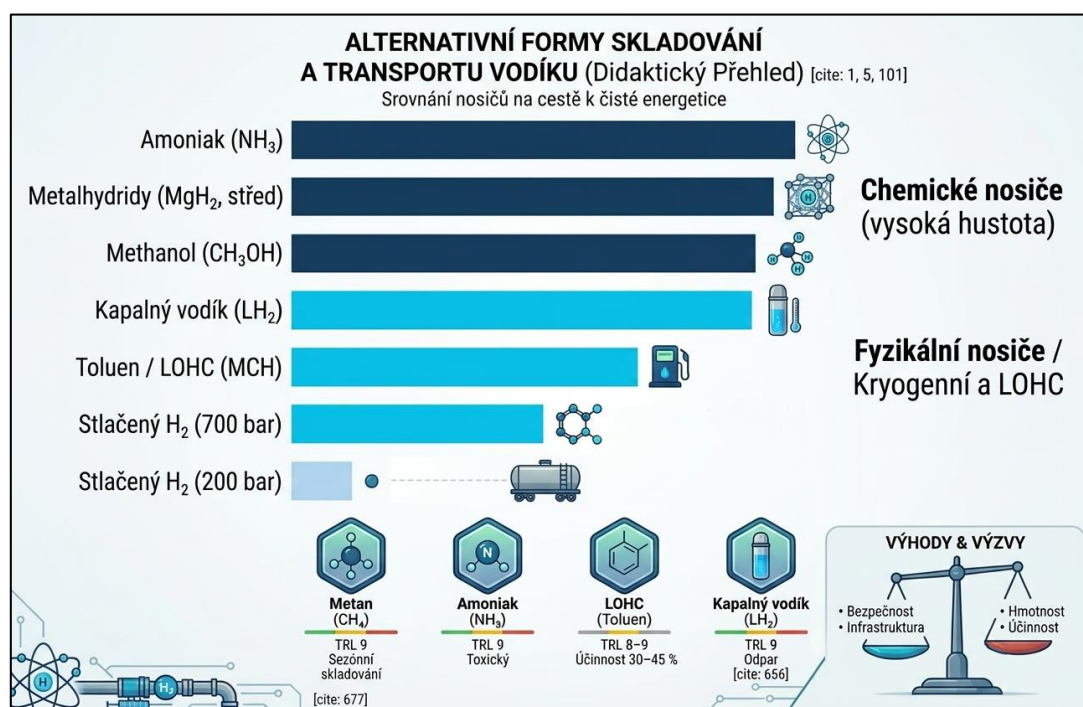


Alternativní formy vodíku

- podklady pro didaktické texty pro úroveň středního školství



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

NÁZEV VÝSLEDKU

Alternativní formy vodíku – podklady pro didaktické texty pro úroveň středního školství

PROJEKT

Národní centrum vodíkové mobility (TN02000007)

NÁZEV DÍLČÍHO PROJEKTU

Alternativní formy skladování a transportu vodíku

ZPRACOVATEL

Česká vodíková technologická platforma (HYTEP)

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

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

AUTORSKÝ TÝM

Jan Sochor (HYTEP)

Bronislav Vahalík (CVD)

Roman Smutný (CDV)

Giurg Adam (ORLEN)

Obsah

1 Úvod a vysvětlení pojmů.....	6
2 Metalhydridy – vodík ukrytý v kovu	7
2.1 Jak to funguje?	7
2.2 Proč je to výhodné?	7
2.3 Druhy metalhydridů	7
2.5 Přeprava metalhydridů	8
2.6 Skladování metalhydridů	8
2.7 Bezpečnost	9
2.8 Kritický pohled: proč metalhydridy stále nejsou všude?	9
2.9 Shrnutí.....	9
3 Metan – vodík schovaný v plynu	11
3.1 Co je metan a jak je v něm vodík navázaný?	11
3.2 Power-to-Gas: jak se z vodíku stane metan.....	11
3.3 Formy přepravy a skladování.....	11
3.4 Jak dostat vodík zpátky z metanu?	12
3.5 Kritický pohled: proč metan není dokonalé řešení.....	12
3.6 Shrnutí.....	13
4 Směs zemního plynu s vodíkem – blend jako přechodné řešení	14
4.1 Co je blending a jak funguje?	14
4.1 Jak se vodík do sítě dostává?	14
4.2 Kde to dává smysl, a kde ne?	14
4.3 Kritický pohled: proč blending není spasitel.....	15
4.4 Shrnutí.....	15
5 Toluén / LOHC – vodík přepravovaný jako nafta	16
5.1 Co je LOHC a co s tím má společného toluén?	16
5.2 Uzavřený cyklus hydrogenace a dehydrogenace.....	16
5.3 Formy přepravy a skladování.....	16
5.4 Aplikace v České republice.....	17
5.5 Kritický pohled: co LOHC brání být všude?	17
5.6 Shrnutí.....	17

6 Plynný vodík (stlačený) – nejpřímější cesta.....	18
6.1 Základní vlastnosti.....	18
6.2 Jak se přepravuje?.....	18
6.3 Skladování	19
6.4 Situace v České republice.....	19
6.5 Kritický pohled: jaké jsou limity stlačeného vodíku?	19
6.6 Shrnutí.....	20
7 Kapalný vodík – nejchladnější energetický náklad na světě.....	21
7.1 Proč vůbec kapalný vodík?	21
7.2 Jak se vodík zkapalňuje?	21
7.3 Odpar: nevyhnutelný nepřítel.....	21
7.4 Přeprava	22
7.5 Situace v České republice.....	22
7.6 Kritický pohled: proč kapalný vodík není všude?	22
7.7 Shrnutí.....	23
8 Amoniak – starý průmyslový gigant v nové roli.....	24
8.1 Co je amoniak a kolik vodíku v sobě nese?	24
8.2 Jak se z amoniaku dostane vodík zpátky?	24
8.3 Přeprava a skladování	24
8.4 Situace v České republice.....	25
8.5 Kritický pohled: proč amoniak není ideální?.....	25
8.6 Shrnutí.....	26
9 Methanol – kapalina, která se vám vejde do nádrže jako nafta	27
9.1 Základní vlastnosti.....	27
9.2 Jak se vodík váže a jak se získá zpět?	27
9.3 Formy přepravy a skladování	28
9.4 Přímé využití jako palivo	28
9.5 Situace v České republice.....	28
9.6 Kritický pohled: co methanolu brání?	28
9.7 Shrnutí.....	29
10 Ethanol – nosič vodíku z přírody?	30
10.1 Co je ethanol a co o něm víme?	30

10.2 Jak se z ethanolu získá vodík?	30
10.3 Formy přepravy a skladování	30
10.4 Dvě generace bioethanolu	31
10.5 Situace v České republice	31
10.6 Kritický pohled: proč ethanol jako nosič vodíku zůstává na okraji?	31
10.7 Shrnutí	32
11 Závěr: Vodíkové nosiče vs. fosilní paliva – kam míříme?	33
11.1 Fosilní paliva: pohodlná, ale s daní za klima	33
11.2 Co to znamená pro budoucnost?	34

1 Úvod a vysvětlení pojmů

Vodík je sice nejrozšířenější prvek ve vesmíru, ale na Zemi má jednu neřest – nerad je sám. Téměř vždy ho najdeme chemicky spoutaný v jiných látkách, jako je voda nebo uhlovodíky. Pokud z něj chceme udělat palivo budoucnosti, čeká nás technologická výzva: musíme ho vyrobit, přepravit a uskladnit. Jak na to? To je otázka, na kterou odpovídá tato brožura.

Možností přepravy a uskladnění je celá řada. Vodík můžeme stlačit pod obrovský tlak, zkapalnit ho při extrémních mrazech, nebo ho chemicky „svázat“ k jiné látce, která zafunguje jako bezpečný přepravní kontejner. Těmto látkám říkáme nosiče vodíku – řadíme sem amoniak, methanol, ethanol, metan, hydridy kovů nebo speciální organické kapaliny. Každý nosič má svá pro a proti, a právě jejich velký souboj je hlavním tématem následujících stránek.

Malý slovníček na začátek:

- Zelený/obnovitelný vodík: Vzniká elektrolýzou vody. Elektrický proud pro tento proces dodávají výhradně obnovitelné zdroje (solární panely, větrné či vodní elektrárny).
- Nízkouhlíkový vodík: Širší rodina vodíků s nízkou emisní stopou. Patří sem ten zelený, ale i vodík vyrobený z jádra nebo z fosilních surovin, u kterých se ale emise CO₂ zachytí a bezpečně uskladní nebo využijí (metoda Carbon Capture and Storage/Utilization).
- TRL (úroveň technologické připravenosti): Celosvětová hitparáda technologií na stupnici 1 až 9. Jednička znamená nápad v hlavě vědce, devítka je hotový produkt na trhu. Čím vyšší TRL, tím dříve technologii potkáte v běžném životě.

Tento text jsme napsali pro středoškoláky, které baví chemie, technika a chtějí vidět pod pokličku moderní energetiky. Nepotřebuješ žádný doktorát, stačí ti otevřená mysl a chuť zjistit, co bude pohánět svět za pár desítek let.

2 Metalhydridy – vodík ukrytý v kovu

Vodík je nejlehčí plyn na světě, a právě proto je obtížnější ho přepravovat a skladovat oproti fosilním kapalným palivům. Potenciálním řešením jsou metalhydridy – látky, které dokážou vodík doslova pohltit do své kovové struktury a bezpečně ho uskladnit, dokud ho opět nepotřebujeme v plynné formě.

2.1 Jak to funguje?

Metalhydridy jsou sloučeniny kovu s vodíkem. Určité kovy – například hořčík (Mg), titan (Ti) nebo slitiny jako LaNi_5 (lanthan-nikl) – mají tu zvláštní vlastnost, že dokážou vodík chemicky pohltit a pevně ho navázat do své krystalové mřížky. Tento proces se nazývá absorpce a probíhá přibližně takto:

- Přivedeme plynný vodík (H_2) ke kovu.
- Molekuly vodíku se rozpadnou na atomy, které proniknou do struktury kovu.
- Vznikne metalhydrid – pevná látka, v níž je vodík chemicky uvězněn.

Celá reakce je přitom vratná – vodík lze kdykoli uvolnit zpět zahřátím na teplotu typicky mezi 60 a 300 °C (záleží na druhu kovu). Při absorpci vodíku se uvolňuje teplo, při jeho uvolňování je naopak nutné teplo dodat – přibližně 25 až 75 kJ na mol H_2 (3,5 až 10,4 kWh/kg H_2).

 **Věděl jsi, že...?** Metalhydrid z hořčíku (MgH_2) váže na každý kilogram kovu až 76 gramů vodíku – to je více než tisíckrát kompaktnější uložení než ve formě volného plynu při atmosférickém tlaku, ačkoliv vodík se při atmosférickém tlaku kvůli svým vlastnostem standardně neskládá!

