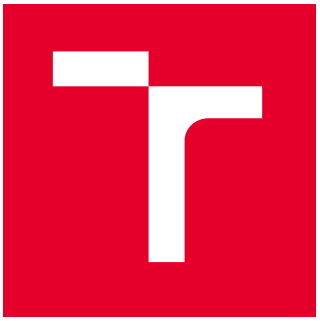



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING


# VÝROBA VODÍKU Z ODPADŮ A JEHO DOPRAVA

WASTE-BASED HYDROGEN PRODUCTION AND ITS TRANSPORTATION

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS


**AUTOR PRÁCE** — **Bc. Sebastian Ženatý**

AUTHOR

**VEDOUCÍ PRÁCE** — **doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.**

SUPERVISOR



**BRNO 2023**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

# Zadání diplomové práce

| | |
|---|---|
| Ústav: | Ústav procesního inženýrství |
| Student: | **Bc. Sebastian Ženatý** |
| Studijní program: | Procesní inženýrství |
| Studijní obor: | bez specializace |
| Vedoucí práce: | **doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.** |
| Akademický rok: | 2023/24 |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Výroba vodíku z odpadů a jeho doprava

**Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Výroba a využití vodíku v dopravě a průmyslu je považováno za jeden ze dvou pilířů strategie pro klimaticky neutrální Evropu. Je diskutována celá řada zdrojů vodíku – výroba parním reformingem zemního plynu s a nebo bez ukládání vznikajícího CO2 (šedý, resp. modrý vodík), výroba zplyňováním uhlí a v neposlední řadě výroba z obnovitelných zdrojů.
Bez ohledu na zdroj vodíků bude jeho vyšší využití v budoucnu vyžadovat změnu současné infrastruktury a logistiky. Práce je kombinací rešerše a vlastních výpočtů založených na modifkovaných technicko–ekonomických modelech dopravních systémů. Úvodní rešerše má poskytnout přehled o současném stavu poznání dané problematiky. Z širokého spektra dílčích témat budou pro detailnější zhodnocení vybrána oblast výroby vodíku z odpadů se zaměřením na komunální odpady. Odpady jako prostorově distribuovaný zdroj vodíku mohou vyžadovat specifický způsob transportu energetického nosiče k zákazníkům.

**Cíle diplomové práce:**

– Seznámit se s problematikou výroby vodíku z odpadů a vypracovat přehled perspektivních kombinací odpad – technologie pro získávání vodíků
– Vypracovat přehled projektů a iniciativ, které se problematice využití a dopravy vodíku věnují (mezinárodní a národní kontext)
– Popsat a analyzovat možné způsoby dopravy vodíku od producentů k zákazníkům
– Řešení modelové případové studie v oblasti dopravy vodíku. na základě modifikace existujících modelů

**Seznam doporučené literatury:**

European Commision. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. COM(2020) 301 final. Brusel, 2020. dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301

HOWARTH R. W., JACOBSON M. Z.. How green is blue hydrogen? Energy Science& Engineering, 12.10.2021, doi.org/10.1002/ese3.956

KAMEŠ J.. Vodík - alternativní palivo. Nakladatelství ČVUT, Praha, 2008, ISBN 978-80-254-1686-

GREGOR J.. Pokročilé modely logistiky v oblasti odpadového hospodářství [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/139107. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Petr Stehlík.

International Energy Agency, Global Hydrogen Review 2021, říjen 2021, dostupné z: "https://iea.blob.core.windows.net/assets/3a2ed84c-9ea0-458c-9421-d166a9510bc0/GlobalHydrogenReview2021.pdf"

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

| | |
|---|---|
| prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.<br>ředitel ústavu | doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.<br>děkan fakulty |

# Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou vodíkového hospodářství, které zahrnuje oblasti výroby vodíku z odpadů a pozemní dopravy vodíku, s důrazem na silniční a potrubní přepravu. Práce se zaměřuje na představení teoretických znalostí v těchto oblastech a provádí ekonomickou analýzu dopravy vodíku na konkrétním provozu a v širším kontextu České republiky.



# Klíčová slova

Výroba vodíku z odpadu, transport vodíku, návěsy pro transport vodíku, potrubní síť vodíku



# Abstract

This master's thesis addresses the issues of the hydrogen economy, encompassing the areas of hydrogen production from waste and terrestrial hydrogen transport, focusing on road and pipeline transportation. The thesis aims not only to present theoretical knowledge in these domains but also to conduct an economic analysis of hydrogen transportation at a specific operation and in the broader context of the Czech Republic.



# Keywords

waste-based hydrogen production, hydrogen transport, trailers for hydrogen transport, hydrogen pipeline network

## Bibliografická citace

ŽENATÝ, Sebastian. Výroba vodíku z odpadů a jeho doprava. Brno, 2024. Dostupné také z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/154099. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Martin Pavlas.

# Prohlášení o původnosti

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Výroba vodíku z odpadů a jeho doprava“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Martina Pavlase Ph.D. a v seznamu literatury jsem uvedl všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 4. 9. 2023

_____

Bc. Sebastian Ženatý

# Poděkování

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Martinu Pavlasovi Ph.D. a Ing. Davidu Poulovi za odborné rady a jejich ochotu při vypracování této diplomové práce. Poděkování patří i rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu podporovali.

# Obsah

**1 ÚVOD ..... 1**
**2 VODÍK – VLASTNOSTI, VÝROBA A VYUŽITÍ ..... 3**
2.1 Chemicko-fyzikální vlastnosti vodíku ..... 3
2.2 Fiktivní rozdělení vodíku dle barvy ..... 6
2.3 Technologie výroby vodíku ..... 8
2.3.1 Elektrolýza ..... 8
2.3.2 Parní reforming zemního plynu ..... 11
2.3.3 Další metody ..... 12
2.3.4 Situace v České republice ..... 14
2.4 Skladování ..... 19
2.4.1 Stlačený vodík ..... 19
2.4.2 Zkapalněný vodík ..... 21
2.4.3 Vodík v pevném skupenství ..... 22
2.5 Využití vodíku ..... 22
2.5.1 Vodík jako úložiště energie ..... 22
2.5.2 Vodíková mobilita ..... 24
2.5.3 V průmyslu ..... 25
2.5.4 Situace v České republice ..... 26
**3 STRATEGIE A LEGISLATIVA SPOJENÁ S VODÍKEM ..... 27**
3.1 Vodíková strategie Evropské unie (NECP) ..... 27
3.2 Vodíková strategie ČR ..... 27
3.3 Legislativa ČR ..... 27
3.4 Normy ČR ..... 27
**4 PRODUKCE A NAKLÁDÁNÍ S ODPADEM V ČR ..... 29**
4.1 Produkce ..... 29
4.2 Nakládání ..... 31
**5 VÝROBA VODÍKU Z ODPADU ..... 33**
5.1 Výroba z komunálního odpadu ..... 33
5.1.1 Plazmatická gasifikace ..... 33
5.1.2 Pyrolýza ..... 35
5.2 Výroba z bioodpadu ..... 36
**6 DOPRAVA VODÍKU ..... 37**
6.1 Potrubní síť ..... 38

6.1.1 Využití odstaveného potrubí na zemní plyn ... 39
6.1.2 Přimíchávání do zemního plynu ... 41
6.1.3 Vodíkovod ... 42
6.2 Silniční doprava ... 43
6.2.1 Tlakové nádoby v klecové konstrukci ... 46
6.2.2 Návěs s doutníkovými nádobami ... 47
6.2.3 Cisterny ... 48
**7 TECHNICKO-EKONOMICKÝ MODEL ... 50**
7.1 Popis principů T-E modelu a jeho vstupy ... 50
7.1.1 Infrastruktura ... 50
7.1.2 Dopravní systém ... 51
7.1.3 Časový průběh ... 53
7.1.4 Náklady ... 54
7.2 Výstupní data ... 55
**8 PŘÍPADOVÁ STUDIE ... 58**
8.1 Aplikace modelu pro vybraný provoz ... 58
8.1.1 Stanovení spotřeby vodíku ... 59
8.1.2 Logistika vodíku ... 59
8.1.3 Analýza výsledků modelování ... 63
8.2 Aplikace modelu pro celostátní perspektivu: Česká republika ... 66
8.2.1 Logistické uzly ... 67
8.2.2 Analýza distribučních nákladů ... 68
**9 ZÁVĚR ... 72**
**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ ... 75**
**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ ... 85**

# 1 Úvod

V současné době se celosvětová společnost aktivně snaží opustit od fosilní zdroje energie. Tento trend přináší zvýšený zájem i o vodíkové technologie a v oblasti vodíkového hospodářství probíhá mnoho výzkumů. Navzdory tomu, že plynný vodík má za sebou mnoho let využití lidskou společností, stále je v tomto odvětví prostor pro další zkoumání. Jednou z těchto nových výzev je doprava vodíku na delší vzdálenosti, která je jedním z témat této diplomové práce. Druhým zpracovávaným tématem práce je výroba vodíku z odpadu. Technologický směr, který výhodně spojuje nutnou ekologickou likvidaci odpadu se současným získáváním významného paliva.

Historicky byl vodík v České republice (ČR) především používán v chemickém a petrochemickém průmyslu. Závody, které potřebují vodík pro své procesy, mají často jednotku na výrobu vodíku umístěnou přímo v areálu a vodík je dopravován na místo spotřeby prostřednictvím vnitroareálových plynovodů. V posledních letech začíná vodík hrát významnou roli i v jiných odvětvích, což vede k potřebě dopravy vodíku za hranice areálu výroby. Místa jeho spotřeby již nemusí být centralizovaná. Významným příkladem je rostoucí sektor vodíkové mobility. S narůstajícím počtem čerpacích stanic pro vodík je a bude nezbytné zásobovat tyto stanice vodíkem z centrálních míst jeho výroby a skladování.

Zájem o vodíkové technologie významně vzrostl zejména v souvislosti s ekologickými obavami a snahou o omezení emisí skleníkových plynů. Elektrolýza, která slouží k výrobě vodíku a je napájena energií z obnovitelných zdrojů, jako jsou solární nebo větrné elektrárny, umožňuje získávání nízkoemisního zdroje energie. Tato energie může být uchována ve formě vodíku a následně přeměněna zpět na elektřinu, nebo může vodík najít jiné využití. V diplomové práci je elektrolýza popisována zejména z důvodu aktuální tendence prosazování a podpory této technologie výroby. Je zde uvedena jako alternativní způsob výroby vodíku k výrobě vodíku z odpadu.

Samotná struktura této práce je promyšleně uspořádána tak, aby reflektovala její obsah a cíle. Rozsáhlejší úvodní část se v kapitolách 2 a 3 zabývá rešerší spojenou s vodíkem jako plynem a vodíkovým hospodářstvím, jeho výrobou, možnostmi využití a obecným legislativním rámcem. Nejprve jsou představeny hlavní vlastnosti a specifika vodíku, jejichž znalost je v mnoha ohledech zásadní pro pochopení dalších částí práce. Následně jsou rozebrány zdroje a možnosti využití vodíku nejen v současné době, ale i v budoucnosti, a to zejména v lokalitě České republiky. Přičemž základním zdrojem informací pro tuto pasáž byl dokument *Vodíková strategie České republiky* [1]. Jelikož vodíkové hospodářství je stále na vzestupu, existuje mnoho strategických plánů a projektů, z nichž některé jsou zatím jen v plánovací fázi, a jejich realizace se ale dočkáme jistě v blízké budoucnosti. V rámci této práce jsou proto mnohdy představeny možné budoucí scénáře, které se zakládají na předpokládaném vývoji vodíkového odvětví. Tyto úvahy o budoucnosti vodíkového hospodářství, které vycházejí převážně z různých strategických plánů, jsou následně i zahrnuty do případové studie.

V kapitole 4 je obecně rozebrána produkce odpadů a nakládání s nimi v České republice. Následně se práce v kapitole 5 zabývá dalším rešeršním cílem a podává náhled na technologické možnosti a procesy výroby vodíku z odpadu a stanovuje

mezní požadavky na vstupní surovinu. Informace pro rešerši o výrobě vodíku z odpadu byly čerpány převážně z článků, zejména od nositelů technologického řešení daných technologií. Tento zdroj informací je obdobný i pro závěrečnou a stěžejní pasáž rešerše, kapitolu 6, jež představuje vnitrozemní možnosti transportu vodíku, konkrétně pak dopravu plynovodem a silniční dopravu.

V druhé části diplomové práce je již upuštěno od rešeršního výzkumu a znalosti popsané v předchozích kapitolách jsou využity v případové studii ekonomického vyhodnocení silniční dopravy vodíku. Pro potřeby případové studii byl využitý matematický model vyvinutý v Ústavu procesního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Informace k tomuto modelu byly čerpány z pojednání dizertační práce Ing. Davida Poula [2] a navazující rozpracované dizertační práce.

Autor této práce působí již několik let v oboru jako projektant-technolog a v praxi se zabývá provozy specializujícími se mimo jiné i na výrobu vodíku. Díky tomuto zaměření je schopen již čerpat kromě externích zdrojů i ze svých praktických zkušeností a aplikovat je v rámci této diplomové práce. Tím je dosaženo účinného propojení jeho teoretických poznatků s reálnými aspekty vodíkového hospodářství. I z tohoto důvodu může představit strukturu práce, která zajišťuje postupné prohloubení znalostí a pochopení komplexní problematiky vodíku, jeho výroby, využití a zejména dopravy. Vše se pak organicky spojuje v konkrétní aplikaci - závěrečné případové studii.

# 2 Vodík – vlastnosti, výroba a využití

## 2.1 Chemicko-fyzikální vlastnosti vodíku

Vodík je prvek, který se na Zemi objevuje v anorganických i organických sloučeninách. Tvoří sloučeniny s téměř všemi prvky periodické soustavy, zejména pak s uhlíkem a kyslíkem. Vodík umožňuje tvořit speciální typ chemické vazby, tzn. vodíkový můstek. Tam dochází k mezimolekulárnímu spojení, i když spolu nejsou molekuly spojeny klasickou vazbou, tedy nesdílejí valenční elektronový pár, jedná se o sdílení vodíkových atomů. Tento specifický typ vazby se vyskytuje např. u vody, díky čemuž má voda některé anomální fyzikální vlastnosti, např. má největší hustotu při 4 °C. [3]

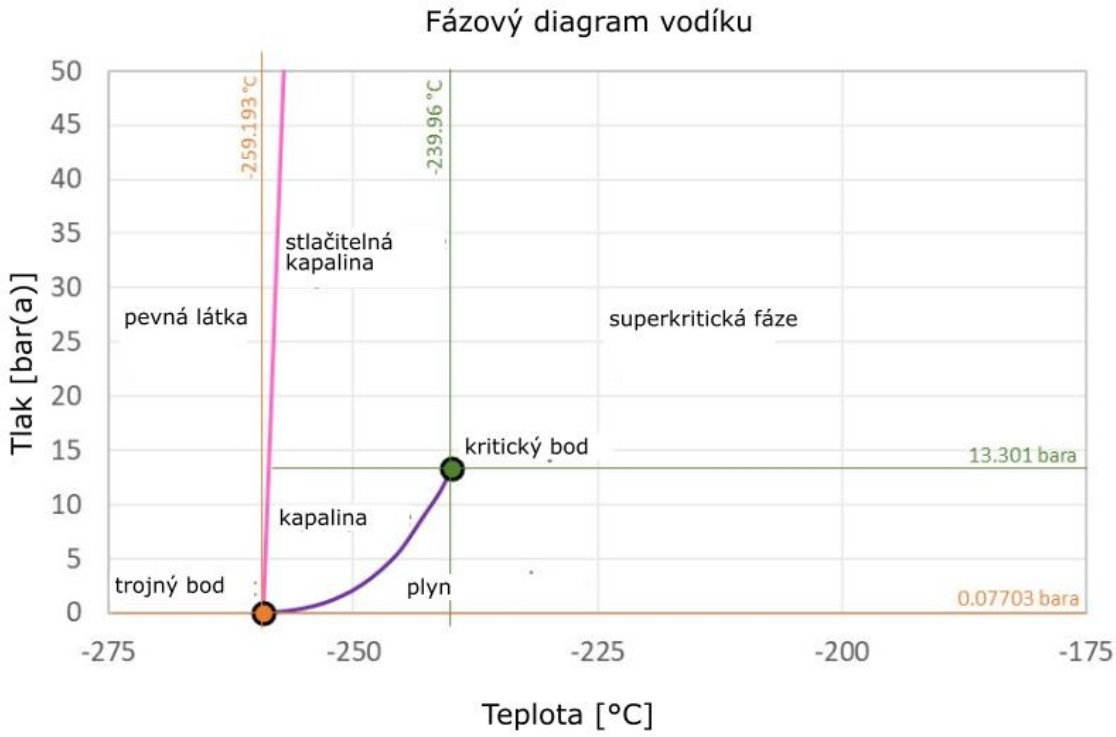
Prvek vodík má velmi malou rozpustnost ve vodě, 1,6 mg/l, oproti tomu má vodík zvláštní schopnost rozpouštět se v některých kovech. Jelikož se jedná o velice malou molekulu, tak jsou tyto vodíkové molekuly schopné procházet krystalovou mřížkou kovů. Tento proces způsobuje tzn. vodíkovou korozi a vodíkovou křehkost, jež je nebezpečná a může propuknout při používání klasických ocelových materiálů ve vodíkových technologiích. Vodíková křehkost nastává od nízkých po vysoké teploty, jedná se o děj, při kterém do krystalové mřížky kovů pronikají atomy vodíku a následně se zde ukládají. Ukládání může mít pro materiál negativní účinky jako je zhoršení jeho mechanických vlastností (meze kluzu, meze pevnosti), ale může i zapříčinit iniciaci trhlin v materiálu, které mohou vést až k jeho nevratné deformaci. V případě difundace vodíku do kovové mřížky za zvýšené teploty může současně docházet i k vodíkové korozi, což je stav, při kterém vodík reaguje s jinými prvky. Např. u ocelí dochází k oduhličení ocelové struktury a vodík se zde slučuje s uhlíkem za vzniku metanu, který je následně uvnitř struktury nahromaděn a vytváří v ní zvýšené pnutí. [4]

Vodík je nekovový prvek vyskytující se v nejběžnější formě jako dvouatomární molekula ($H_2$). Za standardních podmínek, tj. při teplotě 0 °C a tlaku 101,325 kPa(a), se nachází tato molekula ve formě plynu. V této diplomové práci je termín "vodík" většinou využíván pro označení této plynné formy vodíku, pokud není v jednotlivých kapitolách nebo částech práce specifikováno jinak. Například existují části, které se zaměřují na vodík jako prvek, nebo na jeho kapalnou formu (zkapalněný vodík), ale to je dáno specifickým kontextem daných kapitol.

Tento plyn je bez barvy a bez zápachu. Z pohledu nebezpečnosti je plyn klasifikován jako extrémně hořlavá látka a ve směsi se vzduchem hrozí nebezpečí vzplanutí a výbuchu. Výbušná směs se vytváří v koncentraci 4-75 obj. % plynného vodíku se vzduchem. Proto je nutné technická zařízení před stykem s plynným vodíkem inertizovat, nejčastěji plynným dusíkem. Zároveň plynný vodík nesmí přijít do styku s oxidačními činidly (oxidační činidlo je látka schopná přijímat elektrony od jiných látek, tyto reakce bývají často vysoce termické) a při výrobě, čerpání a dopravě je nutno se vyvarovat přítomnosti plamenů a jisker. Technologická zařízení určená pro hospodaření s vodíkem musí být způsobilá pro použití ve výbušném prostředí a splňovat podmínky směrnice Evropské unie ATEX 94/9/ES pro zařízení určená k použití v prostředí s nebezpečím výbuchu. Zařízení s potřebnou certifikací musí být opatřena značkou uvedenou níže, Obr. 1. Součástí označení je i systém písmen a číslic specifikující prostředí. Pro vodíkové prostředí se bude jednat o skupinu výbušnosti IIC, rozdělující plyny dle míry nebezpečí výbuchu, s teplotní třídou T1, což znamená že vodík má teplotu samovznícení větší než 450 °C (vodík má 560°C). [5]

*Obr. 1 Označení zařízení do určená do prostorů s nebezpečím výbuchu [6]*

Z fyzikálních vlastností je pro potřeby této diplomové práce nutné zmínit i teplotu varu vodíku – 252,9 °C, při atmosférickém tlaku. Tato teplota je společně s kritickou teplotou -240 °C velmi důležitá při uvažování nakládání s vodíkem v kapalném stavu. [5] Teplota varu se se změnou tlaku také mění, její závislost je uvedena na Obr. 2.




*Obr. 2 Fázový diagram vodíku [7]*

Pro tepelné bilance je důležitá hodnota měrné tepelné kapacity, která je 14 310 J/(K*kg) (při 25 °C a atmosférickém tlaku). Při stejných podmínkách je hodnota dynamické viskozity 0,009 cP, tato hodnota je důležitá zejména pro výpočty potrubní dopravy. [7] Pro získání těchto údajů existuje na internetu mnoho odborných databází a výpočetních nástrojů, jednou z hojně používaných je *www.engineeringtoolbox.com* [8]. Alternativním řešením je získání těchto veličin z tištěných materiálů, v oboru hojně používaná v praxi je např. *Perry's chemical engineers' handbook* [3], ze které bylo v rámci této práce také čerpáno.

V periodické soustavě prvků se vodík nachází na první pozici, vlevo nahoře, což označuje fakt, že se jedná o nejlehčí prvek v celé soustavě s relativní atomovou hmotností 1,0079 g/mol a molekulovou hmotností 2,0158 g/mol. [3] Kvůli své malé hustotě se vodík velmi často v technologiích stlačuje na vysokou tlakovou úroveň v rozsahu 1-700 bar(g). Následující Tab. 1 ukazuje, jak se mění hustota plynného

vodíku při 20°C se vzrůstajícím tlakem pro vybrané tlakové úrovně a jaké množství vodíku je při dané tlakové úrovni (vybráno dle užití v praxi) možné uchovat v 50 l tlakové lahvi. Hodnoty hustoty byly získány z online výpočetního nástroje *www.cmb.tech/hydrogen-tools* [9].

*Tab. 1 Hustota plynného vodíku při vybraných tlakových úrovních [9]*

| Tlak vodíku (bar(g)) | Hustota (kg/m3) | Hmotnost vodíku v 50 l lahvi (kg) |
|---|---|---|
| 0 | 0,083 | 0,004 |
| 10 | 0,823 | 0,041 |
| 50 | 4,020 | 0,201 |
| 200 | 14,506 | 0,725 |
| 350 | 23,696 | 1,185 |
| 500 | 31,242 | 1,562 |
| 700 | 38,730 | 1,937 |

Vodík je palivo a energetický nosič s velmi vysokou energetickou hustotou, protože v přepočtu na hmotnost dokáže vodík uvolnit velké množství energie až 120 MJ/kg, neboli 33,3 kWh/kg. [10] Nicméně objemová energetická hustota vodíku kvůli jeho výše popsané malé hustotě je v porovnání s ostatními plyny nízká, pouze 10,8 MJ/m$N^3$, neboli 3 kWh/m$N^3$. Pro srovnání Tab. 2 níže uvádí energetické hustoty základních plynů a kapalných i tuhých paliv.

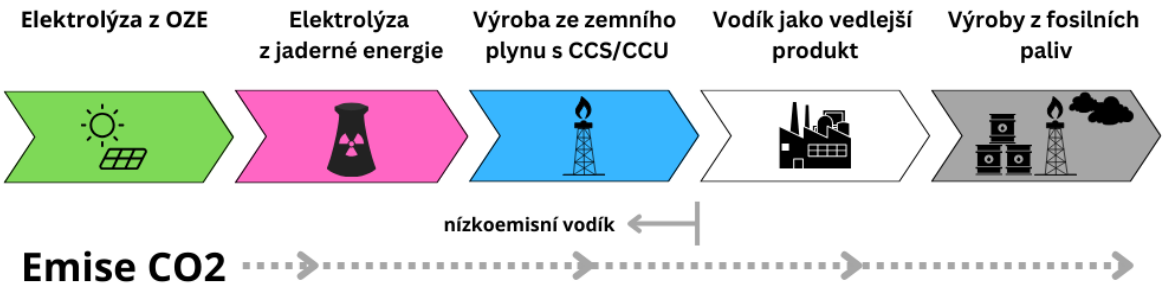
*Tab. 2 Energetická hustota vybraných paliv [10] [3]*

| Palivo | Skupenství | Energetická hustota (MJ/kg) | Energetická hustota (kWh/kg) | Objemová energetická hustota ($MJ/m^3$) | Objemová energetická hustota ($kWh/m^3$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Vodík* | Plyn | 120,0 | 33,3 | 10,8 | 3,0 |
| Vodík 200 bar | Plyn | 120,0 | 33,3 | 1 741,0 | 483,6 |
| Vodík 350 bar | Plyn | 120,0 | 33,3 | 2 844,0 | 790,0 |
| Vodík 700 bar | Plyn | 120,0 | 33,3 | 4 647,0 | 1 290,8 |
| Methan* | Plyn | 50,0 | 13,9 | 35,8 | 9,94 |
| Zemní plyn (US)* | Plyn | 47,1 | 13,1 | 36,6 | 10,16 |
| Diesel* | Kapalina | 42,6 | 11,83 | 36 000 | 10 000 |
| Benzín* | Kapalina | 43,4 | 12,06 | 32 000 | 8 889 |
| Topný olej* | Kapalina | 42,8 | 11,89 | 36 000 | 10 000 |
| LPG* | Kapalina | 45,5 | 12,64 | 24 400 | 6 778 |
| Dřevěné uhlí | Pevná látka | 28,4 | 7,89 | - | - |

**uvedené hodnoty platí pro standardní podmínky (0 °C a 101,325 KPa(a))*

## 2.2 Fiktivní rozdělení vodíku dle barvy

V odborné literatuře je vodík uvažován v několika typem označených barvou pro odlišení. Druhů vodíku existuje několik a přesné číslo nelze stanovit bez pochybností, jelikož každý zdroj udává jiný počet, Obr. 3. představuje 5 nejběžnějších druhů, odlišná literatura však může uvádět odlišené počty a i parametry zařazení. Tyto jednotlivé typy vodíku se liší zejména v technologii výroby a vstupních médiích. S tímto dělením je často spojován odlišný dopad na životní prostředí ve spojitosti s produkcí $CO_2$, ovšem zatím nebyla stanovena závazná direktiva s přesným určením produkce $CO_2$. [11]




*Obr. 3 Barevné rozdělení plynného vodíku dle metody výroby*

V literatuře je často zmiňován nízkoemisní vodík, kterým se rozumí takový vodík při jehož výrobě je vyprodukováno maximálně 4,368 kg $CO_2$/kg $H_2$. Tato hodnota je stanovena na základě 40 % emisní stopy při výrobě vodíku ze zemního plynu bez technologie zachytávající produkovaný $CO_2$. Primárně vodíkové strategie cílí na tento typ vodíku, jelikož jeho využití přispívá ke snižování produkce $CO_2$. Do kategorie nízkouhlíkový vodík spadají zelený, růžový a modrý vodík, jejichž hlavní parametry jsou popsány níže, zároveň je do této kategorie zařazován i vodík vyrobený pyrolýzním rozkladem a plazmovým zplyňováním odpadu. [1]

Zelený se vyrábí rozkladem vody na vodík a kyslík v elektrolyzérech. Pro možnost označení zeleného vodíku musí pocházet elektřina spotřebovaná na výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů energie, tzn. hlavně ze solárních, větrných a vodních elektráren. Může se však jednat i o výrobu z bioplynu a biomasy při zvolení vhodné technologie pro udržitelnost. V rámci strategických cílů je pozornost zaměřena zejména na tento typ výroby vodíku pro jeho kategorizaci jako nízkoemisní. Při vyhodnocení celého řetězce není však možné označovat zelný vodík za bezemisní, jelikož je nutné uvažovat určitou uhlíkovou stopu při výrobě, údržbě a likvidaci solární panelů nebo větrných elektráren, stejně jako tomu je u jiných zdrojů. [1]

Pokud je jako zdroj energie určený pro výrobu vodíku jiný, např. při výrobě elektrického proudu v jaderné elektrárně, neřadí se již vodík do zeleného označení. Může být však stále nízkoemisní a v literatuře je často označován jako růžový vodík. Je velmi obtížné, až nemožné dosáhnout elektrické energie pouze z jaderné elektrárny, jelikož ty jsou napojené na energetickou soustavu kde je více zdrojů, jako je tomu i v rámci České republiky. Vodík vyráběný z elektrické energie odebírané ze sítě je pak zatížen ekologickou zátěží daného palivového mixu. Pro účely srovnání je v České republice emise vyráběného vodíku pomocí elektrolyzéru poháněného elektrickým proudem ze sítě (tento vodík je kategorizován jako šedý) 21,12 kg $CO_2$/kg $H_2$, což je více než čtyřnásobek hodnoty stanovené pro kategorizace jako nízkouhlíkový vodík. [1]

Modrý vodík se vyrábí metodou parního reformingu zemního plynu přičemž vznikající $CO_2$ je zachytáván a ukládán, nejčastěji pod zem. Tato metoda se označuje anglickým pojem a zkratkou Carbon Capture and Storage (CCS), existuje i metadoa Carbon Capture and Utilization (CCU), která produkovaný $CO_2$ zachytává a následně zpracovává. U modrého vodíku je emise $CO_2$ 0,2 kg $CO_2$/kg $H_2$, závisí však na typu a účinnosti použité technologie CCS/CCU, proto se může uvedená hodnota lišit. [12]

Speciální a v literárních zdrojích málo uvažovaným typem je tzv. bílý vodík, který vzniká jako vedlejší produkt v průmyslové výrobě. Emisní náročnost $CO_2$ se velmi těžko určuje kvůli ne zcela definovanému rozsahu možných technologií.

Šedý vodík je vodík s největší uhlíkovou zátěží, která je od 11 kg $Co_2$/kg $H_2$ výše. Do této kategorie je řadí vodík vyráběný z fosilních paliv, např. z ropných zbytků, uhlí a zemního plynu bez technologie CCS/CCU. Z důvodu zatížení velkou uhlíkovou stopou není tento typ vodíku v budoucnosti z ekologického pohledu perspektivní. V některých případech bývá šedý vodík dále dělen na hnědý a černý, který je produkován z hnědého, černého uhlí a jeho emise dosahují přibližně 19 kg$CO_2$/kg$H_2$. [12] [1]

## 2.3 Technologie výroby vodíku

Vodík se může vyrábět velkým množství různých technologií a v současné době je cítit zřetelná podpora zdokonalení těchto technologií a výzkumu nových. V následující podkapitole se práce bude zabývat popisem technologií výroby vodíku, zejména s přihlédnutím na jejich současné a budoucí využití v České republice. Je zde při tom záměrně vynechána produkce vodíku z odpadů, protože toto téma je jedním z cílů této práce a bude mu proto věnována celá samostatná kapitola.

### 2.3.1 Elektrolýza

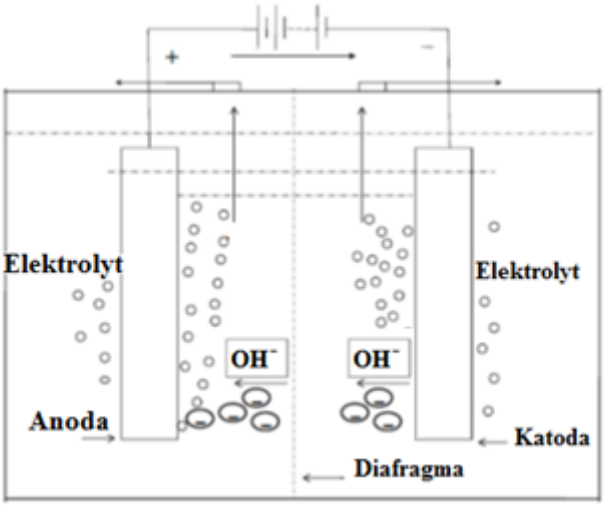
V současné době je v České republice a v Evropské Unii nejvíce podporovaná výroba vodíku právě touto metodou. Jedná se o poměrně dobře prozkoumanou technologii, ovšem i v ní existuje několik variant a typů, které se používají nově, ale i dlouhodobě. Ovšem u všech elektrolyzérů je základní princip jejich fungování stejný. Jedná se o štěpení chemické vazby v molekule vody pomocí stejnosměrného elektrického proudu. Tento děj je popsán v následující rovnici ( 1 ).

