vodíku. Většina pravidel je podobných jako pro silniční či železniční dopravu. Rozdíly jsou především u vybavení posádky či u konkrétních požadavků na bezpečnost. Většina těchto pravidel je již popsána v předchozích kapitolách.

Největší specifikum lodní přepravy je omezení přepravy s dalšími látkami. Přímo kapalný vodík spadá do třídy 2.1 (hořlavé plyny) a má vlastní kód 3F.

6.4.5 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Kapalný vodík není v ČR přepravován prostřednictvím vnitrozemské lodní dopravy a lze očekávat, že tomu vzhledem ke splavnosti řek tak ani v budoucnu nebude nad rámec přepravy kryogenních ISO kontejnerů.

6.4.6 Energetická náročnost

Energetická náročnost zkapalnění vodíku a jeho následná přeprava je zatížena řadou ztrát vycházejících z faktu, že kapalina je přepravována při teplotách okolo -252 °C. Ke zkapalnění vodíku je potřeba přibližně 10–13 kWh energie a ztráty při přepravě mohou být pro ISO kontejnery nižší než v případě přepravy po silnici trailery, 21 dní [23]. Ztráty nicméně mohou být minimalizovány zpětným odchytem vodíku případ od případu. V principu se budou ztráty v celém řetězci od nákladu až po vykládku zkapalněného vodíku pohybovat podle jednotlivých tras v rámci jednotek % vodíku, a to s ohledem na povinnost ventilovat vodík kvůli ztrátám, ke kterým bude docházet vlivem manipulace s vodíkem.

Samotná data o energetické náročnosti přepravy po lodi nejsou k dispozici.

6.4.7 Ekonomické aspekty

Ekonomika přepravy vodíku bude odvislá od spotřeby paliva v lodi a využitého pohonu. Lze předpokládat, že při využití kryogenních ISO kontejnerů nebude docházet k příliš velkým ztrátám vodíku. Informace o finančních aspektech lodní přepravy nejsou k dispozici.

6.4.8 Ekologické aspekty

Ekologický aspekt přepravy lze hypoteticky dopočítat až s ohledem na spotřebu lodě a množství dalšího nákladu, který je společně s vodíkem po lodi přepravován. V případě oceánských lodí je nutné dopočítat emise v závislosti na trase.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.4.9 Normy, oborové předpisy

Standard	Název	Na co se zaměřuje
CGA H-3-2024	Standard for cryogenic hydrogen storage	Vakuum izolované skladovací tanky
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách	Přeprava nebezpečných věcí lodní dopravou po vnitrozemských trasách
IMDG	Informace o přepravě nebezpečného zboží po moři (International Maritime Dangerous Goods Code)	Přeprava nebezpečných věcí lodní dopravou po oceánských trasách
EIGA 06/19	Safety in storage, handling and distribution of liquid hydrogen	Na podmínky zacházení se zkapalněným vodíkem
ISO 20421–1:2019 a ISO 20421–2:2019	Cryogenic vessels – Large transportable vacuum insulated vessels – Part 1: Design, fabrication, inspection and testing	Na design, výrobu, inspekci a testování mobilních kryogenních nádrží
NFPA 55	Compressed gases and cryogenic fluids code	Na skladování zkapalněného vodíku v USA
ISO/TR 15916:2015	Basic considerations for the safety of hydrogen systems	Základní požadavky pro vodíkové systémy v kapalně či plynné formě

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.5 Potrubní přeprava

Zkapalněný vodík se vzhledem k fyzikálním vlastnostem zkapalněného vodíku nemůže přepravovat produktovody. I z toho důvodu je tato kapitola bez dalších informací.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.6 Terminály

V současnosti na území Evropy neexistuje terminál, který by byl schopný přijmout zkapalněný vodík, zplynovat jej a vtlačit do přepravní soustavy, odkud bude vodík následně distribuován napříč Evropou. Existují plány ve fázích záměrů, které ve významných evropských námořních přístavech, například v Rotterdamu, Amsterdamu či [24] Hamburgu potenciálně plánují importní huby pro zkapalněný vodík [25]. V tomto kontextu byl například v roce 2025 dohodnut jeden z prvních importních koridorů mezi Ománem a Amsterdamem. Ve většině případů se očekává zplynování zkapalněného vodíku v místě importu a jeho přeprava formou plynovodů do míst spotřeby po Evropě. Alternativně je možné zkapalněný vodík naložit na trailer či do kontejneru a přepravovat přes silnici či železnici.

Právě produktovodní soustava bude hrát zásadní roli v realizaci terminálů a zásobovacích míst na zkapalněný vodík. V případě, že dojde k jejímu vybudování v 30. letech, lze předpokládat, že přeprava kapalnou formou bude maximálně vyčleněna pro zásobování konkrétních aplikací, jako je potenciálně mobilita, nikoliv k přepravě vodíku z míst výroby do míst spotřeby. Velkokapacitní skladování zkapalněného vodíku se vzhledem k odpařování vodíku momentálně nepředpokládá a bude se silně odvíjet od reality rozvoje vodíku v jiných než současných aplikacích.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.7 Přepravní trasy

	Geografická lokace původu komodity	Přeprava do EU	Přeprava do vnitrozemských terminálů	Přeprava do místa uskladnění v ČR	Přeprava do místa užití
1	Např. Západní Afrika	Např. Loď, 3 000 km	n.a.	Např. Železnice, 1 000 km	Např. Kamion, 200 km

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

6.8 Shrnutí

Kapalný vodík představuje perspektivní formu přepravy vodíku zejména tam, kde nejsou k dispozici produktovody nebo kde je potřeba dopravit větší objemy na střední vzdálenosti. SWOT analýza kapalného vodíku v rámci přepravy je uvedena na Obrázek 6.3. V současnosti sice jeho využití v České republice není ekonomicky ani logisticky nejvhodnější vzhledem k menším přepravovaným objemům, nicméně s rostoucí poptávkou po vodíku a rozvojem vodíkové infrastruktury může jít o velmi efektivní řešení. Kapalný vodík může hrát důležitou roli zejména při zásobování větších čerpacích stanic nebo při dopravě vodíku do míst, kam není možné či ekonomicky výhodné vybudovat potrubní propojení. Významnou výhodou je i možnost efektivně řešit tzv. „poslední míli“ distribuce, kde přeprava potrubím není realizovatelná. V dlouhodobém horizontu se očekává rozvoj přepravy vodíku produktovody, které umožní ekonomickou distribuci ve velkém měřítku, avšak kapalný vodík si i nadále může udržet svou roli jako flexibilní doplňkové řešení tam, kde potrubní infrastruktura nebude dostupná.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Vysoká objemová hustota energie: LH_2 má hustotu přibližně 70.8 kg/m^3 (při $-253 \text{ }^\circ\text{C}$). To je výrazně více než stlačený vodík na 700 barech (42 kg/m^3). Vysoká úroveň technologické připravenosti: TRL 8–9 pro silniční a železniční dopravu, nižší TRL pro lodní. Rychlejší přečerpání kapaliny oproti přepouštění plynu.	Bezpečnostní riziko: manipulace s hořlavou kapalinou. Materiálová kompatibilita: složitější přeprava kvůli nutnosti využít speciální kryogenní nádrže. Ztráty při manipulaci: ztráty odparem (v rámci přepravy 1–3 % denně) a při přečerpávání. Nutnost větrání odparu kvůli budování tlaku: je vhodné využít jen na krátké vzdálenosti, při prostojích vzniká v nádržích zvýšený tlak kvůli odparu, složitější regulatorní schvalování.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Globální obchod s energií: výroba vodíku a zkapalnění v místě s levnou energií a její přeprava do míst spotřeby, například v Evropě či Japonsku. Ekonomika: v některých případech může být výhodnější než přepravovat například čpavek, a to pokud výsledné využití vodíku vyžaduje vysokou čistotu nad 99,99 %. Kombinace dopravy: silnice (ze zkapalňovačů) – železnice (tranzit na velké vzdálenosti) – překlad na silniční dopravu.	Legislativa: přísné požadavky, které mohou prodloužit realizaci. Vodíková křehkost (Hydrogen Embrittlement): dlouhodobé vystavení kovů vodíku, kombinované s termickými cykly (plnění $-253 \text{ }^\circ\text{C}$, prázdná nádrž $+20 \text{ }^\circ\text{C}$), extrémně namáhá svary a materiály. Bezpečnost: mrak chladného vodíku se drží u země a je výbušný v širokém rozmezí koncentrací (4–75 %). Může být omezení, kudy lze s vodíkem cestovat.

OBRÁZEK 6.3: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY KAPALNÉHO VODÍKU.

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Evropská dohoda o přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
CGA	Compressed Gas Association
DOE	U.S. Department of Energy
EIGA	European Industrial Gases Association
IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code
ISO	International Organization for Standardization
LNG	Liquefied Natural Gas
MEGC	Multiple-Element Gas Container
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR
NASA	National Aeronautics and Space Administration
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin
RID	Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečného zboží
SAG	Studie společnosti SAG („Liquid hydrogen as attractive energy storage solution for railway applications“)
TRL	Technology Readiness Level
UC	University of California (UC Davis)
UN1966	Označení pro vodík, hluboce zchlazený, kapalný v přepravní klasifikaci OSN
USA	Spojené státy americké
ČR	Česká republika

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute, 2024. HYDROGEN HUB STRATEGIES IN THE US AND EUROPE. [online] Available at: https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/___icsFiles/afieldfile/2024/03/27/2401j_honma_e.pdf [Accessed 18 August 2025].
- [2] Hydrogen Europe, 2021. Tech Overview – Hydrogen Transport & Distribution. [pdf] Brussels: Hydrogen Europe. Available at: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Tech-Overview_Hydrogen-Transport-Distribution.pdf [Accessed 18 August 2025]
- [3] A. Schiaroli, G. E. Scarponi, and V. Cozzani, "CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS A Comparative Safety Assessment of Hydrogen Storage Tanks for Hydrogen-Powered Buses," 2023, doi: 10.3303/CET2399026.
- [4] A. Patonia, D. Ledesma, and R. Poudineh, *Hydrogen storage for a net-zero carbon future*, (2023).
- [5] Frazer-Nash Consultancy, 2022. "Literature review on climate effects and leakage rates in a hydrogen economy." Available at: https://lca-net.com/files/Hydrogen-review-GWP-and-leaks_20230227_public.pdf
- [6] ISO (2015) ISO/TR 15916:2015 Basic considerations for the safety of hydrogen systems. Geneva: International Organization for Standardization.
- [7] Wikipedia, Spin isomers of hydrogen. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Spin_isomers_of_hydrogen (Accessed: 18 August 2025).
- [8] Zohuri, B. (2019) *Hydrogen Energy: Challenges and Solutions*. Cham: Springer Nature.
- [9] European Industrial Gases Association (EIGA), 2019. Safety in Storage, Handling and Distribution of Liquid Hydrogen (Doc 06/19, revision of Doc 06/02). Brussels: European Industrial Gases Association. Available at: <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC006.pdf> [Accessed 18 August 2025].
- [10] Molkov, V. (2012) *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering*. [online]. Chichester: Wyvern Heritage.
- [11] Burke, A., Ogden, J., Fulton, L. a Cerniauskas, S., 2024. Hydrogen Storage and Transport: Technologies and Costs. UCD-ITS-RR-24-17. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis. Dostupné z: https://escholarship.org/content/qt83p5k54m/qt83p5k54m_noSplash_8bb1326c13cfb9aa3d0d376ec26d3e06.pdf?t=s9oa2u [Přístup: 18. srpna 2025].
- [12] "Plug TL-5000K Cryogenic Trailer." Accessed: Feb. 05, 2026. [Online]. Available: <https://resources.plugpower.com/product-cryogenic-solutions/plug-tl-5000k-cryogenic-trailer>

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

- [13] A. Y. Ku, K. Reddi, A. Elgowainy, J. McRobie, and J. Li, “Liquid pump-enabled hydrogen refueling system for medium and heavy duty fuel cell vehicles: Station design and technoeconomic assessment,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 61, pp. 25486–25498, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.05.283.
- [14] Connelly, E., Penev, M., Elgowainy, A. & Hunter, C., 2019. Current Status of Hydrogen Liquefaction Costs. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record 19001. U.S. Department of Energy, 9 September 2019. Available at: U.S. Department of Energy website [online] (PDF) https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/19001_hydrogen_liquefaction_costs.pdf [Accessed 19 August 2025].
- [15] F. Restelli, E. Spatolisano, L. A. Pellegrini, A. R. de Angelis, S. Cattaneo, and E. Roccaro, “Liquefied hydrogen value chain: A detailed techno-economic evaluation for its application in the industrial and mobility sectors,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 52, pp. 454–466, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.206.
- [16] A. Bauer, T. Mayer, M. Semmel, M. A. Guerrero Morales, and J. Wind, “Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 13, pp. 6795–6812, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.087.
- [17] FuelCellsWorks, 2019. Linde holds ground-breaking ceremony for new hydrogen liquefier in Leuna. [online] 31 October 2019. Dostupné z: FuelCellsWorks
- [18] SAG Group, 2025. *Liquid hydrogen instead of diesel: How sustainability in rail transport can succeed on all routes*. [online] 11 June 2025. Dostupné z: SAG New Technologies GmbH.
- [19] “Liquefied Hydrogen Tank Solutions | A Linde Company.” Accessed: August 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.linde-engineering.com/products-and-services/plant-components/liquefied-hydrogen-tank-solutions>
- [20] Hydrogen Council, 2022. *Toward a new era of hydrogen energy: Suiso Frontier built by Japan’s Kawasaki Heavy Industries*. [online] 4 October 2022. Dostupné z: Hydrogen Council (Hydrogen in Action case study)
- [21] Hydrogen Insight, 2025. *Norwegian firm wins state cash to build 'world's first' liquid-hydrogen-powered bulk carrier ships*. [online] 3 July 2025. Dostupné z: Hydrogen Insight. [cit. 20 August 2025].
- [22] Chart Industries, n.d. ISO Containers. [online] Chart Industries. Dostupné z: Chart Industries – ISO intermodal containers and transportable tanks
- [23] Linde Engineering, n.d. *Liquefied hydrogen tank solutions*. [online] Linde Engineering. Dostupné z: Linde Engineering – plant components – liquefied hydrogen tank solutions [Accessed 20 August 2025].
- [24] Hydrogen Insight, 2024. *Construction begins on Germany's first onshore liquid gases import terminal, which will be 'at the centre' of the national hydrogen network*. [online] 28 June 2024. Dostupné z: Hydrogen Insight – Innovation section

Kapalný vodík jako alternativní forma přepravy vodíku

[25] H2A Association, 2025. *Historic Agreement Establishes World's First Liquid Hydrogen Import Corridor Between Oman and Amsterdam*. [online] 17 April 2025. Dostupné z: H2A Association – news section

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7 Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

Ondřej Asztalos

ORLEN Unipetrol RPA s.r.o., Záluží 1, 436 70 Litvínov

7.1 Obecné informace

Směs zemního plynu s vodíkem se obecně využívá pro dekarbonizaci při spalování. Nicméně v aktuálních podmínkách se nabízejí i jiné možnosti využití. Míchání vodíku do zemního plynu by se mohlo jevit jako rychlá cesta, jak ověřit technologie a aplikovatelnost v reálné síti a dosáhnout prvního, i když omezeného, snížení emisí. Proč se touto směsí zabývat?

Směs zemního plynu s vodíkem má předpoklad k relativně rychlé aplikovatelnosti v současné potrubní infrastruktuře. Studie a projekty ukazují, že přibližně 5–20 % (obj.) koncentrace vodíku může mnoho distribučních sítí a koncových spotřebičů akceptovat bez zásadního zvýšení rizika. Blend (-ing, směs/míchání) umožní částečnou dekarbonizaci, vytváří částečný odbyt pro nízkoemisní vodík, a může tak pomáhat rozjet dodavatelské řetězce. Výraznější emisní úspora by vyžadovala vyšší podíl vodíku, než je dnes realistické. Tato směs je v souladu s evropským rámcem. EU akceleruje trh pro obnovitelný a nízkouhlíkový vodík a postupně se budují dedikované vodíkové sítě. Blending je vnímán spíše jako přechodový krok, nikoli cílový stav.

7.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Jedná se o plynou směs zemního plynu a vodíku v různých poměrech od 0 do 100 % objemu. Směs je bezbarvá a přirozeně bez zápachu, nicméně běžně se do zemního plynu přidávají odoranty pro možnost detekce úniku. V uzavřeném prostoru je směs stabilní za nepřístupu kyslíku nebo jiných oxidačních činidel.

Směs je pravděpodobně nejvhodnější přepravovat v plynném stavu potrubím, jako je aktuálně realizována přeprava u samostatného zemního plynu. S měnící se koncentrací se výrazně mění i objem přepravované směsi (viz Tabulka 7.1), což výrazně komplikuje možnosti přepravy. Ve střednědobém horizontu se v tranzitní přepravě NET4GAS připravuje na možnost využívání až 2 % (obj.) vodíku ve směsi již od roku 2026, a to vzhledem ke skutečnostem, že někteří zahraniční provozovatelé přepravních soustav předpokládají zvýšené množství vodíku v jejich soustavách. V dlouhodobém horizontu je pak cílem NET4GAS vytvářet jen dedikovanou infrastrukturu pro čistý vodík [1]. Nicméně probíhají projekty distributorů napříč EU, ve kterých zkoušejí blend až do koncentrace 20 % (obj.) vodíku. Blend je primárně určen ke spalování tam, kde není překážkou odorizace ani další nečistoty. Pro účely dopravy je ze směsi po přepravě potřeba vodík separační technologií oddělit a vyčistit na potřebnou čistotu 99,97 % (mol.) podle normy ČSN EN 17124.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 7.1: OBJEMY 1 KG SMĚSI ZEMNÍ PLYN – VODÍK PŘI TLACÍCH V DISTRIBUČNÍM A TRANZITNÍM POTRUBÍ.

Koncentrace H ₂ [obj. %]	Objem 1 kg směsi pro tlak 4 bar [m ³]	Objem 1 kg směsi pro tlak 60 bar [m ³]
0	0,37	0,022
10	0,41	0,024
20	0,45	0,027
50	0,66	0,040
90	1,75	0,112
100	2,90	0,206

Pozn.: Teplota = 15 °C. Jedná se o letní období. V zimním období (5 °C) se objem směsi zmenší přibližně o 3,3 %.

7.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Směs je podle nařízení (ES) 1272/2008 klasifikována jako nebezpečná. Jedná se o extrémně hořlavý plyn. Ve všech místech, kde se směs zemního plynu s vodíkem vede potrubím, plní, přečerpává nebo se s ní jinak manipuluje, konkrétně v určených ATEX zónách 0/1/2 a jejich bezprostředním okolí, je nutná ochrana před teplem, horkými povrchy, jiskrami, otevřeným ohněm a jinými zdroji zapálení. To platí po celou dobu provozu, odstávek i prací údržby. V případě poruchy stěny potrubí a následném úniku nebo i požáru (jet fire) vzniká spálením zemního plynu oxid uhličitý a v menším množství také oxid dusnatý a oxid dusičitý. V případě požáru směsi se doporučuje plamen nehasit přímo, ale jen ochlazovat okolí, dokud nedojde k zastavení přívodu směsi, a současně vodní mlhou zabránit šíření požáru do okolí. Doporučuje se hasit pěnou, vodní mlhou a tříštěným proudem vody. Naopak se nesmí hasit plným proudem vody [2]. V otevřených nebo větraných prostorech není nutnost ochrany dýchacích cest. V případě úniku v uzavřeném prostoru je nutné použít izolační dýchací přístroj.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.2 Silniční přeprava

Silniční přeprava směsi zemní plyn-vodík nepřidává z celkového pohledu řetězce žádnou výhodu. Technologicky by taková přeprava měla všechny nevýhody plynného vodíku i metanu, jako jsou nízká kapacita, vysoké tlaky, bezpečnostní opatření atd. Navíc je nutné směs separovat a dočišťovat pro využití ve vodíkové mobilitě, což by vedlo k dalším nákladům a ztrátám vodíku. Při silniční přepravě by nevzešla ani jediná výhoda pro směs proti plynnému vodíku. Při kombinaci potrubí a silniční přepravy by při nakládce bylo nutné využít kompresi na vyšší tlaky, jelikož běžná přeprava vodíku se realizuje při tlacích 200–500 bar a tlak v potrubí je podstatně nižší (do 60 bar). Z technického, ekonomického i ekologického hlediska není přeprava směsi zemní plyn-vodík relevantní. V nynější době se taková přeprava nerealizuje ani se neplánuje do budoucna.

Z důvodů popsaných výše není kapitola detailně řešena. Nicméně technicky by řešení bylo podobné jako v případě silniční přepravy plynného vodíku a metanu, které jsou řešeny detailně v kapitolách 3.2 a 5.2.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.3 Drážní přeprava

Drážní přeprava směsi zemní plyn-vodík nedává z pohledu celého řetězce smysl. Technologicky by měla všechny nevýhody plynného vodíku i metanu; nízkou kapacitu/energetickou hustotu, vysoké tlaky, zvýšené bezpečnostní požadavky atd. Navíc by bylo nutné směs po příjezdu separovat a dočišťovat pro využití ve vodíkové mobilitě, což by vedlo k dalším nákladům a ztrátám vodíku. Oproti přepravě čistého plynného vodíku by směs na železnici nepřinesla žádnou výhodu. Kombinace potrubního blendování a drážní přepravy směsi naráží na kumulaci ztrát a nákladů. Pro nakládku do železničních cisteren by bylo nutné kompresí zvýšit tlak směsi z potrubních tlaků (cca 60 bar) do hodnot 200–500 bar, což zvyšuje energetickou náročnost. Jelikož pro vodíkovou mobilitu je nutný čistý vodík, je potřebná následná separace a dočištění (PSA nebo membrány) s dalšími ztrátami vodíku. Drážní přeprava neřeší nízkou objemovou hustotu směsi, takže užitečná energie na vlak je nízká, zatímco provozní a bezpečnostní požadavky zůstávají vysoké. Prakticky tak směs nepřináší proti přepravě čistého vodíku žádnou relevantní výhodu, a to technicky, ekonomicky ani environmentálně.

Z důvodů popsaných výše není kapitola detailně řešena. Nicméně technicky by řešení bylo podobné jako v případě drážní přepravy plynného vodíku a metanu, které jsou řešeny detailně v kapitolách 3.3 a 5.3

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.4 Lodní přeprava

Lodní přeprava směsi zemní plyn-vodík nedává z celkového pohledu řetězce smysl. Technologicky by taková přeprava nesla všechny nevýhody plynného vodíku i metanu, a to velmi nízkou objemovou hustotu, nutnost vysokých tlaků, přísná bezpečnostní opatření apod. Navíc by bylo nutné směs po přepravě separovat a dočišťovat pro využití ve vodíkové mobilitě, což by vedlo k dalším nákladům a ztrátám vodíku. Při lodní přepravě by směs nepřinesla žádnou výhodu oproti samostatnému převozu plynného vodíku. Při kombinaci potrubí a lodní přepravy by při nakládce bylo nutné směs stlačovat na vyšší tlaky, jelikož běžná přeprava vodíku v tlakových zásobnících probíhá při 200–500 bar, zatímco provozní tlak v plynovodech je podstatně nižší (do 60 bar). Z technického, ekonomického i ekologického hlediska tak není přeprava směsi zemní plyn-vodík relevantní. V současnosti se taková přeprava nerealizuje ani se neplánuje do budoucna.

Z důvodů popsaných výše není kapitola detailně řešena. Nicméně technicky by řešení bylo podobné jako v případě lodní přepravy plynného vodíku a metanu, které jsou řešeny detailně v kapitolách 3.4 a 5.4.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.5 Potrubní přeprava

7.5.1 Vhodnost přepravy

Přeprava potrubními systémy je pro směs zemního plynu s vodíkem nejvhodnější ze všech možných variant. Plynovodní síť je v současné době rozšířená, nicméně stav potrubních tras pro transport vodíku musí být přezkoumán. Podle NET4GAS by síť měla do roku 2026 zvládnout směs s 2 % (obj.) vodíku. Nicméně lze tento způsob považovat jen za přechodné řešení pro překlenutí období, než budou zprovozněny plnohodnotné vodíkovody, a to jak z důvodu separace vodíku ze směsi, tak malého množství přepravovaného vodíku [3].

Pro ostrovní řešení jako například komunitní plynové sítě nebo průmyslové areály se potrubní přeprava nejvíce jeví jako vhodná. A to hlavně z důvodu potřebné separace při každém odběru vodíku z potrubí, a proto se jeví jako nákladnější vzhledem k délce přepravy.

Při delších přepravách na úrovni krajů nebo států lze předpokládat možnost využití stávajících sítí za předpokladu jejich modernizace. S delšími trasami se snižují náklady na přepravu, ale množství přepraveného vodíku je malé [3].

Mezistátní přeprava je, jak se zdá, nejefektivnější ze všech uvažovaných úrovní pro přepravu směsi. Na této úrovni lze využít z větší části stávající infrastrukturu. S rostoucí koncentrací vodíku ve směsi roste množství přepravovaného vodíku, zlepšuje se také jeho separace ze směsi. Na druhou stranu se zvyšuje potřeba modernizace potrubí vzhledem k vyšší koncentraci vodíku, a tudíž jeho častějším únikům. S delší vzdáleností potrubí také roste jeho vhodnost, jelikož se snižují jednotkové fixní náklady na přepravu vodíku.

7.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Úroveň TRL velmi závisí na jednotlivých úrovních přepravy a podílu vodíku ve směsi.

V ostrovních řešeních již nyní probíhají rozsáhlé testy s koncentracemi až do 20 % (obj.) vodíku a dá se říct, že TRL je 7–8. Problémy jsou stále s měřeními průtoku, respektive s možnostmi správně vyúčtovat, jelikož to probíhá na základě odebrané energie, která není v případě směsi vždy konstantní.

S vyššími koncentracemi vodíku ve směsi se TRL snižuje a vyskytují se velké problémy s materiály, úniky, armaturami a ventily a měřeními. TRL je v tomto případě 4–5.

Mezinárodní či mezikontinentální přeprava nemá zatím reálné aplikace a až s nimi lze diagnostikovat konkrétní problémy, nicméně potrubní infrastruktura je již relativně připravená na menší koncentrace kolem jednotek %, zde je TRL 6–7.

7.5.3 Popis druhu přepravy

Směs zemního plynu s vodíkem se jeví nejvhodněji přepravovat v potrubních systémech stejných nebo obdobných, jako jsou ty pro zemní plyn. Tranzitní plynovody bývají větší, průměry dosahují hodnot DN 1000–1400. Naopak plynovody distribučních soustav bývají menší a v závislosti na použití

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

dosahují průměrů od DN 80 až po DN 500. Nejběžnější materiály potrubí jsou polyetylen (PE) nebo ocel.

PE potrubí se využívají jen pro malé tlaky v rozmezí 12–15 bar. Poskytují lepší těsnost než ocelové potrubí a lepší korozní odolnost. U těchto potrubí je nutné používat je převážně pod zemí z důvodu UV degradace.

Ocelová potrubí mají oproti PE mnohem větší využitelnost, lze je využívat jak nadzemně, tak podzemně. Tato potrubí jsou vhodná i do tlaků až několik desítek bar.

7.5.4 Bezpečnostní opatření

V případě úniku je potřeba v prvním kroku uvolnit oblast a zamezit vstupu do prostoru úniku. V dalším kroku informovat hasičský záchranný sbor a sekundárně například provozovatele potrubní soustavy nebo při opravě rozsáhlých únicích i orgány ochrany životního prostředí (Česká inspekce životního prostředí). Je nutné vyvarovat se všem možným zdrojům zapálení, jako jsou horké povrchy, místa, kde dochází k jiskření (např. stykače, kartáče motorů kompresorů ...) [2].

Při běžném provozu je povinností používat nehořlavý, antistatický oděv. Při únicích v zastavěném území je dále nutné používat izolační dýchací přístroj. Požadavky na ochranu očí nebo rukou jak při běžném provozu, tak při úniku směsi nejsou stanovovány [2].

V případě úniku a rychlé expanze směsi může dojít k tvorbě mlhy (plyn je silně podchlazený), která zůstává při zemi, při šíření do okolí je riziko vytvoření výbušné směsi. Při požáru dochází ke vzniku CO₂ a toxických plynů, i když v menším množství, jako například oxidy dusíku nebo oxidy síry z důvodu přítomnosti odorantů v zemním plynu. V případě požáru směsi se doporučuje plamen nehasit, ale jen ochlazovat okolí, dokud nedojde k zastavení přívodu směsi a současně vodní mlhou zabránit šíření směsi do okolí. Doporučuje se hasit pěnou, vodní mlhou a tříštěným proudem vody. Naopak se nesmí hasit plným proudem vody [2].

7.5.5 Legislativní omezení

Veškerá národní legislativa, která má vliv na přepravu směsi zemního plynu s vodíkem, se řídí podle Energetického zákona (Zákon č. 458/2000 Sb.). Do něj byl s účinností od 1. 1. 2024 přidán i vodík, a tudíž také jeho směs se zemním plynem [4][5].

Kolem plynových potrubí se musí dle zákona dodržovat ochranná pásma, v rozsazích viz Tabulka 7.2, pro zajištění jejich bezpečného a spolehlivého provozu v závislosti na jejich umístění podle toho, zda jsou na území obce nebo mimo obec [3][4].

TABULKA 7.2: OCHRANNÁ PÁSMATA PRO PLYNOVÁ POTRUBÍ [4].

	V obci	Mimo obec
< 4 bar	1 m	2 m
4-40 bar	2 m	2 m
> 40 bar	4 m	4 m

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

Další legislativní složkou s vlivem na plynová potrubí jsou bezpečnostní pásma. Ta jsou určena k zamezení nebo zmírnění účinků případných havárií plynových zařízení a k ochraně života, zdraví, bezpečnosti a majetku osob. Pokud to technické a bezpečnostní podmínky umožňují a nedojde-li k ohrožení života, zdraví, bezpečnosti nebo zdraví osob, lze v bezpečnostním pásmu realizovat veřejně prospěšnou stavbu, pokud stavebník prokáže nezbytnost jejího umístění v bezpečnostním pásmu, jen na základě podmínek stanovených fyzických nebo právnických osob zodpovídajících za provoz příslušného plynového zařízení. Bezpečnostní pásma jsou definována podle průměru a tlaku potrubí tak, jak je uvedeno v Tabulka 7.3 [4][5].

TABULKA 7.3: BEZPEČNOSTNÍ PÁSMO PLYNOVÝCH POTRUBÍ PODLE PRŮMĚRU A TLAKU [4].

	<DN 100	DN 100-300	DN 300-500	DN 500-700	> DN 700
4-40 bar	8 m	10 m	15 m	20 m	20 m
> 40 bar	8 m	15 m	70 m	110 m	160 m

7.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Využívání současných plynovodů v rámci ČR pro přepravu směsi aktuálně není kompletně připraveno. Aktuálně se chystá připravení přepravní soustavy na přepravu směsi zemní plyn-vodík a předpokládá se, že by se mohla od roku 2026 v soustavě objevovat směs obsahující až 2 % (obj.) vodíku. Transformace stávajících tranzitních potrubí na přepravu směsi o vysokých koncentracích vodíku není ve střednědobém ani dlouhodobém horizontu cílem, tím je spíše připravit přepravní soustavu na čistý vodík. Co se týká distribučních plynových soustav, zde probíhají napříč Evropou testovací projekty, v rámci kterých se zkouší přimíchávání až 20 % (obj.) vodíku do potrubí zemního plynu. V České republice je aktuálně jediný pilotní projekt v pokročilejší fázi. Jedná se o projekt společnosti GasNet v Hranicích u Aše, kde distributor připravuje místní plynárenskou soustavu na příměs vodíku o koncentraci 10 % (obj.) s plánem přimíchávat v budoucnosti až 20 % (obj.) vodíku [23]. Všechny tyto projekty ovšem plánují využívat směs ke spalování [1][3]. Separace vodíku ze směsi by byla nutná na koncových místech pro využití v mobilitě. Dostupné technologie zvyšují energetické ztráty i náklady, dávají smysl až při vyšších koncentracích a průtocích. U nízkých koncentrací (do 5 % (obj.)) je separace neefektivní a komplikovaná přítomností odorantů a nečistot v DS. Proto je pro nespalovací využití racionálnější vyhrazená vodíková infrastruktura než spoléhat na separaci z nízkoprocentních směsí.

7.5.7 Energetická náročnost

Při potrubní přepravě směsi zemního plynu s vodíkem nedochází k nákladce v běžném smyslu jako u jiných typů přepravy. Samotná přeprava směsi funguje na principu rozdílu tlaků. Na konci řetězce ještě dochází ke spotřebě energie při vykládce/odběru vodíku ze směsi na separačním zařízení.

Tlaky v potrubí bývají nižší (do 60 bar). Po celé délce potrubí jsou rozmístěny kompresorové stanice, ve kterých dochází k navyšování tlaku z důvodu tlakové ztráty při proudění směsi v potrubí. Kompresorové stanice bývají po délce potrubí ve 100–200 km intervalech. Pro přepravu se nyní v kompresních stanicích využívají turbodmychadla, která využívají část přepravovaného plynu pro svůj chod. Energetická náročnost přepravy zemního plynu se pohybuje přibližně kolem 50 Wh/kg

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

z důvodu malého rozdílu tlaků na vstupu a výstupu. S rostoucím množstvím vodíku ve směsi se následně bude zvyšovat spotřeba energie na kompresi, jelikož má vodík nižší hustotu [6][7].

Je potřeba také počítat s energetickou spotřebou technologií separace vodíku ze směsi. U jednotlivých technologií se energetická spotřeba liší v závislosti na koncentraci vodíku ve směsi. Technologie PSA má při nižších koncentracích do 10 % (obj.) vysokou spotřebu kolem 20 kWh/kg vodíku, nicméně s rostoucí koncentrací se spotřeba výrazně snižuje, kdy při 50 % (obj.) koncentraci může být spotřeba jen kolem 2 kWh/kg. Membránová technologie se jeví energeticky méně náročná, při nízkých koncentracích vodíku se spotřeba pohybuje kolem 6 kWh/kg vodíku. S vyššími koncentracemi se ovšem její spotřeba nesnižuje tak výrazně jako u PSA. Při 50 % (obj.) vodíku se energetická spotřeba membrán uvádí přibližně 3–4 kWh/kg. Lze tedy říct, že technologie PSA je vhodnější pro směsi s vyššími koncentracemi než technologie membránová [8][9][17].

7.5.8 Ekonomické aspekty

Ekonomika přepravy směsi zemního plynu s vodíkem je dána několika faktory. Jedním z nich jsou investice do potrubních tras a kompresorů, respektive revitalizace a modernizace stávajících plynovodních a kompresních zařízení vzhledem k zvýšenému množství vodíku v potrubí a jeho možným únikům. Dalším faktorem jsou provozní náklady na provoz kompresorů, ale také potřebná separace vodíku ze směsi při konečných odběrech. Nelze zapomínat také na ztráty způsobené úniky netěsnostmi.

CAPEX

S vyšším podílem vodíku ve směsi je kladen větší důraz na úpravy kompresorů, těsnění a ventilů. Náklady na modernizaci potrubí se mohou pohybovat v rozmezí 20–30 % [10] nákladů na potrubí nové. Zvýší se důraz na přesné měření průtoků, přestože technologie pro vysoké podíly vodíku jsou dostupné (provozují se i čistě vodíkové potrubní systémy), skutečným limitem je kompatibilita stávajících komponent při konverzi plynovodů bez plošné výměny. Je nutné detailně ověřit funkčnost jednotlivých prvků pro různé koncentrace vodíku ve směsi [10].

OPEX

Nejvýraznější položkou provozních nákladů je komprese. S rostoucím množstvím vodíku ve směsi se zvyšuje objem celé směsi, a tudíž i objemový průtok v potrubí. To celé má poté za následek zvýšení příkonu kompresorů, a tedy i zvýšení spotřeby energie. Směs o nižších koncentracích je tedy nutné přepravovat ve větším množství, což vede k výraznějšímu nárůstu ceny přepravy v přepočtu na kilogram vodíku, viz Tabulka 7.4. Pokud by kapacita potrubí nebyla využívána na maximum, tak se cena přepravy ještě zvýší. Tabulka 7.4 poté ukazuje cenu za přepravu 1 kg vodíku, je ovšem potřeba počítat s tím, že s vodíkem je přepravováno také velké množství zemního plynu. Tento zemní plyn je poté možné nadále využívat, což zlepšuje náklad na přepravu vodíkové části směsi. Celkové náklady na přepravu vodíku se tedy liší v závislosti na koncentraci vodíku ve směsi a také podle míry využití celé kapacity potrubí [11].

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 7.4: VLIV KONCENTRACE VODÍKU VE SMĚSI SE ZEMNÍM PLYNEM NA CENU PŘEPRAVY [21, 22].

Podíl H ₂ ve směsi (obj.)	Objem směsi obsahující 1 kg H ₂ [Nm ³]	Náklad na přepravu H ₂ [€/kg H ₂ /1000 km]
5 %	222,47	8,96
10 %	111,23	4,32
20 %	55,62	2,00
50 %	22,25	0,60
90 %	12,36	0,19
100 %	11,12	0,14

Pro využívání vodíku v mobilitě je potřeba počítat také s následnou separací vodíku ze směsi. Existuje několik způsobů, jak vodík ze směsi odseparovat. Nejčastější průmyslovou technologií je PSA (Pressure Swing Adsorption), ta je ovšem energeticky náročná a provozní náklady se pohybují kolem 7 €/kg vodíku při koncentraci kolem 10 % (obj.) [17]. PSA je vhodnější spíše při vyšších koncentracích a průtocích. Pro nižší průtoky a koncentrace je vhodnější membránová technologie, která má mnohem menší spotřebu energie, což vede k ceně separace při 10 % (obj.) koncentraci okolo 4 €/kg vodíku. Při vyšších koncentracích vodíku ve směsi se cena za separaci u obou technologií snižuje, což je patrné z konkrétních hodnot uvedených v Tabulka 7.5. U PSA se cena snižuje mnohem výrazněji, ovšem membránové technologie vychází cenově stále příznivěji [9][12][13].

TABULKA 7.5: VÝVOJ NÁKLADŮ NA SEPARACI VODÍKU PŘI RŮZNÉ KONCENTRACI SMĚSI [17].

Podíl H ₂ ve směsi (obj.)	PSA [€/kg]	Membránová technologie [€/kg]
10 %	7	4
20 %	3	3,5
50 %	2	2
90 %	0,3	0,1

Dalším provozním faktorem ovlivňujícím cenu přepravy je dočištění vodíku pro jeho následné využití v mobilitě. Při separaci metodou PSA se při správném nastavení dokáže dosáhnout dostatečné čistoty pro mobilitu, která je 99,97 % (mol.). Membránové technologie dokážou vyseparovat vodík na čistotu 95–98 %, což znamená, že je potřeba dodatečné dočištění například metodou PSA. Mohlo by se tedy jednat o další náklad přibližně 0,3 €/kg vodíku [18].

Do celkové ekonomiky přepravy je potřeba také započítat možné ztráty. U potrubí s čistým zemním plynem se uvádí poměr ztrát cca 2,5 % [19]. Je potřeba ovšem vzít v potaz, že skutečné hodnoty budou záviset na parametrech jako teplota, tlak, materiál potrubí nebo těsnění potrubí. S rostoucí koncentrací vodíku ve směsi se budou zvyšovat i ztráty, a o to větší důraz je proto potřeba klást na opatření zamezující úniky z potrubí [14].

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.5.9 Ekologické aspekty

Ekologičnost tohoto typu přepravy je spojena převážně s kompresí směsi, respektive s ekologickou náročností kompresorů. Zde záleží, čím jsou kompresory poháněny. Kompresory poháněné zemním plynem vykazují emisní náročnost odpovídající právě spalování zemního plynu. V případě, že budou kompresory poháněné zemním plynem schopné využívat na svůj provoz přepravovanou směs, budou schopné s rostoucí koncentrací vodíku snižovat svoji emisní stopu. Další možnosti mohou být kompresory poháněné elektřinou z energetického mixu ČR, jehož emisní stopu Ministerstvo průmyslu a obchodu vykazuje jako 0,34 kg CO₂/kWh [20]. Emise elektrické energie dodávané ze sítě lze snížit dodávkou elektřiny z obnovitelných zdrojů energie buďto vlastním zdrojem OZE, zasmluvněnou dodávkou, například pomocí PPA kontraktu, nebo nákupem zelených certifikátů.

7.5.10 Normy, oborové předpisy

ČSN 38 6405 – Plynová zařízení. Zásady provozu.

ČSN EN 15001 – Zásobování plynem – Plynovody s provozním tlakem vyšším než 0,5 bar pro průmyslové využití a plynovody s provozním tlakem vyšším než 5 bar pro průmyslové a neprůmyslové využití.

ČSN EN 1594 – Zařízení pro zásobování plynem – Plynovody s nejvyšším provozním tlakem nad 16 bar – Funkční požadavky.

TPG 700 02 – Stanovení technického stavu nízkotlakých a středotlakých plynovodních sítí z oceli.

TPG 700 03 – Podmínky pro provádění pracovních činností a umísťování staveb v ochranných pásmech plynárenských zařízení a pro umísťování staveb v bezpečnostních pásmech plynových zařízení.

TPG 700 04 – Stanovení technického stavu vysokotlakých plynovodů.

TPG 702 01 – Plynovody a přípojky z polyetylenu.

TPG 702 04 – Plynovody a přípojky z oceli s nejvyšším provozním tlakem do 100 bar.

TPG 702 11 – Čistění a sušení plynovodů všech tlakových úrovní po výstavbě.

TPG 703 01 – Průmyslové plynovody.

TPG 905 01 – Základní požadavky na bezpečnost provozu plynárenských zařízení.

TPG 913 01 – Kontrola těsnosti a činnosti spojené s řešením úniků plynu na plynovodech a plynovodních přípojkách.

TPG 920 21 – Protikoroze ochrana v zemi uložených ocelových zařízení. Volba izolačních systémů.

TPG 920 22 – Protikoroze ochrana v zemi uložených ocelových plynových zařízení. Provoz a údržba zařízení aktivní ochrany.

TPG 920 23 – Ochrana kovových objektů a zařízení proti atmosférické korozi.

TPG 920 26 – Katodická ochrana potrubí uložených v zemi.

TPG 938 01 – Detekční systémy pro zajištění provozu před nebezpečím úniku hořlavých plynů.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.6 Terminály

V České republice je aktuálně 5 míst, kde se vyrábí vodík. Jsou jimi Litvínov, Kralupy nad Vltavou, Ústí nad Labem, Ostrava a Valašské Meziříčí. V litvínovské rafinerii se vyrábí největší množství vodíku a je relativně blízko k tranzitním plynovodům. Hlavním krokem v distribuci vodíku z průmyslových výroben by musela být výstavba potrubí k tranzitním plynovodům, pokud zde již nějaké není. Obrázek 7.1 znázorňuje polohy všech průmyslových výroben vodíku vzhledem k tranzitním a vnitrostátním plynovodům.



OBRÁZEK 7.1: POROVNÁNÍ PRŮMYŠLOVÝCH VÝROBEN VODÍKU S PLYNOVODY V ČR [15].

Aktuálně jsou v České republice velké podzemní zásobníky jen čistě na zemní plyn, viz Obrázek 7.2, žádné pro uskladnění směsi vodíku se zemním plynem nejsou a ani se nechystají budovat. Jedinou možnou variantou je využívání současných zásobníků zemního plynu, ovšem možnost přimíchávání vodíků do současných zásobníků není ještě ověřena. Tato varianta je nyní teprve ve fázích příprav na testování.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku



OBRÁZEK 7.2: ROZMÍSTĚNÍ PODZEMNÍCH ZÁSOBNÍKŮ PLYNU V ČR [16].

Jako distribuční centra pro přepravu směsi zemního plynu s vodíkem do České republiky lze považovat a využít přístavní terminály, kudy se do Evropy dováží například LNG (Liquefied Natural Gas/ zkapalněný zemní plyn). Zde je možnost vodík (pokud by v přístavu byl) přimíchávat do potrubních soustav, kterými se přepravuje zemní plyn dále do vnitrozemí. Nabízí se několik možných míst, která lze pro tyto účely využít.

1) Severozápadní koridor

Severozápadní terminály dodávají plyn do ČR přes hraniční body Brandov a Waidhaus. V přístavech jako Rotterdam, Eemshaven, Dunkirk-Zeebrugge nebo Stade lze teoreticky přimíchávat vodík do zemního plynu a poté přes německou potrubní soustavu dopravovat do České republiky.

2) Polsko + Baltské státy

Ze směru od Baltského moře připadají v úvahu přístavy v polském Svinoústí nebo v Litvě v Klaipedě. Odtud je poté teoreticky možné skrz místní potrubní systémy dopravovat směs přes hraniční bod v České Těšíně až do České republiky.

3) Jižní koridor

V potaz přichází také využití přístavů v jižní Evropě (Livorno, Ravenna, ...) a touto jižní cestou přepravovat směs přes hraniční bod Lanžhot.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.7 Přepravní trasy

V dnešní době se nevyužívají žádné trasy, kterými by bylo možné přepravovat směs zemního plynu s vodíkem do České republiky. Překážkou pro jakékoliv trasy mimo potrubní systémy je fakt, že směs zemního plynu s vodíkem není kvůli nízké kapacitě a složitosti řetězce s nezbytnou separací vhodná na jiné přepravy. Dalším faktorem je, že se směs zemní plyn-vodík zatím nikde (ani v zahraničí) nemíchá a nevyužívá v takové míře, aby se distribuovala a mohla být přepravována do České republiky. Pokud se se směsí pracuje, tak to jsou piloty ostrovních řešení pro účely spalování směsi v užitných zařízeních jako samotný zemní plyn.

Vzhledem k rozsáhlým potrubním systémům je možné již dnes přidávat do potrubí vodík a při nízkých koncentracích fungovat v běžném provozu jako se zemním plynem. To by dávalo možnost využívat současné kapacity pro mobilitu již nyní. Distribučních sítí by mohly při dodatečných úpravách zvládat směs s obsahem přibližně 20 % (obj.) vodíku, nicméně tranzitní přeshraniční cesty legislativně dovolují po celé EU limit 2 % (obj.) vodíku. Pokud se bude do budoucna dařit legislativně povolovat vyšší obsah vodíku napříč všemi okolními státy, budou se poté otevírat nové možné trasy pro potrubní přepravu.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

7.8 Shrnutí

Směs zemního plynu s vodíkem dává z hlediska přepravy smysl primárně v potrubních systémech, zatímco silniční, železniční či lodní logistika je kvůli nízké kapacitě směsi na jednotku a nutnosti následné separace ekonomicky i provozně nevýhodná.

V podmínkách ČR lze v dohledné době uvažovat o nízkých koncentracích do 2 % (obj.) vodíku v distribučních a tranzitních sítích. V delším horizontu může být v potrubí až 20 % (obj.) vodíku. Další navyšování koncentrace je nepravděpodobné, jelikož by byla potřeba úprava koncových zařízení. Pro mobilitu je blending s největší pravděpodobností slepá ulička. Separace z nízkých koncentrací na konci přepravního řetězce zvyšuje energetickou náročnost a ekonomické náklady. Více pravděpodobné je směřování investic do předělání potrubí na čisté vodíkovody, které budou mít odlišné využití než nyní potrubí na zemní plyn. To lze sledovat na základě SWOT analýzy (Obrázek 7.3).

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Kompatibilita s existující infrastrukturou: Lze využít stávající plynovody bez zásadních úprav pro nízké koncentrace vodíku. Chemická stabilita: Vodík a metan jsou za běžných podmínek stabilní. Technologická připravenost: TRL 7–8 pro potrubní přepravu.	Bezpečnostní rizika: Hořlavý plyn, výbušné směsi se vzduchem, nutnost bezpečnostních opatření. Ztráty při přepravě: Netěsnosti potrubí. Nelze využít přímo ve vodíkové mobilitě: Nutnost separace.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Dekarbonizace průmyslu a energetiky: pokud splní všechny podmínky EU pro RFNBO. Rozvoj P2G technologií: využití přebytků OZE do plynárenské soustavy. Možnost využití v plynárenské soustavě: do 20 obj. % lze přidávat vodík bez významných úprav plynárenské soustavy.	Konkurence jiných nosičů vodíku: Amoniak, kapalný vodík, LOHC... Metanové úniky: Vysoký GWP (28x CO ₂), riziko negativního dopadu na klima. Nízká využitelnost pro vodíkovou mobilitu: Směs nelze přímo využít. Kolísání koncentrace: Při dodržení podmínek pro RFNBO může výroba vodíku významně kolísat.

OBRAZEK 7.3: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY SMĚSI ZEMNÍHO PLYNU JAKO NOSIČE VODÍKU.

Pokud by bylo cílem blendu spalování v koncových zařízeních, lze uvažovat nad možností rozšiřovat infrastrukturu pro přepravu směsi. Víc než využívání směsi vodíku se zemním plynem, ať už pro účely mobility, nebo jako zdroj čistého vodíku pro průmysl, je ekonomicky i technicky výhodnější budovat trasy a řešení pro čistý vodík. Využívání blendu by mohlo být spíše jen přechodné řešení před výraznější transformací do čistého vodíku.

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
CAPEX	Kapitálové náklady (CAPital EXpenditures)
ČR	Česká republika
EU	Evropská Unie
OPEX	Provozní náklady (OPerating EXpense)
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PE	Polyetylen
PPA	Smlouva o dlouhodobé dodávce elektřiny (Power Purchase Agreement)
PSA	Tlaková cyklická adsorpce (Pressure Swing Adsorption)
TRL	Úroveň technologické připravenosti (Technology Readiness Level)
UV	Ultrafialové záření

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Desetiletý plán rozvoje přepravní soustavy 2025–2034. Online. In: Praha, 2025, s. 75. Dostupné z: https://www.net4gas.cz/files/rozvojove-plany/ntyndp25-34_cz_241031.pdf. [cit. 2026-01-09].
- [2] Bezpečnostní list – zemní plyn + vodík 20 %. Online. In: 2024, s. 7. Dostupné také z: <https://www.gasnet.cz/-/media/GasNet/Files/Gasnet/distribucni-soustava/BL-Zemn-plyn--vodka-20.pdf>.
- [3] Roční zpráva o provozu plynárenské soustavy České republiky 2024. 2024, Energetický regulační úřad.
- [4] Zákon č. 131/2015 Sb.: Zákon, kterým se mění zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon), ve znění pozdějších předpisů, a další související zákony. 2015: Česká republika.
- [5] Zákon č. 458/2000 Sb.: Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů, in Energetický zákon. 2000: Česká republika.
- [6] NET4GAS. Přepravní soustava. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.net4gas.cz/cz/prepravni-soustava/>. [cit. 2025-12-10].
- [7] Interstate Natural Gas Pipeline Efficiency. Online. Washington: Interstate Natural Gas Association of America, 2010. Dostupné z: <https://ingaa.org/wp-content/uploads/2010/10/10929.pdf>. [cit. 2025-12-18].
- [8] Membrane and Cryogenic Assisted Hydrogen Separation and Purification Process. Online. Energy Proceedings. 2021, roč. 2021, č. 24, s. 6. Dostupné také z: <https://www.energy-proceedings.org/wp-content/uploads/2022/03/Ahmad-Naquash ICAE2021 Revised proceedings.pdf>.
- [9] Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs. Online. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record. 2009, roč. 2009, č. 9013, s. 6. Dostupné také z: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf?Status=Master.
- [10] Europe's 'hydrogen backbone' of cross-border pipelines will cost billions more euros than initial estimates. Online. Hydrogeninsight. 2023. Dostupné z: <https://www.hydrogeninsight.com/production/europes-hydrogen-backbone-of-cross-border-pipelines-will-cost-billions-more-euros-than-initial-estimates/2-1-1560429>. [cit. 2025-12-15].
- [11] NAJUMUDEEN, Ameerudeen. Restoring Energy Capacity of Natural Gas Following Hydrogen Blending. Online. In: S. 4. Dostupné z: https://477837.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/477837/Collateral/White%20Papers/TND_KCM_EffectofHydrogenBlendingonEnergyCapacityofNaturalGas_748781_WP/Restoring-Energy-Capacity-of-Natural-Gas-Following-Hydrogen-Blending-white-paper-748781.pdf. [cit. 2026-01-15].

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

- [12] Techno-economic evaluation on a hybrid technology for low hydrogen concentration separation and purification from natural gas grid. Online. ScienceDirect. 2020, roč. 2020, s. 19. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/342699446_Techno-economic_evaluation_on_a_hybrid_technology_for_low_hydrogen_concentration_separation_and_purification_from_natural_gas_grid/fulltext/5f01c3e245851550508d910c/Techno-economic-evaluation-on-a-hybrid-technology-for-low-hydrogen-concentration-separation-and-purification-from-natural-gas-grid.pdf. [cit. 2025-12-20].
- [13] Energy consumption of the hydrogen separation process from a mixture with natural gas. Online. In: Gliwice, 2021, s. 8. Dostupné z: https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_247_papers/247_2022_64.pdf. [cit. 2026-01-10].
- [14] Pioneering the safe use of blended hydrogen in gas networks to reduce carbon emissions. Online. HyDeploy. 2026. Dostupné z: <https://hydeploy.co.uk/>. [cit. 2026-01-13].
- [15] Plynárenství v ČR – dodávka plynu a základní statistiky. Online. In: OENERGETICE.cz. 2015. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/plynarenstvi-v-cr-dodavka-plynu-zakladni-statistiky>. [cit. 2026-01-14].
- [16] Plynáři jsou na případnou krizi na Ukrajině připraveni. Online. In: PETROL.cz. 2014. Dostupné z: <https://www.petrol.cz/aktuality/plynari-jsou-na-pripadnou-krizi-na-ukrajine-pripraveni-3825>. [cit. 2026-01-14].
- [17] Techno-economic evaluation on a hybrid technology for low hydrogen concentration separation and purification from natural gas grid. Online. In: Eindhoven, 2021, s. 20. Dostupné z: https://pure.tue.nl/ws/files/174777614/1_s2.0_S036031992031733X_main.pdf. [cit. 2026-01-08].
- [18] Hydrogen Separation Technologies: Purification of Hydrogen Stored in a Depleted Natural Gas Field. Online. In: California: Low Carbon Resources Initiative, 2024, s. 5. Dostupné z: <https://www.epri.com/research/products/000000003002030648>. [cit. 2025-12-18].
- [19] A National Estimate of Methane Leakage from Pipeline Mains in Local Natural Gas Distribution Systems. Online. In: Colorado: Colorado State University, s. 20. Dostupné z: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-12/8_epa_ghgi_weller_vonfischer.pdf. [cit. 2026-01-13].
- [20] Hodnota emisního faktoru CO₂ z výroby a spotřeby elektřiny. Online. In: Praha: Oddělení analýz a datové podpory koncepcí MPO, 2025, s. 3. Dostupné z: https://mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2025/6/Metodika-CO2_2_2024.pdf?. [cit. 2026-01-11].
- [21] Dovoz obnovitelného vodíku do ČR: Analýza možností a nákladů. Online. In: Husinec-Řež: HYTEP, 2024, s. 50. Dostupné z: https://www.hytep.cz/images/dokumenty-ke-stazeni/Dovoz_obnovitelneho_vodik_u_do_CR_2024.pdf. [cit. 2026-01-12].
- [22] A EUROPEAN HYDROGEN INFRASTRUCTURE VISION COVERING 28 COUNTRIES. Online. In: European Hydrogen Backbone. Utrecht: Guidhouse, 2022, s. 36. Dostupné

Směs zemního plynu s vodíkem jako alternativní forma přepravy vodíku

z: <https://www.ehb.eu/files/downloads/ehb-report-220428-17h00-interactive-1.pdf>. [cit. 2025-12-20].

[23] Zvýšení podílu vodíku: Skládačka. Online. In: Hranice u Aše: GasNet, s. 2. Dostupné z: https://www.gasnet.cz/-/media/GasNet/Files/Gasnet/hranice/GasNet_Zvyseni_podilu_vodiku_skladacka_letak.pdf. [cit. 2026-01-04].