2.2 Proč je to výhodné?

Tradiční způsoby přepravy vodíku vyžadují buď obrovský tlak (200–500 barů, například na dně Mariánského příkopu je tlak až 1 100 barů) nebo extrémní chlad (kapalný vodík má teplotu –253 °C). Metalhydridy umožňují vodík skladovat a přepravovat při nízkém tlaku (10–50 bar) a mírných teplotách, což je mnohem bezpečnější.

Hlavní výhody metalhydridů:

- Vysoká bezpečnost – vodík je pevně vázán, nehrozí náhlý únik velkého množství plynu.
- Nízký provozní tlak – odpadá nutnost objemných vysokotlakých nádob.
- Žádné ztráty odparem – vodík se z kovové struktury sám od sebe neuvolňuje.
- Kompaktnost – objemová hustota uloženého vodíku (0,1–0,15 kg/l) je vyšší než u stlačeného plynu při 500 barech.
- Modularita – systémy lze snadno škálovat od malých zásobníků po velké průmyslové moduly.

2.3 Druhy metalhydridů

Všechny metalhydridy nejsou stejné – liší se materiálem, vlastnostmi i typickým použitím:

Elementární hydridy (MgH_2 , AlH_3 , TiH_2) – dokážou do sebe navázat velké množství vodíku (MgH_2 až 7,6 % hmotnosti), ale potřebují vysoké teploty pro uvolnění (300–700 °C) a mají pomalou kinetiku.

Intermetalické hydridy (LaNi_5 , TiFe) – pracují při teplotách blízkých okolní teplotě a rychle reagují, ale mají nižší kapacitu (1–2 % hmotnosti). Právě LaNi_5 je nejvyspělejší technologií (TRL 7–9) a používá se například v zásobnících pro vysokozdvizné vozíky.

Komplexní hydridy (NaAlH_4 , LiBH_4) – mají vysokou kapacitu (5–18 % hmotnosti), ale vyžadují katalyzátory a teploty pro uvolnění vodíku kolem 300–380 °C.

Nanostrukturované hydridy – klasické materiály upravené na nanometrické úrovni, což zlepšuje rychlost reakce a snižuje provozní teploty.

2.5 Přeprava metalhydridů

Při přepravě jsou metalhydridové zásobníky zařazeny pod kód UN 3468 (vodík v metalhydridovém zásobníku, třída hořlavých plynů). Přepravují se v uzavřených, certifikovaných kontejnerech podle normy ISO 16111. Kontejner musí být udržován v suchu – styku s vodou je třeba za každou cenu zabránit, protože některé hydridové materiály s vodou reagují a uvolňují vodík nekontrolovaně.

Silniční přeprava je nejběžnější – metalhydridové moduly lze naložit na standardní nákladní automobil a odvézt přímo k zákazníkovi, aniž by bylo potřeba speciální kryogenní či kompresní technologie. Technologická připravenost (TRL) silniční přepravy je 5–7, tedy ve fázi pilotních a demonstračních projektů. Lodní přeprava je nejvýhodnější pro velké objemy na dlouhé trasy – metalhydridové kontejnery lze integrovat do standardních námořních kontejnerů.

 **Věděl jsi, že...?** Metalhydridové skladování má v manipulační technice dlouhou historii, Toyota demonstrovala metalhydridový vozík (Fe-Ti slitina) už v roce 1989. Metalhydridy zůstávají předmětem výzkumu, mj. proto, že zásobník může sloužit i jako protizávaží.

2.6 Skladování metalhydridů

Metalhydridy jsou ideální pro krátkodobé až střednědobé skladování vodíku (hodiny až týdny). Díky pevné vazbě nedochází ke ztrátám vodíku ani při dlouhém stání. To je velká výhoda oproti vysokotlakým lahvím nebo kapalným zásobníkům.

Zásobníkové systémy jsou vybaveny tepelnými výměníky, které přivádějí a odvádějí teplo potřebné pro cykly absorpce a uvolnění. Řídicí jednotka průběžně sleduje tlak, teplotu a průtok vodíku.

V podmínkách České republiky jsou metalhydridy vhodné především pro menší modulární aplikace v průmyslu a jako zásobníky pro lokální energetické systémy napájené z obnovitelných zdrojů (solárních panelů nebo větrných elektráren). Technologie nicméně není plně tržně nasazena.

2.7 Bezpečnost

Přes všechny výhody je nutné metalhydridy správně ošetřovat. Zásobníky musí být chráněny před vlhkostí a zdroji tepla. Při případném úniku vodíku je třeba prostor odvětrat a použít detektory H_2 . Při hašení případného požáru se nesmí použít voda ani pěna – pouze suché prášky třídy D určené na kovové požáry, nebo inertní materiály (suchý písek).

2.8 Kritický pohled: proč metalhydridy stále nejsou všude?

Metalhydridy znějí skoro dokonale – ale proč je tedy nenajdeme v každé čerpací stanici nebo v každém vodíkovém vozidle? Odpověď tkví v několika zásadních technických a ekonomických problémech, které dosud nebyly plně vyřešeny.

1. Hmotnost je zásadní problém. Aby metalhydrid vázal jeden kilogram vodíku, potřebuje desítky až stovky kilogramů kovu. Zásobník s 1,83 kg využitelného vodíku váží přibližně 250 kg – pro srovnání, tlaková láhev se stejným množstvím vodíku je výrazně lehčí. Pro automobily nebo letadla je taková hmotnost prakticky nepřijatelná.

2. Uvolnění vodíku stojí energii. Aby se vodík z kovu uvolnil, musíme ho zahřát – někdy až na 300–400 °C. To vyžaduje zdroj tepla, což komplikuje návrh systému a snižuje celkovou účinnost. Například hydrid hořčíku (MgH_2) má sice obrovskou kapacitu, ale bez dostatku tepla vodík jednoduše neuvolní.

3. Tepelná vodivost je nízká. Kovy v metalhydridech vedou teplo špatně – MgH_2 má tepelnou vodivost pouhých 1 až 1,5 W/(m·K), zatímco měď vede teplo přibližně 400krát lépe. To znamená, že zásobník se plní a vyprazdňuje pomalu, protože teplo proniká materiálem jen obtížně.

4. Materiály stárnou. Po tisících cyklech plnění a vyprazdňování se kovová struktura poškozuje – praská a rozpadá na menší kousky. Slitina $LaNi_5$ ztrácí po 10 000 cyklech až 80 % své původní kapacity. Dlouhodobá životnost je proto stále otevřenou výzkumnou otázkou.

5. Cena surovin. Klíčové prvky jako lanthan (La), titan (Ti) nebo lithium (Li) jsou drahé a jejich těžba má nezanedbatelný dopad na životní prostředí. Geopolitická závislost na jejich dodávkách (podobně jako u lithia pro baterie) představuje strategické riziko.

 **Věděl jsi, že...?** Výzkumníci přidávají do MgH_2 nanočástice oxidu manganu (Mn_3O_4) jako katalyzátor – aby snížili teplotu potřebnou k uvolnění vodíku o více než 100 °C. Malá chemická změna tak může mít obrovský praktický dopad.

Metalhydridy proto dnes nacházejí uplatnění hlavně tam, kde hmotnost nehraje klíčovou roli – v stacionárních zásobnících, průmyslových provezech nebo vysokozdvizných vozících. Pro nákladní automobily nebo autobusy zůstávají příliš těžké a výdej vodíku je příliš energeticky náročný.

2.9 Shrnutí

Největší výhodou metalhydridů je, že vodík je uskladněn pevně v kovu a při běžných provozních podmínkách neuniká. Největší výzvou zůstává hmotnost systémů a potřeba

odebrat a dodat teplo pro absorpci vodíku, respektive uvolnění vodíku. Výzkum v této oblasti je velmi aktivní – zejména nanostrukturované materiály slibují zásadní zlepšení v příštích letech.

3 Metan – vodík schovaný v plynu

Vodík a metan toho mají mnoho společného, ačkoliv se to nemusí na první pohled zdát. Vodík je nedílnou součástí chemické vazby metanu a metan, jak již tušíte, umíme dnes přepravovat tisíce kilometrů jak potrubím, tak ve zkapalněné formě na lodi. Z vodíku lze vyrobit syntetický metan. S trochou nadsázky lze říct, že stávající infrastruktura plynárenství dělá z metanu jeden z nejpraktičtějších nosičů vodíku, jaké dnes existují.

3.1 Co je metan a jak je v něm vodík navázaný?

Metan (CH_4) je nejjednodušší uhlovodík – jedna molekula uhlíku a čtyři atomy vodíku. Je to hlavní složka zemního plynu, který každý zná z domácích plynových sporáků nebo kotlů. Klíčové číslo: vodík tvoří přibližně 25 % hmotnosti metanu. To znamená, že z jednoho kilogramu metanu lze teoreticky získat zpět 250 gramů čistého vodíku.

Metan je za normálních podmínek bezbarvý plyn bez zápachu. Tradiční zápach zemního plynu je výsledkem přidání odorantu kvůli bezpečnosti. Je přibližně dvakrát lehčí než vzduch – při úniku tedy stoupá nahoru, což je z bezpečnostního hlediska výhoda.

3.2 Power-to-Gas: jak se z vodíku stane metan

Celý koncept stojí na procesu zvaném Power-to-Gas (P2G). Funguje ve dvou krocích:

- Elektrolýza: elektrické energie (preferenčně z obnovitelných zdrojů či jaderných elektráren) se použije k rozkladu vody na vodík a kyslík.
- Metanizace: vodík reaguje s oxidem uhličitým (CO_2) za vzniku metanu podle Sabatierovy reakce: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Tato reakce může probíhat dvěma způsoby: **termochemicky** za přítomnosti katalyzátoru (obvykle niklu) při teplotě 300–400 °C, nebo **biologicky**, kdy tutéž reakci provádějí methanogenní archaea za nízkých teplot (~40–70 °C) a atmosférického tlaku, například přímo v prostředí bioplynové stanice.

Výsledný syntetický metan (SNG) má prakticky stejné vlastnosti jako fosilní zemní plyn a lze ho okamžitě vtlačit do stávající plynárenské sítě. Tady tkví obrovská výhoda: infrastruktura je hotová. Česká republika má rozsáhlou síť plynovodů a podzemních zásobníků plynu – a syntetický metan ji může využít hned, bez nutnosti stavět cokoli nového.

 **Věděl jsi, že...?** Německo dokáže uskladnit až 260 TWh energie v zemním plynu prostřednictvím skladovacích zařízení? – Instalovaná kapacita baterií v roce 2026 v Německu ale pojme přibližně jen 27,8 GWh elektrické energie, tedy asi 0,01 % kapacity skladování v zemním plynu.

