



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VODÍKOVÁ PLNICÍ STANICE

HYDROGEN FILLING STATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Kaše

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Energetický ústav |
| Student: | Bc. Jakub Kaše |
| Studijní program: | Energetické a termofluidní inženýrství |
| Studijní obor: | Energetické inženýrství |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2022/23 |

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:

Vodíková plnicí stanice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma je zaměřeno na problematiku provozu vodíkové plnicí stanice, kde budou posuzovány různé scénáře dodávky vodíku a související potřeby jeho skladování. Rešeršní část práce bude zahrnovat dohledatelný přehled souvisejících komponent a materiálů pro vodíkové technologie. Uvedeny budou pilotní realizace vodíkových plnicích stanic. Vlastní řešení bude zaměřeno na návrh vodíkové plnicí stanice pro zadané parametry a technicko–ekonomické posouzení jednotlivých scénářů dodávky vodíku včetně varianty uvažující s autonomní produkcí vodíku.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat rešeršní přehled koncepcí, komponent a materiálů používaných pro vodíkové plnicí stanice.
2. Uvést stručný výběr realizací plnicích vodíkových stanic.
3. Vlastní návrh plnicí vodíkové stanice pro zadané parametry.
4. Technicko–ekonomické posouzení uvažovaných scénářů dodávky vodíku.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s., ISBN 978-80-214-4300-6.

BOUDELLAL, Méziane. Power-to-gas: renewable hydrogen economy. Berlin: De Gruyter, 2018, xiii, 211 stran : ilustrace (některé barevné). ISBN 978-3-11-055881-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zabývá vodíkovými plnicími stanicemi, jejich koncepcemi, návrhem a provozem. Je popsán význam vodíku jako energetického nosiče, jeho vlastnosti a důsledky těchto vlastností pro výběr materiálů vhodných pro vodíkové aplikace. Za účelem pochopení rozhodnutí učiněných při návrhu stanice je uveden životní cyklus vodíku od jeho výroby přes přepravu a skladování až po využití. V návaznosti na to je provedeno vyhodnocení zmíněného cyklu z pohledu ekonomiky a dopadů na životní prostředí. Rešeršní část práce je zakončena přiblížením vozidel s palivovými články, jehož součástí je přehled dohledaných osobních a užitkových vozidel, a popisem vodíkových plnicích stanic. Plnicí stanice jsou rozebrány po stránce koncepcí a komponent, součástí je také přehled a analýza vybraných realizací. Výpočetní část práce je zaměřena na návrh a technicko-ekonomickou analýzu vodíkové plnicí stanice s denní kapacitou přibližně 50 kg/den a hodinovou kapacitou 6 vozidel/h pro potřeby logistické společnosti Zásilkovna s.r.o. Byla zvolena varianta stanice s dodávkami plynného vodíku v tlakových nádobách. V rámci práce byla srovnána 3 možná provedení stanice. Vodíkovou plnicí stanicí lze na zadané parametry bez problémů navrhnout. Analýza výsledků nicméně ukázala velmi silnou závislost pořizovacích i provozních nákladů na dimenzovaném výkonu kompresoru. Provedený návrh vodíkové plnicí stanice proto vyžaduje další optimalizaci, což limituje přímou aplikovatelnost uvedených výsledků.

Klíčová slova

Vodík, Plnicí stanice, Palivový článek, Návrh stanice, Analýza nákladů

ABSTRACT

Presented master's thesis deals with hydrogen filling stations, their concepts, design, and operation. The importance of hydrogen as an energy carrier, its properties, and the implications of these properties for the selection of materials suitable for hydrogen applications are described. In order to understand the decisions made in the design of the station, the hydrogen life cycle from production through transportation and storage to use is presented. This is followed by an evaluation of the cycle in terms of economics and environmental impact. The review part of the paper concludes with an introduction to fuel cell vehicles, which includes an overview of the selected passenger and commercial vehicles, and a description of hydrogen filling stations. The filling stations are discussed in terms of concepts and components, and an overview and analysis of selected implementations is also included. The computational part of the thesis focuses on the design and techno-economic analysis of a hydrogen filling station with a daily capacity of approximately 50 kg/day and an hourly capacity of 6 vehicles/hour for the needs of the logistics company Zásilkovna s.r.o. A station variant with hydrogen gas delivery in pressure vessels was chosen. Three possible designs of the station were compared. The hydrogen filling station can be designed for the specified parameters without any problems. However, the analysis of the results showed a very strong dependence of the acquisition and operating costs on the nominal compressor power. Therefore, the design of the hydrogen filling station requires further optimization, which limits the direct applicability of the presented results.

Key words

Hydrogen, Refueling station, Fuel cell, Station design, Cost analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAŠE, Jakub. Vodíková plnicí stanice. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149687>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vodíková plnicí stanice** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jakub Kaše

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícný přístup, a zaujetí pro téma, dále pak Ing. Petře Císařové, MBA a Ing. Tomáši Galíkovi za praktické informace a připomínky, díky kterým se tato práce přiblížila realitě, ale především bych chtěl poděkovat své rodině a nejbližším přátelům za pevnou a neochvějnou podporu.