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8 Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

Beyza Uçar, Adam Giurg

ORLEN Unipetrol RPA s.r.o., Záluží 1, 436 70 Litvínov

8.1 Obecné informace

8.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Amoniak (NH_3) je jednou z celosvětově nejrozšířenějších chemikálií s roční produkcí přes 183 milionů tun [1]. Používá se v různých průmyslových aplikacích, jako je výroba hnojiv, jejichž celosvětová spotřeba amoniaku představuje přibližně 70 % [2].

Amoniak je navíc považován za vysoce účinný nosič vodíku díky svému vysokému hmotnostnímu obsahu vodíku, který je 17,6 hm. %. To v podstatě znamená, že na každých 100 kg amoniaku připadá 17,6 kg vodíku, což z amoniaku činí jeden z nejúčinnějších materiálů pro ukládání vodíku z hlediska gravimetrické kapacity [3]. Hmotová účinnost přeměny vodíku na amoniak a poté zpět na vodík je asi 67 %, na základě předpokladů 86 % účinnosti syntézy amoniaku, 79 % účinnosti krakování amoniaku a 2 % transportních ztrát. V důsledku toho je na každý 1 kg vodíku potřeba 8,5 kg amoniaku [4]. Charakteristické vlastnosti amoniaku a vodíku jsou uvedeny v Tabulka 8.1. Hustota kapalného amoniaku je v bodě varu 600 kg/m^3 , což v přepočtu znamená hustotu vodíku $106 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$ [5]. Za normálních podmínek je amoniak bezbarvý plyn se silným zápachem a má menší hustotu ($0,769 \text{ kg/m}^3$) než vzduch. Amoniak lze snadno zkapalnit pod tlakem nebo při nízkých teplotách [5].

TABULKA 8.1: CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI KAPALNÉHO AMONIAKU A VODÍKU [5-8].

Parametr	Jednotka	Kapalný amoniak	Vodík
Výhřevnost	MJ/kg	18,5	119,9 ($10,7 \text{ MJ/m}^3$)
Energetická hustota	MJ/L	12,7*	4,5 (stlačený H_2^*) 8,5 (kapalný H_2^*)
Emise	-	NO_x a H_2O	H_2O
Teplota samovznícení	$^{\circ}\text{C}$	651	535
Rozsah hořlavosti	%	15–28	4–75 (ve vzduchu)
Riziko úniku	-	Nízké riziko úniku a silný zápach	Nízká hustota způsobuje vysoké riziko úniku
Skladování a přeprava	-	Středně náročná	Velmi náročná

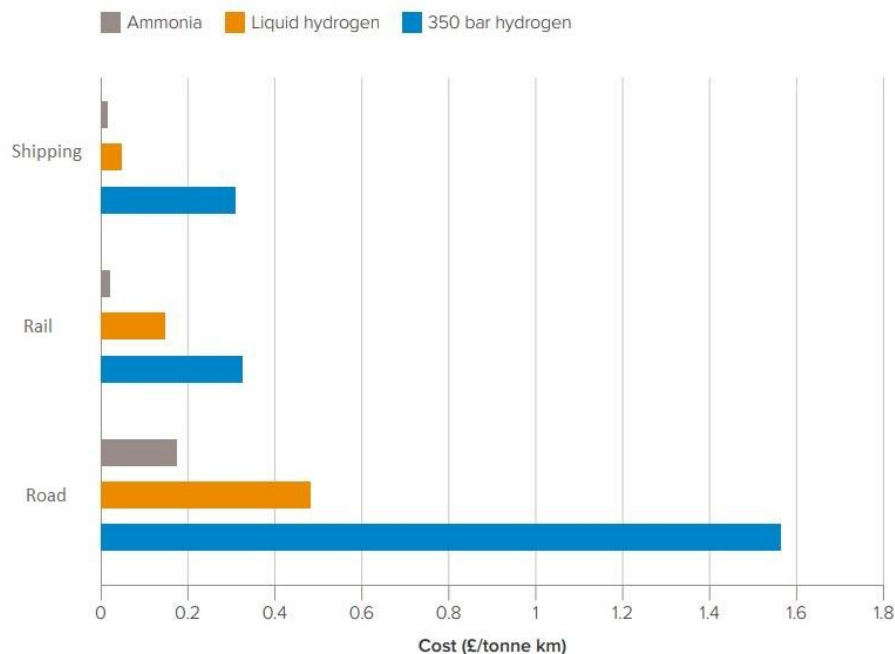
Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

POKRAČOVÁNÍ TABULKA 8.1.

Parametr	Jednotka	Kapalný amoniak	Vodík
Infrastruktura	-	Zavedená	Je třeba vyvinout pro rozsáhlé aplikace
Kompatibilita se stávajícími systémy	-	Vysoká	Střední

* Podmínky jsou uvažovány jako 1 MPa při 25 °C pro kapalný amoniak; 0,1 MPa při -252,9 °C pro kapalný vodík a 69 MPa při 25 °C pro stlačený vodík [5].

Amoniak je vysoce toxický, korozivní a expozice může způsobit vážné podráždění kůže, očí a dýchacích cest. Vdechnutí vysokých koncentrací může vést k plicnímu edému, respiračnímu selhání, a dokonce i smrti [9]. Meze hořlavosti amoniaku ve vzduchu jsou 15 obj. % (dolní mez hořlavosti) a 28 obj. % (horní mez hořlavosti), tyto limity jsou relativně úzké ve srovnání s jinými hořlavými plyny [7]. Amoniak lze skladovat a přepravovat jako kapalinu za mírného tlaku nebo nižších teplot, což usnadňuje velkoobjemovou přepravu potrubím, silnicí, železnicí nebo lodí [10], s typickými provozními tlaky až 29 bar při teplotách mezi -40 °C a +50 °C v závislosti na využitém typu přepravy. Na Obrázek 8.1 jsou porovnány náklady na přepravu amoniaku s náklady na přepravu kapalného a stlačeného vodíku. V tomto ohledu nabízí amoniak výrazně proveditelnější přepravní řešení.



OBRÁZEK 8.1: NÁKLADY NA PŘEPRUVU AMONIAKU, KAPALNÉHO VODÍKU POD TLAKEM 350 BAR LODNÍ, ŽELEZNIČNÍ A SILNIČNÍ PŘEPRAVOU [10].

8.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Amoniak je komoditou s vysokou poptávkou, která vyžaduje přepravu přes regiony a hranice. Přeprava amoniaku však vyžaduje zajištění bezpečnosti pro ochranu veřejného zdraví a životního

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

prostředí kvůli jeho nebezpečným vlastnostem. Znalost vlastností amoniaku je nezbytná pro efektivní balení a bezpečnostní protokoly, jako jsou protokoly Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) [11], Mezinárodní námořní organizace (IMO) [12] a další.

Správné balení zabraňuje úniku, kontaminaci a fyzickému poškození během přepravy. Pro přepravu amoniaku jsou jako obalová řešení vhodné tlakové nádoby a kryogenní kontejnery. Tlakové nádoby, včetně ISO nádrží, statických skladovacích nádrží, silničních cisteren a lahví, jsou navrženy tak, aby zvládly vysoké vnitřní tlaky pro přepravu plynného amoniaku. Kryogenní kontejnery nabízejí pokročilou izolaci při nízkých teplotách a zabraňují odpařování při přepravě kapalného amoniaku [11]. Přeprava amoniaku jako nebezpečného materiálu je možná stejnými cestami jako u jiných produktů (silniční, železniční a lodní), pokud splňují bezpečnostní předpisy. Požadované informace pro přepravu amoniaku, které musí být jasně uvedeny na štítku, se zaměřují na identifikaci nebezpečí. V Tabulce 8.2 jsou uvedeny tyto údaje a dalších související přepravní informace v dokladech podle různých klasifikací.

TABULKA 8.2: POŽADOVANÉ INFORMACE PRO PŘEPRAVU AMONIAKU Z HLEDISKA IDENTIFIKACE NEBEZPEČNÝCH LÁTEK [9, 13].

	DOT	TDG	ADR	IMDG	IATA
UN číslo	UN 1005	UN 1005	UN 1005	UN 1005	UN 1005
UN název	Amoniak, bezvodý	AMONIAK, BEZVODÝ	AMONIAK (ČPAVEK), BEZVODÝ	AMONIAK (ČPAVEK), BEZVODÝ	Amoniak, bezvodý
Třída(y) nebezpečnosti pro přepravu	2.2 	2.3 (8)   	2.3 (8)   	2.2   	2.2  
Nebezpečí pro životní prostředí	Ne.	Ano.	Ano.	Ano.	Ano. Zvláštní označení není vyžadováno.

Pozn.: Označení znečištění moře není vyžadováno pro IMDG při přepravě v objemech ≤ 5 l nebo ≤ 5 kg a pro TDG při přepravě po silnici nebo železnici.

Nejčastěji používané klasifikace, jak je shrnuto v Tabulce 8.2, jsou DOT, TDG, ADR, IMDG a IATA. Ministerstvo dopravy USA (DOT) klasifikuje bezvodý amoniak odlišně v závislosti na způsobu a kontextu přepravy, například jako nehořlavý plyn třídy 2.2 v rámci vnitrostátní přepravy, ale jako třídy 2.3 (toxický plyn) v mezinárodní přepravě kvůli riziku vdechnutí. Při přepravě po vodních cestách USA není amoniak regulován jako znečišťující látka, pokud je balen v množství ≤ 5 l nebo ≤ 5 kg. Pro silniční, železniční nebo vnitrozemskou leteckou přepravu v baleních, která splňují obecná ustanovení, není také amoniak látkou znečišťující vody. Balíčky obsahující množství pod hlášeným množstvím 100 liber (45,4 kg) nepodléhají kompletním přepravním požadavkům. Přeprava bezvodého amoniaku osobním letadlem je zakázána. Přeprava nákladním letadlem je omezena na maximální množství 150 kilogramů [9]. Podle kanadských předpisů pro přepravu nebezpečného

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

zboží (TDG) je bezvodý amoniak klasifikován jako nebezpečné zboží třídy 2, konkrétně v oddíle 2.3 (toxické plyny) pro své vlastnosti představující nebezpečí vdechnutí. Zředěné roztoky amoniaku s nižšími koncentracemi mohou být klasifikovány a přepravovány jako třída 8 (žíraviny) na základě svých korozivních vlastností.

Dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) klasifikuje amoniak jako nebezpečné zboží třídy 2, konkrétně do 2.3 (toxické plyny) a 8 (žíravé). Podle ADR lze hromadně přepravovat amoniak za přísných protokolů o balení a schvalování [13]. Podle Mezinárodního předpisu pro přepravu nebezpečného zboží po moři (IMDG) je bezvodý amoniak klasifikován jako nebezpečné zboží třídy 2, které vyžaduje odpovídající označení, balení a preventivní opatření během námořní přepravy [9]. Mezinárodní sdružení letecké dopravy (IATA) také klasifikuje bezvodý amoniak podobně jako TDG a IMDG, jak je uvedeno v Tabulka 8.2. IATA uznává amoniak jako látku nebezpečnou pro životní prostředí, ale nevyžaduje označení nebezpečnosti pro životní prostředí, pokud to nenařizují jiné přepravní předpisy. Přeprava amoniaku nákladními letadly je možná jen za přísných protokolů o balení a schvalování s maximálním množstvím 150 kg [9].

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.2 Silniční přeprava

8.2.1 Vhodnost přepravy

Amoniak je všeobecně uznáván jako účinný nosič vodíku, zejména pro přepravu vodíku na dlouhé vzdálenosti a velké objemy [5]. Podle hodnot z literatury (Obrázek 8.1) jsou náklady na přepravu amoniaku po silnici nižší než 0,23 EUR/tkm, zatímco náklady na přepravu vodíku po silnici se pohybují od 0,46 do 1,84 EUR/tkm.

Amoniak se obvykle přepravuje nákladními automobily pomocí cisternových návěsů s kapacitou do 21 000 kg pro cisterny na zkapalněný amoniak (LNH_3) [14], což z něj činí vhodnou možnost pro velkoobjemovou distribuci vodíku s nízkou odhadovanou četností úniků, která byla na základě údajů z let 2012 až 2021 pouze 0,0031 na přepravu za rok [15].

8.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Tyto hodnotící skupiny úrovně technologické připravenosti (TRL) jsou rozděleny do 9 TRL a 4 fází vývoje technologií: základní výzkum, výzkum a vývoj, pilotní a demonstrační a brzké přijetí do běžného komerčního využití [16]. Během hodnocení TRL se zkoumají koncepty programu, technologické požadavky a prokázané technické schopnosti. Principy a popisy hodnocení TRL jsou uvedeny v příloze 8.9 v Tabulka 8.14.

Amoniak je jedním z nejvyužívanějších komoditních produktů s vysokou energetickou hustotou, což z něj činí vhodnou velkoobjemovou přepravu na dlouhé vzdálenosti. V současné době se amoniak již přepravuje po celém světě jako komodita, zejména pro kluziště, hnojiva a chemický průmysl. TRL technologií přepravy amoniaku se může lišit v závislosti na použité metodě přepravy. Infrastruktura a bezpečnostní protokoly pro silniční přepravu amoniaku jsou dobře zavedené. Přeprava je považována za vyspělou technologii, která funguje na úrovni TRL 9 (komerční, plně zavedená) [17].

8.2.3 Popis druhu přepravy

Protože je amoniak za standardních podmínek v plynném skupenství, často se zkapalňuje tlakem nebo chlazením a přepravuje se jako zkapalněný plyn v tlakových nádobách nebo kryogenních kontejnerech. Tlakové nádoby (ISO nádrže, statické skladovací nádrže, cisterny a lahve) jsou navrženy tak, aby zvládly vysoké vnitřní tlaky pro přepravu zkapalněného amoniaku [11]. Kryogenní cisternové kontejnery využívající pokročilou izolaci při nízkých teplotách omezují odpařování při přepravě kapalného amoniaku [11].

Pro Evropu musí být přepravní nádrže na amoniak navrženy v souladu s normami EN14025 a musí mít schválenou kvalitu výroby dle normy ISO 3834 technickou komisí CEN/TC 296 [18, 19]. Přepravní nádrže na amoniak splňující normy ADR, jejichž specifikace jsou uvedeny v Tabulka 8.3, poskytují těsné a odolné konstrukce, které splňují bezpečnostní požadavky. Tento typ nádrží navíc splňuje mezinárodní bezpečnostní normy, jako jsou ASME (Americká společnost strojních inženýrů), EN 14025 (Normy pro tlakové nádrže), ISO 9001 (Systém managementu kvality) a TPED (Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních) [20]. Pro tento typ nádrží se provozní teplota pohybuje od -

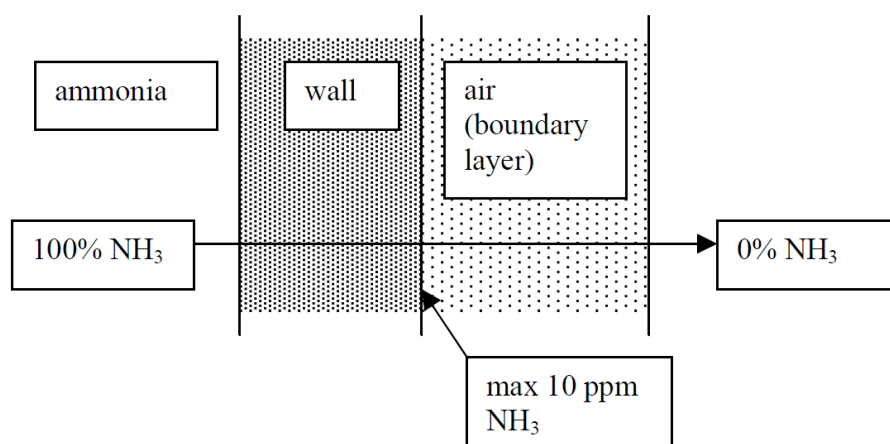
Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

40 °C do +50 °C. Maximální tlak se navíc může pohybovat mezi 19,3 a 29 bar. Aplikace tlaku je nutná k udržení amoniaku v kapalném stavu [18].

TABULKA 8.3: TECHNICKÉ SPECIFIKACE BĚŽNÉ NÁDRŽE NA PŘEPRAVU AMONIAKU [18, 20].

Technický parametr	Specifikace
Návrhový kód	EN 14025 +ADR
Návrhový tlak	19,3 bar
Zkušební tlak	26 bar
Provozní teplota	-40 °C až +50 °C
Kapacita	36 m ³ až 44 m ³
Materiál	EN 10028-3 (P460 NL1)
Typ	Přepravní nádrž na amoniak v souladu s ADR

Nádrž používaná pro přepravu amoniaku by neměla být vyrobena z mědi, zinku, stříbra nebo jejich slitin, protože tyto materiály mohou způsobit kontaminaci produktu. Místo toho se pro konstrukci nádrže používají vhodné ocelové slitiny. Instalace izolačního materiálu na vnější stranu nádrže navíc umožňuje přepravu amoniaku při teplotách blízkých bodu varu [17]. Amoniak je lehčí než vzduch, proto je propustnost nádrže důležitá. Podle výpočtů přenosu hmoty z výzkumné zprávy Risø-R-1504 (DTU, Dánsko), pokud je propustnost skrz samotnou stěnu menší než $1,8 \cdot 10^{-9}$ kg/(m²s), je koncentrace na vnější straně menší než 10 ppm, jak je vidět na Obrázek 8.2. Přenos hmoty není příliš ovlivněn délkou nádrže, pokud je zachován poměr délky k průměru asi 2,5. Například u zásobníku o délce 5 m a průměru 2 m je rychlost přenosu hmoty přibližně $1,2 \cdot 10^{-9}$ kg/(m²s), což naznačuje, že nedochází téměř k žádnému přenosu amoniaku do atmosféry [21].



OBRAZÉK 8.2: PROPUSTNOST NÁDRŽE NA AMONIAK [21].

Ministerstvo dopravy USA definuje amoniak jako nebezpečný materiál a přeprava v kontejnerech musí splňovat specifikace certifikace DOT. DOT označuje běžně používané cisternové vozy, jako je MC 331 (Obrázek 8.3), jejichž konstrukční parametry jsou uvedeny v hlavě 49, části 178 Kodexu federálních předpisů (49 CFR 178). Typické parametry nádrže jsou následující: konstrukční tlak je

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

1,72 MPa, průměr nádrže je 2,18 m, tloušťka stěny je 0,01 m, objem je 37 854 l a tvar dvířek je polokulový [17].



OBRÁZEK 8.3: VIZUALIZACE NÁKLADNÍHO TANKU MC 331 [22].

8.2.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava amoniaku po silnici zahrnuje přísná bezpečnostní opatření kvůli jeho toxicitě, korozivním vlastnostem a potenciálnímu dopadu na životní prostředí. Analýza následků dopravních nehod z literatury zahrnuje scénáře úniku amoniaku, včetně počtu smrtelných případů. V tomto ohledu studie Brockhofs a AVIV uvádí 30 nehodovostí nákladních vozidel na 100 milionů km a uvádějí mechanismy selhání: propíchnutí a prasknutí nádrže v důsledku nárazu, selhání v důsledku oděru (pouze tenkostěnné nádrže) a prasknutí v důsledku požáru [21]. Většina incidentů souvisí s rozptylem plynu, jak je vidět v příloze 8.9 na Obrázek 8.15.

Aby se předešlo jakémukoli selhání, jsou hlavní bezpečnostní opatření:

- 1) Dodržování norem pro přepravu, skladování a balení nebezpečných chemikálií, jako jsou FMCSA [23], EN14025 [19], 49 CFR 178 [17].
- 2) Používejte pouze certifikované cisternové vozy nebo kontejnery určené speciálně pro amoniak s robustní strukturální integritou, které odolávají kolizím a zabraňují únikům [21].
- 3) Přeplnění může způsobit poruchu systému vytápění a chlazení. Proto musí být nainstalován regulátor hladiny, který uzavře plnicí potrubí na určité úrovni v nádrži, aby se zabránilo přeplnění [21].
- 4) Nádrže musí být zajištěny, aby se zabránilo jejich pohybu během přepravy, a teplotní podmínky by měly být sledovány, aby se zachovala stabilita amoniaku.
- 5) Všechny kontejnery musí být opatřeny správnými štítky s upozorněním na nebezpečí (Tabulka 8.2) a příslušnými identifikačními UN čísly.
- 6) Nakládku, přepravu a vykládku by měl provádět vyškolený personál s použitím specializovaného vybavení a za dodržení přísných protokolů, aby se zabránilo poškození kontejneru [21].

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

- 7) Nakládka/vykládka probíhá pouze ve vyhrazených, dostatečně bezpečnostních zónách, mimo veřejné komunikace a budovy, v souladu s povinnostmi vyplývajícími z vnitrostátních právních předpisů implementujících evropské směrnice, jako je Evropská asociace výrobců hnojiv (EFMA) a Dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) [21].
- 8) Použití těsnění víka ventilu zabraňuje úniku z tělesa ventilu a přetlakové zařízení zabraňuje poruchám [21].

8.2.5 Legislativní omezení

Přeprava amoniaku je regulována jako přeprava nebezpečných materiálů s číslem UN 1005 a třídou 2. ADR stanovuje důležitá pravidla pro bezpečné balení a přepravu amoniaku. Nepokrývá však plně všechny požadavky mezinárodních norem, jako jsou ASME, EN 14025, ISO 9001 a TPED, které je také třeba dodržovat pro zajištění vysoké bezpečnosti a shody s předpisy při přepravě amoniaku [21]. Největšími výzvami při přepravě amoniaku jsou maximální povolená kapacita (až 44 m³), tlak (19,3–29 bar) a teplota (–40 °C až +50 °C) pro přepravu, zajištění kvality a konstrukční certifikát (49 CFR 179) [18, 24]. Pokud jsou splněny požadavky, neexistují žádné problémy s přepravou amoniaku, který je známý jako jeden z nejpoužívanějších komoditních produktů.

8.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika v současné době obchoduje s amoniakem ze sousedních zemí, jako je Německo, Polsko a Slovensko [25]. Silniční doprava nabízí flexibilitu a zároveň snižuje počáteční investiční náklady, ale na druhou stranu má nižší kapacitu a vyšší jednotkové náklady. Vzhledem ke geografickým specifikům ČR, průmyslové výrobní kapacitě a přepravním vzdálenostem je silniční doprava proveditelná. Jediným výrobcem amoniaku v České republice je společnost ORLEN Unipetrol. Společnost v současné době silniční přepravu amoniaku nevyužívá, a proto by bylo nutné ji rozšířit.

8.2.7 Energetická náročnost

Silniční přeprava amoniaku (NH₃) má mezi ostatními druhy dopravy (železniční, lodní nebo potrubní) nejvyšší měrnou energetickou náročnost. V literatuře je uvedena pro přepravní vzdálenost 100 km spotřeba energie přibližně 1,65 kWh na MWh přepravovaného amoniaku, což odpovídá 0,0085 kWh na kg NH₃ a 0,048 kWh na kg H₂ přepraveného na stejnou vzdálenost [26].

Energetická náročnost dopravy souvisí především se spotřebou tahače. V dnešní době jsou nejběžnější dieselové tahače. Spotřeba může být až 30 l/100 km. Nafta má výhřevnost 44 MJ/kg, což je asi 12,2 kWh/kg a 10,2 kWh/l. Spotřeba energie je tedy asi 3 kWh/km. Podle výpočtů pro použití dieselového nákladního vozidla je potřeba energie 300 kWh na 100 km, což odpovídá přibližně 0,014 kWh/kg NH₃ a 0,08 kWh/kg H₂ na 100 km. Tento výpočet ukazuje téměř dvojnásobnou spotřebu energie ve srovnání s hodnotami uváděnými v literatuře.

Objem přepravy nákladními vozidly je omezen maximální kapacitou amoniaku 36–44 m³ na jednu cestu, což omezuje nákladovou efektivitu silniční dopravy pro velkoobjemovou nebo dálkovou přepravu amoniaku [18, 24]. Amoniak má však vyšší energetickou hustotu než vodík (viz Tabulka 8.1), což snižuje relativní energetické nároky na přepravu, a tedy je výhodnější než přeprava vodíku.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.2.8 Ekonomické aspekty

Silniční přeprava amoniaku je obecně nejdražším způsobem přepravy ve srovnání s železniční, lodní a potrubní přepravou. Přeprava amoniaku kamionem má několik důležitých ekonomických faktorů, které je třeba mít na paměti. Silniční přeprava je velmi flexibilní a amoniak má vyšší energetickou hustotu než vodík, takže jeho přeprava kamionem je energeticky efektivnější než přeprava vodíku.

Pro distribuci ke koncovým uživatelům se však obvykle používají nákladní automobily. Vzdálenost a trasa přepravy jsou důležité, protože ovlivňují spotřebu energie a způsob řízení rizik. Náklady na silniční dopravu jsou vyšší kvůli omezené objemové kapacitě. Pro přepravu amoniaku je silniční doprava vhodnější především na krátké vzdálenosti, obvykle do 100 km. Na delší vzdálenosti nebo mnohem větší objemy, vyžadují nákladní automobily více energie na jednotku přepravovaného amoniaku, což tuto cestu činí méně ekonomickou.

Náklady na silniční přepravu navíc nepocházejí jen z paliva a energie, ale také z investic do specializovaných cisteren určených pro bezpečnou přepravu amoniaku vzhledem k jeho toxickým vlastnostem. Bezpečná manipulace s amoniakem během nakládky, přepravy a vykládky je zásadní a také přispívá k celkovým nákladům. Nákladní automobily proto musí splňovat přísné bezpečnostní předpisy, používat speciální vybavení a zaměstnávat proškolené řidiče, což vše náklady zvyšuje.

Navzdory vysokým nákladům a omezenému objemu přepravy je silniční doprava atraktivním způsobem přepravy amoniaku díky své dostupnosti a flexibilitě [10, 27]. Silniční přeprava amoniaku je ekonomicky proveditelná na krátké vzdálenosti a s dodáním na místo. Nicméně je třeba zvážit bezpečnostní rizika a opatření.

8.2.9 Ekologické aspekty

Amoniak je klasifikován jako nebezpečný materiál kvůli své toxicitě, korozivním vlastnostem a potenciálnímu dopadu na životní prostředí. Proto přeprava amoniaku po silnici vyžaduje specifická bezpečnostní opatření, která jsou podrobně popsána v kapitole 8.2.4.

Přestože je propustnost stěny menší než $1,8 \cdot 10^{-9}$ kg/(m² s) a koncentrace amoniaku vně je pod 10 ppm (jak je znázorněno na Obrázek 8.2), studie Brockhofa a AVIV uvádí míru vážných nehod nákladních vozidel 30 na 100 milionů kilometrů a identifikovala čtyři mechanismy selhání související s přepravou amoniaku [21]. Podle údajů o dopravních nehodách s amoniakem vedlo 52,98 % nehod k rozptýlení par, 19,82 % k úniku a 23,33 % k úniku i rozptýlení par, jak je znázorněno na Obrázek 8.15. Únik nebo expozice amoniaku způsobuje znečištění ovzduší. Katalyzuje reakce v atmosféře, čímž nepřímo přispívá k okyselení ovzduší a zvyšuje pravděpodobnost kyselých dešťů. Kyselé deště nepříznivě ovlivňují nejen zemědělské oblasti, ale i kvalitu vody [28].

Emise navíc nejsou způsobeny pouze nehodami, ale vznikají i v důsledku samotného dopravního procesu. V Evropské unii je silniční doprava zodpovědná za produkci více než 72 % skleníkových plynů v dopravním sektoru [29]. Důležitý je tedy i typ použitého paliva [30]. Nejběžnějším typem dopravy jsou dieselové nákladní automobily, které s průměrnou spotřebou 30 l/100 km produkují

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

asi 100 kg CO₂/100 km. Z hlediska přepravovaného množství se jedná o 4,7 g CO₂/kg NH₃/100 km, respektive 26,7 g CO₂/kg H₂/100 km.

8.2.10 Normy, oborové předpisy

FMCSA – Federální úřad pro bezpečnost motorové dopravy.

ČSN EN 14025 – Nádrže pro přepravu nebezpečného zboží – Kovové tlakové nádrže – Konstrukce a výroba.

49 CFR 178 – Hlava 49, Kodex federálních předpisů, Část 178 – Specifikace pro obaly.

49 CFR 179 – Hlava 49, Kodex federálních předpisů, Část 178 – Specifikace pro cisternové vozy.

EFMA – Evropská asociace výrobců hnojiv.

ADR – Dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí.

ČSN EN ISO 3834 – Požadavky na jakost při tavném svařování kovových materiálů.

ASME standards – Standardy Americké společnosti strojních inženýrů.

ČSN EN ISO 9001 – Systém managementu kvality.

TPED – Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.3 Drážní přeprava

8.3.1 Vhodnost přepravy

Distribuce amoniaku po železnici se běžně používá jak na krátké, tak i dlouhé vzdálenosti. Železniční doprava je obvykle nákladově efektivní s rozsáhlou a vhodnou železniční sítí [31]. Náklady na přepravu amoniaku po železnici mohou být nižší než 0,12 EUR/tkm. Železniční přeprava amoniaku je vhodná při splnění požadavků předpisů týkajících se konstrukce, jako je Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí (RID). Ačkoli je riziko při posunování a výměně lokomotiv obecně výrazně vyšší než u kamionů, následky nehody jsou obvykle malé a ne dramatické. Železniční doprava je považována za bezpečnou přepravu velkého množství amoniaku [32].

8.3.2 Úroveň technologické připravenosti

Tyto hodnotící skupiny úrovně technologické připravenosti (TRL) jsou rozděleny do 9 TRL a 4 fází vývoje technologií: základní výzkum, výzkum a vývoj, pilotní a demonstrační a brzké přijetí do běžného komerčního využití [16]. Během hodnocení TRL se zkoumají koncepty programu, technologické požadavky a prokázané technické schopnosti. Principy a popisy hodnocení TRL jsou uvedeny v příloze v Tabulka 8.14.

Amoniak je jedním z nejvyužívanějších komoditních produktů s vysokou energetickou hustotou, což z něj činí vhodné médium pro přepravu ve velkém měřítku na dlouhé vzdálenosti. V současné době se amoniak již celosvětově přepravuje železničními vagony. Infrastruktura a bezpečnostní protokoly pro železniční přepravu amoniaku jsou dobře zavedené. Technologie je považována za vyspělou a funguje na úrovni TRL 9 (komerční, plně zavedená) [33].

Zejména Německo má aktivní železniční síť pro přepravu amoniaku. Nedávno se společnost RWE a globální logistická firma VTG spojily s cílem vybudovat železniční distribuční síť pro dovážení amoniaku přijíždějící do Evropy. Každý železniční vagón má kapacitu přibližně 100 m³ a partneři plánují do roku 2026 přepravit až 300 000 t amoniaku ročně, dodávaného přes přístav Brunsbüttel v Německu [34].

8.3.3 Popis druhu přepravy

Amoniak se přepravuje po železnici ve zkapalněném stavu pod tlakem pomocí přetlakových železničních cisteren, které jsou izolovány buď sluneční clonou, nebo kompletním opláštěním z izolačních materiálů pro tepelnou ochranu, nikoli pro chlazení. Železniční cisterny pro přepravu amoniaku jsou navrženy a vyrobeny pro vnitřní tlak 26 bar, zatímco normální provozní tlak je 5–14 bar. Nebezpečí úniku amoniaku během přepravy je tedy velmi malé [32].

Před nakládkou se amoniak obvykle zahřeje z -33 °C na +4 °C (pokud je amoniak skladován při nízké teplotě) v závislosti na venkovní teplotě [35]. Železniční přeprava amoniaku využívá celosvětově převážně cisternové vozy s objemem 50–110 m³ [32, 36]. Obvyklá kapacita v České republice je 85 m³. Obrázek 8.4 znázorňuje vhodný železniční cisternový vůz pro přepravu amoniaku. Oranžový pás o šířce 30 cm, který neodráží světlo, se používá pro přepravu zkapalněných, chlazených

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

zkapalněných nebo rozpuštěných plynů a identifikační štítky cisternových vozů jsou nutné pro přepravu plynů s vícenásobným použitím [37].

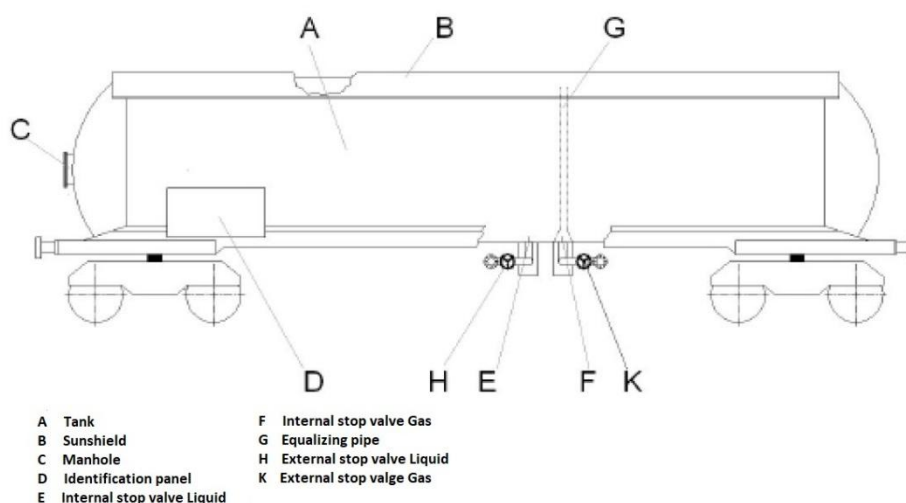


OBRÁZEK 8.4: ŽELEZNIČNÍ CISTERNA PRO AMONIAK S ORANŽOVÝM PÁSEM, TEPELNÝM ŠTÍTEM A IDENTIFIKAČNÍM ŠTÍTKEM [32].

Typické uspořádání vybavení železničních cisteren pro přepravu amoniaku je znázorněno na Obrázek 8.5. Během přepravy vyžaduje každý vůz ochranný štít (sluneční clonu), aby se zabránilo ztrátě obsahu při statickém a dynamickém namáhání za normálních podmínek, a mělo by se zohlednit minimální napětí při zkušebním tlaku. Tento štít (Obrázek 8.5B) musí být navržen a vyroben v souladu s požadavky technického předpisu uznaného příslušným orgánem, ve kterém je materiál vybrán a tloušťka stěny určena s ohledem na maximální provozní tlak a maximální a minimální plnicí a provozní teploty. Kromě toho by měly být pro pláště použity vhodné kovové materiály pro snížení koroze pod napětím v rozmezí teplot $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [32]. Materiály kompatibilní s amoniakem jsou specifikovány v normě ISO 11114-1:2012+A1:2017 a konstruovány s mezí kluzu vyšší než 400 N/mm^2 v souladu s materiálovou normou, musí být při každé pravidelné kontrole podle 6.8.2.4.2 podrobeny magneticko-práškové kontrole za účelem zjištění povrchových trhlin [33].

K významné tepelné roztažnosti může docházet zejména v horkých letních dnech, proto je zákonem povolená maximální hladina naplnění omezena na $0,53\text{ kg}$ amoniaku na liter efektivního objemu cisterny. Limit hmotnosti nákladu navíc stanoví železniční dopravní společnost podle přepravní trasy [32]. Vnitřní uzavírací ventily (Obrázek 8.5E a 8.5F), ovládané zespodu železniční cisterny, ovládají nastavení otevření nebo zavření, proto by měla být použita ovládací zařízení, aby se zabránilo nežádoucímu otevření nárazem. Vnější ventily (Obrázek 8.5H a 8.5K) a vyrovnávací potrubí (Obrázek 8.5G) ovládají vypouštění amoniaku. Těsnost ventilů by měla být kontrolována, aby se zabránilo úniku amoniaku během přepravy.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

**OBRÁZEK 8.5: VYBAVENÍ TYPICKÝCH ŽELEZNIČNÍCH CISTEREN PRO PŘEPRAVU AMONIAKU [32].****8.3.4 Bezpečnostní opatření**

Železniční přeprava amoniaku se neliší od žádné jiné přepravy stejné třídy nebezpečných látek. Železniční doprava je považována za bezpečný způsob přepravy. Mezi lety 1969 a 2002 bylo v Evropě zaznamenáno 228 nehod s amoniakem při výrobě, nakládce a přepravě a pouze 15 z nich se týkalo železniční dopravy [32]. Riziko spojené s železniční přepravou amoniaku je uvedeno v Tabulka 8.4 s kritérii úrovně rizika 10^{-6} .

TABULKA 8.4: RIZIKO SPOJENÉ S ŽELEZNIČNÍ PŘEPRAVOU AMONIAKU, DATA EXTRAHOVANÁ ZE STUDIE O MALAJSI [36].

Kritérium úrovně rizika pro veřejnost (za rok)	Vzdálenost účinku od středu železniční trati (m)		
	Rychlost vlaku 40 km/h	Rychlost vlaku 70 km/h	Rychlost vlaku 90 km/h
10^{-6}	480–600	700–870	880–950

Aby se předešlo jakémukoli selhání, jsou hlavní bezpečnostní opatření:

- 1) Splnění požadavků z předpisů týkajících se designu a konstrukce, jako je Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí (RID).
- 2) Provádět tlakové zkoušky při tlaku 26 bar u nádrží s tepelnou izolací a 29 bar u nádrží bez tepelné izolace [32].
- 3) Přeplnění může způsobit poruchu systému vytápění a chlazení v důsledku omezeného objemu plynu. Nesmí být překročen zákonem stanovený maximální limit plnění 0,53 kg amoniaku na litr [32].
- 4) Nádrže musí být zajištěny, aby se zabránilo jejich pohybu během přepravy, a teplotní podmínky by měly být sledovány, aby se zachovala stabilita amoniaku.
- 5) Železniční cisternové vozy musí být opatřeny správnými štítky s upozorněním na nebezpečí (viz Tabulka 8.2) a příslušnými identifikačními UN čísly.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

- 6) Nakládku, přepravu a vykládku by měl provádět proškolený personál s použitím specializovaného vybavení a za dodržení přísných protokolů, aby se zabránilo poškození a expozici [21].
- 7) Nakládka/vykládka by měla probíhat pouze v určených, dostatečně zabezpečených zónách [21].
- 8) Použití těsnění víka ventilu zabraňující úniku z tělesa ventilu a přetlakové zařízení zabraňující poruchám [21].

8.3.5 Legislativní omezení

Přeprava amoniaku je regulována jako přeprava nebezpečných látek s číslem UN 1005 a třídou 2. Železniční přeprava amoniaku je vhodná při splnění požadavků z předpisů týkajících se návrhu a konstrukce, jako je Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí (RID) [32]. Železniční přeprava amoniaku využívá hlavně cisternové vozy s objemem od 50 do 110 m³ [32, 36]. Vhodná pracovní teplota pro menší namáhání pláště je mezi -20 °C a +50 °C a provozní tlak je obecně mezi 5–14 bar s možností použití až do 26 bar díky své konstrukci a odolnosti [32]. Materiály kompatibilní s amoniakem jsou specifikovány v normě ISO 11114-1:2012+A1:2017 a musí být při každé pravidelné kontrole podle 6.8.2.4.2 podrobeny magneticko-práškové kontrole za účelem zjištění povrchových trhlin [33]. Pokud jsou splněny požadavky, neexistují žádné problémy a limitace s přepravou amoniaku, který je jednou z nepoužívanějších komodit na světě.

8.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika se v současné době podílí na obchodu s amoniakem se sousedními zeměmi, jako je Německo, Polsko a Slovensko [25]. Železniční přeprava nabízí výhody při dlouhých vzdálenostech, distribuci velkých objemů a je to proveditelné řešení díky rozsáhlé železniční síti v ČR. Vzhledem ke geografickým specifikům, průmyslové výrobní kapacitě a přepravním vzdálenostem je železniční doprava pro Českou republiku vhodná. Navíc jediný výrobce amoniaku v České republice, ORLEN Unipetrol, již využívá železniční dopravu obvykle s kapacitou 85 m³ a provozním tlakem 14 bar. To jasně dokazuje dostupnost železniční přepravy amoniaku v rámci České republiky.

8.3.7 Energetická náročnost

Přeprava amoniaku po železnici má v porovnání se silniční přepravou nižší energetické nároky. Železniční přeprava je také proveditelnější, pokud je k dispozici rozsáhlá železniční síť. V literatuře je pro přepravní vzdálenost 100 km uvedena spotřeba energie přibližně 0,95 kWh na MWh přepravovaného amoniaku, což odpovídá 0,00488 kWh na kg NH₃ a 0,028 kWh na kg H₂ přepraveného na stejnou vzdálenost [26].

Energetická náročnost přepravy souvisí především se spotřebou elektrické energie, jelikož elektrické sítě jsou v současnosti nejběžnějším zdrojem energie pro lokomotivy. Na základě reálných dopravních dat z elektrické lokomotivy Siemens Vectron jezdící v České republice se spotřeba energie s ohledem na rekuperaci energie může pohybovat kolem 1 700 kWh na 100 km. To odpovídá přibližně 0,0013 kWh na kg NH₃ a 0,007 kWh na kg H₂ přepraveného na stejnou vzdálenost (100 km). Tento výpočet ukazuje podstatně nižší spotřebu energie ve srovnání s hodnotami uváděnými

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

v literatuře, což může být způsobeno vyšší účinností elektrické lokomotivy oproti dieselové a odečtením rekuperace.

Železniční přeprava amoniaku cisternami nabízí velkokapacitní přepravu, typicky v rozmezí 50–110 m³ [32, 36]. Díky tomuto rozsahu kapacit a možnosti přepravy více cisteren najednou je železnice energeticky a nákladově efektivní možností pro velkoobjemovou nebo dálkovou přepravu amoniaku. Ve srovnání se silniční dopravou má však svá omezení, pokud jde o flexibilitu a aplikovatelnost [26].

8.3.8 Ekonomické aspekty

Železniční přeprava amoniaku zahrnuje použití speciálně navržených železničních cisteren pro bezpečnou přepravu na střední až dlouhé vzdálenosti, zejména pokud není možná přeprava po moři nebo potrubím. Tyto cisterny jsou vyrobeny z materiálů a bezpečnostních prvků, které chrání před toxickými a korozivními vlastnostmi amoniaku a zajišťují bezpečnou manipulaci během nakládky, přepravy a vykládky. Tyto cisterny jsou široce používány v Evropě a Spojených státech.

Z ekonomického hlediska musí být železniční vozy navrženy tak, aby splňovaly přísné bezpečnostní předpisy popsané v kapitole 8.3.4, což zvyšuje jak počáteční investiční, tak provozní náklady. Speciálně navržené cisternové vozy na přepravu amoniaku o objemu 85 m³ stojí přibližně 160 000 EUR za kus. Během přepravy amoniaku po železnici se neočekává odpařování a úniky, což má za následek zanedbatelné ztráty. Procesy nakládky a vykládky zahrnují složité systémy regulace teploty a tlaku, jako jsou chladicí a tlakové kompresory, pro bezpečný přenos kapalného čpavku mezi skladovacími nádržemi a železničními vozy. Tyto systémy jsou spojeny s investičními a provozními náklady. Kromě toho je pro přepravu nebezpečných materiálů vyžadováno pojištění a náklady bývají kvůli rizikům vysoké, což zvyšuje celkové náklady na železniční přepravu.

Železniční přeprava však dokáže najednou dopravit výrazně větší množství amoniaku ve srovnání se silniční přepravou, což snižuje náklady na jednotku při přepravě na delší vzdálenosti. Díky tomu je železnice obzvláště atraktivní pro velkoobjemové zásilky, zejména tam, kde nejsou k dispozici možnosti lodní nebo potrubní přepravy.

8.3.9 Ekologické aspekty

Amoniak je komoditní produkt vhodný pro železniční přepravu [33]. Jeho ekologický dopad během železniční přepravy vyplývá z potenciálních emisí, rizika nehod a provozních úniků během nakládky, přepravy a vykládky. Přestože je míra rizika železniční přepravy amoniaku obecně vyšší než u silniční přepravy, jak je vidět v příloze na Obrázek 8.15, následky nehody jsou obvykle menší. Železniční přeprava je proto obvykle bezpečným způsobem přepravy velkého množství amoniaku [32].

Amoniak je vysoce toxický a korozivní. Proto přísné předpisy (např. RID) upravují konstrukci a provoz železničních cisteren, aby se minimalizovala rizika, jako je korozní praskání v důsledku napětí a náhodné úniky [32]. Bezpečnostní opatření, která mají zabránit jakýmkoli incidentům a poruchám, jsou podrobně popsána v kapitole 8.3.4.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

Během železniční přepravy amoniaku může dojít k náhodným únikům, které mohou vést zejména k rozptýlení par a rozlití. Jak je patrné z Obrázek 8.15, 42 % železničních nehod vede k rozptýlení par a 29 % k rozlití [38]. To způsobuje kontaminaci životního prostředí a rizika pro lidské zdraví i ekosystémy.

Ekologické dopady jsou způsobeny také emisemi vznikajícími v dopravním procesu a energetické síti. V Evropské unii je železniční doprava zodpovědná za přibližně 0,5 % celkových emisí v odvětví dopravy [29]. Emisní náročnost dopravy závisí především na emisích lokomotivy, které jsou v dnešní době určeny především spotřebou elektřiny. V případě využívání elektřiny ze sítě bez certifikátů má elektřina v České republice emisní stopu 340 g CO₂/kWh dle statistik MPO za rok 2024 [39] a 477 g CO₂/kWh dle evropské legislativy pro výpočet úspor emisí, která vychází z dat z roku 2020 a zohledňuje i nepřímé emise [40]. To odpovídá 0,6 g CO₂ na kg NH₃, respektive 3,4 g CO₂ na kg H₂ přepraveného na vzdálenost 100 km.

8.3.10 Normy, oborové předpisy

RID – Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí.

ČSN EN ISO 11114-1 – Lahve na plyny – Kompatibilita materiálů lahve a ventilu s plyným obsahem – Část 1: Kovové materiály.

EFMA – Evropská asociace výrobců hnojiv.

49 CFR 173 – Hlava 49, Kodex federálních předpisů, Část 173 – Odesílatelé – Obecné požadavky na zásilky a obaly.

TDG – Předpisy Kanady pro přepravu nebezpečného zboží.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.4 Lodní přeprava

8.4.1 Vhodnost přepravy

Amoniak je díky zavedeným manipulačním metodám a infrastruktuře vhodný pro lodní přepravu. Lze jej přepravovat třemi hlavními typy plavidel v závislosti na skladovacích podmínkách: plně chlazený (1 bar při $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), částečně chlazený (4–8 bar při $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) a tlakový (17 bar při až $45\text{ }^{\circ}\text{C}$) [41]. Možnost skladovat amoniak ve stlačeném nebo chlazeném stavu z něj činí konkurenceschopnou variantu díky kapalnému stavu. Náklady na přepravu amoniaku po moři mohou být nižší než 0,12 EUR/t NH_3 , což je nižší než náklady na přepravu kapalného vodíku po moři, jak je zobrazeno na Obrázek 8.1.

Lodě ročně přepraví 18 až 20 milionů tun amoniaku a v provozu je přibližně 170 lodí pro přepravu amoniaku [42]. Infrastruktura pro námořní přepravu amoniaku je proto vysoce rozvinutá a mezinárodní přepravní trasy jsou dobře zavedené.

8.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Tyto hodnotící skupiny úrovně technologické připravenosti (TRL) jsou rozděleny do 9 TRL a 4 fází vývoje technologií: základní výzkum, výzkum a vývoj, pilotní a demonstrační a brzké přijetí do běžného komerčního využití [16]. Během hodnocení TRL se zkoumají koncepty programu, technologické požadavky a prokázané technické schopnosti. Principy a popisy hodnocení TRL jsou uvedeny v příloze v Tabulka 8.14.

Technologická připravenost pro přepravu amoniaku se výrazně zlepšila. Značného pokroku bylo dosaženo v oblastech, jako je manipulace s palivem, skladování a pohonné technologie. Nicméně je zapotřebí další úsilí o zlepšení bezpečnostních protokolů a výcviku posádek, aby bylo možné efektivně zvládat specifická rizika spojená s amoniakem [43].



OBRAZEK 8.6: INFRASTRUKTURA PRO PŘEPRUVU AMONIAKU V CELÉM SVĚTĚ [42].

Nizozemsko je nejaktivnější zemí v Evropě, pokud jde o dovoz a vývoz amoniaku. Podle obchodních údajů Nizozemska za rok 2024 činil dovoz bezvodého amoniaku z Alžírsko 55 242 t, což představuje přibližně 44,6 % podílu na celkovém dovozu, a ze Spojených států 25 637 t, což představuje 20,7 % celkového objemu dovozu [44]. Tato data zdůrazňují využívání lodní přepravy pro dopravu amoniaku

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

po moři s TRL 9. Pro demonstraci tohoto stavu zobrazuje Obrázek 8.6 celosvětová zařízení pro nakládku a vykládku amoniaku a zdůrazňuje stávající infrastrukturu pro přepravu amoniaku.

8.4.3 Popis druhu přepravy

Amoniak se přepravuje ve velkém množství specializovanými přepravci. Může být přepravován tankery nebo říčními čluny na amoniak, které jsou navrženy v závislosti na skladovacích podmínkách: plně chlazené „typ A“ (1 bar při -50 °C), částečně chlazené „typ B“ (4–8 bar při -10 °C) a tlakové „typ C“ (17 bar při až 45 °C) [41].

Nádrže typu A jsou samonosné nádrže, obvykle vyrobené z plochých povrchů a tvarované tak, aby maximalizovaly prostor dostupný pro náklad (Obrázek 8.7c). Přestože existuje mnoho konstrukčních řešení, hranolové nádrže mohou umožnit až o 40 % více prostoru pro náklad. Vhodné materiálové charakteristiky jsou podrobně popsány v Mezinárodním předpisu o stavbě a vybavení lodí přepravujících zkapalněné plyny hromadně (předpis IGC). Sekundární bariéra je v některých případech vyžadována, kdy je pravděpodobnost strukturálních poruch a úniků přes primární bariéru [12]. Požadavky na sekundární bariéru ve vztahu k typům nádrží jsou uvedeny v Tabulka 8.5.

TABULKA 8.5: POŽADAVEK NA SEKUNDÁRNÍ BARIÉRU VE VZTAHU K TYPŮM NÁDRŽÍ [12].

Typ nádrže	Teplota nákladu při atmosférickém tlaku		
	-10 °C a více	-10 °C až -55 °C	Pod -55 °C
Základní typ nádrže	Není nutná žádná sekundární bariéra	Trup může fungovat jako sekundární bariéra	V případě potřeby oddělte sekundární bariéru
Typ A		Úplná sekundární bariéra	
Typ B		Částečná sekundární bariéra	
Typ C		Sekundární bariéra není vyžadována	

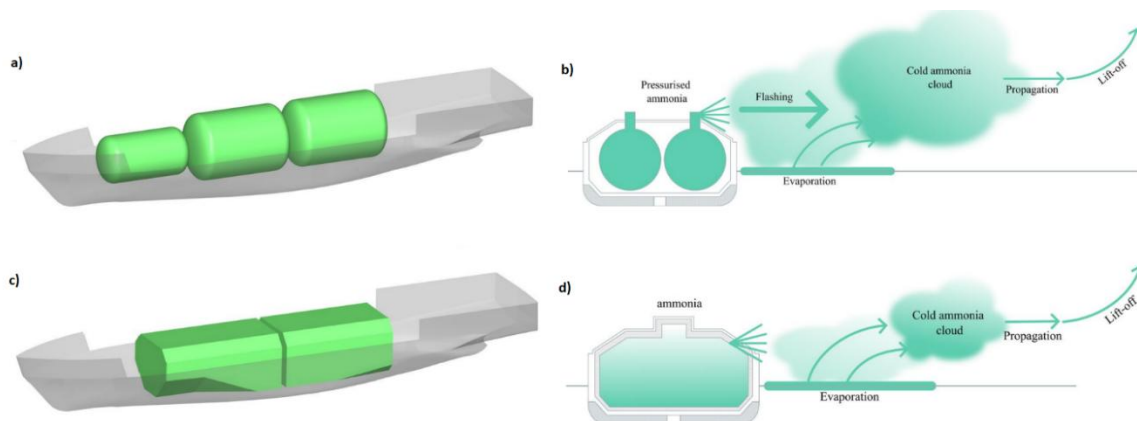
Využití nádrže typu A o celkové délce 26,5 m nabízí lepší prostorovou efektivitu než nádrže typu C o délce 33,4 m. U nádrže typu A je také lepší viditelnost z můstku. Zatímco výška 6,68 m pro nádrže typu A je od základní linie dostatečná, u nádrže typu C se vyžaduje výška 8,1 m. Kromě toho lze při použití nádrže typu A splnit požadavky na stabilitu a odolnost za všech relevantních podmínek zatížení [45].

Zpočátku se vzhledem k malé nákladové kapacitě předpokládalo, že amoniak bude přepravován pod tlakem ve válcových nádržích typu C (Obrázek 8.7a). Konstrukce těchto nádrží je však problematická. Protože průměr válcových nádrží byl omezen předpisem IGC z roku 2014, a tudíž mohou být nutné úpravy trupu některých lodí. Pro dosažení požadovaného objemu nákladu s těmito omezeními průměru by musely být nádrže delší, což by zmenšilo prostor dostupný pro přední a zadní strojovny. To by mohlo způsobit problémy se stabilitou, takže byla přehodnocena zvolená metoda zkapalňování [45].

Vzhledem k toxicitě amoniaku je bezpečnost hlavním faktorem při výběru metody zkapalňování. Náhodné úniky by mohly mít vážné následky a potenciálně vést k velkému počtu obětí. Způsob,

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

jakým se amoniak v případě úniku šíří, závisí na metodě zkapalňování (Obrázek 8.7b a Obrázek 8.7d). Pokud dojde k úniku chlazeného amoniaku, vytvoří se v důsledku rozdílu hustoty mezi amoniakem a vzduchem oblak plynu. Tento oblak se nakonec ohřeje na okolní teplotu a stoupá nahoru. Tento proces trvá déle, pokud je amoniak skladován pod tlakem [45].



OBRÁZEK 8.7: POŽADAVKY NA PROSTOR A ŠÍŘENÍ AMONIAKU V PŘÍPADĚ ÚNIKU PRO A-B) TLAKOVÉ AMONIAKOVÉ NÁDRŽE „TYPU C“ A C-D) CHLAZENÉ AMONIAKOVÉ NÁDRŽE „TYPU A“ [45].

Lodě s polochlazenými nádržemi „typu B“, tlakové v kombinaci s chlazením, mohou přepravit až 11 535 t NH_3 , zatímco lodě s plně chlazenými nádržemi „typu A“ mohou přepravit přibližně 50 000 t. Pro přepravu amoniaku se obvykle používají lodě s kapacitou v rozmezí 23 000–40 200 t, zatímco pro přepravu LPG se obvykle používají lodě s větší kapacitou [46]. Lodě s tlakovými nádržemi „typu C“ mají obvykle nejnížší kapacitu [47]. Lodě s menší kapacitou, než je běžný rozsah, se používají hlavně pro místní, přímořskou a krátkou přepravu LPG a amoniaku [48]. Říční čluny na přepravu amoniaku mohou mít nosnost 400 až 2 500 t NH_3 a většinou využívají chlazené nádrže, ale některé mají i tlakové nádrže [46]. Tyto čluny na přepravu amoniaku jsou vhodné pro použití na úzkých a mělkých vnitrozemských vodních cestách v Evropě a Spojených státech [31].

Většinu globálního obchodu s amoniakem zajišťují velké tankery na přepravu plynu (LGC) a střední tankery na přepravu plynu (MGC), přičemž i některé tankery typu velmi velké tankery na přepravu plynu (VLGC) jsou stavěny nebo modernizovány tak, aby byly připraveny na amoniak. Loď velikosti VLGC má kapacitu přepravit přibližně 66 200 t amoniaku, zatímco LGC a MGC mohou přepravit přibližně 40 200 t, respektive 23 000 t amoniaku [48, 49]. VLGC se používají především na trase mezi Austrálií a Japonskem. Na této trase může jeden VLGC dosáhnout roční přepravní kapacity přibližně 800 000 t amoniaku [49].