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \qquad (1)$$

Z pravidla je na katodě zachycen vodík a na anodě kyslík. Oba zachycené plyny jsou však ve směsi s druhým zmíněným plynem a navíc jsou součástí této směsi vodní páry. Z těchto důvodů je potřeba další úprava zachycených plynů pro zvýšení jejich čistoty a možnosti jejich použití.

Nejčastěji zmiňovanými a také svým výzkumem nejvíce pokročilými typy elektrolýzy jsou alkalická elektrolýza, PEM (Proton Exchange Membrane – protonově vodivá membrána) elektrolyzér a vysokoteplotní elektrolýza. Nejstarší známou a nejlevnější, a tedy i nejčastěji navrhovanou technologií je alkalická elektrolýza, Obr. 4. [13] Tato technologie se skládá z niklové anody a ocelové katody, které jsou oddělené anorganickou přepážkou dříve vyrobenou z azbestu, dnes z keramických a kompozitních materiálů. Jako elektrolyt je zde použit 20-30 % hydroxid draselný. Reakce v elektrolyzéru probíhá při teplotě okolo 80°C a je popsána následujícími rovnicemi a názorně vysvětlena obrázkem. Přičemž rovnice ( 2 ) probíhá na katodě a rovnice ( 3 ) na anodě. [14]

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \qquad (2)$$
$$2OH^- \rightarrow H_2O + O_2 + 2e^- \qquad (3)$$

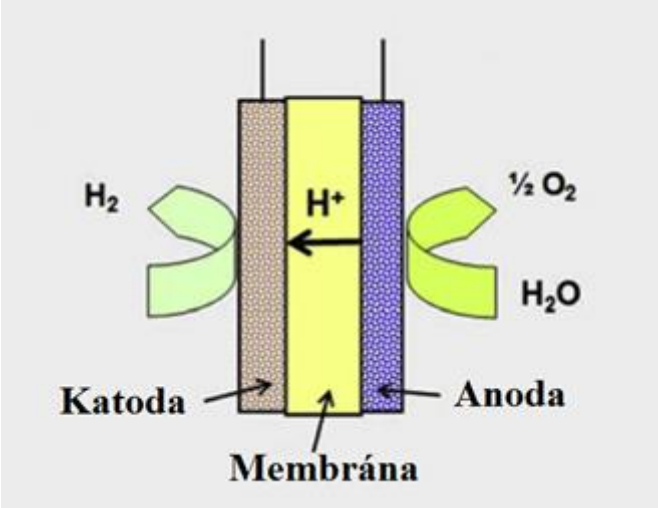



*Obr. 4 Schéma procesu alkalické elektrolýzy vody [14]*

Dalším typem jsou elektrolyzéry, které pracují za teplot 50 až 80 °C. Charakteristickým prvkem této metody je použití neporézní polymerní membrány, schopné propouštět pouze kladně nabité ionty, která odděluje prostor mezi anodou a katodou, jak je znázorněno na Obr. 5 níže včetně rovnic ( 4 ), ( 5 ) popisujících tento děj. [14]

$$\text{Anoda: } 2H_2O \rightarrow 4H^+ + O_2 + 4e^- \qquad (4)$$

$$\text{Katoda: } 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2 \qquad (5)$$




*Obr. 5 Schéma zero gap uspořádání PEM elektrolýzy vody [14]*

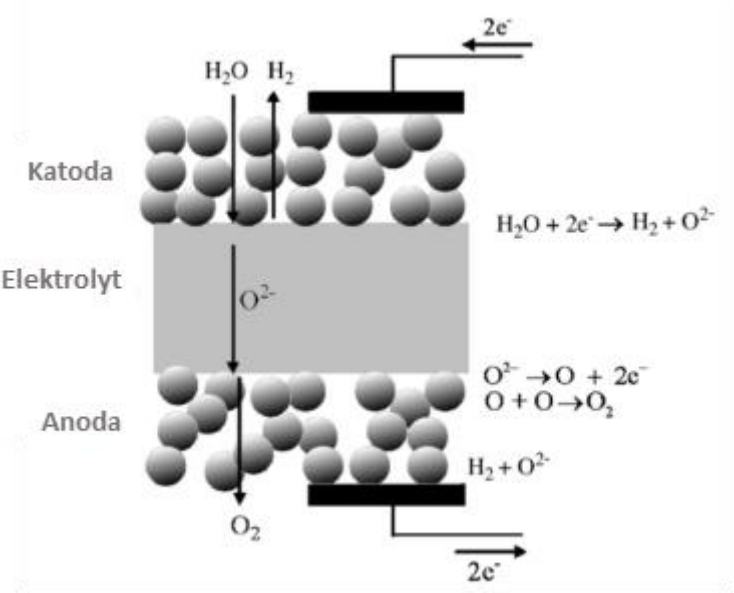
Materiál použitý na elektrody bývá nejčastěji platina, titan, iridium, nebo uhlík. Právě tyto vzácné prvky danou metodu zásadně prodražují. [15]

Posledním typem je metoda vysokoteplotní, jejímž charakteristickým rysem je provozní teplota okolo 800 °C a použití pevného elektrolytu, nejčastěji oxidu zirkoničitého. Materiál na obě elektrody je nejčastěji tvořený oxidem yttria ve sloučenině s niklem. Výhodou této technologie je využití energie ve formě tepla, které nahrazuje část elektrické energie, proto je vhodná pro instalaci k provozům s přebytkem vyrobeného

či odpadního tepla. Díky vysoké teplotě je navíc dosaženo i vyšší účinnosti. Daná metoda je popsaná na obrázcích a v rovnících ( 6 ), ( 7 ), Obr. 6. [14]

$$\text{Katoda: } 2H_2O + 4e^- \rightarrow 2H_2 + 2O^- \qquad (6)$$

$$\text{Anoda: } 2O^- \rightarrow O_2 + 4e^- \qquad (7)$$




*Obr. 6 Princip vysokoteplotní elektrolýzy vody [14]*

Důležitým srovnávacím aspektem různých typů výroby vodíku je energetická náročnost procesu. U elektrolýzy vody se uvažuje na 1 kg vyrobeného vodíku (1kg $H_2$=33,3 kWh) přibližně s 45-50 kWh spotřebované energie ve formě elektrické energie. [16] Tato hodnota určuje účinnost elektrolyzérů, kde u běžných typů (alkalická a PEM elektrolýza) se účinnost pohybuje v rozmezí 62 – 82 %. [17] Kvůli své nízké hustotě musí být vodík z důvodů ekonomického transportu po výrobě v elektrolyzéru stlačen na vyšší tlakovou úroveň, tzn. vzroste energetická náročnost kvůli zapojení kompresorů, a tím pádem se i sníží účinnost celého procesu. Toto energetické navýšení se odvíjí od cílené tlakové hladiny, na kterou je vodík stlačen. Pro názornost teoretické izotermické stlačení vodíku o tlaku 20 bar(g) (běžný výstupní tlak elektrolyzéru) na tlak 350 bar(g) (tlak běžný pro transport vodíku) je přibližně 1,05 kWh/kg $H_2$. Při uvažování reálného scénáře, který zahrnuje neefektivitu kompresoru a zahřívání při rychlém plnění se kompresní energie zvedá do rozmezí 1,7 až 6,4 kWh/kg$H_2$, záleží vždy na použité technologii a zejména na její účinnosti. [18]

Dopady na životní prostředí má výroba vodíku pomocí elektrolýzy dvojí. Prvním je spotřeba vody a druhým je uhlíková stopa. Na výrobu vodíku v elektrolyzéru je nutné použít demineralizovanou vodu, vyčištěnou od téměř všech minerálů. Takto vyčištěná voda může být přivedena do elektrolyzéru, kde je potřeba přibližně 10 kg vody na 1 kg vyprodukovaného vodíku. [19] Nicméně vodík může být v dalším procesu zpětně přeměněn na vodu, např. v palivových článcích. Uhlíková stopa vyrobeného vodíku záleží na typu použité elektrické energie/tepla.

## 2.3.2 Parní reforming zemního plynu

Nejrozšířenější a nejlevnější technologií výroby vodíku je parní reforming zemního plynu. Vstupní látkou do tohoto procesu je zemní plyn, respektive metan (CH4), a voda. Reakce probíhají při teplotách 700–1400 °C, záleží totiž na použitém katalyzátoru. Pokud je katalyzátor při chemické rekci přítomný, je teplota v rozmezí 700 –900 °C. Zemní plyn je přiveden do směšovače s vodní párou, která vzniká při rekuperaci tepla, když jsou vodou ochlazovány teplé spaliny. Následně je tato směs přivedena do reaktoru. Reakce pro svůj průběh potřebuje zvýšenou teplotu, viz výše, která je dodávána přímým spalováním zemního plynu a odpadního plynu z čistícího procesu dané technologie. Tyto podmínky umožní průběh následujících reakcí ( 8 ) –( 12 ):

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (8)$$

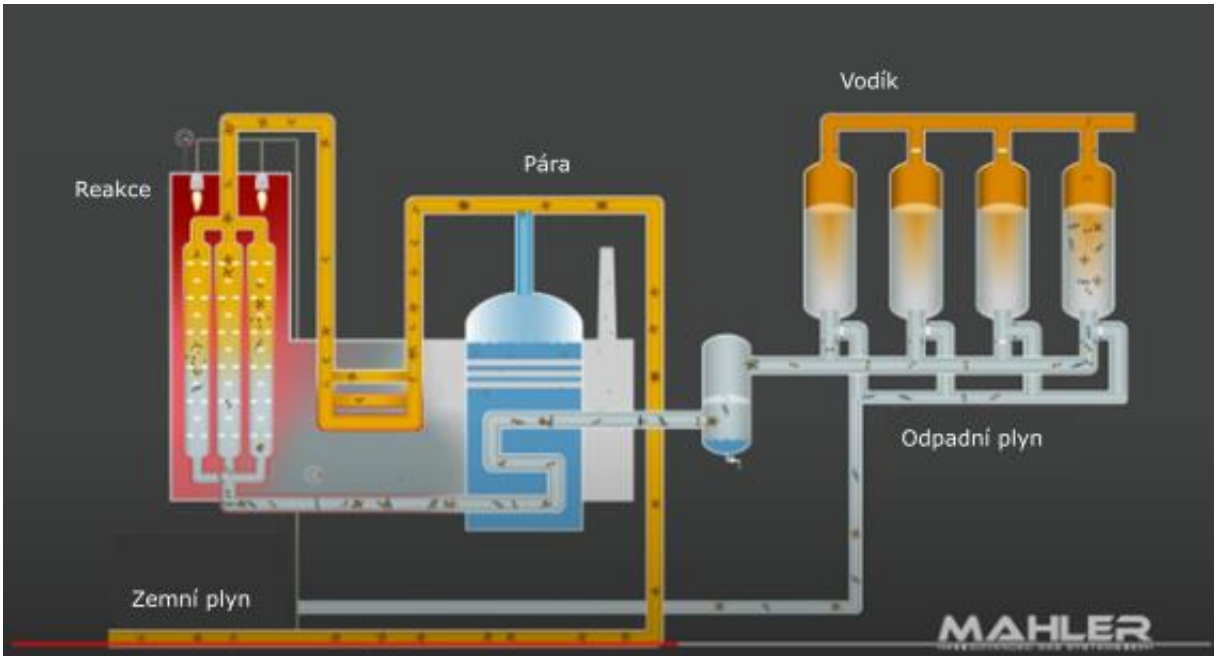
$$CH_4 + H_2O(g) \rightarrow CO + 3H_2 \quad (9)$$

$$CH_4 + 2H_2O(g) \rightarrow CO_2 + 4H_2 \quad (10)$$

$$CO + H_2O(g) \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (11)$$

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O \quad (12)$$

V první fázi je produktem směsi vodní pára/voda a metan směs oxidu uhličitého a vodíku. Navýšení produkovaného vodíku vznikne reakcí oxidu uhličitého s další přidanou vodní párou, při této reakci vzniká vodík a oxid uhelnatý. Množství produkovaného vodíku je pak závislé zejména na poměru množství dodávané páry a obsahu uhlíku ve směsi. [20] Celý tento proces je znázorněn na Obr. 7.




*Obr. 7 Schéma parního reformingu zemního plynu [21]*

Energetická náročnost procesu se dle zdrojů uvádí přibližně na 5–13,6 kWh/kg vyrobeného vodíku. Tato energie je dodávána ve formě tepla. [22] Z pohledu energetické náročnosti tedy vyplývá, že parní reforming je výhodnější než elektrolýza, ovšem je nutné zdůraznit, že toto hodnocení je pouze z hlediska energetické

náročnosti bez přihlédnutí k dalším srovnávacím znakům, jako jsou např. dopady na životní prostředí.

Výsledným produktem je směs vodíku, oxidu uhličitého a oxidu uhelnatého. Zvláštní pozornost poutá vysoká produkce zejména oxidu uhličitého, kdy na 1 kg vyprodukovaného vodíku spadá přibližně 7,05 kg $CO_2$. [20] Z tohoto důvodu a z důvodu potřeby dodávat vodík ve vysoké čistotě je nutné uvažovat na konci procesu ještě s procesem čištění plynů. Tato část procesu je velmi zásadní pro posuzování vyrobeného vodíku, jeho barvy a tedy dopadu na životní prostředí. Nakládání s produkovaným $CO_2$ má několik možností, od neekologického vypouštění rovnou do ovzduší až po tzn. metody CCS (Carbon Capture and Storage ) a CCU (Carbon Capture and USE). Jedná se o technologie zachycení $CO_2$ přímo v provozu a jeho uskladnění, případně využití jako suroviny pro jiný proces. [23]

### 2.3.3 Další metody

Další surovinou vhodnou pro výrobu vodíku jsou těžké uhlovodíkové frakce, mazut, či uhlovodíkový zbytek po visbreakingu (tepelný proces, při kterém dochází k rozpadu dlouhých a těžkých řetězců uhlovodíků, čímž se sníží jejich viskozita). [24] Jedná se o částečnou oxidaci, proto se používá označení POX (partial oxidation). V závodě firmy Unipetrol v Litvínově je použitý jako základní materiál právě posledně jmenovaný a schématicky je tento proces zobrazen na Obr. 8. Jedná se o ropné zbytky, které vznikly ze zpracování ropy. Tento uhlovodíkový materiál je zaveden do reaktoru, kde je spalován za přítomnosti kyslíku a vody ve formě vodních par. V reaktoru probíhají níže uvedené reakce ( 13 ) –( 16 ). Jelikož se jedná o endotermické i exotermické reakce je teplota v reaktoru stabilní. Pro správný průběh reakce je tato teplota okolo 1300 °C při tlaku 3,5 MPa a poměru vstupních látek uhlovodíky : $O_2$ : $H_2O$ = 1 : 1 : 0,6. [16]

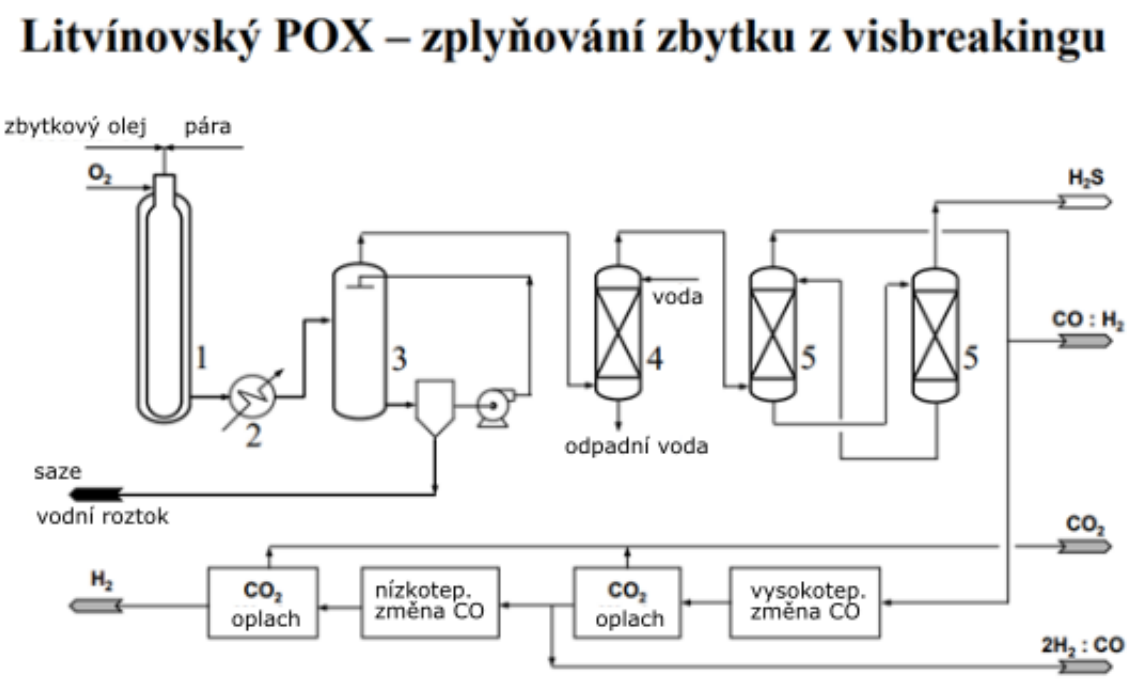
$$C_xH_y + O_2 + H_2O \rightarrow CO + H_2 + CO_2(H_2S, HCN) \quad (13)$$

$$C_xH_y \rightarrow C + C_mH_n \quad (14)$$

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (15)$$

$$C_mH_n + H_2O \rightarrow CO + H_2 \quad (16)$$

Produkovaný plyn musí projít následným několikakrokovým čištěním, kde je z něj odseparovaný čistý vodík a odpadními produkty jsou zejména oxid uhelnatý, oxid uhličitý a sulfan. Při tomto procesu je navíc produkována další odpadní látka, saze, které mohou být ale využity v jiném procesu. Zjednodušený proces parciální oxidace ukazuje obrázek níže: [25]

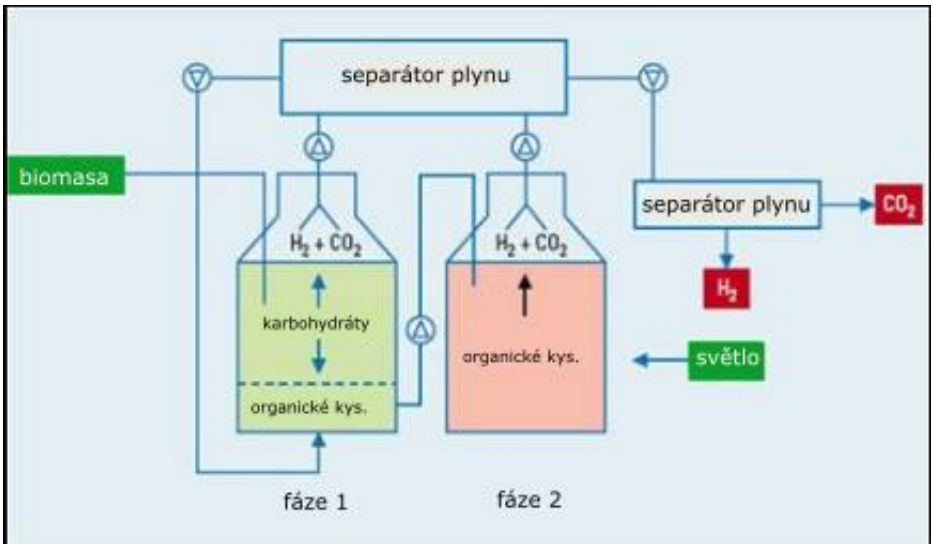



*Obr. 8 Schéma zplyňování zbytku po visbreakingu [16]*

Alternativou předešlých technologií výroby vodíku je zplyňování uhlí. Princip technologie je obdobný, jako u níže popsaného postupu zplyňování plastů. Vstupní surovinou je zde uhlí, nejlépe ve formě prášku, ke kterému je přidán kyslík a vodní pára. Uhelný prášek se spaluje za vysokých teplot, v rozmezí 600-1200 °C, ale může být i vyšší pro získání čistějšího syntézního plynu. Reakce zároveň probíhají za zvýšených tlaků okolo 2 MPa. V případě použití černého uhlí dochází k menší výtěžnosti vodíku, jelikož toto uhlí je vysoce prouhelněné. Uhlí obsahuje značné množství síry, proto je nutné vyprodukovaný plyn ještě dále vyčistit, zejména odsiřovacími procesy. [26]

Jednou z dalších technologií výroby vodíku je i biologická cesta. Při těchto typech technologie se využívá biologických procesů, při kterých je jeden z produktů vodík. Velkou výhodou těchto dějů je jejich malá energetická spotřeba, na druhou stranu ale v dnešní době neexistuje mnoho v praxi ověřených technologií. [27] Základní surovinou pro výrobu vodíku biotechnologickou cestou je biomasa, zejména zde najde uplatnění mokrá biomasa, jelikož v případě suché je z důvodu větší výtěžnosti a rychlosti procesu lepší využití jiné, termické technologie, popsané v dalších kapitolách. Základní popis technologie je představen na Obr. 9. Proces probíhá za nízkých teplot a tlaků a je katalyzován mikroorganismy ve vodním prostředí. V prvním kroku probíhá v reaktoru anaerobní proces vodíkové fermentace v nepřítomnosti světla. Rozkladem organického substrátu pomocí bakterií vzniká vodík a oxid uhličitý. Tyto plyny jsou z reaktoru odváděny do sběrače plynů. Vedlejším produktem je acetát, který je dále zpracován fotofermentací pro dosažení větší výtěžnosti vodíku. Při tomto anaerobním ději se využívá světlo, které napomáhá bakteriím rozložit zbylý acetát na směs vodíku

a oxidu uhličitého. Zbylý nerozložitelný materiál může být vysušen a spalován, a tím tento proces dosáhne vyšší energetické výtěžnosti.




*Obr. 9 Schéma bioprodukce vodíku pomocí dvoustupňové fermentace [28]*

Tento proces výroby vodíku je z pohledu ostatních technologií nízkokapacitní, a proto se v současné době o něm neuvažuje jako o významném zdroji vodíku. Na druhou stranu přináší výhody z pohledu zpracování odpadů (např. kaly z čističek odpadních vod). [28]

Tento výčet technologií rozhodně není kompletní, jelikož produkcí vodíku se zabývá několik výzkumných center už značnou řadu let a vzhledem k současným trendům zelené energie a energetické nezávislosti států se dá předpokládat, že tyto technologie se budou ještě více a rychleji zdokonalovat a budou vznikat i nějaké další.

### 2.3.4 Situace v České republice

Co se týká technologie a surovin, ze kterých je v České republice vodík vyráběn převažují jednoznačně fosilní paliva, jak je ukázáno na Tab. 3.

Jaké je celkové množství vyrobeného vodíku a jeho energetický obsah? Srovnat se spotřebou energie ve vybraných sektorech (doprava, energetika). Jak se dnes využívá?

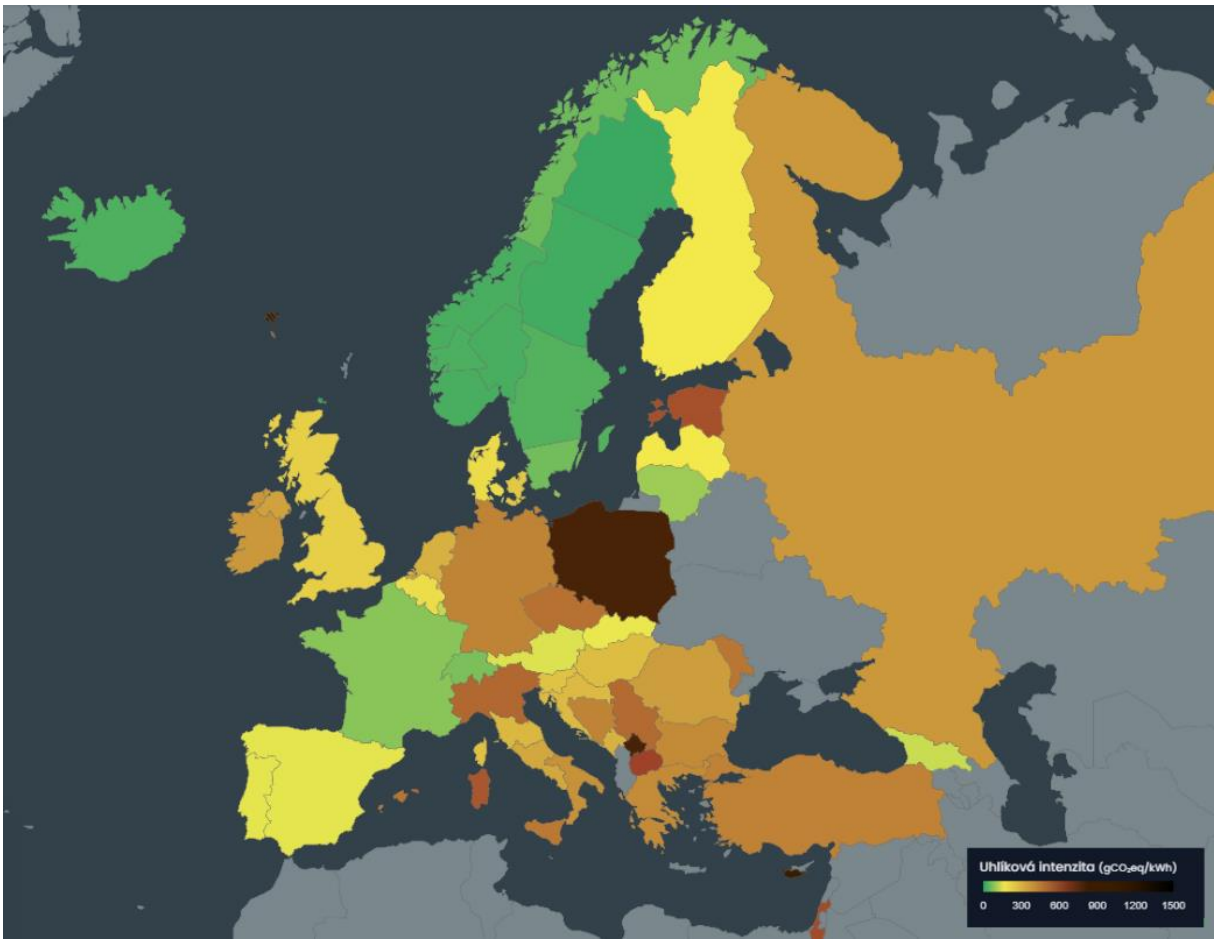
*Tab. 3 Podílové rozdělení produkce plynného vodíku dle typu základní suroviny v ČR [29]*

| Druh suroviny | Podíl vodíku vyrobeného procesem |
|---|---|
| Zemní plyn | 48 % |
| Uhlí | 18 % |
| Ropa | 30 % |
| Voda – elektrolýza | 4 % |

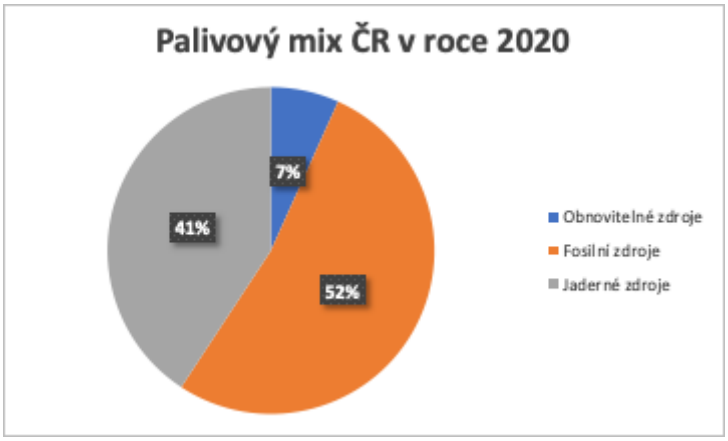
*Tab. 4 Podílové rozdělení produkce plynného vodíku dle typu výrobního procesu v ČR [29]*

| Druh procesu | Podíl vodíku vyrobeného procesem |
|---|---|
| Parní reforming | 59 % |
| Separace z rafinérských a petrochemických procesů (katalytický reforming, pyrolýza) | 35 % |
| Parciální oxidace (POX) | 3 % |
| Ostatní zdroje | 3 % |

Dle Tab. 4 zde největší podíl zabírá parní reforming zemního plynu a výroba vodíku z ropy a uhlí, 96 % celkové výroby. Pouhé 4% výroby vodíku spadají na elektrolýzu vodu. V budoucnu se však uvažuje o posílení této části. K tomu by mělo dojít díky státní podpoře a podpoře EU, která rozvoj a výstavbu nových elektrolyzérů hojně podporuje a podporovat bude, jelikož s vodíkem počítá jako s klíčovou komoditou ve své energetické strategii. V České republice by však rozvoj mohl být pomalejší, jelikož EU zamýšlí podporovat projekty, kde se bude vyrábět zelený vodík a to by mohl být omezující faktor vzhledem k palivovému mixu České republiky. Vzhledem k českému palivovému mixu se v ČR produkuje průměrně 472 g $CO_{2eq}$/kWh vyrobené elektřiny. Pro porovnání je uvedeno na Obr. 10 produkce $CO_{2eq}$/kWh v Evropských zemích. Zde je patrné, že zelený vodík je nejsnazší produkovat ve skandinávských zemích a ve Francii. V palivovém mixu ČR, jak ukazuje Obr. 11, nemá příliš velké zastoupení energie z obnovitelných zdrojů a vzhledem ke geologické lokalitě České republiky, a tím ne příliš vhodným podmínkám pro většinu elektráren z obnovitelných zdrojů, nenaznačuje nic, že by se tato situace měla zásadně změnit. Nicméně v České republice je hojně podporovaná energie z jaderného zdroje, a právě u těchto elektráren se uvažuje o výstavbě elektrolyzérů, kde by vodík byl vyráběn v době, kdy by docházelo k přebytkům vyráběné elektrické energie. [1] Problémem takto produkovaného vodíku je jeho certifikování jako “zeleného vodíku” a tím pádem i podpora výstavby elektrolyzérů. Na druhou stranu díky podoře výroby zeleného vodíku vzniká v ČR mnoho projektů na výstavbu elektrolyzéru s nově vybudovanou solární elektrárnou přímo pro jeho potřeby. Takovéto projekty vznikají zejména v západní části ČR a využívají k tomu lokality bývalých uhelných dolů. Tyto projekty jsou nyní ve stavu studií a procesů schvalování stavebního povolení.




*Obr. 10 Uhlíková intenzita při výrobě elektrické energie v Evropských zemích [30]*




*Obr. 11 Palivový mix ČR v roce 2020 [31]*

Důvodem k podpoře vodíku produkovaného elektrolyzéry je snížení uhlíkové stopy. To bude dosaženo produkcí tzn. nízkouhlíkového vodíku, vodík při jehož produkci vznikne maximálně 4,368 kg $CO_2$/kg $H_2$. Pro porovnání pokud by byl elektrolyzér v České republice napájen elektřinou z veřejné sítě, bude mít vodík uhlíkovou stopu 176 $CO_{2eq}$/MJ a tato hodnota bude i vyšší než průměrná uhlíková stopa vyrobeného vodíku v ČR v současné době, což činí 116 $CO_{2eq}$/MJ. [1]

Pro porovnání čísel převzatých z [1] je zde uveden výpočet, rovnice ( 17 ) a ( 18 ), podle něhož je uhlíková stopa na MJ vyšší, což může být dané odlišnými vstupními daty, např. palivovým mixem v ČR z jiného roku atd.

$$CO_{2eq1kgH2} = CO_{2eqkWh} \times \mathrm{E}_{elektrolýza} \qquad (17)$$

$$\mathrm{CO}_{2\mathrm{eq1kgH2}} = 472 \times 50 = gCO_{2eq}$$

$$CO_{2eqH2} = \frac{CO_{2eq1kgH2}}{E_{1kgH2}} \qquad (18)$$

$$\mathrm{CO}_{2\mathrm{eqH2}} = \frac{23600}{118{,}8} = 198{,}7\ gCO_{2eq}/MJ$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $CO_{2eq1kgH2}$ | produkce $CO_{2eq}$ při výrobě 1 kg $H_2$ [$gCO_{2eq}$], |
| $CO_{2eqH2}$ | produkce $CO_{2eq}$ při výrobě $H_2$ [$gCO_{2eq}$/kWh], |
| $CO_{2eqkWh}$ | produkce $CO_{2eq}$ na kWh dle palivového mixu ČR [$gCO_{2eq}$/kWh], |
| $E_{elektrolýza}$ | spotřeba el. energie na výrobu 1 kg $H_2$ elektrolýzou vody [kWh], |
| $E_{1kgH2}$ | energie uložená v 1kg vodíku [MJ]. |

Dalším důvodem k podpoře budování nových elektrolyzérů je i skutečnost, že tato technologie je v současné době poměrně známá a prozkoumaná, a tudíž je vybudování elektrolýzního provozu poměrně jednoduché. Navíc se výrobou elektrolyzérů zabývá v současnosti již několik firem, které mají vytvořené typové elektrolyzéry, a tím jsou sníženy náklady na vybudování nového vodíkového provozu. Pro porovnání velikosti elektrolyzérů se uvádí jejich spotřeba elektrické energie. Řádově se typové elektrolyzéry pohybují ve velikostech stovek kW až jednotek MW. [32] [19]

V České republice je většina produkce vodíku spotřebována samotnými producenty, zejména v oblasti chemického průmyslu, který spotřebovává vodík pro vlastní účely, nebo je zde vodík jako odpadní produkt. Z tohoto důvodu je třeba uvažovat o nových provozech na výrobu vodíku, jestliže se má vodík rozšířit do mnoha oblastí hospodářství České republiky, zejména v dopravě, jak tomu je nastíněno ve Vodíkové strategii České republiky. Nejvýznamnější tuzemští producenti jsou uvedeni v Tab. 5, včetně typu technologie, kterou k produkci využívají. Jejich souhrnná produkce přesahuje 100 tis t/r.