3.3 Formy přepravy a skladování

Stlačený metan (CNG) – stlačen na 200–250 barů, přepravuje se v tlakových nádobách (svazcích). Z 1 m³ zásobníku stlačeného metanu (CNG, tlak 200–250 bar) lze procesem

reformování zpětně získat až 40 kg vodíku – to je objemová hustota vodíku jako nosiče, nikoli hustota samotného plynu. Technologie je plně komerční (TRL 9) a používá se na mnoha CNG čerpacích stanicích po celé Evropě.

Zkapalněný metan (LNG) – ochlazen na $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$, čímž se objem na stejné množství energie oproti plynu při atmosférických podmínkách zvýší. Hustota vodíku v jednom m^3 stoupne až na 57 kg H_2 . LNG je vhodný pro lodní přepravu na dlouhé vzdálenosti. Námořní přeprava LNG dosahuje TRL 9, přeprava po vnitrozemských vodních cestách TRL 7–8.

Potrubí – nejlevnější a nejefektivnější pro velké objemy energie. Stávající plynovody mohou přenášet syntetický metan bez jakýchkoli úprav. Pro dálkovou přepravu toto řešení nemá konkurenci.

Podzemní zásobníky – stará vyčerpaná plynová ložiska nebo solné kaverny slouží k sezónnímu a dlouhodobému ukládání metanu. Česká republika disponuje 9 lokalitami s podzemními zásobníky.

3.4 Jak dostat vodík zpátky z metanu?

Nejrozšířenějším postupem je parní reformování metanu (SMR), které probíhá při teplotách $700\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato technologie je průmyslově vyspělá a využívaná (TRL 7–9) a relativně levná, ale má zásadní problém: produkuje CO_2 . Přibližně 8,65 až 11 kg oxidu uhličitého na každý kilogram získaného vodíku. Pokud chceme skutečně čistý vodík, musíme buď CO_2 zachytávat (technologie CCS/CCU), nebo využít technologii pyrolýzy/plazma/termolýzy metanu, kde vzniká uhlík v pevném skupenství.

 **Věděl jsi, že...?** Energetická náročnost celého cyklu P2G a zpětné konverze přes SMR dosahuje téměř 100 kWh na kilogram získaného vodíku. Celý řetězec tedy spolkne mnohem více energie, než kolik teoreticky lze z vodíku získat – metan jako nosič vodíku je využitelný ve stávající infrastruktuře, ale energeticky náročný a tím pádem i drahý.

3.5 Kritický pohled: proč metan není dokonalé řešení

- 1. Metan je silný skleníkový plyn.** Při úniku do atmosféry má metan 27krát silnější skleníkový efekt než CO_2 . I samotný metan uniká ze zásobníků a plynové infrastruktury. Právě úniky mohou celý ekologický přínos zhatit.
- 2. Velké energetické ztráty.** Účinnost celého řetězce elektrolýza → metanizace → reformování se pohybuje jen kolem 30–40 %. Z původní elektrické energie se jako čistý vodík využije méně než polovina.
- 3. Zpětná konverze produkuje CO_2 .** Technologie SMR vypouští 8,65–11 kg CO_2 na každý kilogram získaného vodíku. Bez technologie CCS není výsledný vodík klimaticky neutrální (pokud není už při výrobě syntetického plynu využit obnovitelný vodík s biogenním CO_2 , tedy CO_2 , které vzniká například v bioplynových stanicích).

4. Dvojitá transformace a získání vodíku zpět z metanu prodražuje krátké cykly. Pro ukládání vodíku jen na dny nebo týdny je cyklus elektrolýza → metanizace → reformování ekonomicky nesmyslný. Metan dává smysl až pro sezónní nebo víceleté uložení.

5. Závislost na CO₂. Sabatierova reakce spotřebuje 2,74 kg CO₂ na kilogram metanu. Je tedy nutné mít nablízko zdroj CO₂ v dostatečném množství a kvalitě.

3.6 Shrnutí

Metan jako nosič vodíku je pragmatickým kompromisem: nevyžaduje novou infrastrukturu, snadno se přepravuje a lze ho ukládat na měsíce i roky. Platíme za to ale vysokou energetickou cenou, emisemi CO₂ při zpětné konverzi a rizikem úniku metanu. Nejlépe se hodí tam, kde je produkováno velké množství obnovitelné energie, která nemá přímé využití, přístup k CO₂ a možnost dlouhodobého ukládání – nebo pro mezinárodní přepravu vodíku lodní dopravou, u které ale lze předpokládat, že vyrobený metan bude rovnou spotřebován místo jeho zpětné konverze na vodík.

 **Věděl jsi, že...?** Japonsko, Jižní Korea ale i Evropa již dnes importují LNG z Austrálie, Kataru nebo USA. Stejně tankery by mohly v budoucnu převážet syntetický LNG vyrobený z čistého vodíku – infrastruktura je připravená.

4 Směs zemního plynu s vodíkem – blend jako přechodné řešení

Představ si, že chceš dodat vodík do domácností, ale potrubí na čistý vodík ještě není postaveno. Co když ho přimícháš do stávajícího plynovodu? Taková je základní myšlenka tzv. blendingu – mísení vodíku se zemním plynem. Zní to jednoduše, ale realita je složitější a kontroverznější, než se na první pohled zdá.

4.1 Co je blending a jak funguje?

Blending (z angličtiny: mísení, v tomto případě zemního plynu s vodíkem) znamená přidávat určité procento vodíku do stávajících plynovodních sítí, které dnes přepravují a distribuují zemní plyn. Směs je bezbarvá a s typickým sirným zápachem, který je způsoben přidanými odoranty.

Klíčová otázka je: kolik vodíku můžeme přimíchat, aniž bychom museli měnit plynovody nebo kondenzační kotle? Studie ukazují, že přibližně 5–20 % (obj.) vodíku zvládne většina distribučních sítí a koncových spotřebičů bez zásadních problémů. Přes hranice mezi státy EU však legislativa povoluje maximálně jen 2 % (obj.) vodíku – a to je zásadní omezení.

 **Věděl jsi, že...?** Projekt GasNetu v Hranicích u Aše testuje přimíchávání vodíku do distribuční sítě až do koncentrace 10 % (obj.) – a připravuje se na 20 %. Je to jediný takový pilot v České republice. Testují se i spotřebiče v domácnostech, aby se zjistilo, zda směs bez problémů shoří i v běžném kotli.

4.1 Jak se vodík do sítě dostává?

Výroba vodíku elektrolýzou probíhá například v blízkosti větrných, solárních či jaderných elektráren. Vodík se pak přimísí do místního plynovodu prostřednictvím speciální vtláčeční jednotky. Při odtoku ze sítě ho spotřebitel spálí spolu se zemním plynem – nebo se vodík ze směsi separuje speciální technologií (membrány nebo PSA – adsorpce za střídavého tlaku) a čistý vodík se využije například v automobilech nebo průmyslu.

Potrubí samo o sobě může fungovat jako krátkodobý zásobník. Tranzitní síť NET4GAS v České republice má potrubí s průměry DN 1000–1400 – při 10 % (obj.) vodíku a tlaku 60 bar dokáže uložit na každých 100 km potrubí až 38,2 tun vodíku. To je překvapivě velké množství energie, které může sloužit jako vyrovnávací zásobník.

4.2 Kde to dává smysl, a kde ne?

Spalování ve spotřebičích – nejjednodušší využití. Směs se spálí v kotli nebo plynové elektrárně, emise CO₂ se sníží úměrně k podílu vodíku ve směsi. Při 20 % (obj.) vodíku jsou úspory emisí relativně malé – jen asi 7 % CO₂ kvůli odlišné objemové hustotě vodíku oproti zemnímu plynu.

Potrubí jako dálkový transport – směs lze přepravovat stávajícími plynovody bez velkých úprav. Na mezinárodní úrovni NET4GAS plánuje zvládnout 2 % (obj.) vodíku již od roku 2026. TRL je 8–9 pro nízké koncentrace, 4–5 pro vyšší koncentrace.

Vodíková mobilita – zde je blending téměř slepou uličkou. Auto na vodík s palivovým článkem potřebuje čistý vodík (99,97 % mol.), který musí být ze směsi separován. To výrazně prodražuje celý proces.

Podzemní zásobníky – Česká republika má 9 lokalit s podzemními zásobníky zemního plynu. Možnost vtlačování směsi do nich je předmětem analýz a pilotů, ačkoliv skladování vodíku komplikují bakterie, které jej požívají a vyrábí z něj metan. Žádné vtlačování vodíku však dosud v ČR neprobíhá. TRL je 6–7.

4.3 Kritický pohled: proč blending není spasitel

- 1. Malé úspory emisí.** Při 20 % (obj.) vodíku klesnou emise CO₂ ze spalování jen o přibližně 7 %. To je relativně málo s ohledem na požadované úspory emisí, které lze dosáhnout například při využití tepelného čerpadla místo kondenzačního kotle.
- 2. Separace je drahá a energeticky náročná.** Pokud chceme získat čistý vodík (pro mobilitu nebo průmysl), musíme ho ze směsi oddělit. Každá separace znamená ztráty vodíku a náklady navíc.
- 3. Vodík uniká snadno.** Vodík má nejmenší molekulu ze všech látek – může procházet netěsnostmi, které pro zemní plyn nevadí. Se zvyšující se koncentrací vodíku naráží sítě na problémy s těsněním, armaturami a ventily.
- 4. Legislativa je přísná.** Přes hranice EU je povolen maximálně 2 % (obj.) vodíku. To zásadně omezuje množství, které lze přepravit. Navýšení limitu vyžaduje souhlas všech členských států, což je politicky složitý proces.
- 5. Blending je jen přechodové řešení.** Více než využívání směsi je ekonomicky i technicky výhodnější budovat trasy a řešení pro čistý vodík. Blending může být jen dobrý most, než plynovod na čistý vodík bude hotový.

 **Věděl jsi, že...?** 100 km tranzitního potrubí s 10 % blendem vodíku uskladní 38 tun vodíku. To není malé množství. Ale celá ČR má skoro 2 500 km tranzitního potrubí a další desítky tisíců km plynovodní sítě – takový systém by dokázal uchovávat obrovské množství energie. Problém je dostat vodík ze směsi zpět.

4.4 Shrnutí

Blending je nejrychlejší způsob, jak dostat vodík do stávající energetické infrastruktury – bez nákladné výstavby nových potrubí. Pro spalování je to relativně smysluplné přechodové řešení, které trochu sníží emise (při využití vodíku z obnovitelných zdrojů či jadra). Pro využití v sektoru dopravy či aplikaci, kde je vodík nutné využít napřímo je však řešení příliš složité a drahé. Budoucnost patří dedikovaným vodíkovým potrubím – blending může být potenciálním můstkem.