8.4.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava amoniaku po moři vyžaduje přísná bezpečnostní opatření kvůli vysoké toxicitě, hořlavosti a chemické reaktivitě amoniaku. Pro bezpečnost je nejzásadnější dodržovat pravidla daná Mezinárodním předpisem pro námořní přepravu nebezpečných věcí (IMDG) a Mezinárodním předpisem o stavbě a vybavení lodí přepravujících zkapalněné plyny hromadně (předpis IGC) v rámci Mezinárodní námořní organizace (IMO) [12], Evropskou dohodou o mezinárodní přepravě

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách (ADN) podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/68/ES [50] a dalších platných směrnic pro bezpečnostní rámce pro efektivní řízení rizik.

Aby se předešlo jakémukoli selhání, jsou hlavní bezpečnostní opatření:

- 1) Splnění požadavků předpisů týkajících se návrhu a konstrukce, např. z předpisu IGC [12].
- 2) Zákaz kontaktu slitin mědi s amoniakem [28].
- 3) Návrh a kontrola izolace pro skladovací podmínky u tankerů nebo říčních člunů, které jsou plně chlazené, „typ A“ (1 bar při -50 °C), částečně chlazené, „typ B“ (4–8 bar při -10 °C) a plně přetlakové „typ C“ (17 bar při 45 °C) [41].
- 4) Přeplnění může způsobit poruchu systému vytápění a chlazení v důsledku omezeného objemu plynu. Nesmí být překročen zákonem stanovený maximální limit plnění 0,53 kg amoniaku na litr [32].
- 5) Je nezbytné využívat systémy pro detekci úniku amoniaku s plynovými alarmy a automatickými uzavíracími ventily [45, 51].
- 6) V případě úniku amoniaku během přepravy dodržovat nouzové postupy, jako je větrání a bezpečné vypuštění amoniaku, které jsou podrobně popsány v dokumentu Nouzové postupy pro lodě přepravující nebezpečné zboží (EmS).
- 7) Mechanické větrání v uzavřených prostorech [28].
- 8) Pro zvládnutí odpařování v důsledku zvýšení teploty v plně chlazené nádrži během přepravy, které způsobuje hromadění plynu a zvyšování tlaku, jsou nezbytné systémy pro monitorování a regulaci tlaku [28].
- 9) Chlazený amoniak smí být naplněn pouze do 82 % objemu nádrže, aby se umožnila tepelná roztažnost a udržel bezpečný tlak v nádrži v souladu s přepravními normami DOT [52].
- 10) Chlazený amoniak musí být označen slovy „Bezvodý amoniak, nebezpečí vdechnutí“ a zkratkou NQT (není určeno pro kalené a temperované ocelové přívěsy), aby splňoval přepravní normy DOT pro bezvodý amoniak (< 0,2 % vody) [52].
- 11) Během přepravy je únik o hmotnosti 100 liber (přibližně 45 kg) nebo více únikem podléhajícím hlášení podle § 311(b)(4) zákona CERCLA [52].
- 12) Posádka musí být proškolená v oblasti nebezpečí spojených s amoniakem, plánů pro reakci na mimořádné události a používání osobních ochranných prostředků z důvodu rizik pro personál na palubě, jako je vystavení toxickému amoniaku (na kůži, v očích a při vdechnutí) a riziku požáru [51].
- 13) Procesy nakládky, vykládky a dodávky by měly být prováděny proškoleným personálem s použitím specializovaného vybavení a za dodržování přísných protokolů, aby se předešlo jakýmkoli incidentům [28].

8.4.5 Legislativní omezení

Přeprava amoniaku je regulována jak mezinárodními, tak národními rámci. Například americké předpisy (46 CFR 151.50-32) specifikují stavební materiály, větrání, uzemnění a provozní postupy pro nádrže s bezvodým amoniakem na lodích [53]. Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečného zboží po moři (IMDG) a Mezinárodní předpis o stavbě a vybavení lodí přepravujících zkapalněné

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

plyny hromadně (předpis IGC) podle Mezinárodní námořní organizace (IMO) [12] a Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách (ADN) podle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/68/ES [50] rovněž upravují návrh, infrastrukturu a přepravu amoniaku. Tyto předpisy jsou neustále aktualizovány, aby řešily vznikající rizika a technologický vývoj v přepravě amoniaku. Vzhledem k toxicitě amoniaku je nezbytné dodržovat všechny legislativní a bezpečnostní předpisy. Amoniak však lze přepravovat, pokud jsou tyto předpisy dodržovány.

8.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika nemá přímý přístup k moři, takže přeprava amoniaku zůstává pro český průmysl relevantní prostřednictvím dovozních terminálů v sousedních zemích a následnou přepravu po silnici, železnici nebo potrubím. Vybudovaná infrastruktura pro manipulaci s amoniakem v evropských přístavech podporuje její použitelnost pro český energetický a chemický sektor, zejména s tím, jak regiony směřují k dekarbonizaci a alternativním palivům. Pro využití amoniaku ve vodíkové mobilitě by bylo potřeba vybudovat jednotky na rozklad amoniaku.

8.4.7 Energetická náročnost

Přeprava amoniaku po moři vyžaduje relativně málo energie. Amoniak má vyšší energetickou hustotu než vodík (Tabulka 8.1), což snižuje relativní energetické náklady na přepravu. Energie potřebná pro chlazení (až do $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo tlakování (až do 17 bar) je značná, ale se současnou lodní technologií zvládnutelná [41].

V literatuře je pro přepravní vzdálenost 100 km uváděna spotřeba energie přibližně 0,25 kWh na MWh přepraveného amoniaku a dalších 0,85 kWh je potřeba v terminálech pro nakládku a vykládku, což odpovídá 0,0057 kWh na kg NH_3 , respektive 0,0321 kWh na kg H_2 přepraveného na stejnou vzdálenost [26].

Energetická náročnost námořní dopravy souvisí se spotřebou paliva, jako je lodní motorová nafta nebo těžký topný olej, které jsou v současnosti nejběžnějším zdrojem energie pro lodě. Na základě průměrné spotřeby paliva 2,5 t se spotřeba energie odhaduje na 28 500 kWh na 100 km. Nakládka a vykládka amoniaku v terminálu navíc vyžaduje značnou energii. Vzhledem k nosnosti 23 000 t pro tanker MGC to odpovídá přibližně 0,0056 kWh na kg přepraveného NH_3 , respektive 0,031 kWh na kg přepraveného H_2 na 100 km, včetně dodatečné energie potřebné pro nakládku a vykládku v terminálu. Tento výpočet ukazuje téměř stejnou spotřebu energie ve srovnání s hodnotami uváděnými v literatuře.

Přeprava amoniaku po moři nabízí velkokapacitní přepravu, typicky v rozmezí od 23 000 do 40 200 t a případně až 66 200 t [48, 49]. Díky tomuto rozsahu kapacit je lodní přeprava energeticky a nákladově efektivní možností pro velkoobjemovou nebo dálkovou přepravu amoniaku.

8.4.8 Ekonomické aspekty

Amoniak si vybudoval globální trh a díky infrastruktuře je cenově konkurenceschopnou možností pro velkoobjemovou přepravu. Rostoucí počet plavidel a terminálů připravených na amoniak

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

naznačuje rostoucí investice a menší omezení. Přetrvávají však nejistoty ohledně dostupnosti paliva, přístavní infrastruktury a dlouhodobých regulačních nákladů [48, 49].

Jak je uvedeno v kapitole 8.4.3, LGC i MGC jsou plně chladírenské lodě. MGC jsou ekonomičtější (EUR/t) na kratší vzdálenosti, zatímco LGC jsou ekonomičtější na delší vzdálenosti, jak je podrobně popsáno v Tabulka 8.6 [48].

TABULKA 8.6: TYPICKÉ PARAMETRY MGC A LGC [48].

	MGC	LGC
Kapacita (t)	23 000	40 200
Pronájem lodě (EUR/den) ^a	24 035	33 048
Cena paliva (EUR/t) ^b	442	442
Rychlost nakládky (t/h)	1 814	2 730
Rychlost lodi (km/h)	27,8	29,9
Celková délka (m)	174	200
Ponor (m)	8,2	9,4

^a Odhadované hodnoty, ^b Obchodní trh.

Náklady na přepravu amoniaku jsou ovlivněny řadou faktorů, jak je uvedeno v Tabulka 8.6, včetně kapacity nákladu, ceny paliva, dostupnosti lodi, nákladů souvisejících s terminálem (čas strávený v přístavu a přístavní operace – nakládka, příjem, skladování a překládka) a nákladů na posádku. Dynamika trhu v sektoru LPG může navíc ovlivnit náklady na přepravu amoniaku, protože LPG soutěží o využití podobných plavidel. K celkovým nákladům přispívají také regulační požadavky na manipulaci s amoniakem jako nebezpečným materiálem, spolu s poplatky za skladování. Pro přepravu nebezpečných materiálů je navíc vyžadováno pojištění a náklady bývají kvůli rizikům vysoké, což zvyšuje celkové náklady na lodní přepravu. Během přepravy amoniaku po moři se neočekává odpařování a únik, což má za následek zanedbatelné ztráty.

8.4.9 Ekologické aspekty

Amoniak je komoditní produkt vhodný pro přepravu po moři s rozsáhlou přepravní infrastrukturou po celém světě (viz Obrázek 8.6). Jeho ekologický dopad během lodní přepravy vyplývá z potenciálních emisí, rizika nehod a provozních úniků během nakládky, přepravy a vykládky. Riziko nehody při přepravě amoniaku po moři je výrazně nižší než u jiných způsobů přepravy, jak je patrné z Obrázek 8.15 v příloze, což z ní činí typicky bezpečnou metodu přepravy velkého množství amoniaku. Nehody při přepravě po moři vedou primárně k rozptýlu par (72,73 %), úniku (9,09 %) nebo k úniku i rozptýlu par (18,18 %) [38]. Úniky se sebou nesou rizika jak pro lidské zdraví, tak pro ekosystémy.

Amoniak je vysoce toxická a korozivní nebezpečná látka. Proto přísné předpisy od Mezinárodní námořní organizace (IMO) a dalších upravují směrnice a bezpečnostní rámce pro efektivní řízení potenciálních rizik [12]. Bezpečnostní opatření, která mají zabránit jakýmkoli incidentům a selháním, jsou podrobně popsána v kapitole 8.4.4.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

Ekologické dopady jsou navíc způsobeny také emisemi vznikajícími při samotném dopravním procesu. V Evropské unii je námořní doprava zodpovědná za přibližně 12,8 % celkových emisí v dopravním sektoru [29]. Přeprava amoniaku po moři proto představuje slibnou příležitost pro dekarbonizaci dopravy. Tento sektor využívá řadu paliv včetně těžkých olejů s vysokými emisemi CO₂ (3,1 t CO₂/t), SO₂ a sazí. Průměrná spotřeba paliva se může pohybovat kolem 2–3 t na 100 km. Při běžném rozsahu přepravovaného množství však tyto emise činí pouze asi 0,3 g CO₂ na kg NH₃, respektive 1,8 g CO₂ na kg H₂ přepraveného na vzdálenost 100 km.

8.4.10 Normy, oborové předpisy

2014 IGC Code – Mezinárodní předpis o stavbě a vybavení lodí přepravujících zkapalněné plyny hromadně.

IMDG – Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečného zboží po moři.

ADN – Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách.

SOLAS – Mezinárodní úmluva o bezpečnosti lidského života na moři.

MARPOL – Mezinárodní úmluva o zabránění znečištění z lodí.

46 CFR 151.50-32 – Hlava 46, Kodex federálních předpisů, část 151.50-32 – Bezvodý amoniak.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.5 Potrubní přeprava

8.5.1 Vhodnost přepravy

Přeprava velkých objemů kapalného amoniaku potrubím je obecně ekonomičtější než přeprava po silnici nebo železnici. Celosvětově existuje asi 7 600 km potrubí na amoniak, z nichž mnohé jsou v provozu již více než padesát let [4]. Spojené státy, Rusko a Ukrajina mají dobře zavedené potrubní sítě pro přepravu amoniaku [54]. Zejména mezi Ruskem a Ukrajinou vede nejdelší potrubí na světě o délce 2 424 km, které je schopné přepravit až 2,5 milionu t amoniaku ročně [31]. Navzdory tomu Evropa v současné době nemá žádné dálkové potrubní systémy na amoniak [32]. V Evropě se typicky využívá potrubí na amoniak v průmyslových oblastech v délce 1–12 km, ačkoli delší potrubí o délce 74 km se nachází např. v Itálii [42].

Většina stávajících potrubí na amoniak na celém světě byla postavena před rokem 2000, což vedlo k významným rozdílům v konstrukci a infrastruktuře. Potrubní přeprava amoniaku je vhodná při splnění požadavků předpisů týkajících se jejich konstrukce. V Evropě se na konstrukci potrubí na amoniak vztahuje Evropská směrnice o tlakových zařízeních, ačkoli se jedná o obecnou směrnici pro tlakové systémy. Ve Spojených státech jsou konstrukční požadavky na přepravu nebezpečných kapalin potrubím popsány v 49 CFR 195 [54]. Potrubní přeprava amoniaku je považována za bezpečný typ přepravy velkého množství amoniaku. Dosud bylo hlášeno pouze jedenáct incidentů, z nichž žádný neměl katastrofální následky [4].

8.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Tyto hodnotící skupiny úrovně technologické připravenosti (TRL) jsou rozděleny do 9 TRL a 4 fází vývoje technologií: základní výzkum, výzkum a vývoj, pilotní a demonstrační a brzké přijetí do běžného komerčního využití [16]. Během hodnocení TRL se zkoumají koncepty programu, technologické požadavky a prokázané technické schopnosti. Principy a popisy hodnocení TRL jsou uvedeny v příloze v Tabulka 8.14.

Potrubní přeprava amoniaku je na úrovni TRL 9 pro již zavedené průmyslové využití a infrastrukturu. Nová rozsáhlá síť potrubí pro obnovitelný amoniak se navrhuje a vyhodnocuje, ale základní technologie je již osvědčená. Amoniak se přepravuje potrubím již více než padesát let [4]. Ačkoli Evropa čelí omezením v dálkové přepravě amoniaku kvůli své potrubní síti, mnoho evropských zemí provozuje nadzemní nebo podzemní potrubní systémy pro kapalný amoniak, jak je podrobně uvedeno v Tabulka 8.7.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 8.7: POTRUBÍ PRO KAPALNÝ AMONIAK V EVROPĚ [32].

Lokalita	Distribuční funkce	Nadzemní/podzemní	Délka (km)	Provozní tlak (bar)	Provozní teplota (°C)	Průměr (mm)	Kapacita (t/den)
Belgie							
Potrubí 1	Zákazníkům na místě	Nadzemní	10	22	10–15	100 a 150	3 100
Potrubí 2	Externímu zákazníkovi	Podzemní	12	22	10–15	100 a 150	3 100
Německo							
Potrubí 1	Zákazníkům na místě	Nadzemní	24	21	5–40	50–200	2 600
Potrubí 2	Z přístavu do skladu	Nadzemní	2,8	11	5–40	150	1 900
Potrubí 3	Externímu zákazníkovi	Podzemní	12	10–15	1–5	275	3 600
Itálie							
Potrubí 1	Externímu zákazníkovi	Podzemní	74	17	10	200	900
Nizozemsko							
Potrubí 1	Zákazníkům na místě	Nadzemní	5,8	16	5	100–200	3 000
Potrubí 2	Z přístavu do skladu	Nadzemní	1,0	10	-32	80	1 000
Polsko							
Potrubí 1	Z výroby do skladu	Nadzemní	1,2	10–15	-30	200	1 500
Potrubí 2	Ze skladu do jednotky	Nadzemní	1,5	13	-7 až 0	75, 100, 150	120
Potrubí 3	Ze skladu do přístavu	Nadzemní	6,0	8–13	-33 až -15	350	14 000
Potrubí 4	Ze skladu do přístavu	Nadzemní	5,9	8–13	-33 až -15	100	600
Potrubí 5	Z výroby do skladu	Nadzemní	1,2	5–22	-5	150	1,680
Portugal – sko							
Potrubí 1	Z výroby do přístavu	Nadzemní	1,9	13	-30	100	900
Španělsko							
Potrubí 1	Externímu zákazníkovi	65 % podz.	10	14,5	13	150 a 350	860
Potrubí 2	Z přístavu do tanku	95 % nadz.	1,5	3,5–4,5	-33	300	10 000
Potrubí 3	Z přístavu do tanku	90 % podz.	2,4	6	-33	300	12 000
Potrubí 4	Z tanku do jednotky	Nadzemní	4,2	15–18	8–15	100	390
UK							
Potrubí 1	Z přístavu do skladu	Nadzemní	8,8	30	-32	100 a 150	240
Potrubí 2	Z přístavu do jednotky	Nadzemní	6,9	21	-33 až +25	150	1 440
Potrubí 3	Z výroby do přístavu	Nadzemní	6,8	21	-28	150	1 440
Potrubí 4	Externímu zákazníkovi	Nadzemní	2,2	14	-29 až okolní	100	290
Potrubí 5	Externímu zákazníkovi	Nadzemní	1,6	14	-29 až okolní	100	240
Potrubí 6	Z přístavu do skladu	Nadzemní	2,0	2–5	-32	300	12 000
Potrubí 7	Z přístavu do skladu	Nadzemní	2,0	2–5	-32	75	600

Pozn.: Uvedená délka potrubí 1 km nebo více.

Následující potrubí jsou v současné době mimo provoz:

- Z Carling (Francie) do Besche (Německo), poprvé uvedeno do provozu v polovině minulého století.
- Z Mostu do Lovosic (Česká republika), poprvé uvedeno do provozu počátkem 60. let 20. století.
- Z Cabo Ruivo do Alvercy (Portugalsko), poprvé uvedeno do provozu v roce 1960. Z Grand Quevilly do Oisselu (Francie), poprvé uvedeno do provozu v roce 1967.

8.5.3 Popis druhu přepravy

Amoniak se skladuje a přepravuje v kapalném stavu, protože kapalný amoniak má vyšší hustotu než plynný amoniak. Kapalný amoniak se pro přepravu natlakuje na více než 10 bar při teplotě 25 °C. Krátká potrubí mohou být provozována při nižších tlacích, pokud teplota zůstává nad nulou [55]. Konstrukční požadavky na přepravu nebezpečných kapalin a tlakových systémů potrubím jsou popsány v 49 CFR 195 a v Evropské směrnici pro tlaková zařízení [54]. Typické kapacity potrubí se pohybují od 120 do 14 000 t amoniaku za den. Na Středo západě USA se ročně přepraví přibližně 1,5 mil. t amoniaku ve 3 220 km potrubí o průměrech 0,15 m až 0,41 m [56].

Podle statistiky poruch potrubí se ukázalo, že v chemických potrubích s tloušťkou stěny větší než 15 mm nedošlo k žádnému externímu narušení ani nehodám. Do návrhu tloušťky stěny se obvykle

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

započítává korozní tolerance 1 mm. Hlavní koroze je tvorba trhlin na potrubí v důsledku korozního praskání pod vlivem napětí, ke kterému dochází v přítomnosti vody. Koncentrace vody je proto omezena na 0,2 obj. %, aby se zabránilo korozi [4, 55]. I když se konstrukce potrubí mohou lišit, pro potrubí o průměru 20" (DN500) je běžný osvědčený návrhový tlak 50 bar (viz Tabulka 8.8). Ačkoli jsou vyšší návrhové tlaky technicky proveditelné, nejsou standardní praxí. Pro doporučenou velikost potrubí jsou obvykle potřeba tři mezilehlé čerpací stanice na 550 km. Optimalizace průměru potrubí však může snížit potřebu těchto čerpacích stanic, např. použitím trubek o průměru 18" (DN450) nebo 32" (DN810) [55].

TABULKA 8.8: HYDRAULICKÝ NÁVRH POTRUBÍ NA AMONIAK S DÉLKOU 550 KM PRO TŘI PŘÍPADY [55].

Případ	Průměr potrubí (mm)	Návrhový tlak (bar)	Tloušťka stěny (mm)	Počet mezilehlých čerpacích stanic	Popis
Základní	500	50	15	3	Doporučený a osvědčený návrh potrubí
Alternativní	450	100	19	2	Možný návrh potrubí
Referenční	810	50	15	0	Návrh potrubí pro přímý přenos

Pozn.: Hydraulický návrh je založen na hmotnostním průtoku kapalného (bezvodého) amoniaku 222 kg/s.

Protože amoniak je vysoce korozivní pro měď a zinek, je třeba se vyhnout materiálům obsahujícím tyto prvky. Dosažení potřebné odolnosti je obecně snazší u ocelí nižší jakosti, které mají kontrolované horní meze mezí kluzu a pevnosti v tahu. V důsledku toho se pro potrubí na amoniak běžně používá nízkolegovaná uhlíková ocel. V Itálii a Polsku se v provozních potrubích používá API 5L X52N (L360N). V jiných částech Evropy, jako je Nizozemsko, Španělsko a Portugalsko, se často používá ASTM A333 třídy 6. Ve Spojených státech byly typickými materiálovými specifikacemi pro potrubí na amoniak ASTM A53 třídy B nebo ASTM A106 třídy B nebo C [55].

Pro identifikaci a správu potrubí jsou nezbytné značky a výstražné cedule, zejména tam, kde potrubí prochází veřejnou oblastí. Nadzemní potrubí pro přepravu amoniaku na místě je obvykle opatřeno nálepkami, které uvádějí např. název produktu a směr toku a volitelně symbol nebezpečí a telefonní číslo pro případ nouze na místě (viz Obrázek 8.8).



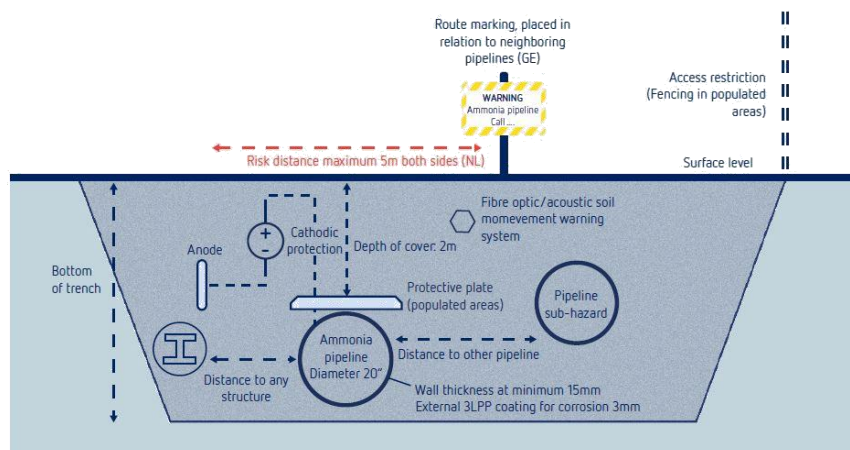
OBRÁZEK 8.8: ZNAČKA ČÁRY NA NADZEMNÍM POTRUBÍ NA AMONIAK [54].

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

Nadzemní potrubí se umísťuje ve veřejně přístupných prostorách. Obvykle jsou označena nálepkami s názvem produktu, jménem provozovatele a telefonním číslem pro případ nouze. Podzemní potrubí se také umísťuje ve veřejně přístupných prostorách. Jejich liniové značky uvádějí číslo sloupu, název produktu, jméno provozovatele a telefonní číslo pro případ nouze. Tyto informace pomáhají usnadnit dohledatelnost potrubí a snižují riziko náhodného poškození zemědělskou činností nebo výkopovými stroji [54].

Podzemní potrubí na amoniak (viz Obrázek 8.9), může být ovlivněno vnější korozí způsobenou kombinací vody, kyslíku a bakterií přítomných v půdě. Aby se tomu zabránilo, potrubí vyžaduje vnější nátěr, nejlépe o celkové tloušťce 3 mm. Vhodným nátěrovým materiálem je třívrstvý polypropylenový systém, který se skládá z epoxidového základního nátěru spojeného tavením, kopolymerní adhezivní mezivrstvy a vnější polypropylenové vrstvy [55]. V EU je dostatečná hloubka pro uložení podzemního potrubí 1,5 m. Pokud se potrubí nachází v blízkosti zdroje podzemní vody, je nutné přijmout další opatření.

Nejnižší možná teplota kapalného amoniaku je jeho atmosférický bod varu $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$. Propláchnutí potrubí inertním plynem, jako je dusík, může snížit teplotu uvnitř potrubí až na $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je rozsah, pro který nemusí být potrubí navrženo. K tomuto extrémnímu ochlazení dochází v důsledku potřebného odpařovacího tepla. Veškerý kapalný amoniak unikající během tohoto procesu by měl být odveden na vhodné místo, např. do skladovací nádrže [54].



OBRAZEK 8.9: SCHÉMA PODZEMNÍHO POTRUBÍ PRO PŘEPRAVU AMONIAKU [55].

8.5.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnostní opatření týkající se amoniaku jsou důležitá pro prevenci nehod. V Tabulka 8.9 jsou uvedeny důvody nehod během přepravy potrubím. Uvolněný amoniak do atmosféry po nehodě způsobuje problémy se zdravím lidí a zvířat, kontaminaci zemědělské vody a zásob pitné vody [54]. Dosud bylo hlášeno jedenáct nehod, z nichž žádná nevedla ke katastrofální tragédii [4].

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 8.9: ANALÝZA INCIDENTŮ V POTRUBÍ NA AMONIAK S PŘÍČINAMI V EVROPĚ [54].

Příčina incidentu	Procento (%) všech incidentů	Důvody
Externí zásah	49,8	Kopání, pilotování, zemní práce, kotvení, buldozer, bagr, pluh, ochranné pouzdro
Konstrukční vady / selhání materiálu	16,7	-
Koroze	15,1	-
Pohyb země	7,1	Protržení hráze, eroze, záplava, sesuv půdy, těžba, řeka
Navrtání potrubí omylem	4,6	-
Jiné a neznámé	6,7	Chyba v návrhu, blesk, údržba

Pokud jde o bezpečnost přepravy amoniaku potrubím po Evropě, Nizozemsko a Německo jsou hlavními přispěvateli, přičemž každý z nich uplatňuje odlišné regulační přístupy. Nizozemsko uplatňuje přístup založený na riziku a zaměřuje se na posuzování a řízení rizik s cílem umožnit bezpečnou přepravu. Naproti tomu Německo při tvorbě svých právních rámců klade důraz na předcházení rizikům a snaží se předcházet nebezpečím prostřednictvím přísných předpisů.

Aby se zabránilo jakémukoli selhání, obecná opatření ke snížení rizik jsou:

- 1) Značky pro identifikaci a sledování potrubí [54].
- 2) Povrchová úprava a izolace pro zabránění vnější koroze a použití katodické ochrany [55].
- 3) Izolace ventilů, a tím minimalizace následků v případě nehody vedoucí k oblaku plynu [54].
- 4) Poloha (otevřeno nebo zavřeno) uzavíracích ventilů; kontrola provozních systémů, jako je kontrola tlaku v příslušných dusíkových lahvích, stav ostatního vybavení, stav stanic nebo krytů, v nichž jsou uzavírací ventily umístěny [54].
- 5) Vyhýbání vedení potrubí městskými a zemědělskými oblastmi nebo kopání hlubších zákopů [55].
- 6) Fyzické bariéry, jako jsou ploty atd., pokud nebrání zemědělství nebo jinému využívání půdy [55].
- 7) Správný návrh potrubí pro přepravu amoniaku [55].
- 8) Pro provoz by měly být provedeny tlakové zkoušky [32].
- 9) Kontrola stavu podpěr potrubí a dalších zranitelných částí [54].
- 10) Pravidelné sledování stavu potrubí pomocí rentgenu [55].
- 11) Kontrola stavu bezpečnostních opatření zabudovaných v místech křížení potrubí se silnicemi, železnicemi a vodními cestami [55].
- 12) Detekce malých úniků pomocí čichových testů [54].

8.5.5 Legislativní omezení

V EU směrnice 2014/68/EU obecně popisuje regulaci návrhu, instalace potrubí a tlakových zařízení na moři/na pevnině pro přepravu kapalných nebezpečných látek [57]. V důsledku toho si mnoho

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

členských států EU vypracovalo vlastní kritéria pro inspekci potrubí pro kapalný amoniak. V USA je přeprava nebezpečných kapalin potrubím definována v americkém předpisu 49 CFR 195 [58].

Nadzemní potrubí obvykle prochází měřením tloušťky stěny každých 4 až 10 let, zatímco podzemní potrubí prochází tlakovou zkouškou přibližně každých 5 let. Harmonizované evropské směrnice, jako jsou Natura 2000, IPPC a směrnice ATEX, platí ve všech členských státech a zahrnují specifické předpisy pro bezpečnost potrubí. Tyto předpisy se vztahují na potrubí přepravující zemní plyn, chemikálie a nově vznikající nosiče energie, jako je vodík a amoniak. V zemích EU se právní rámec v současné době vyvíjí s cílem řešit dopady energetické transformace na bezpečnost potrubí, jak je uvedeno v Tabulka 8.10 [55].

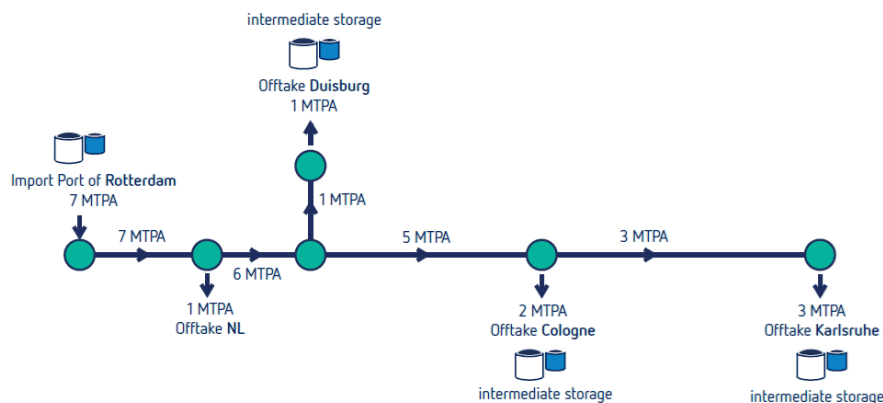
TABULKA 8.10: HLAVNÍ PŘEDPISY PRO BEZPEČNOST POTRUBÍ PRO NIZOZEMSKO A NĚMECKO [55].

Parametry	Nizozemsko	Německo
Environmentální	Zákon o životním prostředí (Omgevingswet)	Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí (UVPG) Zákon o ochraně přírody a krajinné úpravě (BNatSchG) Zákon o změně klimatu (KSG)
Prostorové plánování	Zákon o životním prostředí (Omgevingswet)	Postup územního plánování (Raumordnungsverfahren) Postup schvalování plánu (Planfeststellungsverfahren)
Potrubí a bezpečnost	Zákon o kvalitě životního prostředí a environmentálních činnostech (Bkl and Bal) Řada NEN 3650 pro transportní potrubí Výpočtové moduly (Handboek RIVM Rekenvoorschrift)	Předpis o potrubních systémech (RohrFltgV) Technická pravidla pro potrubní systémy (TRFL)

8.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Česká republika v současné době obchoduje s amoniakem se sousedními zeměmi, jako je Německo, Polsko a Slovensko [25]. Potrubní doprava nabízí možnost distribuce velkých objemů, ačkoli v Evropě se využívá především na krátké vzdálenosti. Jak je podrobně uvedeno v kapitole 8.6, dovoz a vývoz amoniaku je v Evropě nejdominantnější v Nizozemsku. Obrázek 8.10 a Obrázek 8.11 zobrazují jak objemy přepravy, tak potenciální potrubní trasy pro obchod s amoniakem z Rotterdamu do Karlsruhe. Tato čísla navíc naznačují potenciál pro rozvoj obchodních tras pro amoniak do České republiky v dlouhodobém horizontu. V současné době je ORLEN Unipetrol jediným výrobcem amoniaku v České republice, ale v současnosti nevyužívá potrubní dopravu pro amoniak. V minulosti byla realizována potrubní přeprava amoniaku mezi Litvínovem a Lovosicemi [59]. Tento historický příklad demonstruje proveditelnost takové přepravy na základě dohod se zúčastněnými stranami a poptávky trhu.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

**OBRAZEK 8.10: KAPACITA POTRUBÍ PRO PŘEPRAVU AMONIAKU PŘES NIZOZEMSKO DO NĚMECKA [55].****OBRAZEK 8.11: POTRUBNÍ PŘEPRAVNÍ TRASA AMONIAKU PŘES PŘÍSTAV ROTTERDAM [55].****8.5.7 Energetická náročnost**

Přeprava amoniaku potrubím má v porovnání s jinými způsoby přepravy (silniční, železniční a lodní) relativně nízkou energetickou náročnost. Navíc má amoniak vyšší energetickou hustotu než vodík (viz Tabulka 8.1), což snižuje relativní energetické náklady na přepravu a činí přepravu výhodnější.

V literatuře je uvedena pro přepravní vzdálenost 100 km spotřeba energie přibližně 0,19 kWh na MWh přepraveného amoniaku a dalších 3,4 kWh pro počáteční kompresi [26]. Z těchto hodnot vyplývá, že pro počáteční kompresi je zapotřebí 0,001 kWh/kg NH_3 a dalších 0,018 kWh/kg NH_3 /100 km pro přepravu, což odpovídá 0,006 kWh/kg H_2 a 0,1 kWh/kg H_2 /100 km.

Přeprava amoniaku potrubím v Evropě má obecně nízkou kapacitu, obvykle se pohybuje od 1 000 do 3 000 t/den a maximální kapacitou až 14 000 t/den (viz Tabulka 8.7). Na základě údajů poskytnutých pro potrubí 1 v Německu byla spotřeba energie potřebná pro přepravu amoniaku počítána s použitím specifických parametrů: tlak 21 bar, teplota 20 °C, průměr potrubí 10 cm, délka potrubí 24 km a kapacita 2 600 t/den. Výsledky ukazují, že potřebná elektrická energie je

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

0,027 kWh/kg NH₃, respektive 0,153 kWh/kg H₂. Tento výpočet představuje vyšší energetickou náročnost než hodnota uvedená v literatuře nejspíše z důvodu přepravy na krátkou vzdálenost.

Rozsah kapacity a použití na krátké vzdálenosti v Evropě omezuje objem přepravovaného amoniaku, což jej činí méně vhodným pro velmi velké objemy přepravy. Nicméně potrubní doprava zůstává jednou z nejstarších a nejbezpečnějších metod distribuce amoniaku a nabízí výhodu nízké spotřeby energie.

8.5.8 Ekonomické aspekty

Ve Spojených státech, Rusko a Ukrajině se používají dlouhá potrubí na amoniak, která mohou být v určitých lokalitách atraktivním způsobem přepravy amoniaku [54]. Pro přepravní vzdálenosti 1 000 km ve Spojených státech se odhadované náklady v roce 2019 pohybovaly v rozmezí 0,02 až 0,04 EUR/kg NH₃, respektive 0,13 až 0,27 EUR/kg H₂ [60].

Celkové investiční a provozní náklady na přepravu amoniaku potrubím na vzdálenost 550 km jsou uvedeny v Tabulka 8.11. Odhad investičních nákladů pro navrhované 20" (50 cm) potrubí, který upřednostňuje bezpečnost a shodu s předpisy, činí 2 100 mil. EUR. Naproti tomu základní návrh založený na běžných postupech v oboru se odhaduje na 1 600 mil. EUR. Tento základní návrh však nesplňuje požadavky na shodu s předpisy pro přepravu amoniaku. Rozdíl investičních nákladů 500 mil. EUR (tj. 31 %) mezi základním a rozšířeným návrhem v souladu s předpisy se odráží ve významném zhoršení ekonomických parametrů. Roční provozní náklady pro rozšířený návrh činí 310 mil. EUR, což je o 29 % více než náklady základního návrhu. Na základě těchto hodnot se odhadují náklady na dopravu na 0,078 EUR/t NH₃/km, respektive 0,50 EUR/t H₂/km) [55].

TABULKA 8.11: CELKOVÉ INVESTIČNÍ A PROVOZNÍ NÁKLADY NA PŘEPRUVU AMONIAKU POTRUBÍM [55].

Náklady (přesnost +100/-50 %) pro potrubí 20" (50 cm)	Základní provedení, hloubka 1,2 m, ESD stanice vzdáleny 16 km	Rozšířený design se všemi opatřeními požadovanými předpisy a ESD stanice vzdáleny 5 km
Investiční náklady	1 600 mil. EUR	2 100 mil. EUR
Provozní náklady	240 mil. EUR/rok	310 mil. EUR/rok

Pozn.: ESD je systémy pro nouzové vypnutí. Výpočty jsou založeny na délce potrubí 550 km.

8.5.9 Ekologické aspekty

Amoniak je klasifikován jako nebezpečná látka kvůli své toxicitě, korozivním vlastnostem a potenciálnímu dopadu na životní prostředí. Proto přeprava amoniaku potrubím vyžaduje specifická bezpečnostní opatření, která jsou podrobně popsána v kapitole 8.5.4.

V souvislosti s potrubní přepravou bylo dosud hlášeno jedenáct incidentů, z nichž žádný nevedl ke katastrofální následkům [4]. Nicméně amoniak uvolněný do atmosféry při incidentu způsobuje problémy se zdravím lidí a zvířat, kontaminaci zemědělské a pitné vody [54]. Vzhledem k tomu, že potrubní síť v EU je poměrně stará, uplatňují všechny země EU odlišnou legislativu. Nejaktivnější

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

jsou Nizozemsko a Německo, jak je patrné z Tabulka 8.10. Legislativa těchto zemí vytváří vyšší bezpečnost pro ochranu životního prostředí a biodiverzity.

Emise CO₂ jsou obecně nízké díky čerpání kapalné fáze. Emise souvisí především s energetickou náročností čerpadel a emisními stopami použité elektřiny. Před samotnou přepravou je nezbytné amoniak zkapalnit, na což je potřeba také energie. Energie na zkapalnění je potřeba ve všech typech přeprav. Samotná potrubní přeprava má nižší emise než ostatní typy přeprav.

8.5.10 Normy, oborové předpisy

49 CFR 195 – Hlava 49, Kodex federálních předpisů, Část 195 – Přeprava nebezpečných kapalin potrubím.

Směrnice 2014/68/EU – Směrnice EU pro tlaková zařízení.

API 5L X52N (L360N) používaná v provozních potrubí na amoniak. V jiných částech Evropy, jako je Nizozemsko, Španělsko a Portugalsko, se často používá ASTM A333 třídy 6. Ve Spojených státech se používá ASTM A53 třídy B nebo ASTM A106 třídy B nebo C.

Natura 2000 – Soustava chráněných území evropského významu.

IPPC – Mezinárodní úmluva o ochraně rostlin.

ATEX 114 – Směrnice 2014/34/EU o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se zařízení a ochranných systémů určených pro použití v prostředí s nebezpečím výbuchu.

ATEX 153 – Směrnice 1999/92/ES o minimálních požadavcích na zlepšení ochrany zdraví a bezpečnosti zaměstnanců vystavených rizikům souvisejícím s výbušnou atmosférou.

Omgevingswet – Zákon o životním prostředí (Nizozemsko).

Bkl – Zákon o kvalitě životního prostředí (Nizozemsko).

Bal – Nizozemský dekret o environmentálních činnostech.

Řada NEN 3650 – Požadavky na potrubní systémy od Nizozemského normalizačního institutu (NEN).

UVPG – Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí (Německo).

BNatSchG – Zákon o ochraně přírody a krajinné úpravě (Německo).

KSG – Zákon o změně klimatu (Německo).

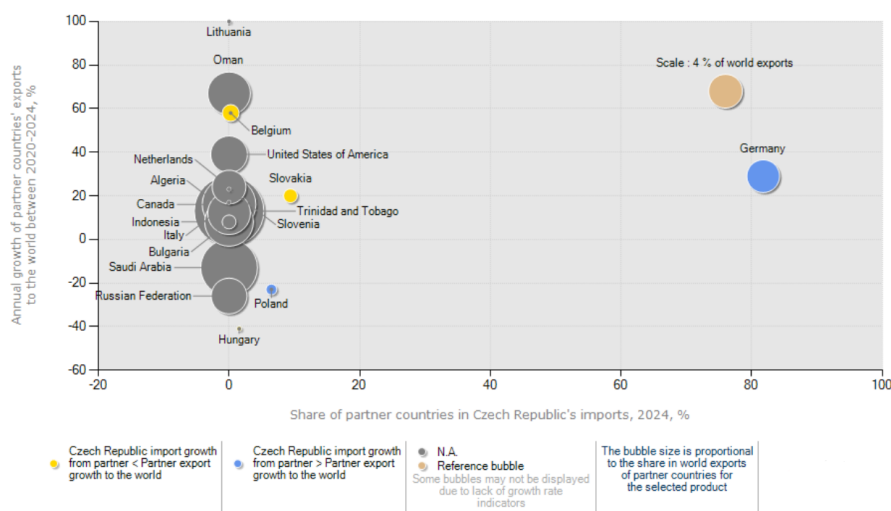
RohrFltgV – Předpis o potrubních systémech (Německo).

TRFL – Technická pravidla pro potrubní systémy (Německo).

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.6 Terminály

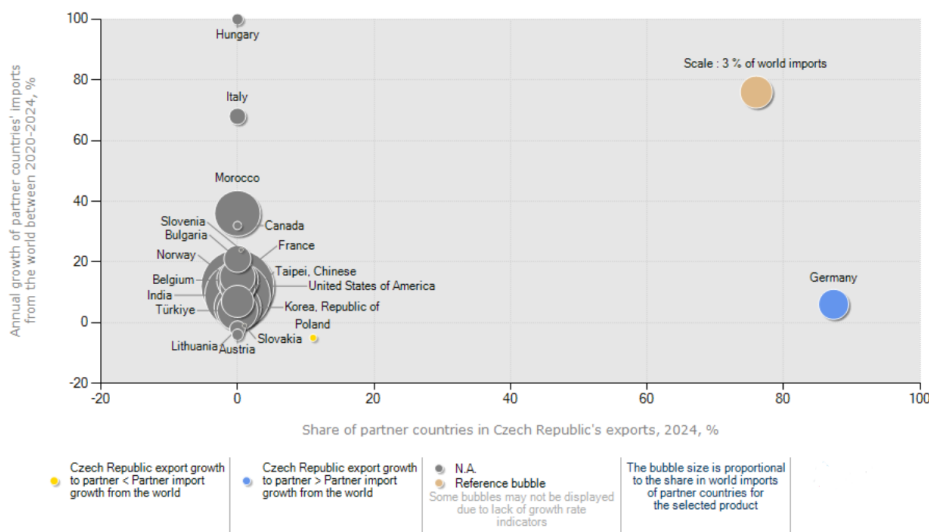
Podle údajů o dovozu za rok 2024 Česká republika představuje 1,4 % celosvětového dovozu bezvodého amoniaku (viz Obrázek 8.12). Průměrná vzdálenost od dodavatelských zemí je 385 km. Jak se očekávalo, největším dodavatelem do ČR bylo Německo s 147 837 t amoniaku, což představovalo přibližně 81,8 % celkového dovozu. Následuje Slovensko s 9,4 % (14 192 t) a poté Polsko s 6,5 % (11 447 t) celkového dovozu bezvodého amoniaku do ČR za rok 2024 [25].



OBRÁZEK 8.12: ÚDAJE O DOVOZU BEZVODÉHO AMONIAKU DO ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2024 [25].

Podle údajů o vývozu za rok 2024, Česká republika představuje pouze 0,2 % celosvětového vývozu amoniaku (viz Obrázek 8.13). Průměrná vzdálenost vývozu je 394 km. ČR nejvíce vyváží do Německa (23 149 t NH_3), což představuje přibližně 87,3 % celkového vývozu amoniaku z ČR. Následuje Polsko s 11,1 % (2 261 t NH_3) a poté Slovensko s 1 % (118 t NH_3) celkového vývozu bezvodého amoniaku z ČR [25].

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

**OBRÁZEK 8.13: ÚDAJE O VÝVOZU AMONIAKU Z ČESKÉ REPUBLIKY ZA ROK 2024 [25].**

Jak je patrné z Obrázek 8.12 a Obrázek 8.13, obchodní síla České republiky silně závisí na Německu, následovaném Polskem a Slovenskem. Vzhledem ke geologické poloze České republiky mají tyto sousední země dobrou polohu, aby mohly sloužit jako dlouhodobí obchodní partneři. Ačkoli zdroje neuvádějí přesné dopravní trasy, s ohledem na využití amoniaku, zejména v průmyslu hnojiv, je železniční doprava nejpravděpodobnějším a nejpraktičtější způsobem. Vzhledem k tomu, že většina obchodu se uskutečňuje ve vnitrozemí, je silniční doprava druhou možností pro zbývající dopravu.

Z informací uvedených výše je jasné, že v ČR nejsou žádné terminály s větší kapacitou. Jediné místo, které lze považovat za terminál je v Litvínově-Záluží, kde se amoniak vyrábí, skladuje a plní do železničních cisteren. Nicméně v okolních zemích, které mají přístup k moři, je velké množství terminálů na amoniak (Hamburg, Brunsbüttel, Wilhelmshaven, Stade, Lubmin, Rotterdam, Antwerpy atd.). Tyto terminály by bylo možné využít v případě budoucího využití amoniaku jako alternativního nosiče vodíku pro vodíkovou mobilitu.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.7 Přepravní trasy

Náklady na přepravu amoniaku se mohou lišit v závislosti na zvolené přepravní trase, jak je popsáno v předchozích částech. Pro lepší pochopení jsou uvedeny náklady na vnitrozemskou přepravu po celém světě z výrobního zařízení do distribučních přístavů potrubím, silničními a železničními trasami, aby se vytvořil komplexní přístup. Přepravní vzdálenost, umístění a průtok jsou velmi důležité parametry pro určení nejschůdnější přepravní trasy.

Pro větší přehlednost jsou v Tabulka 8.12 uvedeny celosvětové náklady na vnitrozemskou přepravu z výrobních zařízení do distribučních přístavů prostřednictvím potrubí, silničních a železničních tras. Tento komplexní přehled pomáhá ilustrovat rozmanitost přepravních cest. Jak je patrné z Tabulka 8.12, na určení nejschůdnější přepravní trasy má vliv několik faktorů, včetně přepravní vzdálenosti, zeměpisné polohy, průtoku a dalších.

TABULKA 8.12: NÁKLADY NA VNITROZEMSKOU DOPRAVU Z VÝROBNÍHO ZAŘÍZENÍ DO DISTRIBUČNÍCH PŘÍSTAVŮ POTRUBÍM, SILNIČNÍ A ŽELEZNIČNÍ TRATÍ [48].

EUR/t		Průtok 1 575 t/den			Průtok 2 100 t/den		
Z	Do	Potrubí	Silnice	Železnice	Potrubí	Silnice	Železnice
Cape Grim	Port Burnie	10,29	12,32	9,80	8,54	12,32	9,06
Sonnblick	Rotterdam port	72,09	-	11,39	54,89	-	10,64
List	Fredericia port	10,58	12,58	9,65	8,76	12,58	8,89
Malin Head	Belfast harbor	13,32	14,75	-	10,82	14,75	-
Upington	Port of Cape Town	52,35	-	-	40,08	-	-
Dikson	Dikson port	3,71	7,48	-	3,60	7,47	-
Lerwick	Lerwick port	4,26	7,69	-	4,02	7,69	-
Jodhpur	Kandla port	49,91	46,94	10,84	38,26	46,94	10,09
Dakar	Port of Dakar	5,73	8,21	-	5,12	8,21	-

Vzhledem k tomu, že amoniak je jedním z nejpoužívanějších komodit, dosáhl v roce 2024 objem globálního obchodu asi 15,3 mil. t. Podle údajů o globálním vývozu za rok 2024 (viz Tabulka 8.13) vedl Trinidad a Tobago ve vývozu bezvodého amoniaku s objemem asi 2,8 mil. t, převážně přepravovaného po moři za podmínek CIF a FOB. Podmínky CIF zahrnují nakládku zboží na palubu plavidla, vývozní odbavení, přepravné do cílového přístavu a minimální pojištění během přepravy. Tyto podmínky pokrývají hlavní přepravní požadavky a usnadňují proces lodní přepravy. Podmínky FOB zahrnují nakládku zboží na loď a vztahují se pouze na námořní nebo vnitrozemskou lodní přepravu. Odpovědnosti a rizika se tedy u těchto podmínek liší. Zúčastněné strany se rozhodují o vhodných podmínkách na základě odpovědností, které chtějí přijmout.

Dalšími v pořadí podle množství vývozu amoniaku následují Saúdská Arábie (2,2 mil. t), Indonésie (1,7 mil. t), Omán (1,1 mil. t), Kanada (1,1 mil. t) a Spojené státy (1 mil. t). Kanada i Spojené státy využívaly pro vývoz bezvodého amoniaku také lodní přepravu s podmínkami CIF a FOB. V Evropské

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

unii vedly ve vývozu bezvodého amoniaku Nizozemsko a Německo, zejména do sousedních zemí, s množstvím 0,5 mil. t, respektive 0,48 mil. t [61].

Podle globálních údajů o dovozu za rok 2024 (viz Tabulka 8.13) vedla Indie v dovozu bezvodého amoniaku s množstvím 2,4 mil. t, převáženého po moři za podmínek CIF a FOB. Následují Spojené státy (2,1 mil. t), Korea (1,2 mil. t) a Turecko (0,8 mil. t). Spojené státy i Korea také využívaly pro dovoz bezvodého amoniaku lodní přepravu s podmínkami CIF a FOB. V Evropské unii vedly v dovozu bezvodého amoniaku Belgie (0,8 mil. t), Francie (0,5 mil. t) a Německo (0,3 mil. t), převážně přepravovaného z Ruské federace, Trinidadu a Tobagu a Nizozemska [61].

TABULKA 8.13: OBJEMY VÝVOZU A DOVOZU BEZVODÉHO AMONIAKU V ROCE 2024 [61].

Země	Vyvezené množství NH ₃ (t)	Dovezené množství NH ₃ (t)
Trinidad and Tobago	2 771 100	6
Saúdská Arábie	2 192 751	647
Indonésie	1 706 665	53 059
Omán	1 126 177	112
Kanada	1 081 199	10 009
Spojené státy	1 035 866	2 073 156
Alžírsko	946 156	-
Ruská federace	701 447	-
Nizozemsko	498 436	123 705
Německo	476 363	340 006
Malajsie	457 319	3 851
Egypt	348 598	1
Austrálie	320 517	51 488
Katar	304 466	-
Turecko	247 676	796 754
Spojené království	170 625	276 566
Francie	117 174	518 023
Malajsie	457 319	3 851
Libye	114 182	15
Čína	89 667	470 663
Belgie	89 007	773 243
Bahrajn	75 432	2
Spojené arabské emiráty	71 326	838
Slovensko	60 005	300
Bulharsko	56 512	315 645
Korejská republika	46 006	1 192 579
Bangladéš	37 629	-

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

POKRAČOVÁNÍ TABULKA 8.13.

Země	Vyvezené množství NH ₃ (t)	Dovezené množství NH ₃ (t)
Polsko	27 246	7 513
Česká republika	25 511	177 560
Portugalsko	14 811	252 207
Íránská islámská republika	12 533	-
Chorvatsko	5 269	238
Jihoafrická republika	4 880	146 205
Kolumbie	4 477	79 449
Švýcarsko	2 305	1 239
Indie	2 230	2 394 153
Řecko	1 647	-
Thajsko	1 243	334 752
Maďarsko	1 032	24 078
Dánsko	940	21 245
Švédsko	818	225 685
Chile	516	343 182
Guatemala	427	3 213
Čína	418	568,212
Litva	372	92 674
Mexiko	337	7 181
Brazílie	240	396 740
Vietnam	200	182 756
Ukrajina	115	4 177
Japonsko	101	227 243
Singapur	52	57 612
Itálie	35	76 756
Kazachstán	35	71 130

Pozn.: Jsou uvedeny pouze země s hodnotou vývozu nebo dovozu vyšší než 1 000 t NH₃.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.8 Shrnutí

Amoniak (NH_3) je široce vyráběná chemikálie a důležitý nosič vodíku, protože má vysokou energetickou hustotu a ve srovnání s vodíkem vyžaduje méně energie pro přepravu. Amoniak lze přepravovat po silnici, železnici, moři a potrubím, přičemž každá z nich má své výhody, omezení a regulační požadavky. Souhrnná SWOT analýza přepravy amoniaku je uvedena na Obrázek 8.14.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Vysoká hustota: V přepočtu asi $105 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$. Technologická připravenost: TRL 9 pro všechny typy přepravy. Zavedené přepravní řetězce: Celosvětově se obchoduje s amoniakem, takže již existuje infrastruktura. Běžná přeprava: Zavedená přeprava po moři, železnici, silnici i potrubím. Rychlost nakládky a vykládky: Zkapalněný plyn lze naložit a vyložit rychleji než plynná média.	Složitost řetězce: Výroba a rozklad amoniaku. Bezpečnostní rizika: Vysoce jedovatý plyn, nutnost velmi přísných bezpečnostních opatření. Technologická připravenost: TRL 5–7 pro rozklad amoniaku. Složitost nakládky a vykládky: Využití hnacího plynu pro zamezení úniku amoniaku při odpojení. Balastní plyn nad kapalinou v zásobníku. Tlak nebo teplota: Nutnost pracovat za vyšších tlaků (až 17 bar) nebo nízké teploty (až -50°C), aby byl amoniak kapalný. Omezené naplnění: Maximální naplnění cisterny může být pouze $530 \text{ kg amoniaku}/\text{m}^3$.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Dekarbonizace energetiky a dopravy: Pokud splní všechny podmínky EU pro RFNBO. Rozvoj P2G technologií: Využití přebytků OZE, stabilizace sítě a možnost přepravy energie. Využití existující infrastruktury: Využití obchodních tras a infrastruktury pro amoniak.	Konkurence jiných nosičů vodíku: Kapalným vodík, methanol LOHC... Proměnlivost cen elektřiny: Náklady na výrobu obnovitelného vodíku jsou závislé na ceně obnovitelné energie. Dostupnost energie: Nízké využití elektrolýzy v ČR. Nemožnost výroby amoniaku z obnovitelného vodíku: Při plnění legislativních podmínek pro RFNBO bude komplikované nebo nemožné navázat výrobu amoniaku na obnovitelný vodík.

OBRÁZEK 8.14: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY AMONIAKU JAKO NOSIČE VODÍKU.

Silniční přeprava je flexibilní a používá se hlavně pro dodávky menších objemů přímo koncovým uživatelům. Maximální povolená kapacita přepravy amoniaku je 44 m^3 při zvýšeném tlaku (až 29 bar) a okolní teplotě (-40°C až $+50^\circ\text{C}$) pro přepravu. Tato přeprava je v České republice použitelná díky geologické poloze země s obchodními vazbami na okolní země. Má však svá omezení v podobě nejvyšší spotřeby energie na jednotku přepravovaného amoniaku a omezené kapacity, což ji činí méně efektivní pro velkoobjemovou nebo dálkovou přepravu.

Železniční přeprava je v mnoha regionech, zejména v Evropě a Spojených státech, preferovaným způsobem dopravy díky své velké kapacitě na jeden vůz $50\text{--}110 \text{ m}^3$ a možnosti přepravy více vozů najednou. Obvyklá kapacita používaná v České republice je 85 m^3 . Železniční doprava je vhodná pro střední až dlouhé vzdálenosti a zvládne velké objemy s provozními podmínkami typicky v rozmezí od -20°C do $+50^\circ\text{C}$ a provozním tlakem až 26 bar. Jediný výrobce amoniaku v České republice, společnost ORLEN Unipetrol, využívá provozní tlak 14 bar. Přestože železniční doprava prochází obydlenými oblastmi a je zodpovědná za většinu nehod při přepravě amoniaku, probíhající bezpečnostní vylepšení snížila rizika.