*Tab. 5 Hlavní provozy vyrábějící plynný vodík v ČR [33] [34] [35] [36]*

| Provoz | Výroba (t/rok) | Energetická hodnota (GWh) | Technologie | Využití |
|---|---|---|---|---|
| Unipetrol Litvínov POX | 55 000 | 1 815 | Parciální oxidace | Výroba čpavka a potřeby rafinérie |
| Unipetrol Litvínov EJ | 7 000 | 231 | Etylenová jednotka | |
| Unipetrol Litvínov Reforming | 12 000 | 396 | Kont. reforming benzínu | |
| Unipetrol Kralupy | 7 000 | 231 | Semikont. reforming benzínu | |
| Synthos Kralupy | 2 500 | 82,5 | Dehydrogenace Ethylbenzenu | Odpadní produkt |
| BC-MCHZ Ostrava | 13 650 | 450,45 | Parní reforming ZP | Výroba anilinu a amoniaku a prodej odběratelům Linde |
| DEZA Valaské Meziříčí | 1 400 | 46,2 | Parní reforming ZP | Hydrogenační rafinace surového benzolu |
| Spolchemie Ústí n. Labem | 2 100 | 69,3 | Elektrolýza Na/K Cl | Odpadní produkt |

Někteří producenti v České republice mají produkci vodíku jako podružnou a vodík zde vzniká jako vedlejší produkt, přičemž v současné době nemá v daných provozech využití a je pouze spalován jako odpadní produkt. Příkladem takového provozu je výroba chlóru v Ústí nad Labem firmou Spolchemie, s.r.o. V tomto podniku je instalován největší elektrolyzér v České republice. Elektrolyzér slouží na produkci chlóru ze solanky (rozpuštěná sůl NaCl ve vodě). Odpadním produktem je zde vodík, který je v současné době pouze mrhán spalováním na fakle. Do budoucna se však uvažuje o jeho využití pro pohon autobusů dopravního podniku Ústí nad Labem. [13]

Vodík, který vzniká jako odpadní produkt by mohl být z procesů zachytáván, vyčištěn a použit jako pohonná hmota, nebo jako zdroj v energetice. Pro účely porovnání, jak velkou měrou by mohl aktuálně produkovaný odpadní vodík přispět v energetice, je zde uvedena roční spotřeba elektrické energie v ČR, 60,4 TWh. [37] Na druhou stranu

je nutné uvažovat, že energie uložená ve vodíku, viz tabulka výše, může být přeměněna v elektrickou energii pouze omezeně. Toto omezení záleží zejména na účinnosti použitých článků.

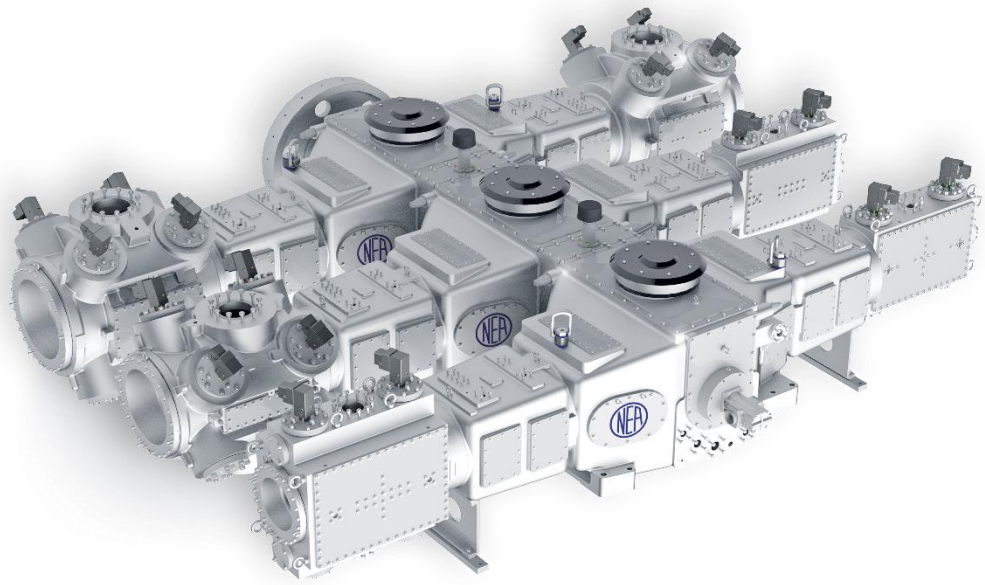
## 2.4 Skladování

Oblast skladování vodíku nabízí největší spektrum možností pro vývoj. Jedná se o paralelu k dopravě vodíku, jelikož při skladování i dopravě vodíku musí společnosti zabývající se touto záležitostí v prvé řadě udělat zásadní rozhodnutí, a to v jakém skupenství budou vodík skladovat/převážet. Navíc většina typů skladování využívá podobné nebo stejné technologie jako se užívá při dopravě vodíku, a proto v této kapitole bude představeno pouze základní možné skladování a podrobněji se budu zabývat touto otázkou v kapitole o dopravě vodíku.

### 2.4.1 Stlačený vodík

Vodík se konvenčně skladuje v plynné nebo kapalné fázi. Jelikož je vodík plyn s malou hustotou v plynné fázi při nízkém tlaku, jak je uvedeno v kapitole 2.1, je nutné ho pro jeho efektivní skladování stlačit na relativně vysoké tlaky. V Tab. 1 jsou pak uvedeny dva nejběžnější tlaky, při kterých se vodík skladuje, 20 MPa(g) a 70 MPa(g), neboli 200 bar(g) a 700 bar(g). Tlaky jsou zde uvedeny v barech, jelikož v praxi se tato jednotka ve spojení s kompresí vodíku hojně využívá, i když správné je označení v SI jednotkách, tedy v MPa. Převodní poměr je pak 1 MPa = 10 bar.

Obvykle jedním z největších a nejdražších zařízení vodíkové technologie bývá kompresorová jednotka, jenž stlačuje vodík na výše uváděné tlakové úrovně. Vodík se obvykle stlačuje z téměř atmosférického tlaku na tlak 200 bar(g), který je nejběžnější pro velkoobjemové skladování. Uvedené vyšší tlaky, 350 a 700 bar(g) jsou pak dosaženy většinou až v plnících stanicích pro koncové nádoby, např. nádrže u automobilů. Kompresory používané na stlačení vodíku bývají v případě velké kapacity nejčastěji pístové bezolejové, a to z důvodu zamezení znečištění vodíku. Vzorový typ pístového kompresoru od německé firmy Neumann Esser pro technologie komprese vodíku z elektrolyzéru o výstupním tlaku 0,1 bar(g), požadovaném skladovacím tlaku 200 bar(g) a průtoku 330 kg/h je uveden na Obr. 12. Tato ukázka byla zvolena na základě pravděpodobného využití tohoto kompresoru v novém provoze na výrobu vodíku v Ústeckém kraji. Jelikož takto velkého tlakového rozdílu nelze docílit během jednoho kompresního stupně, bývají často kompresory několikastupňové, aby kompresní poměr nepřesahoval hodnotu 5. [38] Mezi další často využívané vodíkové kompresory se řadí kompresory membránové. Zároveň se v tomto odvětví objevují raritní, inovátorské modely kompresorů, např. ionický kompresor, který pracuje na principu stlačování ionické kapaliny, která je samomazná. Zatím se však ve větším měřítku tyto kompresory nepoužívají. [39]



*Obr. 12 Model kompresoru od firmy NEA [38]*

Jelikož při stlačení vodíku dochází k jeho ohřevu, musí být kompresorové stanice vybaveny chladící jednotkou s aktivním médiem, a to vodou nebo vzduchem.

Celkovou teoretickou práci kompresoru lze vypočítat z 1. termodynamického zákona. Práce potřebná pro kompresi $w_{komp}$ plynu je rozdíl vnitřní energie neboli rozdíl entalpií h, před a po kompresi, a chladící teplo $q_{chl}$, to celé podělené účinností kompresoru $\eta_{komp}$, dle vztahu ( 19 ). Děj je tedy izotermický, probíhá beze změny teploty. Teplo potřebné k odvedení chladící jednotkou lze vypočítat za úvahy vodíku jako ideálního plynu. Nejprve je nutné vypočítat změnu teploty po kompresi přes rovnici ( 20 ) stavu ideálního plynu při porovnání počátečního a koncového, kde p značí tlak, V objem, n je látkové množství, R je plynová konstanta a T teplota. Následně je možné chladící teplo Q dopočítat z kalorimetrické rovnice ( 21 ), kde m je hmotnost, cp je měrná tepelná kapacita a ΔT je rozdíl teplot.

$$w_{komp} = \frac{h1 - h2 + q_{chl}}{\eta_{komp}} \qquad (19)$$

$$\frac{p1 \times V1}{p2 \times V2} = \frac{n \times R \times T1}{n \times R \times T2} => T2 = \frac{T1 \times p2 \times V2}{p1 \times V1} \qquad (20)$$

$$Q = m \times cp \times \Delta T = m \times cp \times (T1 - T2) \qquad (21)$$

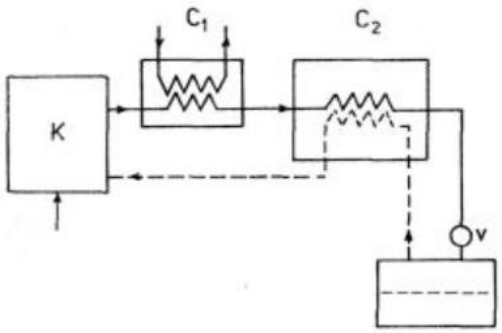
Vzhledem k velmi malé velikosti molekuly vodíku je pro tlakové nádoby, příruby, potrubí a jiná zařízení kritické dodržení dostatečné těsnosti. Obzvláště za vysokých tlaků má vodík tendenci ze systému netěsnostmi unikat. Z tohoto důvodu se musí u zařízení provést zkouška těsnosti dle normy ČSN 69 0012 Tlakové nádoby stabilní - Provozní požadavky. V normě jsou definované akce, časové úseky, po kterých je nutné provést zkoušku, a zároveň je zde popsaný i způsob provedení testu. V zásadě se jedná o 3 možné metody. Hydraulicky, zkušební médium je zpravidla voda, kdy vyhodnocení probíhá vizuálně, pneumaticky, pracovní médium je plyn (nejčastěji

hélium kvůli velikostně malé molekule), a vyhodnocení probíhá potíráním kritických míst pěnotvorným roztokem, nebo poklesem tlaku změřeným manometrem. [40]

Systémy určené pro vodíkové technologie musí zároveň projít i tlakovou zkouškou. Ta je prováděna dle nařízení vlády 219/2016 Sb. hydrostatickým zkušebním tlakem o hodnotě minimálně 1,43 násobku maximálního pracovního tlaku. [41]

### 2.4.2 Zkapalněný vodík

Druhou alternativou je skladování vodíku v kapalném stavu. Při této metodě nastává komplikace dosažení kapalného stavu vodíku, jelikož má bod varu při atmosférickém tlaku -253 °C, což je druhá nejnižší hodnota ze všech prvků. Nejnižší hodnotu má helium -268,9 °C. [42] Pro dosažení takto nízké teploty je nutné využít soustavy pracující na principu Joule-Thomsonova jevu. Schéma zkapalňovacího procesu je zobrazeno na Obr. 13. Čistý proud vodíku je nejdříve stlačen vysokotlakým kompresorem označeným písmenem K. Během komprese se proud ohřeje, z tohoto důvodu je přiveden nejdříve do předchlazovacího výměníku C1, kde je teplý vodík ochlazen kombinací proudů plynného a kapalného dusíku, až pod inverzní teplotu vodíku Ti = 205 K (Porovnání teploty s inverzní teplotou dané látky je důležité pro určení znaménka Joule-Thomsonova koeficientu, tzn. expanduje-li přes pórovitou přepážku plyn s nižší než inverzní teplotou, expanzí se dále ochlazuje). Dále je plyn dochlazen v chladiči C2 recirkulovanými, studenými parami vodíku. Následně plynný vodík expanduje přes škrtící ventil V (který nahrazuje pórovitou přepážku) do zásobníku, čímž vznikne dvoufázový proud vodíku a zároveň se tím sníží jeho teplota. Plynný vodík je ze zásobníku odveden do chladiče C2, kde slouží jako chladící médium a po ohřátí je zaveden do kompresoru K. Zde je smíchán s novým proudem vodíku a celý proces se opakuje. V zásobníku za škrtícím ventilem se postupně akumuluje tekutý vodík. [43] [44]




*Obr. 13 Schéma zkapalňovacího procesu [43]*

Výše popsaný proces zkapalnění je energeticky velmi náročný a zdroje uvádí, že při jeho procesu se spotřebuje cca 40 % energie, která je ve vodíku uskladněna. V přepočtu na absolutní číslo je na vyprodukování 1 kg kapalného vodíku potřeba 13,33 kWh. To představuje hlavní limitující prvek zkapalňovačů. [45] Tekutý vodík má za atmosférického tlaku hustotu 70 kg/m$^3$. Pro srovnání plynný vodík při teplotě 20 °C a běžném skladovacím a transportním tlaku 200 bar(g) dosahuje hustoty 14,5 kg/m$^3$. Tzn. zkapalněný vodík zaujme téměř 5x menší objem pro uskladnění, transport stejné hmoty (stejného množství energie) než vodík v plynné fázi. [43]

Nádoby určené pro skladování kapalného vodíku musí být speciální, více plášťové s velmi dobrými izolačními vlastnostmi. Jelikož však nejde nádoby plně izolovat, dochází k prostupu tepla z okolí. To má za následek odpařování vodíku kvůli jeho nízkému bodu varu, plynný vodík zůstává v nádrži a tím zvyšuje vnitřní přetlak. Z tohoto důvodu je nutné vodík při zvýšeném tlaku z nádrže upouštět a tím tak plýtvat jeho energetický potenciál. Řešením je návrh nádrží na vyšší pracovní tlak, což by snížilo četnost vypouštění nežádoucího plynného vodíku do ovzduší. [46] Rychlost přeměny z kapalného na plynný vodík je určena zejména izolační schopností nádoby. Zdroje udávají, že aktuální zásobníky mohou být navrženy na ztrátu v jednotkách objemových procent za den, např. ve studii [47] se uvádí ztráta 0,75 obj %/ den. Případné ztráty u zásobníků mohou být redukovány na nulové v případě odvodu odpařeného plynu zpět do zkapalňovače. [48] Toto provedení však není možné využít ve všech aplikacích, např. v automobilovém zásobníku na vodík.

### 2.4.3 Vodík v pevném skupenství

Jelikož výše zmíněné metody skladování vodíku jsou spojené s obtížemi při jejich vyžívání, snaží se vědci vymyslet metodu, jak vodík uchovat v tuhé fázi. Většina těchto projektů je v současné době ve fázi výzkumu, a proto zatím nejsou zařazeny mezi konvenční metody. Vodík není v tomto případě skladován v čisté formě, ale jedná se o kovové sloučeniny, hydridy. Dalo by se tedy říct, že se jedná o typ vodíkové baterie. I tato metoda má svá vlastní úskalí. Zaprvé sloučeniny s kovy mají obvykle velkou hustotu, a tím pádem je výsledný materiál velmi těžký, což znemožňuje využití při transportu vodíku. Tato metoda je tedy vhodná zejména pro stacionární uložení. Zadruhé pouze určité kovy mají schopnost na sebe vodík vázat a uvolňovat. S tím je spojená i rychlost tohoto procesu, která musí být dostatečná pro potřeby reálné aplikace a v neposlední řadě zde může nastat problém v opakovatelnosti, tedy počtu cyklů nabití a vybití vodíku bez snížení účinnosti. [49]

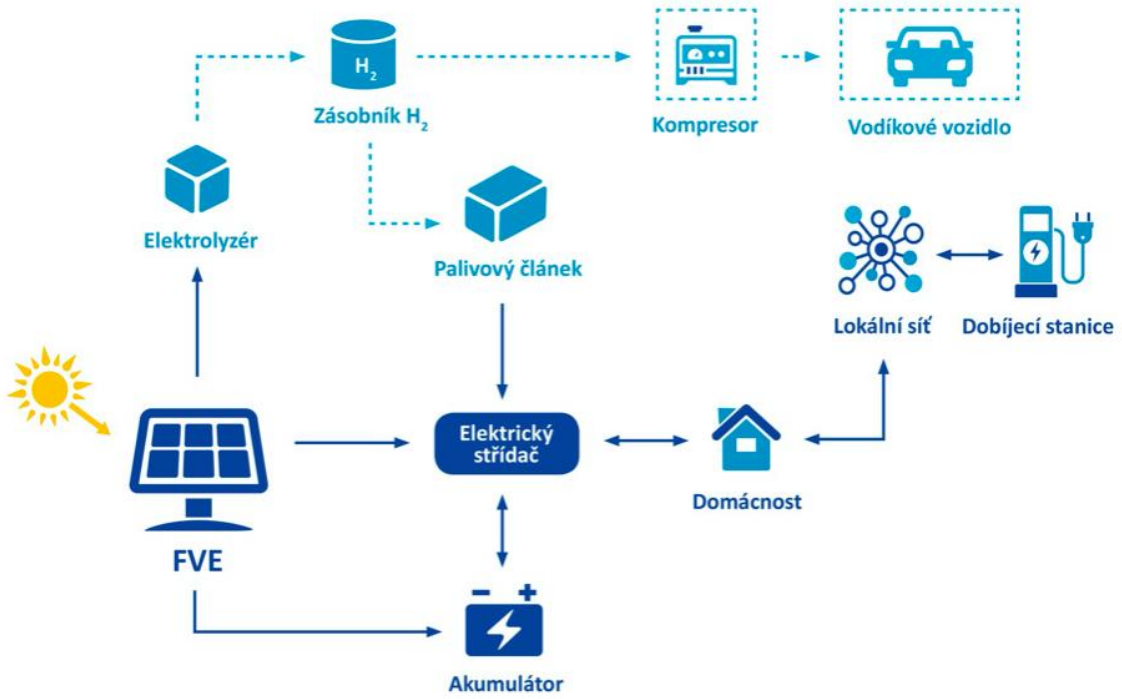
## 2.5 Využití vodíku

### 2.5.1 Vodík jako úložiště energie

V energetickém odvětví je palčivá otázka, kterou je zapotřebí vyřešit, v jaké formě lze efektivně uskladnit velké množství vyrobené energie. Např. jaderné elektrárny nedokáží pružně reagovat na kolísání poptávky po elektřině, a tím pádem může docházet k okamžitým přebytkům vyrobené elektrické energie. Další typy elektráren, zejména sluneční a větrná, se potýkají s problémem, že elektrickou energii vyrábějí pouze za příznivých podmínek. Poptávku je ale potřeba pokrýt i v případě, že zrovna nefouká vítr nebo nesvítí slunce. Z těchto důvodů se vědecké snažení zaobírá otázkou, jak elektrickou energii v době její nadprodukce uskladnit, aby mohla být využita v potřebný čas. Jak ukazuje přiložený Obr. 14 s ilustrativní sluneční elektrárnou, elektrická energie může být použita k nabíjení obřích akumulátorů nebo využita k výrobě vodíku v elektrolyzérech. Takto vyrobený vodík je uskladněn ve vysokotlakých zásobnících a následně v době potřeby přiveden do palivového článku, kde slouží jako zdroj pro výrobu elektřiny. Samozřejmě existují i další typy uskladnění

elektrické energie, např. přečerpávací elektrárny, nicméně tento typ není předmětem této diplomové práce. U všech výše zmíněných procesů se však musí vždy uvažovat se ztrátami energie kvůli účinnostem technologického zařízení. Jelikož u žádné technologie se nedá dosáhnout 100 % účinnosti, bude vždy množství získané energie menší, než kolik bylo do dané technologie uloženo.

Pro porovnání firma DEVINN pracující s PEM vodíkovými články uvádí účinnost při výrobě elektrické energie svých palivových článků cca 50 %. Zároveň je možné využít i vedlejší produkty, a to energii ve formě tepla a vodu. [50]




*Obr. 14 Schéma propojení fotovoltaických panelů a vodíkového akumulačního systému [51]*

Dalším možným využitím vodíku je jeho spalování v kotli na plynná paliva, pokud by se však v daném kotli spaloval pouze čistý vodík, musel by zejména hořák být speciálně upraven. Spalování vodíku či jiného produktu vyrobeného z vodíku je možné buď v kotli produkujícím teplo nebo v kogenerační jednotce, kde může být vodík přeměněn na elektrickou i tepelnou energii. [52] Jelikož však v dnešní době nejsou kotle ani kogenerační jednotky většinou uzpůsobené na spalování čistého vodíku, jeví se jako dobrá alternativa výroba uměle vyrobeného/syntetického zemního plynu. Výroba syntetického zemního plynu probíhá v tzn. metanizačním zařízení, ve kterém se odehrává chemická reakce, viz rovnice ( 22 ). Syntetický metan spotřebovává na svou výrobu mimo vodíku i oxid uhličitý, a tak se tato technologie dá považovat za výhodnou i vzhledem ke zpracování oxidu uhličitého. Nicméně je nutné dodat, že spálením syntetického zemního plynu dojde opět k vytvoření oxidu uhličitého, a tak je jeho eliminace pouze dočasná.

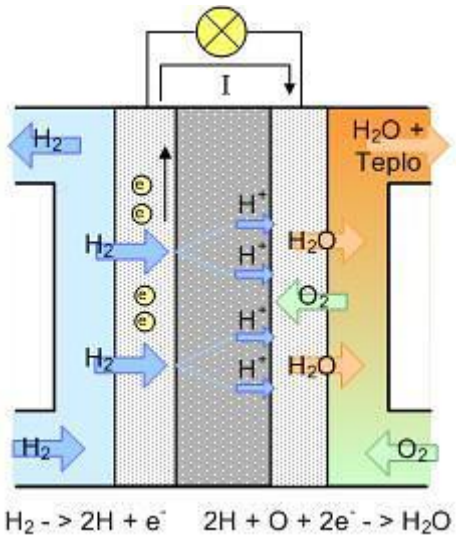
$$2H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + O_2 \qquad (22)$$

### 2.5.2 Vodíková mobilita

Vodík může sloužit jako palivo pro dopravní prostředky. Své využití nachází zejména v autobusové dopravě, u osobních a nákladních automobilů a vlaků. Přičemž v Evropě je v současné době nejvíce implementované využití vodíku k pohonu u městské autobusové dopravy. Tento trend je zapříčiněn nedostatečnou infrastrukturou vodíkových čerpacích stanic, a proto se nedá očekávat v nejbližší budoucnosti rozmach v osobních a nákladních automobilech, kde by vedle nově budovaných čerpacích stanic pro elektroauta musela vyrůst i nová síť vodíkových čerpacích stanic. Oproti tomu autobusy městské dopravy mohou mít v dané lokalitě jen jedno, nebo dvě čerpací místa. Náklady na jejich vybudování jsou tedy přijatelnější a rozvoj může být rychlejší.

Ve výše zmíněných typech dopravy může být vodík využitý jako palivo dvěma typy technologií. Prvním z nich je přímé spalování vodíku. Automobil je vybaven lehce modifikovaným pístovým motorem, který se běžně nachází u benzínových a naftových aut. Palivem pro tento motor je stlačený vodík, který je do motoru vstřikován ve směsi s kyslíkem a jejich reakcí způsobující zvýšení teploty a tlaku je poháněn vlastní motor. Výhodou spalování vodíku oproti běžným palivům (benzín a nafta) jsou nízké až nulové emise v závislosti na typu použitého vodíku. [53]

Druhou technologií je výroba elektrické energie v palivovém článku, zobrazený na Obr. 15. Dopravní prostředek je vybaven elektromotorem, který je poháněn touto vlastní vyrobenou elektrickou energií. Tento princip je v dnešní době uplatňován v mnohem větším měřítku a na rozdíl od předchozí metody, ve které existují spíše prototypy, dopravní prostředky poháněné vodíkem s palivovým článkem jsou už i v dnešní době často vyráběné. Jedná se opět zejména o autobusy, osobní a nákladní automobily a vlaky. Autobusy a vlaky mají celou technologii, tedy palivový článek i zásobníky vodíku, z důvodu bezpečnosti umístěnou na střeše. Palivový článek napájí elektromotor vyrobenou elektrickou energií, který vzniká při chemické reakci s kyslíkem. Každý palivový článek je tvořen třemi základními prvky - anodou, katodou a katalyzátorem, nebo membránou. Základní princip fungování palivového článku je znázorněn na obrázku a popsán v rovnicích. Membránou prochází kladné protony a elektrony odchází elektrickým obvodem a jsou příčinou vzniku elektrického proudu, který pohání dopravní prostředek. Protony a elektrony po průchodu membránou, respektive elektrickým obvodem reagují s oxidačním činidlem, v tomto případě kyslíkem, za vzniku odpadních látek vody a tepla, což jsou jediné přímé emise tohoto procesu. [54]




*Obr. 15 Schéma palivového článku [55]*

### 2.5.3 V průmyslu

V průmyslu se vodík využívá dvěma způsoby. Prvním z nich je využití vodíku jako vstupní suroviny, přičemž tento vodík následně reaguje s jiným prvkem nebo molekulou za vzniku požadovaného sloučeni. Toto využití nachází vodík v chemickém a potravinářském průmyslu. Druhou možností je využití vodíku jako zdroje tepla. Při druhém typu využití může být navíc výhodné pro některá průmyslová odvětví, že vodík je ve směsi s kyslíkem jediným bezuhlíkovým topným plynem. [56]

V chemickém průmyslu jsou třeba zmínit dva hlavní procesy, a to je výroba amoniaku, jakožto meziproduktu při výrobě hnojiv, polymerů a výbušnin, a rafinace ropy, kde se vodík využívá jako vstupní surovina. Při výrobě amoniaku se využívá nejčastěji Haber-Boshova procesu. Pro správný průběh reakce je potřebná teplota okolo 400 °C, tlaku 150 bar a použití katalyzátoru s obsahem železa. Probíhající reakce je exotermní a teplo ní produkované se může zpětně pro tento proces využít. Proces probíhá dle následující rovnice ( 23 ). [57]

$$3H_2 + N_2 \rightarrow 2NH_3 \qquad (23)$$

V rafinérském průmyslu je vodík klíčovou chemikálií pro zpracování ropy. Používá se pro výrobu lehkých ropných frakcí, pro odstranění nežádoucích látek (síra, dusík, kovy atd.). Vodík nachází své využití i při procesu zkapalňování uhlí kde blní podobné fukce. [58]

Významnou technologií spotřeby vodíku je výroba metanolu, kde dochází k reakci s oxidem uhelnatým a uhličitým za vzniku vody a metanolu, dle rovnic ( 24 ) a ( 25 ). Tento proces je využíván např. při výrobě biopaliv a umožňuje recyklaci vyprodukovaných uhlíkatých plynů. [58]

$$CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH \quad (24)$$
$$CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O \quad (25)$$

Významnou roli hraje vodík i v metalurgii, kde slouží jako redukční činidlo při výrobě oceli. Stále je jako hlavní redukční činidlo používán koks, ale v dnešní době je trend mnoha firem od koksu ustupovat a je nahrazen vodíkem, který neprodukuje emise oxidu uhelnatého a uhličitého narozdíl od koksu. Navíc má pro zpracování železa lepší efekt. [59]

Jelikož jsou průmyslová odvětví velmi rozmanitá, vodík nachází uplatnění v několika dalších. Jako příklad uvádím výrobu margarínů v potravinářství nebo využití vodíku jako raketového paliva atd.

### 2.5.4 Situace v České republice

V současné době se vodík v Česku vyrábí téměř výhradně pro využití v chemickém průmyslu. Zejména se pak jedná o rafinaci ropy a výrobu čpavku, popsané v kapitolách výše. Nicméně kvůli již několikrát zmiňované současné situaci a podpoře produkce vodíku uvažuje i Česká republika o dalších možnostech využití vodíku. Ve své Vodíkové strategii [1] představuje další vhodné využití vodíku v Česku v budoucnosti. Kromě již zmíněného chemického průmyslu, u kterého se očekává, že bude převažovat i nadále, by se ke spotřebě vodíku měla přidat i oblast dopravy. Tato studie vidí největší potenciál v osobní automobilové dopravě a v dopravě nákladní a autobusové. Právě poslední zmíněná zažívá nejmarkantnější rozvoj v Česku už nyní, téměř každé velké město v ČR již zvažuje zařazení vodíkových autobusů do své flotily. Nejblíže jsou k realizaci v Ostravě, kde místní dopravní podnik již vypsal výběrové řízení a zahájil přípravu výstavby první vodíkové plničky [60]

Historicky je v České republice vyvinutá produkce oceli a vzhledem k její spotřebě, u nás i ve světě, nic nenaznačuje, že by měl být hutní průmysl na ústupu, právě naopak. Při zpracování železné rudy a výrobě oceli dochází ke značným emisím skleníkových plynů, a proto je nutné tento proces dekarbonizovat. Splnění cíle dekarbonizace výrobního procesu je možné dvěma směry. Jelikož ve vysokých pecích na tavení železa je spalováno většinou fosilní palivo s velkými emisemi skleníkových plynů, je možné toto palivo nahradit vodíkem. Zadruhé při procesu výroby oceli je nutné oddělit ze sloučenin oxidů železa čisté železo. K této chemické reakci, redukci, slouží ve většině případů dnes uhlík, avšak společnost Hydrit Fossil Free Steel přišla s novou technologií a jako redukční činidlo slouží vodík, takže z celého procesu je uhlík vyloučen. [61] Právě z důvodů rozvinutého ocelářského průmyslu v České republice se tato metoda zpracování železné rudy bezuhlíkovou metodou jeví pro Českou republiku velmi zajímavou a uvažuje s ní ve své vodíkové strategii.

# 3 Strategie a legislativa spojená s vodíkem

## 3.1 Vodíková strategie Evropské unie (NECP)

Ve vodíku vidí budoucnost větší část vyspělého světa a s tím je spojena i investice do plánovaní a vymýšlení vodíkových strategií. Stranou těchto záměrů nezůstává ani Evropská Unie (EU), která se snaží formou doporučení, nařízení a finančních podpor zajistit rozvoj vodíkového hospodářství v rámci svých členských států. V roce 2020 vydala Evropská komise sdělení *Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu* [62], ze kterého vyplývá, že budoucnost ve výrobě vodíku vidí ve výrobě vodíku pomocí elektrolyzérů. Následně ve sdělení byly představeny i konkrétní strategické cíle výstavby nových elektrolyzérů. Do roku 2024 by se měly vystavět elektrolyzéry o celkovém výkonu 6 GW a následně do roku 2030 by se mělo jednat o provozy o výkonu alespoň 40 GW. [62]

## 3.2 Vodíková strategie ČR

V České republice se podporou vodíkových projektů zabývá od roku 2007 Česká vodíková technologická platforma (HYTEP), která vznikla na popud Ministerstva průmyslu a obchodu ČR. Jednou z klíčových aktivit HYTEP byla konzultace při vytváření Vodíkové strategie ČR a její aktualizace. [63]

## 3.3 Legislativa ČR

Vodík je nyní v legislativě České republiky zakotven pouze jako alternativní palivo v zákoně č. 311/2006 Sb. o pohonných hmotách. V energetickém zákoně č. 458/2000 Sb. § 2 odst. 2 písmeno b) bod 9 jsou vyjmenované plyny určené pro energetiku: zemní plyn, koksárenský plyn čistý, degazační a generátorový plyn, biometan, propan, butan a jejich směsi, pokud nejsou používány pro pohon motorových vozidel, nicméně vodík mezi nimi chybí. Avšak aktuálně chtějí zákonodárci tento stav změnit. [64] [65]

V současné době obecně legislativa ČR zaostává oproti vývoji a je proto nutné přijmout legislativní opatření, která by vyřešila situaci ohledně vtláčení vodíku do plynárenských systémů, certifikovala kategorizaci vyráběného vodíku atd. V těchto ohledech by bylo možné čerpat a převzít legislativní úpravy z okolních zemí, např. z Německa, kde se vodíkovou problematikou zabývají již delší čas. Zároveň by převzetí úprav ulehčilo situaci meziregionální přepravy vodíku. [1]

## 3.4 Normy ČR

Při návrhu technických zařízení a provozů se v ČR nejčastěji vychází z Českých technických norem (ČSN) eventuálně z harmonizovaných (převzatých) Evropských norem (ČSN EN). Z aktuálně platných norem v ČR jsou z pohledu tématu této práce

důležité zejména normy na skladování a transport vodíku, ty nejzákladnější jsou představeny níže.