OBSAH

| | |
|---|----|
| ÚVOD..... | 13 |
| 1 VÝZNAM VODÍKU | 14 |
| 1.1 Aktuální stav energetiky | 14 |
| 1.2 Aktuální stav silniční dopravy | 15 |
| 1.3 Vodíkové strategie | 16 |
| 2 VLASTNOSTI VODÍKU | 17 |
| 2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti | 17 |
| 2.2 Poškození materiálů vodíkem | 17 |
| 2.2.1 Hydrogen embrittlement (HE) | 18 |
| 2.2.2 Hydrogen-induced cracking (HIC)..... | 18 |
| 2.2.3 Hydrogen blistering (HB)..... | 19 |
| 2.2.4 High temperature hydrogen attack (HTHA) | 19 |
| 2.2.5 Hydride formation (HF) | 20 |
| 2.3 Bezpečnostní aspekty vodíku..... | 20 |
| 3 MATERIÁLY PRO VODÍKOVÉ APLIKACE | 21 |
| 3.1 Tlakové aplikace | 21 |
| 3.2 Kryogenní aplikace | 22 |
| 3.3 Přehled využívaných materiálů..... | 22 |
| 4 VÝROBA VODÍKU | 24 |
| 4.1 Výroba z fosilních zdrojů | 25 |
| 4.1.1 Parní reforming zemního plynu..... | 25 |
| 4.1.2 Parciální oxidace | 25 |
| 4.1.3 Zplyňování uhlí | 26 |
| 4.2 Výroba z obnovitelných zdrojů..... | 26 |
| 4.2.1 Elektrolýza vody | 26 |
| 4.2.2 Výroba z biomasy..... | 27 |
| 5 PŘEPRAVA A SKLADOVÁNÍ VODÍKU | 28 |
| 5.1 Stlačený vodík..... | 28 |
| 5.1.1 Plynovody..... | 29 |
| 5.1.2 Tlakové nádoby | 29 |
| 5.1.3 Podzemní zásobníky..... | 30 |
| 5.2 Zkapalněný vodík | 31 |
| 5.3 Vodík ve sloučeninách a materiálech | 31 |
| 6 VYUŽITÍ VODÍKU | 32 |
| 6.1 Spalování vodíku | 32 |

| | | |
|--------|--|----|
| 6.2 | Palivové články | 33 |
| 6.3 | Syntetická paliva | 35 |
| 7 | EKONOMIKA A ENVIRONMENTÁLNÍ ASPEKTY VODÍKU | 36 |
| 7.1 | Ekonomika vodíku | 36 |
| 7.2 | Environmentální aspekty vodíku..... | 38 |
| 7.2.1 | Přímé dopady vodíku | 38 |
| 7.2.2 | Dopady vodíkového hodnotového řetězce..... | 39 |
| 8 | VODÍKOVÁ SILNIČNÍ VOZIDLA | 41 |
| 8.1 | Technologie vozidel | 41 |
| 8.2 | Plnění vodíkových vozidel | 42 |
| 8.3 | Přehled vozidel | 42 |
| 9 | VODÍKOVÉ PLNÍČÍ STANICE..... | 44 |
| 9.1 | Koncepce plnicích stanic..... | 44 |
| 9.1.1 | Rozdělení dle způsobu dodávek vodíku | 44 |
| 9.1.2 | Rozdělení dle způsobu provozu..... | 46 |
| 9.1.3 | Rozdělení dle typu plněných vozidel..... | 47 |
| 9.2 | Komponenty plnicích stanic | 48 |
| 9.2.1 | Plnicí stanice s dodávkou plynného vodíku..... | 48 |
| 9.2.2 | Plnicí stanice s dodávkou kapalného vodíku | 49 |
| 9.3 | Přehled vybraných realizací | 49 |
| 10 | NÁVRH VODÍKOVÉ PLNÍČÍ STANICE | 52 |
| 10.1 | Potřebné množství vodíku | 52 |
| 10.2 | Způsob dodávek vodíku | 53 |
| 11 | VYSOKOKAPACITNÍ TLAKOVÁ NÁDOBA | 55 |
| 11.1 | Návrhové parametry | 55 |
| 11.2 | Postup výpočtu | 56 |
| 11.3 | Výpočet a vypočítané hodnoty | 57 |
| 12 | KOMPRESOR | 59 |
| 12.1 | Návrhové parametry | 59 |
| 12.2 | Postup výpočtu | 60 |
| 12.2.1 | Dimenzování kompresoru | 60 |
| 12.2.2 | Běžný provoz kompresoru | 62 |
| 12.3 | Výpočet a vypočítané hodnoty | 66 |
| 12.3.1 | Dimenzování kompresoru | 66 |
| 12.3.2 | Běžný provoz kompresoru | 68 |
| 13 | VYSOKOTLAKÝ AKUMULÁTOR | 74 |

| | | |
|------|---|-----|
| 13.1 | Návrhové parametry | 74 |
| 13.2 | Postup výpočtu..... | 75 |
| 13.3 | Výpočet a vypočítané hodnoty | 78 |
| 14 | CHLADÍCÍ ZAŘÍZENÍ..... | 82 |
| 14.1 | Návrhové parametry | 82 |
| 14.2 | Postup výpočtu..... | 82 |
| 14.3 | Výpočet a vypočítané hodnoty | 83 |
| 15 | EKONOMIKA VODÍKOVÉ PLNÍCÍ STANICE..... | 85 |
| 15.1 | Definice a měny | 85 |
| 15.2 | Postup výpočtu..... | 85 |
| 15.3 | Výpočet a vypočítané hodnoty | 88 |
| 15.4 | Vyhodnocení a diskuze | 93 |
| | ZÁVĚR..... | 97 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 99 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 114 |