Mezinárodní a dálkové přepravě amoniaku dominuje lodní přeprava, přičemž typické kapacity lodí se pohybují od 23 000 do 40 200 t NH_3 a ve zvláštních případech až do 66 138 t NH_3 . Tyto velké kapacity umožňují ekonomickou přepravu velkého množství napříč kontinenty. Tankery nebo říční čluny na amoniak se v závislosti na skladovacích potřebách liší jako plně chlazené „typ A“ (1 bar při -50°C), polochlazené „typ B“ (4–8 bar při -10°C) a plně tlakové „typ C“ (17 bar při 45°C). Lodní

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

přeprava je energeticky účinná na dlouhé vzdálenosti a přístavní infrastruktura je již velmi rozšířená. Vzhledem k vnitrozemské poloze není pro Českou republiku přímo dostupná. Využití lodní přepravy by mohlo být možné v kombinaci s dalšími typy přepravy.

Potrubí představuje vysoce efektivní a bezpečnou možnost pro přepravu velkých objemů amoniaku na krátké až dlouhé vzdálenosti. Celosvětově je v provozu přibližně 7 600 km potrubí na amoniak, některá jsou v provozu již přes padesát let. V Evropě stárnoucí infrastruktura sice omezuje jeho využití, ale potrubí zůstává účinné pro distribuci velkých objemů na dlouhé vzdálenosti. Ačkoli jediný výrobce amoniaku v České republice, společnost ORLEN Unipetrol, v současné době nepoužívá pro amoniak potrubní přepravu, v minulosti byla realizována mezi Litvínovem a Lovosicemi [59]. Vzhledem ke geografickým specifikům, průmyslové výrobní kapacitě a přepravním vzdálenostem sousedních zemí představuje obchod s amoniakem potrubní přepravou pro Českou republiku dlouhodobý potenciál.

Závěrem lze říct, že silniční a železniční přeprava nabízí flexibilní regionální dopravu, přičemž železnice je upřednostňována pro větší objemy. Námořní doprava je optimální pro mezinárodní přepravu velkoobjemových zásilek, ale pro Českou republiku není přímo dostupná. V dlouhodobém horizontu se potrubí stává preferovanou metodou pro vysokokapacitní distribuci amoniaku, která vyvažuje bezpečnost, efektivitu a nízké náklady pro budoucí energetické a průmyslové potřeby.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
ASME	Americká společnost strojních inženýrů (American Society of Mechanical Engineers)
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials)
ATEX	Směrnice týkající se výbušného prostředí
Bal	Nizozemský dekret o environmentálních činnostech
Bkl	Zákon o kvalitě životního prostředí
BNatSchG	Zákon o ochraně přírody a krajinné úpravě (Německo)
CAPEX	Investiční náklady (CAPital EXpenditure)
CERCLA	Zákon o komplexní environmentální reakci, kompenzaci a odpovědnosti (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act)
CFR	Kodex federálních předpisů (Code of Federal Regulations)
CIF	Mezinárodní typ přepravních podmínek – Náklady, pojištění a doprava (Cost, Insurance, and Freight)
ČR	Česká republika
DOT	Ministerstvo dopravy Spojených států (US Department of Transportation)
EFMA	Evropská asociace výrobců hnojiv (European Fertilizer Manufacturers Association)
EmS	Nouzové postupy pro lodě přepravující nebezpečné zboží (Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods)
ESD	Systémy nouzového vypnutí (Emergency Shutdown Systems)
EU	Evropská unie
FMCSA	Federální úřad pro bezpečnost motorové dopravy (Federal Motor Carrier Safety Administration)
FOB	Mezinárodní typ přepravních podmínek – Zdarma na palubě (Free On Board)
IATA	Mezinárodní sdružení letecké dopravy (International Air Transport Association)
IGC	Mezinárodní předpis o stavbě a vybavení lodí přepravujících zkapalněné plyny hromadně (International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk)
IMDG	Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečného zboží po moři (International Maritime Dangerous Goods Code)
IMO	Mezinárodní námořní organizace (International Maritime Organization)
IPPC	Mezinárodní úmluva o ochraně rostlin (International Plant Protection Convention)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

KSG	Zákon o změně klimatu (Německo)
LGC	Velké tankery na přepravu plynu (Large Gas Carriers)
LPG	Zkapalněný ropný plyn (Liquefied Petroleum Gas)
MARPOL	Mezinárodní úmluva o zabránění znečištění z lodí (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)
MGC	Střední tankery na přepravu plynu (Medium Gas Carriers)
NEN	Nizozemský institut pro normalizaci
NQT	Není určeno pro kalené a temperované ocelové přívěsy (Not for Quenched and Tempered Steel Trailers)
OPEX	Provozní náklady (OPerational EXpenditure)
RID	Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí
RohrFltgV	Předpis o potrubních systémech (Německo)
SOLAS	Mezinárodní úmluva o bezpečnosti lidského života na moři (International Convention for the Safety of Life at Sea)
TDG	Předpisy Kanady pro přepravu nebezpečného zboží (Transportation of Dangerous Goods Regulations)
TPED	Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních (Transportable Pressure Equipment Directive)
TRFL	Technická pravidla pro potrubní systémy (Německo)
TRL	Úroveň technologické připravenosti (Technology Readiness Level)
UN	Spojené národy (United Nations)
UVPg	Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí (Německo)
VLGC	Velmi velké tankery na přepravu plynu (Very Large Gas Carriers)

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Ulucan, T.H., et al., *Hydrogen storage in liquid hydrogen carriers: recent activities and new trends*. Progress in Energy, 2023. 5(1): p. 012004.
- [2] IEA, *Ammonia Technology Roadmap*. 2021, IEA: Paris.
- [3] Huang, X., et al. *Recent Progress on Hydrogen Production from Ammonia Decomposition: Technical Roadmap and Catalytic Mechanism*. Molecules, 2023. 28, DOI: 10.3390/molecules28135245.
- [4] Hans van 't Noordende, G.T., Kevin Rouwenhorst, Marthe Fruytier, *Clean Ammonia Roadmap*, B.L. Communicatie, Editor. 2024, Institute for Sustainable Process Technology.
- [5] Aziz, M., A. Wijayanta, and A. Nandiyanto, *Ammonia as Effective Hydrogen Storage: A Review on Production, Storage and Utilization*. Energies, 2020. 13: p. 3062.
- [6] Pei, Y., et al., *A quantitative study on the combustion and emission characteristics of an Ammonia-Diesel Dual-fuel (ADDF) engine*. Fuel Processing Technology, 2023. 250: p. 107906.
- [7] Menefee, A.H. and B.A. Schwartz, *Comparing green hydrogen and green ammonia as energy carriers in utility-scale transport and subsurface storage*. Energy and Climate Change, 2024. 5: p. 100163.
- [8] Abbasian Hamedani, E., S.A. Alenabi, and S. Talebi, *Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles*. Energy Reports, 2024. 12: p. 3778-3794.
- [9] *Ammonia Safety Data Sheet*. [cited 2025; Available from: <https://www.airgas.com/msds/001003.pdf>].
- [10] Brown, T., *Ammonia: Zero-Carbon Fertiliser, Fuel and Energy Store*, in *Policy Briefing*. 2020, The Royal Society.
- [11] Sharma, S., *What Role Does Packaging Play in Safe Ammonia Transportation?* 2024, Jaysons Chemical Industries.
- [12] *Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk (IGC Code)* T.M.S. Committee, Editor. 2014.
- [13] *Safety Data Sheet, Ammonia, Anhydrous*. [cited 2025; Available from: https://www.chemos.de/import/data/msds/GB_en/7664-41-7-A0052472-GB-en.pdf].
- [14] Sens, L., et al., *Conditioned hydrogen for a green hydrogen supply for heavy duty-vehicles in 2030 and 2050 – A techno-economic well-to-tank assessment of various supply chains*. International Journal of Hydrogen Energy, 2024. 52: p. 1185-1207.
- [15] Kyung-Tae, M., D. Paul, and W. Louise, *Ammonia as a marine fuel: likelihood of ammonia releases*. Journal of Advanced Marine Engineering and Technology, 2023. 47(6): p. 447-454.
- [16] *Technology Readiness Level (TRL) Assessment Tool*. 2021 19.08.2024]; Available from: <https://ised-isde.canada.ca/site/clean-growth-hub/en/technology-readiness-level-trl-assessment-tool>.
- [17] *Comparative Quantative Risk Analysis of Motor Gasoline, LPG, and Anhydrous Ammonia as an Automotive Fuel*. 2009, Iowa State University: Quest.
- [18] *Ammonia Transport and Storage Tanks*. Available from: <https://harsantanker.com/en/ammonia-transport-and-storage-tanks/>.
- [19] Standardization, E.C.F., *BS EN 14025:2023*, in *Tanks for The Transport of Dangerous Goods — Metallic Pressure Tanks — Design and Construction*. 2023, BSI Standards Limited 2024.
- [20] *ADR Compliant Ammonia Transport Tank*. 2025; Available from: <https://www.mim-mak.com/en/products/pressure-tanks/adr-compliant-ammonia-transport-tank.html>.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

- [21] Nijs Jan Duijm, F.M., Jette Lundtang Paulsen, *Safety Assessment of Ammonia as A Transport Fuel*, in *Risø-R-1504(EN)*. 2005, Risø National Laboratory.
- [22] MC 331. Models & Training Props; Available from: <https://safetransportation.com/portfolio-posts/mc-331/>.
- [23] *Hazardous Material Regulations*, D.o.T. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Editor., National Archives: Code of Federal Regulations.
- [24] *Part 179: Specification For Tank Cars*, D.o.T. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, Editor., National Archives: Code of Federal Regulations.
- [25] *281410-Anhydrous Ammonia*. Czech Republic, Imports, Exports [cited 2025; Available from: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1%7c203%7c%7c%7c%7c%7c%7c%7c6%7c1%7c1%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1.
- [26] *Transport of Hydrogen in the Form of Ammonia*. 2023; Available from: <https://www.ffe.de/en/publications/transportation-of-the-energy-carrier-ammonia/>.
- [27] Elishav, O., et al., *Progress and Prospective of Nitrogen-Based Alternative Fuels*. Chemical Reviews, 2020. 120(12): p. 5352-5436.
- [28] *Guideliness for Safety Operation for Ammonia-Fueled Vessels in Chapter 4 Safety Measures*. 2025: Nippon Kaiji Kyokai.
- [29] Aminzadegan, S., et al., *Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review*. Energy Reports, 2022. 8: p. 2508-2529.
- [30] Pierre-Louis Ragon, F.R., *CO2 emissions from trucks in the EU: An analysis of the heavy-duty CO2 standards baseline data*, in *Analysis of the Heavy-Duty CO2 Standards Baseline Data 2021*, ICCT: INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT).
- [31] Elishav, O., et al., *Chapter 5 - Storage and Distribution of Ammonia*, in *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*, A. Valera-Medina and R. Banares-Alcantara, Editors. 2021, Academic Press. p. 85-103.
- [32] *Guidance for Transporting Ammonia by Rail*. 2014: Fertilizers Europe 2014.
- [33] *Convention Concerning International Carriage by Rail (COTIF), Appendix C: Regulations Concerning The International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)*, RID, Editor. 2023.
- [34] Atchison, J. *RWE: linking ammonia imports to EU consumers by rail*. 2023 [cited 2025; Available from: <https://ammoniaenergy.org/articles/rwe-linking-ammonia-imports-to-eu-consumers-by-rail/>.
- [35] Hutchison, G., *Ammonia Transportation, Distribution & Logistics*. 2005, Royster Clark: Argonne National Laboratory.
- [36] Hassan, C.R.C., et al., *Quantitative risk assessment for the transport of ammonia by rail*. Process Safety Progress, 2010. 29(1): p. 60-63.
- [37] *RID (Carriage of Dangerous Goods)*. [cited 2025; Available from: <https://du.gov.cz/en/topics/rid-carriage-of-dangerous-goods/>.
- [38] Shikder, M.F.H., et al., *Risk incident analyses in the transportation of anhydrous ammonia as an emerging clean energy resource*. Risk Anal, 2025. 45(3): p. 653-667.
- [39] *Hodnota emisního faktoru CO2 z výroby a spotřeby elektřiny*. 2025; Available from: https://mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/elektrina-a-teplo/2025/6/Metodika-CO2_2_2024.pdf.
- [40] *Commission Delegated Regulation (EU) 2023/1185*. 2023; Available from: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/1185/oj.
- [41] *Green Ammonia Shipment*, in *Shipping Green Ammonia from ECI,WCI to Germany*. Scribd Inc.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

- [42] Rouwenhorst, K.H.R. and G. Castellanos, *Innovation Outlook: Renewable Ammonia*. 2022.
- [43] *Ship Readiness For Zero Carbon Fuels*. 2024.
- [44] 281410-Anhydrous Ammonia. Netherlands, Imports, Exports 2025; Available from: https://www.trademap.org/Country_SelProductCountry.aspx?nvpm=1%7c528%7c%7c%7c%7c281410%7c%7c%7c6%7c1%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1.
- [45] Dahlke-Wallat, F., et al., *Ammonia bunker vessel: ship design for energy transition*. International Marine Design Conference, 2024.
- [46] Appl, M., *Ammonia, 1. Introduction*, in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2011.
- [47] Goetheer, E., *Ammonia : Transport and Storage*. 2022: VoltaChem.
- [48] Nayak-Luke, R.M., et al., *Chapter 8 - Techno-Economic Aspects of Production, Storage and Distribution of Ammonia*, in *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*, A. Valera-Medina and R. Banares-Alcantara, Editors. 2021, Academic Press. p. 191-207.
- [49] Augdal, T. *Will the Ammonia Shipping Market Boom?* 2023 [cited 2025; Available from: <https://maritimeoptima.com/insights/will-the-ammonia-shipping-market-boom>].
- [50] *Directive 2008/68/EC of the European Parliament and of the Council on the Inland Transport of Dangerous Goods*, E. Union, Editor. 2008: European Union.
- [51] Anna Karlsson, O.G., Julia Burgén, Joanne Ellis, Chen Huang, Tobias Olsson, Stina Andersson, *Safety of Ammonia on Board*. 2024, RISE Research Institutes of Sweden AB: Lighthouse.
- [52] *Refrigeration Ammonia: Ammonia, Anhydrous Refrigeration Grade, Technical Premium Grade*, in *Nitrogen Products: Technical Information*. Dyno Nobel Inc.
- [53] *Part 151.50-32: Ammonia, anhydrous*, in 46, C.o.F. Regulations, Editor.
- [54] *Guidance for Inspection of and Leak Detection in Liquid Ammonia Pipelines* 2008, European Fertilizer Manufacturers Association: 2008 EFMA.
- [55] Hans van 't Noordende, V.M., *Design and Safety Aspects for large-scale Clean Ammonia Pipelines*, H. Franka Wijnbergen and L.-S.W. Good Design, Editors. 2025, Institute for Sustainable Process Technology: Clean Ammonia Innovation Platform.
- [56] *Pipeline Transportation of Ammonia: Helping to Bridge the Gap to a Carbon Free Future*. 2021, NuStar: Ammonia Energy.
- [57] *Directive 2014/68/EU of The European Parliament and of The Council*, T.E.P.a.T. Council, Editor. 2014: Official Journal of the European Union.
- [58] *Part 195: Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline*, in 49, L.P.S.H.L. Regulations, Editor. 2023.
- [59] *History*. [cited 2025; Available from: <https://www.orlenunipetrol.cz/en/AboutUs/Pages/History.aspx>].
- [60] Herbinet, O., P. Bartocci, and A. Grinberg Dana, *nOn the Use of Ammonia as a Fuel – A Perspective*. Fuel Communications, 2022. 11: p. 100064.
- [61] 281410-Anhydrous Ammonia. Wold, Imports, Exports [cited 2025; Available from: https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c281410%7c%7c%7c6%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1].
- [62] European, C., et al., *Technology readiness level – Guidance principles for renewable energy technologies – Annexes*. 2017: Publications Office.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

8.9 Přílohy

TABULKA 8.14: POPIS A PRINCIPY FÁZÍ TRL [16, 62].

Fáze vývoje technologií	TRL	Definice	Popis
Základní výzkum	1	Pozorování základních principů	• Identifikace možných materiálů, komponent a systémů a souvisejících rizik a nebezpečí. • Předběžný návrh koncepce. • Předběžné vyhodnocení potenciálních přínosů a technologických mezer nové koncepce oproti stávajícím.
	2	Formulace technologického konceptu	• Prozkoumá se technická analýza konceptu. • Kvalitativně se posoudí interakce mezi komponentami. • Proveďte se kvalitativní posouzení výhod (např. environmentálních, technologických, ekonomických) nového konceptu. • Definuje se přístup ověření konceptu a předběžné technické specifikace (např. technologie, složení, omezení).
Výzkum a vývoj	3	Experimentální důkaz konceptu	• Koncept je testován v laboratorním měřítku. • Jsou měřeny/vypočítány parametry charakterizující technologii. • První prototyp pro ověření konceptu je připraven a předběžně testován. • Je provedeno ověření konceptu pomocí konsolidovaných simulačních nástrojů a křížová validace numerických modelů s využitím literárních dat.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

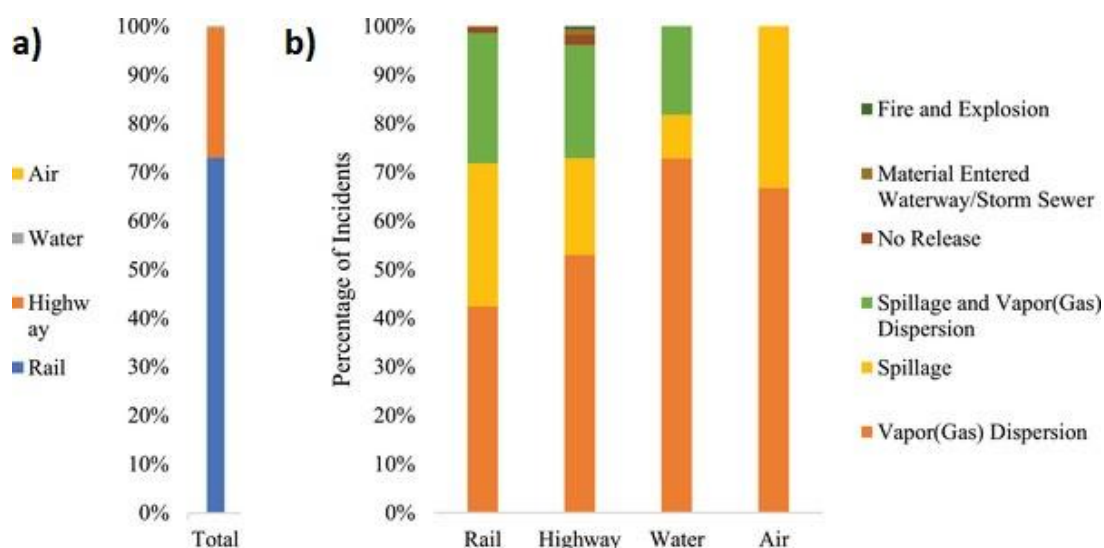
POKRAČOVÁNÍ TABULKA 8.14

Fáze vývoje technologií	TRL	Definice	Popis
	4	Technologie ověřená v laboratoři	• Proces je testováno a validováno v laboratorním měřítku. • Jsou definovány vlastnosti prototypu. • Prototyp může dosáhnout. Opakovatelného/stabilního výkonu. • Je provedena integrace s doplňkovými subsystémy. • Je prokázáno kvantitativní posouzení výhod (např. environmentálních, technologických, ekonomických) nového konceptu. • Měla by být identifikována rizika spojená s technologií.
	5	Technologie validovaná v relevantním prostředí	• Je realizován a testován rozsáhlý laboratorní prototyp v zamýšleném pracovním prostředí. • Jsou definovány parametry výrobního procesu. • Jsou k dispozici informace pro provedení posouzení environmentální a socioekonomické udržitelnosti. • Je možné provést analýzu životního cyklu.
Pilotní a demonstrační projekt	6	Technologie demonstrována v relevantním prostředí	• Technologie je demonstrována v pracovních podmínkách. • Proces je bezpečný a spolehlivý. • Realizace prototypu v pilotním měřítku, který by mohl být integrován s dalšími subsystémy a doladěn v terénu. • Měření výkonu prototypu v pilotním měřítku v různých a relevantních extrémních podmínkách. • Výkon odpovídá klíčovým ukazatelům výkonnosti. • Je vyhodnocena společenská akceptace.

Amoniak jako alternativní forma přepravy vodíku

POKRAČOVÁNÍ TABULKA 8.14

Fáze vývoje technologií	TRL	Definice	Popis
	7	Demonstrace prototypu systému v provozním prostředí	• Systém/technologie demonstrována v praxi za různých pracovních podmínek. • Je demonstrován výrobní přístup. • Je přehodnoceno posouzení životního cyklu a kalkulace nákladů životního cyklu. • Jsou analyzovány a dodržovány regulační aspekty.
	8	Systém kompletní a kvalifikovaný	• Technologie je ověřena ve své konečné podobě a za očekávaných podmínek. • Výroba je potenciálně komerčně životaschopná. • Technologie je v souladu s právními povinnostmi.
Komerční využití	9	Skutečný systém ověřený v provozním prostředí	• Technologie dostupná pro trh. • Plná připravenost k výrobě. • K dispozici je obchodní plán.



OBRÁZEK 8.15: SOUVISEJÍCÍ INCIDENTY PŘI PŘEPRAVĚ BEZVODÉHO AMONIAKU; A) PODÍL INCIDENTŮ NA TYPU PŘEPRAVY, B) PODÍL KATEGORIÍ INCIDENTŮ V KAŽDÉM TYPU PŘEPRAVY [38].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9 Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Zahra Gholami, Adam Giurg

ORLEN Unipetrol RPA s.r.o., Záluží 1, 436 70 Litvínov

9.1 Obecné informace

9.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Methanol (CH_3OH) je široce vyráběná chemikálie a díky svým příznivým fyzikálním vlastnostem a kompatibilitě se stávající infrastrukturou je stále významnějším kandidátem pro transport vodíku. Při okolní teplotě a tlaku je kapalný, což zjednodušuje skladování, manipulaci a přepravní logistiku ve srovnání s vodíkem či amoniakem, které často vyžadují vysoký tlak nebo kryogenní podmínky. Methanol využívá globální dopravní infrastrukturu, což umožňuje jeho přepravu, potrubím nebo přepravu po železnici a silnici s využitím konvenčních systémů, které již existují pro jiná kapalná paliva [1].

V roce 2019 dosáhla celosvětová spotřeba methanolu 98,3 milionu tun a předpokládá se, že do roku 2025 překročí 120 milionů tun [2, 3] a do roku 2050 dosáhne 500 milionů tun [4]. Čína, jakožto přední producent a spotřebitel methanolu, přispěla k více než polovině celosvětové poptávky. V roce 2018 spotřebovala přibližně 55 milionů tun, přičemž čtvrtina byla použita v palivových aplikacích. Ve spotřebě následovala zbývající část Asie (bez Číny), Evropa, Severní Amerika a Jižní Amerika. Během příštího desetiletí se předpokládá, že Čína bude hnací silou růstu poptávky v důsledku zvýšeného využívání dopravních a topných paliv a závodů na výrobu methanolu z olefinů [3, 5].

Z hlediska nosiče vodíku obsahuje methanol přibližně 12,5 hm. % vodíku, což znamená, že 100 kg methanolu uloží 12,5 kg vodíku. Hustota methanolu je 791 kg/m^3 , což odpovídá přibližně $99 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$ a činí methanol lepším objemovým úložištěm vodíku než kapalný vodík ($\sim 71 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$) a mnohem lepším než stlačený vodík při 700 bar ($\sim 40 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$). Energetická hustota methanolu je také značná, i s nízkou výhřevností $19,9 \text{ MJ/kg}$ je objemová energetická hustota $15,6 \text{ MJ/l}$, což překračuje hodnoty kapalného a stlačeného vodíku [1, 6, 7].

Za normálních podmínek existuje methanol jako bezbarvá, těkává kapalina s charakteristickým alkoholovým zápachem. Má bod varu $64,7^\circ\text{C}$ a bod tání -98°C , což ho činí kapalným v širokém teplotním rozmezí, což usnadňuje skladování a přepravu. Charakteristické vlastnosti methanolu a vodíku jsou pro komplexní srovnání uvedeny v Tabulka 9.1 [8].

Methanol nabízí z hlediska dopravy významné výhody. Lze jej skladovat a přepravovat jako kapalinu za podmínek okolního tlaku a teploty s využitím stávající infrastruktury pro ropné produkty s minimálními úpravami. Tato kompatibilita s konvenčními systémy distribuce paliv poskytuje značné ekonomické výhody a snižuje investiční požadavky do infrastruktury. Současné lodě pro přepravu ropy lze s malými úpravami upravit pro přepravu methanolu [9, 10].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 9.1: CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI METHANOLU A VODÍKU.

Parametr	Jednotka	Methanol	Vodík
Výhřevnost (LHV)	MJ/kg	19,9	119,9 (10,7 MJ/m ³)
Spalné teplo (HHV)	MJ/kg	23,0	141,7
Energetická hustota	MJ/l	15,6	4,5 (stlačený H ₂) 8,5 (kapalný H ₂)
Emise	-	CO ₂ and H ₂ O	H ₂ O
Teplota samovznícení	°C	470	535
Rozsah hořlavosti	obj. %	6,0–36,5	4–75 (ve vzduchu)
Riziko úniku	-	Nízké riziko úniku, detekovatelný zápach	Malá molekula a vysoké tlaky způsobují vysoké riziko úniku
Skladování a přeprava	-	Relativně snadné	Velmi náročné
Infrastruktura	-	Dobře zavedená	Potřebuje vývoj pro rozsáhlé aplikace
Kompatibilita se stávajícími systémy	-	Velmi vysoká	Střední

Používání methanolu přináší specifické bezpečnostní aspekty. Je toxický pro člověka a při požití může mít zdravotní dopady, včetně slepoty a smrti. Meze hořlavosti methanolu ve vzduchu se pohybují od 6 obj. % do 36,5 obj. %, což je širší než u amoniaku, ale užší než u vodíku. Navzdory těmto obavám poskytuje silný zápach methanolu přirozenou schopnost detekce úniků a jeho kapalný stav za okolních podmínek snižuje riziko výbuchu [6].

9.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Methanol je kritická průmyslová komodita široce přepravovaná v rámci globálních dodavatelských řetězců a kvůli svým nebezpečným vlastnostem vyžaduje přísné bezpečnostní protokoly. Přeprava methanolu vyžaduje komplexní pochopení jeho vlastností a dodržování mezinárodních bezpečnostních předpisů na ochranu veřejného zdraví a životního prostředí. Regulační rámec upravující přepravu methanolu zahrnuje normy Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO), Mezinárodní námořní organizace (IMO) a další regulační orgány po celém světě. Správné balení zabraňuje úniku, kontaminaci a fyzickému poškození během přepravy. Pro přepravu methanolu se používají různá řešení v závislosti na způsobu přepravy a rozsahu. Patří mezi ně specializované cisterny s tepelnou izolací pro velkoobjemovou přepravu, středně velké kontejnery (IBC), sudy a menší kontejnery pro menší množství. Na rozdíl od amoniaku, který vyžaduje kryogenní podmínky nebo vyšší tlak, zůstává methanol při okolní teplotě a tlaku kapalný, což výrazně zjednodušuje požadavky na skladování a manipulaci. Bod varu methanolu (65 °C) eliminuje nutnost použití tlakových nádob nebo kryogenních kontejnerů, což z něj činí palivo snáze manipulovatelné než většina alternativ. [11].

Přeprava methanolu jako nebezpečné látky je možná prostřednictvím různých cest, včetně námořní, železniční a silniční dopravy, za předpokladu dodržování příslušných bezpečnostních předpisů. Požadované informace pro přepravu methanolu, podle různých mezinárodních klasifikací, jsou

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

uvedeny v Tabulka 9.2. Mezi nejpoužívanější klasifikace shrnuté v Tabulka 9.2 patří DOT, TDG, ADR, IMDG a IATA. Ministerstvo dopravy USA (DOT) klasifikuje methanol odlišně pro vnitrostátní a mezinárodní přepravu. Pro vnitrostátní přepravu v rámci USA je methanol klasifikován pouze jako třída 3 (hořlavá kapalina), zatímco pro mezinárodní přepravu spadá do třídy 3 i do podtřídy 6.1 (toxická) kvůli svým toxickým vlastnostem. Vnitrostátní klasifikace odráží regulační přístup, který neuznává podtřídu toxického nebezpečí methanolu, a odlišuje tak americké předpisy od mezinárodních norem [12].

TABULKA 9.2: POŽADOVANÉ INFORMACE PRO PŘEPRAVU METHANOLU Z HLEDISKA IDENTIFIKACE NEBEZPEČNÝCH LÁTEK DLE MEZINÁRODNÍCH PŘEDPISŮ.

Klasifikace	DOT (US)	TDG (Kanada)	ADR (Evropa)	IMDG (Moře)	IATA (Letectví)
UN číslo	UN 1230	UN 1230	UN 1230	UN 1230	UN 1230
UN název pro přepravu	Methanol	Methanol	Methanol	Methanol	Methanol
Třída nebezpečnosti pro přepravu	3 (domácí) / 3, 6.1 (mezinár.)	3, 6.1	3, 6.1	3, 6.1	3, 6.1
Obalová skupina	II	II	II	II	II
Nebezpečí pro životní prostředí	Ne	Ano	Ano	Ne*	Ano

*Označení znečišťujících látek na moři není pro kontejnery vyžadováno pro ≤ 5 l nebo ≤ 5 kg.

Podle kanadských předpisů pro přepravu nebezpečného zboží (TDG) je methanol klasifikován jako třída 3 s podtřídou 6.1, která uznává jak jeho hořlavé, tak toxické vlastnosti. Ministerstvo dopravy Kanady objasnilo, že na jakoukoli směs obsahující 7,5 obj. % nebo více methanolu se vztahuje podtřída nebezpečnosti 6.1. Tato striktní interpretace zajišťuje, že i zředěné roztoky methanolu si zachovávají status nebezpečného materiálu, i když by se na ně mohla vztahovat výjimka o nebezpečnosti zboží [12, 13].

Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) klasifikuje methanol jako třídu 3 s podtřídou 6.1, která vyžaduje specializovanou certifikaci vozidel, školení řidičů s certifikáty ADR pro nebezpečné věci a příslušné označení vozidel včetně oranžových štítků a kódů nebezpečí. Methanol patří do obalové skupiny II, což označuje látky se střední úrovní nebezpečí, a vyžaduje specializované cisterny vybavené tepelnou izolací, ventilačními systémy a zařízeními proti úniku [14].

Podle Mezinárodního předpisu pro námořní přepravu nebezpečného zboží (IMDG) je methanol klasifikován jako třída 3 s podtřídou 6.1, což vyžaduje odpovídající označování, balení a preventivní opatření během námořní přepravy. Při využití methanolu jako paliva se námořní přeprava řídí Mezinárodním předpisem o bezpečnosti lodí používajících plyn nebo jiná paliva s nízkým bodem vzplanutí (předpis IGF), který stanoví normy pro lodě používající paliva s nízkým bodem vzplanutí s cílem minimalizovat rizika pro plavidla, posádku a životní prostředí. Předpis IGF vyžaduje posouzení rizik, identifikaci nebezpečí a analýzu poruchových režimů během fáze návrhu, aby byla zajištěna ekvivalentní úroveň bezpečnosti jako u konvenčních systémů poháněných ropou [12, 15].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Mezinárodní sdružení leteckých dopravců (IATA) klasifikuje methanol podobně jako mezinárodní normy pro námořní a silniční dopravu a uznává jej jako třídu 3 s podtřídou 6.1. Letecká přeprava methanolu vyžaduje přísné protokoly balení a je omezena pouze na nákladní letadla s maximálními množstevními omezeními a povinným školením o nebezpečném zboží pro personál zapojený do přepravního řetězce [12, 15].

Mezi výhody methanolu v dopravě oproti jiným alternativním palivům patří jeho kapalný stav za normálních podmínek. Nízký bod vzplanutí methanolu, přibližně 11 °C, však vyžaduje udržování inertní atmosféry v nádržích, čehož se obvykle dosahuje pomocí systémů výroby a skladování dusíku. V okolí zásobníků methanolu jsou vyžadovány bezpečnostní zóny o minimální vzdálenosti 25 metrů s omezeními pro zařízení, která by mohla generovat jiskry nebo teplo [16, 17].

Mezi primární bezpečnostní aspekty přepravy methanolu patří prevence požárů prostřednictvím kontroly statické elektřiny, správné uzemnění a propojení přepravního zařízení a použití vhodných materiálů, které odolávají korozivním vlastnostem methanolu. Na rozdíl od benzínu a jiných ropných produktů má methanol elektrickou vodivost větší než 50 pS/m, takže je méně náchylný k hromadění statické elektřiny, ačkoli správné uzemňovací postupy zůstávají nezbytné. Methanol navíc hoří téměř neviditelným plamenem, což vyžaduje specializované infračervené detekční systémy namísto konvenčních detektorů kouře pro monitorování požáru [18, 19].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.2 Silniční přeprava

9.2.1 Vhodnost přepravy

Methanol je slibným nosičem vodíku pro silniční přepravu díky svému kapalnému stavu při okolní teplotě a tlaku. Jeho objemová hustota vodíku je výrazně vyšší než hustota stlačeného nebo zkapalněného vodíku, což umožňuje přepravu většího množství. Methanol je kompatibilní se stávající infrastrukturou pro kapalná paliva a lze jej přepravovat pomocí konvenčních cisteren na chemikálie s typickými kapacitami podobnými jiným kapalným palivům, takže je vhodný pro silniční distribuci [6, 8, 20].

Pro vhodnost využití alternativní formy vodíku ve vodíkové mobilitě je nezbytné počítat s celým řetězcem, včetně výroby methanolu a jeho rozkladu zpět na vodík. Takže i když díky vlastnostem methanolu je samotná přeprava nejlepší variantou, tak pro vodíkovou mobilitu se vyplatí především pro větší množství a vzdálenosti, kde výhody přepravy převáží nad nevýhodami složitosti celého řetězce a ztrátami v jeho jednotlivých částech.

Pro ostrovní řešení není methanol vhodný jako alternativní forma vodíku. Pro úroveň krajů je methanol vhodnější, nicméně jen za předpokladu vysoké spotřeby vodíku. Na národní úrovni je situace podobná jako u krajské úrovně s tím rozdílem, že je více pravděpodobné, že množství vodíku bude vyšší, což zlepšuje využitelnost methanolu jako nosiče vodíku. Na Evropské úrovni je methanol velmi vhodný kvůli dlouhým vzdálenostem a velkému množství, kde již plyný vodík má své limity.

Celkově vzato, fyzikální a chemické vlastnosti methanolu, kompatibilita se stávajícími systémy pro přepravu paliv, relativně nízké náklady na přepravu a zvládnutelný bezpečnostní profil z něj činí vhodného a praktického nosiče vodíku pro silniční dopravu za předpokladu významného rozvoje vodíkové mobility.

9.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Methanol jako nosič vodíku dosáhl vysoké úrovně technologické připravenosti (TRL), která se obecně hodnotí mezi TRL 8 a 9, což naznačuje, že technologie pro jeho výrobu, skladování a silniční přepravu jsou vyspělé a komerčně dostupné. Procesy přeměny energie na methanol byly ověřeny v provozním měřítku a existují průmyslové závody vyrábějící obnovitelný methanol z vodíku a zachyceného CO₂. Na rozdíl od nově vznikajících nosičů těží methanol ze zavedených výrobních metod a dobře rozvinuté logistické infrastruktury [21].

Technologie přepravy a manipulace s methanolem jsou také vyspělé a využívají stávající systémy distribuce paliva a cisterny, což zajišťuje vysokou úroveň technické připravenosti pro silniční dopravu na komerční úrovni. Technologie pro skladování a přepravu methanolu jsou již dnes k dispozici a běžně se používají, což z methanolu činí jednu z nejpokročilejších možností pro přepravu vodíku z hlediska technologické připravenosti.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.2.3 Popis druhu přepravy

Methanol vyniká mezi chemickými nosiči vodíku díky snadné manipulaci s ním jako s kapalinou za okolních podmínek, což nabízí výrazné výhody pro dopravní logistiku ve srovnání s jinými nosiči vodíku. Protože je methanol kapalný při standardní teplotě a tlaku (bod tání: $-98\text{ }^{\circ}\text{C}$, bod varu: $64,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), nevyžaduje pro stabilizaci během přepravy vysokotlaký obal ani kryogenní systémy, což má za následek nižší náklady na infrastrukturu a provoz a širokou kompatibilitu se stávajícími systémy distribuce kapalných paliv. Cisterny na methanol jsou navrženy v souladu s mezinárodními bezpečnostními předpisy pro přepravu nebezpečných kapalin, jako je Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR).

Methanol se běžně přepravuje pomocí standardní infrastruktury pro kapalný náklad v silničních cisternách nebo cisternových ISO kontejnerech. Silniční přeprava methanolu cisternami (Obrázek 9.1) je regulována kvůli klasifikaci methanolu jako nebezpečné látky. Methanol patří do třídy nebezpečnosti 3 (hořlavé kapaliny) podle Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) s číslem UN 1230 a obalovou skupinou II, což označuje střední stupeň nebezpečí. Pro přepravu methanolu se používají specializované cisterny (autocisterny). Tyto cisterny musí být certifikovány pro přepravu nebezpečných látek, splňovat požadavky ADR a být vybaveny tepelnou izolací pro udržení stabilní teploty nákladu během přepravy. Cisterny jsou vyrobeny z nerezové oceli pro chemickou odolnost, jsou hermeticky uzavřeny, aby se zabránilo únikům, a jsou vybaveny bezpečnostními zařízeními, jako jsou pojistné a dýchací ventily pro regulaci tlaku. Cisterny se plní na 90–95 % objemu podle rozdílu teploty methanolu při plnění a přepravě, aby se umožnila tepelná roztažnost [22].



OBRÁZEK 9.1: PŘEPRAVA METHANOLU CISTERNOU [23].

Cisternové ISO kontejnery, které splňují normy, jako je ISO 1496-3, jsou rozšířené pro pozemní i námořní přepravu. Tyto nádrže jsou obvykle vyrobeny z austenitické nerezové oceli, aby se zabránilo korozi vyvolané methanolem a aby se zachovala kvalita produktu. Typické technické specifikace pro přepravní nádrže na methanol jsou uvedeny v Tabulka 9.3 [24-27].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 9.3: TECHNICKÁ SPECIFIKACE BĚŽNÝCH PŘEPRAVNÍCH NÁDRŽÍ PRO METHANOL.

Parametr	Specifikace
Materiál	Nerezová ocel (AISI 316/304)
Kapacita (silnice/ISO tank)	25–40 m ³ (silnice); 20–45 m ³ (ISO)
Jmenovitý tlak	Atmosférický až nízký tlak (do 6 bar)
Teplotní rozsah	-40 °C až +65 °C
Normy	ISO 1496-3, IMDG, ADR, DOT, UIC

Další možností je přeprava sudů s methanolem (Obrázek 9.2). Přeprava obvykle zahrnuje kovové sudy o objemu 200 l nebo menší nádoby, jako jsou plastové kanystry o objemu 20 l. Tyto nádoby musí splňovat přísné standardy pro balení, aby byla zajištěna bezpečnost během přepravy. Plastové nádoby se obecně nedoporučují pro dlouhodobé skladování nebo přepravu, protože methanol může degradovat plasty. Klíčový předpis ADR upravuje způsob silniční přepravy, spolu s požadavky na balení, označování, umístění štítků a školení řidičů. Přeprava sudů s methanolem v osobních vozidlech je zákonem zakázána. Bezpečnost během přepravy zahrnuje také kontrolu statické elektřiny prostřednictvím správného propojení a uzemnění. Methanol jako polární kapalina obecně příliš nehromadí statický náboj, ale přesto jsou nutná opatření, aby se zabránilo vznícení [28].

Manipulace s velkými sudy vyžaduje mechanické zařízení, jako jsou vysokozdvizné vozíky nebo kladkostroje, protože 200 l sud naplněný na 80 % objemu váží asi 130 kg. Bezpečné techniky přepravy zahrnují pečlivé umístění, aby se zabránilo rozlití. Páry methanolu jsou toxické a hořlavé, proto jsou zásadní ochranná opatření, jako je větrání a zachycení rozlitého materiálu. Skladovací a přepravní prostory by měly být vybaveny systémy detekce a hašení požáru. Celkově vzato, přeprava sudů s methanolem vyžaduje dodržování podrobných bezpečnostních norem a předpisů ke zmírnění zdravotních a požárních rizik a zároveň k zajištění souladu s právními předpisy [28].



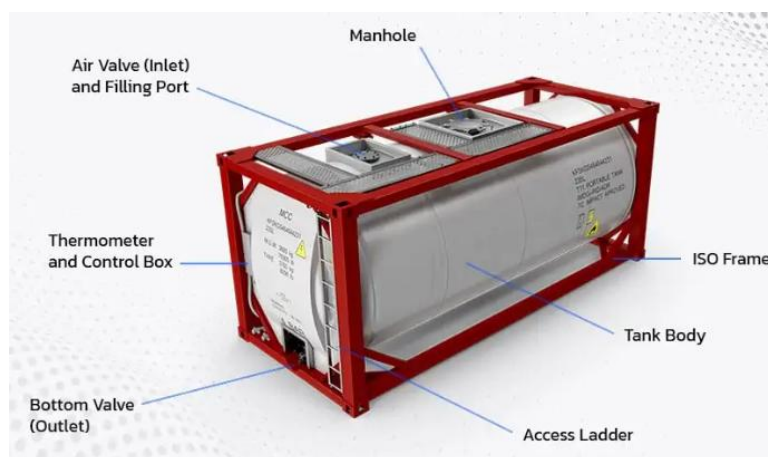
OBRÁZEK 9.2: SUDY NA METHANOL PRO PŘEPRAVU [28].

ISO nádrže (Obrázek 9.3) jsou standardizované, opakovaně použitelné nádoby určené speciálně pro hromadnou přepravu kapalin, včetně nebezpečných chemikálií, jako je methanol, v různých druzích dopravy (silniční, železniční a lodní). Jádrem nádrže je vyrobeno z nerezové oceli, která poskytuje odolnost proti korozi a kontaminaci, což je zásadní pro udržení čistoty methanolu během přepravy.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Tyto nádrže jsou obvykle izolované a mají ochranné vnější povrchy, což pomáhá zachovat integritu kapaliny i za různých podmínek prostředí. Ve srovnání se sudy nabízejí ISO nádrže:

- Vyšší kapacitu: Jedna ISO nádrž pojme až 45 000 l methanolu, což zvyšuje účinnost a snižuje potřebu více menších obalů.
- Vynikající bezpečnost: Prvky, jako jsou zesílené stěny, specializované pojistné ventily a bezpečné obložení, minimalizují riziko úniků nebo rozlití, což je nezbytné při přepravě těkavých produktů, jako je methanol.
- Intermodální flexibilita: ISO nádrže jsou vyrobeny podle univerzálních standardů, což umožňuje bezproblémové přeložení mezi silniční, železniční a lodní přepravou bez vykládání nákladu, čímž se snižují rizika a náklady spojené s manipulací.
- Environmentální přínosy: ISO nádrže jsou opakovaně použitelné pro více než sto cest a eliminují odpad z jednorázových obalů, což z nich činí udržitelnější variantu pro logistiku.



OBRÁZEK 9.3: STRUKTURA ISO NÁDRŽE [29].

Porovnání ISO nádrží, flexitanků a sudů je uvedeno v Tabulka 9.4 [29].

TABULKA 9.4: POROVNÁNÍ ISO NÁDRŽÍ, FLEXITANKŮ A SUDŮ.

Faktor	ISO tanky	Flexitanky	Sudy
Nákladová efektivita	Střední	Nízká	Vysoká
Opakovatelnost	100+ cest	Jednorázové	5–10 použití
Bezpečnost	Vysoká (odolný proti rozlití)	Střední	Nízká (náchylný k únikům)
Ochrana nákladu	Vynikající	Střední	Nízká
Kapacita	Až 45 000 l	Až 24 000 l	Obvykle 200 l na sud; pro velké objemy je potřeba více sudů.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.2.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava methanolu zahrnuje přísná bezpečnostní opatření kvůli jeho vysoké hořlavosti, toxicitě a rizikům pro životní prostředí. Bod vzplanutí methanolu je nízký (kolem 11 °C), takže je snadno vznětlivý a schopen tvořit výbušné směsi par se vzduchem o koncentraci mezi 6 obj. % a 36 obj. %. Páry methanolu jsou navíc těžší než vzduch, což může vést k hromadění par v nízko položených nebo uzavřených prostorách, a zvyšovat tak nebezpečí požáru a výbuchu.

Při manipulaci a převozu methanolu je potřeba dodržovat základní bezpečnostní pravidla:

1. Dodržování norem pro přepravu nebezpečných chemikálií, jako je Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR), která klasifikuje methanol jako hořlavou kapalinu třídy 3 se specifickými požadavky na vozidla a balení.
2. Používání specializovaných cisternových vozů nebo kontejnerů certifikovaných pro přepravu methanolu, vybavených tepelnou izolací, systémem pro rekuperaci par a protipožárními systémy. Pro označení rizik hořlavosti a toxicity je povinné řádné označení, včetně štítků s uvedením třídy nebezpečnosti a identifikačních čísel OSN.
3. Řidiči musí mít osvědčení ADR pro přepravu nebezpečného zboží, aby zajistili správnou manipulaci, znalosti o reakci na mimořádné události a dodržování bezpečnostních protokolů během nakládky, přepravy a vykládky.
4. Přísná kontrola zdrojů zapálení během přepravy, skladování a manipulace. To zahrnuje zákaz kouření, používání elektrických zařízení v nevýbušném provedení, uzemnění a používání nejiskřivého nářadí.
5. Osobní ochranné prostředky (OOP) pro personál manipulující s methanolem by měly zahrnovat chemicky odolné rukavice (např. nitrilové nebo neoprenové), ochranné brýle nebo štíty na obličej a antistatický nehořlavý ochranný oděv. V špatně větraných prostorách nebo během zásahu při úniku může být nutná ochrana dýchacích cest.
6. Při netěsnosti nebo rozliti methanolu je nezbytné zvládat rychlou evakuaci oblasti, odstranění zdrojů vznícení a omezení úniku pomocí inertních adsorbentů, jako je písek nebo zemina. Rozliti většího množství methanolu by mělo být nařazeno a ohrazeno pro bezpečnou likvidaci. Požáry methanolu vyžadují alkoholu odolnou vodnou pěnu tvořící film (AR-AFFF) a suché chemické hasicí přístroje.
7. Monitorování teploty a prevence přehřívání jsou nezbytné, aby se zabránilo nárůstu tlaku par a následným únikům nebo poruchám. Odvzdušňovací systémy nádrží musí bezpečně zajišťovat nouzové uvolnění par.
8. Nakládka a vykládka by měla probíhat ve vyhrazených bezpečných zónách mimo veřejná prostranství a měla by být prováděna vyškoleným personálem se specializovaným vybavením, aby se minimalizovala rizika a zabránilo se poškození kontejneru.

Tato opatření jsou zásadní pro zmírnění značných rizik, která methanol představuje pro lidské zdraví a bezpečnost, a také pro prevenci kontaminace životního prostředí během nakládky, přepravy a vykládky [19, 22, 30].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.2.5 Legislativní omezení

Přeprava methanolu je regulována kvůli jeho klasifikaci jako nebezpečné látky. Podle mezinárodních a národních předpisů je methanolu přiřazeno číslo UN 1230 a je klasifikován jako hořlavá kapalina třídy 3 s vedlejším nebezpečím toxicity (obalová skupina II), což odráží jeho střední úroveň nebezpečí během přepravy. Silniční přeprava spadá pod Evropskou dohodu o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR), která stanoví podrobné požadavky na balení, specifikace vozidel a certifikace řidičů, aby byla zajištěna bezpečná manipulace a minimalizována rizika spojená s hořlavostí a toxicitou methanolu. Přeprava methanolu se řídí mezinárodními a národními předpisy, včetně vzorových předpisů OSN pro přepravu nebezpečných věcí (UN TDG), ADR pro evropskou silniční dopravu a předpisů Ministerstva dopravy USA (DOT), které zajišťují harmonizované bezpečnostní požadavky napříč jurisdikcemi.

ADR nařizuje, aby byl methanol přepravován ve specializovaných, certifikovaných cisternách vybavených tepelnou izolací, ventilačními systémy a bezpečnostními zařízeními, které zabraňují únikům a požárům. Cisterny a kontejnery musí být navíc opatřeny příslušným označením nebezpečnosti, včetně oranžových štítků a kódů nebezpečnosti označujících třídu nákladu, zatímco řidiči musí mít certifikáty ADR prokazující školení v oblasti přepravy nebezpečného zboží.

Dokumentace během přepravy methanolu musí obsahovat nouzové postupy, certifikáty o schválení vozidla potvrzující splnění požadavků ADR a certifikáty kvality nákladu pro specifické druhy methanolu, jako je palivo nebo farmaceutická kvalita. Řidiči musí také mít u sebe platná lékařská osvědčení a doklad o školení v oblasti přepravy nebezpečného zboží.

Hořlavá a toxická povaha methanolu vyžaduje také dodržování bezpečnostních předpisů na pracovišti, požárních předpisů a předpisů na ochranu životního prostředí během přepravy. Provozovatelé musí zajistit neporušenost obalů, dokumentaci, označení vozidel bezpečnostními štítky a certifikaci řidičů. Celkově tyto legislativní rámce podporují bezpečnou a regulovanou silniční přepravu methanolu. Za dodržení těchto pravidel lze bez problémů přepravovat methanol po silnici [22, 31-33].

9.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Silniční přeprava methanolu v České republice je proveditelná a již nyní je podporována stávajícími logistickými a regulačními postupy, ačkoli ve srovnání s přepravou jiných paliv zůstává methanol minoritní. V zemi působí provozovatelé poskytující služby silniční přepravy cisternami, které plně splňují bezpečnostní požadavky pro přepravu methanolu, což může zajistit bezpečnou přepravu v rámci České republiky, která může být využita i v rámci vodíkové mobility.

Trh s methanolem v ČR v posledních letech vykazuje mírný růst a stabilizaci, což naznačuje stabilní poptávku. V případě rozvoje vodíkové mobility a využití methanolu jako alternativní formy lze investovat do silniční dopravní infrastruktury, a tím zvýšit přepravní kapacity. Česká logistika a silniční sítě jsou schopny podporovat distribuci methanolu a propojovat chemické výrobní závody s koncovými uživateli v celé zemi a sousedními regiony. Silniční doprava nabízí flexibilitu, která je výhodná pro variabilní poptávku a dodávky menších množství, a to i přes vyšší jednotkové náklady na přepravu ve srovnání s jiným typem přepravy. Vzhledem k centrální poloze ČR v Evropě se silniční

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

doprava může také napojit na přeshraniční obchodní trasy a propojit dodávky methanolu ze sousedních zemí nebo exportních trhů [34].

Využití methanolu pro vodíkovou mobilitu v ČR má jediný problém, kterým je absence výroby methanolu na území ČR. Pro rozvoj tohoto segmentu by byly potřeba velké investice na výrobu a stáčecí terminály. Další limitující prvek je výroba e-methanolu z obnovitelného vodíku, která není v podmínkách ČR optimální. Nicméně poloha ČR je vhodná pro import levnějšího methanolu ze zahraničí do distribučních center. V těchto centrech by šlo za relativně nízkých nákladů vybudovat mísení methanolu s vodou pro vytvoření směsi vhodné k rozkladu na vodík. Tato směs by mohla být přepravována v rámci ČR do míst s decentralizovaným využitím vodíku z methanolu.

9.2.7 Energetická náročnost

Přeprava methanolu po silnici s sebou nese specifické energetické nároky úzce spojené se zdrojem energie vozidla, zejména u diesellových tahačů, podobně jako u jiných kapalných paliv. Diesellové tahače obvykle spotřebují 30 l/100 km, přičemž výhřevnost nafty je kolem 44 MJ/kg (přibližně 12,2 kWh/kg nebo 10,2 kWh/l). To odpovídá spotřebě energie nákladního vozidla zhruba 3 kWh/km. Při typické kapacitě cisterny na methanol 30 m³, naplnění na 95 % a hustotě methanolu přibližně 792 kg/m³ může nákladní vozidlo přepravit přibližně 22 500 kg methanolu na jednu cestu. To znamená energetickou spotřebu na 100 km přibližně 0,013 kWh na kg methanolu. Vzhledem k tomu, že methanol je nosičem vodíku, kde 1 kg methanolu obsahuje zhruba 0,125 kg vodíku, je spotřeba energie na 100 km přibližně 0,11 kWh na kg vodíku.

S přepočtem na vodík je nutné si ještě uvědomit, že pro rozklad methanolu na vodík je potřeba voda, ze které také vzniká vodík. Takže při přepravě čistého methanolu a následném přidání vody získáme více vodíku, než je v samotném methanolu. Nicméně kvůli ztrátám při reformování je získaného vodíku jen o trochu více, takže energetická spotřeba na převoz je jen o trochu nižší. V případě přepravy směsi methanolu s vodou pro reformování je energetická spotřeba na 100 km asi 0,14 kWh na kg vodíku.

Pro nakládku a vykládku methanolu se používají čerpadla nebo gravitační přepouštění samospádem. Kapalná paliva se nejčastěji vykládají samospádem do podzemních zásobníků. Toto je i nejpravděpodobnější případ pro vykládku methanolu. Tento způsob nemá energetickou spotřebu. V případě nakládky nebo v ojedinělých případech vykládky má na energetickou spotřebu vliv především čerpadlo, které čerpá kapalinu. Spotřeba čerpadla je velmi nízká, o několik řádů nižší než v případě přepravy. Konkrétní hodnota závisí na výšce čerpání, ale přibližně se může pohybovat do 0,05 kWh/t methanolu, což je zanedbatelná hodnota oproti přepravě.

9.2.8 Ekonomické aspekty

Silniční doprava methanolu má ve srovnání s jinými nosiči vodíku, jako je amoniak nebo čistý vodík, odlišné ekonomické vlastnosti. Kapalný stav methanolu při okolní teplotě a tlaku poskytuje značnou výhodu z hlediska hustoty energie a manipulačních nákladů, což usnadňuje přepravu pomocí stávajících cisternových vozů bez nutnosti rozsáhlých úprav. To snižuje kapitálové výdaje (CAPEX)

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

a provozní náklady (OPEX) související s úpravami infrastruktury, a tím i celkové náklady na silniční dopravu.

Nákladová efektivita silniční přepravy methanolu je silně ovlivněna přepravovaným objemem a vzdáleností. Obecně je přeprava kamiony ekonomicky životaschopná na relativně krátké a střední vzdálenosti, obvykle ve stovkách kilometrů, což odpovídá distribučním modelům, které zahrnují konečné dodání koncovým uživatelům nebo místním skladům. U delších vzdáleností nebo větších objemů se zvyšují náklady na jednotku energie, což činí silniční přepravu méně konkurenceschopnou ve srovnání se železniční, lodní nebo potrubní přepravou.

Náklady na přepravu methanolu po silnici jsou podle literatury asi 0,28 €/tkm. Komerční nabídky pro převoz methanolu ze zahraničí jsou asi 60 €/t z Polska, 80 €/t z Německa a 110 €/t z Nizozemska nebo Španělska. Tyto ceny odpovídají již zaběhlé logistice s konkurencí. V případě rozvoje vodíkové mobility v ČR bude záviset na využití cisteren, tedy na množství přepravovaného methanolu.

9.2.9 Ekologické aspekty

Methanol se vyznačuje specifickými ekologickými aspekty, které ovlivňují bezpečnost silniční dopravy a dopad na životní prostředí. Methanol je těkavá, bezbarvá kapalina s nízkým profilem toxicity, která je rychle biologicky odbouratelná v environmentálních médiích, jako je půda, voda a vzduch, a představuje tak nízké dlouhodobé riziko pro životní prostředí.