Z pohledu transportu vodíku potrubím v ČR nyní chybí normy, které by se zabývaly přimícháváním vodíku do zemního plynu, a tím využily stávající plynárenské infrastruktury pro transport vodíku. Na druhou stranu se již nyní připravují adekvátní normy, při jejichž vzniku se autoři norem inspirují zejména zahraničními studiemi a výzkumy. [66] Vodík je již dlouhou dobu využíván v chemickém průmyslu a v případě výstavby nového plynovodu na vodík, je možné využít stávající normy, např. ČSN EN 13480 Kovová průmyslová potrubí.

Díky výše zmíněnému faktu, že vodík je již řadu let využíván v průmyslu, existují pro transport v tlakových lahvích příslušné normy, např. ČSN EN ISO 11114 Lahve na přepravu plynů a ČSN 07 8305 Kovové tlakové nádoby k dopravě plynu.

Pro účely skladování vodíku je možné využít normu ČSN EN 17533 Plynný vodík - Lahve a velkoobjemové lahve pro stacionární skladování.

Výše zmíněné normy jsou zpoplatněné, nicméně informace je možné čerpat z volně dostupné technické normy vydané Českým plynárenským svazem, TPG 304 03 Plnící stanice stlačeného vodíku pro mobilní zařízení, kde je mimo jiné definovaná čistota vodíku potřebná pro využití jako pohonné hmoty, vzorové technologické zařízení (kompresor, vysokotlaká nádoba atd.).

# 4 Produkce a nakládání s odpadem v ČR

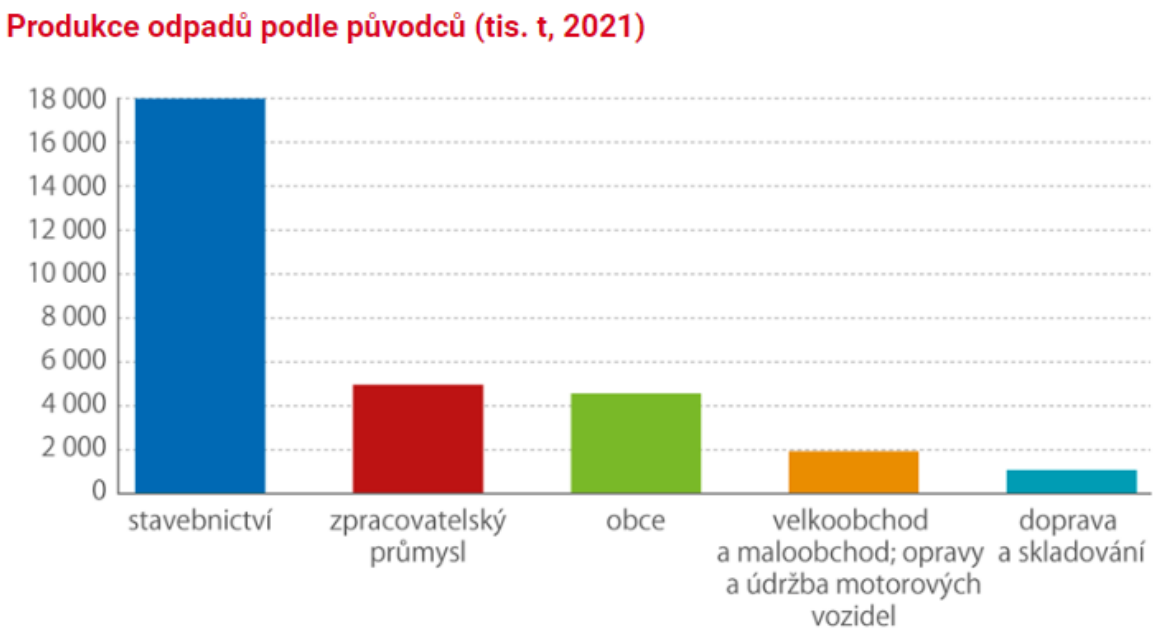
Odpadové hospodářství řeší každá společnost, a to zejména ve dvou fázích - produkce a nakládání s odpadem. Odpady vznikají téměř ve všech oblastech lidské činnosti a dají se primárně rozdělit na podnikový a obecní, který je převážně tvořený komunálním odpadem. Pro kategorizaci odpadu je v České republice klíčový zákon o odpadech 541/2020 Sb. a jeho prováděcí předpisy. Mimo zařazení odpadu podle příslušného kódování se tato legislativa zabývá i nakládáním s odpady, plány odpadového hospodářství, regulacemi firem zabývajícími se odpadovým hospodářství atd.

V rámci této kapitoly se bude vycházet zejména z údajů Českého statistického úřadu, který sbírá data s využitím Integrovaného systému plnění ohlašovacích povinností provozovaného Českou informační agenturou životního prostředí. [67] Údaje uvedené níže budou vztaženy k roku 2020, jelikož je to nejaktuálnější rok, ze kterého lze snadno veřejně získat data o odpadech v České republice.

V rámci tématu této diplomové práce je vhodné popsat obecnou problematiku odpadů, nicméně bude zde kladen důraz zejména na komunální odpad, a to ze čtyřech klíčových důvodů. Zaprvé hlavní zdrojem vodíku v odpadu jsou plasty a bioodpad, který je obsažen ve velké míře právě v komunálním odpadu. Zadruhé podnikový odpad si již nyní firmy samy nebo s pomocí externí firmy často recyklují nebo využívají k terénním úpravám a rekultivaci, a proto není třeba řešit otázku zpracování tohoto odpadu. Dále z důvodu zákazu skládkování v ČR po roce 2030 a nutnosti zpracování skladovaného odpadu. [68] A nakonec pro uvažování výstavby závodu na výrobu vodíku z odpadu bude velmi výhodné, že systém svozu a dopravy komunálního odpadu je již nyní propracovaný a funkční.

## 4.1 Produkce

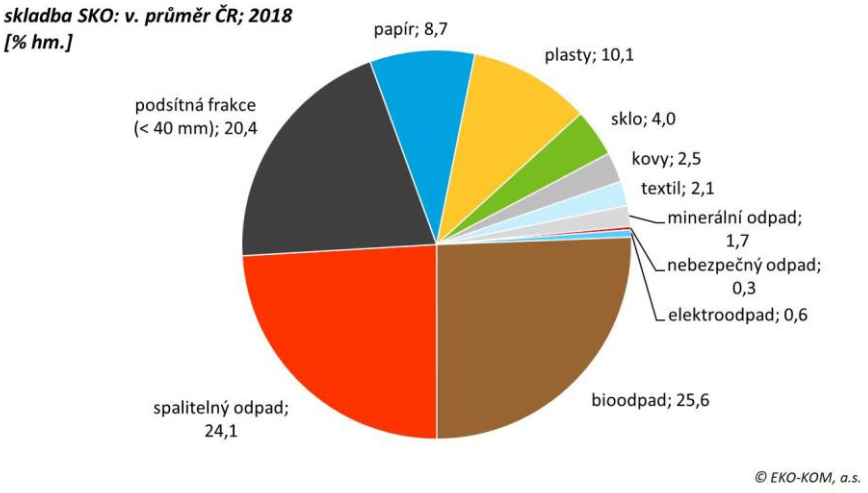
V České republice se za rok 2021 vyprodukovalo přes 39 mil. tun odpadů, z toho bylo přes 5,9 mil tun komunálního odpadu. [69] Na Obr. 16 jsou uvedeny jednotlivé sektory producentů, přičemž podnikové odpady jsou zde dále děleny podle skupin podnikání a smysluplných celků na stavebnictví, zpracovatelský průmysl, velkoobchod a maloobchod, opravy a údržba motorových vozidel a doprava a skladování.




*Obr. 16 Produkce odpadů podle původců v ČR [67]*

Při pohledu na Obr. 16 je vidět, že největším producentem odpadu je oblast stavebnictví. Je to dáno zejména definicí odpadu, a tím pádem klasifikováním zeminy jako odpadu. Ta tvořila přes 40 % všech vyprodukovaných odpadů.

Jak bylo výše zmíněno zaměření je zejména na komunální odpad, proto je na následujícím Obr. 17 uvedeno procentuální složení. [70] Data jsou uvedena z roku 2018, ale jelikož se jedná o procentuální zastoupení, je možné ho aplikovat prakticky i na rok 2021, jelikož se nepředpokládá výraznější změna v trendu. Tím pádem je možné vypočítat, že objem plastů v komunálním odpadu činní téměř 0,6 mil tun a bioodpadu přes 1,5 mil. Tun. Toto číslo však nemusí být konečné, jelikož značné množství mohlo v rámci analýzy propadnout do podsítné frakce.

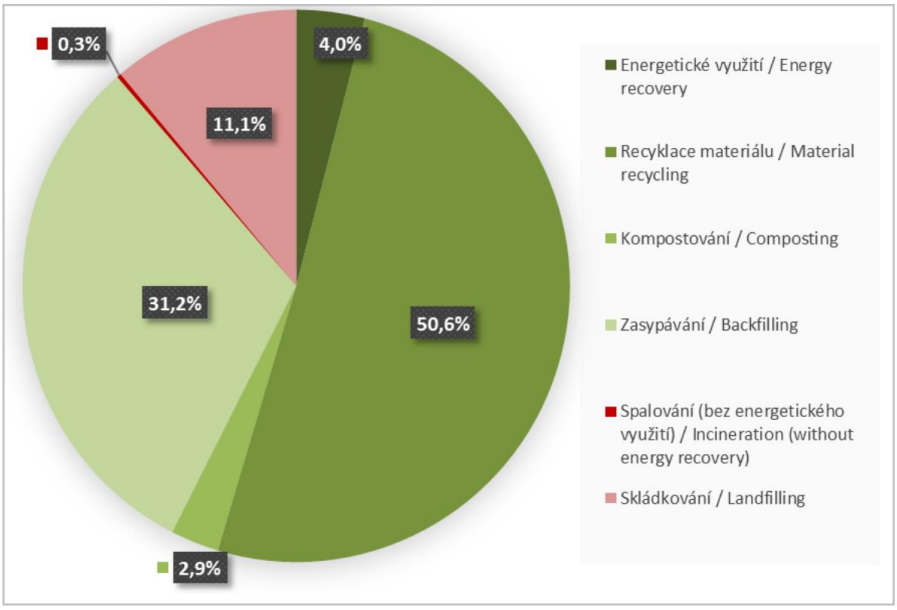



*Obr. 17 Skladba SKO v ČR [70]*

## 4.2 Nakládání

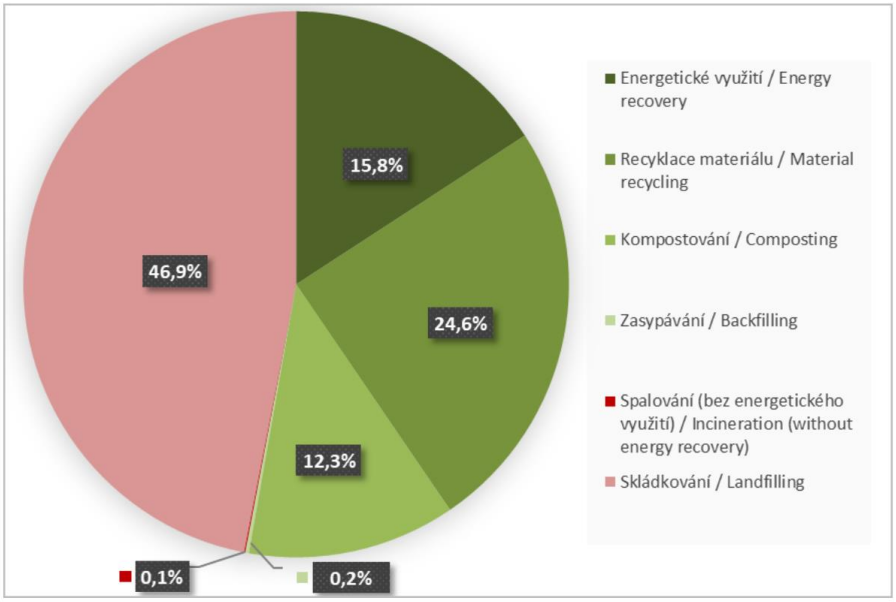
Po vzniku odpadu je sledovaným kritériem konečné nakládání s ním, což je stav, při kterém je odpad odstraněn nebo materiálově či energeticky využit, a tím pádem přestane být odpadem. V roce 2021 bylo nakládáno celkem s téměř 34 mil. tun odpadů. Rozdíl mezi produkcí a nakládáním tvoří zejména odpad uskladněný k využití, nebo odstranění v následujících letech, případně se může jednat o odpad, který byl odvezen ke zpracování mimo Českou republiku. [67]

Jednotlivé metody, jak bylo s odpadem v daném roce nakládáno, a jejich procentuální zastoupení v nakládání s odpady zobrazuje Obr. 18.




*Obr. 18 Nakládání s odpady v ČR [71]*

Pro porovnání je na Obr. 19 uvedeno i nakládání s komunálním odpadem. Je jasně patrné, že komunální odpad má mnohem menší využití než odpad celkový. Využitím odpadu rozumíme veškeré formy nakládání mimo skládkování a spalování bez energetického využití. V souhrnném odpadu, tedy podnikovém i obecním (≈ komunálním), je míra využití 88,4 %, oproti tomu v oblasti nakládání s komunálním odpadem jen 53 %. Tento fakt podporuje výše zmíněnou tezi, že u podnikového odpadu dochází k většímu materiálovému využití než u komunálního.




*Obr. 19 Nakládání s komunálním odpadem v ČR [72]*

# 5 Výroba vodíku z odpadu

Při nakládání s odpady je možné využít mnoho různých alternativ, pro různé typy odpadů jsou vhodné různé metody zpracování. Při výrobě vodíku je možné vycházet zejména z komunálního odpadu a z bioodpadu, eventuálně se dá použít i podnikový plastový odpad, ten si ale většinou firmy recyklují. Bližší specifikace vstupního materiálu a metody jejich uplatnění jsou popsány v této kapitole.

## 5.1 Výroba z komunálního odpadu

Výroba z odpadu je podmíněna faktem, že zpracovávaný materiál musí obsahovat vodíkové sloučeniny. V ojedinělých případech však tato podmínka nemusí být splněna do důsledku a může se zde zpracovávat i jiný materiál, a to proto, že závod je primárně určen pro likvidaci odpadů a výroba vodíku je až sekundární proces.

Vhodným materiálem je každý odpad, který obsahuje velké množství organického materiálu z chemického hlediska. Toto komunální odpad splňuje, jelikož obsahuje zejména plasty, bioodpad a papír, tzn. anorganické sloučeniny bez obsahu vodíku jsou vněm zastoupeny minoritně. Výroba vodíku z komunálního odpadu je navíc výhodná i z pohledu ekologického, jelikož zpracovávaný materiál nebude skládkován.

V současné době jsou provozovány zejména závody používající technologii zplyňování popsanou v kapitole 5.1.1, protože je oproti druhé možné technologii, pyrolýze 5.1.2, výhodnější z pohledu výtěžnosti vodíku. Nicméně oba typy technologií jsou nadále zkoumány ve výzkumných centrech, jelikož jejich technologie ještě není zdokonalena do bodu, kdy by došlo k její masové aplikaci v provozech na zpracování odpadů, a to zejména kvůli vysokým energetickým nárokům. Obě metody jsou totiž založené na rozkladu odpadu na vodík, oxid uhelnatý/uhličitý a pevný zbytkový materiál za vysoké teploty.

### 5.1.1 Plazmatická gasifikace

Princip zplyňování neboli gasifikace odpadu spočívá v jeho přeměně z pevného materiálu na plyn, tzn. syngas, neboli syntetický plyn složený z převážně z vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Vznik zmíněných oxidů je zapříčiněn přívodem kyslíku do procesu zplyňování, což je hlavní charakteristický rozdíl od pyrolýzy.

Vlastní proces této termo-chemické výroby začíná rozemletím odpadu na malé částice v rotačním dvouhřídelovém drtiči. Odtud je transportován do kotle, kde dochází k přeměně odpadu na plyny za vysokých teplot. Teplota gasifikace je základním parametrem tohoto procesu, jelikož na ní závisí typ výsledného produktu. Výsledným produktem totiž nemusí být ve všech závodech na zpracování odpadů pouze výroba vodíku, ale může to být např. i výroba kapalin, které jsou vhodné na výrobu pohonných hmot. K tomuto účelu musí být ale dále zpracovány a vyčištěny. Aby výsledkem reakce v gasifikačním kotli byl vodík, musí se tavenina ohřívat na požadovanou teplotu v rozmezí stovek až tisíců °C, dle uvažované technologie gasifikace, jak je rozvedeno

níže. [73] Při procesu zplyňování může být použit katalyzátor pro urychlení chemické reakce, ale zároveň to není podmínkou u všech typů zplyňování.

Častým typem gasifikačního procesu při zpracování odpadů je gasifikace pomocí plazmatického paprsku, který je znázorněn na Obr. 20. Při tomto procesu je rozemletý materiál dopravován nad plazmový oblouk tvořený grafitovými elektrodami pod proudem, mezi které je hnán plazmový plyn např. argon, dusík, nebo nejčastěji používaný vzduch. Ze vzduchu se díky průchodu elektrickým obloukem stane ionizovaný vzduch tvořeny ionty a elektrony o vysoké teplotě 2 000 – 10 000 °C. Za těchto vysokých teplot je anorganický materiál přeměňován na jednoduché plyny (převážně) a kapaliny. Takto vzniklý syngas je nutno pro další použití upravit. Úprava probíhá vyčištěním od základních prvků v něm obsažených a nežádoucích. Těmi mohou být zejména síra, čpavek, chlór, rtuť a stopová množství dalších kovů. [74] Pro čištění syngasu není možné použít konvenční technologie, jelikož ty jsou ve většině případů aplikovatelné pouze na plyny o nízkých teplotách. Teplota vyprodukovaného syngasu se pohybuje v řádů stovek stupňů Celsia. Z těchto důvodů byl vyvinut a na pilotní lince v Singapuru vyzkoušen postup čištění syngasu při vysokých teplotách, který probíhá v několika stupních. Z gasifikačního reaktoru je plyn hnán na fluidizační lože katalytického reformeru, kde je z něj odstraněn dehet a jiné oleje. Následně prochází pračkou na plyn, kde je zbaven chlóru ve formě HCl. Drobné částice obsažené v syngasu jsou následně odfiltrovány ve filtru pevných částic. V poslední části čištění prochází plyn přes dvojité pevné lóže určené k desulfurizaci. V této části je plyn zbaven síry, která díky regenerovatelnému sorbentu reaguje v plynu na sulfidy. [75] Takto čistý plyn je následně možné využít ve formě paliva do generátorů. Pro potřeby výroby vodíku je ale nutné z čistého syngasu oddělit ještě zbylé složky od vodíku. A těmito složkami jsou zejména zmíněné oxidy uhlíku, oxid uhličitý a oxid uhelnatý. Proces získání čistého vodíku ze syngasu se skládá z dvou částí, obohacení vodíkem a regenerací pevných částí. Během obohacovací části prochází syngas vrstvami oxidu železitého a oxidu vápenatého, kde dochází k reakcím popsaných v následujících rovnicích ( 26 )–( 34 ): [76]

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (26)$$
$$H_2 + Fe_2O_3 \rightarrow H_2O + 2FeO \quad (27)$$
$$H_2 + FeO \rightarrow H_2O + Fe \quad (28)$$
$$CO + Fe_2O_3 \rightarrow CO_2 + 2FeO \quad (29)$$
$$CO + FeO \rightarrow CO_2 + Fe \quad (30)$$
$$2CO \rightarrow CO_2 + C \quad (31)$$
$$CO_2 + CaO \rightarrow CaCO_3 \quad (32)$$
$$CO_2 + CH_4 \rightarrow 2CO + 2H_2 \quad (33)$$
$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \quad (34)$$

Výsledkem těchto rovnic je produkce čistého vodíkového proudu. Následuje krok regenerace, při kterém je regenerováno reakční lože, které zachytilo atomy uhlíku, které jsou ve formě oxidu uhličitého odstraněny. Regenerace probíhá za přístupu vzduchu a popisují je následující rovnice ( 35 )–( 38 ): [76]

$$2Fe + O_2 \rightarrow 2FeO \quad (35)$$
$$4FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_2O_3 \quad (36)$$

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (37)$$

$$CaCO_3 \rightarrow CO_2 + CaO \quad (38)$$

*Obr. 20* Zjednodušené schéma technologie plazmového zplyňování. *[77]*

Další součástí chemickém procesu je použití vhodného katalyzátoru. Ten je v procesu použit jako urychlovač chemické reakce, byť on sám se reakce neúčastní a nefiguruje ani v surovinách, ani v produktech. Použití katalyzátoru je spíše využito u procesu pyrolýzy, ale může se vyskytnout i u gasifikace.

### 5.1.2 Pyrolýza

Existují dva základní rozdílové parametry mezi gasifikací a pyrolýzou. Pyrolýza probíhá bez přístupu okysličovadla a za nižších teplot, řádově v rozmezí 400-900 °C. Při termochemickém rozkladu organického materiálu za výše zmíněných podmínek vzniká zejména kapalná frakce, menší podíl plynné frakce a samozřejmě tuhý zbytek. Kvůli vzniku velkého množství kapalné frakce (olejů) je tato metoda používána spíše při výrobě syntetických paliv a není vhodná čistě pro výrobu syntézního plynu, nebo vodíku, na druhou strunu může být druhotně využita i k těmto účelům. [78]

V produkovaném syntézním plynu jsou zastoupeny zejména složky methanu, vodíku, oxidu uhličitého a uhelnatého, ethenu a ethanu. Obsah vodíku ve vyprodukovaném plynu závisí na použití paliva, které by mělo být ideálně jednosložkové (např. vytříděný plast). Pro porovnání metod zplyňování a pyrolýzy stejného materiálu byl obsah vodíku v plynu pouze 5 % obj. u pyrolýzy a více než 10x větší, 50 % obj., u plazmového zplyňování. Jelikož je syntézní plyn produkovaný pyrolýzou směsný plyn, je nutné z něj vodík vyseparovat, a to zejména metodami adsorbčními (PSA technologie), permeačními (membránová technologie) nebo kryogenní separací. Podobná úprava plynu musí být i u zpracování syntetického plynu po plazmatickém zplynění, ovšem kvůli nižšímu obsahu vodíku je nutné provádět vícekrokové procesy. Z výše zmíněných důvodů je tedy většinou výhodnější využít pyrolýzní plyn pro kogeneraci za účelem výroby elektrické a tepelné energie. [78]

## 5.2 Výroba z bioodpadu

Jednou z alternativních metod výroby vodíku je využití fermentace biomasy. Proces je založený na rozkladu organické látky zejména na vodík a oxid uhličitý. Tato přeměna je docílena díky působení bakterií v biochemických reaktorech bez přístupu vzduchu, jedná se tedy o děje anaerobní. Dle vnějších podmínek se dělí fermentační postupy na fotofermentační, probíhá-li proces za přístupu světla, nebo tzn. tmavá fermentace, je-li proces bez přísunu světelné energie. Pro jednotlivé procesy se musí využít jiný typ bakterií, a také parametry výstupního procesu jsou odlišné.

Při tmavé fermentaci dochází k produkci většího množství vodíku než při fotofermentaci, ovšem výtěžnost je nižší, a to zejména z důvodu, že vodík z tmavé fermentace obsahuje velké množství znečišťujících látek, např. $H_2S$. Toto je dáno faktem, že při fotofermentaci dochází ke komplexní oxidaci organického materiálu na vodík a oxid uhličitý díky působení světla.

Společnou nevýhodou obou typů fermentací je nutnost hospodaření s odpadní vodou z procesu a nutnost separace vodíku ze vzniklé směsi plynů, vodík + oxid uhličitý. [79]

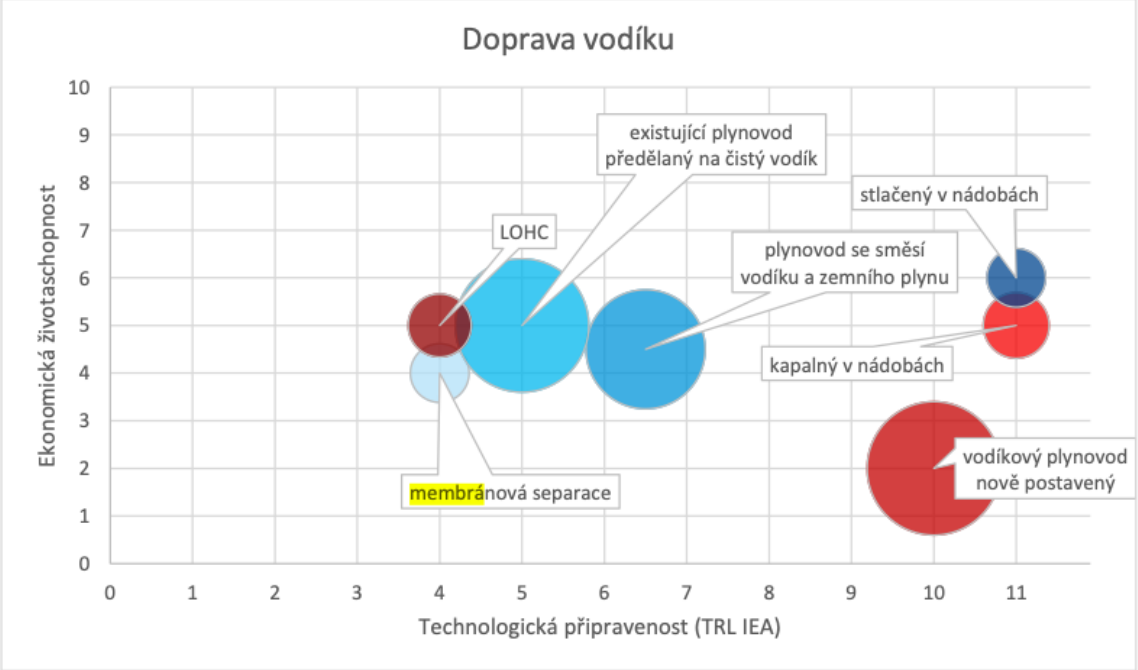
# 6 Doprava vodíku

V současné době je na lokální úrovni, v České republice, řešena velkoobjemová doprava vodíku zejména na krátké vzdálenosti. Nynější provozy zabývající se produkcí vodíku jsou většinou součástí větších technologických celků, které využívají vodík jako vstupní surovinu pro následné procesy. Jelikož jsou výrobní i spotřební provozy součástí jednoho závodu, nejsou zde kladeny složité požadavky na dopravu vodíku, jelikož jeho transport je možné realizovat vnitropodnikovým potrubím. Dopravování vodíku na delší trasy z místa výroby k jeho odběratelům je v současnosti minoritní, jelikož spotřebitelem jsou většinou jen laboratoře a maloodběratelé, ke kterým je dopravován vodík v tlakových lahvích v plynném skupenství, obdobně jako jiné běžně komerčně prodávané technické plyny, např. dusík, argon, helium atd.

V budoucnosti se však uvažuje, že dojde ke změně oproti současnému stavu a místa výroby a spotřeby vodíku budou mít mezi sebou větší vzdálenost. Zejména kvůli nárůstu počtu a dislokací míst spotřeby a nemožnosti zajištění lokálních výrob vodíku u každého z nich. Tímto rozšířením je myšlen zejména nárůst počtu plnících míst pro vodíkové dopravní prostředky, jež jsou nyní na vzestupu.

Z výše uvedeného plyne, že se budou následující pasáže zaměřovat na aktuální i budoucí možnosti transportu vodíku na větší než vnitropodnikové vzdálenosti. Jelikož je tato práce zaměřena na situaci v České republice, budou popsány zásadní typy dopravy vodíku pro daný region, kterým jsou silniční a potrubní doprava. Přeprava vodíku hraje významnou roli v koncovém ekologickém i ekonomickém dopadu využívání vodíku, na což je zaměřena i následná případová studie.

Popis současné situace transportu vodíku a jeho jednotlivých metod představuje Obr. 21. Každý tep technologie je určen jeho technickou připraveností a ekonomickou životaschopností. Technická připravenost stanovuje, jak je daná technologie současně využívaná ve světě (v ČR se může lehce lišit) a je vynesena na ose X, přičemž čím vyšší číslo dosahuje tím je více v provozech zavedená a využívaná. Technická připravenost určená na škále Technology Readiness Level (TRL) podle definic International Energy Agency (IEA). Škála udává, zda se jedná o počáteční idea metody (0) až o stabilní řešení (11). Osa Y zobrazuje ekonomickou životaschopnost dané technologie, tzn. hodnocení současné nákladové efektivity a odhad budoucí ekonomické perspektivy dané technologie, čím vyšší číslo, tím je dané technologie ekonomicky perspektivnější. Každá technologie je označena kruhem o různém průměru, což ukazuje, jak velký objem vodíku je pomocí dané technologie možné přepravit, čím větší kruh, tím více vodíku. V kombinovaném hodnocení nejlépe vychází transportovat stačený vodík v nádobách, jelikož se jedná o opakovaně integrované řešení s nejlepší ekonomickou perspektivou. S přihlédnutím i na hledisko přepravovaného objemu je pak významný transport pomocí stávajícího potrubí, předělaného na vodíkové potrubí, nebo přimíchávání k zemnímu plynu. V obou případech se však nyní jedná zatím jen o prototypy v provozním měřítku. [1]




*Obr. 21 Zhodnocení technické připravenosti a ekonomické životaschopnosti [1]*

## 6.1 Potrubní síť

Doprava vodíku plynovodem je ideální řešení pro účely transportu velkého množství vodíku na krátké trasy, nicméně může být vhodná i pro aplikace na dlouhé trasy. Velkou výhodou této dopravy je její kontinuálnost, jelikož plyn může proudit v potrubí neustále, a tak nedochází k dodávkám v jednotlivých dávkách. Doprava vodíku pomocí plynovodů je vhodné řešení jedná-li se o dopravu v rámci jednoho provozu, je-li tedy výrobna vodíku umístěná vedle nebo přímo v areálu, kde je zároveň plyn i spotřebováván. Pokud ale uvažujeme o transportu na větší vzdálenosti začínají být značným problémem vysoké investiční náklady, ať už na výstavbu nového plynovodu nebo na úpravu stávajícího. Další překážkou pro výstavbu či rekonstrukci potrubní sítě představuje i časová náročnost dané investice a legislativní požadavky, ať už připravenost vlastní legislativy, tak i potřebná povolení a vyjádření od příslušných úřadů a organizací a v neposlední řadě též výkup potřebných pozemků.

Vodík je možné dopravovat pomocí potrubních sítích v několika variantách. Ekonomicky výhodné je využití již existujících plynárenských sítí na zemní plyn, které se nepoužívají nebo kde se s jejich využitím v dohledné době nepočítá. Dalším typem je přimíchávání vodíku do stávajícího potrubí na zemní plyn a vytvoření jejich směsi. Posledním typem je vybudování nového plynovodu určeného pro čistý vodík. Všechny tři zmíněné technologie využití potrubí jsou detailněji popsány níže.