ÚVOD

Doprava je jedním z hlavních zdrojů emisí skleníkových plynů v Evropě i ve světě. Silniční doprava samotná pak představuje více než 15 % antropogenních emisí v České republice a dokonce 21 % emisí vypouštěných v rámci Evropské unie [1][2]. Vedle produkce oxidu uhličitého je problémem také vznik přízemního ozonu nebo tuhých částic, které mají negativní dopad na lidské zdraví. Snaha o snížení těchto emisí by proto měla být naší prioritou.

Do osobní dopravy již úspěšně pronikají bateriové elektromobily. Jejich budoucnost však závisí na pokrocích v oblasti dostupných a ekologicky šetrných bateriových technologií. V oblasti nákladní dopravy je ale situace komplikovanější. Problematická není jen – pro tyto účely stále nízká – kapacita baterií, ale i samotné množství energie v nich uložené. To má za následek dlouhou dobu nabíjení i při vysokém nabíjecím výkonu. Důsledkem je tak potřeba velkého počtu nabíjecích stanic, a ještě vyššího elektrického příkonu, který klade extrémní nároky na elektrickou distribuční soustavu. Uvedené problémy se v některých lokalitách projevují již dnes a s rozvojem bateriových elektromobilů lze předpokládat jejich zhoršení. Z těchto důvodů je třeba – zejména v oblasti nákladní, ale i osobní dopravy – zvážit alternativu, kterou představují vodíkové elektromobily s palivovými články.

Elektromobily s palivovými články jsou konstrukcí pohonu shodné s bateriovými elektromobily. Elektřina pro pohon motoru však nepochází z baterie, ale z palivového článku, ve kterém dochází k přímé přeměně vodíku na elektrickou energii. Při přeměně nedochází ke vzniku spalin, jediným vedlejším produktem je tak vodní pára. Využití vodíkových elektromobilů s palivovými články nepovede k nižší spotřebě energie, je však řešením její dostupnosti. Plnění nádrže vodíkového vozidla je stejně rychlé, jako běžné tankování a již se současnou technologií nabízí podobný dojezd jako bateriové elektromobily. Jejich úspěch a rozšíření je ale závislé na vybudování sítě vodíkových plnicích stanic. Než však bude tato síť připravena, mohou vznikat – podobně jako u elektrické energie – ostrovní systémy. Řada společností provozuje flotily vozidel operující z jedné základny po relativně blízkém okolí, a právě pro ně může být nákup vodíkových vozidel již dnes zajímavý.

Hlavním cílem předkládané práce je návrh vodíkové plnicí stanice právě pro tento účel, ale také zmapování celého procesu návrhu a vlivu jednotlivých rozhodnutí v jeho průběhu na výsledek. Obsáhnutí celého tématu je však vzhledem k jeho šíři jen obtížně dosažitelné. Řešební část práce je rozdělena do tří celků. I. celek (kapitoly 2 a 3) je věnován popisu interakcí vodíku s materiály a dopadům těchto interakcí na výběr materiálů pro vodíkové aplikace. Zahrnuta je i podkapitola zaměřená na bezpečnost vodíku a jeho odlišnosti oproti zemnímu plynu. II. celek (kapitoly 4 až 7) je zaměřen na jednotlivé fáze životního cyklu vodíku od výroby, přes přepravu a skladování až po konečné využití. Významnou částí je zde podkapitola o tlakových nádobách, na kterou je později odkazováno. Součástí je také srovnání emisí vozidel s různými druhy pohonu, které již obsahem spadá spíše do dalšího celku. III. celek (kapitoly 8 a 9) tvoří přechod k výpočetní části práce a zahrnují popis technologie vozidel s palivovými články a koncepcí a komponent plnicích stanic. Tento celek poskytuje teoretický základ pro návrh a výpočet stanice, řada informací je však uvedena také ve výpočtu samotném.

Výpočetní část práce (kapitoly 10 až 15) je rozdělena podle technologických a zároveň výpočetních celků. V kapitole 10 jsou také uvedeny přesné návrhové parametry stanice. Návazující kapitoly jsou pak členěny na část Návrhové parametry, kde jsou popsány volené parametry a jejich význam pro výpočet, Postup výpočtu, kde jsou uvedeny použité výpočetní vztahy a část Výpočet a vypočítané hodnoty, ve které je provedeno dosazení do vztahů a uvedena tabulka výsledků. Závěrečná kapitola 15 je pak kromě samotného výpočtu ekonomiky věnována přehledům vypočítaných hodnot z technické i ekonomické části a analýze výsledků.