Mísitelnost methanolu s vodou vede k rychlému zředění po úniku a jeho biodegradace probíhá efektivně za různých redoxních podmínek, což minimalizuje poškození ekosystému ve srovnání s tradičními fosilními palivy, jako je benzín a nafta, které obsahují rezistentnější škodlivé složky, jako je benzen. V případě náhodného úniku během silniční dopravy však může být methanol nebezpečný kvůli své hořlavosti a toxicitě při vysokých expozicích. Riziko úniku se zvyšuje s rostoucí poptávkou a objemem methanolu přepravovaného po celém světě.

Methanol přepravovaný nákladními vozidly s naftovým motorem nepřímo přispívá k emisím CO₂ úměrně spotřebě nafty během přepravy. Zpráva Institutu pro methanol o uhlíkové stopě z roku 2022 uvádí emisní faktor pro silniční kamionovou dopravu přibližně 95,9 g CO₂ ekv. na tunokilometr [35]. Emise nafty jsou podle Evropské legislativy 95,1 g CO₂/MJ = 3,95 kg CO₂/kg = 3,3 kg CO₂/l. Se spotřebou tahače 30 l/100 km je emisní stopa přepravy 1 kg CO₂/km. V přepočtu na přepravované množství jsou emise 4,4 g CO₂/100 km/kg methanolu, což je asi 35,6 g CO₂/100 km/kg H₂. V případě započtení vody pro reakci na rozklad methanolu by emise byly o trochu nižší a v případě přepravy přímo směsi methanolu s vodou by byly emise o trochu vyšší.

Emise při nakládce jsou spojeny především s emisemi elektřiny spotřebované pro pohon čerpadla. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, tato spotřeba je zanedbatelná oproti přepravě. Vykládka je obvykle realizována pomocí samospádu, takže emise jsou nulové.

Významné emise jsou spojeny také s další částí řetězce, kde při rozkladu methanolu na vodík vzniká CO₂. V případě přímého využití methanolu ve vozidlech také vzniká CO₂ ze spalování. Nicméně při využití CO₂ z atmosféry při výrobě methanolu se jedná o uzavřený cyklus, který nepřidává emise.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.2.10 Normy, oborové předpisy

Silniční přeprava methanolu je přísně regulována kvůli jeho klasifikaci jako nebezpečné a hořlavé kapaliny. Methanol je podle Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí (ADR) zařazen do kategorie hořlavých kapalin třídy 3 a spadá do obalové skupiny II, což značí střední úroveň nebezpečí. Jeho přeprava vyžaduje dodržování komplexních norem, které zajišťují bezpečnost od manipulace až po dodávku. Mezi klíčové předpisy a normy platné pro přepravu methanolu patří:

ADR (Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí) – Upravuje přepravu methanolu jako nebezpečného zboží a stanoví specifické požadavky na cisterny, balení, označování a kvalifikaci řidičů.

49 CFR Parts 171-180 (U.S. Code of Federal Regulations) – Zahrnuje specifikace pro balení, cisternová vozidla a bezpečnostní normy pro přepravu, které musí být splněny pro přepravu methanolu v rámci Spojených států.

Doporučení OSN pro přepravu nebezpečného zboží (Vzorové předpisy OSN) – Poskytuje globální pokyny přijaté do regionálních a národních právních předpisů pro standardizaci klasifikace, balení a přepravy methanolu.

TPED (Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních) – Zabývá se bezpečnostními normami pro tlaková zařízení používaná při přepravě methanolu.

ISO 9001 (Systémy řízení kvality) – Mnoho výrobců methanolu a přepravních společností zavádí normu ISO 9001, aby udržovaly konzistentní kontroly kvality v logistických a přepravních procesech.

Standardy specifikace nádrží – Přeprava methanolu se spoléhá na specializované cisternové vozy vyrobené z nerezové oceli (L4BH) a splňující normy pro tepelnou izolaci a prevenci úniků. Tyto nádrže jsou navrženy tak, aby se naplnily na 90–95 % objemu, aby se zohlednila tepelná roztažnost během přepravy.

Tato nařízení kolektivně zahrnují fyzická, procedurální a administrativní opatření nezbytná pro bezpečnou a vyhovující silniční přepravu methanolu. Přísné dodržování předpisů zajišťuje zmírnění rizik spojených s nebezpečím požáru, expozicí životního prostředí a dopady na lidské zdraví spojené s únikem methanolu nebo nehodami.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.3 Drážní přeprava

9.3.1 Vhodnost přepravy

Vhodnost methanolu jako nosiče vodíku vyplývá především z jeho kapalného stavu při okolní teplotě a tlaku, což ve srovnání s plyným vodíkem zjednodušuje manipulaci a skladování. Železniční cisternové vozy určené pro methanol musí splňovat přísné bezpečnostní normy a normy pro kompatibilitu materiálů jako v případě silniční přepravy. Železniční přeprava methanolu může využívat stávající železniční infrastrukturu. Díky větším přepravovaným objemům než u silniční přepravy umožňuje drážní přeprava kompaktní a ekonomickou přepravu železničními cisternami. To usnadňuje přepravu velkého množství vodíku prostřednictvím methanolu na velké vzdálenosti.

Drážní přeprava methanolu není vhodná pro ostrovní řešení, kde je vhodnější využít silniční nebo potrubní přepravu. Pro úroveň krajů není drážní přeprava vhodná ve spojení s vodíkovou mobilitou. V případě přímého využití methanolu v chemickém průmyslu by i na úrovni krajů byla drážní přeprava vhodná. Na národní úrovni je drážní přeprava methanolu vhodná. Jelikož u této přepravy je limitace kolejemi, je přeprava vhodnější do chemických závodů nebo distribučních center, kde se může methanol přímo využít, naložit do silničních cisteren, smíchat s vodou a vyrobit vodík nebo směs naložit do silničních cisteren. U drážní přepravy je vhodnější přepravovat jen čistý methanol. Pro úroveň EU je drážní přeprava velmi vhodná. Platí to samé, co pro národní úroveň, a navíc na větší vzdálenosti se lépe využije výhoda přepravy velkého množství najednou. Další výhodou může být přeprava ze zemí s lepšími geografickými podmínkami, což může znamenat nižší cenu methanolu.

9.3.2 Úroveň technologické připravenosti

Železniční doprava methanolu dosáhla značné úrovně technologické připravenosti, podpořené zavedenými přepravními a bezpečnostními technologiemi pro manipulaci s kapalnými palivy, jako je methanol. Železniční přeprava methanolu využívá stávající technologie cisternových vozů přizpůsobených jedinečným vlastnostem methanolu, včetně jeho hořlavosti, toxicity a korozivních vlastností. Železniční vozy pro přepravu methanolu jsou navrženy s použitím materiálů a bezpečnostních systémů, které zabraňují korozi a zvládají široké limity hořlavosti, což je zásadní pro bezpečný provoz.

Úroveň technologické připravenosti (TRL) pro methanol jako nosič vodíku je obecně vysoká, často mezi 8 a 9, což odráží vyspělé a komerčně použitelné technologie v celém hodnotovém řetězci výroby, skladování a distribuce. To zahrnuje i železniční dopravu, kde cisternové vozy vyrobené pro methanol splňují přísné bezpečnostní normy a regulační rámce, což zajišťuje spolehlivost a komerční životaschopnost. Železniční dopravní infrastruktura a provoz pro methanol těží ze stávajících logistických systémů používaných pro přepravu chemikálií, což z něj činí snadno dostupnou možnost pro velkoobjemovou distribuci methanolu jako nosiče vodíku.

Bezpečnostní předpisy a pravidla klasifikačních společností poskytují pokyny a požadavky, které musí železniční systémy manipulující s methanolem dodržovat. Patří mezi ně posouzení rizik

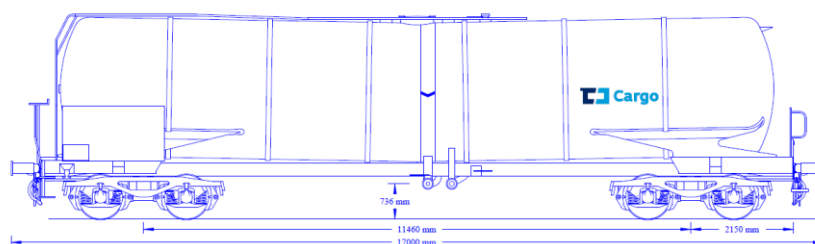
Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

a analýza nebezpečí pro řízení bezpečnosti v celém přepravním řetězci, čímž se posiluje provozní připravenost pro železniční přepravu methanolu [36, 37].

9.3.3 Popis druhu přepravy

Methanol se přepravuje po železnici v kapalné formě za atmosférického tlaku pomocí speciálně konstruovaných železničních cisteren určených pro přepravu hořlavých chemikálií. Železniční cisterny pro methanol jsou konstruovány na nízký tlak (max. 6 bar). Železniční cisterny jsou obvykle vyrobeny z nerezové oceli (AISI 316/304), aby se zabránilo korozi, jelikož methanol je vodivé polární rozpouštědlo, které může způsobit galvanickou korozi v nekompatibilních materiálech [38, 39].

Samotné železniční cisterny jsou navrženy tak, aby se udržoval stabilní tlak i při působení tepelné roztažnosti během přepravy, podobně jako při přepravě ethanolu, benzínu, leteckého paliva a dalších destilátů. Cisternové vozy mají obvykle objem 50–115 m³ (viz Obrázek 9.4). Všechny cisterny musí být vybaveny přetlakovými ventily. Pro vykládku methanolu se nikdy nesmí používat přetlakování nádrží vzduchem. Methanol je korozivní pro slitiny uhlíkové oceli v přítomnosti vlhkosti nebo vodních par. Z tohoto důvodu je vhodné inertizovat volný prostor nad methanolem. Methanol lze nakládat nebo vykládat pomocí nakládacího ramene nebo chemických hadic se suchými odpojovacími armaturami [40].



OBRAZEK 9.4: ŽELEZNIČNÍ CISTERNA PRO KAPALINY [41].

Methanol může být převážen také na intermodálních vozech v ISO nádržích (Obrázek 9.3). Tato varianta je vhodná při kombinaci různých druhů přepravy. Výhodou je snadné přeložení bez nutnosti vykládky a nakládky methanolu. Nevýhodou je nižší kapacita. Proto není vhodné ISO nádrže využívat pro aplikace, kde se ze železniční přepravy methanol vykládá pro využití nebo případné mísení s vodou.

9.3.4 Bezpečnostní opatření

Roztoky methanolu s vodou jsou hořlavé od 26 obj. %. Methanol se hůře vznítí než benzin a hoří pomaleji s menší tepelnou intenzitou. Koncentrace methanolových par ve vzduchu musí být pro hoření alespoň 6 %. Plameny methanolu jsou za jasného slunečního světla téměř neviditelné. Nicméně lze detekovat generované teplo a plameny a kouř z jiných materiálů zapálených požárem methanolu. Na hašení požáru methanolu je vhodné využít alkoholu odolnou vodnou pěnu tvořící film (AR-AFFF) a suché chemické hasicí přístroje. Při hašení je vhodné také využít velké množství vody, která odvádí teplo a ředí methanol do bodu, kdy lze požár snadno uhasit [36]. Přímé požití nebo vdechnutí více než 10 ml může způsobit trvalou slepotu, otravu centrálního nervového systému a smrt. Přípustný expoziční limit je 200 ppm za 8 h. Proto manipulace s methanolem musí

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

probíhat v dobře větraných prostorech. Při nakládce a vykládce musí být cisterna uzemněna a přísně se sleduje průtok. V místě plnění by měly být zachytné vany a k dispozici by měla být nouzová sprcha.

Železniční přeprava methanolu je považována za relativně bezpečný způsob dopravy, pokud jsou dodržovány příslušné bezpečnostní protokoly. Podle Institutu pro methanol je železniční přeprava považována za bezpečnou, pokud je methanol obsažen v cisterně. Statistické údaje ze studií přepravy nebezpečných materiálů ukazují, že více než 99,9 % nebezpečných materiálů přepravovaných po železnici dosáhne svého cíle bez úniků souvisejících s nehodou. V komplexní analýze nehod při přepravě nebezpečných chemikálií, která zahrnovala více než 13 000 incidentů, byl methanol konkrétně identifikován u několika velkých železničních nehod, včetně nehody „3.1“ v tunelu Shanxi Jincheng Yanhou (Čína) v roce 2014, která si vyžádala 40 úmrtí, a nehody „8.26“ v Shaanxi (Čína) v roce 2012, která si vyžádala 36 úmrtí [42].

Aby se předešlo poruchám a byla zajištěna bezpečná přeprava, mezi hlavní bezpečnostní opatření pro železniční přepravu methanolu patří:

1. Soulad s předpisy: Splnění požadavků mezinárodních předpisů, včetně Předpisu o mezinárodní železniční přepravě nebezpečných věcí (RID), který klasifikuje methanol podle UN 1230 jako třídu 3 (hořlavá kapalina) s vedlejšími nebezpečnostmi třídy 6.1 (toxická látka). Všechny železniční vozy musí splňovat klasifikační kód FT1 podle předpisů RID [12, 43].
2. Požadavky na tlakové zkoušky: Cisternové vozy musí podléhat pravidelným tlakovým zkouškám. Pro přepravu methanolu pomocí cisternových vozů DOT-111 jsou zkušební tlaky obvykle asi 7 bar(g), což představuje přibližně 20 % tlaku, který roztrhne cisternu. Moderní cisternové vozy DOT-117 se vyznačují zvýšenou bezpečností díky normalizovaným ocelovým plášťům o tloušťce 14,3 mm a přetlakovým systémem na 11,4 bar(g) [44].
3. Omezení nakládky: Aby se zabránilo problémům s tepelnou roztažností, cisternové vozy s methanolem se obvykle plní na 90–95 % objemu, aby se umožnila tepelná roztažnost během přepravy. Kapalný stav methanolu při okolní teplotě zjednodušuje postupy nakládky, ale zároveň vyžaduje pečlivé řízení kapacity.
4. Systémy pro uvolnění tlaku: Cisternové vozy musí být vybaveny vhodnými zařízeními pro snížení tlaku navrženými tak, aby vyrovnávaly tepelnou roztažnost a zabránily přetlaku. U hořlavých kapalin, jako je methanol (třída 3), jsou vyžadována tato zařízení s opětovným uzavřením s nastaveným tlakem buď na 100 % zkušební tlaku cisterny, nebo na 33 % tlaku způsobující roztržení cisterny podle toho, která hodnota je vyšší [44].
5. Kompatibilita materiálů: Cisternové vozy musí být vyrobeny z vhodných materiálů, aby se zabránilo galvanické korozi. Methanol, jakožto vodivé polární rozpouštědlo, vyžaduje konstrukci z nerezové oceli (obvykle AISI 316/304) [36].
6. Identifikace nebezpečí: Všechny cisterny musí být opatřeny správnými štítky s uvedením třídy nebezpečí 3 a 6.1 spolu s identifikačními čísly UN 1230, jak vyžadují předpisy RID [12, 43].
7. Příprava na mimořádné události: Nakládku, přepravu a vykládku musí provádět vyškolený personál s použitím specializovaného vybavení a dodržováním přísných protokolů. Personál musí vědět, jak postupovat v případě mimořádné události. Záchranáři si musí být vědomi širokého

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

rozsahu hořlavosti methanolu (6–36,5 % ve vzduchu) a potenciálu přenosu par ke zdrojům vznícení [36].

8. Provozní bezpečnostní zóny: Nakládka a vykládka by měly probíhat ve vyhrazených bezpečnostních zónách s vhodnými systémy detekce a hašení požáru vzhledem k riziku hořlavosti a toxicity methanolu [36].
9. Ochrana ventilů a armatur: Cisternové vozy jsou vybaveny ochrannými kryty a vhodnými ventilovými systémy, aby se zabránilo poškození během přepravy. Spodní výpusti jsou u cisteren na methanol obvykle zakázány, aby se eliminovala potenciální místa úniku [36].

9.3.5 Legislativní omezení

Přeprava methanolu je regulována jako přeprava nebezpečných látek s označením UN 1230 a je klasifikována jako třída 3 (hořlavá kapalina) s podtřídou 6.1 (toxická látka) podle mezinárodních předpisů. Železniční přeprava methanolu se řídí požadavky předpisů týkajících se návrhu a konstrukce, jako je například Předpis o mezinárodní železniční přepravě nebezpečných věcí (RID) [43]. Podle předpisů RID je methanolu přiřazen klasifikační kód FT1, což označuje hořlavou kapalinu s toxicitou. Přeprava probíhá za atmosférického až nízkého tlaku (max. do 6 bar) v důsledku kapalného stavu methanolu při okolní teplotě a tlaku. Vhodný provozní teplotní rozsah pro železniční přepravu methanolu je obvykle od -40 °C do +65 °C, přičemž materiály cisteren jsou navrženy tak, aby odolaly tepelné roztažnosti a smršťování během přepravy [45].

Kompatibilní materiály pro konstrukci cisteren pro přepravu methanolu jsou specifikovány tak, aby zabránily galvanické korozi, přičemž nerezová ocel (AISI 316/304) je preferovaným materiálem. Cisterny z uhlíkové oceli lze použít, ale vyžadují ochranné povlaky nebo obložení, aby se zabránilo korozi. Pokyny pro kompatibilitu Institutu pro methanol specifikují, že austenitická nerezová ocel řady 300 poskytuje optimální odolnost proti korozi pro provoz s methanolem. Konstrukce nádrží musí splňovat příslušné normy pro materiály a musí být pravidelně kontrolována, aby se odhalily povrchové praskliny nebo poškození korozí [39].

Pokud jsou splněny tyto regulační požadavky, včetně správné specifikace cisterny (kód cisterny L4BH podle RID), vhodného výběru materiálu, označení nebezpečnostními štítky třídy 3 a 6.1 a souladu se zvláštními ustanoveními 279 pro přepravu methanolu, neexistují pro železniční přepravu methanolu žádná významná omezení. Methanol je považován za zavedenou komoditní chemikálii s rozvinutou dopravní infrastrukturou, což umožňuje snadnou přepravu po železnici, pokud jsou zavedena řádná bezpečnostní a regulační opatření [43, 46].

9.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Železniční přeprava methanolu je v České republice relevantní, a to díky rozšiřující se železniční infrastruktuře země a její centrální poloze v rámci evropských sítí chemické logistiky. Methanol se dováží a distribuuje po celé České republice a sousedních zemích, kde železniční doprava umožňuje efektivní přepravu velkoobjemového zboží na dlouhé vzdálenosti. Flexibilita a kapacita železničních sítí činí z železniční dopravy proveditelné řešení pro distribuci methanolu, zejména pro velkoobjemové průmyslové uživatele nebo distribuční centra [47].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Pro logistiku methanolu železniční dopravou se obvykle využívají cisterny od 50 do 115 m³, které jsou kompatibilní s evropskými železničními standardy. Železniční dopravci, jako je ČD Cargo, poskytují specializované služby cisternových vozů plně v souladu s bezpečnostními a regulačními požadavky a mohou zajišťovat bezpečnou přepravu methanolu [43, 44]. Tento zavedený rámec železniční dopravy nabízí spolehlivý a nákladově efektivní způsob dodávky methanolu v rámci České republiky, může propojovat výrobní závody, rafinerie a distribuční centra a zároveň může být integrován do širších evropských dodavatelských řetězců [43, 48].

Geografická poloha České republiky v kombinaci s rozvinutou železniční infrastrukturou staví železniční přepravu methanolu do role praktické a efektivní logistiky hlavně v rámci evropských trhů. Pro přepravu ke koncovým uživatelům by bylo vhodné vybudovat distribuční centra, kde by se methanol mohl překládat a případně mísit s vodou na vhodnou směs pro rozklad na vodík.

9.3.7 Energetická náročnost

Přeprava methanolu po železnici vykazuje malé energetické nároky ve srovnání se silniční přepravou, s významným zvýšením účinnosti díky elektrické trakci a velkoobjemové přepravě. Ačkoli specifické studie o energetické náročnosti přepravy methanolu v železniční dopravě jsou omezené, energetická náročnost pro běžnou železniční nákladní dopravu v Evropě poskytuje spolehlivý ukazatel. Typické elektrické lokomotivy spotřebovávají za reálných provozních podmínek přibližně 0,02 kWh na tunokilometr [49].

Reálná spotřeba elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace je asi 1 800 kWh/100 km. V jedné cisterně o objemu 88 m³ lze převážet asi 58 t methanolu na traťové třídě C. I když existují větší cisterny, tak díky limitaci maximální hmotnosti by na této traťové třídě nebyly naplněny více. Za předpokladu převezení až 30 cisteren najednou je převezené množství asi 1 740 t methanolu. Z toho vychází energetická spotřeba na 100 km asi 0,001 kWh/kg methanolu (0,008 kWh/kg H₂). Tato spotřeba je asi poloviční oproti udávané hodnotě výše na tunokilometr. Rozdíl bude nejspíše v odečítané energii z rekuperace a výpočtu pro konkrétní parametry pro přepravu methanolu vs. obecná hodnota pro přepravu nákladu.

9.3.8 Ekonomické aspekty

Železniční přeprava methanolu zahrnuje použití speciálně navržených cisteren k bezpečné přepravě methanolu na střední až dlouhé vzdálenosti, zejména pokud nejsou k dispozici možnosti přepravy potrubím nebo námořní dopravou. Tyto cisterny jsou vyrobeny z nerezové oceli s bezpečnostními prvky, které chrání před hořlavými a toxickými vlastnostmi methanolu a zajišťují bezpečnou manipulaci během nakládky, přepravy a vykládky. Železniční doprava je v Evropě a Severní Americe široce využívána pro distribuci methanolu ve velkém.

Z ekonomického hlediska musí methanolové železniční cisterny splňovat přísné bezpečnostní předpisy, což zvyšuje jak počáteční investice, tak provozní náklady. Během přepravy methanolu po železnici jsou ztráty způsobené odpařováním a úniky minimální díky uzavřené konstrukci systému a kapalnému stavu methanolu za okolních podmínek [19, 40, 46].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Obecně platí, že procesy nakládky a vykládky vyžadují specializované vybavení, včetně průtokoměrů, integrovaných automatizačních ovládacích prvků, systémů statického monitorování uzemnění a pojistných přetlakových ventilů, aby byla zajištěna bezpečná přeprava methanolu mezi skladovacími nádržemi a železničními cisternami [19, 40, 46]. Tyto systémy znamenají značné investiční a provozní náklady, přičemž systémy nakládky/vykládky železničních vagonů představují pro terminály značné výdaje na infrastrukturu. Požadavky na pojištění pro přepravu nebezpečných materiálů bývají navíc vysoké kvůli klasifikaci methanolu do třídy 3 (hořlavý) a třídy 6.1 (toxický) [43], což zvyšuje celkové náklady na přepravu.

Železniční přeprava však nabízí ve srovnání se silniční značné ekonomické výhody díky velkokapacitní přepravě. Cisternové vozy mají obvykle kapacitu 50–115 m³ [50] a lze přepravit až 30 vozů najednou, což podstatně snižuje jednotkové náklady při přepravě na delší vzdálenosti. Náklady na přepravu methanolu po železnici jsou přibližně 0,025 €/tkm, což je výrazně méně než u silniční přepravy [50]. Díky tomu je železnice obzvláště atraktivní pro hromadné zásilky, zejména tam, kde nejsou k dispozici možnosti přepravy potrubím nebo námořní dopravou. Nákladová efektivita se dále zvyšuje se vzdáleností, protože železniční přeprava dokáže efektivně zvládnout velké objemy, zatímco silniční doprava se na delších trasách stává stále dražší.

9.3.9 Ekologické aspekty

Methanol je široce přepravovaná chemická komodita vhodná pro železniční přepravu. Jeho ekologický dopad během železniční přepravy vyplývá z potenciálních emisí během převozu, rizik nehod a provozních úniků během nakládky, přepravy a vykládky. Ačkoli jsou specifické statistické údaje o železničních nehodách s methanolem omezené, studie bezpečnosti dopravy ukazují, že více než 99,9 % nebezpečných materiálů přepravovaných po železnici dosáhne svého místa určení bez úniků souvisejících s nehodou [51]. Železniční doprava je obecně považována za bezpečný způsob přepravy velkých objemů methanolu, pokud jsou dodržovány bezpečnostní postupy.

Náhodné úniky methanolu během železniční přepravy mohou vést především k rozptýlení par a rozlití kapaliny. Studie incidentů s methanolem ukazují, že nehody související s dopravou, ačkoli jsou méně časté než průmyslové incidenty, mohou vést k požáru nebo výbuchu (přibližně 62 % dopravních nehod), rozlití (23 %) nebo jiným scénářům úniku. Úniky par methanolu představují zvláštní výzvu kvůli jejich širokému rozmezí hořlavosti (6–36,5 % ve vzduchu) a potenciálu pro přenos par ke zdrojům zapálení [36]. Při aplikaci normy Mezinárodní elektrotechnické komise jsou vyžadovány značné bezpečnostní vzdálenosti jak z hlediska hořlavosti, tak i nebezpečí toxicity. V nejzávažnějším případě sahají bezpečnostní vzdálenosti až 4,8 m pro hořlavost a 16,1 m pro toxicitu [52].

Ekologické dopady pramení také z provozních emisí z železniční přepravy a závislosti na energetické síti. V Evropské unii se železniční doprava podílí přibližně na 0,5 % celkových emisích v odvětví dopravy [53]. Intenzita emisí se však v jednotlivých zemích výrazně liší v závislosti na skladbě zdrojů výroby elektřiny. V České republice jsou emise z železniční dopravy podstatně vyšší kvůli uhlíkové náročné elektrické síti, kde přibližně 76 % elektřiny pochází z fosilních paliv [54], což má za následek emisní faktory přibližně 477 g CO₂/kWh podle EU legislativy na výpočet úspory emisí, která bere data

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

z roku 2020 a počítá i s nepřímými emisemi. To ostře kontrastuje se zeměmi využívajícími čistší zdroje elektřiny, kde železniční doprava vykazuje v porovnání se silničními alternativami lepší environmentální výkonnost.

Při spotřebě elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace 1 800 kWh/100 km, převozu 58 t methanolu na jeden vůz a převozu 30 cisternových vozů jsou emise z elektrické energie v ČR na 100 km asi 0,49 g CO₂/kg methanolu (3,95 g CO₂/kg H₂). Tyto emise jsou velmi nízké oproti silniční přepravě.

9.3.10 Normy, oborové předpisy

RID (Předpis o mezinárodní železniční přepravě nebezpečných věcí) – Upravuje mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí včetně methanolu podle UN 1230. RID nařizuje pravidla pro konstrukci, klasifikaci a provoz, aby se zajistilo, že cisternové vozy s methanolem minimalizují rizika spojená s hořlavostí a toxicitou během přepravy [43].

ISO 1496-3:2019 (Série 1 Nákladní kontejnery, Specifikace a zkoušení, Část 3: Cisternové kontejnery pro kapaliny, plyny a tlakové suché sypané látky) – Specifikuje požadavky na cisternové kontejnery používané v železniční a intermodální přepravě kapalin včetně methanolu, přičemž zajišťuje trvanlivost, odolnost vůči tlaku a materiálovou kompatibilitu. Konstrukce z nerezové oceli a systémy pro potlačení tlaku musí splňovat tuto normu, aby bylo zaručeno bezpečné udržení během přepravy [55].

Specifikace cisternových vozů DOT-117 (49 CFR části 171–180 (CFR: Code of Federal Regulations)) – V Severní Americe musí methanолоvé železniční cisterny splňovat bezpečnostní požadavky DOT-117 pro cisternové vozy, včetně silnějších ocelových plášťů, krytů podvozku po celé výšce, tepelné izolace a zařízení pro pojistné odtlakování určených k prevenci katastrofických poruch během nehod. Tyto specifikace zvyšují odolnost železničních cisteren při nehodě v případě hořlavých kapalin, jako je methanol [44, 56].

Doporučení OSN pro přepravu nebezpečného zboží (Vzorové předpisy OSN) – Poskytují globálně harmonizované pokyny pro přepravu nebezpečných materiálů, včetně klasifikace, balení a specifikací nádrží pro methanol. Vzorové předpisy OSN podporují regionální adaptace, jako jsou RID a DOT, a vyžadují klasifikaci methanolu jako třídy 3 (hořlavá kapalina) s doplňkovým označením toxicity.

TDG (Předpisy Kanady pro přepravu nebezpečného zboží) – Kanadský regulační rámec pro železniční a silniční přepravu methanolu, který specifikuje balení, certifikaci cisteren, manipulační postupy a požadavky na školení řidičů v souladu s normami OSN a DOT s cílem zajistit bezpečnou přepravu methanolu v kanadské železniční síti [12, 13].

Tyto normy společně zajišťují, že přeprava methanolu po železnici probíhá bezpečně, minimalizují rizika pro životní prostředí a lidské zdraví a zároveň zachovávají soulad s předpisy v různých jurisdikcích.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.4 Lodní přeprava

9.4.1 Vhodnost přepravy

Lodní přeprava methanolu není vhodná pro národní úroveň kvůli velmi omezeným možnostem splavných řek. Podobná situace je i pro úroveň EU. Přeprava methanolu lodí z/do jiné země je prakticky nerealizovatelná. Lodní přeprava je vhodná pouze pro mezikontinentální úroveň. Velké množství převezeného methanolu zajišťuje vhodné ekonomické parametry přepravy pro velké vzdálenosti. Lodní přeprava je také vhodná v kombinaci s jiným typem přepravy. Další výhodou může být možnost využití methanolu jako paliva pro loď, čímž by loď produkovala méně emisí než v případě spalování těžkého oleje.

Methanol je vhodný pro námořní dopravu díky svému kapalnému stavu při okolní teplotě a tlaku [57, 58]. Methanol zabírá přibližně 2,4 až 2,5krát větší objem než konvenční lodní paliva, jako je těžký topný olej, což vyžaduje větší nádrže na plavidlech. Konstrukční požadavky na skladování methanolu jsou však jednodušší a méně kapitálově náročné než u LNG, protože methanol nevyžaduje přetlakování ani kryogenní podmínky, což snižuje celkové náklady na novostavby nebo modernizace. Rostoucí flotila lodí poháněných methanolem zahrnuje lodě na přepravu sypkých materiálů, tankery, kontejnerové lodě a specializovaná plavidla na moři, což odráží rostoucí připravenost trhu a poptávku [59, 60].



OBRÁZEK 9.5: HLAVNÍ MEZIREGIONÁLNÍ OBCHODNÍ TOKY S METHANOLEM (V TIS. TUN ROČNĚ)
[60].

Globální infrastruktura pro lodní paliva s obsahem methanolu se rychle rozšiřuje a po celém světě je více než 120 přístavů vybaveno skladovacími zařízeními pro methanol. Mezi metody tankování patří přeprava z kamionu na loď, z lodi na loď a z kotviště na loď, což podporuje rostoucí logistickou flexibilitu. Průmyslové iniciativy rovněž podporují „zelené přepravní koridory“, kde lze pilotně testovat paliva s nulovými emisemi, jako je methanol, v rámci jasných regulačních rámců [60]. Ročně se přibližně jedna třetina z celosvětové výrobní kapacity ~120 milionů tun methanolu přepraví a obchoduje jako průmyslová komodita prostřednictvím námořní dopravy, což ilustruje vyspělé

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

a robustní dodavatelské řetězce schopné podporovat jak tradiční trhy s chemickými látkami, tak vznikající poptávku po lodních palivech (Obrázek 9.5) [60].

9.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologická připravenost (TRL) methanolu pro námořní dopravu dosáhla pokročilého stádia, obecně hodnoceného na úrovni TRL 8 až 9, což naznačuje, že technologie výroby, skladování, manipulace, využití methanolu pro pohon a přepravu methanolu jsou vyspělé a komerčně použitelné. Methanol těží ze zavedených konceptů námořní logistiky a konstrukce nádrží, které byly původně vyvinuty pro jiné kapalné chemikálie, což usnadňuje jeho rychlé přijetí v odvětví námořní dopravy. Značného pokroku bylo dosaženo v systémech manipulace s palivem, palubních skladovacích nádržích, protokolech požární bezpečnosti a technologiích modernizace motorů pro použití methanolu jako lodního paliva, což potvrzuje vysoké TRL [59-61].

Globální námořní infrastruktura podporující methanol zahrnuje více než 120 specializovaných přístavů se skladovacími zařízeními, zatímco flotily plavidel schopných provozovat methanol neustále rostou, včetně lodí na přepravu sypaného nákladu, kontejnerových lodí a specializovaných tankerů [60]. Klíčoví hráči v Evropě, Asii a Severní Americe aktivně dovážejí, vyvážejí a využívají methanol po námořních trasách, což naznačuje plně funkční dodavatelské řetězce a připravenost trhu na úrovni TRL 9. Např. Nizozemsko vede v evropském dovozu/vývozu methanolu s významnými objemy obchodovanými prostřednictvím námořní přepravy, což odpovídá zavedeným možnostem námořní přepravy amoniaku [48, 62].

Přeprava methanolu obecně již dosahuje vysoké úrovně technologické připravenosti pro námořní přepravu, kterou podporuje vyspělá infrastruktura, regulační rámce a technologie plavidel, přičemž probíhající vývoj zvyšuje bezpečnost a environmentální výkonnost.

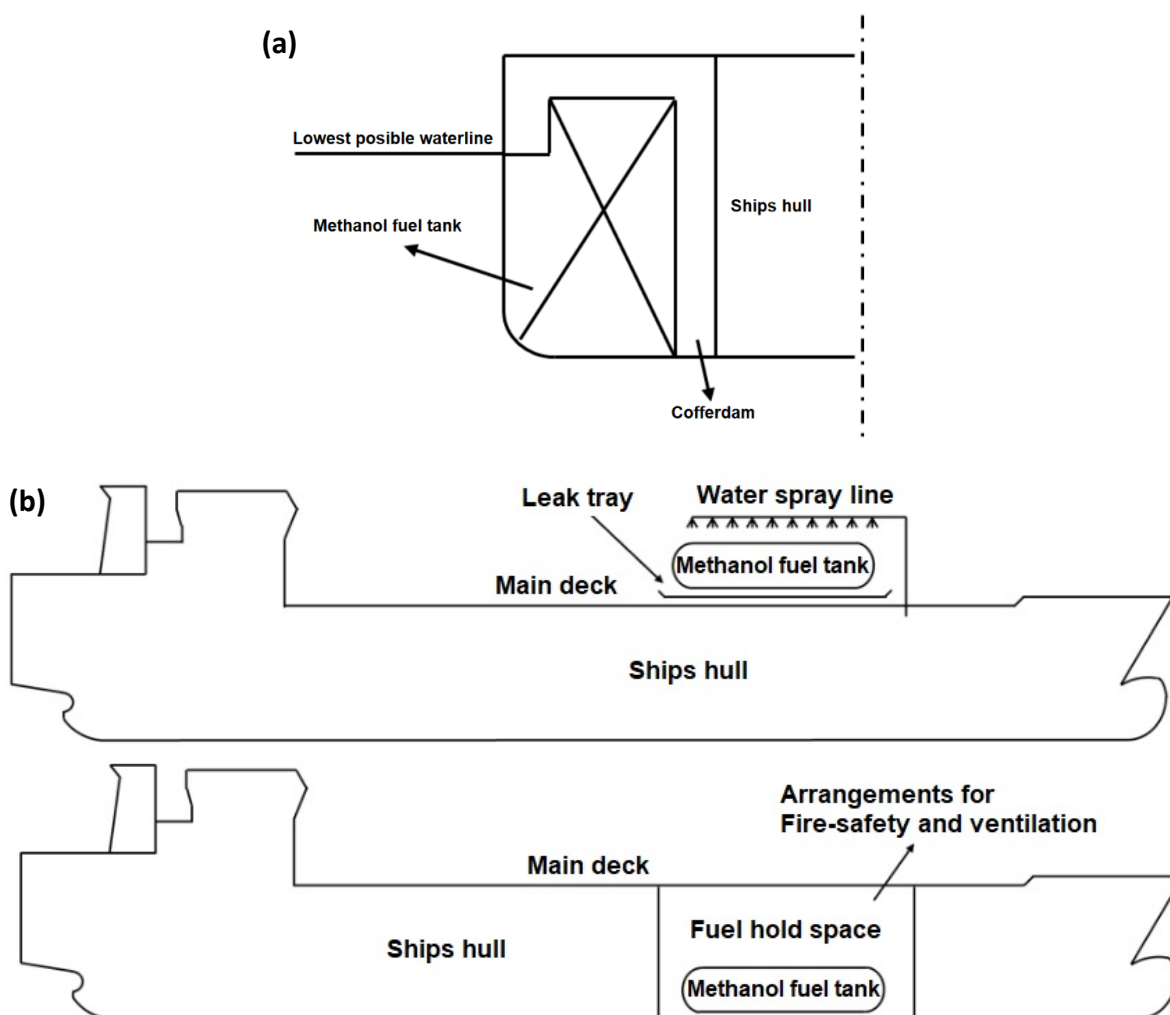
9.4.3 Popis druhu přepravy

Methanol se na lodích přepravuje a skladuje jako kapalina při okolní (atmosférické) teplotě a tlaku, což výrazně zjednodušuje skladování ve srovnání s amoniakem nebo LNG, které vyžadují kryogenní nebo vysokotlakové systémy. Standardní námořní přeprava nevyžaduje dodatečné chlazení ani tlakování, místo toho zůstává methanol stabilní a bezpečný pro přepravu v konvenčních chemických/produktových tankerech za normálních klimatických a plavebních podmínek. Tanky na methanol mají obvykle dvojí trup a jsou vyrobeny z nerezové oceli nebo potažené měkké ocelí, aby se zabránilo korozi. Tanky jsou navrženy pro provoz za atmosférického tlaku, přičemž bezpečnostní a odvětrávací systémy udržují mírný přetlak (obvykle 2–10 bar v moderních systémech) pro manipulaci a distribuci, zejména v systémech zásobování dvoupalivových motorů [11]. Mezinárodní předpisy (např. předpis IBC, ISO 6583:2024) vyžadují, aby všechny použité materiály byly vhodné pro maximální provozní teplotu a tlak očekávaný na palubě, a palubní systémy pro methanol využívají nepřetržité monitorování odchylek [63-65].

Methanol se přepravuje ve velkém množství specializovanými chemickými/produktovými tankery regulovanými Mezinárodní námořní organizací (IMO) podle Mezinárodního předpisu pro stavbu a vybavení lodí hromadně přepravujících nebezpečné chemikálie (IBC). Tyto lodě mohou mít nádrže

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

na methanol ve třech hlavních konfiguracích: integrované, nezávislé nebo přenosné nádrže, přičemž každá z nich je navržena tak, aby splňovala specifické provozní a bezpečnostní požadavky. Na rozdíl od amoniaku, který vyžaduje složité tlakové nebo chladicí systémy, se methanol přepravuje v kapalném stavu při okolní teplotě a tlaku, což výrazně zjednodušuje konstrukci nádrží a plavidel. Integrované nádrže jsou podobné lodním nádržím na plynový olej, ale pro bezpečnost vyžadují obklopující kesony (Obrázek 9.6a), zatímco nezávislé nádrže jsou samonosné a mohou být umístěny nad nebo pod palubou s vhodnou mechanickou ochranou a nouzovými chladicími systémy (Obrázek 9.6b) [58].



OBRAZÉK 9.6: NÁMOŘNÍ PŘEPRAVA METHANOLU: A) INTEGROVANÁ NÁDRŽ, B) NEZÁVISLÁ NÁDRŽ [58].

Přenosné nádrže (Obrázek 9.7) nabízejí flexibilní instalaci a rychlé možnosti připojení/odpojení pro zásobovací operace. Přenosná nádrž je podobná nezávislé nádrži s tím rozdílem, že ji lze snadno připojit a odpojit od lodních systémů a snadno instalovat na loď. Přenosné nádrže by měly: 1) být při připojení k lodním systémům zajištěny k palubě; 2) mít mechanickou ochranu v závislosti na umístění a nákladových operacích; 3) pokud jsou umístěny na otevřené palubě, mít zachytňné vany pro zachycení úniků a systémy vodního postřiku pro nouzové chlazení; a 4) pokud jsou umístěny

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

v prostoru pro skladování paliva, měl by prostor splňovat ustanovení o požární bezpečnosti a větrání [58].



OBRÁZEK 9.7: PŘENOSNÉ NÁDRŽE PRO NÁMOŘNÍ PŘEPRAVU METHANOLU [58].

Společnost Waterfront Shipping se sídlem ve Vancouveru v Kanadě je dceřinou společností zabývající se námořní dopravou společnosti Methanex Corporation, největšího světového výrobce a dodavatele methanolu. Obě společnosti byly průkopníky v propagaci methanolu v lodní dopravě a Waterfront Shipping, globální firma zabývající se námořní dopravou specializující se na chemikálie a čisté ropné produkty, spolu se společností MAN a jejími partnery stála v čele úsilí o rozvoj flotily založené na tomto palivu, které je dnes široce využíváno i jinými. Společnost provozuje plavidla poháněná methanolem od roku 2016 a v současné době má ve své flotile 19 dvoupalivových lodí, které jsou v průměru deset let staré a jejichž velikost se pohybuje od 3 000 do 49 999 tun nosnosti [60].

Dvoutrupá loď na přepravu methanolu MILLENNIUM EXPLORER má dvojnásobnou kapacitu oproti jakékoli jiné lodi svého typu. Celková nákladní kapacita je přibližně 120 000 m³. Methanol se přepravuje ve 12 nákladních tancích. Všechny tanky byly natřeny ekologickým anorganickým nátěrovým systémem na bázi silikátu zinečnatého. Všechny tanky jsou vybaveny dvěma tlakovými ventily, aby splňovaly předpisy vyžadující sekundární způsob uvolnění nahromaděného tlaku v nouzových situacích. Manipulace s nákladem se provádí pomocí dvou parních nákladních čerpadel. Každé čerpadlo má kapacitu 2 500 m³/h. Na palubě byla instalována tři nákladní potrubí o průměru 500 mm, která umožňují oddělení nákladu v případě potřeby [66].

Jedním z nejvýznamnějších rysů lodi MILLENNIUM EXPLORER je instalace největšího lodního membránového generátoru dusíku na světě. Dusík se používá k ochraně nákladu methanolu během plavby po moři i během vykládky. Mezi další významné vybavení patří motorové čerpadlo balastní

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

vody o výkonu 3 000 m³/h a výkonný systém pro odstraňování nákladu/mytí nádrží. Značná pozornost byla věnována zajištění mimořádné účinnosti systému odstraňování nákladu na palubě, čímž se minimalizují zbytky na maximálně 30 litrů na tank [66].

9.4.4 Bezpečnostní opatření

Přeprava methanolu po moři vyžaduje přísná bezpečnostní opatření kvůli jeho hořlavosti, nízkému bodu vzplanutí (11 °C) a toxicitě. Mezinárodní regulační orgány vypracovaly komplexní pokyny a bezpečnostní rámce pro řízení těchto rizik. Patří sem dokumenty jako Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečného zboží na moři (IMDG), Evropská dohoda o přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách (ADN), předpis IBC pro stavbu a vybavení lodí přepravujících nebezpečné chemikálie v rámci Mezinárodní námořní organizace (IMO) a nově vznikající norma ISO 6583:2024 [63-65, 67, 68].

Aby se předešlo nehodám a byl zajištěn bezpečný provoz, jsou hlavní bezpečnostní opatření:

1. Splnění regulačních požadavků: Splnění požadavků na konstrukci, podle předpisu IBC pro přepravu chemikálií, požadavky předpisu SOLAS-IGF pro methanol a soulad s MSC.1/Circ.1621 Interim Guidelines for Ships Using Methyl/Ethyl Alcohol as Fuel [68, 69].
2. Požadavky na kompatibilitu materiálů: Všechny součásti, které přicházejí do styku s methanolem, musí být vyrobeny z korozi-vzdorných materiálů, obvykle z nerezové oceli (třídy 316/304) nebo speciálně potažené nízkouhlíkové oceli, protože methanol může způsobit galvanickou korozi nekompatibilních kovů [67, 68].
3. Správná konstrukce a kontrola nádrže: Nádrže na methanol musí být navrženy pro provoz za atmosférického tlaku s vhodnou regulací par, dvojitým trupem pro prevenci úniku a dostatečným volným prostorem pro tepelnou roztažnost [68].
4. Prevence přeplnění: Plnění nádrže musí být omezeno na 90–95 % objemu, aby se zohlednila tepelná roztažnost methanolu, s vhodným monitorováním hladiny a alarmy vysoké hladiny, aby se zabránilo nebezpečným situacím s přetlakováním nádrže [68].
5. Komplexní systémy detekce plynů: Systémy detekce plynů s alarmy výparů methanolu nastavenými na 20 % dolní meze výbušnosti (LEL) pro výstrahy a 40 % LEL pro aktivaci nouzového vypnutí, včetně automatických uzavíracích ventilů a systémů nouzového vypnutí (ESD) [64, 68].
6. Postupy pro reakci na mimořádné události: Řídit se postupy podrobně popsány v Postupech pro reakci na mimořádné události pro loď přepravující nebezpečné zboží (Průvodce EmS) podle předpisu IMDG, včetně specializovaného hašení požárů pomocí pěnových systémů odolných vůči alkoholu a systémů vodní mlhy vhodných pro požáry methanolu [70, 71].
7. Nucené mechanické větrání: Mechanické větrání ve všech uzavřených prostorech, kde se skladuje či manipuluje s methanolem, aby se zabránilo hromadění par a udržely se koncentrace pod limity výbušnosti [68].
8. Specializovaná protipožární opatření: Protipožární opatření zahrnující infračervenou detekci plamene (protože methanol hoří téměř neviditelnými plameny), systémy hašení požáru pěnou odolnou vůči alkoholu a termovizní zařízení pro hasičské operace [67, 68].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9. Správná identifikace nebezpečí: Dodržovat identifikace nebezpečí u zásilek methanolu označených štítky třídy 3 (hořlavá kapalina) a vedlejší třídy 6.1 (toxická látka), identifikačními čísly UN 1230 a mít příslušnou přepravní dokumentaci [12].
10. Komplexní školení posádky: Školení posádky o nebezpečích specifických pro methanol, postupech pro reakci na mimořádné události a správném používání osobních ochranných prostředků (OOP) včetně chemicky odolného oděvu, ochrany dýchacích cest a nouzových stanic pro výplach očí/sprchování [67, 68].
11. Osobní ochranné prostředky (OOP): Mít OOP včetně chemicky odolných obleků, rukavic, bot, ochrany dýchacích cest a ochrany očí/obličeje určené speciálně pro expozici methanolu během všech manipulačních operací [67].
12. Hlášení úniku a reakce na něj: Jakýkoli únik methanolu překračující regulační prahové hodnoty vyžaduje okamžité oznámení úřadům a provedení opatření k jeho zadržení s použitím vhodných adsorpčních materiálů a technik potlačení par [64, 67, 68].
13. Bezpečnostní protokoly pro nakládku a vykládku: Dodržování bezpečnostních protokolů vyžaduje vyškolený personál, specializované vybavení, bezpečnostní zóny (minimálně 25 metrů kolem operací), nepřetržitý monitoring a omezení vlivem počasí během přepravních operací [64, 67].
14. Systémy kontinuálního monitorování: Monitorovací systémy tlaku, teploty, koncentrace par a detekce úniků ve všech systémech s methanolem s automatickými bezpečnostními opatřeními spouštěnými abnormálními podmínkami [64, 67, 68].

9.4.5 Legislativní omezení

Přeprava methanolu je regulována jak mezinárodními, tak národními předpisy. Mezinárodní předpis pro přepravu nebezpečných věcí na moři (IMDG) podle Mezinárodní námořní organizace (IMO) klasifikuje methanol jako UN 1230, třídu 3 (hořlavá kapalina) s vedlejší třídou 6.1 (toxická) nebezpečnost v mezinárodním měřítku, ačkoli USA nepřirazují vedlejší klasifikaci toxicity pro vnitrostátní přepravu. Americké předpisy podle 46 CFR 151 specifikují stavební materiály, větrání, uzemnění a provozní postupy pro nádrže na methanol na lodích. Mezinárodní předpis pro stavbu a vybavení lodí hromadně přepravujících nebezpečné chemikálie (předpis IBC) upravuje přepravu methanolu jako chemického nákladu, přičemž novela z roku 2021 reklasifikovala methanol z rizika „znečištění“ na riziko představující jak bezpečnost, tak i znečištění [12, 72-75].

Pro methanol jako lodní palivo platí další regulační rámce, včetně Mezinárodního předpisu o bezpečnosti pro lodě používající plyny nebo jiná paliva s nízkým bodem vzplanutí (předpis IGF) podle kapitoly II-1 úmluvy SOLAS, pravidel 56 a 57. Vzhledem k tomu, že předpis IGF zatím neobsahuje specifické normativní požadavky na methanol, musí lodě splňovat požadavky MSC.1/Circ.1621 s názvem „Prozatímní pokyny pro bezpečnost lodí používajících methyl/ethylalkohol jako palivo“, které přijala IMO v listopadu 2020. Tyto prozatímní pokyny vyžadují proces schvalování alternativního konstrukčního uspořádání podle předpisu 55 kapitoly II-1 úmluvy SOLAS, který zahrnuje komplexní metodiky posuzování rizik podrobně popsané v MSC.1/Circ.1212 [68, 69, 76, 77].

Na methanol jako lodní palivo se vztahují předpisy přílohy VI úmluvy MARPOL, které vyžadují dodržování dokumentace o obsahu síry (předpis 14.5), dodacích listů pro lodní dopravu (předpis 18)

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

a reprezentativních postupů odběru vzorků dle úmluvy MARPOL, ačkoli kvůli nízkému bodu vzplanutí a toxicitě methanolu jsou vyžadovány speciální metody odběru vzorků v uzavřené smyčce [78].

Klasifikační společnosti včetně ABS, DNV, Lloyd's Register, Indian Register of Shipping a Class NK vypracovaly komplexní směrnice a pravidla pro plavidla poháněná methanolem, které zahrnují prozatímní směrnice IMO a stanoví podrobné technické požadavky na návrh, konstrukci a provoz. Tyto předpisy jsou průběžně aktualizovány, aby řešily nově vznikající rizika a technologický vývoj v přepravě methanolu, a IMO řeší začlenění požadavků na methanol do formální struktury předpisu IGF [68, 76-79].

Vzhledem k hořlavosti, toxicitě a nízkému bodu vzplanutí methanolu je nezbytné přísné dodržování všech legislativních a bezpečnostních předpisů. Methanol však lze bezpečně přepravovat a používat jako lodní palivo, pokud jsou tyto komplexní regulační rámce řádně dodržovány a jsou zavedena vhodná opatření ke zmírnění rizik.

9.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Protože Česká republika nemá přímý přístup k moři, přeprava methanolu je možná jen prostřednictvím dovozních terminálů v okolních zemích, zejména v Německu a Nizozemsku. Odtud je nezbytné využít jiné typy přepravy.

Předpokládá se, že evropská poptávka po methanolu bude do roku 2030 tvořit 8,8 % světové produkce, zatímco nizozemská poptávka po methanolu pro námořní dopravu by měla dosáhnout 2,3 % globální kapacity. Strategická poloha České republiky ve střední Evropě jí umožňuje těžit z těchto rozšiřujících se evropských dodavatelských řetězců methanolu s řadou dopravních koridorů dostupných z hlavních přístavů přes říční systém Dunaje, železniční síť a silniční dopravy.

9.4.7 Energetická náročnost

Lodní přeprava methanolu vyžaduje minimální množství energie, protože methanol se přepravuje v kapalném stavu při okolní teplotě a tlaku, což eliminuje potřebu chladicích nebo tlakových systémů.

Spotřeba energie pro přepravu methanolu po moři pochází především z pohonných paliv lodí (těžký topný olej nebo lodní motorová nafta). Typické chemické tankery spotřebují 20–70 tun paliva denně v závislosti na velikosti a rychlosti lodí; například TNO uvádí, že denní spotřeba paliva se pohybuje od 18 do 148 tun těžkého topného oleje/lodního plynového oleje (HFO/MGO) pro tankery na kapalné chemické látky [80]. Těžký topný olej (HFO) používá většina lodí v dnešní lodní přepravě. Energetický obsah lodních paliv je v průměru asi 41,75 MJ/kg (11,60 kWh/kg).

Těžká paliva mají výhodu v tom, že jsou relativně levná. Obvykle jsou o 30 % levnější než destilovaná paliva, jako je lodní motorová nafta nebo lodní plynový olej [81]. Nákladní kapacita methanolu se běžně pohybuje od 1 000 do 50 000 tun na plavidlo; specializované lodě na přepravu methanolu mohou mít objem nákladních tanků přesahující 100 000 m³, jako například loď Millennium Explorer (120 000 m³) [66]. S touto kapacitou by energetická spotřeba byla asi 3,9 kWh/100 km/t methanolu

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

(0,031 kWh/100 km/kg H₂). Kromě toho manipulace s nákladem v nakládacích a vykládacích terminálech přispívá k celkové spotřebě energie jen okrajově a vyžaduje přibližně 0,15–0,25 kWh na tunu methanolu (0,0012–0,002 kWh/kg H₂).

9.4.8 Ekonomické aspekty

Methanol má zavedený globální trh a infrastrukturu, díky nimž je cenově konkurenceschopnou možností pro velkoobjemovou přepravu. Rozsáhlá flotila chemických tankerů a tankerů pro přepravu produktů schopných přepravovat methanol spolu s rostoucí dostupností přístavních zařízení pro manipulaci s methanolem po celém světě naznačuje vyspělou infrastrukturu a snížená provozní omezení. Přetrvávají však nejistoty ohledně rozvoje specializované terminálové infrastruktury a vyvíjejících se nákladů na dodržování předpisů pro manipulaci s hořlavými kapalnými náklady [67, 80].

Malé, střední a velké chemické tankery slouží k přepravě methanolu pro různé segmenty. Menší tankery jsou ekonomičtější na kratší vzdálenosti, zatímco větší jsou nákladově efektivnější na delší vzdálenosti díky úsporám z rozsahu. Porovnání některých parametrů a nákladů pro malé a střední tankery je uvedeno v Tabulka 9.5.

TABULKA 9.5: TYPICKÉ PARAMETRY MALÝCH A STŘEDNÍCH TANKERŮ PRO PŘEPRUVU METHANOLU.

	Malý tanker	Střední tanker
Kapacita	10 000–15 000 t	25 000–35 000 t
Sazba pronájmu ^a	18 000–28 000 €/den	35 000–50 000 €/den
Cena paliva ^b	540 €/t	540 €/t
Rychlost nakládky	800–1 200 t/h	1 500–2 200 t/h
Rychlost lodi	22–26 km/h	24–28 km/h
Celková délka lodi	120–150 m	170–200 m
Ponor	7,5–9,0 m	9,5–11,5 m

^a Odhadované sazby za pronájem vycházejí z aktuálních tržních podmínek.

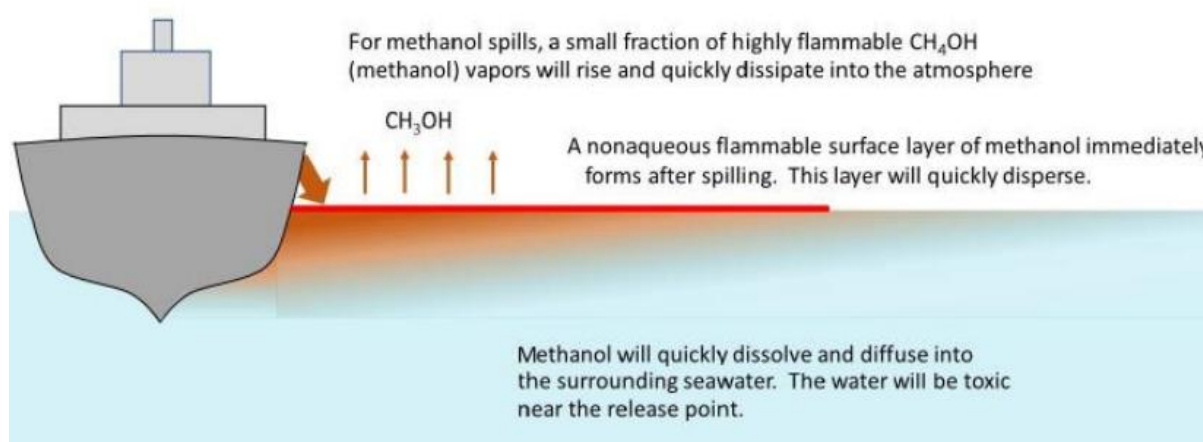
^b Ceny těžkých topných olejů/lodního plynového oleje pro lodní loď.