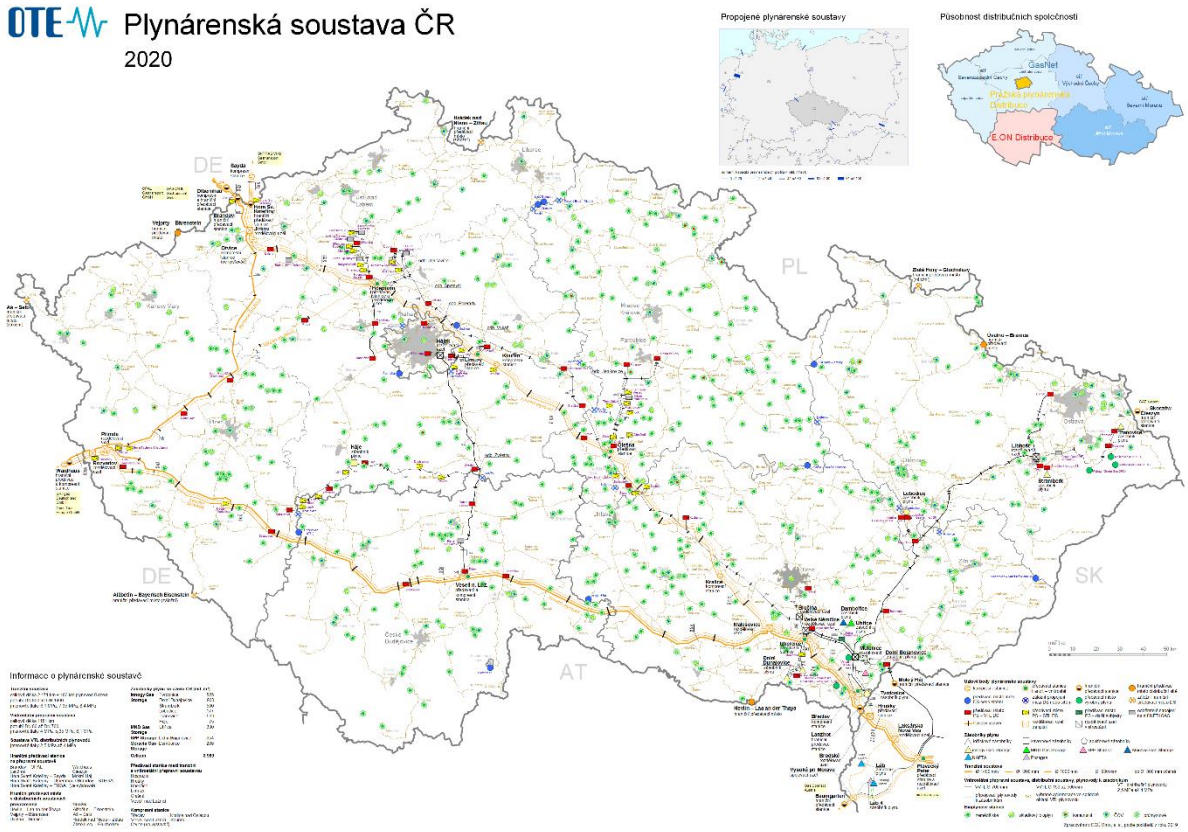
### 6.1.1 Využití odstaveného potrubí na zemní plyn

Jednou z možných variant dopravy vodíku je využití stávající potrubní sítě pro zemní plyn. Tato metoda se dá realizovat buď přimícháním vodíku k zemnímu plynu, popsáno v další kapitole, nebo přímo náhradou zemního plynu za vodík. Druhé zmíněné řešení je ze všech tří variant ekonomicky nejvýhodnější, jelikož se při něm využívá již vybudovaná plynárenská síť a zároveň není nutné investovat do míchacích a separačních stanic, která sjednocují nebo rozdělují proud vodíku a zemního plynu.

Při využití stávajícího plynovodu není však možné pouze vyměnit proudící médium v potrubí, a to v souvislosti s odlišnými vlastnostmi obou látek. Největší roli zde hraje velikost molekul. Protože vodík má mnohonásobně menší molekulu než zemní plyn, je zde mnohem větší riziko úniku. Proto je nutné zajistit, aby byl stávající plynovod konstruován i pro potřeby vodíku dle normy ČSN EN 13480-3, tj. že je pro vodík zvolený správný materiál, který odolá i korozi a vodíkové křehkosti dle normy ČSN EN 13480-2 a v neposlední řadě musí plynovod splnit i požadavky na zkoušení dle normy ČSN EN 13480-5. Zde dojde velmi pravděpodobně ke zjištění úniku, viz výše. Tyto úniky jsou nejčastěji v místech přírubových spojů, které je potřeba v takovém případě osadit jiným typem těsnění nebo vyměnit celý spoj. [80]

Při využití stávajícího plynovodu je samozřejmě nutné posoudit i jednotlivá zařízení, která jsou součástí sítě. Nejvýznamnějším zařízením jsou kompresory, které musí být odzkoušeny obdobně jako potrubí a při zjištění nedostatků musí být vyměněny.

Na Obr. 22 je uvedena současná plynárenská soustava ČR, tvořená tranzitními trasami potrubí ve velikostech DN 800–1400 a tlaku v rozmezí 6,1–8,4 MPa. Na trase těchto potrubí jsou tzn. předávací stanice, na kterých se kontroluje množství a kvalita protečeného plynu a zároveň slouží jako napojovací místa pro vnitrostátní přepravní a distribuční soustavu. Ta se skládá s potrubí o dimenzi o DN 80–700 a zároveň při oddělení plynu z tranzitního potrubí na vnitrostátní poklesá i tlak na 2,5–6,1 MPa. Mimo těchto předávacích uzlů jsou na trasách plynovodu i posilující kompresory, které udržují požadovanou tlakovou úroveň snižující se v důsledku působení tlakových ztrát třením. [81]




*Obr. 22 Plynárenská soustava ČR [81]*

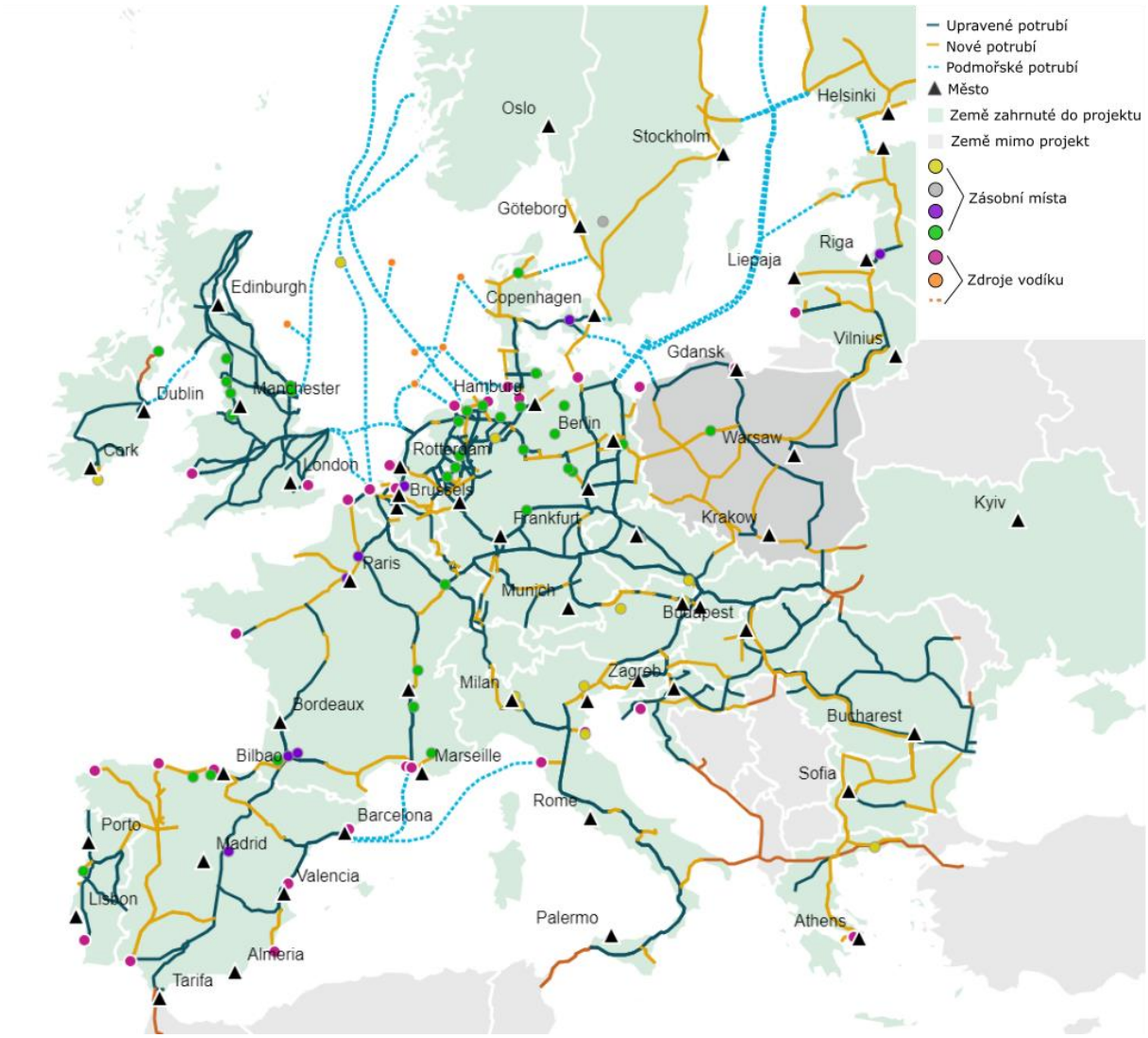
Při nahrazení transportovaného zemního plynu vodíkem v plynárenské síti by došlo k snížení energetické hustoty, Tab. 6. Snížená energetická hustota by musela být řešena 3–4 násobným navýšením průtoku vodíku pro doručení stejného množství energie. Zvýšený průtok v potrubí o stejné dimenzi vede k navýšení rychlosti média, z čehož vyplývá, že by musela být prověřena technická připravenost plynárenské soustavy.

*Tab. 6 Energetická hustota v části plynárenské soustavy ČR [82]*

| Plynárenská soustava | Energetická hustota zemního plynu (kWh/m$^3$) | Energetická hustota plynného vodíku (kWh/m$^3$) |
|---|---|---|
| Tranzitní síť 6,1–8,4 MPa | 640,5–924,9 | 167,0–226,0 |
| Vnitrostátní potrubí 2,5–6,1 MPa | 242,5–640,5 | 71,2–167,0 |

Evropská iniciativa sdružující 32 evropských provozovatelů plynárenských soustav, European Hydrohen Backbone (EHB), si dala za cíl vybudování komplexní evropské vodíkové infrastruktury. Ta je představena na Obr. 23, který je tvořen přívodními trasami, výrobnami, sklady vodíku a je spojen soustavou nově vybudovaných plynovodů, popř. s využitím stávajících plynovodů pro zemní plyn. Což je i příklad České republiky. Při pohledu na část, kde se nachází ČR je vidět, že EHB ve své vizi využívá repasovanou současnou tranzitní trasu. Kdy by však mělo k realizaci dojít,

není zcela jasné, jelikož termín přechodu Evropy na vodík se stále oddalují a aktuálně je ve hře rok 2030. [83]




Obr. 23 Schéma možnosti budoucího využití plynovodů v rámci evropských zemí [83]

## 6.1.2 Přimíchávání do zemního plynu

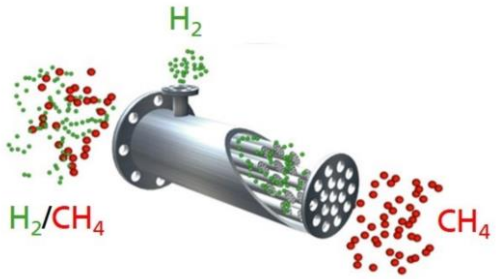
Přimíchávání vodíku do zemního plynu a vytvoření směsi plynů úzce souvisí s předchozí kapitolou, jelikož i zde je možné využít stávající plynárenskou soustavu a i zde platí, že je nutné otestovat zejména těsnostní parametry potrubí a technologických zařízení.

Na rozdíl od předchozí kapitoly médium proudící v potrubí je směsný plyn zemního plynu a vodíku. Existují však dva různé přístupy k této směsi. Jedním z nich je využití přímo směsného plynu a druhým je opětovná separace vodíku od zemního plynu.

Při přimíchávání vodíku se využívá mixážní zařízení, což je v důsledku pouze soustava potrubí, ventilů, průtokoměrů a měření tlaků, které zaručují přimíchávání správného

množství vodíku do zemního plynu. [84] Určení správného množství je nyní otázkou probíhajících výzkumů, limitující prvky jsou zejména nepoškození současné plynárenské sítě (těsnost, vodíková koroze) a správné fungování spotřebičů (nižší výhřevnost). Nejdále jsou v tomto odvětví v Evropě Němci, kteří mají výzkumná centra na testování přimíchávání a zároveň už mají i odzkoušené přimíchávání vodíku přímo do vybraných testovacích úseků aktivních plynovodů. V topném období 2021/2022 a 2022/2023 bylo odzkoušeno přidání vodíku v krocích po 5 % a bylo úspěšné pro kroky 10, 15 a 20 %, přičemž 20 % byla i cílová hranice, které mělo být dosaženo. [85] V České republice plánuje podobné testování společnost GasNet v Ústeckém kraji, která je na obdobné testování po technické stránce připravena, ale stále se čeká na doplnění legislativy a technických norem, které stále nejsou v platnosti. [86]

Alternativou je přimíchání vodíku do proudu zemního plynu a jeho následná separace v místě spotřeby, např. palivového článku, nebo plnící stanice. Zpětná separace vodíku je nyní předmětem výzkumů. Jednou z možných technologií a již nyní poměrně prozkoumaná je metoda Pressure Swing Adsorption (PSA). PSA je technologie založená na separaci plynů na základě jejich různé afinity k adsorbentu, při tomto procesu se používají střídavé změny tlaku pro adsorpci a desorpci. Tato metoda je však energeticky a ztrátově náročná, proto se jako klíčová technologie zdá membránová separace. Do potrubí se vloží filtrační vložka s membránou, např. uhlíkovou, která vyniká vlastností velmi malých pórů, a to zapříčiňuje průchod malých molekul vodíku, oproti záchytu záchytu větších molekul methanu, viz Obr. 24. Hlavní nevýhodou těchto metod je však jejich extrémní tlaková ztráta a následné požadavky na navýšení čerpací práce. [87]




*Obr. 24 Membrána pro oddělení proudů $H_2$ a $CH_4$ [87]*

### 6.1.3 Vodíkovod

Technologicky nejjednodušší je výstavba nové potrubní sítě určené pro čistý vodík, zejména proto, že je tato technologie již několik desetiletí známá a praxí vyzkoušená. Nicméně v mnoha případech se k ní investoři přiklání až jako k poslední možnosti, protože s výstavbou zcela nové sítě se pojí největší investiční náklady a také největší množství potřebných povolení, a tím pádem i dlouhý čas její výstavby.

Vodík díky svým vlastnostem přináší značné požadavky i na materiálové a technické provedení celé soustavy. Největšími riziky jsou těsnost systému, kvůli velmi malým molekulám vodíku. Díky této vlastnosti velmi snadno uniká i malými netěsnostmi a při použití potrubí z kovu nastává navíc i riziko vodíkové křehkosti. To je jev, při kterém je do struktury kovu difundovaný vodík, a tím mění vlastnosti daného kovu. Nejčastějším

materiálem, ze kterého je vybudována potrubní síť pro čistý vodík je bezešvá, nerezová ocel o velké čistotě a tvrdosti [88], případě může být použité i potrubí z kompozitního materiálu, je však nutné u obou dbát na správné provedení těsnění zejména u armatur.

Při návrhu dedikovaného potrubí pro vodík se vychází z obecné normy pro návrh, montáž, materiál a zkušební testy potrubí, ČSN EN 13480 a jejích kapitol 1-5. Pro návrh celé soustavy, tedy včetně armatur a kompresorů, jsou dále potřebné technické normy z kategorie ČSN 13 pro armatury a potrubí a ČSN? 10 pro kompresory, vakuovou techniku a pneumatická zařízení. Pro vodíkovody neexistují v současné době žádné specifické technické normy ČSN, podle kterých by se mělo navrhovat. [89]

Dle normy ČSN EN 13480 je možno navrhnout potrubí o velmi vysokém provozním tlaku, v řádech stovek barů, je však potřeba brát v úvahu, že s rostoucím tlakem roste i tloušťka stěny potrubí, což může být limitující prvek. [89]

## 6.2 Silniční doprava

Využití silniční sítě je výhodné zejména na střední vzdálenosti, kde se již nejedná o dopravu v areálu ani trasu překonávající rozsáhlé území, pro které je výhodnější využití potrubní nebo lodní dopravní sítě. Z pohledu České republiky se právě tato doprava kvůli dopravním vzdálenostem jeví jako nejschůdnější. Silniční doprava se dá využít v kombinaci se sítí plynovodů pro vodík, jelikož ty nemohou být zavedeny ke každému spotřebiteli, alespoň v počátečních fázích výstavby sítě vhodné pro vodík. Proto se zdá být jako rozumná alternativa využití základní rozvodné sítě s několika velkými čerpacími uzly, ze kterých bude vodík s využitím silniční dopravy dopravován k maloodběratelům. Obdobně ovšem poslouží i silniční doprava z místa výroby vodíku, pokud u tohoto provozu nebude možné napojení do plynovodů. V České republice je rozsáhlá sít dopravních komunikací a při využití silniční dopravy je právě z tohoto důvodu poměrně snadno možné pružně měnit trasy odkud a kam má být vodík dopravován, obzvláště v porovnání s potrubní dopravou, kdy musí být vybudováno nové potrubí, nebo s lodní dopravou, která je omezená na vodní toky v dané lokalitě. Investiční náklady jsou omezeny většinou pouze na nákup přepravních vozidel a vybudování vhodné plnící stanice, protože síť dopravních komunikací v odpovídající kvalitě již existuje. Časová náročnost realizace dopravních tras je díky výše zmíněnému také značně kratší, než je tomu např. u potrubní dopravy.

Silniční doprava může být využita pro přepravu vodíku v plynném i kapalném skupenství. Nicméně po průzkumu trhu a aktuálního stavu výzkumu/vývoje přepravy budou níže popisované stavy platné pouze pro plynný vodík. V České republice se aktuálně neuvažuje o využívání kapalného vodíku, a to pravděpodobně z důvodů velké energetické náročnosti při zkapalňování. Na druhou stranu silniční přeprava vodíku v plynném skupenství je již značně prozkoumaná a existuje pro ni několik různých konstrukčních, technologických řešení. Níže jsou popsány tři varianty přepravy vodíku s využitím silniční sítě. Vždy se jedná o tahač s návěsem, na kterém jsou umístěny tlakové nádoby různé konstrukce. Varianty se liší pouze množstvím nádob a jejich uspořádáním na návěsu. Z důvodu již několikrát zmíněné vlastnosti vodíku, a to jeho malou hustotou, se potýká i silniční přeprava vodíku s nutností stlačit jej na vysokou tlakovou úroveň, aby bylo nakládání s ním ekonomicky možné. Proto musí být nádoby

navrženy na pracovní tlak v řádu stovek bar(g), což je hlavní limitující prvek při jejich navrhování.

Hlavní porovnávacím kritériem různých konstrukčních variant je jejich váha a množství přepravovaného vodíku, pro tento účel slouží jednotka kg $H_2$/kg hmotnost konstrukce, nebo nádoby. Jelikož s rostoucí přepravní tlakovou úrovní roste i hmotnost přepravovaného vodíku ve stejném objemu, je výhodné dosáhnout vyšší úrovně, oproti tomu jde úměra, že s rostoucím pracovním tlakem, roste i tloušťka stěny nádoby, a tím pádem i její hmotnost. Pro návrh nápravy jsou limitujícími prvky hmotnost a rozměry požadované pro nákladní vozidla v ČR uvedené ve vyhlášce č. 209/2018 Sb. Pro kategorii O1-O4 přípojná vozidla je nejvyšší přípustná hmotnost, včetně nákladu, od 750 kg do 10 000 kg na jednu nápravu a maximální rozměry jsou šířka 2,55 m, výška 4,00m a délka jízdní soupravy motorového vozidla s návěsem 16,50 m. [90]

Při návrhu konstrukce tlakových nádob se v praxi vychází z normy ČSN EN 13480-3 určené pro přímé trubky zatížené vnitřním přetlakem, výpočet v ní uvedený přesně odpovídá tlakovým nádobám popsaným v normě ČSN EN 13445-3, důvodem použití ČSN EN 13480-3 je její jednoznačné a jednoduché zpracování. Výpočet tloušťky stěny přímé trubky kruhového průřezu vychází z výpočtu válcové skořepiny stálé tloušťky, která je namáhána v obvodovém a osovém směru. Vzorec výpočtu je následují ( 39 ):

$$e = \frac{p_c \times D_0}{2 \times f \times z + p_c} \qquad (39)$$

Kde $p_c$ je výpočtový přetlak, $D_0$ je vnější průměr válce, f značí dovolené namáhání (určené z vlastností použitého materiálu) a z je součinitel hodnoty podélného svaru (u bezešvých nádob se uvažuje z=1). [91]

Z výše uvedeného vzorce je jasně patrné, že s rostoucím přetlakem v nádobě i rostoucím průměrem nádoby se zvětšuje i tloušťka stěny, a tím pádem roste i hmotnost nádoby. Hmotnost nádoby je hlavním limitujícím prvkem při návrhu návěsu, a proto musí výrobci optimalizovat průměr nádoby a tlakovou úroveň pro požadované přepravní množství vodíku.

Z pohledu materiálového provedení se dělí tlakové nádoby na 4 typy, zobrazený na Obr. 25. Typ I je tvořen pouze kovovým materiálem, nejčastěji bezešvou ocelí nebo hliníkem, tento typ vyrábí např. česká firma Vítkovice Cylinders. Typ II je tvořený kovovým jádrem, které je ve válcové části opatřeno vnější výztuží (potahem) z kompozitního materiálu, uhlíkového vlákna. Typ III je podobný jako typ II, ale vyztužené kompozitem jsou i dna nádoby. Typ IV má polymerní jádro vyztužené kompozitem po celém svém povrchu, z důvodů použití polymeru místo oceli na jádro nádoby jsou tyto nádoby nejlehčí z uvedených. Technické provedení je uvedeno na Obr. 26. Maximální možné tlaky a hmotnostní podíl vodíku ku hmotnosti nádoby je uveden v Tab. 7.

*Tab. 7 Typy tlakových lahví na stlačený plyn [92]*

| Typ | Maximální tlaková úroveň (bar(g)) | Hmotnostní podíl vodíku ku hmotnosti nádoby (%) |
|---|---|---|
| I | 200 | 1 |
| II | 300 | 3,9 |
| III | 700 | 5 |
| IV | 700 | >5 |

*Obr. 25 Tlaková lahev typ IV [93]*

*Obr. 26 Typy tlakových lahví a jejich konstrukční řešení [93]*

### 6.2.1 Tlakové nádoby v klecové konstrukci

Pravděpodobně nejrozšířenějším řešením přepravy vysokotlakého, plynného vodíku v současné době na území České republiky je umístění soustavy vyšších jednotek až desítek tlakových lahví ve svazcích umístěných vertikálně v kontejnerové/klecové konstrukci. Součástí klece s umístěnými lahvemi je i řídící jednotka, ke které jsou připojeny jednotlivé tlakové lahve. Jednotka řídí soustavu ventilů, pomocí kterých řídí plnění a vypouštění lahví. Názorná ukázka svazku tlakových lahví v kleci je uvedena níže, Obr. 27.

*Obr. 27 Návěs s tlakovými nádobami v klecové konstrukci [94]*

Každá firma používá lehce odlišné konstrukční řešení, a proto není možné dopočítat danou hodnotu hmotnosti návěsu a přepravovaného množství vodíku. Pro účely této práce byla vybrána německá firma Wystrach GmbH, která částečně data o svých návěsech sdílí. Pro porovnání s ostatními typy uvedenými v Tab. 8, byl vybrán typový návěs délky 45 ft, přibližně 13,7 m, což je i uvažovaná délka u zbylých typů. Firma dodává tlakové nádoby s možností přepravy na 3 různých tlakových úrovních. Pro všechny tlakové úrovně jsou použity nádoby typu IV.

*Tab. 8 Typy tlakových úrovní, jejich hmotnost a přepravované množství vodíku [95]*

| Tlaková úroveň (bar(g) | Celková kapacita $H_2$ (kg) | Energie uložená ve vodíku (GJ) | Objem (l) | Hmotnost návěsu naplněného vodíkem (kg)* | Hmotnost návěsu potřebná na převoz 1kg $H_2$ (kg) |
|---|---|---|---|---|---|
| 300 | 958 | 115,0 | 45 150 | 19 500 | 20,4 |
| 381 | 1 164 | 139,7 | 45 150 | 22 500 | 19,3 |
| 500 | 1 237 | 148,4 | 38 961 | 32 000 | 25,9 |

** Hmotnost je uvedena pouze pro návěs, pro celkovou hmotnost dopravní soustavy je nutné připočítat hmotnost tahače. Jelikož je možné uvažovat různé typy tahačů s různou hmotností, které nejsou cílem rešerše této práce, je zde uvedena pouze hmotnost samostatného návěsu.*

### 6.2.2 Návěs s doutníkovými nádobami

Anglicky se tento typ návěsu nazývá „tube trailer“, v českém jazyce je používán nepřeložený název, pakliže je ale potřeba termín přeložit, užívá se výrazu doutníková nádoba. Jedná se o návěs, na kterém je umístěný opět svazek válcových nádob. Hlavní rozdíl oproti předchozímu typu je uložení nádob, které je horizontální. Dále potom počet nádob na jeden návěs, který se pohybuje z pravidla do 10, a s tím spojené i rozměry jednotlivých nádob, které jsou delší a mají větší průměr, což může být limitující prvek při vyšších tlakových úrovních, respektive doutníkové nádoby musí mít větší tloušťku oproti tlakové lahvi pro dosažení stejné tlakové úrovně. Ukázka návěsu s doutníkovými nádobami je vidět na Obr. 1.

*Obr. 28 Návěs s doutníkovými nádobami [96]*

Vzhledem k faktu, že vodíkové technologie jsou nyní na vzestupu a probíhá stále mnoho výzkumů, firmy nejsou příliš ochotny poskytovat podrobné informace o svých produktech, proto je možnost široké rešerše omezena. Z tohoto důvodů byl vybrán pro porovnání produkt firmy Enric, určený pro přepravu vodíku a standardizovaný dle ISO11120 standardu. Jako druhý produkt byl vybrán tube trailer od společnosti City Machine & Welding, Inc. Oba jsou představeny v Tab. 9.

*Tab. 9 Typy tlakových úrovní, jejich hmotnost a přepravované množství vodíku [97] [98]*

| **Tlaková úroveň (bar(g)** | **Kapacita $H_2$ (kg)** | **Energie uložená ve vodíku (GJ)** | **Objem vody (l)** | **Hmotnost návěsu naplněného vodíkem (kg)** | **Hmotnost návěsu potřebná na převoz 1kg $H_2$ (kg)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 250 | 283 | 34,0 | 17 840 | 25 650 | 90,6 |
| 182 | 311 | 37,3 | 23 191 | 27 442 | 88,2 |

### 6.2.3 Cisterny

Cisterny se na přepravu stlačeného plynného vodíku nepoužívají. Kvůli jejich průměru a vnitřnímu tlaku přepravovaného vodíku by museli být navrženy s velmi tlustou stěnou, což by cisternu prodražilo a hlavně extrémně zvedlo její hmotnost. Cisterny se ovšem hojně využívají pro přepravu zkapalněného vodíku. V Evropě a potažmo České

republice se uvažuje s využíváním vodíku spíše v jeho plynném skupenství, proto tato kapitola jen okrajově představuje možnou alternativu a nepopisuje ji detailněji. Ukázka autocisterny na zkapalněný vodík je uvedena na Obr. 29.

*Obr. 29 Cisterna na přepravu kapalného vodíku [99]*

Na převoz zkapalněného vodíku se používají speciálně upravené cisterny na přepravu kryogenních plynů. Níže jsou v Tab. 10 uvedeny specifikace vybrané cisterny vztažené k množství přepravovaného vodíku. Tento konkrétní typ cisterny je izolován kvůli snížení prostupu tepla do těla cisterny, a tím způsobeného odparu vodíku. Izolace je provedena dvojitým pláštěm a vyplněna vakuem pro zajištění maximální účinnosti.

*Tab. 10 Tlaková úroveň, hmotnost a přepravované množství vodíku [99] [100]*

| **Tlaková úroveň (bar(g)** | **Kapacita $H_2$ (kg)** | **Energie uložená ve vodíku (GJ)** | **Objem vody (l)** | **Hmotnost návěsu naplněného vodíkem (kg)** | **Hmotnost návěsu potřebná na převoz 1kg $H_2$ (kg)** |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 3 500 | 420 | 49 210 | 23 231 | 6,6 |

# 7 Technicko-ekonomický model

V Ústavu procesního inženýrství VUT Brno byl zkonstruován Technicko-ekonomický (T-E) model silniční dopravy pro svoz komunálního odpadu. Popis tohoto modelu je uveden v pojednání dizertační práce Ing. Davida Poula *Výpočtové nástroje pro oběhové hospodářství* [2]. V následujících kapitolách budou vysvětleny principy daného T-E modelu, přičemž v rámci celé kapitoly budou informace čerpány právě ze zmíněné dizertační práce. Autor diplomové práce, která je zde předkládána, není tvůrcem samotného výpočetního modelu, nýbrž ho využil jako nástroj pro analýzu v rámci případové studie, která bude dále popsána. Model byl upraven a použit za účelem provedení konkrétního posouzení.

Modifikací modelu určeného primárně pro svoz odpadu je možné získat T-E model pro silniční transport téměř libovolné komodity. V případě této práce se jedná o transport vodíku. Specifické technické údaje a vstupní parametry pro konkrétní případovou studii byly získány autorem diplomové práce a do výpočetního modelu zapracovány Ing. Davidem Poulem. Tyto vstupy jsou konkrétně specifikovány v dalších kapitolách práce.

Model je vytvořen v programu MS Excel s využitím implementovaného programovacího jazyka Visual Basic of Application (VBA). Model pracuje na základě logického řetězce, kdy uživatel zadá proměnné vstupní parametry, které jsou do ekonomického modelu rovnou převedeny nebo slouží pro načtení údajů z databází. Na základě těchto vstupních dat, kterých model v současné chvíli obsahuje 98, provede výpočetní nástroj ekonomické zhodnocení pomocí předem zadaných výpočtových vzorců a matematických operací a předloží výstupní parametry.

## 7.1 Popis principů T-E modelu a jeho vstupy

Model se především soustředí na silniční dopravu těžkých nákladních vozidel. Z tohoto důvodu jsou v něm zohledněny specifikace, které jsou charakteristické pro tento konkrétní druh dopravy.

V následujících podkapitolách budou detailněji popsány obecné základní prvky T-E modelu a následně i konkrétní hodnoty vstupů a výstupů získaných z ekonomického vyhodnocení T-E modelu.

### 7.1.1 Infrastruktura

Silniční síť České republiky tvoří základní vstupní argumenty pro T-E model. Model pracuje s databází silniční sítě, která do něj byla implementována z dat poskytnutých Centrem pro dopravní výzkum (CDV) z roku 2014. Datová sada je založena na obcích s rozšířenou působností (ORP), tzn. že mapa České republiky je rozdělena do území ORP. Doprava do nebo z libovolné lokality v daném území je zjednodušeně uvažována jako doprava do nebo z daného ORP. V některých případech jsou vybraná velká města, dále členěna na více území např. Brno, Praha, Ostrava. Celkově datová sada obsahuje 230 bodů, které jsou v databázi specifikovány pomocí GPS souřadnic.

Na základě práce s databází CDV bylo stanoveno mezi těmito body celkem 230 835 úseků. V rámci každého úseku jsou popsány jeho charakteristické rysy např. identifikační číslo úseku, délka úseku, typ komunikace (dálnice, silnice I., II., III. třídy, polní cesta, městská cesta), zpoplatněná část, možná maximální rychlost, čas průjezdu úseku, souřadnice počátku a konce úseku atd.

Na základě těchto úseků jsou navrženy trasy vzájemně mezi všemi 230 body, s těmito trasami T-E model nadále pracuje. Trasy jsou vymodelovány z jednoho nebo více úseků mezi každými dvěma body, jeden je počáteční druhý koncový. Charakteristika výsledné trasy je stanovena na základě charakteristik jednotlivých úseků.