5 Toluen / LOHC – vodík přepravovaný jako nafta

Představ si, že můžeš přepravovat vodík v autocisternách – stejně jako dnes převážíme naftu nebo benzin. Žádné chlazení, žádné extrémní tlaky. Zní to jako fantazie, ale technologie LOHC to dělá reálné už dnes.

5.1 Co je LOHC a co s tím má společného toluen?

LOHC je zkratka z angličtiny: Liquid Organic Hydrogen Carrier – kapalný organický nosič vodíku. Principem je chemicky vázat vodík do běžné kapalné látky, přepravit ji a na místě určení vodík uvolnit.

Toluen (C_7H_8) je aromatický uhlovodík – běžná průmyslová kapalina používaná jako rozpouštědlo v barvách a lacích. Při kontaktu s vodíkem za přítomnosti katalyzátoru (platina, palladium) se mění na methylcyklohexan (MCH, C_7H_{14}) – pomocí tzv. hydrogenace. MCH drží vodík bezpečně chemicky vázaný. Když vodík chceme zpět, ohřejeme MCH na 200–350 °C za přítomnosti katalyzátoru a dojde k uvolnění vodíku – tomuto ději se říká tzv. dehydrogenace. Zbývající toluen znovu použijeme.

 **Věděl jsi, že...?** MCH má objemovou hustotu vodíku až 47 kg H_2 na m^3 – 1,5x více než vodík stlačený na 500 bar. Jedna autocisterna s MCH převeze více energie než trailer se stlačeným vodíkem.

5.2 Uzavřený cyklus hydrogenace a dehydrogenace

- Hydrogenace: toluen + 3 H_2 => MCH (150–200 °C, platinový nebo niklový katalyzátor, 20–30 bar). Při reakci se uvolní teplo.
- Přeprava: MCH se přepravuje jako běžná chemická kapalina – autocisterny, železniční vagóny nebo tankery.
- Dehydrogenace: MCH => toluen + 3 H_2 (200–350 °C, platinový katalyzátor). Potřebuje 8–10 MJ tepla k uvolnění kilogramu vodíku.
- Toluén se může následně přivést zpět a cyklus se opakuje. Systém vydrží 300–500 cyklů bez výrazné degradace toluenu.

Klíčová výhoda: MCH je za běžných podmínek stabilní – žádné nebezpečné tlaky, žádné extrémní teploty. Vodík se uvolní až tehdy, když ho aktivně chceme.

5.3 Formy přepravy a skladování

Silniční přeprava (TRL 8–9) – standardní ADR-certifikované autocisterny s objemem 30 000 litrů. Stejné vozy jako pro přepravu chemikálií.

Železniční přeprava (TRL 7–8) – cisternové vagóny pro chemické kapaliny, až 60 tun MCH na vagón. Ekonomicky výhodné pro středně velké dodávky.

Lodní přeprava (TRL 6–7) – upravené ropné tankery; MCH se neodpaří. Vhodné pro mezikontinentální trasy.

Skladování – MCH lze držet v ocelových nádržích při normálním tlaku a teplotě po měsíce i roky bez ztrát.

5.4 Aplikace v České republice

Česká republika má petrochemickou základnu v Litvínově, Kralupech nad Vltavou a Pardubicích, která by se dala adaptovat pro LOHC logistiku. LOHC se hodí především pro sezónní akumulaci: letní přebytek solární energie se přemění na vodík, který se hydrogenuje do toluenu, uskladní jako MCH a v době poptávky se uvolní.

 **Věděl jsi, že...?** LOHC připomíná konzistencí i zápachem ropu. Převážovat kapalinu je vždy levnější a jednodušší než stlačený či kryogenně zmražený plyn.

5.5 Kritický pohled: co LOHC brání být všude?

- 1. Dehydrogenace je energeticky náročná.** Uvolnění vodíku z MCH spotřebuje 8–10 MJ tepla/kg H₂. Bez odpadního tepla musíš část vodíku přímo spálit, aby sis teplo vyrobil, alternativně k výrobě tepla lze můžeš spálit třeba zemní plyn, to ale produkuje emise.
- 2. Celková účinnost je nízká.** Systém hydrogenace + přeprava + dehydrogenace má účinnost jen 30–45 %.
- 3. Platina je drahá a vzácná.** Katalyzátory na bázi platiny jsou klíčové pro dehydrogenaci. Životnost reaktorového lože je pouze 8 000–12 000 hodin.
- 4. Toluén je toxický.** Toluén způsobuje poškození nervové soustavy při dlouhodobé expozici a je vysoce hořlavou kapalinou s bodem vzplanutí pod 23 °C.
- 5. Systém startuje pomalu.** Dehydrogenační reaktor potřebuje desítky minut přípravy od studeného stavu.

 **Věděl jsi, že...?** Japonská společnost Chiyoda Corporation uskutečnila demonstrační projekt: vodík vyrobený v Bruneji byl hydrogenován do toluenu, MCH byl následně převezen tankerem do Japonska, kde byl dehydrogenován na čistý vodík. Mezikontinentální transport LOHC je technicky možný, brání mu pouze ekonomika.

5.6 Shrnutí

LOHC na bázi toluenu je jednou z nejpraktičtějších cest, jak přepravovat vodík na velké vzdálenosti bez kryogenních podmínek nebo extrémních tlaků. Stávající chemická infrastruktura a cisternová síť jsou plně kompatibilní. Hlavní překážky jsou energetická náročnost dehydrogenace, nízká účinnost a cena platinových katalyzátorů. Pro sezónní skladování a mezikontinentální dopravu vodíku představuje LOHC potenciální alternativu, které brání pouze ekonomické aspekty.

6 Plynný vodík (stlačený) – nejprímější cesta

Když se řekne vodík, většina lidí si představí stlačený plyn v těžké ocelové lahvi. Stlačený plynný vodík je dnes nejrozšířenějším způsobem přepravy a krátkodobého skladování vodíku. Je nejjednodušší na pochopení a zároveň má nejjasnější fyzikální limity.

6.1 Základní vlastnosti

Vodík je za normálních podmínek plyn s nejnižší hustotou ze všech látek: $0,09 \text{ kg/m}^3$. To je asi 14krát méně než vzduch. Aby bylo možné vodík prakticky skladovat a přepravovat, je nutné ho stlačit do tlakových nádob. Čím vyšší tlak, tím více vodíku se do nádoby vejde:

- 45 bar: hustota $3,69 \text{ kg/m}^3$ – nízkotlaké zásobníky pro průmysl.
- 200 bar: hustota $14,94 \text{ kg/m}^3$ – standardní vodíkové trailery a lahve.
- 500 bar: hustota cca $31,6 \text{ kg/m}^3$ – vysokotlaké vodíkové trailery a lahve.

Klíčový problém: ani při 500 barech není hustota stlačeného vodíku velká ve srovnání s kapalinami. Pro uskladnění jedné tuny vodíku při 200 barech potřebujeme přibližně 67 m^3 zásobníkového objemu. Pro uskladnění 1 tuny nafty potřebujeme jen cca $1,2 \text{ m}^3$.

 **Věděl jsi, že...?** 500 barů je přibližně 200krát větší tlak než v pneumatice osobního auta (kolem 2,5 baru). Nádrže pro plnění vodíkových aut musí vydržet opakované tlakové cykly a jsou proto vyrobeny z kompozitních materiálů vyztužených uhlíkovými vlákny.

6.2 Jak se přepravuje?

Tlakové lahve a svazky lahví – malé ocelové nebo kompozitní nádoby spojené do paletových sestav (objem $0,6\text{--}2,5 \text{ m}^3$). Zákazník dostane plný svazek a vrátí prázdný. Vhodné pro menší odběratele v laboratořích nebo průmyslu. TRL 9.

Vodíkové trailery – velký návěs s napevno připojenými lahvemi, objem $20\text{--}45 \text{ m}^3$, celková kapacita $300\text{--}1\,400 \text{ kg H}_2$ v závislosti na využitém tlaku. Přepravní tlak $200\text{--}500 \text{ bar}$, TRL 9 pro ocelové lahve, TRL 8 pro kompozitní. Nejběžnější způsob zásobování čerpacích stanic. Ekonomicky výhodné pro malé vzdálenosti vzhledem k malému objemu přepraveného vodíku.

ISO kontejnery s tlakovými nádobami – standardizované kontejnery kompatibilní se silniční, železniční i lodní přepravou. Intermodální přeprava umožňuje flexibilní kombinaci dopravních módů. TRL 7–8.

Plynovody – pro velké objemy na pevnině nejlevnější varianta. Evropská vodíková páteřní síť („Hydrogen Backbone“) se plánuje v ČR realizovat kolem roku 2030–2032. ČR je zapojena do projektu Czech H2 Backbone, který počítá s přestavbou části plynovodů na vodíkovody, jako první by měla být zrealizována přeměna plynovodu Gazela.

6.3 Skladování

Stlačený plyný vodík je ideální pro krátkodobé skladování (hodiny až dny) díky jednoduchosti řetězce. Nevyžaduje žádné katalyzátory pro převody z jedné látky do druhé. Vodík lze rovnou využít v palivových článcích nebo průmyslových procesech bez dalšího zpracování za předpokladu vysoké úrovně čistoty.

Pro větší kapacity existují nízkotlaké zásobníky do 50 bar (horizontální nebo vertikální nádrže, standardně 95 m³, vyráběné i v ČR). Pro dlouhodobé sezónní skladování se zkoumá využití podzemních struktur – kavernových zásobníků, vytěžených ložisek zemního plynu nebo akviferů. V ČR existuje 9 lokalit s podzemními zásobníky, ale jejich způsobilost pro vodík dosud nebyla prověřena.

6.4 Situace v České republice

Česká republika má pět lokalit průmyslové výroby vodíku: Litvínov, Kralupy nad Vltavou, Ústí nad Labem, Ostrava a Valašské Meziříčí. Největší výroba je v Litvínově, kde se vodík využívá převážně k výrobě konvenčních fosilních paliv, ale část vodíku se dočišťuje na kvalitu pro mobilitu a je využíván jako palivo do vodíkových čerpacích stanic.

Silniční přeprava stlačeného vodíku v ČR již probíhá – zásobuje zejména průmyslové odběratele a první vodíkové čerpací stanice (Praha, Litvínov). Železniční přeprava vodíku se nerealizuje. Potrubní přeprava bude klíčová do budoucna – plánovaná česká vodíková páteřní síť by měla propojit průmyslové výrobce s odběrateli.

 **Věděl jsi, že...?** Vzpomínáš na hélium v narozeninových balonkách? Hélium a vodík jsou si podobné – oba jsou extrémně lehké a hned letí nahoru. Jenže zatímco hélium je inertní (nehořlavé), vodík hoří.