1 VÝZNAM VODÍKU

Současná podoba využívání energetických zdrojů není dlouhodobě udržitelná. Kromě omezených zásob fosilních paliv jsou hlavním problémem klimatické dopady jejich využívání. Dříve byly tyto změny viditelné zejména v méně rozvinutých státech rovníkové oblasti. Během posledních let jsou však jejich projevy stále častější a ve větší míře patrné i v našich zeměpisných šířkách. Naše společnost proto v současnosti prochází zásadní změnou uvažování ve vztahu k dalšímu používání těchto paliv. Řešením je přechod na bezemisní zdroje energie. Nejprve je však nutné uvědomit si rozsah problému.

1.1 Aktuální stav energetiky

Fosilní zdroje aktuálně pokrývají 82,28 % světové spotřeby primární energie [3]. V rámci České republiky činí tento podíl 68,80 % [4]. Přesné zastoupení jednotlivých zdrojů je patrné z tab. 1.1, resp. tab. 1.2. Spotřeba primární energie je energie přímo těžených paliv a energie získávaná z okolního prostředí. Implicitně v sobě tedy zahrnuje energii sekundárních paliv, které jsou z primárních odvozeny. Zároveň má přímý vztah k těženému množství a emisím skleníkových plynů. Z těchto důvodů byla zvolena pro srovnání.

Tab. 1.1 Světové dodávky primární energie dle zdroje za rok 2021 [3].

| Zdroj | Spotřeba [EJ] | Spotřeba [TWh] | Podíl [%] | Fosilní | Bezemisní | Obnov. |
|--------------------|---------------|----------------|-----------|---------|-----------|--------|
| Ropa | 184,21 | 51169,44 | 30,95 | × | – | – |
| Zemní plyn | 145,35 | 40375,00 | 24,42 | × | – | – |
| Uhlí | 160,10 | 44472,22 | 26,90 | × | – | – |
| Jaderná energie | 25,31 | 7030,56 | 4,25 | – | × | – |
| Vodní elektrárny | 40,26 | 11183,33 | 6,76 | – | × | × |
| Obnovitelné zdroje | 39,91 | 11086,11 | 6,71 | – | × | × |
| Celkem | 595,14 | 165316,67 | 100,00 | | | |

Pozn. Platné hodnoty označeny ×, neplatné hodnoty –.

Tab. 1.2 Dodávky primární energie dle zdroje za rok 2021 v České republice [4].

| Zdroj | Spotřeba [EJ] | Spotřeba [TWh] | Podíl [%] | Trend | Výhled |
|--------------------|---------------|----------------|-----------|-------|--------|
| Ropa | 0,392 | 108,889 | 21,65 | – | ↘ |
| Zemní plyn | 0,326 | 90,556 | 18,00 | – | ↗ |
| Uhlí | 0,528 | 146,667 | 29,16 | ↘ | ↘ |
| Jaderná energie | 0,336 | 93,333 | 18,55 | – | – |
| Vodní elektrárny | 0,009 | 2,500 | 0,50 | – | – |
| Obnovitelné zdroje | 0,220 | 61,111 | 12,15 | ↗ | ↗ |
| Celkem | 1,811 | 503,056 | 100,00 | | |

Pozn. Vzestupný trend označen ↗, konstantní –, sestupný ↘.

Na základě stále platné Státní energetické koncepce lze předpokládat zásadní snížení podílu ropy a zejména uhlí, a naopak nárůst podílu obnovitelných zdrojů (dále jen OZE) a zemního plynu [5]. Tento trend bude dále umocněn závaznou energetickou politikou Evropské unie [6][7]. Ve stejném dokumentu je však jasně uvedeno, že zemní plyn je považován pouze za přechodný zdroj a konečným cílem je dosažení klimatické neutrality [7].

Výhodou obnovitelných zdrojů energie jsou nižší emise skleníkových plynů na jednotku vyrobené energie [8]. Důležité je zhodnocení těchto emisí během celého životního cyklu paliva i zařízení. Primárním produktem OZE je elektrická energie, přičemž některá zařízení mohou

být i zdrojem tepla např. pro vytápění a průmyslové procesy. Nevýhodou elektrické energie je její obtížná skladovatelnost. To spolu s proměnlivostí výkonu některých OZE – zejména fotovoltaických a větrných elektráren – způsobuje problémy při udržování rovnováhy mezi produkcí a spotřebou [9]. Zároveň existuje řada průmyslových odvětví, jejichž dekarbonizace za využití elektrické energie není vlivem technických omezení možná, nebo je velmi obtížná [10]. Vodík představuje ekologicky šetrnou alternativu zemního plynu, která mimo jiné umožňuje dlouhodobý provoz současných plynových zdrojů elektrické energie a tím zachování jejich funkce v primární regulaci sítě. Dalšími možnými aplikacemi jsou přímé využití vodíku v palivových článcích, přímé využití v průmyslu, dlouhodobé ukládání energie, náhrada zemního plynu při vytápění budov a využití v dopravě pro pohon vozidel [11].