### 7.1.2 Dopravní systém

Součásti T-E modelu je široká databáze dopravních prostředků pro všestranné využití převozu nákladu. Soubor dopravních systémů se skládá z několika typů motorových vozidel, přípojných vozidel, nástaveb a kontejnerů, například:

- Automobilový nákladní podvozek, který lze kombinovat s hákovým nakladačem pro kontejnery, případně s nástavbami
- Tahač s návěsem
- Automobilový podvozek s přívěsem

Pro větší variabilitu jsou v modelu zadány technické parametry motorových a přípojných vozidel, eventuálně nákladních nástaveb/kontejnerů v separátních databázích a je možné je libovolně kombinovat. V obou databázích se nachází seznam několika technicky různě řešených typů. U motorových vozidel je základním parametrem, zda se jedná o tahač nebo automobilový podvozek. Pro přípojná vozidla je důležité, zda jde o návěs, nebo přívěs a konstrukční provedení, které může být kontejner, nebo nástavba. U obou typů vozidel jsou v databázi uvedeny základní parametry, tzn. jejich hmotnost a počet náprav, u přípojných vozidel pak hraje důležitou roli jejich objem. Pro zadávání určité dopravní soupravy je ve vstupních údajích nutné určit tři parametry a to typ motorového vozidla, typ přípojného vozidla a typ kontejneru/nástavby.

Pro správné fungování T-E modelu je klíčové důkladně zkoumat a analyzovat technické parametry dopravních souprav, které jsou v něm využity. Tyto parametry hrají zásadní roli při výpočtech nákladů dopravy a jsou nedílnou součástí celkového výsledku. Detailní informace o specifikacích je možné získat z katalogových materiálů o daných dopravních prostředcích. Dále je také klíčové zohlednit spotřebu paliva jako důležitý faktor ovlivňující celkové náklady dopravy. Spotřeba paliva je úzce spojena s efektivitou a výkonností dopravních prostředků a může značně ovlivnit konečný výsledek našeho modelu. Je však třeba zdůraznit, že získání přesných dat o spotřebě paliva může být náročné a v některých případech je nemožné získání pravdivých údajů o konkrétním typu vozidla. Proto je u některých vozidel stanovena spotřeba na základě rešeršních výsledků podobných souprav.

V rámci uváděné případové studie byl zvolen model tahače Volvo FH 16 4x2, který je součástí databáze T-E modelu, uvedený na Obr. 30.

*Obr. 30 Motorové vozidlo vybrané pro případovou studii [101]*

K tomuto tahači byl následně přidán odpovídající návěs, specializovaný na přepravu vodíku. Technické parametry daného návěsu byly doplněny do databáze přípojných vozidel, což umožnilo jej využívat v rámci výpočtu. Získání relevantních technických informací o návěsu však nebylo jednoduché. S ohledem na náročnost získávání těchto údajů byly možnosti výběru návěsů omezeny. Konkrétně byl vybrán návěs Wystrach WyCarrier $H_2$, jehož technické parametry byly volně k dispozici, Obr. 31. Jedná se konstrukčně o kontejnerové řešení umístěné na návěsu, tento typ byl vybrán z důvodu nejnižšího poměru celkové hmotnosti návěsu ku přepravované hmotnosti vodíku, viz kapitola 6.2. V kontejneru je soustava menších tlakových nádob v klecové konstrukci.

V rámci těchto parametrů byly identifikovány klíčové údaje, a to zejména přepravovaná hmotnost vodíku ve váze 1 164 kg, který je uložen pod tlakem 381 bar(a). Celková váha návěsu, včetně vodíku, dosahuje hodnoty 22 500 kg. Tyto informace hrají důležitou roli při řádné simulaci a analýze v rámci našeho T-E modelu, což umožňuje dosažení přesných a relevantních výsledků týkajících se nákladů a efektivity přepravy vodíku.

*Obr. 31 Přípojné vozidlo vybrané pro případovou studii [102]*

### 7.1.3 Časový průběh

Další klíčový faktor je časové vyhodnocení. Základním limitujícím prvkem je v tomto případě délka jedné směny řidiče nákladního automobilu. Ta je legislativně ošetřena v nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 561/2006 – Nařízení o době řízení, přestávkách a době odpočinku a dokumentem pod zkratkou AETR, tedy Evropskou dohodou o práci osádek vozidel v mezinárodní silniční dopravě. Legislativa se zaměřuje na klíčové aspekty, jako je stanovení maximální doby řízení, určení frekvence a délky povinných přestávek, definice nezbytné délky odpočinku a také specifikace situací, kdy je možné odchýlit se od těchto stanovených časových limitů. Pro účely zjednodušení však model počítá se základními limitujícími prvky a možné odchylky zanedbává.

Pro určení ročního pracovního fondu vycházíme z konzervativního přístupu, který předpokládá, že délka jedné denní pracovní směny činí 9 hodin. Avšak existuje možnost využití dvou pracovních směn během jednoho dne, a to zejména v případech, kdy v automobilu pracuje dvojice řidičů a dochází k jejich střídání, nebo dochází ke střídání v počáteční lokalitě. Celkový pracovní fond je pak získán z počtu pracovních dní v roce, kterých je 260. Tento počet odpovídá 52 týdnům v roce a 5 pracovním dnům v týdnu. S ohledem na přítomnost dvou řidičů a pracovní dobu 9 hodin na každého z nich, se otevírá teoretická možnost dosáhnout maximálního počtu odježděných hodin za rok ve výši 4680 hodin. Tato kalkulace vychází z kombinace efektivního využití času a střídání mezi řidiči, což umožňuje dosáhnout optimálního výkonu v průběhu celého pracovního roku.

Model pracuje na základě časového hodnocení délky jednoho cyklu. Cyklus se skládá z několika časových úseků:

- Čas nakládky [min]
- Čas na ujetí dopravní trasy [min]
- Čas vykládky [min]
- Čas na navrácení do výchozí lokace [min]
- Uvažovaná teoretická zdržení [%]

Čas nakládky a vykládky byl vyhledán na základě rešeršní práce a jeho hodnota je totožná pro plnění i vyprazdňování tlakových nádob. Získaná hodnota stáčení je 7,5 kg/min, v případě celého návěsu vychází čas 2,5 hodiny. [103]

Transportní čas je vypočítán na základě znalosti dopravní trasy, viz kapitola 7.1.1, a průměrné rychlosti, kterou se jízdní souprava může po této trase pohybovat. K výslednému času je navíc připočtena rezerva 10 % pro případné dopravní zdržení.

Kombinací výše uvedených časových údajů je možné výpočtem získat klíčový parametr celého T-E modelu, čímž je teoretické vytížení soupravy na jeden cyklus. Neboli jaký čas z maximálního možného pracovního fondu spotřebuje jeden cyklus, viz. rovnice ( 40 ).

$$vytížení_{cyklus} = \frac{T_{cyklus}}{T_{pracovní\ doba}} \qquad (40)$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $vytížení_{cyklus}$ | teoretické vytížení cyklu [%], |
| $T_{cyklus}$ | čas pro jeden cyklus [min], |
| $T_{pracovní\ doba}$ | fond pracovní doby [min]. |

Na základě znalosti tohoto klíčového parametru je možné získat údaj o celkovém možném počtu cyklů za rok, a tím pádem o maximální možné přepravované kapacitě mezi dvěma lokalitami pomocí jedné soupravy. Eventuálně poskytuje tento údaj i informaci o počtu potřebných souprav k dosažení přepravované kapacity za rok, což je názorně předvedeno v kapitole 8.1.3.

### 7.1.4 Náklady

Pro zhodnocení ekonomických ukazatelů vstupují do modelu parametry nákladů, které lze rozdělit na fixní a variabilní.

Fixní náklady jsou primárně spojeny s investicí do dopravních souprav a dále zahrnují náklady, které se udržují relativně stálé bez ohledu na provozní výkony. Tyto náklady zůstávají konstantní a nemění se v závislosti na množství přepraveného materiálu. Mezi základní patří např. poplatky za STK, servis (který je stanoven předpokládanou fixní průměrnou částkou na rok), pojištění, silniční daň atd.

Fixní náklady byly agregovány v rámci celé délky trvání projektu. V rámci modelu je doba trvání projektu stanovena na 30 let, což znamená, že tyto fixní náklady jsou brány v úvahu po celou tuto dobu v součtu. Toto lze ilustrovat následujícím příkladem: model pracuje s životností dopravních systémů, je-li tedy životnost vozidla např. 7 let, pak je nutné pořídit v rámci 30 let 5 vozidel (30 let / 7 let = 4,28, což zaokrouhlíme nahoru na 5). Roční investiční náklady na nákup vozidel jsou tedy spočítány jako celkové investiční náklady na nákup 5 vozidel dělené 30 roky.

U ekonomických parametrů je v rámci modelu také možno uvažovat s případným úvěrem na splátku investičních nákladů a následnými úroky. Pro zjednodušení však v případové studii není s půjčkou uvažováno.

Zásadními variabilními náklady jsou provozní náklady dopravní soupravy. Tato kategorie zahrnuje hlavně náklady spojené s provozem vozidla na cestách. Patří sem zejména spotřeba paliva, oleje a kapaliny AdBlue. Spotřeba paliva je odvozena z údajů dostupných v databázi modelu pro konkrétní motorové vozidlo. Spotřeba oleje a kapaliny AdBlue je následně určena jako určité procento spotřeby paliva; konkrétně 5 % pro oleje a 7 % pro AdBlue z množství spotřebovaného paliva.

Pro výpočet provozních nákladů je kritické určení ceny paliva, stanovením této ceny je jedním ze základních vstupních parametrů modelu. V našem případě byla tato cena stanovena na 40 Kč za litr.

Kromě provozních nákladů jsou další významné variabilní náklady mýtné a poplatky, které jsou závislé na kategorii a délce užívaných silnic, a náklady na nákup pneumatik dle ročního nájezdu vozidla. Tyto faktory jsou nezbytné pro správný výpočet celkových variabilních nákladů a pro účely modelu hrají klíčovou roli při analýze nákladové struktury dopravy.

Mzdové náklady představují další významnou kategorii. V rámci modelu je počítáno primárně se mzdou řidiče, pro případovou studii byla ilustrativně určena hodnota 50 000 Kč měsíčně, kterou si model zvýší o nutné odvody. Avšak v této kategorii jsou zahrnuty i další náklady, správní a provozní režie, které zohledňují náklady na další zaměstnance nezbytné pro provoz firmy. Tyto náklady jsou zjednodušeny a uvedeny jako konstanta.

## 7.2 Výstupní data

Základním výstupním parametrem tohoto modelu jsou údaje týkající se infrastrukturní sítě a vyhodnocení dopravní trasy, vycházející z počátečního a koncového místa. Model analyzuje jednotlivé úseky a sumarizuje je do konečné trasy. Díky databázové znalosti specifikací jednotlivých úseků model určuje celkovou délku trasy a ekonomické náklady trasy (mýtné). Čas který potřebuje jízdní souprava na ujetí dané trasy se určí dle průměrné rychlosti, která je do systému zadávaná manuálně dle kategorie vozidla. Pro těžká nákladní vozidla lze uvažovat následující hodnoty:

- Dálnice I. a II. třídy 80 km/h
- Silnice I. třídy 65 km/h
- Silnice II. třídy 60 km/h
- Silnice III. třídy 30 km/h
- Město 30 km/h
- Les/polní cesty 10 km/h

Dalším důležitým výstupem modelu je mapový podklad trasy. S použitím GPS souřadnic počátečního a koncového bodu a znalostí jednotlivých úseků mezi těmito body je možné generovat mapové výstupy v geografických programech nebo přímo v nástroji MS Excel pomocí grafů.

Na základě hodnocení trasy a vstupních parametrů model generuje sérii zejména ekonomických výstupních parametrů. Tyto výstupy mohou sloužit buď jako konečné výsledky pro daný případ, nebo mohou být matematicky zpracovány pro další parametry. Základními, zejména ekonomickými výstupy modelu, jsou:

- Náklady na 1 tunu [Kč/t]
- Náklady na 1 tunokilometr [Kč/tkm]
- Náklady na 1 cyklus [Kč/cyklus]
- Čas cyklu [min]
- Teoretické vytížení cyklu [-]

Pro konkrétní situace s daným objemem přepravovaného materiálu, lze získat i další důležité výstupní parametry:

- Roční náklady [Kč/rok]
- Počet cyklů [-]
- Roční nájezd [km/rok]
- Teoretické vytížení dopravního systému [-]

Jelikož byly v případové studii vyhodnoceny ekonomické výstupní parametry mezi všemi jednotlivými body, bylo na jejich základě možné stanovit graf nákladů na transport vodíku vůči dopravované vzdálenosti, Obr. 32. Náklady jsou prezentovány na tunokilometr - osa y, na ose x je pak vynesena vzdálenost, na kterou je vodík transportován.

*Obr. 32 Závislost nákladů na délce trasy*

Cena za dopravu jedné tuny vodíku na vzdálenost jednoho kilometru má zajímavou charakteristiku. Při kratších vzdálenostech je tato cena relativně vysoká, neboť náklady spojené s úvodní investicí jsou rozloženy na menší počet ujetých kilometrů. S postupem vzdálenosti však tyto investiční náklady (fixní náklady) představují menší část z celkových nákladů a hlavní roli hrají variabilní náklady, konkrétně náklady na spotřebu.

Důležitým aspektem této cenové dynamiky jsou dva zřetelné "skoky" v ceně. Tyto změny nejsou lineární, nýbrž nastávají na dvou klíčových místech: přibližně při dopravě na vzdálenostech 15-25 km a 85-130 km. Při detailním zkoumání bylo odhaleno, že tyto skoky jsou způsobeny specifickým faktorem. Tento faktor je spojen s teoretickým vytížením cyklu z pohledu pracovní doby, což zahrnuje průměrnou rychlost soupravy na daném úseku a dostupný pracovní fond řidičů.

Konkrétně jde o to, že řidiči jsou schopni v rámci dvou pracovních směn (1 pracovní den), tedy za 18 hodin, zvládnout různý počet cyklů na dané trase. To v praxi znamená, že cyklus může být absolvován za jeden den jednou, dvakrát nebo třikrát. Důležité je poznamenat, že tato skoková změna není pouze na jednom místě, nýbrž se nachází v přechodové oblasti. To je způsobeno tím, že na několika trasách s podobnou délkou mohou řidiči dosahovat různých průměrných rychlostí, což má vliv na to, kolik cyklů mohou za den dokončit.

# 8 Případová studie

S využitím matematického modelu, popsaného v kapitole 7 je případová studie zaměřena na ekonomické zhodnocení situace dopravy vodíku. Studie porovnává využití čistě silniční dopravy s kombinovaným transportem pomocí plynovodu a silniční dopravy. V případě plynovodné soustavy se uvažuje v rámci studie s futuristickým, avšak reálným scénářem, s využitím páteřní sítě rozvodů zemního plynu pro rozvod vodíku. Toto řešení je blíže popsané v kapitole 8.1.2. Druhou podstatnou úvahou pro případovou studii je rozšíření počtu spotřebitelů vodíku a jejich rozložení v rámci celé České republiky, např. vybudování infrastruktury čerpacích stanic vodíku pro automobily.

V podkapitole 8.1 studie představuje ukázkovou metodu práce s modelem pro výpočet finančních nákladů dopravy vodíku mezi dvěma určitými body. V této části případové studie je počítána i roční spotřeba vodíku v dané lokalitě a s tím spojené roční absolutní náklady na transport.

V podkapitole 8.2 jsou předneseny výsledky nákladů na transport vodíku v rámci celé České republiky. Výpočty a principy vycházejí z podkapitoly 8.1, místo zaměření na jednu lokalitu jsou provedeny pro všechna ORP České republiky a jsou uvedeny v relativních hodnotách.

## 8.1 Aplikace modelu pro vybraný provoz

Pro demonstraci využití modelu při stanovení nákladů při transportu roční spotřeby vodíku silniční dopravou byl v rámci této práce uvažován teplárenský objekt. Avšak stejně tak by mohl být vybrán jiný objekt spotřebovávající vodík např. čerpací stanice vodíku, chemický závod na výrobu amoniaku, palivový článek atd.

Teplárna využívá jednu z možných aplikací vodíku, kterou je jeho spalování v kotli. Přitom se uvolní energie potřebná pro výrobu tepla v teplárnách a elektrárnách. Z tohoto důvodu byl vybrán teplárenský objekt jako spotřebitel transportovaného vodíku. Okruh možných vybraných závodů byl dále zúžen na teplárny, které mají jako primární zdroj tepla, alespoň v některém svém kotli, zemní plyn. Předpokládá se totiž, že úprava kotle na spalování vodíku místo zemního plynu bude méně nákladná než úprava kotle na spalující uhlí.

Z důvodů firemního utajení není možné získat přesné údaje o provozech, kotlích, spotřebě, typu paliva atd. u všech teplárenských objektů. Zejména na základě tohoto limitujícího prvku a splnění výše popsaných kritérií byla vybrána Teplárna Kladno s.r.o. jako referenční podnik.

Teplárna Kladno má instalovaný kogenerační výkon 524 MW, který zajišťuje dohromady 5 výrobních bloků. Roční výroba tepla se pohybuje v rozmezí 0,8–1 PJ a produkce elektrické energie je cca 2 –2,2 TWh. Teplárna využívá jako primární zdroj energie hnědé uhlí a sekundárním zdrojem je zemní plyn. Nicméně v rámci této případové studie je uvažována pouze náhrada spotřeby zemního plynu. [104]

### 8.1.1 Stanovení spotřeby vodíku

Pro účely případové studie bylo zásadní získání údaje roční spotřeby zemního plynu, která pro Teplárnu Kladno činila v roce 2021 1 843 755 $m^3$. [105] Na základě výhřevnosti zemního plynu, kapitola 2.2, bylo vypočteno celkové množství energie dodané zemním plynem za rok., viz ( 41 ):

$$E_{zemní\ plyn} = \frac{V_{zemní\ plyn}}{Q_{zemní\ plyn}} \qquad (41)$$

$$E = 1\,843\,755\ m^3/rok \times 36{,}6\ MJ/m^3 = 67\,481 GJ/rok$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $E_{zemní\ plyn}$ | dodané množství energie ve formě zemního plynu [GJ/rok], |
| $V_{zemní\ plyn}$ | dodané množství zemního plynu [$m^3$/rok], |
| $Q_{zemní\ plyn}$ | výhřevnost zemního plynu [MJ/$m^3$]. |

Následně bylo reverzně vypočítáno množství potřebného vodíku, který nahradí zemní plyn při zachování stejného dodaného množství energie, dle vztahu ( 42 ):

$$m_{vodík} = \frac{E_{\text{zemní plyn}}}{Q_{vodík}} \qquad (42)$$

$$m_{vodík} = \frac{67\,481\ GJ/rok}{0{,}12\ GJ/kg} = 562{,}3\ t/rok$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $m_{vodík}$ | dodané množství vodíku za rok [t/rok], |
| $Q_{vodík}$ | výhřevnost vodíku [GJ/kg]. |

Pro jednoduchost se předpokládá rovnoměrná dodávka vodíku v průběhu roku.

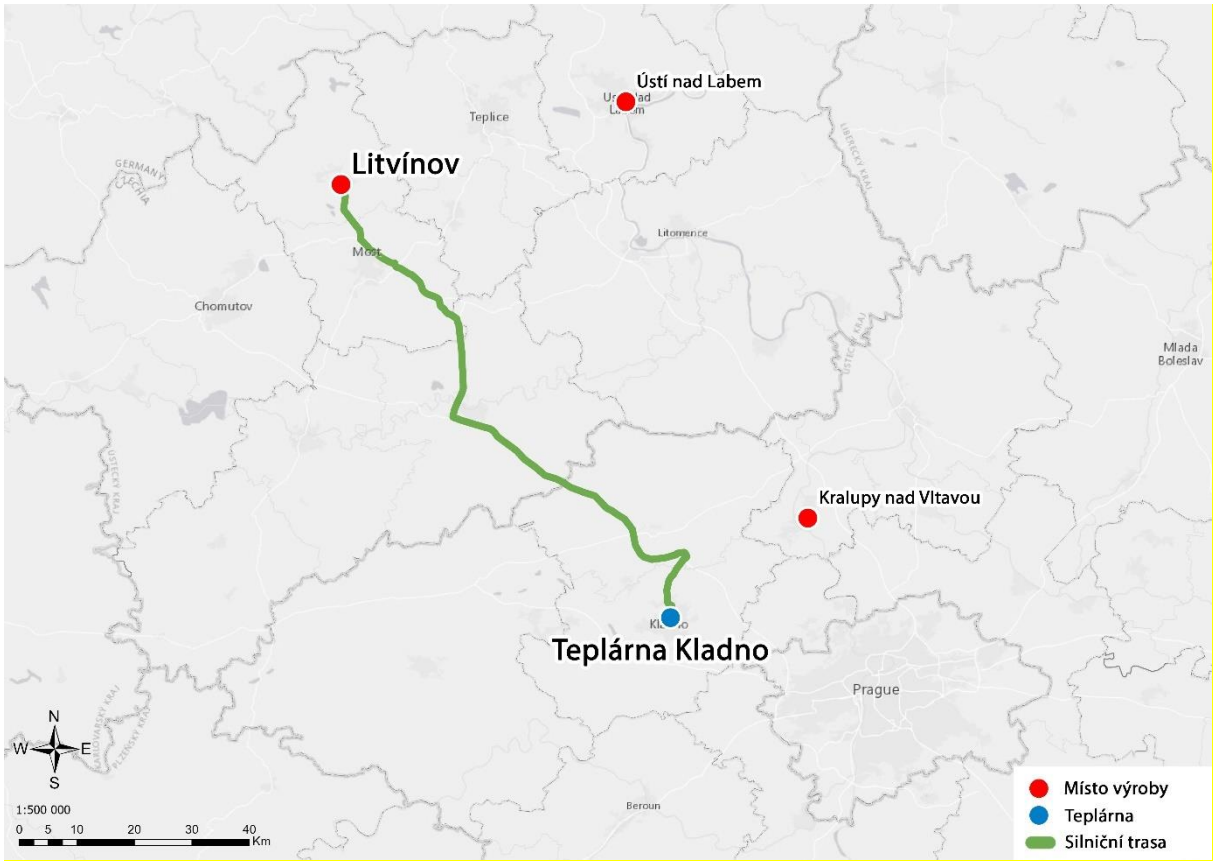
### 8.1.2 Logistika vodíku

Pro účely získání ekonomického vyhodnocení dopravy stanoveného množství vodíku za rok je nutné stanovit logistická místa, mezi kterými bude přeprava modelována. Oběma místům musí být přiřazena příslušná ORP, jakožto nejpřesnější identifikace lokality, kterou daný model umožňuje. Místo spotřeby zvolené výše, Teplárna Kladno, leží v ORP Kladno.

Pro určení počátečního místa byla zvolena jedna ze současných lokalit výroby vodíku, dle kapitoly 2.3.4. Jelikož se jedná o nahrazení zemního plynu vodíkem, byly vyřazeny provozy, které vyrábí vodík právě ze zemního plynu z důvodu nízké efektivity systému. Z hlediska nejmenší dopravní vzdálenosti mohl být vybrán provoz v Kralupech, ale

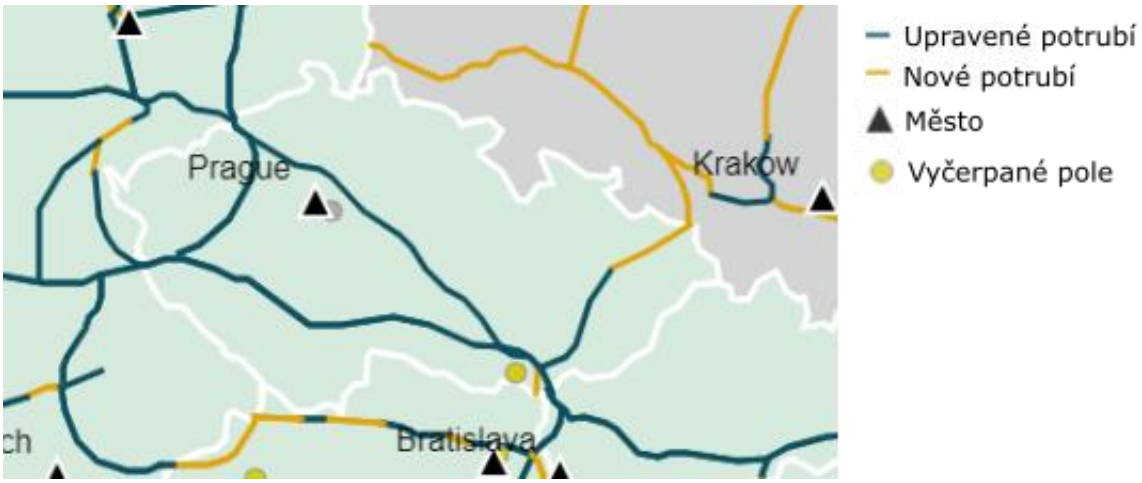
místo toho byl upřednostněn závod Unipetrol v Litvínově a to na základě největší produkce vodíku za rok v České republice a stále ještě přiměřené vzdálenosti od spotřebitele. Podnik se nachází v ORP Litvínov, která byla zvolena jako referenční místo výroby a tedy i počáteční bod pro dodávku vodíku pro Teplárnu Kladno.

Model následně určil optimální trasu mezi těmito body na základě vlastní databáze silniční sítě s ohledem na rychlost přepravy a limitující parametry, viz Obr. 33. Silniční trasa mezi těmito dvěma body je dlouhá 76,54 km.




*Obr. 33 Silniční trasa Litvínov-Kladno*

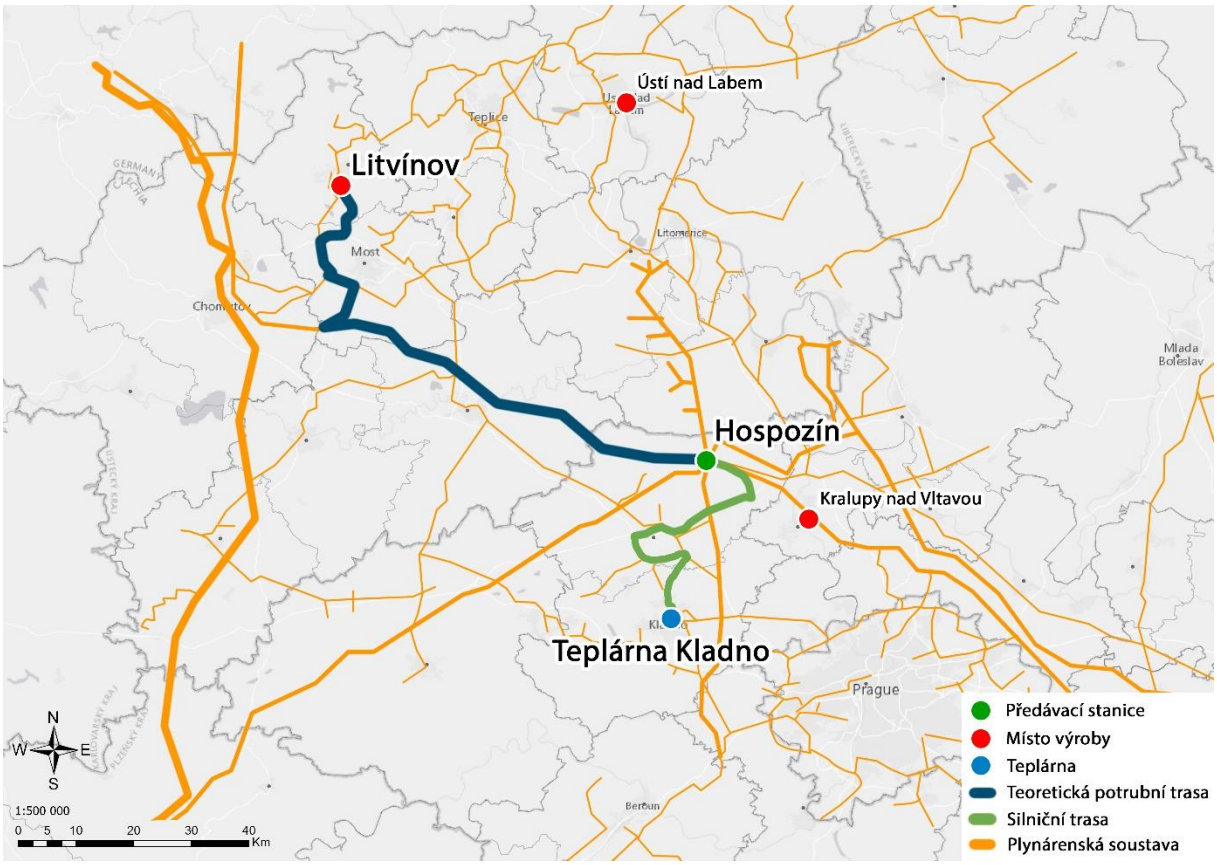
Pro porovnání nákladů při transportu vodíku byla dále zvoleno jako alternativa kombinovaná doprava – potrubní a následně silniční, jelikož se jedná o nejpravděpodobnější budoucí scénář pro přepravu vodíku v rámci ČR. Využívané potrubní trasy vycházejí ze strategických cílů iniciativy EHB, blíže pospané v kapitole 6.1.1. Při detailním pohledu na Českou republiku v rámci cílů EHB, Obr. 34, je patrné, že se uvažuje zejména s využitím stávající páteřní plynárenské sítě pro zemní plyn. Páteřní síť je tvořena tranzitní soustavou plynovodů (DN 800–1400, 6,1–8,4 MPa), ke které je přičtena část vnitrostátního velmi vysokotlakého plynovodu (VVTL – DN 700, 4,0–6,1 MPa), jenž spojuje Jihomoravský a Moravskoslezký kraj.




*Obr. 34 Možné uvažované využití páteřní sítě plynovodu v ČR pro dopravu vodíku [83]*

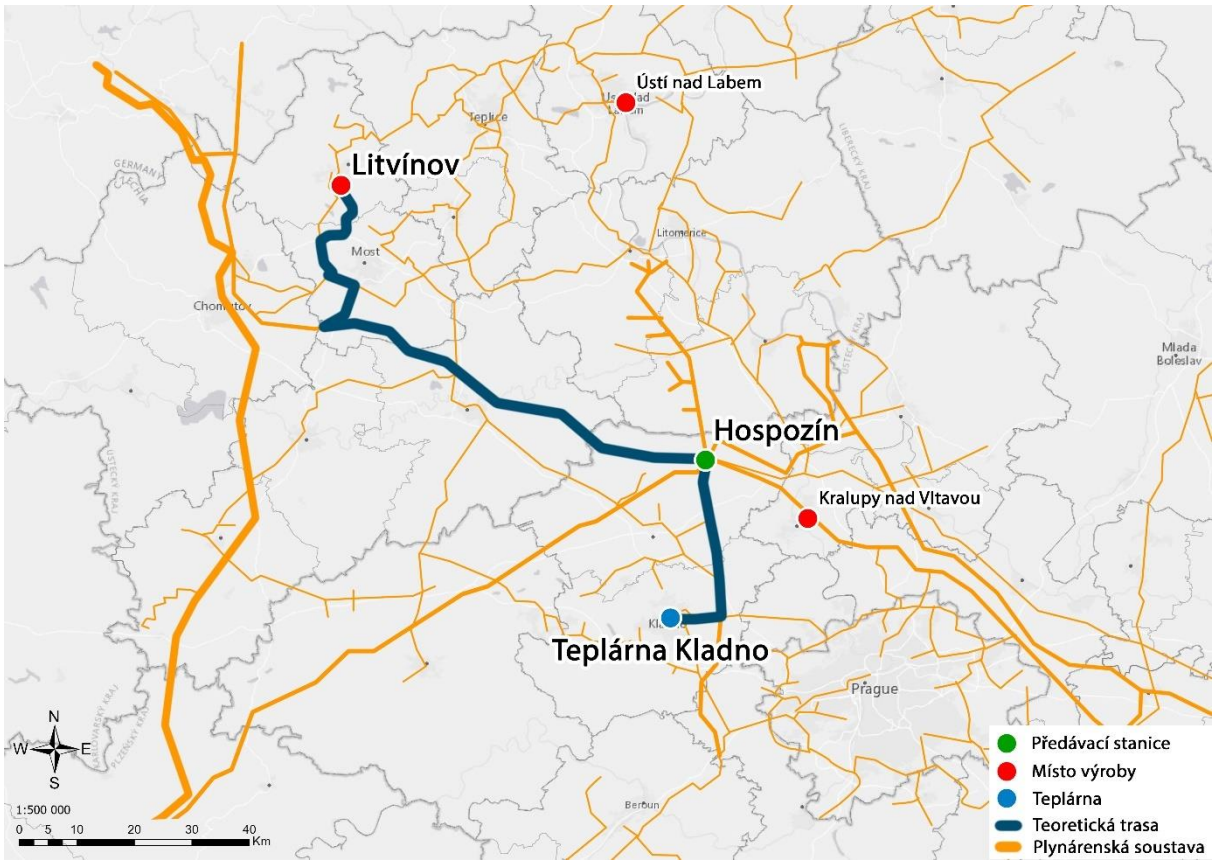
Součástí této páteřní sítě plynovodu jsou místa, kde je možné se na páteřní trasu napojit, respektive z ní odpojit a slouží tedy jako zdroj vodíku pro lokální distribuci. V rámci modelu byly pro tyto účely stanoveny stávající předávací stanice, ve kterých dochází k odpojení do distribučních sítí zemního plynu. U jednotlivých předávacích míst musí být vybudovány plnící stanice nákladních aut pro vodík, tento náklad je však v rámci práce zanedbán. V modelu je dále uvažované, že zdrojem vodíku jsou stávající výrobny, kapitola 2.3.4. Ty však neleží přímo na páteřní soustavě. Je tedy nutné přidat do případové studie úvahu, že tyto podniky budou napojeny k nejbližšímu místu na páteřní síti upraveným vnitrostátním distribučním plynovodem o menším tlaku (do 4 MPa), nebo bude vybudován nový plynovod. V případě výroby vodíku v Litvínově je v rámci modelu napojení do páteřní sítě přes stávající vysokotlaký plynovod (VTL, 2,5-4MPa).