6.5 Kritický pohled: jaké jsou limity stlačeného vodíku?

- 1. Nízká objemová hustota energie.** Ani při 500 barech není stlačený vodík příliš kompaktní. Pro srovnání: nafta ukládá energii asi 55krát kompaktněji (objemově) než vodík při 500 barech. Nádrže proto musí být velké a těžké, což omezuje použití zejména v letectví a osobní mobilitě.
- 2. Komprese stojí energii.** Stlačení vodíku spotřebuje velké množství energie, podle vstupního a výstupního tlaku jsou to jednotky %.
- 3. Vodíková křehkost materiálů.** Vodík proniká do struktury kovů a způsobuje jejich křehnutí (hydrogen embrittlement). Ocelové nádoby a potrubí musí být z odolných slitin, jinak hrozí praskliny a havárie. To prodražuje celou infrastrukturu a vyžaduje pravidelné revize.
- 4. Úniky jsou nevyhnutelné.** Vodík je nejmenší molekula na světě a proniká i zdánlivě těsnými spoji. Každé přepouštění, proplach systému nebo odtlakování přináší ztráty vodíku. Detekce úniků je proto kritickou součástí každého vodíkového systému.
- 5. Ekonomika silniční přepravy rychle klesá s vzdáleností.** Silniční přeprava traileru s vodíkem je ekonomicky výhodná při malých vzdálenostech.

6.6 Shrnutí

Stlačený plyný vodík je dnes technologicky nejzralejší a nejflexibilnější způsob distribuce vodíku na krátké a střední vzdálenosti. Jeho největší výhodou je jednoduchost – vodík není nutné chemicky přeměňovat a je okamžitě k dispozici. Nevýhodou je nízká objemová hustota, energetická náročnost komprese, problém vodíkové křehkosti a vysoké náklady na infrastrukturu. Pro zásobování čerpacích stanic v rozsahu ČR je silniční přeprava optimální řešení. Pro velké vzdálenosti a velké objemy (např. pro průmyslové odběratele) mu bude konkurovat potrubí přeprava nebo jiné nosiče.

7 Kapalný vodík – nejchladnější energetický náklad na světě

Teplota $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je jen 20 stupňů nad absolutní nulou – chladnějším místem ve vesmíru je pouze prostor mezi hvězdami. Při takové teplotě se vodík mění z plynu na kapalinu a jeho hustota stoupne přibližně 800krát v porovnání s plynem za atmosférických podmínek. Kapalný vodík je jednou z nejatraktivnějších forem přepravy vodíku pro velké vzdálenosti – ale dosáhnout a udržet tuto teplotu stojí obrovské množství energie.

7.1 Proč vůbec kapalný vodík?

Klíčovou výhodou zkapalněného vodíku je jeho hustota: $70,8\text{ kg/m}^3$ – více než dvojnásobek oproti vodíku stlačenému na 500 barů ($31,6\text{ kg/m}^3$). Jeden kryogenní trailer přepraví standardně 3 500 až 4 500 kg vodíku, zatímco tlakový trailer se stlačeným plynem pojme jen 300–1 400 kg podle tlakové úrovně. Podle studie UC Davis z roku 2024 je přeprava kapalného vodíku při vzdálenostech nad 150 km přibližně 4krát levnější než přeprava stlačeného vodíku.

Kapalný vodík má kořeny ve vesmírném programu NASA, který ho používá jako raketové palivo od 60. let. Americká raketa Saturn V, která dopravila astronauty na Měsíc, spalovala kapalný vodík v druhém a třetím stupni. Komerční využití se pak rozšířilo do průmyslu a postupně i do mobility.

 **Věděl jsi, že...?** NASA v roce 2022 dokončila největší nádrž na kapalný vodík na světě v Kennedyho vesmírném středisku – kulovitá nádrž o průměru 23 m a výšce 27 m pojme $4\,730\text{ m}^3$ (přibližně 335 tun). Nová izolace ze skleněných mikrobublin snížila odpar o 46 % oproti předchozím konstrukcím. K naplnění bylo potřeba přibližně 50 kryogenních trailerů.

7.2 Jak se vodík zkapalňuje?

Zkapalnění vodíku probíhá ve specializovaných zařízeních – zkapalňovačích. Ty vodík ochlazují v několika fázích až na $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celý proces spotřebuje přibližně 10–13 kWh elektrické energie na každý kilogram vodíku v závislosti na velikosti zkapalňovače, větší spotřebují méně energie na kilo vodíku. To odpovídá 30–40 % energetického obsahu vodíku samotného. Větší zkapalňovače jsou účinnější – průmyslové jednotky (15 t/den) dosahují spotřeby kolem 10 kWh/kg, malé mohou spotřebovat i 20 kWh/kg.

Technická záludnost: vodík existuje ve dvou spinových izomerech – ortho a para. Při pokojové teplotě tvoří 75 % ortho a 25 % para vodík. Při zkapalňování se ortho postupně mění na para a uvolňuje se teplo. Pokud není tento přechod řízen, kapalný vodík se sám zahřívá a odpaří se rychleji, než by měl. Správný poměr izomerů je kritický pro stabilitu.

7.3 Odpar: nevyhnutelný nepřítel

Největší technická výzva kapalného vodíku se jmenuje boil-off – odpar. Ani ty nejlepší kryogenní nádrže nejsou dokonale izolované a teplo z okolí postupně proniká dovnitř:

- Velké stacionární nádrže (tisíce m^3): odpar 0,05–0,2 % denně.
- Středně velké nádrže (1–100 m^3): odpar 0,3–1 % denně.

- Mobilní trailery při přepravě: přibližně 1 % denně i více.

Odpařený vodík je nutné buď využít (spálit, stlačit do zásobníku), nebo kontrolovaně odvětrat. Systémy zero boil-off (ZBO) vodík aktivně re-kondenzují, ale jsou velmi drahé a energeticky náročné – využívají je prakticky jen v kosmickém průmyslu.

7.4 Přeprava

Silniční kryogenní trailery (TRL 9) – kulovité nebo válcové nádrže s vakuovou izolací, kapacita 3 500–4 500 kg H₂. Vodík lze přečerpávat na 90 % kapacity nádrže, kvůli odpařování, které buduje tlak je obvykle ponechána provozní rezerva. Cena traileru: 1,3–2,6 mil. €. Rozšířeny jsou především v USA.

Kryogenní ISO kontejnery (TRL 6–7) – standardní rozměry kompatibilní se silnicí, železnicí i lodí. Kapacita přibližně 3 tuny H₂, cena jednoho kontejneru přibližně 650 000 €.

Lodní přeprava – první komerční tanker pro kapalný vodík (Suiso Frontier, Japonsko–Austrálie) byl spuštěn v roce 2019. Plánují se terminály v Rotterdamu, Amsterdamu a Hamburku. V roce 2025 byl dohodnut jeden z prvních importních koridorů (Omán–Amsterdam). Kapalný vodík nelze přepravovat plynovody – potrubní přeprava LH₂ není možná.

 **Věděl jsi, že...?** Japonský tanker Suiso Frontier byla první loď na světě speciálně navržená pro přepravu kapalného vodíku. V roce 2022 dokončila první zkušební plavbu z Austrálie do Japonska. Projekt ukázal, že mezikontinentální přeprava LH₂ je technicky proveditelná – ale stále velmi drahá.

7.5 Situace v České republice

V ČR se kapalný vodík nevyužívá, rovněž po Evropě na rozdíl od USA příliš projektů s kapalným vodíkem neexistuje (až na pár výjimek většinou spojených s projekty v oblasti vodíkové mobility – například vodíkové kamiony Daimler). Žádný terminál pro lodní dopravu kapalného vodíku v ČR neexistuje a ani se v současnosti neplánuje.

7.6 Kritický pohled: proč kapalný vodík není všude?

1. Zkapalnění spotřebuje 30–40 % energie vodíku. Každý kilogram kapalného vodíku stojí 10–13 kWh elektřiny jen na výrobu. To je dramatická energetická daň, která musí být kompenzována výhodami přepravy.

2. Odpar je nevyhnutelný. Při přepravě se ztrácí přibližně 1 % denně. Při 10denní přepravě je to 10 % nákladu – ztraceno jen kvůli fyzikálním zákonům.

3. Infrastruktura je extrémně drahá. Zkapalňovač pro 15 t H₂/den stojí desítky milionů €. Kryogenní trailer 1,3–2,6 mil. €.

4. Bezpečnostní náročnost. Kapalný vodík kondenzuje vzdušnou vlhkost, může zatuhnout ve ventilech, způsobuje popáleniny při kontaktu s pokožkou a při úniku kondenzuje okolní

vzduch do výbušných oblak. Provoz vyžaduje speciálně školený personál a přísná bezpečnostní opatření (ATEX).

5. Nevhodné pro dlouhodobé skladování. Kvůli odparu je kapalný vodík ekonomicky výhodný jen pro krátkodobé skladování (hodiny až dny) ve velkých objemech. Pro sezónní ukládání energie jsou plynné zásobníky nebo chemické nosiče (LOHC, amoniak) lepší volbou.

7.7 Shrnutí

Kapalný vodík je nejkompaktnějším způsobem přepravy čistého vodíku na velké vzdálenosti. Pro přepravu na větší vzdálenosti a mezikontinentální import je dnes jednou z alternativ. Hlavní překážky jsou enormní energetická náročnost zkapalnění, nevyhnutelný odpar a vysoké investiční náklady. Klíčovým faktorem pro jeho rozvoj bude dostupnost levné obnovitelné elektřiny a rozvoj terminálové infrastruktury v evropských přístavech.

8 Amoniak – starý průmyslový gigant v nové roli

Amoniak. Pro většinu lidí synonymum čisticích prostředků nebo hnojiv. Ale chemici a energetici v něm vidí něco jiného: jeden z nejkompaktnějších nosičů vodíku na světě s plně fungující globální infrastrukturou. Každý rok se ho vyrobí přes 183 milionů tun a přepravuje se loděmi, vlaky i cisternami po celém světě. Otázka je: dokážeme tuto obrovskou průmyslovou sílu využít pro ekonomiku postavenou částečně na vodíku?

8.1 Co je amoniak a kolik vodíku v sobě nese?

Amoniak (NH_3) je sloučenina jednoho atomu dusíku a tří atomů vodíku. Za normálních podmínek je to bezbarvý plyn s typickým štiplavým zápachem. Klíčové číslo: amoniak obsahuje 17,6 % vodíku podle hmotnosti. To z něj dělá jeden z nejučinnějších chemických nosičů vodíku vůbec. Amoniak se zkapalní při mírných podmínkách – buď mírným tlakem (7–18 bar při okolní teplotě), nebo chlazením pod $-34\text{ }^\circ\text{C}$.