1.2 Aktuální stav silniční dopravy

V oblasti silniční dopravy můžeme pozorovat postupný odklon od tradičních fosilních paliv, jako jsou benzín a nafta a nárůst využívání alternativních fosilních paliv a elektřiny [12]. Vývoj se však liší v závislosti na kategorii vozidel. V osobní dopravě panuje zvýšený zájem o hybridní a bateriové elektrické vozy (BEV) a také auta na CNG. Ke změnám v nákladní dopravě dochází jen pomalu, a to zejména u lehkých a středních užitkových vozů, které jsou konstrukcí blízké osobním vozidlům. Zde je nejvýznamnější nárůst BEV. Podíly a počty silničních vozidel dle paliva, resp. zdroje energie jsou uvedeny v tab. 1.3.

Tab. 1.3 Podíl silničních vozidel dle paliva v roce 2021 [12].

| Osobní vozy | | | | Nákladní vozy | | | |
|-------------|-----------|-----------|-------|--------------------------|-----------|-----------|-------|
| Palivo | Počet | Podíl [%] | Trend | Palivo | Počet | Podíl [%] | Trend |
| Benzín | 3 523 023 | 57,86 | – | Benzín | 80 161 | 10,95 | ↘ |
| Nafta | 2 415 250 | 39,67 | ↗ | Nafta | 637 767 | 87,12 | ↗ |
| Hybrid | 10 615 | 0,17 | ↗ | Ostatní | 14 138 | 1,93 | ↗ |
| Elektřina | 9 051 | 0,15 | ↗ | Celkem | 732 066 | 100,00 | |
| LPG | 108 611 | 1,78 | – | | | | |
| CNG | 20 717 | 0,34 | ↗ | Silniční tahače | | | |
| Ostatní | 1 463 | 0,02 | – | Palivo | Počet | Podíl [%] | Trend |
| Celkem | 6 088 730 | 100,00 | | Benzín | 37 | 1,03 | – |
| | | | | Nafta | 3 520 | 98,08 | ↘ |
| Autobusy | | | | Ostatní | 32 | 0,89 | – |
| Palivo | Počet | Podíl [%] | Trend | Celkem | 3 589 | 100,00 | |
| Benzín | 1 614 | 8,11 | ↘ | | | | |
| Nafta | 16 316 | 81,94 | – | Všechna silniční vozidla | | | |
| Ostatní | 1 982 | 9,95 | ↗ | Celkem | 8 575 422 | ks | ↗ |
| Celkem | 19 912 | 100,00 | | | | | |

Pozn. Trend je vztažen k podílu paliv. Vzestupný trend označen ↗, konstantní –, sestupný ↘.

Pomalá adopce alternativních způsobů pohonu v těžké silniční dopravě je zapříčiněna řadou faktorů. Z technického hlediska je nejdůležitějším nízká rozvinutost palivové infrastruktury, resp. infrastruktury pro rychlé nabíjení vozidel [13]. Specifickým faktorem u BEV je problematická integrace nabíjecích stanic do stávající elektrizační soustavy. Dalším významným činitelem je pak dojezd, který je limitujícím faktorem zejména u BEV. Současné baterie dosahují relativně nízkých energetických hustot, což vede k velkým rozměrům. S tím souvisí i vysoká hmotnost. Oba tyto faktory mají negativní vliv na velikost nákladového prostoru a užitnou hmotnost. Využívaným řešením je snížení dojezdu a tím i potřebné velikosti baterií.

Dojezd se proto pohybuje zpravidla kolem 300 km [14]. Z tohoto důvodu nejsou BEV vhodné pro přepravu na větší vzdálenosti. Alternativou pro tyto aplikace může být např. využití zkapalněného zemního plynu (LNG). Ten lze ve variantě bio-LNG, vyráběné biologickým rozkladem biomasy a čištěním vznikajícího bioplynu považovat za obnovitelné palivo [15]. Další možností je pak využití vodíku, kterému je věnována tato práce. Elektrická vozidla s palivovými články (FCEV) využívající jako zdroj energie vodík jsou dále popsána v kap. 8.

1.3 Vodíkové strategie

Rozvoj vodíkové infrastruktury je nyní na úplném počátku. Vzhledem k předpokládanému rozsahu aplikací a tlaku na rychlou výstavbu se jedná o velmi ambiciózní projekt vyžadující mezinárodní spolupráci. Pro usnadnění rozvoje vodíkových technologií byly v mnoha zemích světa vypracovány vodíkové strategie a další státy na jejich přípravě aktivně pracují [16]. Budoucnost vodíku v rámci České republiky je tak dána zejména Evropskou a Českou vodíkovou strategií [17][18]. Následující text proto vychází z těchto strategií.