V literatuře se uvádí cena asi 0,15 €/t methanolu/100 km (1,2 €/t H₂/100 km) [50]. Nicméně náklady na přepravu methanolu jsou ovlivněny řadou faktorů, včetně kapacity nákladu, dostupnosti plavidla, ceny paliva a nákladů souvisejících s terminálem (čas strávený v přístavu a provoz přístavu). Náklady na posádku, údržbu plavidla a náklady na pojištění také významně přispívají k provozním nákladům. Dynamika trhu v sektoru chemických tankerů může navíc ovlivnit náklady na přepravu methanolu, protože chemické tankery soutěží o různé kapalně chemické náklady jako methanol, petrochemikálie, rostlinné oleje atd. Regulační požadavky na manipulaci s methanolem jako hořlavým kapalným nákladem, spolu se specializovanými skladovacími systémy a posílenými bezpečnostními protokoly, přispívají k celkovým nákladům na přepravu, ačkoli tyto požadavky jsou méně složité než požadavky na kryogenní nebo tlakové plynné náklady.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.4.9 Ekologické aspekty

Methanol se přepravuje po celém světě jako kapalný náklad chemickými tankery, s využitím rozsáhlé námořní infrastruktury. V případě náhodného úniku vede vysoká rozpustnost methanolu ve vodě a jeho biologická odbouratelnost k rychlému zředění a mikrobiální degradaci, což podstatně snižuje dlouhodobou kontaminaci životního prostředí ve srovnání s perzistentními znečišťujícími látkami, jako je ropa. Společnost ITOPF uvádí, že úniky methanolu v mořském prostředí se primárně šíří rozpouštěním a odpařováním s omezeným rizikem usazování sedimentů nebo dlouhodobé toxicity pro vodní organismy (Obrázek 9.8). Přestože je methanol hořlavý a jeho páry mohou představovat nebezpečí při vdechnutí, při náhodných námořních incidentech s methanolem se obvykle jedná o omezené objemy a rychlé odbourávání, což zmírňuje potenciální dopady na ekosystém [82].



OBRAZEK 9.8: SCHÉMA OČEKÁVANÉHO CHOVÁNÍ ÚNIKU METHANOLU Z LODI [82].

Navzdory relativní bezpečnosti v případě úniku přispívá námořní doprava methanolu k celkovým emisím z lodní dopravy, protože k pohonu používá těžký topný olej nebo lodní plynový olej. Evropská agentura pro životní prostředí odhaduje, že námořní doprava se podílí přibližně 12,8 % na celkových emisích v odvětví dopravy v EU. Regulační rámce Mezinárodní námořní organizace (IMO), včetně předpisu IBC pro chemické náklady a přílohy VI úmluvy MARPOL, upravují bezpečnou manipulaci a omezují provozní úniky a zajišťují, aby nakládka, přeprava a vykládka dodržovaly přísné environmentální a bezpečnostní normy. Ačkoliv námořní doprava methanolu s sebou nese inherentní ekologická rizika, jsou tato rizika účinně řízena prostřednictvím námořních předpisů, konstrukce plavidel a příznivých charakteristik methanolu z hlediska vlivu na životním prostředí [67, 83, 84].

9.4.10 Normy, oborové předpisy

Předpis IBC (Mezinárodní předpis pro stavbu a vybavení lodí hromadně přepravujících nebezpečné chemikálie) – Předpis IBC upravuje návrh, konstrukci a vybavení lodí přepravujících nebezpečné kapalné chemikálie ve velkém objemu, včetně methanolu. Stanovuje závazné bezpečnostní normy pro konstrukční materiály nádrží, zadržování nákladu, strukturální integritu a větrání s cílem minimalizovat rizika během přepravy. Předpis klasifikuje methanol podle jeho chemických nebezpečí a specifikuje protokoly pro hromadné balení, skladování a segregaci [68, 69].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Předpis IMDG (Mezinárodní námořní předpis pro nebezpečné zboží) – Předpis IMDG upravuje přepravu nebezpečného zboží, včetně methanolu, na lodích. Definuje postupy klasifikace, balení, označování, etiketování a dokumentace pro zajištění bezpečné manipulace, skladování a reakce na mimořádné události. Methanolu je přiřazeno číslo UN 1230, třída 3 (hořlavá kapalina), se specifickými ustanoveními pro skladování a oddělení, aby se zabránilo riziku požáru [46, 70, 71].

SOLAS (Bezpečnost života na moři) – SOLAS předepisuje minimální bezpečnostní standardy pro konstrukci, vybavení a provoz lodí. Pro chemické tankery přepravující methanol vyžadují předpisy SOLAS bezpečné navigační postupy, výcvik posádky, protipožární vybavení a záchranné prostředky, které zajišťují bezpečnost lodi a personálu po celou dobu plavby [69].

MARPOL (Mezinárodní úmluva o zabránění znečištění z lodí) – Příloha II úmluvy MARPOL se zabývá kontrolou znečištění škodlivými kapalnými látkami přepravovanými ve velkém objemu, včetně methanolu. Stanoví pokyny pro omezení vypouštění, vedení záznamů o ropných látkách a používání dvojitého trupů k minimalizaci dopadu na životní prostředí během přepravy kapalných [46].

U.S. CFR 46 Part 150 (Kompatibilita nákladu) – Předpisy pobřežní stráže USA specifikují další požadavky na lodě přepravující methanol, včetně specifikací materiálu nádrží, větrání a provozních postupů, aby byly splněny bezpečnostní a environmentální normy USA. Tyto předpisy zajišťují soulad s mezinárodními rámci i protokoly specifickými pro USA [85].

ISO 8217 Specifikace paliva a ISO 15848 pro netěsnost ventilů – Tyto ISO normy jsou relevantní pro lodní manipulační systémy, aby se udržela kvalita paliva a zabránilo se únikům ze systémů manipulujících s methanolem a jinými hořlavými kapalinami a aby se zajistila provozní bezpečnost a ochrana životního prostředí [86, 87].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.5 Potrubní přeprava

9.5.1 Vhodnost přepravy

Kapalný stav methanolu při okolní teplotě a tlaku poskytuje výhody oproti dopravě plynu, zjednodušuje konstrukci potrubí a snižuje požadavky na energii pro kompresi [88]. Doprava methanolu potrubím je ekonomická na střední vzdálenosti do přibližně 475 km, poté se lodní přeprava stává nákladově efektivnější [89]. Na rozdíl od amoniaku, který má rozsáhlou globální síť potrubí o celkové délce 7 600 km [90], je infrastruktura potrubí pro methanol globálně omezenější, ačkoli existuje několik regionálních sítí pro průmyslovou distribuci. Doprava potrubím v USA je minimální a omezena na krátké vzdálenosti. Mnoho zemí má potrubí pro přepravu ropných produktů, ale jejich využití k přepravě methanolu čelí několika výzvám. Doprava methanolu ropovody představuje několik obtíží. Zpočátku by objemy methanolu představovaly pouze malý podíl kapacity potrubí. Přerušované přepravy ropovody vytvářejí problémy, jako je míchání produktů na rozhraních a potřeba dalšího skladování kompatibilního s methanolem [88].

Současné sítě potrubí pro přepravu methanolu slouží primárně průmyslovým regionům, přičemž společnosti jako Methanex využívají integrovanou logistiku včetně potrubní dopravy jako součást svého globálního dodavatelského řetězce. Náklady na přepravu potrubím jsou podle literatury přibližně 0,028 €/t/km, což činí potrubí vysoce ekonomickým pro distribuci velkého množství methanolu.

Potrubní přeprava methanolu není vhodná pro ostrovní řešení kvůli složitějšímu řetězci než u plynného vodíku. U potrubí nepřevládá výhoda nižší spotřeby energie na přepravu nad nutností vyrobit a následně rozložit methanol zpět na vodík. V případě využití methanolu pro průmyslové aplikace nebo přímo do vozidel by potrubní přeprava byla vhodná i pro kratší vzdálenosti.

Potrubní přeprava methanolu pro úroveň krajů také není příliš vhodná. Nevýhody složitějšího řetězce jsou v tomto případě ještě umocněny problémy s výstavbou potrubí. V ČR nelze využít žádné stávající potrubí, takže by bylo potřeba vybudovat nové, které vychází ekonomicky hůře, a navíc by bylo potřeba řešit pozemky, což by pro malé množství přepravovaného methanolu nevycházelo pozitivně.

S většími vzdálenostmi a množstvím přepravovaného methanolu v rámci národní či evropské úrovně je teoreticky přeprava methanolu potrubím vhodná díky nízkým provozním nákladům a dobře řešitelné bezpečnosti. Nicméně stále platí problémy s novým potrubím jako v případě krajské úrovně. Proto vybudování potrubí by bylo vhodné jen za předpokladu velké poptávky po methanolu, aby byla kapacita potrubí naplněna. To v praxi znamená spíše potenciální řešení ve vzdálenější budoucnosti.

Pro mezikontinentální přepravu by potrubí bylo vhodné jen za předpokladu napojení na tranzitní pozemní potrubí a jen v případě menších vzdáleností, jako např. mezi Afrikou a Evropou. V případě delších vzdáleností je vhodnější využít lodní přepravu.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Úroveň technologické připravenosti (TRL) pro přepravu methanolu potrubím se v současnosti odhaduje na TRL 8 až 9, což naznačuje vyspělou a komerčně osvědčenou technologii s plnohodnotným zavedením v určitých průmyslových a regionálních aplikacích. Potrubní přeprava methanolu je v dnešní době omezena převážně na menší měřítka. Přeprava potrubím těží z příznivých fyzikálních vlastností methanolu jako kapaliny při okolní teplotě a tlaku, což zjednodušuje materiál potrubí a provozní požadavky ve srovnání se zkapalněnými médii tlakem nebo teplotou. Několik průmyslových potrubních systémů pro methanol je v provozu po celém světě a podporuje integrované dodavatelské řetězce pro distribuci methanolu průmyslovým uživatelům nebo mísicím terminálům [46, 91].

V Evropě existují omezení pro dálkovou přepravu methanolu potrubím kvůli současným nedostatkům v infrastruktuře, ale místní a regionální potrubí jsou zavedena často v průmyslových zónách se specializovanými bezpečnostními a regulačními rámci, jako jsou předpisy o bezpečnosti potrubí z roku 1996. Materiálová kompatibilita methanolu s běžnými ocelovými materiály potrubí s ochrannými povlaky a regulací obsahu vody podporuje spolehlivý dlouhodobý provoz a zabraňuje významným problémům s korozí, s nimiž se setkáváme u jiných chemikálií [92, 93].

Technologie přepravy methanolu potrubím se blíží plné průmyslové připravenosti s prokázanou bezpečností, provozní spolehlivostí a integrací do regionálních a globálních logistických řetězců methanolu. Rozšíření sítě potrubí může hrát klíčovou roli v rozsáhlém přijetí methanolu jako udržitelného nosiče energie a chemické suroviny.

9.5.3 Popis druhu přepravy

Methanol se potrubím přepravuje v kapalném stavu při okolní teplotě a atmosférickém tlaku, což eliminuje potřebu tlakových nebo chladicích systémů. Tato přeprava v kapalném stavu nabízí oproti stlačeným plynům značnou výhodu v podobě minimální energie pro čerpání. Konstrukční tlaky v potrubí pro přepravu methanolu se obvykle pohybují od 10 do 50 bar v závislosti na délce potrubí a topografii, přičemž většina systémů pracuje na spodní hranici tohoto rozsahu kvůli příznivým tokovým vlastnostem methanolu [91, 92, 94].

Potrubní systémy pro methanol vykazují dobrou bezpečnost, pokud jsou správně navrženy a udržovány s vhodnými opatřeními proti korozi. Tloušťka stěny potrubí musí být vypočítána podle příslušných norem pro tlakové nádoby, jako je ASME B31.3, s typickými korozními tolerancemi 1,5–3,0 mm zahrnutými v návrhu v závislosti na provozních podmínkách a očekávané rychlosti koroze [95]. Hlavním problémem materiálu je korozní praskání v methanolu pod tahovým napětím (zbytkové napětí, vložené napětí), ke kterému dochází, když obsah vody v methanolu klesne do kritického rozmezí 0,05 až 1,0 obj. %, kvůli čemuž je pro integritu potrubí nezbytná kontrola obsahu vody [96].

Na rozdíl od amoniaku, který vyžaduje specializované nízkolegované oceli, mohou potrubí pro methanol používat standardní uhlíkovou ocel (ASTM A53 třídy B, ASTM A106 třídy B nebo API 5L). Trubky ASTM A106 jsou primárně navrženy pro vysokoteplotní aplikace a vykazují vynikající výkon v systémech vyžadujících jak tepelnou odolnost, tak schopnost odolávat tvářecím operacím, jako je

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

ohýbání. Naproti tomu trubky ASTM A53 nabízejí větší všestrannost a běžně se používají v univerzálních instalatérských a nízkotlakých systémech. Trubky API 5L jsou speciálně navrženy pro výstavbu potrubí v ropném a plynárenském průmyslu a optimalizují se pro přepravu ropy, zemního plynu a dalších kapalin za různých provozních podmínek [97, 98].

Kompatibilita methanolu se standardními materiály pro potrubí zjednodušuje konstrukci ve srovnání s korozivnějšími chemikáliemi. Běžně se používá uhlíková ocel, ačkoli je třeba se vyhnout materiálům obsahujícím měď nebo zinek kvůli obavám z koroze. Značení potrubí a výstražné systémy jsou nezbytné pro bezpečnost, zejména tam, kde potrubí prochází veřejnými prostranstvími. Nadzemní úseky vyžadují identifikaci produktu, indikátory směru proudění a kontaktní informace pro případ nouze. Zatímco podzemní potrubí musí být uloženo v hloubce nejméně 1,5 m s vhodnými vnějšími nátěrovými systémy [46, 99].

Kapalná povaha methanolu za okolních podmínek eliminuje obavy z extrémních teplotních výkyvů, které ovlivňují systémy stlačeného plynu. Proplachování lze provádět dusíkem bez rizika nadměrného ochlazení a mísitelnost methanolu s vodou zjednodušuje čištění a údržbu potrubí ve srovnání s uhlovodíky, které se oddělují od vodných čisticích roztoků.

9.5.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnostní opatření pro přepravu methanolu potrubím jsou zásadní pro prevenci nehod, které by mohly vést k nebezpečí požáru, kontaminaci životního prostředí a zdravotním rizikům. Mezi hlavní nebezpečí spojená s methanolem patří jeho hořlavost, toxicita při požití nebo vdechnutí a potenciál pro korozní praskání v důsledku napětí v potrubních systémech, když obsah vody překročí bezpečné limity. Nehody v potrubí mohou vést k tvorbě oblaků par, únikům kapalin, které mohou kontaminovat půdu a podzemní vodu, a k riziku požáru v důsledku nízkého bodu vzplanutí methanolu [46].

Pro bezpečnost přepravy methanolu potrubím kladou regulační rámce v Evropě a Severní Americe důraz na komplexní přístupy k řízení rizik. Americký úřad pro bezpečnost potrubí a nebezpečných materiálů (PHMSA) a kanadský energetický regulátor poskytují pokyny, které se konkrétně týkají přepravy methanolu, zatímco evropské země implementují směrnici o tlakových zařízeních a předpisy o bezpečnosti potrubí [19, 47, 100].

Aby se zabránilo poruchám potrubí a minimalizovaly se následky, jsou nezbytná následující opatření ke snížení rizik:

1. Označování a identifikační systémy pro jasnou identifikaci potrubí pro methanol a poskytování kontaktních informací pro případ nouze.
2. Vnější nátěr a katodická ochrana k zabránění vnější korozi, s třívrstvými polypropylenovými nátěry běžně používanými pro podzemní potrubí.
3. Systémy uzavíracích ventilů strategicky umístěné tak, aby minimalizovaly objem uvolňovaného methanolu a umožnily rychlou izolaci části potrubí s místem úniku v případě nouze.
4. Pravidelná kontrola a údržba ventilů včetně tlakových zkoušek, kontrol funkčnosti pohonů a ověření polohy uzavíracího ventilu.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

5. Plánování trasy s cílem vyhnout se, pokud možno, hustě osídleným oblastem, citlivým environmentálním zónám a terénu s vysokým rizikem.
6. Fyzické bariéry a varovné systémy včetně oplocení, hloubkových značek a zón s omezeným přístupem podél koridorů potrubí.
7. Správný hydraulický návrh zajišťující dostatečnou tloušťku stěny, vhodné materiály (uhlíková ocel s tolerancí proti korozi) a jmenovitý tlak pro provoz s methanolem.
8. Protokoly tlakových zkoušek provedených před uvedením do provozu a pravidelně během provozu za účelem ověření integrity potrubí.
9. Podepření potrubí a monitorování základů pro prevenci koncentrace napětí a mechanického poškození.
10. Nedestruktivní testování zahrnující ultrazvukové kontroly, radiografické testování a inteligentní inspekce pomocí ježků k detekci ztenčení stěn a vad.
11. Ochrana potrubních vedení pod silničními, železničními a vodními přejezdy s vylepšenými systémy pažení, hloubkového zabezpečení a monitorování na kritických křižovatkách.
12. Systémy pro detekci úniků zahrnující monitorování par, analýzy tlakového rozdílu a programy vizuální kontroly, s ohledem na to, že methanol má charakteristický zápach, který napomáhá detekci.

9.5.5 Legislativní omezení

EU směrnice 2014/68/EU (směrnice o tlakových zařízeních) obecně popisuje regulaci návrhu potrubí, instalace a tlakových zařízení pro přepravu nebezpečných kapalin na pevnině a na moři, včetně methanolu. Na základě této směrnice si mnoho členských států EU vypracovalo vlastní kritéria pro inspekci methanolových potrubí [101]. V USA je přeprava nebezpečných kapalin potrubím definována v 49 CFR Part 195, který od roku 2020 výslovně zahrnuje methanol jako regulovanou nebezpečnou kapalinu [102, 103].

Ve Spojených státech se 49 CFR Part 195 konkrétně zabývá přepravou methanolu potrubními systémy a vyžaduje dodržování bezpečnostních norem pro potrubí pro nebezpečné kapaliny. Toto nařízení nařizuje systémy detekce úniků, programy řízení integrity a pravidelné kontroly potrubí pro methanol. Provozovatelé potrubí musí zavést systémy počítačového monitorování potrubí a vést bezpečnostní listy pro reakci na mimořádné události [102, 103].

Harmonizované evropské směrnice, jako je nařízení o infrastruktuře alternativních paliv, směrnice SEVESO III a směrnice ATEX, platí ve všech členských státech a zahrnují specifické předpisy pro bezpečnost potrubí pro methanol. Tyto předpisy se vztahují na potrubí přepravující chemikálie a nové nosiče energie včetně methanolu jako paliva i vstupní suroviny [104-107].

9.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V současné době nejsou v České republice žádná specializovaná potrubí na methanol; existují však stávající ropovody, jako je systém TAL/IKL, které by mohly být v budoucnu upraveny pro přepravu alternativních nosičů energie. Potrubní doprava nabízí distribuci velkých objemů. Strategická poloha České republiky ve střední Evropě ji potenciálně staví do dobré pozice pro budoucí rozvoj potrubí na methanol, zejména s ohledem na probíhající iniciativy evropské energetické transformace

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

a rozvoj projektů na obnovitelný methanol. Realizace rozsáhlých potrubí na methanol by však vyžadovala značné investice a vývoj regulačního rámce specifického pro bezpečnost přepravy methanolu a environmentální aspekty.

9.5.7 Energetická náročnost

Stávající ropovody lze s minimálními modernizacemi znovu využít pro přepravu methanolu. Čerpací stanice vzdálené od sebe zhruba 150–200 km udržují tlak v potrubí. Technicko-ekonomická studie NREL modeluje 91,4 cm methanолоvé potrubí, které nepřetržitě dodává 37 435 MW energie (LHV) rychlostí toku 3,9 m/s, což je asi 6 770 t/h. Čerpací stanice podél trasy dlouhé asi 1 600 km spotřebovávají 758 MW (2,02 % dodané energie), což odpovídá 1,26 kWh na MWh přepraveného methanolu na 100 km. Tato energie odpovídá 0,00553 kWh/100 km/kg methanolu (0,056 kWh/100 km/kg H₂). Menší modernizovaná potrubí (průměr 35,56 cm) obvykle zvládnou přepravit 415–625 t/h [108]. Potrubní přeprava methanolu tak představuje perspektivní typ přepravy velkého množství.

9.5.8 Ekonomické aspekty

Potrubní doprava methanolu nabízí oproti jiným způsobům dopravy značné ekonomické výhody pro aplikace na střední vzdálenosti. Ve Spojených státech a dalších zemích s rozsáhlou sítí průmyslových potrubních systémů lze methanol efektivně přepravovat jak vyhrazenými, tak i repasovanými ropovody.

Podle komplexní analýzy NREL činí kapitálové náklady na infrastrukturu methanолоvého potrubí přibližně 1 mil. €/km, což odpovídá nákladům normalizovaným podle kapacity ve výši 28 €/km/MW [109]. Rozpis kapitálových výdajů na methanолоvé potrubí zahrnuje [125]:

- Materiály: 0,31 mil. €/km (vyšší než u ropovodů kvůli požadavkům na korozivní odolnost)
- Práce: 0,29 mil. €/km
- Pozemky: 0,04 mil. €/km
- Náklady na čerpací stanici: 0,33 mil. €/km
- Různé náklady: 0,075 mil. €/km

Roční provozní náklady a investiční náklady vedou k celkovým nákladům na přepravu ve výši 1,2 € za MWh na 1 000 km [109], což odpovídá 0,66 €/t/100 km (5,3 €/t H₂/100 km). Nicméně nedávné evropské studie ukazují cenu násobně vyšší, jelikož jiná studie uvádí pro vzdálenost 450 km cenu 3,6 €/MWh (20 €/t MeOH), což odpovídá 4,44 €/t/100 km (35,5 €/t/100 km) [89]. Jelikož se hodnoty v literatuře velmi liší, tak nelze jednoznačně určit, jaká je cena za přepravu. Cena bude s vysokou pravděpodobností také velmi závislá na konkrétních podmínkách, kde se potrubí nachází a jak je dimenzované.

9.5.9 Ekologické aspekty

Methanol je klasifikován jako nebezpečná látka kvůli svým vysoce hořlavým, toxickým a korozivním vlastnostem s potenciálními dopady na životní prostředí a lidské zdraví při přepravě potrubím. Potrubní přeprava methanolu vyžaduje specifická bezpečnostní opatření a rámce pro dodržování

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

předpisů, aby se minimalizovala environmentální rizika. Úplná mísitelnost methanolu s vodou představuje jak environmentální výzvy, tak i výhody. I když rozlité látky mohou rychle kontaminovat vodní zdroje, tato vlastnost také usnadňuje přirozený biologický rozklad a ve srovnání s ropnými produkty snižuje dlouhodobou perzistenci v životním prostředí. Toxické vlastnosti methanolu však vyžadují okamžitou kontrolu a sanaci, aby se zabránilo ekologickým škodám a ochránily se zásoby pitné vody.

V souvislosti s přepravou potrubím byly zdokumentovány incidenty s methanolem s různou mírou dopadu na životní prostředí. Institut pro methanol provedl v letech 1998 až 2011 komplexní analýzu incidentů s methanolem, která zahrnovala incidenty hlášené ve Spojených státech, Kanadě, Brazílii, Francii, Itálii, Německu, Švédsku, Číně, Indii, Malajsii, Jižní Africe a Austrálii [46]. Bylo zjištěno, že byly hlášeny čtyři incidenty s potrubím (tři úniky a jeden požár), přičemž jeden se stal během standardního provozu a tři během běžné údržby. I když tyto incidenty nevedly ke katastrofickým environmentálním škodám srovnatelným s jinými nebezpečnými materiály, uvolňovaný methanol může způsobit problémy se zdravím lidí a zvířat, kontaminaci zemědělských vodních zdrojů a zdrojů sladké vody.

Obecná uhlíková stopa přepravy methanolu potrubím je asi 15,74 g/t/km, což je zhruba o 40 % více než u námořní přepravy velkoobjemových nákladů, která činí 11,3 g/t/km (na základě spotřeby paliva 0,12 MJ/t/km pro tanker na přepravu produktů a emisí za celý životní cyklus 94,2 g CO₂ekv/MJ) [35]. Nicméně ze spotřeb energie pro čerpadla a emisní náročnosti elektrické energie v ČR 477 g CO₂/kWh podle evropské legislativy, vychází emise 3,34 kg CO₂/t/100 km (26,7 g CO₂/kg H₂/100 km). I když je to větší hodnota než v literatuře, tak stále se jedná o velmi nízké hodnoty emisí. Navíc u potrubní přepravy není nakládka a vykládka, takže se neprodukují další emise a ztráty jsou velmi nízké.

9.5.10 Normy, oborové předpisy

Zajištění bezpečné a spolehlivé přepravy methanolu potrubím vyžaduje přísné dodržování národních a mezinárodních norem týkajících se konstrukce potrubí, materiálů, provozu, ochrany životního prostředí a kontroly závažných rizik. Klíčové předpisy a normy platné pro potrubí pro methanol jsou uvedeny níže se stručným popisem.

49 CFR 195 (Přeprava nebezpečných kapalin potrubím) – Americký sborník federálních předpisů, hlava 49, část 195, upravuje návrh, výstavbu, provoz, údržbu a reakci na mimořádné události v souvislosti s potrubími přepravujícími nebezpečné kapaliny, včetně methanolu, jak je definováno Úřadem pro bezpečnost potrubí a nebezpečných materiálů Ministerstva dopravy USA (PHMSA) [46, 100].

Směrnice 2014/94/EU (nařízení o infrastruktuře pro alternativní paliva) – Právní předpisy EU nařizující zavádění infrastruktury pro alternativní paliva, včetně potrubí pro methanol pro námořní, vnitrozemské vodní a silniční čerpací stanice, v technologicky neutrálním rámci na podporu obnovitelných a nízkouhlíkových paliv [110].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Směrnice pro tlaková zařízení 2014/68/EU (PED) – Evropská směrnice týkající se návrhu, výroby a posuzování shody tlakových zařízení a sestav (kategorie II–IV), platná pro svařované úseky potrubí pro methanol, regulační zařízení a tlakové nádoby pro provoz s methanolem [111].

API 5L (X52–X70) (Specifikace potrubí) – Norma Amerického ropného institutu pro bezešvé a svařované ocelové potrubí běžně používané pro methanolové potrubí v Severní Americe. Typické jakosti: X52 (L360) a vyšší pevnostní jakosti až do X70 (L555), vybrané na základě tlaku, teploty a podmínek prostředí [97, 98].

ASTM A333 třída 6 (Potrubí z uhlíkové oceli pro nízkoteplotní provoz) – Specifikace pro bezešvé a svařované potrubí z uhlíkové oceli vhodné pro nízkoteplotní provoz s methanolem v evropských plynovodech a kapalných potrubích (teploty do -45 °C). Často se používá tam, kde provozní podmínky vyžadují houževnatost a odolnost proti lomu [112].

Řada NEN 3650 (Potrubní systémy, Nizozemsko) – Nizozemské normy specifikující požadavky na konstrukci, provoz a kontrolu potrubí. Platí pro methanolové potrubí v Nizozemsku a zahrnuje materiály, svařování, zkoušení a ochranu životního prostředí [113].

RohrFltgV (Německo) – Německá spolková vyhláška upravující výstavbu a provoz dálkových potrubí přepravujících kapaliny (včetně methanolu). Stanovuje požadavky na plánování tras, bezpečnostní opatření a sledování integrity potrubí [114].

Technische Regeln für Rohrfernleitungsanlagen (TRFL, Německo) – Technická pravidla doplňující RohrFltgV, která poskytují podrobné pokyny pro projektování, výběr materiálů, testování a údržbu potrubí přepravujících methanol a další nebezpečné kapaliny přesahující hranice země [114].

Směrnice SEVESO III (směrnice 2012/18/EU) – Směrnice EU o kontrole nebezpečí závažných havárií s přítomností nebezpečných látek, která vyžaduje, aby provozovatelé potrubí pro methanol zavedli systémy řízení bezpečnosti, prováděli posouzení rizik, vypracovali havarijní plány a informovali příslušné orgány o zásobách a riziku [106].

Mezinárodní úmluva o ochraně rostlin – Stanoví fyto-sanitární opatření, která se mohou vztahovat na výstavbu průjezdných cest pro potrubí pro methanol přes zemědělské pozemky a lesy, aby se zabránilo zavlečení a šíření škůdců [115].

Směrnice ATEX (směrnice 2014/34/EU) – Předpisy pro zařízení a ochranné systémy určené k použití v potenciálně výbušném prostředí (např. zóny s methanolovými parami kolem čerpacích stanic a ventilových šachet), vyžadující certifikaci zařízení a instalaci v nebezpečných prostorech [107].

UVPG (Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí, Německo) – Německý zákon nařizující posuzování vlivů na životní prostředí u infrastrukturních projektů, včetně nových potrubí pro methanol, za účelem vyhodnocení a zmírnění dopadů na půdu, vodu, ovzduší a lidské zdraví [116].

BNatSchG (Spolkový zákon o ochraně přírody, Německo) – Spolkový zákon chránící biodiverzitu, krajinu a druhy, má dopad na trasování potrubí pro methanol, odklizení terénu a požadavky na obnovu stanovišť [117].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Nařízení Evropského parlamentu a rady o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva (AFIR) – Stanovisko Institutu pro methanol – Doporučení průmyslu, aby AFIR zahrnovala explicitní cíle a opatření pro infrastrukturu pro methanolové palivo, podporující adaptaci a zavádění potrubní sítě ve vnitrozemských vodních cestách a námořních přístavech [110].

Interpretace PHMSA 16-0116 – Objasňuje, za jakých podmínek jsou směsi methanolu osvobozeny od určitých mezinárodních přepravních předpisů (IMDG, ICAO TI, vzorové předpisy OSN) při přepravě potrubím v USA, včetně prahových hodnot čistoty a složení směsi [103].

Předpis IMDG / Předpis IBC (IMO) – Mezinárodní předpis pro námořní přepravu nebezpečného zboží a Mezinárodní předpis pro velkoobjemové chemikálie stanoví normy pro námořní přepravu methanolu jako nákladu; relevantní pro napojení na pobřežní potrubí a čerpací terminály manipulující s methanolem.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.6 Terminály

Většina mezinárodního obchodu probíhá s využitím námořních tankerů, říčních nákladních člunů a železničních vagonů. V případě přepravy mezi kontinenty je realizovaná lodní přeprava methanolu. Při mezikontinentálním importu methanolu připadají v úvahu využít terminály v Rotterdamu (Nizozemsko) a Hamburku (Německo) od roku 2027. V těchto terminálech lze přeložit methanol na silniční, železniční nebo potrubní přepravu. Jelikož v ČR nejsou v současné době vyhrazená potrubí na methanol, může v dohledné době přeprava methanolu do ČR probíhat jen po železnici nebo silnici.

Celosvětově je přeprava methanolu potrubím omezena na několik sítí, přičemž lodní a železniční doprava dominují v dálkových dodavatelských řetězcích kvůli vyšším kapitálovým nákladům a omezenému budování infrastruktury pro potrubí. Vyhrazená potrubí existují především v regionech s koncentrovanými výrobními a spotřebními místy (např. petrochemická centra v Severní Americe a částech Asie), ale nejsou celosvětově rozšířená. Stávající potrubní infrastruktura slouží primárně pro zemní plyn a ropu nebo její deriváty. Národní a unijní regulační dokumenty nenaznačují žádná probíhající rozšíření ani rozvoj zaměřený konkrétně na přepravu methanolu potrubím v rámci země.

Methanol dovážený do zemí EU bude obvykle dodáván oceánskými tankery do hlavních evropských přístavů (Rotterdam a Hamburk) a odtud přepravován do vnitrozemí převážně železničními nebo silničními cisternami. Potrubní systém České republiky je více zaměřen na ropu a plyn, což dokládá probíhající rozšiřování, jako je ropovod TAL.

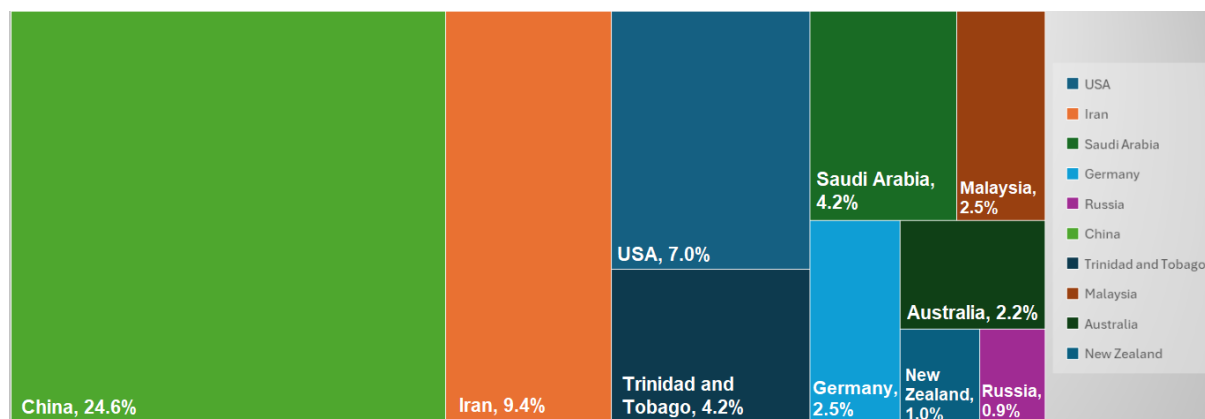
V rámci ČR není nyní žádný terminál vyhrazený pro methanol. Nicméně v případě rozvoje trhu s methanolem je možné přetransformovat část infrastruktury pro konvenční paliva. Tím by vznikly významné kapacity pro skladování methanolu.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.7 Přepravní trasy

Převážná část methanolu přijíždějícího do střední Evropy, včetně České republiky, je dovážena námořními tankery do severozápadních evropských přístavů (např. Antverpy, Rotterdam) a následně železničními cisternami nebo silničními cisternami do vnitrozemských destinací. Přestože je methanol při pokojové teplotě kapalný, takže je technicky kompatibilní s potrubní dopravou, existuje na celém světě jen málo specializovaných potrubí pro methanol a v České republice nejsou žádná. Potrubní doprava methanolu vyžaduje materiály odolné proti korozi (obvykle nerezovou ocel nebo uhlíkovou ocel s výstelkou) a specializované čerpací stanice, což zvyšuje kapitálové výdaje ve srovnání s železničními nebo silničními alternativami. Pro vnitrozemskou přepravu methanolu v ČR se nadále využívají existující distribuční sítě pro kapalné chemikálie, především železniční a silniční infrastruktura [118].

Mezi hlavní producenty methanolu na světě patří země s bohatými zdroji zemního plynu a uhlí, které slouží jako primární suroviny pro syntézu methanolu. V roce 2024 byly největšími zeměmi produkujícími a vyvážejícími methanol Trinidad a Tobago, Saúdská Arábie a Spojené státy, přičemž každá z nich využívá svůj přístup k levnému zemnímu plynu pro konkurenceschopnou výrobu (Obrázek 9.9). Čína je také významným producentem, který převážně využívá zplyňování uhlí, což vede k uhlíkově náročnější výrobní cestě. Mezi další klíčové hráče patří Blízký východ, Brazílie, Indie, Nizozemsko, Jižní Korea a Belgie, které významně přispívají ke globálním obchodním tokům methanolu [119].



OBRAZEK 9.9: NEJVĚTŠÍ SVĚTOVÍ PRODUCENTI METHANOLU [119].

Globální síť pro přepravu methanolu zahrnuje kombinaci námořní dopravy, potrubí a vnitrozemských dopravních metod. Methanol se však ve velké míře přepravuje po moři v tankerech z výrobních center do distribučních přístavů po celém světě. Hlavní exportní trasy zahrnují přepravu z Blízkého východu do asijsko-pacifického regionu, ze Severní Ameriky do Evropy a Latinské Ameriky a významné vnitrostátní a regionální toky v rámci Číny. Přístavy vybavené specializovanou infrastrukturou pro skladování a manipulaci s methanolem usnadňují efektivní vykládku a další logistické procesy. Po vylodění na břeh se methanol přepravuje do vnitrozemí převážně železničními a silničními cisternami, optimalizovanými pro flexibilitu a přístup k různým koncovým uživatelům [119].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

9.8 Shrnutí

Methanol (CH_3OH) je globálně vyráběná chemická látka a perspektivní nosič vodíku díky vlastnostem, které zjednodušují jeho skladování, manipulaci a přepravu. Je to bezbarvá, těkavá kapalina při pokojové teplotě a tlaku s bodem varu $64,7^\circ\text{C}$ a bodem tání -98°C , což umožňuje transport v kapalně fázi v širokém teplotním rozsahu bez nutnosti kryogenního nebo vysokotlakého systému. Celosvětově dosáhla spotřeba methanolu v roce 2019 přibližně 98,3 milionu tun a předpokládá se, že do konce roku 2025 překročí 120 milionů tun, přičemž největším spotřebitelem bude Asie (v čele s Čínou). Methanol obsahuje přibližně 12,5 hm. % vodíku a nabízí značnou objemovou hustotu vodíku ($\sim 99 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$), která převyšuje kapalný a stlačený vodík. Díky těmto vlastnostem v kombinaci s jeho kompatibilitou se stávající dopravní infrastrukturou je methanol ekonomicky výhodným nosičem vodíku pro různé distribuční metody.

Souhrnná SWOT analýza methanolu jako nosiče vodíku pro účely přepravy je uvedena na Obrázek 9.10.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Vysoká hustota: V přepočtu asi $99 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$. Manipulace za okolních podmínek: Methanol je kapalina za běžných podmínek. Chemická stabilita: Methanol je za běžných podmínek stabilní. Technologická připravenost: TRL 8–9 pro všechny druhy přepravy. Vysoké využití skladovaného množství: Nezůstává významné množství methanolu v cisternách. Snadná nakládka a vykládka: Čerpadlo nebo gravitační přepouštění.	Složitost řetězce: Výroba a rozklad methanolu. Bezpečnostní rizika: Hořlavá a jedovatá kapalina, výbušné směsi se vzduchem (6–36,5 obj. %), nutnost přísných bezpečnostních opatření. Technologická připravenost: TRL 6–7 pro rozklad methanolu.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Dekarbonizace energetiky a dopravy: Pokud splní všechny podmínky EU pro RFNBO. Rozvoj P2G technologií: Využití přebytků OZE, stabilizace sítě a možnost přepravy této energie. Využití existujících řetězců: Využití obchodních tras methanolu, dostupných cisteren a případně snadné rozšíření přepravy.	Konkurence jiných nosičů vodíku: Amoniak, kapalný vodík, LOHC... Proměnlivost cen elektřiny: Náklady na výrobu obnovitelného vodíku jsou závislé na ceně obnovitelné energie. Dostupnost energie: Nízké využití elektrolyzéru v ČR. Nemožnost výroby methanolu z obnovitelného vodíku: Při plnění legislativních podmínek pro RFNBO bude komplikované nebo nemožné navázat výrobu methanolu na obnovitelný vodík.

OBRÁZEK 9.10: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY METHANOLU JAKO NOSIČE VODÍKU.

Methanol lze přepravovat několika konvenčními způsoby, včetně silničních cisteren, železnice, námořní dopravy a potrubím, přičemž každý z nich má odlišné technické, provozní a nákladové charakteristiky.

V silniční dopravě se methanol přepravuje specializovanými cisternami vybavenými tepelnou izolací, přetlakovými ventily a bezpečnostními zařízeními pro řízení tepelné roztažnosti a minimalizaci rizik. Kapacita nádrží se obvykle pohybuje od 20 do 45 m^3 , přičemž kamiony jsou z bezpečnostních důvodů naplněny na 90–95 % kapacity. Silniční doprava je flexibilní a vhodná pro místní nebo regionální distribuci tam, kde není k dispozici jiná infrastruktura. Náklady a energetická spotřeba jsou na silniční dopravu vyšší ve srovnání s potrubní a železniční dopravou. Ve spojení s vodíkovou mobilitou, a hlavně samotnými čerpacími stanicemi je flexibilita výhodnější. Toho lze nejlépe využít

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

pro tzv. poslední míli, kde je možné přepravovat rovnou směs s vodou, která je vhodná pro rozklad na vodík.

Methanol se přepravuje po železnici ve speciálně navržených cisternách vyrobených převážně z nerezové oceli, které pracují při atmosférickém až nízkém tlaku (až 6 bar). Železniční cisterny mají obvykle objem 50 až 115 m³. Železniční doprava nabízí bezpečnou a ekonomickou možnost distribuce methanolu ve velkém objemu na střední až dlouhé vzdálenosti s nižší cenou než silniční přeprava. Mezi bezpečnostní prvky patří přetlaková zařízení, ochrana proti únikům, materiály kompatibilní s polární a korozivní povahou methanolu a přísné dodržování předpisů o nebezpečných látkách podle rámců RID a DOT. TRL pro železniční přepravu methanolu je také vysoká (8–9) a je podpořena zavedenými logistickými a bezpečnostními protokoly v daném odvětví.

Další možností přepravy methanolu je námořní doprava. Kapalné skupenství methanolu umožňuje přepravu ve standardních tankerech na chemické produkty bez chlazení nebo přetlakování, což zjednodušuje konstrukci lodí a snižuje kapitálové investice do plavidel. Specializované lodě na přepravu methanolu mohou pojmout objem až 120 000 m³, jako např. Millennium Explorer. Lodě jsou vybaveny nádržemi odolnými proti korozi a pokročilými systémy manipulace s nákladem. Ročně se přibližně třetina celosvětové produkce methanolu přepravuje po námořních trasách, což svědčí o vyspělých a rozsáhlých dodavatelských řetězcích. V případě lodní přepravy je methanol používán i jako palivo. Zařízení pro tankování jsou ve více než 120 přístavech po celém světě a podporují lodě různých velikostí, včetně lodí na přepravu sypkých materiálů a kontejnerových lodí. Náklady na námořní dopravu jsou primárně ovlivněny spotřebou paliva pro pohon lodí, přičemž energie na nakládku je zanedbatelná. Manipulaci, balení a nouzové postupy upravují bezpečnostní předpisy, jako je Mezinárodní předpis pro stavbu a vybavení lodí hromadně přepravujících nebezpečné chemikálie (IBC) a Mezinárodní předpis pro námořní přepravu nebezpečného zboží (IMDG). TRL pro přepravu methanolu v námořní dopravě je vysoká (8–9), což odráží komerční připravenost.

Potrubí pro methanol fungují při okolní teplotě a mírném tlaku (10–50 bar) a těží z kapalného stavu methanolu, který ve srovnání s plyny snižuje požadavky na kompresi. Potrubní přeprava je nákladově efektivní pro střední vzdálenosti až do přibližně 475 kilometrů. Celosvětově existují potrubí pro methanol převážně v okolí průmyslových zón, ale jsou méně rozsáhlá než potrubí pro jiné chemikálie, jako je amoniak. Kompatibilita materiálů s potrubími z uhlíkové oceli je proveditelná s vhodnými ochrannými nátěry, což zajišťuje provozní spolehlivost a bezpečnost v rámci regulačních rámců. Potrubí pro methanol mají TRL 8 až 9, což znamená vyspělou technologii pro průmyslové nasazení.

Závěrem lze říct, že vlastnosti methanolu jako kapalného nosiče vodíku za normálních podmínek poskytují oproti jiným nosičům významné výhody, zejména pokud jde o jednoduchost skladování a přepravy, kompatibilitu se stávající infrastrukturou a ekonomickou životaschopnost. Různé způsoby dopravy, včetně potrubní dopravy, námořní dopravy, železnice a silnice, nabízejí flexibilitu pro různé požadavky dodavatelského řetězce, přičemž každý způsob dopravy je podporován vyspělými technologiemi a komplexními bezpečnostními rámci. Zatímco námořní a potrubní doprava je nákladově nejefektivnější pro velké objemy na střední až dlouhé vzdálenosti, železniční a silniční doprava umožňují regionální a flexibilní distribuci, která umožňuje dosáhnout na trhy tam,

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

kde jsou potrubní a přístavní sítě nepřístupné. Methanol představuje vysoce praktický a komerčně použitelný nosič vodíku v současných i budoucích cestách energetické transformace.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
AFIR	Nařízení Evropského parlamentu a rady o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva (Alternative Fuel Infrastructure Regulation)
AR-AFFF	Vodná pěna tvořící film odolná vůči alkoholu (Alcohol-Resistant Aqueous Film-Forming Foam)
ASME	Standardy Americké společnosti strojních inženýrů (American Society of Mechanical Engineers Standards)
ASTM	Americká společnost pro testování a materiály (American Society for Testing and Materials)
ATEX	Výbušné atmosféry (ATmosphères EXplosibles)
CAPEX	Kapitálové výdaje (CAPital EXpenditure)
CFR	Kodex federálních předpisů (Code of Federal Regulations)
ČR	Česká republika
DOT	Ministerstvo dopravy USA (Department of Transportation)
ESD	Nouzové vypnutí (Emergency ShutDown)
EU	Evropská unie
HFO	Těžký topný olej (Heavy Fuel Oil)
HHV	Spalné teplo (Higher heating value)
IATA	Mezinárodní sdružení letecké dopravy (International Air Transport Association)
IBC	Středně velký kontejner (Intermediate Bulk Container)
(Předpis) IBC	Mezinárodní předpis pro stavbu a vybavení lodí hromadně přepravujících nebezpečné chemikálie (International standard for the safe carriage in bulk by sea of dangerous chemicals and noxious liquid substances)
IMDG	Mezinárodní námořní přeprava nebezpečného zboží (International Maritime Dangerous Goods)
IMO	Mezinárodní námořní organizace (International Maritime Organization)
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci (International Organization for Standardization)
LEL	Dolní mez výbušnosti (Lower Explosive Limit)
LHV	Výhřevnost (Lower heating value)
LNG	Zkapalněný zemní plyn (Liquefied Natural Gas)
MeOH	Methanol
MGO	Lodní plynový olej (Marine Gas Oil)
NEN	Královský nizozemský normalizační institut (The Royal Netherlands Standardization Institute)
NREL	Národní laboratoř pro obnovitelné zdroje energie (National Renewable Energy Laboratory)
OOP	Osobní ochranné prostředky
OPEX	Provozní výdaje (OPERational EXpenditure)

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

PED	Směrnice o tlakových zařízeních (Pressure Equipment Directive)
PHMSA	Správa bezpečnosti potrubí a nebezpečných materiálů (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration)
RID	Mezinárodní železniční přeprava nebezpečných věcí
RohrFtgV	Nařízení o plynovodech / Spolkové nařízení Německa o plynovodech
SOLAS	Bezpečnost života na moři (Safety of Life at Sea)
TAL/IKL	Transalpinský ropovod/Ropovod Ingolstadt – Kralupy nad Vltavou – Litvínov
TDG	Přeprava nebezpečného zboží (Transportation of Dangerous Goods)
TPED	Směrnice o přepravitelných tlakových zařízeních (Transportable Pressure Equipment Directive)
TNO	Nizozemská organizace pro aplikovaný vědecký výzkum
TRFL	Technická pravidla pro potrubní systémy v Německu
TRL	Úroveň technologické připravenosti (Technology Readiness Level)
UVPg	Německý zákon o posuzování vlivů na životní prostředí

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Plass, L., et al., *Methanol as a Hydrogen and Energy Carrier*, in *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future: Asinger's Vision Today*, M. Bertau, et al., Editors. 2014, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 619-655.
- [2] Methanol-Institute. *Methanol price and supply/demand*. [cited 2024; Available from: <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>].
- [3] Berggren, M. *Global methanol—State of the industry*. in *Proceedings of the 22nd IMPCA Asian Methanol Conference, Singapore*. 2019.
- [4] Saygin, D. and D. Gielen, *Zero-Emission Pathway for the Global Chemical and Petrochemical Sector*. *Energies*, 2021. 14(13): p. 3772.
- [5] IRENA, *Innovation Outlook: Renewable Methanol*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2021, IRENA.
- [6] Pawelczyk, E., et al. *Recent Progress on Hydrogen Storage and Production Using Chemical Hydrogen Carriers*. *Energies*, 2022. 15, DOI: 10.3390/en15144964.
- [7] Concepcion, J.J., R.N. Sampaio, and G.J. Meyer, *Catalytic Reduction of Carbon Monoxide to Liquid Fuels with Recyclable Hydride Donors*. *ACS Catalysis*, 2024. 14(22): p. 16562-16569.
- [8] Papadias, D.D., J.-K. Peng, and R.K. Ahluwalia, *Hydrogen carriers: Production, transmission, decomposition, and storage*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. 46(47): p. 24169-24189.
- [9] SGS, *METHANOL: PROPERTIES AND USES* 2020.
- [10] Zhao, J., et al., *How to make use of methanol in green catalytic hydrogen production?* *Nano Select*, 2020. 1(1): p. 12-29.
- [11] ABS, *SUSTAINABILITY WHITEPAPER: METHANOL AS MARINE FUEL*. 2021.
- [12] Paterson, J., *Methanol Safe Handling - Technical Bulletin*.
- [13] TransportCanada. *Aqueous solutions of alcohol, Class 3, Flammable Liquids*. Available from: <https://tc.canada.ca/en/dangerous-goods/aqueous-solutions-alcohol-class-3-flammable-liquids>.
- [14] United Nations, *European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways (ADN)*. 2021.
- [15] Ishmael, K. *Classification Containing Methanol*. 2021; Available from: [https://www.thecompliancecenter.com/classification-containing-methanol/#:~:text=Internationally%20\(IATA%20and%20IMDG\)%20methanol,Hazard%20class%203%20and%206.1](https://www.thecompliancecenter.com/classification-containing-methanol/#:~:text=Internationally%20(IATA%20and%20IMDG)%20methanol,Hazard%20class%203%20and%206.1).

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [16] Bomanson, J., B. Ramne, and S. Naos, *SUMMETH – Sustainable Marine Methanol, Deliverable D4.2 - Report on general recommendations for conversions of specific ship types*. 2018. p. 14.
- [17] Safety4sea, *METHANOL BUNKER OPERATING REGULATIONS*. 2022: MUNICIPAL COMPANY, CITY OF GOTHENBURG.
- [18] Methanol Institute, *Methanol Drum Transport, Handling & Storage*
- [19] Methanol Institute, *Precautions for Loading, Unloading, Transport and Storage of Methanol*.
- [20] Garg, N., A. Sarkar, and B. Sundararaju, *Recent developments on methanol as liquid organic hydrogen carrier in transfer hydrogenation reactions*. Coordination Chemistry Reviews, 2021. 433: p. 213728.
- [21] Sterner, M., et al., *19 Import options for green hydrogen and derivatives - An overview of efficiencies and technology readiness levels*. International Journal of Hydrogen Energy, 2024. 90: p. 1112-1127.
- [22] Save-Pro-Solution. *How methanol and alcohols are transported: norms and requirements*. [cited 2025; Available from: <https://saveprosolutions.com/blog/perevezennia-metanolu-ta-spirtiv-normi-ta-vimogi>].
- [23] Save-Pro-Solution. *Transportation of methanol*. [cited 2025; Available from: <https://saveprosolutions.com/perevezennia-metanolu>].
- [24] Osterman, K., *STAINLESS STEELS*.
- [25] SeaCube. *ISO Tank Containers*. [cited 2025; Available from: https://seacubecontainers.com/product_specs/iso-tank-containers-25000-liters/].
- [26] TEC. *Standardised ISO Tank Containers: Uses, Specifications, And Capacity*. 2023; Available from: <https://teccontainersolutions.com/standardised-iso-tank-containers-uses-specifications-and-capacity/>.
- [27] Kadatec. *ISO TANK CONTAINER 20FT / 1CC / TYPE KC240/20*. [cited 2025; Available from: https://kadatec.cz/download/ISO-tanks/ISO-tank-container-20FT_1CC_TYPE-KC240-20_Kadatec-v11a_ENG.pdf].
- [28] Methanol.org. *Methanol Drum Transport, Handling, and Storage*. 2016 [cited 2025; Available from: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/MethanolDrumTransport.pdf>].
- [29] Ramos, R. *Shipping ISO Tanks: Complete Guide to Features, Sizes & Benefits*. 2025; Available from: <https://www.latinamericancargo.com/guides/shipping-iso-tanks/>.
- [30] Methanol-Institute, *methanol safe handling manual - health and safety module*. 2017.
- [31] ADR-Tool. *ADR goods calculator*. 2025 [cited 2025; Available from: <https://adr-tool.com/593/un-1230>].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [32] Methanex. *SAFETY DATA SHEET*. 2025; Available from: https://www.methanex.com/wp-content/uploads/UL-METHANOL-NA_Methanol_NGHS_English_01.31.2025v6.pdf.
- [33] Paterson, J. *METHANOL SMALLQUANTITIES BULLETIN*. [cited 2025; Available from: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Methanol-Small-Quantities-Bulletin.pdf>.
- [34] Strandesen, M., P.B. Poulsen, and A. Schmidt, *Survey of methanol (Cas no. 67-56-1)* 2012, The Danish Environmental Protection Agency.
- [35] Hamelinck, C. and M. Bunse, *Carbon footprint of methanol*. 2022.
- [36] methanol-Institute. *METHANOL RAILCAR AND TANKER TRUCK ACCIDENT RESPONSE*. 2018 [cited 2025; Available from: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/railcarandtankertruckresponse.pdf>.
- [37] Breuer, J.L., et al. *An Overview of Promising Alternative Fuels for Road, Rail, Air, and Inland Waterway Transport in Germany*. *Energies*, 2022. 15, DOI: 10.3390/en15041443.
- [38] Methanol-Institute. *Methanol Safe Handling Manual*. [cited 2024; Available from: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf.
- [39] Methanol-Institute. *METHANOL SAFE HANDLING TECHNICAL BULLETIN - ATMOSPHERIC ABOVE GROUND TANK STORAGE OF METHANOL*. [cited 2025; Available from: <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/03/atmosphericabovegroundstorage.pdf>.
- [40] SafeRack. *Methanol Chemical Overview*. [cited 2025; Available from: <https://saferack.com/industries/bulk-chemical/methanol/>.
- [41] Cargo, Č. *Nejvhodnější vozy pro nákladní přepravu zboží*. 2025 [cited 2025; Available from: <https://www.cdcargo.cz/aplikace/katalog-nakladnich-vozu/>.
- [42] Zhang, W., W. Cheng, and W. Gai, *Hazardous Chemicals Road Transportation Accidents and the Corresponding Evacuation Events from 2012 to 2020 in China: A Review*. *Int J Environ Res Public Health*, 2022. 19(22).
- [43] OTIF. *Dangerous Goods – RID*. 2025 [cited 2025; Available from: https://otif.org/en/?page_id=1105.
- [44] Maty, A.D. and C.J. Wright, *Field Guide to Tank Cars*. 2022.
- [45] ROTH. *Safety data sheet - Methanol*. 2024 [cited 2025; Available from: <https://www.carlroth.com/medias/SDB-AE01-GB-EN.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzNjE5NTN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFHTm1MMmhpTUM4NU1qSXpNVFI5TlRrek16RXdMMU5FUWw5QlJUQXhYMGRDW>

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

DBWT0xuQmtaZ3w5MWQ3NjZiMzkzZWU3MDJjMTljYTY0ZDU4MmJkY2ZmOGFiZjdiZDRhYW
M40GE5MjE3MmE3MzU2MTcwNmE3MWU4.