Hustota kapalného amoniaku může být 600 kg/m^3 , což v přepočtu na vodík dává $106\text{ kg H}_2/\text{m}^3$. Hustota ale záleží na tlaku, a je tak možné dosáhnout vyšší hustoty. I v případě při 600 kg/m^3 je to o 50 % více než kapalný vodík ($70,8\text{ kg H}_2/\text{m}^3$) a násobně více než stlačený vodík při 500 barech ($31,6\text{ kg/m}^3$).

 **Věděl jsi, že...?** Amoniak patří mezi nejvyroběnější průmyslové chemikálie na světě – ročně se ho vyrobí více než 183 milionů tun, z toho přibližně 80 % jde na výrobu hnojiv. Bez amoniakových hnojiv by Země uživila zhruba o 40 % méně lidí, než dnes na Zemi žije.

8.2 Jak se z amoniaku dostane vodík zpátky?

Výroba amoniaku probíhá Haber-Boschovým procesem: vodík + dusík $\Rightarrow$ amoniak (reakce při teplotách $400\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaku $100\text{--}1\,000\text{ bar}$ za přítomnosti železného katalyzátoru). Účinnost syntézy dosahuje přibližně 86 %.

Opačný proces – krakování amoniaku – probíhá při teplotách nad $500\text{ }^\circ\text{C}$ za přítomnosti katalyzátoru (železo, ruthenium, nikl): $\text{NH}_3 \Rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$. Účinnost krakování dosahuje 79 %. Celková účinnost celého cyklu (syntéza + transport + krakování) je asi 67 %. Na každý kilogram vodíku, který chceme přepravit, potřebujeme přepravit 8,5 kg amoniaku.

Velká výhoda oproti LOHC nebo metanu: amoniak neobsahuje uhlík, takže při krakování nevzniká žádný CO_2 . Vzniká převážně dusík a vodík – obě látky bez přímých emisí skleníkových plynů.

8.3 Přeprava a skladování

Silniční přeprava (TRL 9) – cisternové návěsy s kapacitou až 44 m^3 při tlaku do 29 barů a teplotách $-40\text{ }^\circ\text{C}$ až $+50\text{ }^\circ\text{C}$.

Železniční přeprava (TRL 9) – cisternové vagóny, kapacita $50\text{--}110\text{ m}^3$ (v ČR standardně 85 m^3), provozní tlak do 26 barů. ORLEN Unipetrol (jediný výrobce amoniaku v ČR) využívá železniční přepravu pro distribuci amoniaku z Litvínova.

Zdroj: Studie TAČR 2025 – HYTEP, VŠB, CDV, ČVUT, ORLEN Unipetrol

Lodní přeprava (TRL 9) – největší amoniakové tankery přepraví až 66 000 tun NH_3 . Tři typy tankerů: plně chlazené (1 bar při $-50\text{ }^\circ\text{C}$), polochlazené (4–8 bar při $-10\text{ }^\circ\text{C}$) a plně tlakové (17 bar při $45\text{ }^\circ\text{C}$). Přístavní infrastruktura je celosvětově rozšířená.

Potrubní přeprava – celosvětově existuje přibližně 7 600 km potrubí na amoniak, některá v provozu přes 50 let. V ČR historicky fungovala trasa Litvínov–Lovosice. Amoniak lze přepravovat existujícím plynovodním potrubím s úpravami.

Skladování – kapalný amoniak v nádrži je téměř bezeztrátový: průměrný odpar pouze 0,017 % denně. Vhodný proto pro sezónní i víceleté skladování.

 **Věděl jsi, že...?** Japonsko a Jižní Korea si vybraly amoniak jako hlavního kandidáta pro import čistého vodíku ze zámoří. V Japonsku se plánuje využití amoniaku jako přímého paliva v elektrárnách (spoluspalování s uhlím) – bez nutnosti krakování na vodík, čímž se celý řetězec zjednodušuje a zlevňuje. Spoluspalování amoniaku je ale některými kritizováno pro relativně malý přínos k snižování emisí CO_2 a zvyšování emisí NO_x .

8.4 Situace v České republice

ORLEN Unipetrol v Litvínově je jediným výrobcem amoniaku v ČR. Infrastruktura pro přepravu a skladování amoniaku existuje a je funkční. Při přechodu na čistý amoniak (vyrobený z čistého vodíku) by tato infrastruktura mohla sloužit i pro import a distribuci vodíku pro další použití.

 **Věděl jsi, že...?** Amoniak možná znáš z domácnosti – je v některých čistících prostředcích na okna a podlahy. Ten typický štiplavý zápach, který štípe nos? To je právě amoniak. V průmyslu se s ním ale pracuje bezpečně každý den v obrovských množstvích: každý rok ho lidstvo vyrobí tolik, co by naplnilo přes 9 000 olympijských bazénů.

8.5 Kritický pohled: proč amoniak není ideální?

1. Amoniak je vysoce toxický. Koncentrace 25 ppm (částic na milion) způsobuje podráždění očí a nosu. Při 100 ppm je vdechování nebezpečné, při 300 ppm hrozí poškození plic. Havárie cisterny s amoniakem může ohrozit celá okolní sídliště – proto je nutné dodržovat přísná bezpečnostní opatření.

2. Krakování vyžaduje teplo a katalyzátor. Aby se z amoniaku dostal čistý vodík, potřebujeme teplotu nad $500\text{ }^\circ\text{C}$ a katalyzátor. Každá čerpací stanice nebo průmyslový odběratel by potřeboval vlastní krakovací jednotku. Celý řetězec se tím prodražuje a komplikuje.

3. Celková účinnost cyklu: 67 %. Na každý kilogram vodíku přepravovaného jako amoniak a zpátky získaného krakováním ztratíme přibližně 33 % vodíku. To je výrazná systémová ztráta. Výsledný vodík je navíc nutné dočišťovat, což využití vodíku komplikuje.

4. Amoniak koroduje měď a slitiny. Amoniak je agresivní vůči mědi, zinku, mosazi a jejich slitinám – běžným materiálům v průmyslu. Veškerá infrastruktura musí být z ocelí nebo speciálních slitin, což zvyšuje náklady.

5. Emisní riziko NO_x. Pokud se amoniak spaluje přímo jako palivo (bez krakování), vznikají oxidy dusíku (NO_x) – škodlivé látky způsobující smog a kyselé deště. Přímé spalování amoniaku vyžaduje speciální hořáky a katalytické čisticí systémy.

 **Věděl jsi, že...?** Nos člověka je na amoniak extrémně citlivý – cítíme ho již při koncentraci kolem 5 ppm, tedy 5 molekul z milionu. Paradoxně je to jedna z bezpečnostních výhod: na rozdíl od vodíku (bez zápachu) nebo CO (jedovatý a bez zápachu) amoniak svou přítomnost hlasitě ohlásí dávno před tím, než dosáhne nebezpečné koncentrace.

8.6 Shrnutí

Amoniak je z hlediska objemové hustoty vodíku nejlepší dostupný nosič (106 kg H₂/m³) a má plně rozvinutou globální infrastrukturu. Pro mezikontinentální přepravu alternativní formy vodíku lodní dopravou je dnes nejreálnějším kandidátem. Hlavní překážky jsou vysoká toxicita, nutnost krakovací infrastruktury na straně odběratele a systémová hmotnostní a energetická ztráta. Pokud se amoniak bude spalovat přímo (v elektrárnách nebo lodích), odpadá problém s krakováním – to je směr, který např. Japonsko aktivně testuje.

9 Methanol – kapalina, která se vám vejde do nádrže jako nafta

Málokterý nosič vodíku má tak elegantní příběh jako methanol. Je kapalný při běžné teplotě a tlaku, nádrže na něj nevypadají jinak než nádrže na benzin, přepravují ho stejné typy lodí, jaké dnes přepravují ropu, a infrastruktura pro něj již existuje. Methanol je alkohol – příbuzný ethanolu v lihovinách, bez jednoho atomu uhlíku s naprosto odlišným využitím. A v budoucnosti možná jeden z klíčových nosičů vodíku.

9.1 Základní vlastnosti

Methanol (CH_3OH) je nejjednodušší alkohol – jeden atom uhlíku, čtyři atomy vodíku, jeden kyslík. Za normálních podmínek je to bezbarvá, těkavá kapalina s mírným alkoholovým zápachem. Bod varu má $64,7^\circ\text{C}$, bod tuhnutí -98°C – zůstává tedy kapalný v obrovském teplotním rozsahu, což je velká výhoda pro přepravu i skladování.

Klíčové čísla: methanol obsahuje 12,5 % vodíku hmotnostně. Hustota methanolu je 791 kg/m^3 , což odpovídá přibližně $99\text{ kg H}_2/\text{m}^3$. To je více než kapalný vodík ($\sim 71\text{ kg/m}^3$). Objemová energetická hustota methanolu ($15,6\text{ MJ/l}$) překračuje hodnoty jak kapalného, tak stlačeného vodíku.

 **Věděl jsi, že...?** Celosvětová spotřeba methanolu dosahuje přibližně 120 milionů tun ročně – a do roku 2050 některé mezinárodní asociace předpokládají nárůst na 500 milionů tun. Přibližně třetina celosvětové produkce se přepravuje po moři. Methanol je zároveň jedním z nejpoužívanějších alternativních paliv pro velké lodě – plnicí zařízení pro methanol existují ve více než 120 přístavech na světě.

9.2 Jak se vodík váže a jak se získá zpět?

Methanol váže vodík chemicky – přepravuje se běžná kapalina, aniž by existovalo riziko nekontrolovaného úniku vodíku. Vyrobit methanol lze z čistého vodíku a CO_2 :

- Hydrogenace CO_2 : $\text{CO}_2 + 3\text{ H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ (probíhá při 250°C , 50–80 bar, katalyzátor $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$). Účinnost je asi 60 %.
- Parní reformování (zpětné): $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{ H}_2$ (teplota nad 150°C). Pro mobilitu – reformer pomáhá měnit methanol zpět na vodík na čerpací stanici, řeší se také možnost přeměny methanolu přímo ve vozidle.

Methanol má praktickou výhodu v tom, že jej lze využít přímo jako kapalné palivo ve spalovacích motorech nebo v přímých methanolových palivových článcích nebo jako složka do fosilního paliva, bez nutnosti krakování.

 **Věděl jsi, že...?** Kromě hydrogenace CO_2 lze methanol vyrábět i dalšími způsoby? Dnes se drtivá většina (tzv. šedý methanol) produkuje ze syntézního plynu ($\text{CO} + \text{H}_2$) získaného ze zemního plynu či uhlí. Stále populárnější jsou však udržitelné alternativy: biomethanol vznikající zplyňováním lesní štěpky a zemědělského odpadu, nebo chemická recyklace, která high-tech zplyňováním mění nerecyklovatelný komunální odpad na čisté palivo.