Na evropské úrovni jsou investice do vodíkové infrastruktury prezentovány jako nástroj pro oživení ekonomik členských států po krizi COVID-19, resp. navazující energetické krizi. Zároveň mají za cíl přispět k energetické bezpečnosti a nezávislosti Evropy [19]. Hlavním cílem je nicméně snížení emisí CO₂ a omezení následků globálního oteplování. Evropská vodíková strategie poskytuje politický rámec, vytyčuje strategické cíle a metody jejich dosažení. Její součástí je i harmonogram s obecným popisem jednotlivých fází. Z hlediska plánování investic je zásadní nastínění budoucích investičních programů včetně podpor konkrétních odvětví a strategie pro vznik trhu s vodíkem. V návaznosti na evropskou strategii vznikají národní strategie jednotlivých členských států, které ji dále rozpracovávají [17]. Česká vodíková strategie obsahuje kromě technického popisu vodíkových technologií a terminologie především scénáře a implementační strategie využití vodíku v jednotlivých oblastech. Dále obsahuje i plánované možnosti podpory včetně přehledu jednotlivých programů a dotačních titulů. Z technického hlediska je zásadní přítomnost přehledu a zhodnocení jednotlivých technologií výroby, přepravy a skladování a možností využití vodíku. Zmíněná část tak umožňuje rychlý vhled do problematiky [18]. Společně tyto strategie nastavují jasnou podobu budoucímu vývoji a usnadňují plánování investic v této oblasti.

2 VLASTNOSTI VODÍKU

2.1 Fyzikální a chemické vlastnosti

Vodík je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu [20]. Na Zemi se vyskytuje zejména v podobě vody a organických sloučenin, v čisté podobě pak vytváří molekuly H_2 . Atomy vodíku jsou v případě nejběžnějšího izotopu 1H tvořeny jedním protonem a jedním elektronem. Jsou proto nejmenšími atomy, díky čemuž snadno pronikají do krystalických struktur jiných materiálů – viz kap. 2.2. Vodík je dále charakteristický svými extrémně nízkými teplotami tání a varu, nízkou hustotou a vysokou tepelnou vodivostí [20]. Jeho základní vlastnosti jsou uvedeny v tab. 2.1

Tab. 2.1 Přehled a srovnání vybraných vlastností vodíku a metanu [21][22][23][24].

| Veličina | H_2 | CH_4 | Jednotka |
|-------------------|----------------------|----------------------|--|
| Teplota tání | -259 | -183 | [°C] |
| Teplota varu | -253 | -162 | [°C] |
| Hustota | 0,084 | 0,668 | [kg·m ⁻³] |
| Viskozita | $8,81 \cdot 10^{-6}$ | $1,10 \cdot 10^{-5}$ | [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹] |
| Tepelná vodivost | 0,1825 | 0,034 | [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹] |
| Výhřevnost | 120 | 50 | [MJ·kg ⁻¹] |
| Výhřevnost | 10,08 | 33,40 | [MJ·m ⁻³] |
| Meze vznětlivosti | 4–75 | 5–15 | [Obj. %] |
| Iniciační energie | 0,02 | 0,29 | [mJ] |
| Teplota vznícení | 585 | 540 | [°C] |
| Rychlost plamene | 2,83 | 0,45 | [m·s ⁻¹] |

Pozn. Vlastnosti metanu jsou blízké zemnímu plynu. Hodnoty vztaheny k normálním podm.

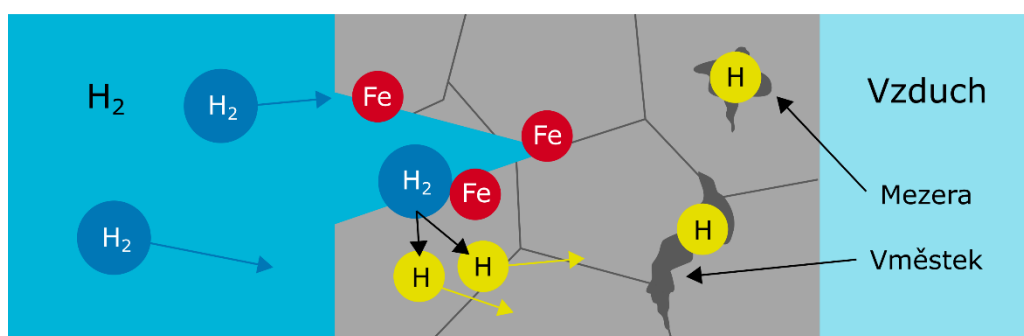
Molekula H_2 je za normálních podmínek stabilní. K chemickým reakcím dochází až za zvýšené teploty a/nebo při přítomnosti katalyzátoru. Význačnou reakcí je hoření – exotermická reakce vodíku s kyslíkem za vzniku vody. Plamen je mírně namodralý, nesvítivý a nesálavý, což ztěžuje jeho detekci ze denního světla [25]. Přenos tepla proto probíhá dominantně konvekcí.