- [46] Methanol-Institute, *methanol safe handling manual - 5th Edition*. 2020.
- [47] Broekman-Logistics. *How does Czech Republic redefine logistics excellence for global leaders?* [cited 2025; Available from: [https://www.broekmanlogistics.com/insight/how-does-czech-republic-redefine-logistics-excellence-for-global-leaders/#:~:text=Beyond%20its%20\(%20Czech%20Republic%20\)%20strategic,deeply%20integrated%20within%20Europe%27s%20supply%20chain%20network.](https://www.broekmanlogistics.com/insight/how-does-czech-republic-redefine-logistics-excellence-for-global-leaders/#:~:text=Beyond%20its%20(%20Czech%20Republic%20)%20strategic,deeply%20integrated%20within%20Europe%27s%20supply%20chain%20network.)
- [48] Ellis, J., et al., *FASTWATER - Deliverable 7.1 - Report on methanol supply, bunkering guidelines, and infrastructure* 2021.
- [49] TNO, *Insight into the energy consumption, CO2 emissions and NOx emissions of rail freight transport*. 2018.
- [50] Sánchez, A., E.C. Blanco, and M. Martín, *Comparative assessment of methanol and ammonia: Green fuels vs. hydrogen carriers in fuel cell power generation*. Applied Energy, 2024. 374: p. 124009.
- [51] AAR. *Freight railroads safely transport hazmat*. [cited 2025; Available from: <https://www.aar.org/issue/freight-rail-hazmat-safety/>].
- [52] Fernandes, A., *Green Maritime Methanol 2.0*. 2023.
- [53] EEA. *Climate*. 2024 [cited 2025; Available from: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/climate#:~:text=These%20projections%20indicate%20that%2C%20in,2022%20to%2031.1%25%20in%202050.>
- [54] Frohm, E. and U. Sila, *OECD Economics Department Working Papers No. 1754 - Towards net zero in the Czech Republic*. 2023, OECD.
- [55] ISO, *ISO 1496-3:2019, Series 1 freight containers — Specification and testing, Part 3: Tank containers for liquids, gases and pressurized dry bulk*. 2019.
- [56] Railway-Supply-Institute. *Tank Car Standards in North America*. [cited 2025; Available from: <https://tankcarresourcecenter.com/standards/>].
- [57] Center, M.-M.-K.M., *Vessel design considerations for methanol retrofits*. 2025.
- [58] marine-service-noord. *Methanol fuel tanks*. [cited 2025; Available from: <https://marine-service-noord.com/en/products/alternative-fuels-and-technologies/methanol/methanol-fuel-tanks/>].
- [59] DNV. *Methanol as fuel heads for the mainstream in shipping*. 2023 [cited 2025; Available from: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Methanol-as-fuel-heads-for-the-mainstream-in-shipping/>].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [60] Marquez, C., *MARINE METHANOL - Future-Proof Shipping Fuel*. 2023, Methanol Institute.
- [61] Klein, T., *Methanol: a future-proof fuel*. Future Fuel Strategies, 2020.
- [62] Methanex, *Marine Fuel*. 2024.
- [63] ISO, *Methanol as a fuel for marine applications — General requirements and specifications*. 2024.
- [64] IRCLASS, *Best Practices - Methanol Bunkering 2025*. 2025.
- [65] SAFETY4SEA. *ISO issues 6583:2024 standard for methanol as a marine fuel*. 2024 [cited 2025; Available from: <https://safety4sea.com/iso-issues-65832024-standard-for-methanol-as-a-marine-fuel/>].
- [66] WÄRTSILÄ. *Methanol carrier MILLENNIUM EXPLORER*. [cited 2025; Available from: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/methanol-carrier-millennium-explorer#:~:text=The%20double%2Dhulled%20methanol%20carrier,build%2Dup%20in%20emergency%20situations>].
- [67] OCIMF, *The Carriage of Methanol in Bulk Onboard Offshore Vessels*. 1 ed. 2020.
- [68] IRCLASS, *GUIDELINES ON METHANOL FUELED VESSELS*. 2025.
- [69] IMO, *INTERIM GUIDELINES FOR THE SAFETY OF SHIPS - USING METHYL/ETHYL ALCOHOL AS FUEL*. 2020.
- [70] IMO. *Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods (EmS) Guide*. Available from: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/ems-guide.aspx>.
- [71] IMO, *CARRIAGE OF DANGEROUS GOODS - INTERNATIONAL MARITIME DANGEROUS GOODS (IMDG) CODE - REVISED EMERGENCY RESPONSE PROCEDURES FOR SHIPS CARRYING DANGEROUS GOODS (EMS GUIDE)*. 2018.
- [72] ecfr. *PART 1090—REGULATION OF FUELS, FUEL ADDITIVES, AND REGULATED BLENDSTOCKS*. 2020 [cited 2025; Available from: <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-U/part-1090>].
- [73] ecfr. *PART 151—BARGES CARRYING BULK LIQUID HAZARDOUS MATERIAL CARGOES*. 1970 [cited 2025; Available from: <https://www.ecfr.gov/current/title-46/chapter-I/subchapter-O/part-151>].
- [74] sdir. *Carriage of hazardous and noxious liquid substance in bulk on existing offshore support vessels after 31 December 2020*. 2021 [cited 2025; Available from: <https://www.sdir.no/regelverk/rundskriv/carriage-of-hazardous-and-noxious-liquid-substance-in-bulk-on-existing-offshore-support-vessels-after-31-december-2020/#:~:text=Compared%20to%20the%20current%20situation%2C%20amendments%20to,at%20safeguarding%20life%2C%20health%20and%20material%20values>].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [75] Chemical-Tanker-Knowledgebase. *Chemical Tanker Knowledgebase - IBC Code*. 2020 [cited 2025; Available from: <https://chemicaltankerknowledgebase.com/ibc-code/#:~:text=S/P%20product%20is%20included%20in%20the%20Code,to%20which%20the%20Code%20does%20not%20apply%27>].
- [76] *Guidance - MCA customer process for alternative fuels - methanol*. 2025 [cited 2025; Available from: <https://www.gov.uk/government/publications/mca-customer-process-for-alternative-fuels-methanol/mca-customer-process-for-alternative-fuels-methanol>].
- [77] ClassNK, *Safety Requirements for Construction and Equipment of Ships Using Methanol as Fuel*. Class NK Technical Journal, 2023. 8: p. 13-19.
- [78] Lloyd's-Register, *Introduction to Methanol Bunkering - Technical Reference*. 2020.
- [79] ABS, *Guide for Methanol and Ethanol Fueled Vessels*. 2022.
- [80] Zomer, G., et al., *TNO 2020 R11105 - Green Maritime Methanol - Operation aspects and the fuel supply chain*. 2020, TNO.
- [81] Senmatic. *The 5 most relevant marine fuels right now*. [cited 2025; Available from: [https://senmatic.com/knowledge/sensor/the-5-most-relevant-marine-fuels-right-now/#:~:text=Heavy%20Fuel%20Oil%20\(often%20referred,oil%20or%20marine%20gas%20oi](https://senmatic.com/knowledge/sensor/the-5-most-relevant-marine-fuels-right-now/#:~:text=Heavy%20Fuel%20Oil%20(often%20referred,oil%20or%20marine%20gas%20oi)l].
- [82] ITOPF, *FATE, BEHAVIOUR AND POTENTIAL DAMAGE & LIABILITIES ARISING FROM A SPILL OF METHANOL INTO THE MARINE ENVIRONMENT*. 2024.
- [83] EPA, *MARPOL Annex VI and the Act To Prevent Pollution From Ships (APPS)*. 2020.
- [84] Aminzadegan, S., et al., *Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review*. Energy Reports, 2022. 8: p. 2508-2529.
- [85] ecfr. *PART 150—COMPATIBILITY OF CARGOES*. 2012 [cited 2025; Available from: <https://www.ecfr.gov/current/title-46/chapter-I/subchapter-O/part-150>].
- [86] Dan-Bunkering, *ISO 8217 2017 FUEL STANDARD FOR MARINE DISTILLATE FUELS*. 2017.
- [87] Valve-World-Americas-Publisher. *Reduction of Fugitive Emissions: Valve Testing According to ISO 15848-1*. 2023 [cited 2025; Available from: <https://valve-world-americas.com/reduction-of-fugitive-emissions-valve-testing-according-to-iso-15848-1/>].
- [88] Bechtold, R.L., M.B. Goodman, and T.A. Timbario, *Use of Methanol as a Transportation Fuel*. 2007.
- [89] Transport-Advancement. *Transport Costs Crucial for Green E-Methanol Market*. [cited 2025; Available from: <https://www.transportadvancement.com/articles/transport-costs-crucial-for-green-e-methanol-market/>].

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [90] Hans van 't Noordende, G.T., Kevin Rouwenhorst, Marthe Fruytier, *Clean Ammonia Roadmap*, B.L. Communicatie, Editor. 2024, Institute for Sustainable Process Technology.
- [91] Vijay, V., *Techno-economic Analysis of Transporting Offshore PtX Products via Ship and Pipeline*. 2023.
- [92] Kitamura, Y., et al., *Method for pressure transport of methanol through a pipeline*. 1984, Toyo Engineering Corp: United States.
- [93] Legislation.gov.uk. *The Pipelines Safety Regulations 1996*. 1996 [cited 2025; Available from: <https://www.legislation.gov.uk/uksi/1996/825>].
- [94] OSTI.GOV, *Transport of methanol by pipeline*. 1985.
- [95] ASME, *ASME B31.3 Process Piping Guide*. 2014, ASME: The American Society of Mechanical Engineers.
- [96] Step-Change-In-Safety. *Failure of Carbon Steel Piping due to Methanol Stress Corrosion Cracking*. 2019 [cited 2025; Available from: <https://www.stepchangeinsafety.net/alerts-moments/failure-of-carbon-steel-piping-due-to-methanol-stress-corrosion-cracking/>].
- [97] Lafth, M.Y. and H.M. Lieth, *Impact the sulphur content in Iraqi crude oil on the mechanical properties and corrosion behaviour of carbon steel in various types of API 5L pipelines and ASTM 106 grade B*. Nonlinear Engineering, 2025. 14(1).
- [98] EPCLand. *ASTM A106 vs. ASTM A53 vs. API 5L*. [cited 2025; Available from: <https://blog.epcland.com/astm-a106-vs-astm-a53-vs-api-5l/#:~:text=In%20summary%2C%20ASTM%20A106%2C%20ASTM,mechanical%20properties%20of%20these%20standards?>].
- [99] Gouda, O.E., A.Z.E. Dein, and M.A.H. El-Gabalawy, *Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines*. Electric Power Systems Research, 2013. 103: p. 129-136.
- [100] US-Department-of-Transportation. *Hazardous Materials Regulations*. [cited 2025; Available from: <https://www.phmsa.dot.gov/standards-rulemaking/hazmat/hazardous-materials-regulations#:~:text=PHMSA%20is%20responsible%20for%20regulating,modes%20of%20transportation%2C%20including%20pipelines>].
- [101] *Directive 2014/68/EU of The European Parliament and of The Council*, T.E.P.a.T. Council, Editor. 2014: Official Journal of the European Union.
- [102] DOT, *STUDY OF NONPETROLEUM HAZARDOUS LIQUIDS TRANSPORTED BY PIPELINE PURSUANT TO THE SAFETY, REGULATORY CERTAINTY, AND JOB CREATION - ACT of 2011, SECTION 17*. 2015, U.S. Department of Transportation (DOT) Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA).
- [103] Evergreen, *PHMSA Amendment No. 195-102 Code Updates*. 2020.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [104] EUR-Lex. *DIRECTIVE 2012/18/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. 2012 [cited 2025; Available from: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/18/oj/eng>.
- [105] European-Commission. *Alternative Fuels Infrastructure*. 2024 [cited 2025; Available from: https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/clean-transport/alternative-fuels-sustainable-mobility-europe/alternative-fuels-infrastructure_en.
- [106] European-Commission, *Seveso-III Directive and TEIA Convention*. 2021.
- [107] European-Commission, *ATEX GUIDELINES*. 2013.
- [108] Atkinson, R.D., *Distribution of Methanol as a Transportation Fuel*. 1982: Standards Development and Support Branch, Emission Control Technology ...
- [109] DeSantis, D., et al., *Cost of long-distance energy transmission by different carriers*. IScience, 2021. 24(12).
- [110] Methanol-Institute, *The Alternative Fuel Infrastructure Regulation*. 2021.
- [111] European Commission, *Guidelines related to the Pressure Equipment Directive 97/23/EC (PED)*. 2014.
- [112] Sunny-Steel. *ASTM A333 Gr.6, Low Temperature Pipe Seamless*. [cited 2025; Available from: <https://www.sunnysteel.com/astm-a333-gr-6-low-temperature-pipe-seamless.php#:~:text=ASTM%20A333%20Gr.-,6%2C%20Low%20Temperature%20Pipe%20Seamless,up%20to%202D45%20degrees%20C.&text=They%20are%20low%2D%20to%20medium,cryogenic%20services%2C%20and%20power%20plants>.
- [113] NEN. *Requirements for pipeline systems - Part 1: General requirements*. 2020 [cited 2025; Available from: <https://www.nen.nl/en/nen-3650-1-2020-nl-266927>.
- [114] TRFL. *TRFL - Technische Regeln für Rohrfernleitungsanlagen*. 2024 [cited 2025; Available from: <https://www.dinmedia.de/en/publication/trfl-taschenbuch/371036745>.
- [115] IPPC. *International Plant Protection Convention*. [cited 2025; Available from: <https://www.ippc.int/en/>.
- [116] CUBE-CONCEPTS-GmbH. *Environmental impact assessment (UVPg)*. 2024 [cited 2025; Available from: <https://cubeconcepts.de/en/environmental-impact-assessment-uvpg/>.
- [117] BMUKN, *Federal Nature Conservation Act – BNatSchG*. 2010.
- [118] PV-magazine. *Transport costs are a crucial factor for the future of the green e-methanol market in Europe*. 2025 [cited 2025; Available from: <https://www.pv-magazine.com/2025/02/11/transport-costs-are-a-crucial-factor-for-the-future-of-the-green-e-methanol-market-in-europe/>.

Methanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [119] Perez, P.J. *Understanding the Global Methanol Supply Chain: From Production to End Use*. 2025
[cited 2025; Available from:
<https://www.chemanalyst.com/NewsAndDeals/NewsDetails/understanding-the-global-methanol-supply-chain-from-production-to-end-use-37422>.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10 Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Václav Koleník¹, Pavel Hruběš¹, Ľubomír Krajňák²

¹České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Katedra dopravní telematiky, Konviktská 20, 110 00 Praha 1

²České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Katedra dopravních prostředků, Konviktská 20, 110 00 Praha 1

10.1 Obecné informace

Ethanol (C_2H_5OH) je bezbarvá, těkavá kapalina s charakteristickým zápachem, za normálních podmínek stabilní a dobře mísitelná s vodou. Díky relativně nízkému bodu varu ($78,3\text{ }^{\circ}C$ při normálním tlaku $1\,013\text{ hPa}$) a hustotě blízké benzínu ($786,4\text{ kg/m}^3$ při $25\text{ }^{\circ}C$) je z hlediska manipulace, skladování a přepravy velmi podobný běžným kapalným motorovým palivům. V energetice má dvojí roli: jednak jako samostatné nebo směsné motorové palivo, jednak jako chemická platforma a potenciální nosič vodíku v budoucích palivových řetězcích. V řadě zemí je dnes ethanol etablovaným komponentem automobilových benzínů a v některých regionech se používá i jako čisté palivo pro vozidla s flexibilním palivovým systémem [1], [2], [3], [4].

Globální produkce bioethanolu v posledních dvou dekádách výrazně vzrostla, přičemž hlavními producenty jsou Spojené státy a Brazílie. V Brazílii tvoří ethanol významnou část palivové bilance v osobní dopravě a vozový park je z velké části tvořen tzv. flex-fuel vozidly schopnými spalovat jak směs benzínu s ethanolem, tak samotný hydratovaný ethanol [1], [2].

V USA se ethanol uplatňuje především ve směsích E10 a E15, v některých regionech pak i jako vysokoprocentní palivo (E85) pro speciální vozidla, distribuční systém je přitom nastaven tak, že anhydridní ethanol je dopravován odděleně a mísí se až v distribučních terminálech [3], [5].

V evropském kontextu je ethanol používán zejména ve směsích E5 a E10, v menším rozsahu pak jako komponent vyšších směsí nebo specializovaných paliv pro těžkou dopravu a vozidla s upraveným motorem [3], [6].

Z hlediska zdrojů lze rozlišit tzv. první generaci bioethanolu vyráběnou z cukerných a škrobových plodin (cukrová třtina, kukuřice, obiloviny, cukrová řepa) a druhou generaci na bázi lignocelulózové biomasy (zemědělské zbytky, dřevní hmota, energetické byliny). Druhá generace je z hlediska využití půdy a konkurence s potravinářskou produkcí perspektivnější, ale technologicky i logisticky náročnější. Studie ukazují, že klíčovým problémem je sběr a doprava rozptýlené biomasy do ethanolových závodů, zatímco vlastní přeprava hotového ethanolu již probíhá v relativně standardizované podobě [3], [7], [8].

Při hodnocení environmentálních přínosů bioethanolu je proto nutné brát v úvahu nejen koncovou fázi spalování v motoru, ale celý řetězec od pěstování biomasy přes zpracování až po distribuci. Některé scénáře například ukazují, že bez vhodných opatření na straně zemědělství a průmyslu

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

může intenzivní rozvoj ethanolu v dopravě vést pouze k omezenému, nebo dokonce negativnímu čistému přínosu pro kvalitu ovzduší a zdraví obyvatel [2], [9], [10].

Z pohledu nosiče vodíku je ethanol zajímavý tím, že má relativně vysoký obsah vázaného vodíku a existují technologie parního reformingu, parciální oxidace i autotepelního reformingu, které umožňují získat z ethanolu vodík při teplotách nižších, než jsou obvyklé pro zemní plyn [11]. Teoreticky lze při parním reformingu získat významné množství vodíku na jednotku objemu kapaliny, přičemž ethanol má současně vysokou objemovou energetickou hustotu a je stabilní při okolních teplotách [11]. Ve srovnání s plynným nebo kapalným vodíkem, které vyžadují vysokotlaké zásobníky nebo kryogenní podmínky, tak ethanol nabízí atraktivní kombinaci energetické hustoty, jednoduššího skladování a možnosti využít stávající kapalnou logistickou infrastrukturu.

10.1.1 Základní vlastnosti formy z pohledu přepravy

Pro účely přepravy je zásadní, že ethanol je při běžných teplotách kapalný, není potřeba jej stlačovat na vysoké tlaky ani ochlazovat. To umožňuje jeho dopravu v běžných atmosférických cisternách, zásobnících a potrubních systémech pro hořlavé kapaliny, které jsou již dnes v rozsáhlé míře vybudovány pro ropné produkty a další kapalná paliva [1], [5], [6]. Ethanol je plně mísitelný s vodou a má nízkou viskozitu (kinematická viskozita představuje hodnotu 0,7503 mm²/s), což usnadňuje čerpání a mísení, ale zároveň zvyšuje citlivost na příměs vody v logistickém řetězci. V praxi proto zůstává ethanol až do úrovně distribučních terminálů skladován a dopravován odděleně a teprve na terminálu je mísen s benzínem, aby se minimalizovalo riziko fázového dělení paliva a koroze v zásobnících a potrubí [1], [4], [5].

Z hlediska materiálové kompatibility může ethanol negativně ovlivňovat některé kovy a polymerní materiály. Zvláštní pozornost se věnuje těsněním, hadicím a vnitřním povlakům nádrží: ponořovací testy ukazují, že některé běžně používané elastomery v prostředí ethanol–benzínových směsí výrazně mění své mechanické vlastnosti, zatímco vhodně zvolené fluorované elastomery nebo určité epoxidové povlaky vykazují dobrou dlouhodobou stabilitu [1]. To znamená, že přechod na vyšší podíly ethanolu v palivovém systému je spojen především s požadavky na výběr materiálů a kontrolu kvality v infrastruktuře, nikoli s potřebou zcela nových typů dopravních prostředků.

10.1.2 Bezpečnost formy pro přepravu

Z bezpečnostního hlediska je ethanol klasifikován jako vysoce hořlavá kapalina; mezinárodní přepravní předpisy jej řadí do třídy hořlavých kapalin (UN 1170). Hlavním rizikem jsou hořlavé páry, které mohou při úniku a nedostatečném větrání vytvořit se vzduchem výbušnou směs, a dále možnost vzniku požáru při styku s otevřeným ohněm nebo jiným zdrojem zapálení. Na rozdíl od některých jiných nosičů vodíku (například amoniaku) však ethanol nevyžaduje zvláštní opatření z hlediska akutní toxicity; jeho primární riziko je hořlavost a riziko znečištění životního prostředí, nikoli toxicita.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Klasifikace látky podle nařízení (ES) č. 1272/2008 (CLP)

Ethanol (CAS: 64-17-5) je klasifikován následovně:

- H225: Vysoce hořlavá kapalina a páry (Obrázek 10.1).
- H319: Způsobuje vážné podráždění očí (Obrázek 10.2).

Piktogramy nebezpečnosti:



OBRÁZEK 10.1:
PIKTOGRAM HOŘLAVÉ
LÁTKY [12].



OBRÁZEK 10.2:
PIKTOGRAM DRÁŽDIVÉ

NFPA 704 klasifikace (USA) (Obrázek 10.3)

Národní asociace požární ochrany (NFPA) označuje ethanol podle systému NFPA 704 následovně:

- Zdravotní nebezpečí (modré pole): 2 – krátkodobé vystavení může způsobit dočasné poškození.
- Hořlavost (červené pole): 3 – může být zapálen při běžné teplotě.
- Reaktivita (žluté pole): 0 – stabilní, nereaktivní za normálních podmínek.



OBRÁZEK 10.3: NFPA 704 KLASIFIKACE PRO ETHANOL [13].

Při posuzování environmentálních rizik se ethanol vyznačuje dobrou biologickou odbouratelností a absencí síry a perzistentních aromatických uhlovodíků, což obecně snižuje dlouhodobou perzistenci jeho zbytků v životním prostředí ve srovnání s těžšími ropnými produkty. Na druhé straně může větší únik ethanolu do vodního prostředí vést k výraznému snížení obsahu rozpuštěného kyslíku a akutnímu stresu pro vodní organismy. Zátěž je závislá na objemu, rychlosti ředění a schopnosti regenerace ekosystému [9], [10]. V oblasti podzemních nádrží a starých skladů bylo navíc prokázáno, že přítomnost ethanolu může zvyšovat mobilitu některých kontaminantů v podzemních vodách, což klade vyšší nároky na monitoring a údržbu těchto zařízení [5], [9].

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.2 Silniční přeprava

Silniční přeprava představuje v současných logistických řetězcích ethanolu základní článek mezi výrobními závody, rafineriemi, směšovacími terminály a konečnými odběrateli. V distribučních systémech v Evropě i Severní Americe je běžné schéma, v němž jsou dlouhé tranzitní toky řešeny železnicí nebo lodní dopravou, zatímco konečná distribuce z terminálů k čerpacím stanicím nebo průmyslovým odběratelům probíhá téměř výhradně autocisternami [1], [5]. Fyzikálně-chemické vlastnosti ethanolu umožňují využívat prostou cisternovou přepravu bez potřeby tlakových nádob či kryogenních technologií.

10.2.1 Vhodnost přepravy

Jako kapalné palivo lze ethanol efektivně přepravovat v objemech desítek kubických metrů v běžných silničních cisternách a ISO cisternových kontejnerech, které jsou již provozovány v rámci existující ropné a chemické logistiky. Ostrovní řešení je vhodné a umožňuje pružné zásobování i menších odběrných míst, a to bez potřeby napojení na železniční či potrubní infrastrukturu. Na přepravu ethanolu tady mohou sloužit menší autocisterny, nebo IBC kontejnery. Díky husté silniční síti je způsob distribuce na krajské úrovni v současnosti standardní a vhodný zejména v rámci propojení výrobních závodů či regionálních skladů, a to bez nutnosti budování další infrastruktury. Na národní úrovni je umožněna přeprava díky dobře vyvinuté a dlouhodobě zavedené bezpečné přepravy na dlouhé vzdálenosti (legislativní rámec ADR). V rámci EU úrovně prostřednictvím dohody ADR je umožněna přeprava ethanolu i mezi členskými státy bez technických úprav prostředků. Silniční doprava je tak využívána jako navazující způsob přepravy k železniční a námořní dopravě [5]. Pro scénáře využití ethanolu jako nosiče vodíku je silniční přeprava výhodná zejména v počátečních fázích rozvoje, kdy jsou objemy distribuovaného produktu relativně nízké a prostorově rozptýlené, a dokud by investice do nových potrubních sítí nebo specializované železniční infrastruktury nebyly ekonomicky odůvodnitelné [2], [6].

10.2.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologická připravenost silniční přepravy ethanolu odpovídá plně komerčnímu nasazení (TRL 9). V literatuře je tato část logistického řetězce popisována jako standardní, dlouhodobě ověřená technologie, která se v podstatě neliší od přepravy benzinu či dalších kapalných paliv [1], [5]. Výrobci, distributoři a provozovatelé čerpacích stanic mají s manipulací a přepravou ethanolu rozsáhlé zkušenosti; v řadě zemí je ethanol již desítky let rutině rozvážen jako složka směsných paliv (E5, E10) nebo jako samostatné palivo pro tzv. „flex-fuel“ vozidla, která dokážou spalovat typicky benzin s obsahem ethanolu 0-85 % (v ČR směs typicky prodávána jako „E85“). Příklad takového vozidla je uveden na Obrázek 10.4.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku



OBRAZEK 10.4: VOZIDLO SCHOPNÉ SPALOVAT AŽ 85% SMĚS ETHANOLU V BENZINU. TYPICKY JDE O VOZIDLA ZNAČKY SAAB, VOLVO NEBO FORD.

V kontextu vodíkové mobility je tedy silniční přeprava ethanolu technicky zcela připravená a případné nové prvky (například decentralizované reformní jednotky v dopravních uzlech) se týkají až následného využití, nikoli samotného transportu [9].

10.2.3 Popis druhu přepravy

Při silniční přepravě ethanolu se využívají především jedno nebo vícekomorové autocisterny s objemem typicky 20–35 m³. Cisterny jsou vybaveny pojistnými a podtlakovými ventily, uzemňovacími body, armaturami pro spodní plnění, případně i vrchní, a často i systémy pro zpětné odsávání par, aby se minimalizovaly emise těkavých organických látek při manipulaci. U větších logistických toků se běžně používají kombinace tahače s návěsem a případně i souprav s přívěsem. Pro menší objemy, laboratorní dodávky nebo zásobování menších odběratelů se používají IBC kontejnery (Obrázek 10.5 vlevo) a sudy přepravované na plošinových vozidlech, přičemž princip zabezpečení a označení nákladu odpovídá požadavkům na nebezpečné látky třídy 3 [5], [21].

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku



OBRÁZEK 10.5: IBC KONTEJNER (VLEVO) A ISO CISTERNOVÝ KONTEJNER NA ETHANOL (VPRAVO).

Významnou roli hraje také využití ISO cisternových kontejnerů (Obrázek 10.5 vpravo), které umožňují snadný přechod mezi silniční, železniční a námořní dopravou bez přepouštění produktu. Tyto kontejnery jsou konstruovány podle mezinárodních standardů a v případných intermodálních řetězcích slouží jako základní logistická jednotka; silniční doprava pak zajišťuje první a poslední úsek přepravy – z výrobního závodu do překladiště a z přístavu nebo železniční stanice do terminálu či k zákazníkovi [1], [2].

10.2.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnost silniční přepravy ethanolu vychází z jeho klasifikace jako vysoce hořlavé kapaliny. Hlavními riziky jsou úniky par a kapalin, možnost vzniku hořlavé atmosféry v uzavřených nebo špatně větraných prostorech a následný požár. Z toho vyplývají požadavky na konstrukci cisteren, uzemnění vozidel, použití antistatických hadic při plnění a vyprazdňování, omezení zdrojů zapálení a vhodné větrání nákladových a vykládkových míst [5].

Opatření při nakládání a vykládání [14] [15]:

- Správné označení cisterny a technických zařízení podle ADR předpisů (rychlá identifikace nebezpečné látky v nouzových případech).
- Cisterna uzemněná kvůli riziku vzniku statické elektřiny a připojená k uzemňovacímu systému plnicího místa.
- Zajištění stejného elektrického potenciálu při propojení mezi cisternou a plnicím potrubím – potrubí a cisterna jsou nejdříve spojeny vodičem zapojeným do k tomu určeného konektoru.
- Kontrola těsnosti a stavu hadic, spojek, armatur a bezpečnostních ventilů ještě před samotným zahájením operace.
- Zákaz kouření a používání otevřeného ohně v okolí přečerpávací techniky.
- Zabránění náhodnému vniknutí nepovoleným osobám a jiným vozidlům.
- Zajištění přítomnosti proškolené osoby sledující průběh procesu plnění/vypouštění.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Opatření v případě úniku a požáru:

Riziko úniku snižuje využití certifikovaných nádrží z materiálů určených pro nádrže na ethanol, potrubí a těsnění musejí být kompatibilní s ethanolem; literatura upozorňuje zejména na možné problémy s korozí některých kovů (hliník, zinek, některé oceli) a s bobtnáním nevhodně zvolených elastomerů [1]. Tento problém se v omezené míře projevoval i u palivových systémů motorových vozidel při zavádění E5 a E10 paliv.

Havarijní plány v distribučních terminálech a u specializovaných dopravců zpravidla zahrnují postupy pro řešení úniku ethanolu z cisterny, včetně okamžitého zabezpečení místa, vytvoření záchytných bariér, zabránění vniknutí ethanolu do kanalizace a vodních toků a použití vhodných hasicích prostředků při požáru [16].

Vhodná a nevhodná hasiva:

Vhodné je použití pěnových hasicích prostředků určených pro alkoholy a suchých chemických hasicích přístrojů. Hašení vodou je problematické – vodní mlha snižuje teplotu a šíření požáru, ale silný proud může naopak požár rozšířit (ethanol je lehčí než voda a hoří na jejím povrchu) [16].

Technologické ztráty při nakládání a vykládání ethanolu [17] [18]:

Při nakládce a vykládce ethanolu dochází ke ztrátám unikem. Nedochozí k chemickým ztrátám, protože ethanol je za běžných podmínek stabilní látkou. Ztráty tak můžeme rozdělit na:

Evaporační ztráty (ztráty odparem)

- Proces, kdy při plnění a vyprazdňování cisteren dochází k vytěsňování par ethanolu z nádrže. Tyto ztráty se pohybují v jednotkách gramů na m³ přečerpávaného ethanolu, což odpovídá méně než 0,01 % na jednu operaci nakládky/vykládky za běžných podmínek.

Ztráty zbytkového množství

- V plnicích hadicích, armaturách, potrubí a nádržích samotných se po ukončení přečerpávání nachází zbytkové množství ethanolu, které není možné zcela technicky přečerpat do cisterny. Z průmyslových manuálů vychází, že zbytkové množství se pohybuje v řádu jednotek litru na jeden proces (v závislosti na délce a průměru hadice). Na 30 m³ objemu cisterny připadají řádově 3 litry ztráty zbytkového množství, což je ztráta pouze 0,01 %.

Ztráty úkapem při připojování a odpojování hadic

- Mechanickým připojováním a odpojováním hadic dochází také k menším ztrátám ve formě úkapu kapaliny nebo uvolnění malého množství par. Opatřením podle technických výrobců může být aplikace suchých spojek, které výrazně snižují tyto ztráty a riziko úniku v porovnání s klasickými šroubovými spoji.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.2.5 Legislativní omezení

Silniční přeprava ethanolu podléhá mezinárodním a národním předpisům pro přepravu nebezpečných věcí. V evropském prostoru je klíčová dohoda ADR, podle níž je ethanol klasifikován pod UN 1170 jako hořlavá kapalina (třída 3, klasifikační kód F1). ADR stanovuje požadavky na konstrukci a zkoušení cisteren, značení vozidel, vybavení posádek, dokumentaci a omezení průjezdu tunely (cisterna s ethanollem nesmí do tunelů kategorie D a E). Národní legislativa v jednotlivých státech EU tato pravidla přejímá a doplňuje o požadavky z oblasti bezpečnosti práce, požární ochrany a prevence závažných havárií [5]. Obce mohou určit další omezení – zákaz vjezdu do center, případně definovat povinné trasy pro nebezpečný náklad.

Z praktického hlediska to znamená, že vozidla přepravující ethanol musejí být vybavena odpovídajícím značením, mít příslušné doklady a jejich řidiči musejí vlastnit osvědčení ADR. Pro ethanollem zásobované terminály a velké sklady pak platí prahové hodnoty pro zařazení do režimu prevence závažných havárií, které se odvíjejí od celkového skladovaného množství a od kombinace různých nebezpečných látek (detailněji viz dokument Alternativní forma Ethanol – skladování) [16].

10.2.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V českých podmínkách je infrastruktura pro silniční přepravu ethanolu dlouhodobě zavedená a využívána jak pro potravinářský a technický ethanol, tak pro palivový ethanol. Síť čerpacích stanic, rafinerií a distribučních terminálů je navržena pro dovoz a rozvoz kapalných paliv po silnici a ethanol v ní plní roli jedné složky automobilových benzínů. Z hlediska případného využití ethanolu jako nosiče vodíku je proto možné navázat na stávající logistické toky a jejich kapacity, aniž by bylo nutné budovat zcela novou dopravní infrastrukturu. Silniční doprava tak může v ČR plnit roli primárního způsobu distribuce ethanolu od výrobců nebo importérů k reformním jednotkám v dopravních uzlech, případně k vodíkovým plnicím stanicím, kde by probíhala přeměna ethanolu na vodík.

Čerpání ethanolu [19] [20]:

Nejvíce běžným typem čerpadel jsou odstředivá čerpadla. Nacházejí použití při přečerpávání ethanolu mezi nádrží a cisternou nebo ve skladových systémech.

- Průtok: může dosahovat desítky až stovky m^3/h , záleží od velikosti a typu čerpadla.
- Tlak: typicky do 10 bar.
- Příkon: několik kW až desítky kW (orientačně odpovídá 1 kW příkonu cca 20 m^3/h).
- Materiál: nerezová ocel zajišťující chemickou odolnost vůči ethanolu.

10.2.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost silniční přepravy ethanolu je dána především spotřebou nafty v nákladních vozidlech a je výrazně závislá na přepravní vzdálenosti, profilu trasy a stupni využití kapacity cisteren. Analýzy dodavatelských řetězců bioethanolu ukazují, že logistika (včetně silniční dopravy suroviny a hotového paliva) tvoří významnou, ale nikoli dominantní část celkových energetických nároků a emisí v životním cyklu paliva [2], [8]. Ve srovnání s železnicí a potrubím jsou jednotkové energetické náklady silniční dopravy vyšší, nicméně na krátkých a středních vzdálenostech a při

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

menších objemech může být silniční varianta z hlediska celkových nákladů i emisí stále výhodná, zejména pokud by alternativou bylo budování nové infrastruktury

Výpočet energetické náročnosti přepravy ethanolu:

Výhřevnost nafty 44 MJ/kg = 12,2 kWh/kg = 10,2 kWh/l

Spotřeba tahače 30 l nafty /100 km

Kapacita cisterny 30 m³ = 23,6 t ethanolu

Následující rovnice (10.1) určuje energetickou náročnost přepravy kilogramu ethanolu plnou silniční cisternou na vzdálenost 100 km.

$$\frac{10,2kWh/l * 30 l}{23600 kg} \cong 0,013 kWh/kg \quad (10.1)$$

Energetická náročnost je přibližně 0,013 kWh energie na přepravu 1 kg ethanolu na 100 km. To odpovídá cca 0,1 kWh/kg vodíku uloženého v ethanolu (vodík tvoří cca 13,13 % hmotnosti). Pokud budeme dále uvažovat uvolnění vodíku z ethanolu parní reformací, měrná energetická náročnost přepravy se sníží na 0,067 kWh/kg vodíku (při parní reformaci se uvolní víc vodíku, než bylo v přepravovaném ethanolu).

10.2.8 Ekonomické aspekty

Ekonomické hodnocení silniční přepravy ethanolu zahrnuje jak provozní náklady (palivo, mzdy, údržba, mýtné), tak kapitálové náklady na pořízení vozidel a cisteren. Optimalizační modely bioethanolových dodavatelských řetězců ukazují, že při regionální distribuci a středních objemech může být silniční doprava ekonomicky konkurenceschopná vůči železnici nebo lodní dopravě, zejména pokud je potřeba obsloužit velký počet menších odběrných míst [6], [8]. Důležitým faktorem je také flexibilita – možnost rychle reagovat na změny v poptávce a směřovat dodávky do jiných regionů bez nutnosti dlouhodobého plánování kapacit kolejí či produktovodů.

10.2.9 Ekologické aspekty

Z ekologického hlediska jsou se silniční přepravou ethanolu spojeny emise skleníkových plynů a znečišťujících látek z dieselových motorů vozidel, stejně jako riziko havarijních úniků.

Studie zabývající se environmentálními dopady bioethanolu upozorňují, že celková uhlíková bilance závisí i na způsobu jeho přepravy. Emise, které vznikají při silniční přepravě mohou snižovat celkový dekarbonizační přínos [11], [16]. To platí stejně pro ethanol získaný kvašením (bioethanol) i pro RFNBO ethanol získaný reformací z vodíku.

V případě úniku ethanolu do životního prostředí hraje roli jeho dobrá biologická odbouratelnost a absence dalších znečišťujících součástí jako u jiných paliv, typicky síry či aromatických uhlovodíků, takže při včasném zásahu a sanaci bývají dlouhodobé dopady zpravidla menší než u úniku ropných produktů [16].

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Výpočet emisí CO₂ uvolněných při přepravě ethanolu

Emise nafty podle EU legislativy: 95,1 g CO₂/MJ = 3,95 kg CO₂/kg = 3,3 kg CO₂/l

Spotřeba tahače 30 l/100 km

Kapacita cisterny 30 m³ = 23,6 t ethanolu

$$\frac{3300 \text{ g CO}_2/\text{l} * 30 \text{ l}}{23600 \text{ kg}} \cong 4,2 \text{ g CO}_2/\text{l} \quad (10.2)$$

Emise vychází zhruba na 4,2 g CO₂ na kilogram ethanolu přepraveného 100 km (rovnice 10.2). Při přepočtu na uložený vodík vychází emise cca na 32 g CO₂ na kilogram vodíku převezeného ve formě ethanolu, resp. 21 g CO₂/kg vodíku, pokud uvažujeme zpětné uvolnění pomocí parní reformace.

10.2.10 Normy, oborové předpisy

Nejdůležitější relevantní norma je **ADR klasifikace ethanolu pod UN 1170** jako hořlavá kapalina (třída 3) s klasifikačním kódem F1 a zákazem vjezdu do tunelů kategorie D a E.

Kromě již zmíněné dohody ADR jsou relevantní technické normy pro konstrukci nádrží a cisteren a předpisy pro zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu. Tyto normy a předpisy se vztahují na ethanol jako látku bez ohledu na jeho konečné využití, a proto je možné je přímo využít i při posuzování ethanolu jako alternativní formy pro přepravu vodíku.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.3 Drážní přeprava

Drážní přeprava představuje v logistických řetězcích ethanolu typicky mezistupeň mezi výrobními regiony a velkými distribučními nebo exportními uzly. V mnoha scénářích je využívána pro střední a dlouhé vzdálenosti, zejména tam, kde je potřeba přepravovat velké objemy z několika málo zdrojů do malého počtu terminálů. Studie zabývající se dodavatelskými řetězci ethanolu uvádějí železnici spolu se silnicí, potrubím a lodní dopravou jako standardní součást palivové logistiky, přičemž ethanol je zpravidla dopravován z biorafinérií do distribučních terminálů právě po silnici nebo železnici [5], [21].

10.3.1 Vhodnost přepravy

Z hlediska fyzikálně-chemických vlastností je ethanol pro drážní přepravu rovněž vhodný, jde o kapalinu s relativně nízkou viskozitou a hustotou srovnatelnou s benzinem, bez potřeby tlakového režimu či kryogenního chlazení. Železnice je výhodná především při velkých objemech a na delší vzdálenosti, kde umožňuje snížit specifickou spotřebu energie i emise skleníkových plynů na jednotku přepravovaného paliva ve srovnání se silnicí. Analýzy ethanolových koridorů ukazují, že za určitých podmínek může přechod z čistě silniční přepravy na kombinaci silnice–železnice významně omezit emise CO₂, přičemž míra přínosu závisí na délce tratě a její elektrifikaci [1], [21].

Pro scénáře využití ethanolu jako nosiče vodíku je drážní přeprava zajímavá zejména tam, kde se uvažuje centralizovaná výroba (například velká biorafinerie nebo závod na syntetický ethanol) a odběr ve vzdálených centrech spotřeby či v terminálech pro další export. Vzhledem k nízkým nákladům na překládání a nízkým ztrátám při překládání, resp. možnosti používat ISO cisternové kontejnery, se nabízí možnost používat kombinaci železniční a silniční dopravy.

10.3.2 Úroveň technologické připravenosti

Z hlediska technologické připravenosti je drážní přeprava ethanolu plně komerčně zavedená. Cisternové vozy určené pro hořlavé kapaliny jsou standardní součástí vozového parku a provozní předpisy pro jejich použití jsou dlouhodobě ustálené. Literatura i průmyslové přehledy uvádějí, že ethanol je v řadě zemí běžně přepravován po železnici jako palivo i chemická surovina, přičemž požadavky na vozidla, armatury a provoz se zásadně neliší od jiných produktů třídy 3 (hořlavé kapaliny) [2], [5].

Technologická připravenost tedy odpovídá nejvyššímu stupni (TRL 9); hlavní bariéry souvisejí spíše s kapacitou infrastruktury, dostupností terminálů a ekonomickou atraktivitou železniční přepravy oproti silnici než s vlastní technologií.

10.3.3 Popis druhu přepravy

Ethanol se po železnici přepravuje především ve speciálních cisternových vozech pro kapaliny. Tyto vozy jsou obvykle atmosférické, o objemu desítek kubických metrů, s válcovým pláštěm obvykle z uhlíkové oceli nebo nerezové oceli, opatřené bezpečnostními ventily, ochrannými kryty armatur a často i tepelnou izolací tam, kde to provozní podmínky vyžadují. Plnění a vyprazdňování probíhá shora nebo zdola, pomocí pevně instalovaných zařízení v terminálech a flexibilních hadic

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

s rychlospojkami (Obrázek 10.6). Jako příklad lze uvést vůz řady Zacns 98 o objemu 98 m³ a maximální ložné hmotnosti 68,5 tuny.



OBRÁZEK 10.6: PLNĚNÍ CISTERNOVÉHO VOZU.

Vedle klasických cisteren se využívají také ISO cisternové kontejnery umístěné na kontejnerových vozech (Obrázek 10.7). Tyto jednotky umožňují snadný přechod mezi silnicí a železnicí bez přečerpání produktu a jsou vhodné zejména pro intermodální řetězce s větším počtem cílových míst nebo pro mezinárodní přepravy, kde je výhodné využít překladiště kontejnerů [21].



OBRÁZEK 10.7: VLAK LOŽENÝ ISO CISTERNOVÝMI KONTEJNERY.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

V exportních koridorech bývá typická konfigurace silnice – železnice – přístav, kdy silniční doprava zajišťuje svoz ethanolu z menších závodů k železničnímu terminálu a železnice potom tranzit na velké vzdálenosti k námořním přístavům nebo velkým skladům.

10.3.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnostní požadavky pro železniční přepravu ethanolu vycházejí z jeho klasifikace jako hořlavé kapaliny. Cisternové vozy musejí splňovat konstrukční požadavky na odolnost vůči nárazu a převrácení, být vybaveny pojistnými ventily, přetlakovými a podtlakovými ochranami a často také ochrannými štíty v oblasti nárazníků a podvozků. Vozy mohou být používány na různé kapaliny, proto často splňují požadavky nad rámec požadavků pro převoz ethanolu (např. možnost výhřevu, tepelné izolace atd.). Provozní předpisy ukládají různá omezení (viz kapitola 10.3.5), pravidelné technické prohlídky, tlakové zkoušky nádrží/kontroly těsnosti a školení personálu pro manipulaci s nebezpečnými látkami. Cisternové vozy vhodné na ethanol jsou typicky konstruovány na maximální rychlost 120 km/h prázdné, resp. 100 km/h ložené.

Rizika spojená s únikem ethanolu se týkají zejména možnosti vzniku hořlavé směsi se vzduchem a kontaminace povrchových a podzemních vod. Havarijní plány pro železniční koridory proto zahrnují opatření pro zabezpečení místa nehody, zachytné systémy, ochranu vodních toků a použití vhodných hasicích prostředků – obdobně jako u silniční přepravy (kapitola 10.2.4). Studie logistických řetězců zdůrazňují, že při správném konstrukčním návrhu vozů a dodržování předpisů je železniční přeprava ethanolu z hlediska frekvence i závažnosti incidentů relativně bezpečná, přičemž rozhodující je kvalita infrastruktury a dispečerského řízení [1].

10.3.5 Legislativní omezení

V evropském prostoru je železniční přeprava ethanolu upravena především předpisem RID, který je přílohou Úmluvy COTIF. Podle RID je ethanol veden pod číslem UN 1170 jako hořlavá kapalina (třída 3), kód cisterny LGBF. RID stanovuje požadavky na konstrukci cisternových vozů, jejich značení, dokumentaci, organizaci přepravy i kvalifikaci personálu. Vnitrostátní právní předpisy jednotlivých států EU tyto požadavky přejímají a doplňují, včetně návaznosti na legislativu v oblasti prevence závažných havárií a bezpečnosti práce. Další vrstvu omezení přináší vnitřní předpisy dopravců a případně správce infrastruktury.

Typicky při splnění požadavků RID není omezeno, po kterých tratích může vlak jet (při dodržení podmínek přechodnosti). Výjimky může určit správce infrastruktury (např. dlouhé tunely).

10.3.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V podmínkách České republiky je železniční infrastruktura i vozový park koncipován tak, aby umožňoval přepravu širokého spektra kapalných chemikálií a paliv, včetně látek s podobnými vlastnostmi jako ethanol. Z hlediska techniky a regulace tedy drážní přeprava ethanolu nenaráží na zásadní bariéry. V současnosti se železnice v ČR používá především pro přepravu ropných produktů a chemických látek, zatímco ethanol je kvůli menším objemům často distribuován po silnici; v případě rozvoje velkoobjemové výroby ethanolu jako nosiče vodíku by však bylo možné relativně snadno navázat na stávající cisternové vozy, terminály a koridory.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Pro zásobování vodíkové infrastruktury by železnice mohla plnit roli páteřního módu mezi velkými výrobními nebo importními uzly (například rafinerie, velké biorafinerie či importní přístavy) a regionálními distribučními centry, zatímco silniční doprava by zajišťovala přepravu na kratší vzdálenosti. Vzhledem k tomu, že česká železniční síť je relativně hustá a napojena na sousední státy, nabízí tento přístup potenciál pro mezinárodní koridory, v nichž by ethanol fungoval jako mezinárodně obchodovatelný nosič vodíku, aniž by bylo nutné zavádět zcela nové technologie přepravy.

10.3.7 Energetická náročnost

Z energetického hlediska využívá železniční doprava, zejména u elektrifikovaných tratí, výhod nižší měrné spotřeby energie na tunokilometr. I tam, kde jsou hnací vozidla dieselelektrická, jsou specifické emise CO₂ na tunokilometr zpravidla nižší než u těžké silniční dopravy. Studie analyzující logistické etapy brazilského ethanolu prokázaly, že nahrazení části silniční přepravy železnicí může v závislosti na trase snížit emise v přepravní fázi ethanolu v průměru o desítky procent, přičemž konkrétní výsledky se liší podle délky a struktury koridoru [1], [21].

Výpočet energetické náročnosti dopravy ucelenou soupravou na elektrifikované trati

Ložná hmotnost vozu: 68,5 t (Zacns 98)

Počet vozů v soupravě: 30

Spotřeba elektrické lokomotivy po odečtení rekuperace: 1 700 kWh/100 km

$$\frac{1700000Wh}{30 * 68500kg} \cong 0,82Wh/kg \quad (10.3)$$

Měrná spotřeba (rovnice 10.3) na převoz 1 kg ethanolu na vzdálenost 100 km činí cca 0,82 Wh/kg (pro srovnání u silniční přepravy je to cca 13 Wh/kg – viz kapitola 10.2.7). Po přepočtu na kg vodíku v ethanolu je to cca 6,3 Wh/kg, resp. 4,2 Wh/kg při odloučení vodíku pomocí parní reformace.

10.3.8 Ekonomické aspekty

Z ekonomického hlediska má železniční přeprava charakter vysokých fixních a nižších variabilních nákladů. Vyžaduje investice do terminálů, zásobníků, překladišť a vozového parku, ale při dostatečně velkých a stabilních tocích nabízí nižší jednotkové náklady než silniční doprava na střední a dlouhé vzdálenosti. Přehledy praxe v USA i modely distribučních systémů ukazují, že ethanol je u výrobců typicky rozdělen mezi nákladní auta a železnici; železnice se uplatňuje právě u větších objemů a na delších relacích, zejména mezi výrobními závody a vzdálenějšími terminály [2], [7].

Cena vozidel je v případě velkého cisternového vozu typu Zacns 98 přibližně 100 000 EUR, cena 20 ft ISO cisternového kontejneru cca 15 000 EUR. Nádoby pro přepravu ethanolu patří mezi nejlevnější, protože ukládají materiál při atmosférickém tlaku a běžné okolní teplotě, nevyžadují tepelnou izolaci ani vyhřívání a speciální chemickou odolnost.

Pro scénáře využití ethanolu jako nosiče vodíku v ČR a okolních zemích to implikuje, že železniční přeprava bude ekonomicky zajímavá zejména v případě centralizovaných výrobních kapacit

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

a stabilních mezinárodních toků, zatímco pro menší či nepravidelné objemy bude nadále dominovat flexibilnější silniční doprava.

10.3.9 Ekologické aspekty

Výpočet emisí CO₂ při přepravě elektrickým vlakem vychází z výpočtu v kapitole 10.3.7.

Spotřeba elektrické energie na přepravu kg ethanolu na vzdálenost 100 km: 0,82 Wh/kg

Emise CO₂ při výrobě elektřiny dle Delegated Regulation (EU) 2023/1185: 477 g CO₂/kWh

$$0,82Wh/kg * 477 g CO_2/kWh \cong 0,39g CO_2/kg \quad (10.4)$$

Emise vychází na velmi příznivých necelých 0,4 g CO₂/kg ethanolu převezeného vlakem na 100 km (rovnice 10.4).

10.3.10 Normy, oborové předpisy

Železniční přeprava ethanolu a jiných nebezpečných látek je právně řízena především mezinárodním předpisem RID, který je povinně implementován v EU prostřednictvím **směrnice 2008/68/ES** a je přijat do vnitrostátního právního systému (např. v ČR jako součást Sbírky mezinárodních smluv a zákona o dráhách). RID stanoví technické, bezpečnostní a dokumentační požadavky – od klasifikace a obalů až po povinnosti dopravce a školení personálu – které jsou závazné pro mezinárodní i vnitrostátní přepravu po kolejích.

Národní legislativa řeší prováděcí detaily, sankce, odpovědnost a další doplňkové požadavky. **Zákon č. 266/1994 Sb.**, o dráhách upravuje obecná pravidla železniční dopravy v ČR a odkazuje na povinnost dodržovat RID při přepravě nebezpečných věcí, stanovuje pravomoci Drážního úřadu a dopravce v oblasti bezpečnosti přepravy RID a umožňuje Správě železnic a dopravcům upravit provozní a organizační pravidla (např. dohody o odstavení, bezpečná místa pro nakládku/vykládku a řízení mimořádných situací).

Součástí norem a nařízení jsou i technická doporučení pro návrh a provoz cisternových vozů, například oborové příručky pro konstrukci a testování železničních cisteren. Tyto dokumenty doplňují obecné požadavky na zajištění nákladu, tlakové a pevnostní zkoušky nádrží, údržbu armatur a inspekce v průběhu životního cyklu vozů.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.4 Lodní přeprava

10.4.1 Vhodnost přepravy

Z čistě fyzikálně-chemického hlediska je ethanol pro lodní přepravu rovněž vhodný, jde o kapalinu za běžných teplot, bez potřeby kryogenního chlazení či vysokých tlaků, s viskozitou a hustotou srovnatelnou s řadou jiných kapalných chemikálií a paliv běžně přepravovaných v chemických a produktových tankerech. V tomto smyslu se technologie přepravy ethanolu na moři blíží zavedeným postupům pro benzin, kerosin či jiné podobné ropné produkty [1]. Nízké náklady a emise CO₂ vůči převáženému množství energie favorizují použití formy ethanolu na všechny úrovně, od lokální po mezikontinentální. Pro specifika ČR je hlavní limitací dostupnost vodních cest a omezení splavnosti. Limitujícím faktorem jsou i vysoké náklady na reformaci a zpětné získávání H₂ z ethanolu; viz kapitola Alternativní forma – Ethanol – skladování.

Specifickým problémem ethanolu je však dlouhodobé udržení kvality při delší době přepravy. Literatura upozorňuje, že při transportu lodí je obtížnější kontrolovat změny složení, kontaminaci obsahu a interakce ethanolu s materiálem nádrží během týdny trvajících plaveb [2]. Jako hlavní rizika jsou zmiňována kompatibilita vnitřních povlaků nádrže s ethanolem (možné vyluhování a odlupování, změna vodivosti či kyselosti) a dlouhá doba přepravy, která ztěžuje zajištění odpovídající kvality při příjezdu do přístavu [2]. To neznamená, že by lodní přeprava ethanolu nebyla možná nebo používaná, ale klade zvýšené nároky na materiály, monitoring a laboratorní kontrolu kvality ve srovnání s kratšími vnitrozemskými trasami.

Studie věnované logistice ethanolu zdůrazňují potřebu pravidelného sledování klíčových parametrů, jako je obsah vody, vodivost, kyselost a přítomnost uhlovodíkových nečistot, a to jak ve skladových nádržích, potrubí, tak na lodích [5], [7]. V některých případech se používají tzv. „wall-washing“ testy, při nichž je na stěny nádrže nanесena a následně odebrána vzorková kapalina, aby se ověřilo, zda dochází k interakci povlaku s ethanolem a zda nedochází k uvolňování látek, které by mohly ovlivnit kvalitu ethanolu [2]. Vzhledem k tomu, že nejčastěji se využívá bioethanol jako složka paliva s přísnými parametry, může i relativně malá změna parametru (například nárůst vody či kyselosti) vést k vyřazení celé šarže nebo nutnosti jejího přepracování.

10.4.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologicky je námořní přeprava ethanolu plně komerčně zavedená. Ethanol je dlouhodobě obchodován jako kapalná chemická komodita a přepravován na velké vzdálenosti v chemických nebo produktových tankerech, případně v ISO cisternových kontejnerech na kontejnerových lodích [1], [5]. V rozvinutých producentských zemích je lodní doprava integrální součástí logistického řetězce, bioethanol je shromažďován v přístavních terminálech, mísen s jinými produkty nebo reexportován, přičemž objemy dosahují jednotek až desítek milionů litrů ročně pro jednotlivé exportní trasy [5], [21].

Z pohledu úrovně technologické připravenosti je námořní přeprava ethanolu na úrovni nejvyššího stupně (TRL 9). Používají se standardní konstrukční principy pro nádrže, čerpací systémy, inertizaci a detekci úniků, vycházející z dlouhodobé praxe u chemikálií třídy „hořlavé kapaliny“. Specifické

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

výzvy se týkají spíše integrace ethanolu jako paliva pro samotná plavidla nebo jako součásti nových nízkouhlíkových palivových směsí, což přesahuje rámec samotné přepravy a spadá do oblasti lodních pohonných systémů.