9.3 Formy přepravy a skladování

Silniční cisternové vozy (TRL 8–9) – nádrže 20–45 m³, plněny na 90–95 % kapacity z bezpečnostních důvodů. Vhodné pro lokální a regionální distribuci.

Železniční cisterny (TRL 8–9) – objem 50–115 m³, provozní tlak až 6 bar. Ekonomické pro středně velké a velké dodávky na střední až dlouhé vzdálenosti.

Lodní přeprava (TRL 8–9) – standardní tankery pro chemické produkty bez chlazení a mírným přetlakem do 10 bar. Největší loď přepraví až 120 000 m³. Methanol je zároveň používán jako palivo pro tyto lodě – v tzv. dual-fuel motorech.

Potrubí (TRL 8–9) – funguje při okolní teplotě a mírném tlaku (10–50 bar).

Skladování – běžné ocelové nádrže při atmosférickém tlaku a okolní teplotě. Doporučená skladovací teplota 5–30 °C. Ztráty odparem jsou mírné a výrazně nižší než u kapalného vodíku.

9.4 Přímé využití jako palivo

Methanol lze použít přímo jako palivo – bez nutnosti extrakce vodíku – a to třemi způsoby:

- Přímé spalování v motoru: dvoupalivové motory na methanol a naftu snižují emise CO o 13–40 % a spotřebu paliva o 5–14 %.
- Přímé methanolové palivové články (DMFC): mění methanol přímo na elektřinu bez spalování.
- Reformování na vodík na lodích a v průmyslu: methanol se přemění na vodík přímo v místě spotřeby.

 **Věděl jsi, že...?** Některé z největších lodí na světě – kontejnerové obří jako Maersk nebo CMA CGM – již dnes používají methanol jako palivo. Je to jedno z mála alternativních paliv, které může přímo nahradit těžký topný olej bez nutnosti překopat celý systém lodi.

9.5 Situace v České republice

Česká republika nemá v současnosti velké sklady methanolu, ale má bohatou průmyslovou základnu pro jejich výrobu. Infrastruktura ORLEN Unipetrol v Litvínově nebo sklady ČEPRÁ by mohly sloužit jako základ pro skladování čistého methanolu. Chybí však technologie pro zpracování methanolu na vodík (reformování), bez které nelze methanol použít pro vodíkovou mobilitu.

 **Věděl jsi, že...?** Pozor na záměnu! Methanol a ethanol (alkohol v pivu, víně nebo tvrdých lihovinách) jsou chemicky velmi podobné, ale methanol je jedovatý. Stačí vypít malé množství a člověk může oslepnout nebo zemřít...

9.6 Kritický pohled: co methanolu brání?

1. Methanol je toxický. Na rozdíl od etanolu, methanol způsobuje při požití slepotu a smrt. Již 10 ml může způsobit trvalé poškození zraku. Expoziční limit na pracovišti je 200 ppm. Přesto se s ním pracuje běžně v průmyslu – je nutné jen dodržovat bezpečnostní pravidla.

2. Obsahuje uhlík – vzniká CO₂. Při spalování methanolu nebo při jeho reformování vzniká CO₂. Pokud má být methanol klimaticky neutrální, musí být vyroben z čistého vodíku a CO₂ zachyceného z atmosféry nebo průmyslových zdrojů – tzv. e-methanol nebo zelený methanol.

3. Celková účinnost řetězce je nízká. Výroba vodíku elektrolýzou vody (70 %) a následnou hydrogenací CO₂ (60 %) dává celkovou účinnost asi 42 %. To je méně než přímé použití stlačeného vodíku (70–85 %).

4. Koroze materiálů. Methanol je agresivní vůči některým polymerům a nátěrům. Přímé přimíchávání do benzínu vyžaduje přidání inhibitorů koroze, což komplikuje jeho široké využití jako benzinové příměsi.

9.7 Shrnutí

Methanol je jednou z nejpraktičtějších kapalných forem vodíku. Lze ho přepravovat stávající infrastrukturou, spalovat přímo v motorech nebo využít jako surovinu pro výrobu vodíku. Jeho objemová hustota vodíku (99 kg/m³) překračuje každý jiný nosič kromě amoniaku. Hlavní výzvy jsou emisní dopad CO₂ a nižší účinnost řetězce. Pro mezinárodní lodní přepravu a jako přímé náhrady těžkých topných olejů je dnes čistý methanol jednou z nejslibnějších cest dekarbonizace lodního průmyslu.

10 Ethanol – nosič vodíku z přírody?

Ethanol je alkohol. Je bezpečný, kapalný při běžné teplotě a tlaku, snadno se přepravuje a infrastruktura pro něj existuje. Jenže jako nosič vodíku má ethanol jednu zásadní slabinu: celkový řetězec od výroby až po spotřebu je energeticky neefektivní. Pojďme se na něj podívat bez příkras.

10.1 Co je ethanol a co o něm víme?

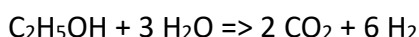
Ethanol (C₂H₅OH) je organická kapalina s bodem varu 78,3 °C a hustotou 786 kg/m³ – velmi podobná benzinu. Je mísitelný s vodou, hořlavý a biologicky odbouratelný. Jedna molekula ethanolu obsahuje šest atomů vodíku. To odpovídá hmotnostnímu obsahu vodíku přibližně 13 %. Teoreticky tedy z jednoho kilogramu ethanolu získáme asi 130 g vodíku procesem parního reformování.

Energetická hustota ethanolu je 5,9 kWh/l – výrazně více než kapalný vodík (2,3 kWh/l) nebo vodík stlačený na 500 bar (1,05 kWh/l). Díky tomu je ethanol z pohledu přepravy energie na objem velmi atraktivní nositel – jenže při přepočtu na využitelný vodík tato výhoda rychle klesá.

 **Věděl jsi, že...?** Brazílie je světovým lídrem v bioetanolové ekonomice: téměř všechna osobní auta jsou tzv. flex-fuel – mohou spalovat benzin, čistý ethanol nebo jejich libovolnou směs. Ethanol se vyrábí z cukrové třtiny a přepravuje se z vnitrozemí do přístavu Santos, odkud míří lodní dopravou do Evropy a Severní Ameriky. Tato infrastruktura by mohla sloužit i pro export ethanolu jako nosiče vodíku.

10.2 Jak se z ethanolu získá vodík?

Základním procesem pro získání vodíku z ethanolu je parní reformování (Steam Reforming of Ethanol, SRE). Probíhá při teplotách 600–800 °C za přítomnosti katalyzátoru (nikl, kobalt, rhodium):



Účinnost zpětné konverze ethanolu na vodík se pohybuje kolem 60–80 %. Jenže to je jen druhý krok. Pokud chceme vyrobit čistý ethanol z čistého vodíku (hydrogenace CO₂), účinnost tohoto prvního kroku je jen 30–55 %. Kombinovaná účinnost celého řetězce elektřina → H₂ → ethanol → H₂ je tedy pouhých 20–44 % – to znamená, že přes 50–80 % původní energie se ztratí v přeměnách.

10.3 Formy přepravy a skladování

Silniční cisternové vozy (TRL 9) – standardní cisterny pro hořlavé kapaliny, atmosférický tlak, identické s vozidly na benzin nebo methanol.

Železniční cisterny (TRL 9) – běžně se používají v USA, Brazílii i Evropě pro přepravu velkých objemů bioethanolu. Kapacita desítky m³ na vůz, ekonomické na střední až dlouhé vzdálenosti.

Lodní přeprava (TRL 9) – standardní chemické tankery bez chlazení nebo přetlaku. Brazílie exportuje ethanol tankery do USA a Evropy. Přístavy Rotterdam a Hamburg mají specializované ethanolové terminály.

Potrubi (produktovody) (TRL 8–9) – existují v Brazílii a USA.

Skladování (TRL 9) – běžné ocelové nádrže při atmosférickém tlaku. Zvláštní pozornost je potřeba dbát na těsnění a vnitřní materiály – ethanol napadá některé elastomery. V ČR vyrábí vhodné nádrže řada průmyslových firem.

10.4 Dvě generace bioethanolu

1. generace – z cukerných a škrobových plodin (kukuřice, cukrová řepa, cukrová třtina). Levnější a technologicky zralejší, ale konkuruje potravinářské výrobě a záboru zemědělské půdy.

2. generace – z lignocelulózové biomasy (zemědělské zbytky, dřevní hmota, energetické byliny). Nekonkuruje potravinářství, ale technologicky náročnější a dražší. Perspektivnější z ekologického hlediska.

Čistý syntetický ethanol (3. generace) – vyrobený z čistého vodíku a CO₂ katalytickou cestou. Zcela bez biomasy, ale nejméně efektivní varianta (30–55 % účinnost výroby). TRL pouze 4–5.

10.5 Situace v České republice

V ČR vyrábí ethanol zejména společnost Tereos TTD v závodech v Dobrovici, Chrudimi, Kojetíně a Kolíně a závod Ethanol Energy ve Vrdách. Biomasa přichází z řepařských a obilnářských oblastí (Polabí, východní Čechy, střední Morava). Hotový ethanol se mísí s benzinem v rafinériích ORLEN Unipetrol v Litvínově a Kralupech nad Vltavou.

Pro využití ethanolu jako nosiče vodíku v ČR chybí reformovací technologie na průmyslové škále. TRL procesu je přibližně 4–5. Ve střednědobém horizontu 5 let je masové průmyslové nasazení velmi nepravděpodobné.

 **Věděl jsi, že...?** Ethanol v pivu nebo víně vzniká, když kvasinky „snědí“ cukr a vydýchají ethanol a CO₂. Přesně tenhle proces se používá v biorafinériích: místo hroznů nebo sladu se kvasí kukuřice, cukrová řepa nebo třtina – a ethanol jde pak do vozidel jako příměs paliva. Brazílie tohle dělá ve velkém: téměř každé auto tam jezdí aspoň částečně na ethanol z cukrové třtiny. Je to v podstatě recyklace sluneční energie – třtina ji zachytí, my ji „vyfermentujeme“ a spálíme v motoru.

10.6 Kritický pohled: proč ethanol jako nosič vodíku zůstává na okraji?

1. Nízká celková účinnost řetězce. Pokud ethanol vyrábíme z čistého vodíku a pak ho zpátky reformujeme na vodík, celkový výsledek je 20–44 % účinnosti. Z každých 100 kWh elektrické energie na vstupu získáme zpátky jen 20–44 kWh ve formě vodíku. Zbytek se ztratí v přeměnách.