2.2 Poškození materiálů vodíkem

Popis v této podkapitole vychází ze zdroje [26]. Čistý vodík se běžně vyskytuje v podobě molekul H_2 . V přítomnosti některých prvků, zejména železa však dochází k jejich disociaci na dva atomy H. Jev probíhá snadněji na špicích trhlin, kde jsou atomy železa obnažené, a to následujícím mechanismem [27]. Při přiblížení molekuly vodíku k atomu železa dochází ke sdílení elektronů mezi atomem železa a molekulou vodíku, což vede k destabilizaci chemické vazby H–H a vzniku atomárních vodíků [28]. Atom železa zde působí jako katalyzátor a snižuje energetickou bariéru reakce. Vlivem rozdílných parciálních tlaků vodíku na vnitřní a vnější straně materiálu – typicky u tlakových nádob nebo potrubí – pak dochází difuzí ke vniknutí atomárního vodíku do krystalické mřížky. Atomy vodíku mohou stěnou procházet zcela – pak mluvíme o permeaci, nebo jen částečně [27]. Důsledkem je pak vznik řady problémů vedoucích k degradaci mechanických vlastností těchto materiálů. Při rešerši bylo dohledáno pět základních degradačních dějů, přičemž první dva spolu přímo souvisí [26].

2.2.1 Hydrogen embrittlement (HE)

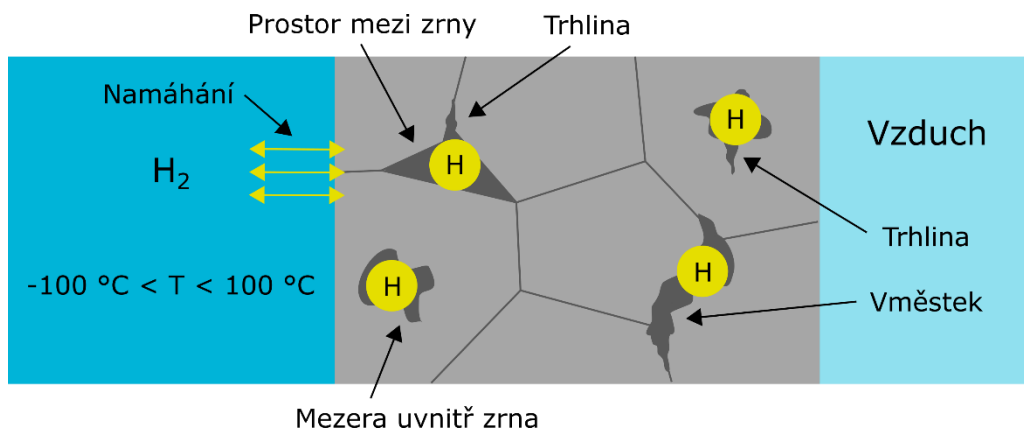
Hydrogen embrittlement neboli vodíkové křehnutí je významný degradační děj způsobující vratnou změnu mechanických vlastností materiálů za normálních teplot, a to již při nízkém tlaku vodíku – od 1 baru [29]. Rychlost děje je závislá mimo teploty a tlaku také na difuzním koeficientu materiálu a zpravidla se pohybuje v řádu minut. Ovlivněny jsou zejména uhlíkové a nerezové oceli a slitiny niklu [26]. Principem je difuze atomárního vodíku do mezer v krystalické mřížce materiálu, což vede k významnému poklesu plasticity a lomové houževnatosti. Průběh vnikání vodíku do materiálu a následného křehnutí je zachycen na obr. 2.1. Při ději nedochází k přímému poškození materiálu. Nebezpečná je však kombinace s vnějším, zejména cyklickým namáháním nebo vnitřní napjatostí [27]. Ta může být zapříčiněna zbytkovým napětím, vadami materiálu nebo spojováním atomů vodíku uvnitř materiálu do molekul H_2 obdobně, jako je tomu u HB – viz kap. 2.2.3. Regenerace materiálu je možná vyjmutím z vodíkové atmosféry, po které dojde k difuzi atomů vodíku ven z krystalické struktury [26].



Obr. 2.1 Průběh vnikání vodíku do materiálu a vodíkového křehnutí. Vlastní dílo.

2.2.2 Hydrogen-induced cracking (HIC)

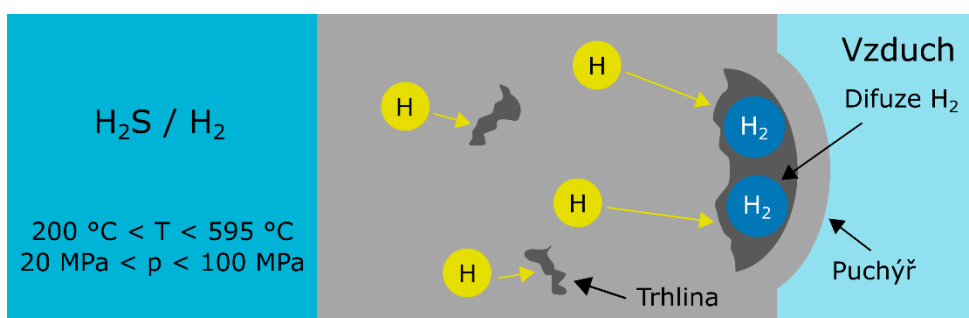
Hydrogen-induced cracking – někdy také hydrogen-assisted cracking – neboli vodíkem vyvolané praskání je významný mechanismus poškození materiálu typický pro vysokopevnostní oceli od meze pevnosti $R_m > 800$ MPa [30]. Podmínkou průběhu je přítomnost napětí v materiálu – viz kap. 2.2.1, intenzita přítom narůstá s rostoucí velikostí napětí. Děj navazuje na HE a probíhá nejintenzivněji za normálních teplot [26]. Průběh je zachycen na obr. 2.2. Důsledkem poklesu plasticity a lomové houževnatosti je lokální překročení R_m materiálu a vznik a růst trhlin [31]. Vlivem křehnutí dochází k překročení meze pevnosti při nižším namáhání, než je tomu ve vzduchu. Zároveň dochází také k poklesu únavové životnosti a prahového napětí únavy [31]. HIC je dominantní formou vodíkového poškození materiálů pro většinu aplikací, odolnost vůči němu je proto hlavním faktorem při posuzování vhodnosti materiálů.