10.4.3 Popis druhu přepravy

Ve velkém měřítku je ethanol přepravován v chemických či produktových tankerech. Tyto lodě jsou vybaveny vícečlennými nádržovými systémy, umožňujícími současný transport několika různých produktů. Typicky nemají kapacitu jako největší námořní tankery, které jsou určeny k přepravě ropy, jejich nosnost je cca o řád menší – 10–40 tisíc DWT. Velké říční lodě mají kapacitu kolem 1 000–1 500 tun. Nádrže jsou obvykle z uhlíkové oceli s vnitřním povlakem, nebo z vybraných druhů nerezové oceli; volba materiálu a nátěru je klíčová právě z hlediska dlouhodobé kompatibility s ethanolem a minimalizace rizika kontaminace [2]. Nádrže jsou navrženy pro provoz za atmosférického tlaku s mírným přetlakem pro manipulaci, vybaveny systémy pro kontrolu atmosféry v nádrži, ochrannými prvky proti přetlaku a podtlaku a instrumentací pro měření hladiny, teploty a tlaku.

Kromě velkoobjemové přepravy se uplatňuje i transport ethanolu v ISO cisternových kontejnerech, které lze umístit na kontejnerové lodě jako běžnou jednotku intermodální dopravy. Tyto kontejnery jsou typicky z nerezové oceli, s objemem kolem 20–30 m³, navržené pro atmosférický až nízký tlak a jsou certifikovány pro kombinovanou silniční, železniční a námořní přepravu [1]. Pro menší objemy nebo speciální dodávky se využívají sudy a menší sudové kontejnery, avšak u ethanolu ve funkci paliva či nosiče vodíku se předpokládá, že rozhodující podíl přepravy bude probíhat právě ve velkoobjemových nádržích a cisternových kontejnerech.

Součástí logistiky přepravy ethanolových tankerů je jak jejich fyzické čerpání, tak úkony administrativní a organizační. Od těchto úkonů se odvíjí i celková doba procesu. Studie od autorů José Carlos a kol. uvádí, že celý proces od příjezdu tankeru po jeho odjezd včetně všech kroků může trvat v průměru 8–9 hodin. V krajních případech, pokud nastane např. zpoždění uvnitř zařízení, může celková doba představovat až 13 hodin [22].

10.4.4 Bezpečnostní opatření

Z hlediska bezpečnosti je ethanol při námořní přepravě klasifikován jako hořlavá kapalina, u níž jsou dominantní rizika spojená s požárem, výbušnou atmosférou v nádržích, úniky do mořského prostředí a ochranou posádky a přístavního personálu. Nákladové nádrže musí být vybaveny systémy na inertizaci volného prostoru nádrže nebo jinými opatřeními zabraňujícími vzniku hořlavé směsi, uzemněním a propojením pro minimalizaci statické elektřiny a vhodnými ventilačními a detekčními systémy. Při nakládce a vykládce jsou používány certifikované hadice, suché rychlospojky, havarijní uzávěry a sběrné vany pro zachycení případných úniků.

V případě požáru EmS Guide zdůrazňuje hlavně chlazení, použití vhodných pěn a ochranných prostředků, a pro únik izolaci požáru, ochranu posádky, eliminaci zdrojů zapálení a kontrolu šíření úniku, přičemž všechny kroky musí být součástí lodi vlastní bezpečnostní a havarijní dokumentace podle IMDG Code a SOLAS.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

V případě úniku musí posádka okamžitě vyhodnotit charakter látky, izolovat postiženou oblast a minimalizovat riziko vzniku výbušné atmosféry či kontaktu s nebezpečným obsahem. U hořlavých tekutin, jako je ethanol, to znamená stáhnout posádku do chráněných poloh, odstranit zdroje zapálení, a pokud je to bezpečné, použít prostředky pro omezování šíření úniku (např. sorpční materiály, bariéry), ale zabránit kontaktu s pokožkou či očima a nevdechovat výpary. Doporučuje se manévrovat lodí tak, aby obytné prostory a můstek lodi byly proti větru od úniku. [23]

10.4.5 Legislativní omezení

Lodní přeprava ethanolu podléhá mezinárodním předpisům pro přepravu nebezpečných věcí po moři (IMDG) a národním implementacím těchto pravidel. Ethanol je v rámci mezinárodních klasifikačních systémů veden jako nebezpečná látka třídy „hořlavé kapaliny“, specificky hořlavá kapalina třídy 3, obalová skupina II (středně nebezpečná látka), s přiděleným číslem UN 1170 (ethanol nebo ethanolové roztoky). Z toho vyplývají požadavky na balení, označení, dokumentaci nákladu, konstrukci nádrží a vybavení plavidel i přístavních terminálů.

Pro mořskou přepravu není považován za „marine pollutant“, ale i tak musí být dodrženy všechny standardní požadavky IMDG, včetně přepravních omezení velikosti a balení (např. žádná výjimka pro bulk lodi, pokud není součástí MARPOL/IBC režimu), povinné nebezpečnostní štítky 3 a příslušné speciální ustanovení týkající se požární ochrany a nakládky.

Při dopravě po vnitrozemských cestách platí pravidla ADN – ethanol se řadí pod UN 1170, třída 3, obalová skupina II a klasifikační kód F1, což znamená, že pro jeho přepravu jsou vyžadovány technicky schválené cisterny či kontejnery odpovídající konstrukčním požadavkům ADN, správné značení, pevně stanovené limity množství a ventilace nákladních prostor, a speciální ustanovení jako ventilation VE01 pro zajištění odvětrání prostoru s nebezpečným nákladem [24].

10.4.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

Pro Českou republiku má lodní přeprava ethanolu význam především v kontextu mezinárodního obchodu a dovozu. Vnitrozemská vodní síť je z hlediska přepravy kapalných paliv omezená, a proto se využívá distribuce železnicí, potrubím nebo silniční dopravu do vnitrozemí. Pro navrhování scénářů využití ethanolu jako nosiče vodíku v ČR je proto důležité uvažovat o námořní dopravě jako o součásti nadřazeného evropského či globálního logistického řetězce, nikoli jako o primárním dopravním módu na národní úrovni.

Současně je vhodné zohlednit, že případné zvýšení podílu importovaného bioethanolu nebo syntetického ethanolu může být citlivé na mezinárodní standardizaci parametrů kvality a na schopnost přístavních terminálů zajistit důsledný monitoring produktu při příjezdu a před dalším rozdělením v evropské síti. Pro spolehlivé využití ethanolu jako nosiče vodíku je proto klíčová koordinace mezi námořními a vnitrozemskými logistickými články, a to jak z hlediska kvality a bezpečnosti, tak z hlediska ekonomické bilance celého řetězce.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.4.7 Energetická náročnost

Z energetického hlediska nabízí typicky lodní doprava na dlouhé vzdálenosti nejnížší měrnou energetickou náročnost na tunokilometr [5], [21]. Následující výpočet (rovnice 10.5 a 10.6) je orientační, spotřeba jednotlivých lodí je výrazně proměnlivá dle okolností (v říční dopravě např. plavbou po/proti proudu, v námořní počasí/vítr).

Emise nafty podle EU legislativy: $95,1 \text{ g CO}_2/\text{MJ} = 3,95 \text{ kg CO}_2/\text{kg} = 3,3 \text{ kg CO}_2/\text{l}$

Emise těžkého topného oleje: $3,11 \text{ kg CO}_2/\text{kg}$

Spotřeba říční lodi: $500 \text{ l nafty}/100 \text{ km}$

Kapacita říční lodi: $1\,500 \text{ t}$

Spotřeba námořní lodi: $3 \text{ t těžkého topného oleje}/100 \text{ km}$

Kapacita námořní lodi: $40\,000 \text{ DWT}$

$$\text{Říční loď: } \frac{3300 \text{ gCO}_2/\text{l} * 500 \text{ l}}{1\,500\,000 \text{ kg}} \cong 1,1 \text{ gCO}_2/\text{l} \quad (10.5)$$

$$\text{Námořní loď: } \frac{3110 \text{ gCO}_2/\text{kg} * 3000 \text{ kg}}{40\,000\,000 \text{ kg}} \cong 0,23 \text{ gCO}_2/\text{l} \quad (10.6)$$

Emise vychází zhruba na $1,1 \text{ g CO}_2$ na kilogram ethanolu přepraveného 100 km vnitrozemskou lodní dopravou a $0,23 \text{ g CO}_2$ na kilogram ethanolu přepraveného 100 km námořní dopravou. Při přepočtu na uložený vodík to pak vychází na cca $8,4$ resp. $1,8 \text{ g CO}_2$ na kilogram vodíku převezeného ve formě ethanolu a $5,6$ resp. $1,2 \text{ g CO}_2/\text{kg}$ vodíku, pokud uvažujeme zpětné uvolnění pomocí parní reformace.

10.4.8 Ekonomické aspekty

Ekonomicky je námořní doprava výhodná pro velké a stabilní toky, typicky na mezikontinentálních trasách nebo mezi několika málo velkými výrobními a odběratelskými regiony. Fixní náklady spojené s přístavní infrastrukturou, tankery a zásobníky jsou vysoké, ale při plném využití kapacity poskytuje lodní přeprava velmi nízké jednotkové logistické náklady. To je důležité zejména v případě, že by ethanol měl fungovat jako globální nosič vodíku – například při dovozu nízkouhlíkového ethanolu z oblastí s levnou obnovitelnou energií do Evropy. V takovém scénáři může námořní přeprava v kombinaci s potrubní a železniční dopravou vytvořit nákladově konkurenceschopný řetězec vůči jiným formám přepravy vodíku.

Kromě předpisů zaměřených na přepravu zboží se uplatňují také normy z oblasti prevence znečištění moří a ovzduší – například limity pro emise z lodní dopravy a pravidla pro nakládání s případnými úniky ethanolu do mořského prostředí. Přestože ethanol není persistentní znečišťující látkou a je biologicky odbouratelný, větší úniky mohou vést k akutním dopadům na vodní ekosystémy a vyžadují koordinovaný zásah.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.4.9 Ekologické aspekty

Ekologicky je lodní doprava výhodná díky nízkým emisím skleníkových plynů na tunokilometr, ale představuje specifická rizika spojená s možnými haváriemi na vodních cestách. Únik velkého množství ethanolu do vodního prostředí může vyvolat akutní toxické a ekologické dopady, především v důsledku zvýšené biologické spotřeby kyslíku a možného úhynu vodních organismů, i když je ethanol relativně rychle biologicky odbouratelný. Pro mořskou přepravu není ethanol považován za „marine pollutant“ (viz kapitola 10.4.5). Moderní předpisy však obsahují přísné požadavky na prevenci úniků, konstrukci lodí a havarijní připravenost, riziko závažných nehod je relativně nízké.

Negativním ekologickým aspektem je používání těžkých frakcí paliv v námořní dopravě, které produkují vysoké emise pevných částic. Říční lodě používají buď naftu, nebo frakce podobné naftě, které mohou mít při použití moderních motorů relativně nízké emise pevných částic.

10.4.10 Normy, oborové předpisy

Ethanol je pro přepravu klasifikován jako UN 1170, hořlavá kapalina. Námořní doprava musí splňovat požadavky **IMDG Code** (pravidla pro přepravu nebezpečného zboží po moři) definovaného MSC (organizace, která určuje bezpečnostní pravidla pro plavbu, součást OSN). Říční doprava je řízena **dohodou ADN** (European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways) upravující mezinárodní přepravu nebezpečných látek po vnitrozemských vodních cestách (řeky, kanály), s pravidly pro klasifikaci, stavbu nádob, značení, bezpečné nakládání a provoz lodí. ADN je v EU vnořena i do směrnice EU o vnitrozemské dopravě nebezpečných věcí (Directive 2008/68/EC), která rozšiřuje a transponuje mezinárodní dohody ADR, RID a ADN do práva EU. Na národní úrovni jsou tyto mezinárodní dohody implementovány jako mezinárodní smlouvy, nebo části přejaty do národního práva (technické předpisy, zákony, vyhlášky).

Kromě ADN pro vnitrozemské vody a IMDG pro námořní dopravu se lodní přeprava ethanolu opírá o řadu technických standardů pro konstrukci tankových lodí, přístavních zařízení, hasicích systémů a detekce úniků [19]. Tyto předpisy úzce navazují na obecné normy pro přepravu nebezpečných látek a petrochemické standardy pro nádrže a potrubní systémy.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.5 Potrubní přeprava

10.5.1 Vhodnost přepravy

Z hlediska fyzikálně-chemických vlastností je ethanol pro přepravu potrubím vhodný, jde o kapalinu vhodnou k přepravě při běžné teplotě, s nízkou viskozitou a hustotou blízkou lehkým uhlovodíkům, takže jej lze čerpat běžnými čerpacími stanicemi bez potřeby kryogenního chlazení nebo vysokých tlaků. Ve srovnání s plyným vodíkem je výhodou mnohem vyšší objemová hustota energie a možnost využít zkušenosti i část infrastruktury z ropného a plynárenského sektoru [5].

Potrubní přeprava ethanolu je však smysluplná až od určitého objemu. Pro ostrovní řešení s omezeným množstvím ethanolu a rozptýlenou poptávkou se může jednat o přepravu v závodu nebo mezi závody či distribučními centry. Tam se přeprava může jevit jako vhodná (pokud by byl i objem větší), protože na tak krátkou vzdálenost nejsou potřebné vysoké náklady. S narůstající vzdáleností náklady porostou a porostou i problémy s pozemky, což se ukazuje jako méně vhodné řešení. Na úrovni jednotlivých krajů nebo regionů se vysoké kapitálové náklady na výstavbu samostatného potrubí na ethanol obvykle nevrátí. Naopak při velkých objemech mezi několika málo uzly může být potrubí z dlouhodobého hlediska výhodné jak ekologicky, tak ekonomicky [1], [21].

Je však důležité zmínit, že vhodnost potrubní přepravy ethanolu neznamena hned automaticky i vyšší efektivitu řetězce ve srovnání s jinými nosiči vodíku.

10.5.2 Úroveň technologické připravenosti

Technologie potrubní přepravy ethanolu je na plně komerční úrovni (TRL 9). V průmyslové praxi se ethanol produktovody již přepravuje, a to jak v rámci smíšených sítí pro kapalná paliva, tak v rámci novějších dedikovaných ethanolových systémů. V Brazílii je budována síť o délce více než 1 300 km, která propojuje centrální produkční oblasti s hlavními spotřebitelskými regiony a má být napojena i na exportní přístav Santos; tato síť je provozována s běžnými průmyslovými čerpadly a využívá elektrickou energii pro pohon, což se příznivě promítá do emisní bilance [2], [21].

10.5.3 Popis druhu přepravy

Ethanol se potrubím přepravuje v kapalném stavu při běžné teplotě prostředí a mírném tlaku. Potrubní systémy jsou obvykle konstruovány z uhlíkové oceli nebo nerezových materiálů, s vnější protikorozií ochranou (nátěry, izolace, katodická ochrana) a s vnitřní ochranou tam, kde je riziko koroze nebo uvolňování pevných částic do proudu ethanolu. Kapalná povaha ethanolu výrazně zjednodušuje návrh ve srovnání s plyným vodíkem, není nutné řešit vysoké tlaky ani kryogenní teploty, provozní podmínky jsou blízké jiným hořlavým kapalinám, např. palivům [5].

Hlavním technickým problémem je čistota produktu a kontaminace. Studie provozu dlouhých produktovodů ukazují, že během prvních hodin po zahájení přečerpávání dochází ke zvýšení kyselosti, vodivosti a obsahu nečistot, což souvisí s vymýváním zbytků z předchozích produktů, koroze a povlaků v potrubí [5].

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.5.4 Bezpečnostní opatření

Bezpečnost potrubní přepravy ethanolu vychází z jeho klasifikace jako vysoce hořlavé kapaliny. Hlavními riziky jsou únik kapaliny v důsledku koroze nebo mechanického poškození potrubí, vznik oblaku hořlavých par v okolí úniku a kontaminace půdy a vodních zdrojů. Na rozdíl od vysokotlakých plynovodů pro vodík nebo zemní plyn však pracují potrubí na ethanol obvykle při nižších tlacích a s menším potenciálem vzniku proudového ohně. Rizikem je spíše environmentální škoda.[5].

Základní bezpečnostní opatření zahrnují vhodný výběr materiálů, vnější protikorozi ochranu v kombinaci s katodickou ochranou, optimální volbu trasy mimo hustě osídlená území a citlivé ekosystémy, instalaci uzavíracích ventilů v pravidelných rozestupech a systémy detekce úniků. Detekce může být založena na bilanci průtoků a tlaků nebo akustickém monitoringu. V havarijních scénářích je nutné být schopen rychle izolovat poškozený úsek a organizovat sanaci zasažené půdy a vod.

Pokud dojde k porušení potrubí, hlavními kroky jsou zastavení čerpání, uzavření ventilů, zabezpečení okolí proti vzniku zdrojů zapálení a nasazení záchranných a sanačních prostředků. Vzhledem k tomu, že ethanol je dobře rozpustný ve vodě, dochází k jeho míchání s podzemními vodami, což není vhodné kvůli zhoršení kvality povrchových a podzemních vod. Na druhé straně jeho biologická odbouratelnost snižuje dlouhodobé dopady [2].

10.5.5 Legislativní omezení

Potrubní přeprava ethanolu spadá pod obecné předpisy pro dálkovodní potrubní systémy pro nebezpečné kapaliny a pod předpisy pro nakládání s nebezpečnými látkami. Na mezinárodní úrovni se uplatňují rámcové požadavky na konstrukci, zkoušení, provoz a monitoring potrubních systémů, v evropském prostoru doplněné směrnici pro tlaková zařízení a pro zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu. Tyto předpisy obvykle nerozlišují mezi ethanollem jako palivem či chemickou surovinou; rozhodující jsou jeho fyzikálně-chemické a nebezpečnostní charakteristiky. Technickou a finanční náročnost výstavby a provozu potrubních systémů zvyšují požadavky směrnic ATEX. Realizaci potrubních tras může výrazně prodloužit posuzování vlivů na životní prostředí (EIA).

10.5.6 Aplikovatelnost v podmínkách České republiky

V podmínkách České republiky se nevyskytuje potrubní vedení pro přepravu ethanolu. Případné potrubí na ethanol by navazovalo na existující regulaci ropovodů a produktovodů, včetně povinného posuzování vlivů na životní prostředí, územního plánování a požadavků na bezpečnost práce. Vybudování takové infrastruktury by vyžadovalo zajistit dostatečně velké a dlouhodobě stabilní přepravní objemy. Realizovat rozsáhle povolená procesy, jako např. EIA, majetkoprávní vypořádání souvisejících pozemků či splnění přísných bezpečnostních požadavků (ATEX, Seveso III). Z praktického hlediska je pro krátkodobý až střednědobý horizont pravděpodobnější využití stávající silniční a železniční infrastruktury.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.5.7 Energetická náročnost

Energetická náročnost potrubní přepravy ethanolu je nižší než u silniční dopravy na jednotku přepravené hmotnosti a vzdálenosti. Spotřeba energie je soustředěna do čerpacích stanic a je kryta elektřinou; při hodnocení emisí je tedy rozhodující emisní faktor elektrické energie v dané zemi. Specifická spotřeba energie se řádově pohybuje kolem 0,14 MJ/tkm. Co se týče rozestupů čerpadel, tak u ropných produktů se stanice rozmísťují každých 65–100 km s tím, že přesná vzdálenost závisí na potrubním průměru, dostupnosti energie či terénu. Dá se uvažovat, že rozestupy čerpacích stanic ethanolu by se mohly pohybovat v podobném rozmezí [25], [26].

10.5.8 Ekonomické aspekty

Ekonomicky se potrubní přeprava vyznačuje vysokými investičními náklady na výstavbu a relativně nízkými provozními náklady. Potřebná je dlouhodobá jistota velkých objemů, jinak se vysoké investice nevrátí. Modely dodavatelských řetězců ethanolu zdůrazňují, že investice do potrubí jsou opodstatněné až tehdy, když je trh dostatečně velký a geograficky koncentrovaný, zatímco v raných fázích rozvoje trhu bývá ekonomicky výhodnější kombinace silniční a železniční dopravy s využitím stávajících kapacit [8], [21].

V případě ethanolu jako nosiče vodíku to znamená, že potrubní přeprava se stává realistickou možností teprve ve scénářích, kde je ethanol vyráběn ve velkých objemech v omezeném počtu lokalit a spotřebováván v hlavních průmyslových nebo přístavních uzlech. Pro pilotní projekty a regionální sítě plnicích stanic zůstává základním módem silniční doprava, případně doplněná železnicí.

Modelový příklad nákladů [25], [27]:

- Typ potrubí: onshore
- Délka potrubí (L): 100 km
- Přepravené množství (Q) = 500 000 t/rok

CAPEX:

- Jednotkový CAPEX potrubí = 2 mil. EUR/km
- Příplatky (čerpací stanice, uvedení do provozu) = +10 %
- Výpočet:
 - Základ: $100 \text{ km} \cdot 2 \text{ mil. EUR/km} = 200 \text{ mil. EUR}$
 - Příplatek +10 % = 20 mil. EUR
 - **CAPEX (celkem) $\approx$ 220 mil. EUR**

OPEX fixní (ročně):

- Při volbě konzervativního středu: OPEX fixní = 1,5 % CAPEX
- Výpočet:
 - OPEX fixní (celkem) $\approx 0,015 \cdot 220 \text{ mil. EUR/rok}$
 - **OPEX fixní (celkem) $\approx$ 3,3 mil. EUR/rok**

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

OPEX variabilní (ročně):

- Elektrická energie na čerpání $\approx 0,050 \text{ MJ} = 0,0139 \text{ kWh/tkm}$
- Cena elektřiny pro ČR $\approx 0,17 \text{ EUR/kWh}$
- Variabilní náklad na tkm: $0,0139 \cdot 0,17 = 0,00236 \text{ EUR/tkm}$
- Roční výkon přepravy (tkm): $Q \cdot L = 500\,000 \cdot 100 = 50 \text{ mil. tkm/rok}$
- Výpočet:
 - OPEX variabilní (celkem) $\approx 50 \text{ mil. tkm/rok} \cdot 0,00236 \text{ EUR/tkm}$
 - **OPEX variabilní (celkem) $\approx 118\,000 \text{ EUR/rok}$**

10.5.9 Ekologické aspekty

Z ekologického hlediska nabízí potrubní přeprava ethanolu dvě protichůdné stránky. Na jedné straně má nízkou provozní uhlíkovou stopu na tunokilometr a může významně snížit emise z logistické etapy ve srovnání se silniční dopravou, pokud je čerpání napájeno nízkoemisní elektřinou [1]. Na druhé straně představuje potenciální zdroj rozsáhlé lokální kontaminace při havárii, zejména pokud dojde k úniku v blízkosti vodních zdrojů nebo citlivých ekosystémů.

Ethanol je dobře biologicky odbouratelný a neobsahuje síru ani perzistentní aromatické uhlovodíky, takže jeho dlouhodobé dopady na ekosystémy jsou menší než u ropných produktů. Krátkodobě však může velký únik způsobit výrazné snížení obsahu kyslíku ve vodním prostředí a negativně ovlivnit vodní organismy; riziko je proto třeba řídit volbou trasy potrubí, monitoringem a připraveností na zásah [2].

Studie brazilského exportního koridoru uvádí, že specifický emisní faktor pro potrubní přepravu ethanolu je řádově nižší než u silniční dopravy (cca $0,0039 \text{ kg CO}_2 \text{ na m}^3/\text{km}$) a že rozšíření produktovodní sítě může snížit emise z etapy přepravy ethanolu téměř o polovinu ve srovnání s čistě silničním scénářem [1].

Výpočet emisí pro ČR [25], [28]:

- Ať je spotřeba energie $0,14 \text{ MJ/tkm}$ (po převodu $\approx 0,04 \text{ kWh/tkm}$), emisní faktor elektřiny (ČR, 2020): $0,379 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ a hustota ethanolu $0,789 \text{ t/m}^3$, pak:
- $\text{Emise} \approx 0,04 \text{ kWh/tkm} \cdot 0,379 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \cdot 0,789 \text{ t/m}^3$
- **$\text{Emise} \approx 0,012 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^3/\text{km}$**

Emise v ČR při spotřebě energie $0,04 \text{ kWh/tkm}$ představují $0,012 \text{ kg CO}_2 \text{ m}^3/\text{km}$.

10.5.10 Normy, oborové předpisy

Bezpečný provoz potrubí na ethanol vyžaduje uplatnění souboru norem a oborových předpisů pro konstrukci, zkoušení a provoz potrubních systémů pro nebezpečné kapaliny (**ČSN EN 14161**). Patří sem technické normy pro jakost ocelí a svařování (**ČSN EN ISO 9606-1, ČSN EN ISO 15614-1, ČSN EN ISO 17638/17640**), pro protikorozi ochranu (**ČSN EN ISO 21809 a ČSN EN 12954**), pro tlakové zkoušky a pro systémy detekce úniků (**ČSN EN 16348**), dále předpisy pro zařízení v prostředí s nebezpečím výbuchu (**ATEX**) a legislativa v oblasti prevence závažných havárií a posuzování vlivů

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

na životní prostředí. Specifické normy často vycházejí z ropného a plynárenského sektoru a jsou adaptovány na vlastnosti ethanolu a požadavky dané země.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.6 Terminály

Ethanolové terminály obvykle neexistují jako samostatná síť, ale jako ethanol-ready část běžných ropných a chemických terminálů, kde jsou doplněny nádrže, čerpací linky a mísicí technologie pro bioethanol a směsné benziny E5/E10/E85 [1], [5]. Patří sem velká vnitrozemská distribuční a mísicí centra, přístavní exportní a importní terminály se samostatnými ethanolovými nádržemi a rameny pro tankery a také produktovodní a železniční huby, kde se ethanol ve velkých objemech překládá mezi potrubím, železnicí a silnicí [2], [8]. V evropských podmínkách, včetně České republiky, se proto spíše předpokládá postupná adaptace stávajících terminálů pro kapalná paliva na manipulaci s ethanolem než výstavba oddělené sítě čistě „ethanolových“ terminálů [1], [16].

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

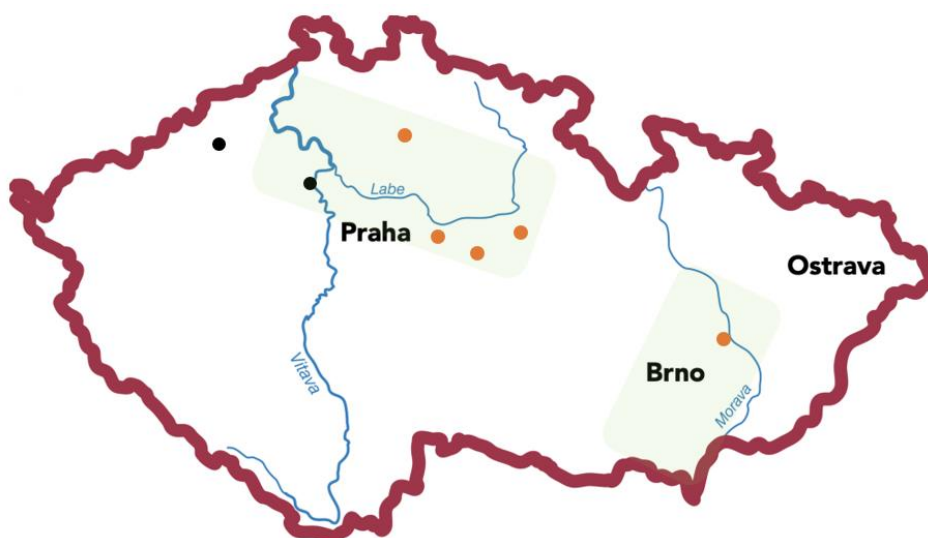
10.7 Přepravní trasy

Přepravní trasy ethanolu propojují výrobu, terminály a konečná odběrná místa a v praxi mají několik typických podob. Na lokální úrovni jde například o krátké silniční trasy z lihovarů zpracovávajících obilí nebo lignocelulózovou biomasu do regionálních skladů a čerpacích stanic, jak ukazují regionální scénáře pro Švédsko a další severské země [2], [3]. V USA je typická „středozápadní“ trasa, kdy ethanol z lihovarů v kukuřičném pásu (oblast ve středozápadní části Spojených států amerických, kde je od 50. let 19. století převládající plodinou kukuřice) putuje ucelenými železničními vlaky (unit trains) do velkých pobřežních nebo vnitrozemských terminálů a odtud autocisternami na čerpací stanice, kde se míchá do paliva (E10, E85) [12], [21].

V exportně orientovaných scénářích, například v Brazílii, se uplatňují víceetapové koridory, v nichž ethanol putuje ze závodů ve vnitrozemí po silnici nebo železnici do překladišť a dále produktovody či po železnici do přístavu Santos, odkud je lodně vyvážen do Severní Ameriky nebo Evropy [1], [8]. V evropských podmínkách má velký význam dovoz do přístavů typu Rotterdam, kde se ethanol z různých zdrojů konsoliduje a následně rozváží po železnici, říční dopravou a po silnici do vnitrozemských států včetně Německa a České republiky [6], [16].

V současné době v České republice je proces výroby a zpracování ethanolu následující. Zemědělská surovina, zejména cukrová řepa a obilniny, se pěstuje především v tradičních řepářských a obilnářských oblastech, tedy v Polabí, ve východních Čechách a na střední Moravě. Z těchto regionů je surovina dopravována k výrobcům ethanolu, zejména společnosti Tereos TTD (Dobruška, Chrudim, Kojetín, Kolín) a do závodu Ethanol Energy ve Vrdách. V těchto podnicích se vyrábí ethanol, který je následně přepravován do rafinerií a distribučních terminálů, kde se míchá do automobilových benzínů. Hlavními zpracovatelskými uzly jsou rafinerie skupiny ORLEN Unipetrol v Litvínově-Záluží a v Kralupech nad Vltavou.

Současný stav výroby a zpracování ethanolu v České republice zobrazuje následující mapa (Obrázek 10.8):



OBRÁZEK 10.8: MAPA SOUČASNÉHO STAVU VÝROBY A ZPRACOVÁNÍ ETHANOLU V ČR.

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Legenda:

- Výrobci ethanolu
- Zpracovatelé ethanolu
- Zemědělské oblasti plodin pro výrobu ethanolu

Vodík získaný zpětnou reformací z ethanolu může být využíván pro dopravu samotnou, čímž by snížil emise CO₂ z dopravy. Existoval i funkční koncept osobního automobilu značky Nissan, který interně vytvářel z ethanolu vodík, ze kterého následně v palivovém článku generoval elektrickou energii na pohon, nicméně celý systém je zatím na tak nízkém TRL (odhadem 4–5), že jde spíše o vizi než aplikační potenciál.

Využití energie uložené ve vodíku pro pohon dopravních prostředků je v současnosti v produkční fázi u osobních automobilů (Toyota Mirai a Hyundai Nexa, dohromady vyrobeno cca 50 000 vozidel celosvětově), u několika modelů autobusů a nákladních automobilů (prototyp Tatra) a vodíkového vlaku Coradia iLint (vyrobeno cca 50 jednotek).

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

10.8 Shrnutí

Z pohledu přepravy a infrastruktury lze ethanol hodnotit jako použitelný nosič vodíku, protože využívá převážně stávající logistické řetězce pro kapalná paliva, silniční a železniční cisterny, skladovací terminály a částečně i námořní a produktovodní infrastrukturu. Silniční doprava zajišťuje vysokou flexibilitu na lokální a regionální úrovni, železnice je vhodná pro větší objemy na delší vzdálenosti a v exportně/importně orientovaných scénářích lze navázat na lodní dopravu a případně produktovody, které při velkých stabilních tocích snižují emise i náklady.

Souhrnná SWOT analýza přepravy vodíku ve formě ethanolu je uvedena na Obrázek 10.9.

SILNÉ STRÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Kapalná forma za běžných podmínek: Není nutné vysokotlaké stlačování či chlazení. Vysoká flexibilita silniční přepravy. Vysoká úroveň technologické připravenosti: TRL 9 pro silniční, železniční, lodní i potrubní dopravu. Energetické nároky: Relativně nízké energetické nároky na přepravu. Využitelnost stávající logistické infrastruktury: Ethanol lze přepravovat v běžných cisternách.	Bezpečnostní riziko: Manipulace s hořlavou kapalinou. Materiálová kompatibilita: Negativní ovlivňování některých kovů, polymerních materiálů, těsnění či hadic. Emise CO₂: Vyšší u silniční dopravy. Ztráty při manipulaci: Ztráty odparem, úkapem, zbytkové množství. Absence potrubní infrastruktury v ČR.
PŘÍLEŽITOSTI	HROZBY
Rozvoj bez nutnosti nové infrastruktury: Využití existujících infrastruktur. Ekonomika: Výhodné náklady na přepravu. Kombinace dopravy: Silnice (z menších závodů) – železnice (tranzit na velké vzdálenosti) – přístav.	Environmentální dopady: Při haváriích únik do vod a půdy. Vysoké náklady na potrubní přepravu. Legislativa: Přísné požadavky, které mohou prodloužit realizaci.

OBRAZEK 10.9: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY ETHANOLU JAKO NOSIČE VODÍKU.

Typické přepravní koridory v praxi spojují domácí lihovary a regionální sklady s čerpacími stanicemi (případně budoucími reformními jednotkami) a v mezinárodním měřítku pak velké ethanolové regiony a evropské přístavy, odkud ethanol pokračuje po železnici a silnici do vnitrozemských států. V podmínkách České republiky z toho vyplývá, že rozvoj ethanolu jako nosiče vodíku může probíhat evolučně, bez potřeby budovat zcela novou dopravní infrastrukturu. Klíčové bude spíše efektivní využití existujících silničních a železničních kapacit, cílená adaptace terminálů a optimální návrh přepravních tras tak, aby se minimalizovaly logistické náklady i emise a zároveň byly splněny požadavky na bezpečnost a kvalitu produktu.

Základní informace shrnuje následující Tabulka 10.1:

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

TABULKA 10.1: SOUHRNNÁ TABULKA.

Druh dopravy / článek	Ekonomická náročnost vybudování infrastruktury	Ekonomická náročnost přepravy (na jednotku)	Ekologická zátěž (emise, rizika)	Flexibilita a dostupnost	Vhodnost pro ČR (krátkodobě / střednědobě)
Silniční doprava	Nízká – infrastruktura již existuje	Střední až vyšší – vysoké provozní náklady	Vyšší emise CO ₂ na tkm, lokální znečištění, riziko úniku při nehodách; ale dobře známý režim, jasná pravidla	Velmi vysoká – lze obsloužit i malé a rozptýlené odběratele, rychlé zavedení nových tras	Klíčový mód pro start: regionální distribuce ethanolu i „vodíkového“ ethanolu, minimální bariéry
Železniční doprava	Střední až vysoká – koleje, vlečky, nakládací terminály; v ČR z velké části existuje, ale někde chybí přímé napojení závodů/terminálů	Nižší než silniční při větších objemech a delších trasách	Nižší emise CO ₂ na tkm než u silniční, menší dopravní externality; rizika úniku koncentrovaná do menšího počtu tras	Střední – vysoká kapacita, ale vázaná na koleje a jízdní řády; méně vhodná pro malé a ad hoc dodávky	Výhodná pro větší toky; spíše střednědobý horizont

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

POKRAČOVÁNÍ TABULKA 10.1.

Druh dopravy / článek	Ekonomická náročnost vybudování infrastruktury	Ekonomická náročnost přepravy (na jednotku)	Ekologická zátěž (emise, rizika)	Flexibilita a dostupnost	Vhodnost pro ČR (krátkodobě / střednědobě)
Lodní doprava	Velmi vysoká – přístavy, nábrežní ramena, tankery, velké zásobníky; vnitrozemské státy jsou závislé na zahraničních přístavech	Velmi nízká na tkm při velkých objemech a dlouhých vzdálenostech; nejvýhodnější pro mezikontinentální obchod	Nízké emise na tkm, ale potenciálně vážné dopady při velkých únicích do vodního prostředí; nároky na monitoring kvality při dlouhé plavbě	Nízká na vnitrostátní úrovni ČR, vysoká v globálním měřítku – vhodné jen pro import/export	Důležitá nepřímá – při dovozech ethanolu do EU, pro ČR vždy v kombinaci se železnicí nebo silnicí
Potrubní doprava (produktovody)	Velmi vysoká – výstavba dálkovodů, čerpací stanice, terminály; investice se vyplatí jen při velkých a stabilních tocích	Velmi nízká – nízké provozní náklady	Nejnižší emise na tkm ze všech přeprav, ale vysoké lokální riziko při havárii (únik do půdy/vod); nutná kvalitní ochrana a monitoring	Nízká – pevná trasa, žádná flexibilita v prostoru	Spíše dlouhodobý scénář: dává smysl jen při velkých objemech

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Použité zkratky

Zkratka	Název
ADN	Evropská dohoda o mezinárodní přepravě nebezpečných věcí po vnitrozemských vodních cestách
ADR	Dohoda o silniční přepravě nebezpečných věcí
ATEX	Zařízení a ochranné systémy určené k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu
DWT	Deadweight tonnage – nosnost lodi (v tunách)
E5/E10/E85	„biopaliva“ – směs ethanolu s benzinem v různém poměru; číslo určuje procento ethanolu
IMDG	International Maritime Dangerous Goods Code – pravidla pro přepravu nebezpečného zboží po moři
MSC	Maritime Safety Committee – Mezinárodní námořní organizace, spadá pod OSN
NFPA	National Fire Protection Association
RFNBO	Renewable fuels of non-biological origin – obnovitelná paliva nebiologického původu
RID	Řád pro mezinárodní železniční přepravu nebezpečných věcí

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

Seznam literatury

- [1] Belincanta, J., J.A. Alchorne, and M.T. da Silva. The Brazilian Experience with Ethanol Fuel: Aspects of Production, Use, Quality and Distribution Logistics. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2016;33(4):1091–1102. [citováno dne 30. 11. 2025 2025; Dostupné z: doi:10.1590/0104-6632.20160334s20150088.]
- [2] Scovronick, N., D. Armstrong, P. Sambandam, G. Nagarajappa, V. Naik, and K.R. Smith. Air Quality and Health Impacts of Future Ethanol Production and Use in São Paulo State, Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016;13(7):695. [citováno dne 30. 11. 2025 2025; Dostupné z: doi:10.3390/ijerph13070695.]
- [3] Matsuda, H. and K. Takeuchi. Introduction. In: Takeuchi, K., et al., editors. *Biofuels and Sustainability. Science for Sustainable Societies*. Springer Japan; 2018. [citováno dne 30. 11. 2025 2025.]
- [4] Chemos GmbH & Co. KG, „Safety Data Sheet: Ethanol,“ 2023. [Online]. Available: https://www.chemos.de/import/data/msds/GB_en/64-17-5-A0000146-GB-en.pdf. [citováno dne 12. 12. 2025]
- [5] Vimmerstedt, L., B. Bush, and S. Peterson. Ethanol Distribution, Dispensing, and Use: Analysis of a Portion of the Biomass-to-Biofuels Supply Chain Using System Dynamics. *PLoS ONE*. 2012;7(5):e35082. [citováno dne 30. 11. 2025 2025; Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0035082.]
- [6] van Ree, R. and E. Annevelink. Country Report The Netherlands 2010. IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery. Wageningen; 2010. [citováno dne 30. 11. 2025 2025.]
- [7] Becerra-Pérez, L.A., L. Rincón, and J.A. Posada-Duque. Logistics and Costs of Agricultural Residues for Cellulosic Ethanol Production. *Energies*. 2022;15(12):4480. [citováno dne 30. 11. 2025 2025; Dostupné z: doi:10.3390/en15124480.]
- [8] Daianova, L. Lignocellulosic Ethanol Production Potential and Regional Transportation Fuel Demand. Licentiate Thesis. Västerås: Mälardalen University; 2011. [citováno dne 30. 11. 2025 2025.]
- [9] Chauhan, S.K., S. Gangopadhyay, and N. Singh. Environmental Aspects of Biofuels in Road Transportation. *Environmental Science and Pollution Research*. 2009;16(1):77–81. [citováno dne 30. 11. 2025 2025.]
- [10] Winther, M., F. Møller, M.S. Plejdrup, and T.C. Jensen. The Emission Consequences of Using Biodiesel and Bioethanol as a Fuel for Road Transport. *Proceedings of the Annual Transport Conference at Aalborg University – Trafikdage på Aalborg Universitet*. 2012. [citováno dne 30. 11. 2025 2025.]
- [11] Ma, Y., X.R. Wang, T. Li, J. Zhang, J. Gao, and Z.Y. Sun. Hydrogen and Ethanol: Production, Storage, and Transportation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46:27330–27348. [citováno dne 30. 11. 2025 2025; Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.06.027.]

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

- [12] Výstražné symboly CLP. In: *ECHA* [online]. [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: <https://echa.europa.eu/cs/regulations/clp/clp-pictograms>
- [13] ETHANOL. In: *CAMEO Chemicals* [online]. 2010 [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/667>
- [14] HARMON, Nick. Loading and Unloading of Chemical Tanker Trailers. In: *Trailersoftexas* [online]. 2024 [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: <https://www.trailersoftexas.com/blog/chemical-tanker-trailer-loading-unloading-procedure>
- [15] Proper Procedures for Loading and Unloading Fuel and Petroleum Products in Tanker Trailers. In: *Hftankers* [online]. 2025 [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: <https://hftankers.com/en/how-to-properly-load-and-unload-fuel-and-petroleum-products-in-tanker-trailers/>
- [16] Chan, G. and D.M. Reiner. The Transport Biofuel Value Chain: A Study of Governance and Sustainability along the Maritime Silk Road. In: Takeuchi, K., et al., editors. *Biofuels and Sustainability. Science for Sustainable Societies*. Springer; 2018. [citováno dne 30. 11. 2025 2025.]
- [17] AP 42, Fifth Edition, Volume I Chapter 5: Petroleum Industry. In: *Epa.gov* [online]. 2025 [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-5-petroleum-1>
- [18] Safe use and handling of flammable liquids. In: *Hse.gov* [online]. 2015 [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: <https://www.hse.gov.uk/pubns/books/hsg140.htm>
- [19] Centrifugal pump. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2025 [cit. 2025-12-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_pump
- [20] Ethanol pumps made of stainless steel (1.4435). In: *Sawa* [online]. 2024 [cit. 2025-12-23]. Dostupné z: <https://www.sawa.ch/en/ethanol-pumps>
- [21] Bartholomeu, D.B., C.J.R. Lopes, and H.T.Y. Yoshizaki. CO₂ Emissions from Fuel Consumption in the Logistic Stages of the Brazilian Bioethanol Supply Chain. *Sustainability*. 2020;12(23):9979. [citováno dne 30. 11. 2025 2025; Dostupné z: doi:10.3390/su12239979.]
- [22] CARLOS JACINTHO, José, Márcia TERRA DA SILVA, Ridnal JOÃO DO NASCIMENTO a Pedro FERNANDO POVEDA. Ethanol Loading and Dispatch Operation: A Discussion on Management Practices and Logistics 4.0. In: *ResearchGate* [online]. 2018 [cit. 2025-12-18]. Dostupné z: [https://www.imorules.com/MSCCIRC_1588_ANN.html](https://www.researchgate.net/publication/377658919_Ethanol>Loading and Dispatch Operation A Discussion on Management Practices and Logistics 40</p><p>[23] Annex - Revised Emergency Response Procedures for Ships Carrying Dangerous Goods (EmS Guide). Dostupný z www: <a href=)
- [24] Ventilation requirements, Transmitted by the European Barge Union (EBU). Dostupný z www: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2011/dgwp15ac2/WP15-AC2-19-inf7e.pdf>

Ethanol jako alternativní forma přepravy vodíku

[25] VAN ESSEN, H.P., H.J. CROEZEN a J.B. NIELSEN. Emissions of pipeline transport compared with those of competing modes. In: *Cedelft.eu* [online]. 2003 [cit. 2026-01-16]. Dostupné z: https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/03_4598_32.pdf

[26] Pumps Keep Oil Moving. In: *Enbridge.com* [online]. [cit. 2026-01-16]. Dostupné z: <https://www.enbridge.com/projects-and-infrastructure/projects/~media/2509CBF391B74FB9B33935264971D1C1.ashx?utm>

[27] Czech Republic - Electricity prices: Non-household, medium size consumers. In: *Tradingeconomics* [online]. 2024 [cit. 2026-01-16]. Dostupné z: <https://tradingeconomics.com/czech-republic/electricity-prices-non-household-medium-size-consumers-eurostat-data.html>

[28] Czech Republic 2021 Energy Policy Review. In: *iea* [online]. 2021 [cit. 2026-01-16]. Dostupné z: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/301b7295-c0aa-4a3e-be6b-2d79aba3680e/CzechRepublic2021.pdf>

11 Seznam obrázků

Obrázek 2.1: NFPA ohnivý diamant [10].	10
Obrázek 2.2: Silniční přeprava vodíku ve formě metalhydridů – kontejnerový trailer systému Hydrexia [9].	11
Obrázek 2.3: Schéma zásobníku Savannah River Technology Center s hliníkovou pěnou a koaxiálním U-tube výměníkem tepla [25].	13
Obrázek 2.4: Příklad modulárního metalhydridového zásobníku a demonstrační plnicí stanice na vodík [23].	15
Obrázek 2.5: Konstrukční řez nízkotlakového metalhydridového zásobníku s integrovaným výměníkem tepla, použitý jako reprezentativní příklad přepravitelného metalhydridového systému [58].	23
Obrázek 2.6: Příklad modulárního metalhydridového zásobníku určeného pro skladování a přepravu vodíku v pevné fázi [59].	24
Obrázek 2.7: Palubní uložení kontejnerů na kontejnerové lodi [86].	34
Obrázek 2.8: SWOT analýza přepravy metalhydridů jako nosiče vodíku.	48
Obrázek 3.1: Tube trailer [20].	67
Obrázek 3.2: MEGC kontejner s tlakovými lahvemi (otevřený design) [21].	67
Obrázek 3.3: Kryogenní cisterna na přepravu LNG [27].	68
Obrázek 3.4: Kryogenní kontejner typu T75 [72].	78
Obrázek 3.5: Kryogenní železniční cisterny [71].	78
Obrázek 3.6: SWOT analýza přepravy metanu jako nosiče vodíku.	103
Obrázek 4.1: Silniční přeprava vodíku v toluenu [20].	117
Obrázek 4.2: Drážní přeprava vodíku v toluenu [63].	123
Obrázek 4.3: Lodní přeprava vodíku v toluenu [86].	130
Obrázek 4.4: Potrubní přeprava vodíku v toluenu [114].	137
Obrázek 4.5: SWOT analýza přepravy toluenu jako nosiče vodíku.	146
Obrázek 5.1: Svazky tlakových lahví od společnosti Vítkovice Cylinders [2].	162
Obrázek 5.2: Vodíkový trailer – tzv. bateriový [4].	163
Obrázek 5.3: Vodíkový trailer s malými lahvemi orientovanými horizontálně [5].	163
Obrázek 5.4: Vodíkový trailer s malými lahvemi orientovanými vertikálně [6].	163
Obrázek 5.5: Příklady intermodálních vozů s možnostmi naložení ISO kontejnerů [13].	171
Obrázek 5.6: Česká plynárenská přepravní síť NET4GAS [25].	184
Obrázek 5.7: Lokality výroby vodíku a podzemních struktur v ČR.	188
Obrázek 5.8: SWOT analýza přepravy plynného vodíku.	191
Obrázek 6.1: Trailer společnosti Plug Power schopný přepravit až 4,5 tuny vodíku [12].	200
Obrázek 6.2: Suiso Frontier z roku 2022 od Kawasaki Heavy Industries.	210
Obrázek 6.3: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY Kapalného VODÍKU.	216
Obrázek 7.1: Porovnání průmyslových výroben vodíku s plynovody v ČR [15].	232
Obrázek 7.2: Rozmístění podzemních zásobníků plynu v ČR [16].	233
Obrázek 7.3: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY směsi zemního plynu jako nosiče vodíku.	235
Obrázek 8.1: Náklady na přepravu amoniaku, kapalného vodíku pod tlakem 350 bar lodní, železniční a silniční přepravou [10].	241

Obrázek 8.2: Propustnost nádrže na amoniak [21].	245
Obrázek 8.3: Vizualizace nákladního tanku MC 331 [22].	246
Obrázek 8.4: Železniční cisterna pro amoniak s oranžovým pásem, tepelným štítem a identifikačním štítkem [32].	251
Obrázek 8.5: Vybavení typických železničních cisteren pro přepravu amoniaku [32].	252
Obrázek 8.6: Infrastruktura pro přepravu amoniaku v celém světě [42].	256
Obrázek 8.7: Požadavky na prostor a šíření amoniaku v případě úniku pro a-b) tlakové amoniakové nádrže „typu C“ a c-d) chlazené amoniakové nádrže „typu A“ [45].	258
Obrázek 8.8: Značka čáry na nadzemním potrubí na amoniak [54].	265
Obrázek 8.9: Schéma podzemního potrubí pro přepravu amoniaku [55].	266
Obrázek 8.10: Kapacita potrubí pro přepravu amoniaku přes Nizozemsko do německa [55].	269
Obrázek 8.11: Potrubní přepravní trasa amoniaku přes přístav Rotterdam [55].	269
Obrázek 8.12: Údaje o dovozu bezvodého amoniaku do české republiky za rok 2024 [25].	272
Obrázek 8.13: Údaje o vývozu amoniaku z České republiky za rok 2024 [25].	273
Obrázek 8.14: SWOT ANALÝZA PŘEPRAVY Amoniaku JAKO NOSIČE VODÍKU.	277
Obrázek 8.15: Související incidenty při přepravě bezvodého amoniaku; A) podíl incidentů na typu přepravy, b) podíl kategorií incidentů v každém typu přepravy [38].	286
Obrázek 9.1: Přeprava methanolu cisternou [23].	292
Obrázek 9.2: Sudy na methanol pro přepravu [28].	293
Obrázek 9.3: Struktura ISO nádrže [29].	294
Obrázek 9.4: Železniční cisterna pro kapaliny [41].	301
Obrázek 9.5: Hlavní meziregionální obchodní toky s methanolem (v tis. tun ročně) [60].	307
Obrázek 9.6: Námořní přeprava methanolu: a) Integrovaná nádrž, b) Nezávislá nádrž [58].	309
Obrázek 9.7: Přenosné nádrže pro námořní přepravu methanolu [58].	310
Obrázek 9.8: Schéma očekávaného chování úniku methanolu z lodi [82].	315
Obrázek 9.9: Největší světoví producenti methanolu [119].	326
Obrázek 9.10: SWOT analýza přepravy methanolu jako nosiče vodíku.	327
Obrázek 10.1: Piktogram hořlavé látky [12].	343
Obrázek 10.2: Piktogram dráždivé látky [12].	343
Obrázek 10.3: NFPA 704 klasifikace pro ethanol [13].	343
Obrázek 10.4: Vozidlo schopné spalovat až 85% směs ethanolu v benzínu. Typicky jde o vozidla značky Saab, Volvo nebo Ford.	345
Obrázek 10.5: IBC kontejner (vlevo) a ISO cisternový kontejner na ethanol (vpravo).	346
Obrázek 10.6: Plnění cisternového vozu.	352
Obrázek 10.7: Vlak ložený ISO cisternovými kontejnery.	352
Obrázek 10.8: Mapa současného stavu výroby a zpracování ethanolu v ČR.	367
Obrázek 10.9: SWOT analýza přepravy ethanolu jako nosiče vodíku.	369

12 Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Porovnání přepravních módů pro metalhydridy – silnice, železnice, loď.	49
Tabulka 3.1: Ceník regulované složky ceny zemního plynu v závislosti na velikosti odběru [115]. ..	95
Tabulka 3.2: Plynovody s významem pro ČR.	100
Tabulka 3.3: LNG terminály s významem pro ČR.	102
Tabulka 5.1: Hustoty vodíku při různých tlacích a teplotě 15 °C.	160
Tabulka 5.2: Energetická spotřeba pro kompresi vodíku ze vstupního tlaku 30 bar(g) na různé tlakové úrovně.	165
Tabulka 5.3: Příklady množství převezeného plynného vodíku (M) a Energetická spotřeba nafty (E) pro různé tlakové úrovně.	166
Tabulka 5.4: Ztráta plynného vodíku při nakládce a vykládce pro různé tlakové úrovně přepravy.	167
Tabulka 5.5: Příklady množství převezeného plynného vodíku (m) a emisní stopa nafty (e) pro různé tlakové úrovně.	168
Tabulka 5.6: Příklady množství převezeného plynného vodíku (m) a energetická spotřeba elektrické lokomotivy (E) pro různé tlakové úrovně.	173
Tabulka 5.7: Příklady množství převezeného plynného vodíku (m) a emisní stopa elektřiny (e) pro různé tlakové úrovně.	174
Tabulka 5.8: Bezpečnostní pásma kolem potrubí v závislosti na tlaku a průměru potrubí [23].	183
Tabulka 5.9: Energetická spotřeba pro kompresi vodíku ze vstupního tlaku 0,5 a 30 bar(g) na různé tlakové úrovně.	185
Tabulka 6.1: Hustoty vodíku při různých tlacích a teplotě 15 °C.	197
Tabulka 6.2: Hodnota vztažená na 1 kg vodíku a na 100 km pro 3500 kg vodíku.	202
Tabulka 6.3: Přehled technických norem a oborových předpisů pro zkapalněný vodík.	204
Tabulka 6.4: Hodnota vztažená na 1 kg vodíku a na 100 km pro 91 200 kg vodíku.	208
Tabulka 6.5: Hodnota vztažená na 1 kg vodíku a na 100 km pro 91 200 kg vodíku.	209
Tabulka 7.1: Objemy 1 kg směsi zemní plyn – vodík při tlacích v distribučním a tranzitním potrubí.	222
Tabulka 7.2: Ochranná pásma pro plynová potrubí [4].	227
Tabulka 7.3: Bezpečnostní pásma plynových potrubí podle průměru a tlaku [4].	228
Tabulka 7.4: Vliv koncentrace vodíku ve směsi se zemním plynem na cenu přepravy [21, 22].	230
Tabulka 7.5: Vývoj nákladů na separaci vodíku při různé koncentraci směsi [17].	230
Tabulka 8.1: Charakteristické vlastnosti kapalného amoniaku a vodíku [5-8].	240
Tabulka 8.2: Požadované informace pro přepravu amoniaku z hlediska identifikace nebezpečných látek [9, 13].	242
Tabulka 8.3: Technické specifikace běžné nádrže na přepravu amoniaku [18, 20].	245
Tabulka 8.4: Riziko spojené s železniční přepravou amoniaku, data extrahovaná ze studie o malajsi [36].	252
Tabulka 8.5: Požadavek na sekundární bariéru ve vztahu k typům nádrží [12].	257
Tabulka 8.6: Typické parametry MGC a LGC [48].	261
Tabulka 8.7: Potrubí pro kapalný amoniak v Evropě [32].	264
Tabulka 8.8: Hydraulický návrh potrubí na amoniak s délkou 550 km pro tři případy [55].	265

Tabulka 8.9: Analýza incidentů v potrubí na amoniak s příčinami v Evropě [54].....	267
Tabulka 8.10: Hlavní předpisy pro bezpečnost potrubí pro Nizozemsko a Německo [55].....	268
Tabulka 8.11: Celkové investiční a provozní náklady na přepravu amoniaku potrubím [55].	270
Tabulka 8.12: Náklady na vnitrozemskou dopravu z výrobního zařízení do distribučních přístavů potrubím, silniční a železniční tratí [48].....	274
Tabulka 8.13: Objemy vývozu a dovozu bezvodého amoniaku v roce 2024 [61].....	275
Tabulka 8.14: Popis a principy fází TRL [16, 62].....	284
Tabulka 9.1: Charakteristické vlastnosti methanolu a vodíku.	288
Tabulka 9.2: Požadované informace pro přepravu methanolu z hlediska identifikace nebezpečných látek dle mezinárodních předpisů.....	289
Tabulka 9.3: Technická specifikace běžných přepravních nádrží pro methanol.	293
Tabulka 9.4: Porovnání ISO nádrží, flexitanků a sudů.....	294
Tabulka 9.5: Typické parametry malých a středních tankerů pro přepravu methanolu.....	314
Tabulka 10.1: Souhrnná tabulka.	370