Vodík vyrobený v lokalitě Litvínov bude transportován potrubní sítí do existující předávací stanice Hospozín, která leží na páteřní plynárenské síti. Využívaná potrubní trasa byla stanovena na 75 km. Následně bude vodík transportován silniční dopravou do teplárny Kladno. Silniční trasa mezi těmito body je 36,6 km. Mapa kombinované dopravy je znázorněna na Obr. 35.




*Obr. 35 Kombinovaná trasa (silniční a potrubní) Litvínov-Kladno*

Jelikož Kladno leží také na plynárenské soustavě VTL (2,5-4MPa), lze dopravovat vodík z Litvínova pouze za pomoci potrubní dopravy. Pro účely porovnání byl tedy vytvořen třetí scénář transportu. Využívaný plynovod je naznačen na Obr. 36.




*Obr. 36 Potrubní trasa Litvínov-Kladno*

### 8.1.3 Analýza výsledků modelování

Pro trasu transportu vodíku čistě silniční dopravou z místa výroby v podniku v Litvínově do místa spotřeby v Kladně byly T-E modelem stanoveny a jsou stanoveny v Tab. 11.

*Tab. 11 Výstupy modelu pro silniční dopravu Litvínov-Kladno*

| | | |
|---|---|---|
| Průměrná rychlost Pro jednoduchost se předpokládá rovnoměrná dodávka vodíku v průběhu roku. | 63,1 | km/h |
| Náklady na 1 tunu | 7 168 | Kč/t |
| Náklady na tunokilometr | 94 | Kč/tkm |
| Náklady na 1 cyklus | 8 343 | Kč/cyklus |
| Čas cyklu | 476 | min |
| Teoretické vytížení cyklu | 0,19 | % |

Na základě znalosti potřebného množství transportovaného vodíku a přepravované hmotnosti vodíku v 1 cyklu je možné stanovit potřebný počet cyklů za rok a následně vypočítat zásadní ekonomické a dopravní ukazatele pro dodávku roční poptávky

vodíku v daném podniku. Výpočet těchto ukazatelů je proveden dle následujících rovnic ( 43 )–( 46 ) :

$$N_{cykly} = \frac{m_{vodík}}{m_{cyklus}} \quad (43)$$

$$vytížení_{souprava} = N_{cykly} \times vytížení_{cyklus} \quad (44)$$

$$N_{rok} = N_{cykly} \times N_{cyklus} \quad (45)$$

$$R_{souprava} = N_{cykly} \times 2 \times L_{trasa} \quad (46)$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $m_{vodík}$ | dodané množství vodíku za rok [t/rok], |
| $m_{cyklus}$ | přepravované množství vodíku na 1 cyklus [t/cyklus], |
| $N_{cykly}$ | počet cyklů [-], |
| $vytížení_{soupravy}$ | teoretické vytížení soupravy [%], |
| $vytížení_{cyklus}$ | teoretické vytížení cyklu [%], |
| $N_{rok}$ | roční náklady [Kč/rok], |
| $N_{cyklus}$ | náklady na 1 cyklus [Kč/cyklus], |
| $R_{souprava}$ | roční nájezd soupravy [km/rok], |
| $L_{trasa}$ | délka trasy [km]. |

Vypočítané ukazatele jsou shrnuty v Tab. 12.

*Tab. 12 Výsledky výpočtů pro silniční dopravu Litvínov-Kladno*

| | | |
|---|---|---|
| Počet cyklů | 484 | - |
| Teoretická vytíženost soupravy | 93,1 | % |
| Roční náklady | 4,04 | mil. Kč/rok |
| Roční nájezd | 37 045 | km/rok |

Dodávku potřebného množství vodíku dokáže obsloužit 1 jízdní souprava a zároveň její roční vytížení bude 93,1 % z maximálního ročního časového fondu této soupravy (respektive jejich řidičů). Tzn. že 6,9 % z maximální ročního časového fondu jízdní soupravy je možné využít pro dopravu vodíku do jiné lokality. V případě, že by nedošlo k využití soupravy pro jinou lokalitu, tento čas by byl mrhán a náklady na dopravu vodíku do Teplárny Kladno by narostly, jelikož by se do nich musely rozpustit i náklady počítané na těchto 6,9 %.

V případě kombinovaného transportu vodíku potrubím a silniční dopravou jsou výstupy pro silniční část dopravy z T-E modelu uvedeny v Tab. 13.

*Tab. 13 Výstupy modelu pro silniční dopravu Hospozín-Kladno*

| | | |
|---|---|---|
| Průměrná rychlost | 59,3 | km/h |
| Náklady na 1 tunu | 5 317 | Kč/t |
| Náklady na tunokilometr | 145 | Kč/tkm |
| Náklady na 1 cyklus | 6 190 | Kč/cyklus |
| Čas cyklu | 410 | min |
| Teoretické vytížení cyklu | 0,19 | % |

Výsledky pro stanovení vytížení dopravního prostředku a náklady na jeho provoz jsou uvedeny v Tab. 14.

*Tab. 14 Výsledky výpočtů pro silniční dopravu Hospozín-Kladno*

| | | |
|---|---|---|
| Počet cyklů | 484 | - |
| Teoretické vytížení soupravy | 93,1 | % |
| Roční náklady | 3,00 | mil. Kč/rok |
| Roční nájezd | 17 714 | km/rok |

Pro stanovení nákladů, které budou více reflektovat realitu, je nutné k nákladům silniční dopravy připočítat i přidružené náklady na dopravu plynovodem z míst výroby do předávacích stanic. Plynovod mezi těmito body byla vymodelována ve webové aplikaci mapy.cz [106], která stanovila délku této trasy. Z rešeršní práce byla stanovena cena na přepravu vodíku potrubím na 3,16 Kč/tkm. [107]. Cena dopravy vodíku potrubím byla stanovena dle následujícího vzorce ( 47 ).

$$N_{potrubí} = \frac{L_{potrubí}}{N_{potrubí\ 1\ km}} \qquad (47)$$

$$N_{potrubí} = 75\ km \times 3{,}16\ Kč/tkm\ = 237\ Kč/t$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $N_{potrubí}$ | celkové náklady na dopravu potrubím [Kč/t], |
| $N_{potrubí\ 1\ km}$ | náklady na dopravu potrubím [Kč/tkm], |
| $L_{potrubí}$ | délka potrubí [km]. |

Při dopravě 562,3 t/rok jsou náklady za dopravu potrubím na trase Litvínov-Hospozín 0,13 mil. Kč za rok. Kombinované roční náklady při silniční a potrubní dopravě jsou 3,13 mil. Kč.

Výsledky třetího scénáře, kdy je vodík dopravován mezi Litvínovem a Kladnem pouze za pomoci potrubní dopravy byly stanoveny na základě délky této trasy 95 km. Náklady na roční dodávku plynu činí 0,17 mil. Kč/rok.

Souhrnná Tab. 15 pro všechny tři pospané scénáře ukazuje jejich srovnání. Z porovnání vychází, že ekonomicky nejvýhodnější je dopravovat vodík čistě potrubní sítí. Tato doprava má však předpoklad, že výrobní a spotřebitelský provoz jsou propojeny potrubní sítí, což může být hlavní překážka. Pokud tyto provozy propojeny nejsou, musí být vybudován plynovod nový, což s sebou nese značné investiční náklady a časovou prodlevu kvůli vyprojektování plynovodu a schvalovacím procesům dokumentace. Z těchto důvodů je v rámci celé práce brán takový důraz na silniční dopravu, která má sice mnohem vyšší náklady, ale distribuční síť, kterou tvoří silnice, je v rámci České republiky poměrně hustě vybudována. Největší výhoda silniční dopravy tedy spočívá v možnosti dopravovat do téměř libovolné lokality a zároveň zahájit dopravování v krátkém čase. Nejpřijatelnější metodou dopravy se tedy jeví kombinovaná, která snižuje celkové náklady na dopravu využitím dopravy vodíku potrubím a zároveň přináší velkou flexibility obsluhy spotřebitelů díky silniční dopravě.

*Tab. 15 Srovnání nákladů silniční, kombinované a potrubní dopravy v Kč/rok*

| | | |
|---|---|---|
| Roční náklady pro pouze silniční dopravu | 4,04 | mil. Kč/rok |
| Roční náklady pro kombinovanou dopravu | 3,13 | mil. Kč/rok |
| Roční náklady pro pouze potrubní dopravu | 0,17 | mil. Kč/rok |

Pro potřeby srovnávání s jinými energetickými zdroji a stanovení o kolik zdražuje transport dopravovanou energii ve formě vodíku je nutné převést výše zmíněné hodnoty na náklady na jednotku energie, Kč/MWh. Tyto údaje jsou uvedeny v Tab. 16.

*Tab. 16 Srovnání nákladů silniční, kombinované a potrubní dopravy v Kč/MWh*

| | | |
|---|---|---|
| Náklady pro pouze silniční dopravu | 215,6 | Kč/MWh |
| Náklady pro kombinovanou dopravu | 167,1 | Kč/MWh |
| Náklady pro pouze potrubní dopravu | 9,1 | Kč/MWh |

## 8.2 Aplikace modelu pro celostátní perspektivu: Česká republika

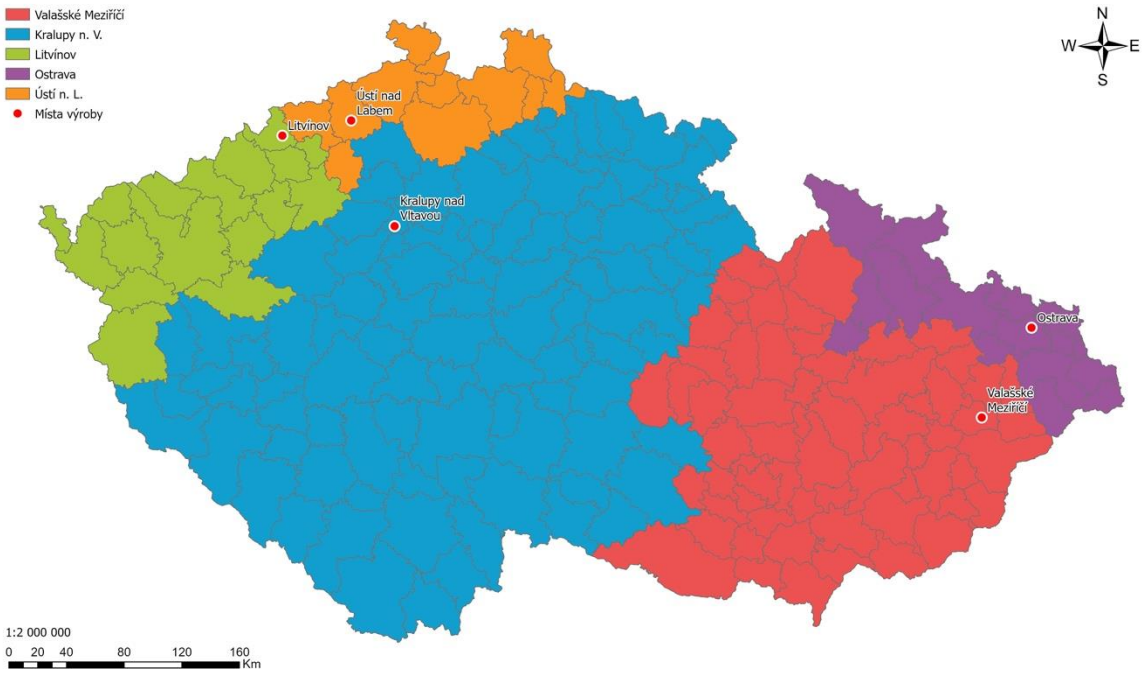
Druhá část případové studie je zaměřena na aplikaci modelu při modelování finančních nákladů transportu vodíku v rámci České republiky. Náklady jsou uvažovány zejména pro silniční dopravu z důvodů specifikace modelu pro tento typ dopravy. V poslední části je uvedeno srovnání nákladů při použití pouze silniční dopravy a při využití dopravy kombinované – potrubím a po silnici.

Jelikož je oblast vodíkového hospodářství teprve v rozvoji, nejsou v modelu uvažována konkrétní místa spotřeby, ale výsledky jsou prezentovány s relativními hodnotami.

### 8.2.1 Logistické uzly

Pro účely studie musely být vybrány výchozí body dopravy, zdroje vodíku. Tyto body byly stanoveny na základě aktuálních hlavních producentů vodíku v České republice. Producenti vodíku byli stanoveni dle kapitole 2.3.4 a jedná se o lokality Litvínov, Kralupy nad Vltavou, Ústí nad Labem, Ostrava a Valašské Meziříčí. Z těchto výrobních závodů je uvažován transport do celé České republiky. Vyjmenovaní producenti vyrábí v převážné většině vodík pro vlastní spotřebu a není proto možné uvažovat, že jejich kompletní výrobní kapacita bude v budoucnu distribuována. Pro budoucí použití modelu bude nutné přidat výrobní místa vodíku, která budou nově vybudována, a to primárně právě pro distribuci vodíku spotřebitelům mimo dané závody.

Výpočty byly provedeny v rámci celé České republiky, která je pro naši potřebu rozdělena na základě ORP. V první části byly jednotlivým ORP přiřazeny výrobní závody, ze kterých budou obsluhovány. Výběr byl proveden na základě nejkratších tras vybraných z dostupné silniční sítě modelu mezi místem výroby a obslouženým ORP. Výběr s přihlédnutím pouze na výrobní lokality vodíku a silniční síť České republiky je odůvodněný faktem, že pro tento typ transportu nejsou potřebné žádné investice v rámci dopravní sítě a popisuje tedy stav, který je možný aktuálně realizovat. Na základě tohoto výběru byly ORP rozděleny do 5 skupin obslužných míst. Barevné rozdělení jednotlivých ORP s označením příslušného obslužného místa je uvedeno na Obr. 37.



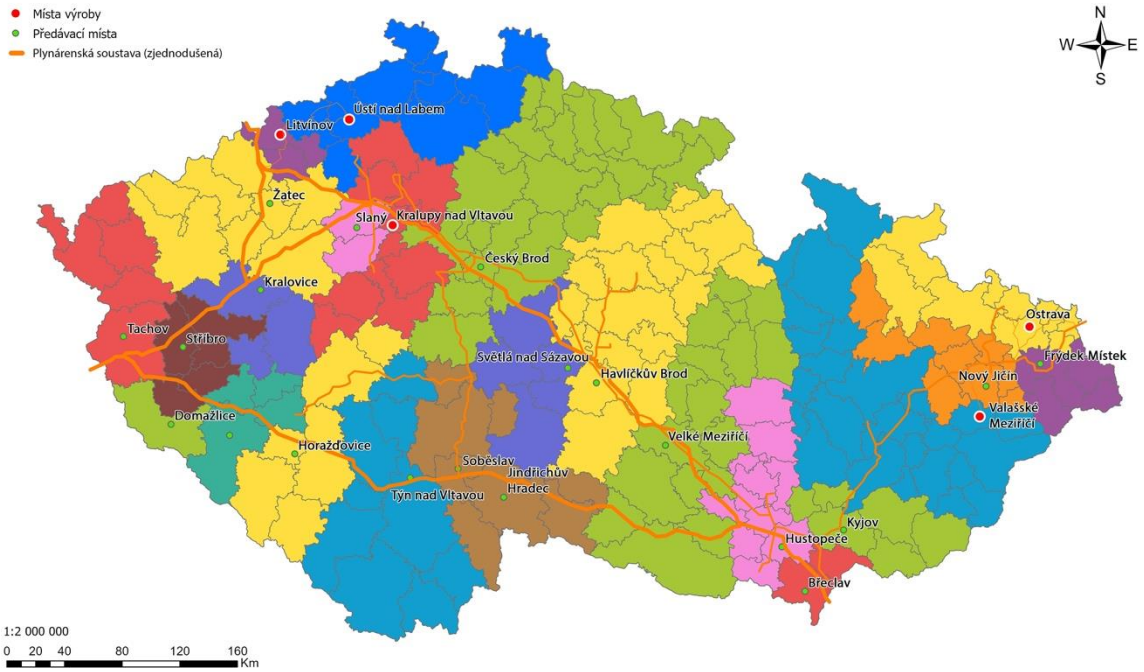

*Obr. 37 Rozdělení ORP dle distribučního místa*

Pro realističtější rozdělení by bylo nutné dále uvažovat výrobní kapacitu zdrojů vodíku, a tím pádem maximální možný počet obsloužených ORP, cenovou hladinu daných podniků, technickou připravenost atd. Z důvodů modelování relevantních nákladů,

nejsou výše zmíněné limitní podmínky zohledňovány, protože není stanoveno potřebné množství vodíku v jednotlivých ORP.

Ve druhé části je uvažovaný budoucí scénář v rámci rozvoje vodíkového hospodářství, který využívá stávající plynárenskou soustavu. Proto byl pro účely srovnání do modelu tento stav zahrnutý. Pracuje na základě využití páteřní sítě rozvodů vodíku a jeho následnou distribucí pomocí silniční dopravy, blíže je tento proces včetně popisu páteřní sítě specifikován v kapitole 8.1.2.

Obr. 38 ukazuje rozdělení České republiky do územních celků podle místa, ze kterých jsou zásobována vodíkem. Distribučním místem pro tuto druhou část jsou kromě podniků vyrábějící vodík (označeny červenou tečkou) i předávací stanice (označeny zelenou tečkou). Jelikož však model pracuje na úrovni ORP, nejsou v něm stanoveny přesné lokace a názvy závodů a předávacích stanic, ale místo toho je zde uvedena ORP, ve kterých se daná stanice nachází. Ve skutečnosti leží předávací stanice přímo na trase plynovodu. U všech výrobních podniků je předpoklad vybudování plynovodu mezi místem výroby a nejbližším místem na páteřní trase plynovodu, tak aby výrobní závody mohly do tohoto rozvodu dodávat vodík, tento náklad však není v rámci T-E modelu zahrnutý. Na mapě je zároveň vyznačena stávající, zjednodušená plynárenská soustava, která by měla znázorňovat uvažovaný páteřní potrubní rozvod.




*Obr. 38 Rozdělení ORP dle distribučního místa s využitím páteřní sítě plynovodu*

## 8.2.2 Analýza distribučních nákladů

Pro každé ORP byly vypočítány náklady na dopravu vodíku z místa výroby, respektive z místa distribuce vodíku. Výpočty byly provedeny dle stejných výpočtů, které jsou uvedeny v kapitole 8.1.3. Pouze některé ORP mají v současné době objekty vhodné

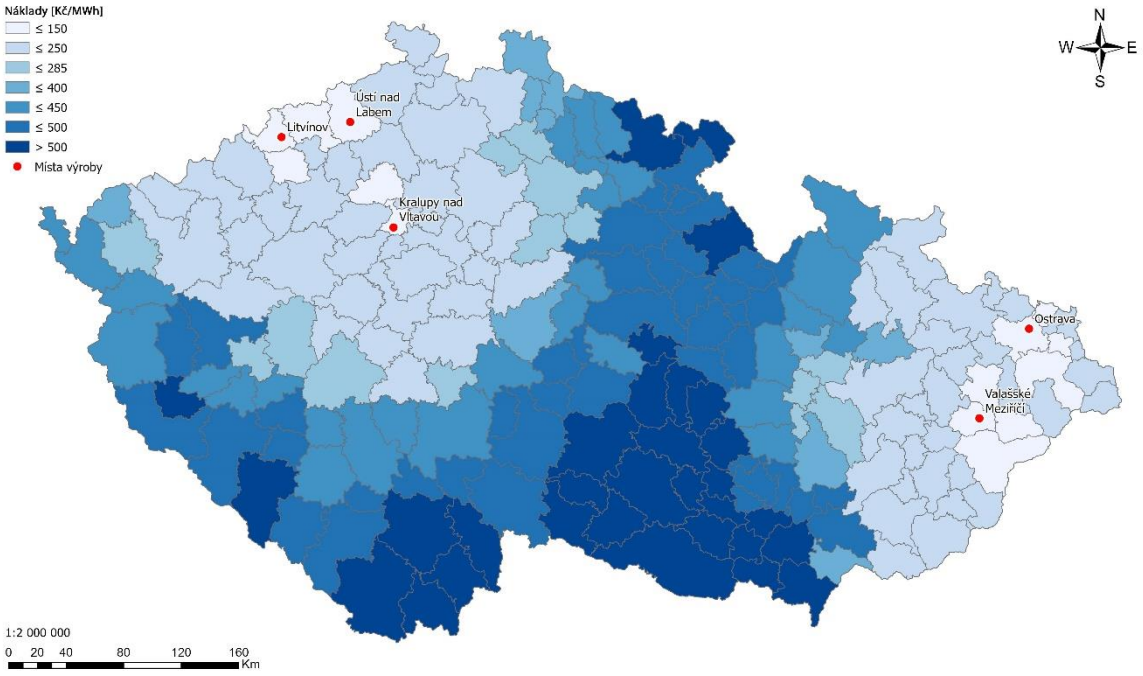
pro spotřebu vodíku, a proto jsou náklady vypočítány pro všechny ORP relativní, nejedná se o výpočet konkrétního dodávaného množství vodíku. Z T-E modelu je získána hodnota nákladů silniční dopravy při dopravě tuny vodíku do jednotlivých ORP. Pro možnost srovnávání s jinými nosiči energie jsou hodnoty převedeny na MWh dle níže uvedeného výpočtu ( 48 ).

$$N_{doprava,ener} = \frac{N_{doprava,hmot}}{Q_{vodík}} \qquad (48)$$

Kde příslušné symboly mají význam:

| | |
|---|---|
| $N_{doprava,ener}$ | náklady na dopravu vztažené k energii [Kč/MWh], |
| $N_{doprava,hmot}$ | náklady na dopravu vztažené k hmotnosti [Kč/t], |
| $Q_{vodík}$ | energetická hustota vodíku [km]. |

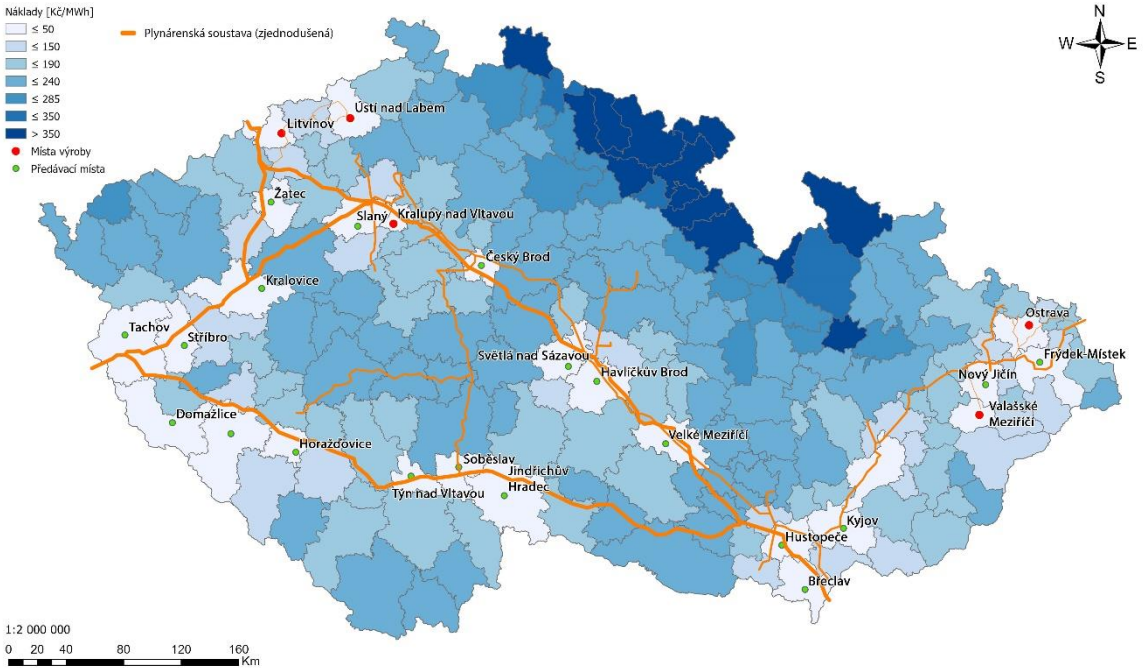
Na základě vypočtených hodnot byla vytvořena mapa ČR rozdělující ORP do škály podle nákladů na dopravu do dané lokality, Obr. 39. Tato mapa je stanovena pro první část, kde se uvažuje s distribucí pro celou ČR pouze z míst výroby vodíku. Místa označená tmavšími odstíny modré značí vyšší náklady na dopravu vodíku do této lokality, oproti tomu světle modrá místa značí lokality s nízkými náklady na dopravu. Barevná škála je dána zejména vzdáleností lokality od místa výroby vodíku.




*Obr. 39 Náklady na dopravu vodíku do jednotlivých ORP*

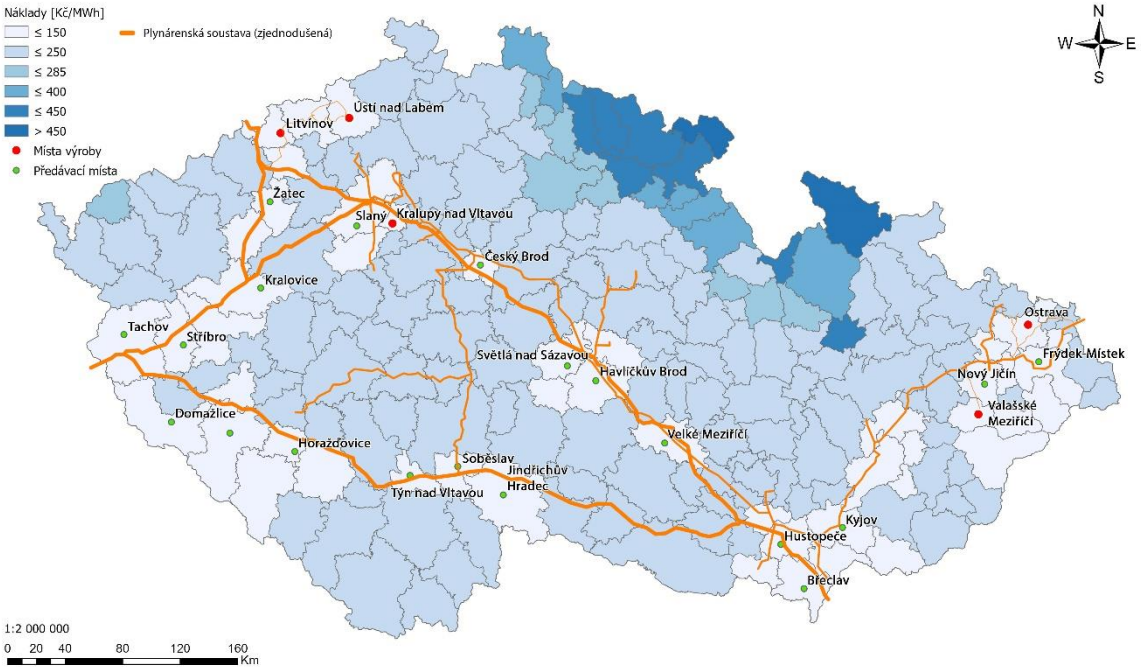
Uvažuje-li se o využití páteřní plynárenské sítě, náklady na dopravu vodíku se v některých lokalitách sníží. V některých ORP nastane totiž situace, kdy je vzdálenost z předávacích míst na páteřní síti kratší než z míst výroby a tím se sníží náklady na dopravu. Při stanovení celkových nákladů je samozřejmě opět nutné k nákladům silniční dopravy připočítat i náklady na využití potrubní sítě. Postup stanovení nákladů

na potrubní dopravu byl následující: jednotlivým distribučním bodům byla přidělena místa výroby vodíku, která je budou zásobovat, a to dle jejich nejkratší trasy potrubní sítě mezi nimi. Délka jednotlivých tras potrubí byla aproximována na základě znalosti využívané potrubní sítě a byla vymodelována body ve webové aplikaci mapy.cz. [106], která následně určila délku mezi počátečním a koncovým bodem. Cena dopravy vodíku potrubím byla stanovena pro všechny předávací stanice jednotlivě, blíže je tento postup popsán v kapitole 8.1.3. Celkové náklady na dopravu vodíku v rámci České republiky s využitím kombinované dopravy jsou zobrazeny na Obr. 40, včetně předávacích míst a využívané zjednodušené plynárenské sítě. Pro detailnější grafické škálování lokalit byla zvolena stupnice s jinými rozsahy oproti předchozímu případu. Pro možnost srovnání je zde uvedena i mapa se stejnou škálou na Obr. 41.




*Obr. 40 Náklady na dopravu vodíku do jednotlivých ORP s využitím páteřní sítě plynovodu**

**Předávací místa jsou znázorněna pouze jako místo ORP, reálné předávací místo leží na trase plynovodu*




*Obr. 41 Náklady na dopravu vodíku do jednotlivých ORP s využitím páteřní sítě plynovodu – původní stupnice*

Kvůli lokalizaci výrobních podniků na východě a západě České republiky jsou v těchto místech náklady na dopravu vodíku nízké. Oproti tomu v jižní a severní části České republiky chybí vodíková infrastruktura, díky čemuž jsou náklady na dopravu vodíku výrazně vyšší. Z porovnání map nákladů na distribuci vodíku vyplývá, že při využití potrubní sítě a předávacích stanic, se výrazně sníží náklady na distribuci vodíku na jihu České republiky, jelikož tímto územím vede plynovod, který může dané území zásobovat.

# 9 Závěr

Úvodní rešeršní část diplomové práce úspěšně dosáhla jednoho ze svých hlavních cílů – poskytnutí komplexního přehledu o metodách získávání vodíku s důrazem na využití odpadu. V současném období se v České republice převážně spoléhá na získávání vodíku zpracováním fosilních paliv. Avšak v blízké budoucnosti se otevírá možnost výstavby elektrolyzérů poháněných především obnovitelnými zdroji energie, čímž by mohl být produkován tzv. zelený vodík. V této oblasti se aktuálně připravuje potřebná dokumentace, včetně případových studií, stavebních povolení a realizační dokumentace. Výzkum v oblasti výroby vodíku z odpadu zatím zůstává v České republice na počátku svého vývoje, a podobně je tomu i na globální úrovni. Zajímavé výsledky a postupy však lze nalézt především v USA a Japonsku, kde již fungují pilotní provozy. Potenciál výroby vodíku z odpadu je tak zatím spíše okrajový a její význam pro získávání vodíku je hluboce ve stínu vlastní likvidace odpadu.

Analyzování možných forem pozemní dopravy vodíku bylo dalším z cílů této práce, jehož splnění se podařilo. Tato sekce poskytla klíčové parametry a charakteristiky, které byly nezbytné pro následné ekonomické výpočty dopravy. Zároveň sumarizovala důležité poznatky pro lepší pochopení specifik této problematiky.

V případě potrubního přepravování vodíku se aktuálně jeví jako nejvýhodnější možnost přimíchávání vodíku do rozvodů zemního plynu a následná společná spotřeba těchto dvou plynů. V této oblasti výzkumu se nejvíce angažují Němci, kteří úspěšně provedli testování přimíchání až 15 % vodíku k zemnímu plynu bez negativních dopadů. Nicméně tento způsob transportu vodíku naráží na limitující faktor, totiž že vodík je ve směsi se zemním plynem. To omezuje jeho použití jako čistého plynu, například jako paliva pro palivové články, a proto může být spotřebován pouze ve formě energetického využití spalování. Potenciálně lze toto omezení překonat navržením vhodného rozdělovače, který by oddělil vodík od zemního plynu. Například princip adsorpčního odlučování (PSA) by mohl být použit k odstranění tohoto limitujícího faktoru.