2. Reformování je technologicky nezralé. Na rozdíl od methanu nebo methanolu neexistuje průmyslový standard pro parní reformování ethanolu. TRL procesu je pouze 4–5. Katalyzátory degradují a deaktivují se rychleji než u jiných nosičů.

3. Konkurence s potravinářstvím. Bioethanol 1. generace soupeří s potravinářskou produkcí o zemědělskou půdu. Při rozsáhlém nasazení by mohlo dojít k zdražení potravin – tento efekt se projevil například při americkém boomu kukuřičného ethanolu v roce 2007.

4. Emise CO₂ při reformování. Parní reformování ethanolu produkuje CO₂. Bez technologie CCS (zachytávání uhlíku) jde o uhlíkově neúplný řetězec. To problematizuje ethanol jako součást skutečně zelené vodíkové ekonomiky.

5. Koroze infrastruktury. Ethanol je agresivní vůči některým elastomerům a vnitřním povlakům nádrží.

 **Věděl jsi, že...?** Nissan vyvinul palivový článek e-Bio Fuel-Cell, který spaluje bioethanol smíchaný s vodou a přímo z něj vyrábí elektřinu pomocí reformace a palivového článku SOFC – bez nutnosti přeměny ethanol zpět na vodík. Technologie je ve fázi demonstrace ale její nasazení je momentálně nejisté.

10.7 Shrnutí

Ethanol jako nosič vodíku je technicky fascinující, ale ekonomicky a energeticky problematický. Existující globální infrastruktura pro bioethanol je obrovská výhoda – přeprava je jednoduchá, bezpečná a levná. Problém je však jinde: celkový energetický řetězec výroba vodíku → ethanol → zpět na vodík je extrémně neefektivní (20–44 %) a reformovací technologie jsou na nízkém TRL. Nejreálnější využití ethanolu v kontextu vodíkové ekonomiky proto není jako nosič čistého vodíku, ale jako přímé obnovitelné palivo pro lodě, těžká vozidla nebo letadla – nebo jako základní surovina pro udržitelná syntetická paliva (SAF) pro letectví.

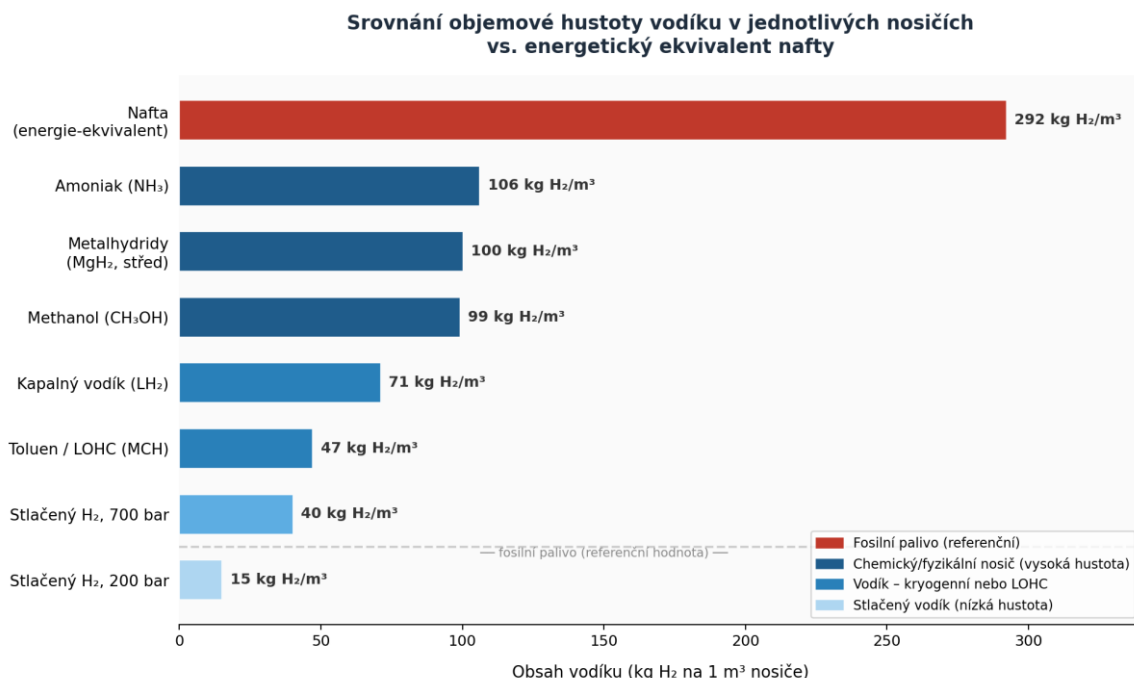
11 Závěr: Vodíkové nosiče vs. fosilní paliva – kam míříme?

Prošli jsme devět různých způsobů, jak vodík přepravovat a skladovat. Každý z nich má své místo v budoucí energetice. Ale jak si vedou oproti fosilním palivům, na která jsme zvyklí dnes? A jaký mají potenciál?

11.1 Fosilní paliva: pohodlná, ale s daní za klima

Nafta, benzin a zemní plyn jsou dnes dominantní z jediného důvodu: jsou neuvěřitelně praktické. Nafta má energetickou hustotu 35 MJ/l, snadno se tankuje, neskládá se pod tlakem ani se nechladí. Jenže každý spálený litr nafty vypustí asi 2,7 kg CO₂. Za rok 2023 lidstvo spálilo fosilní paliva odpovídající přes 37 miliardám tun CO₂ – to je klíčová příčina klimatické změny.

Pro srovnání: nádrž nafty o objemu 60 litrů (plná nádrž osobního auta) obsahuje energii odpovídající přibližně 17,5 kg vodíku. Stejné množství energie by ve formě stlačeného vodíku (700 bar) vyžadovalo nádrž o objemu přibližně 435 litrů – zabrala by tedy asi 7krát více místa. Právě toto je základní fyzikální výzva, která stojí za většinou technických kompromisů popsaných v této publikaci. Nafta je energeticky extrémně kompaktní a za desetiletí byly všechny systémy (motory, nádrže, čerpací stanice) optimalizovány právě pro její využití. Vodíkové nosiče nabízí cestu bez emisí, ale žádný z nich nemá srovnatelné fyzikální parametry. Právě proto je většina nosičů více ekonomicky konkurenceschopná teprve tam, kde vzniká přebytek levné obnovitelné energie, která náklady na přeměnu kompenzuje.



Obrázek 1: Srovnání objemové hustoty vodíku v jednotlivých nosičích. Nafta je zobrazena jako energetický ekvivalent, nikoli skutečný obsah vodíku v 1 m³ nafty.

Vodíkové nosiče: přehled potenciálu

Amoniak (NH₃): 106 kg H₂/m³, TRL 9, tankery pro přepravu již existují a používají se, při spálení vznikají NO_x. Toxický, ale energeticky nejhustší nosič. ★★★★★ Největší potenciál pro mezikontinentální přepravu vodíku.

Methanol (CH₃OH): ~99 kg H₂/m³, TRL 9, tankery jako pro ropu, přímé spalování v lodních motorech. ★★★★★ Největší krátkodobý potenciál pro dekarbonizaci lodní dopravy.

Stlačený vodík (CGH₂): 14–32 kg/m³, TRL 9, 0 kg CO₂ při použití. Ekonomický pro krátké vzdálenosti. ★★★★★ Nejlepší pro lokální distribuci a vodíkové čerpací stanice.

Kapalný vodík (LH₂): 70,8 kg/m³, TRL 9 pro trailery, 0 kg CO₂ při přímém použití. Zkapalnění stojí 30–40 % energie. ★★☆☆☆ Potenciálně vhodný pro dálkový import čistého vodíku.

Toluen / LOHC: 47 kg H₂/m³, TRL 8–9 pro přepravu, stávající cisterny. Účinnost 30–45 %. ★★☆☆☆ Vhodný pro sezónní skladování a středně vzdálené trasy.

Metan / CNG: TRL 9, plně kompatibilní se stávající plynovodní sítí. Zpětná konverze produkuje CO₂. ★★☆☆☆ Přechodové řešení pro sezónní akumulaci energie.

Blending (H₂ v ZP): TRL 8–9, nízké investice do infrastruktury. Emisní úspora jen 7 % při 20 % objemu H₂. ★★☆☆☆ Pouze přechodové řešení – neplnohodnotná náhrada.

Metalhydridy: TRL 7–9, nejbezpečnější forma, nulový samovolný únik. Těžké systémy. ★★☆☆☆ Pro specializované průmyslové zásobníky a speciální mobilitu.

Ethanol (C₂H₅OH): TRL 9 pro přepravu, jako přímé biopalivo perspektivní. ★☆☆☆☆ Jako nosič vodíku nepříliš perspektivní Účinnost řetězce 20–44 %; jako biopalivo pro letectví zajímavý.

11.2 Co to znamená pro budoucnost?

Žádný vodíkový nosič není dokonalou náhradou ropy či zemního plynu. Každý přináší jiné kompromisy: bezpečnost vs. hustota, účinnost vs. náklady, emise vs. jednoduchost logistiky. Budoucnost energetiky proto nebude jen vodík ani jen elektřina – bude různorodá a každý nosič najde své optimální místo:

- Amoniak a methanol – mezikontinentální lodní přeprava čistého vodíku ze zemí s vysokým potenciálem OZE.
- Kapalný vodík – velkokapacitní import do evropských přístavů v případě požadavku velmi čistého vodíku pro odběratele.
- Stlačený vodík – zásobování čerpacích stanic a průmyslu na kratší vzdálenosti.
- LOHC – sezónní skladování přebytků solární a větrné energie.
- Metan / CNG – přechodové řešení využívající stávající plynárenskou síť.
- Metalhydridy – bezpečné zásobníky v průmyslu a speciálních vozidlech.

Klíčem ke všem těmto řešením je čistý vodík – vyrobený elektrolýzou z obnovitelné či jaderné elektřiny. Bez něj jsou všechny nosiče jen jiným způsobem, jak přepravovat uhlík. S ním se otvírá cesta k energetice bez fosilních emisí.

 **Věděl jsi, že...?** Kdybychom pokryli solárními panely plochu 600 × 600 km v Saharské poušti, vyrobili bychom dost elektřiny pro celou dnešní světovou spotřebu energie? Největším problémem je ale skladování energie do doby, kdy jí můžeme využít. Vodíkové nosiče – amoniak, methanol, kapalný vodík – jsou mostem, který by tuto saharskou elektřinu potenciálně dopravil do Evropy, Japonska nebo Brazílie. Zásadním problémem je ale ekonomika. Nosiče vodíku patrně nikdy nebudou schopny plně konkurovat fosilním palivům. I proto v Evropě existují systémy zpoplatnění CO₂, které cenu za vypouštění CO₂ dorovnávají.