V budoucnu se v rámci Evropy zvažuje možný odklon od využívání zemního plynu a s tím souvisí potenciální využití existující plynovodné infrastruktury. Je však důležité brát v úvahu, že vodík má odlišné vlastnosti od zemního plynu, zejména menší molekulu a nižší hustotu. Na toto specifikum se váží nutné modifikace existující soustavy, objektivně nesoucí s sebou také další náklady.

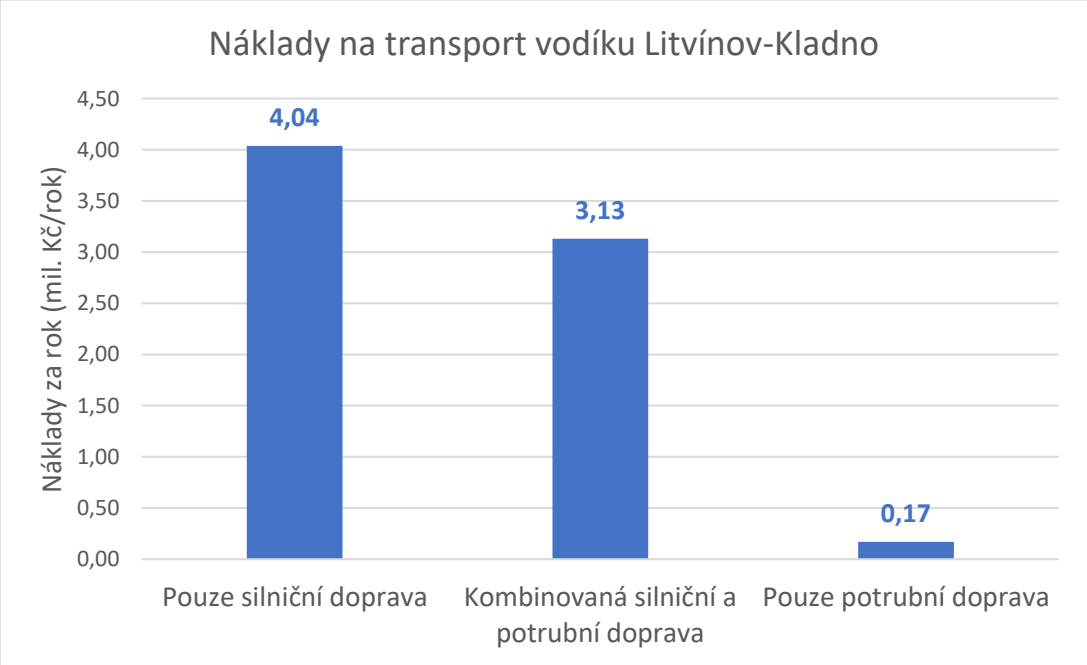
Jedním z alternativních dopravních systémů je silniční doprava vodíku. Vzhledem k tomu, že vodík má velmi malou hustotu při atmosférických podmínkách, má nízkou energetickou hustotu, je tedy nutné vodík stlačit a následně přepravovat v tlakových nádobách. Pro přepravu vodíku se zvažují různé tlakové úrovně začínající od 200 bar(g), což nese vysoké technické i finanční nároky na kompresory a skladové hospodářství. Konstrukce nádob pro přepravu vodíku musí být speciálně navržena tak, aby odolaly vysokému tlaku. To zahrnuje použití tlustších stěn a relativně menších objemů jednotlivých nádob. Zároveň platí, že čím větší je průměr nádoby, tím musí být stěny tlustší, aby mohly odolat stejnému tlaku. Tento způsob konstrukce nádob zásadně zvyšuje celkovou hmotnost dopravní soupravy. Z konstrukčního hlediska se

jeví jako optimální klecová konstrukce s menšími tlakovými lahvemi jako nejvhodnější volbou.

Silniční doprava vodíku přináší výhodu v tom, že může flexibilně zásobovat libovolné spotřební lokace rozmístěné na rozsáhlé silniční síti České republiky. Tato vlastnost je zejména v souvislosti s rozvojem vodíkové mobility velmi významná, neboť umožňuje efektivně dopravovat vodík do jednotlivých čerpacích stanic pro vodíková vozidla.

Posledním cílem diplomové práce byla modifikace technicko-ekonomického modelu a jeho praktické uplatnění pro hodnocení transportu vodíku, což se podařilo rovněž naplnit. Případová studie se soustředila na analýzu ekonomických nákladů spojených s přepravou vodíku od jeho výrobců k spotřebitelům v rámci území České republiky.

V první části případové studie bylo provedeno srovnání nákladů na přepravu vodíku v rámci použití silniční, potrubní a kombinované (silniční a potrubní) dopravy do konkrétního provozu s danou roční spotřebou. Výsledky představené na Obr. 42 ukázaly, že náklady na potrubní dopravu jsou značně nejnižší. Čistě potrubní dopravu však nemusí být vždy možné realizovat, např. pokud výrobní a spotřební provoz nejsou propojeny plynovodem. V takovém případě se jeví kombinovaná doprava jako vhodná alternativa, jelikož je ekonomicky výhodnější oproti čistě silniční dopravě. Z tohoto důvodu je v budoucnu výhodné zvažovat především potrubní dopravu na co nejdelší trase a až pro kratší úseky využít silniční dopravu. Stále totiž platí, že silniční doprava je flexibilnější a nenáročná na stavební investice při zásobování lokalit, kde není vybudován plynovod.




*Obr. 42 Náklady na transport vodíku na trase Litvínov-Kladno*

Metodika z případové studie týkající se přepravy vodíku pro konkrétní provoz byla rozšířena a aplikována na celou lokalitu České republiky. Výsledná mapa, Obr. 40, ilustruje místa v České republice, kde existuje dostatečná infrastrukturní síť pro efektivní přepravu vodíku, a naopak identifikuje místa, kde by byly náklady na přepravu

vodíku vysoké. Při vytváření této mapy byly zohledněny relativní náklady, avšak je důležité mít na paměti, že v reálném scénáři by měly být zohledněny i další faktory. Mezi tyto faktory by mohl patřit například počet jízdních cyklů, které by byly nutné pro obsluhu jednotlivých cílových míst, nebo efektivní využití dopravních souprav. Je třeba brát v úvahu i situaci, kdy nebude dosaženo 100% vytížení dopravního vozidla, a zvážit možnost jeho využití i pro přepravu do jiných lokalit.

V současné době je model koncipován na základě aktuální situace v oblasti vodíkového hospodářství v České republice, s důrazem na existující výrobní lokality vodíku. Tento model však bude schopen adaptace i do budoucna, kdy se předpokládá vznik nových míst produkce vodíku Do modelu tedy bude nutné zadat nové ORP, ze kterých bude možné dodávat vodík. Model je aktuálně strukturován do dvou scénářů. První scénář zachycuje současnou situaci, kde je vodík dostupný pouze z existujících míst produkce. Druhý scénář se zaměřuje na budoucí možnost využití páteřní plynárenské sítě pro transport vodíku. Vzhledem k budoucímu využití modelu bude klíčové posoudit, zda je reálně možné uplatnit druhý scénář s využitím této infrastruktury nebo zda bude vhodnější spoléhat se pouze na místa výroby vodíku.

Aktuálně je model zaměřený na distribuci vodíku pouze z hlediska fyzické vzdálenosti mezi producentem a spotřebitelem. Aby bylo distribuční rozložení realističtější a přesněji zachytilo všechny podmínky transportu vodíku, bylo by nezbytné provést další modifikace. Tyto modifikace by měly brát v úvahu specifické potřeby jednotlivých spotřebitelů a možnosti různých producentů, např. v rámci maximálních výrobních kapacit. Kromě toho by měly být do modelu začleněny další faktory, jako je konkurence na základě ceny a technická vybavenost. To by umožnilo lépe simulovat reálné rozhodovací procesy a strategie spotřebitelů a producentů při distribuci vodíku. Pro tuto modifikaci je však nutná detailnější znalost jednotlivých spotřebitelů a producentů, resp. jejich potřeb a záměrů.

V současné době jsou producenti prakticky zároveň i jedinými spotřebiteli vodíku v rámci České republiky, a proto není aktuálně zřejmá významná potřeba transportu vodíku. Nicméně do budoucna se očekává rozšíření vodíkového hospodářství, které s sebou přinese nárůst počtu producentů i spotřebitelů vodíku. Klíčovými faktory, které budou tuto změnu podporovat, jsou plánovaná výstavba nových elektrolyzérů pro výrobu vodíku a zejména očekávaný rozvoj vodíkové mobility. Tyto faktory budou zároveň tahouny změny, která otevře nové možnosti pro rozvoj vodíkové infrastruktury a distribuce, a tím zvýší význam představeného modelu.

# Seznam použitých zdrojů


[1] *Vodíková strategie České republiky* [online]. In: . Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky, 2021 [cit. 2022-10-04]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf

[2] POUL, David. *Výpočtové nástroje pro oběhové hospodářství*. Brno, 2022. POJEDNÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE. VUT Brno. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

[3] PERRY, Robert a Don GREEN. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008. ISBN 9780071422949.

[4] WITZKE, Peter. *Vodíková křehkost* [online]. In: . Bossard, 2020 [cit. 2022-10-02]. Dostupné z: https://media.bossard.com/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/white-paper/bossard_whitepaper_vodkov-kehkost_cz_11-2020.pdf?la=cs

[5] *Bezpečnostní list* [online]. In: . Air Products, 2009 [cit. 2022-10-02]. Dostupné z: http://www.plynarna-pb.cz/doc/vodik.pdf

[6] *Temperature T class ratings* [online]. 2023 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: https://www.heatingandprocess.com/product/hazardous-area-zones/temperature-t-class-ratings/

[7] *Hydrogen - Thermophysical Properties* [online]. In: . The Engineering ToolBox, 2008 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-d_1419.html

[8] *The Engineering ToolBox* [online]. 2023 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: http://www.engineeringtoolbox.com/

[9] *Hydrogen - System Mass Calculator* [online]. In: . CMB-tech [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: https://cmb.tech/hydrogen-tools

[10] *Fuels - Higher and Lower Calorific Values* [online]. In: . The Engineering ToolBox, 2003 [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html

[11] HOWARTH, Robert a Mark JACOBSON. How green is blue hydrogen?. *Energy Science & Engineering* [online]. 2021, **9**(10), 1676-1687 [cit. 2023-09-02]. ISSN 2050-0505. Dostupné z: doi:10.1002/ese3.956

[12] *Routes to hydrogen production* [online]. In: . Johnson Matthey, 2023 [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: https://matthey.com/products-and-markets/energy/hydrogen/types-of-hydrogen-production

[13] *Základní informace k vodíku* [online]. In: . HYTEP - Česká vodíková technologická platforma, 2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce

[14] *Výroba vodíku elektrolýzou vody* [online]. In: . HydroRACE4schools, 2019 [cit. 2023-04-18]. Dostupné z: https://www.hydro-race.eu/V%C3%BDroba-vod%C3%ADku-elektrol%C3%BDzou-vody

[15] HADRAVA, Jan. *Alkalická elektrolýza, produkce vodíku, jeho čištění a skladování* [online]. In: . Mikulov: 2. Mezinárodní chemicko-technologická konference Mikulov 7. – 9.4. 2014, 2014, [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: doi:10.13140

[16] *Výroba a použití vodíku* [online]. In: . UJEP - Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem [cit. 2022-12-14]. Dostupné z: https://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/VODIK_vyroba_a_pouziti.pdf

[17] CARMO, Marcelo, David FRITZ, Jürgen MERGEL a Detlef STOLTEN. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, **38**(12), 4901-4934 [cit. 2023-09-02]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.151

[18] *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs* [online]. In: . Department of Energy USA, 2009 [cit. 2023-08-25]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf

[19] *Silyzer 300 - datasheet* [online]. In: . Siemens Energy [cit. 2023-02-02]. Dostupné z: https://assets.siemens-energy.com/siemens/assets/api/uuid:a193b68f-7ab4-4536-abe2-c23e01d0b526/datasheet-silyzer300.pdf?ste_sid=4640e7c99d2224d3565cd1f4817354af

[20] *Vodík: vlastnosti, výroba a využití* [online]. In: . Vysoká škola chemicko-technická v Praze [cit. 2023-02-17]. Dostupné z: https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html

[21] *Hydrogen generation by steam reforming (Mahler AGS GmbH)* [online]. Mahler AGS GmbH, 2019 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=xAjHJ49VOUM&ab_channel=MahlerAGSGmbH

[22] BUDSBERG, Erik, Jordan CRAWFORD, Rick GUSTAFSON, Renata BURA a Maureen PUETTMANN. Ethanologens vs. acetogens: Environmental impacts of two ethanol fermentation pathways. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2015, **83**, 23-31 [cit. 2023-09-02]. ISSN 09619534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2015.08.019

[23] HRUBÝ, Michal. CCS uspělo v Inovačním fondu, jak uspěje v ČR?. *EkonTech.cz* [online]. 2021 [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: https://www.ekontech.cz/clanek/ccs-uspelo-inovacnim-fondu-jak-uspeje-cr

[24] TUKAČ, Vratislav, Jiří HANIKA, Václav VESELÝ a Jaromír LEDERER. *Možnosti produkce vodíku parciální oxidací odpadní biomasy* [online]. Biom.cz, 2011 [cit. 2023-04-26]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-produkce-vodiku-parcialni-oxidaci-odpadni-biomasy

[25] TYAGUNOVA, Victoria. *Vodíková paliva*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.

[26] HADRAVA, Jan, Roman VOKATÝ, Tomáš HLINČÍK a Daniel TENKRÁT. Porovnání kvality vodíku z různých technologií výroby. *Paliva*. 2013, (3), 79-83. ISSN 1804-2058.

[27] BIČÁKOVÁ, Olga. Možnosti výroby vodíku biologickými procesy. *Paliva* [online]. 2010, 103-112 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: doi:10.35933

[28] *Schéma bioprodukce vodíku pomocí dvoustupňové fermentace* [online]. In: . iDNES.cz, 2008 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/foto/VSE20b1e8_8_schema_bioprodukce.jpg

[29] SIKORA, Kamil. Vodík – palivo budoucnosti. *Průmyslové spektrum* [online]. 2021, (2021) [cit. 2023-04-23]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/vodik-palivo-budoucnosti

[30] *ELECTRICCITY MAP* [online]. 2023 [cit. 2023-09-02]. Dostupné z: https://app.electricitymaps.com/map

[31] *Národní energetický mix ČR* [online]. In: . OTE [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/zbytkovy-energeticky-mix

[32] *Nel electrolyzers | Fueling stations* [online]. Nel ASA, 2023 [cit. 2022-10-07]. Dostupné z: https://nelhydrogen.com/

[33] PAIDAR, Martin, Adam GIURG a Karel DENK. *Výroba vodíku v ČR a její uhlíková stopa* [online]. In: . Praha: Vysoká škola chemicko-technická v Praze, Ústav anorganické technologie [cit. 2022-10-20]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/file/edee/produkty_sluzby/veda_a_vyzkum/dotacni_projekty/vodikove-vlaky/prezentace-vyroba-vodiku-v-cr-a-jeji-uhlikova-stopa.pdf

[34] Budoucnost je prý ve vodíku. *Euro.cz* [online]. 2006 [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: https://www.euro.cz/clanky/budoucnost-je-pry-ve-vodiku-878645/

[35] *Valašský chemik*. DEZA a. s., červenec-září 2013.

[36] *Bezpečnostní zpráva SYNTHOS Kralupy a.s.* 2009.

[37] *Domácnosti v roce 2022 rekordně šetřily elektřinou* [online]. In: . Energetický regulační úřad, 2023 [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: https://www.eru.cz/domacnosti-v-roce-2022-rekordne-setrily-elektrinou

[38] *Plant pilot compressors solution* [online]. In: . Neumann & Esser Group [cit. 2023-06-08]. Dostupné z: https://plantpilot.neuman-esser.de/

[39] *Linde standard hydrogen filling station with IC90 compressor* [online]. In: . Linde, 2014 [cit. 2023-06-08]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=usaQrCDORFY&t=4s&ab_channel=Linde

[40] *Zkouška těsnosti TNS (tlakové nádoby stabilní)* [online]. In: . Verlag Dashöfer, nakladatelství, spol. s r. o., 2020 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://www.bozpprofi.cz/33/zkouska-tesnosti-tns-tlakove-nadoby-stabilni-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Egny2sdjJ1sR8VGSoXtE_R5rJfTGJxQrnQ/

[41] *Nařízení vlády č. 219/2016 Sb.: Nařízení vlády o posuzování shody tlakových zařízení při jejich dodávání na trh*. In: . 2016. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-219/zneni-20160719#p18-1-1

[42] *Safety data sheet Helium* [online]. In: . Airgas, 2021 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://www.airgas.com/msds/001025.pdf

[43] *Joulův-Thomsonův jev* [online]. In: . Matematicko-fyzikální fakulta Univerzita Karlova [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/7_7

[44] *Vodíkové zkapalňovače* [online]. In: . Chart Industries, 2023 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://cz.chartindustries.com/Products/Hydrogen-Liquefiers

[45] DROBNÝ, Josef. *Skladování vodíku* [online]. In: . HydroRACE4schools, 2019 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://www.hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku

[46] MORAVEC, Hynek. Kapalný vodík z nádrže jen tak neuteče. *Český rozhlas* [online]. [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://plus.rozhlas.cz/kapalny-vodik-z-nadrze-jen-tak-neutece-6655713

[47] AL GHAFRI, Saif, Adam SWANGER, Vincent JUSKO, Arman SIAHVASHI, Fernando PEREZ, Michael JOHNS a Eric MAY. Modelling of Liquid Hydrogen Boil-Off. *Energies* [online]. 2022, **15**(3) [cit. 2023-09-03]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15031149

[48] NOTARDONATO, W, A SWANGER, J FESMIRE, K JUMPER, W JOHNSON a T TOMSIK. Zero boil-off methods for large-scale liquid hydrogen tanks using integrated refrigeration and storage. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2017, **278** [cit. 2023-09-03]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/278/1/012012

[49] VANĚK, Václav. Skladování vodíku. *Třípól* [online]. 2022 [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: https://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/2822-skladovani-vodiku

[50] *Palivový článek* [online]. In: . Devinn, 2019 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://www.devinn.cz/blog/palivovy-clanek

[51] *Vodíkové technologie* [online]. In: . ÚJV Řež, a.s. [cit. 2023-06-10]. Dostupné z: https://www.ujv.cz/cs/produkty-a-sluzby/nejaderna_energetika/vodikove-technologie

[52] První kogenerační jednotka na vodík o výkonu 1 MW na světě. *TZB info* [online]. Rayo Engineering, s.r.o., 2021 [cit. 2023-06-09]. Dostupné z: https://energetika.tzb-info.cz/kogenerace/22868-prvni-kogeneracni-jednotka-na-vodik-o-vykonu-1-mw-na-svete

[53] FUGLEVIČ, Daniel. Toyota vyvinula nový motor spalující vodík. Jeho schopnosti otestuje v motorsportu. *Autorevue.cz* [online]. 2021 [cit. 2023-06-15]. Dostupné z: https://www.autorevue.cz/toyota-vyvinula-novy-motor-spalujici-vodik-jeho-schopnosti-otestuje-v-motorsportu

[54] PANGSY-KANIA, Sylwia, Aleksandra ROMANOWSKA, Katarzyna WIERZBICKA a Katarzyna KANIA. Activity of Patents in Fuel Cells and Hydrogen Production in the Context of Passenger Car Fleet in the V4 Countries. *Studies in Logic, Grammar and Rhetoric* [online]. 2022, **67**(1), 475-497 [cit. 2023-09-03]. ISSN 2199-6059. Dostupné z: doi:10.2478/slgr-2022-0024

[55] *Palivové články princip funkce a dělení* [online]. In: . oEnergetice [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/akumulace-energie/palivove-clanky-princip-funkce-a-deleni

[56] *Vodík a jeho využití* [online]. In: . Enviweb s.r.o., 2013 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.enviweb.cz/95892

[57] DARMAWAN, Arif, Muhammad AZIZ, Muhammad AJIWIBOWO, Muhammad BIDDINIKA, Koji TOKIMATSU a Baskoro LOKAHITA. Integrated ammonia production from the empty fruit bunch. In: *Innovative Energy Conversion from Biomass Waste* [online]. Elsevier, 2022, s. 149-185 [cit. 2023-09-03]. ISBN 9780323854771. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85477-1.00006-3

[58] DROBNÝ, Josef a Přemysl ŠUMPELA. *Průmyslové využití vodíku* [online]. In: . HydroRACE4schools, 2019 [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://hydro-race.eu/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9-vyu%C5%BEit%C3%AD-vod%C3%ADku

[59] *SSAB AB* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.ssab.com/cs-cz/pravni-informace

[60] *V roce 2023 s vodíkovými autobusy!* [online]. In: . Dopravní podnik Ostrava, 2021 [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: https://www.dpo.cz/pro-cestujici/aktuality/novinky/5421-vodikove-autobusy-v-roce-2023.html

[61] *Pilot scale direct reduction with hydrogen* [online]. In: . Hybrit [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: https://www.hybritdevelopment.se/en/a-fossil-free-development/direct-reduction-hydrogen-pilotscale/

[62] *A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe COM(2020) 301 final*. In: . Brusel: European Commision, 2020. Dostupné také z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301

[63] *HYTEP - Česká vodíková technologická platforma* [online]. [cit. 2023-05-23]. Dostupné z: https://www.hytep.cz/

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

[65] *Zákon č. 311/2006 Sb.: Zákon o pohonných hmotách a čerpacích stanicích pohonných hmot a o změně některých souvisejících zákonů (zákon o pohonných hmotách)*. In: . Česká republika, 2006. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-311?text=311%2F2006+Sb

[66] Chybějí normy, které umožní distribuci vodíku v energetice. *OEnergetice* [online]. [cit. 2023-04-03]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/evropska-unie/svaz-chybeji-normy-ktere-umozni-distribuci-vodiku-v-plynovodech

[67] HARÁK, Tomáš. Jedním z velkých problémů současné společnosti jsou odpady. Jak si s nimi dokážeme poradit v České republice?. *Statistika&My* [online]. 2023 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://www.statistikaamy.cz/2023/03/27/zemereno-na-odpady

[68] Konec skládkování bude až v roce 2030, rozhodla sněmovna. Za odpad se ale budou zvyšovat poplatky. *Hospodářské noviny* [online]. [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: https://domaci.hn.cz/c1-66818290-konec-skladkovani-bude-az-v-roce-2030-schvalila-snemovna-za-odpad-se-ale-budou-zvysovat-poplatky

[69] *Produkce a nakládání s odpady v roce 2021* [online]. In: . Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2022 [cit. 20220-10-13]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/odpady_podrubrika/$FILE/OODP-Produkce_a_nakladani_2021-20221031.pdf

[70] Skladba směsného komunálního odpadu z domácností ČR. *EKO-KOM, a.s.* [online]. 2019 [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: https://www.ekokom.cz/skladba-smesneho-komunalniho-odpadu-z-domacnosti-cr/

[71] *Nakládání s odpady v roce 2021* [online]. In: . Český statistický úřad [cit. 2021-10-13]. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/164986107/28002022g1.pdf/08d5ef31-4e31-42fc-a5e1-821dc4c99504?version=1.3

[72] *Nakládání s komunálními odpady v roce 2021* [online]. In: . Český statistický úřad [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/164986107/28002022g2.pdf/b4f3f564-477d-4431-ba4b-cf8b172386ee?version=1.3

[73] *Difference Between Pyrolysis and Gasification* [online]. In: . Difference Between, 2019 [cit. 2023-02-06]. Dostupné z: https://www.differencebetween.com/difference-between-pyrolysis-and-gasification/

[74] *DEVELOPMENTAL SYNGAS CLEANUP TECHNOLOGY* [online]. In: . National Enery Technology Laboratory USA [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: https://netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/rd-syngas-cleanup

[75] HA, Quan. *Clean Syngas from Waste for Energy and Chemicals* [online]. In: . Nanyang Technology Univerzity Singapore, 2021 [cit. 2023-03-10]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=H5Vsu_t2_r8&ab_channel=QuanHa

[76] CAMPEN, A., K. MONDAL a T. WILTOWSKI. Separation of hydrogen from syngas using a regenerative system. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2008, **33**(1), 332-339 [cit. 2023-09-03]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2007.07.016

[77] *Princip plazmového zplyňování komunálního odpadu* [online]. In: . PGP Terminal, a.s. [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: https://www.pgpt.cz/cz/plazmova-technologie.html

[78] *Výroba vodíku z odpadu – náhrada za ruskou ropu a plyn?* [online]. In: . ChzechInvest, 2022 [cit. 2022-10-13]. Dostupné z: https://www.czechinvest.org/cz/Homepage/Novinky/Cerven-2022/Vyroba-vodiku-z-odpadu-%e2%80%93-nahrada-za-ruskou-ropu-a-plyn

[79] KOSKINEN, P. *The development and microbiology of bioprocesses for the production of hydrogen and ethanol by dark fermentation*. Tampere: Tampere University of Technology, 2008.

[80] ADAMS, Thad, Robert SINDELAR, George RAWLS a Poh-Sang LAM. *Evaluation of Natural Gas Pipeline Materials for Hydrogen/Mixed Hydrogen-Natural Gas Service* [online]. In: . Department of Energy USA, 2005 [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/progress05/v_a_4_adams.pdf

[81] *Plynárenská soustava ČR* [online]. In: . OTE, a.s., 2020 [cit. 2023-06-03]. Dostupné z: https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/plynarenska-soustava-cr.png

[82] *Natural Gas Density Calculator* [online]. In: . Unitrove, 2023 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: https://www.unitrove.com/engineering/tools/gas/natural-gas-density

[83] *The European Hydrogen Backbone (EHB) initiative* [online]. In: . [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: https://ehb.eu/newsitems#ehb-infrastructure-maps-update-february-including-latest-feasibility-estimates-and-pci-submissions

[84] *Sagebruch* [online]. [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: https://sagebrushpl.com/

[85] *Zukunftweisendes Pilotprojekt erfolgreich beendet: Erstmals bis zu 20 Prozent Wasserstoff im Gasnetz beigemischt* [online]. In: . Avacon [cit. 2023-09-03]. Dostupné z: https://www.avacon-netz.de/de/avacon-netz/forschungsprojekte/wasserstoff-im-gasnetz.html

[86] *Na distribuci vodíku se zemním plynem se chystá celá Evropa* [online]. In: . GasNet, 2022 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: https://www.gasnet.cz/o-spolecnosti/novinky/2022/08/Vodik-a-Evropa

[87] *Green Hydrogen: Transportation in the Natural Gas Grid* [online]. In: . 2021 [cit. 2023-06-26]. Dostupné z: https://fuelcellsworks.com/news/green-hydrogen-transportation-in-the-natural-gas-grid/

[88] *Hydrogen Transportation Pipeslines* [online]. In: . European Industrial Gases Association, 2004 [cit. 2023-06-23]. Dostupné z: https://h2tools.org/sites/default/files/Doc121_04%20H2TransportationPipelines.pdf

[89] *Technické normy ČSN* [online]. [cit. 2023-06-13]. Dostupné z: https://www.technicke-normy-csn.cz/#

[90] *Vyhláška č. 209/2018 Sb.: Vyhláška o hmotnostech, rozměrech a spojitelnosti vozidel*. In: . Česká republika, 2018. Dostupné také z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2018-209

[91] BEDNÁŘ, Jindřich. *Zásady při navrhování a výpočtu tlakových návod* [online]. In: . Tlakinfo.com, 2007 [cit. 2023-05-28]. Dostupné z: https://www.tlakinfo.com/t.py?t=2&i=1411&h=128

[92] LI, Mengxiao, Yunfeng BAI, Caizhi ZHANG, Yuxi SONG, Shangfeng JIANG, Didier GROUSET a Mingjun ZHANG. Review on the research of hydrogen storage system fast refueling in fuel cell vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, **44**(21), 10677-10693 [cit. 2023-09-03]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.02.208

[93] *Hydrogen high-pressure Type 4 cylinders* [online]. In: . Hexagon Purus [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://hexagonpurus.com/our-solutions/hydrogen-systems/hydrogen-type-4-cylinders

[94] *500-bar hydrogen trailer from Linde* [online]. In: . The Linde Group [cit. 2023-01-05]. Dostupné z: https://www.thenewsmarket.com/500-bar-hydrogen-trailer-from-linde/a/bc10ed32-af96-4b5a-b3ba-1fef8f993d48

[95] *Wystrach Wycarrier datenblatt* [online]. In: . Wystrach, 2022 [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: https://www.wystrach.gmbh/media/wystrach_wycarrier_datenblatt_en.pdf

[96] *Tube Trailers* [online]. In: . Ovid [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: https://www.ovid.it/en/tube-trailers/

[97] *Tube Trailer, Tube Skid* [online]. In: . Enric [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: http://cimc-ege.com/1-2-1-tube-skid-tube-trailer/191489/

[98] *Hydrogen tube trailer - 9 tube DOT 3AAX 2400 PSI 40 FT* [online]. In: . Home City Machine & Welding, Inc [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: https://cmwelding.com/configuration/hydrogen-h2-tube-trailer-9-tubes-dot-3aax-2400psi-40-ft

[99] *Cryogenic Liquid Hydrogen Tanker* [online]. In: . FIBA Canning Inc. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20110710235720/http:/www.fibacanning.com/Cryogenic/Cryogenic%20Liquid%20Hydrogen%20Tankers%20for%20sale-flyer.pdf

[100] AHLUWALIA, R.K., H.-S. ROH, J.-K. PENG et al. Liquid hydrogen storage system for heavy duty trucks: Configuration, performance, cost, and safety. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2023, **48**(35), 13308-13323 [cit. 2022-11-15]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.12.152

[101] *Technické údaje - FH16.550 4x2 Tractor Volvo Trucks* [online]. In: . Lectura [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: https://www.lectura-specs.cz/cz/model/preprava/kamiony-tahace-volvo-trucks/fh16-550-4x2-tractor-11707841

[102] *Wystrach* [online]. [cit. 2023-07-11]. Dostupné z: https://www.wystrach.gmbh/produkte/wycarrier/

[103] REUß, M., T. GRUBE, M. ROBINIUS, P. PREUSTER, P. WASSERSCHEID a D. STOLTEN. Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy* [online]. 2017, **200**, 290-302 [cit. 2023-07-11]. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.05.050

[104] *Teplárna v Kladně* [online]. In: . Sev.en, 2023 [cit. 2023-07-15]. Dostupné z: https://www.7.cz/cz/cinnosti/#teplarna-v-kladne

[105] *Údaje o výrobě Teplárna Kladno s.r.o. - výrobna KLADNO* [online]. In: . Sev.en [cit. 2023-07-16]. Dostupné z: https://www.7.cz/files/7zeta/Udaje_o_vyrobe_Kladno_2021_12.pdf

[106] Mapy.cz. In: *Mapy.cz* [online]. [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: https://mapy.cz/zakladni?x=16.6968000&y=49.2034000&z=11

[107] OBOŘIL, David. Infrastruktura pro přepravu vodíku může vyjít až na 64 mld. EUR, v ČR by vodík přepravovala nejdříve Gazela. *OEnergetice* [online]. 2020 [cit. 2023-08-03]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/plyn/infrastruktura-prepravu-vodiku-muze-vyjit-az-64-mld-eur-cr-by-vodik-prepravovala-nejdrive-gazela

# Seznam použitých zkratek a symbolů

| | |
|---|---|
| $CO_2eq$ | Ekvivalent oxidu uhličitého |
| $CO_2$ | Oxid uhličitý |
| OH | Odpadové hospodářství |
| SKO | Směsný komunální odpad |
| KO | Komunální odpad |
| EU | Evropské unie |
| ČR | Česká republika |
| EU ETC | EU Emissions Trading System |
| ZP | Zemní plyn |
| ÚPI | Ústav procesního inženýrství |
| VUT v Brně | Vysoké učení technické v Brně |
| MS | Microsoft |
| tkm | Tunokilometr |
| t | Tuna |
| r | Rok |
| km | Kilometr |
| Kč | Korun Českých |
| MWh, kWh | Megawatt hodina, Kilowatt hodina |
| TJ, GJ, MJ | Terajoule, Gigajoule, Megajoule |
| mil | Milion |
| ORP | Obec s rozšířenou působností |
| EHB | European Hydrogen Backbone |