Obr. 2.2 Schéma průběhu praskání vyvolaného vodíkem. Vlastní dílo.

2.2.3 Hydrogen blistering (HB)

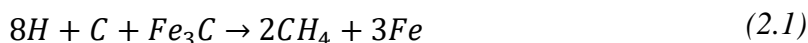
Hydrogen blistering neboli tvorba puchýřků je druh poškození typický zejména pro nízkopevnostní oceli a hliník a jeho slitiny [26]. Dochází při něm k opětovnému spojování atomů vodíku uvnitř materiálu do molekul H_2 . Vzniklá molekula vyžaduje více místa než jednotlivé atomy, což vede ke vzniku vnitřního napětí v materiálu. Bublinky vodíku nemohou pro svou velikost difundovat ven z materiálu a dochází tak k jejich hromadění a růstu [26]. Důsledkem tohoto děje je deformace a narušení struktury materiálu a iniciace trhlin. Vznik puchýřků probíhá již za normálních teplot, ve zvýšené míře pak od 200 °C, a to zejména v blízkosti povrchu [31]. Průběh děje je znázorněn na obr. 2.3. Velikost puchýřků je přímo úměrná době expozice, obecně se však jedná o relativně pomalý proces [32]. Na rozdíl od ostatních způsobů poškození ke vzniku puchýřků dochází zejména v prostředí kyselých plynů – především sulfanu, díky snadnějšímu vzniku atomárního vodíku [31]. Vzhledem k pomalému průběhu a snadné detekci je riziko havárie v důsledku HB za předpokladu provádění pravidelných kontrol minimální.



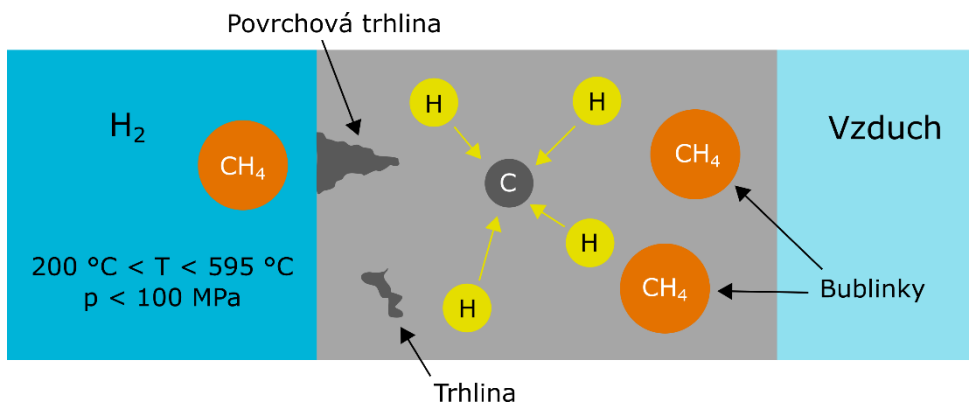
Obr. 2.3 Schéma vzniku puchýřků. Vlastní dílo, založeno na [31].

2.2.4 High temperature hydrogen attack (HTHA)

High temperature hydrogen attack neboli vysokoteplotní napadání vodíkem je druh poškození typický pro uhlíkové a nízkolegované oceli [26]. Dochází při něm k reakci vodíku s uhlíkem v materiálu na metan dle rovnice 2.1:



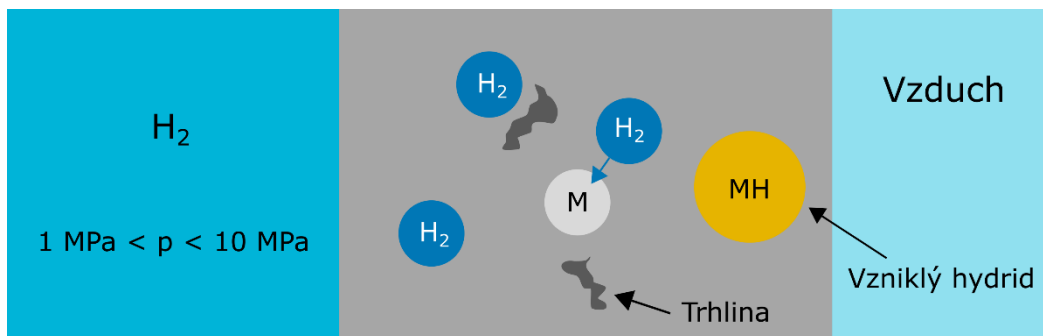
Důsledkem vysokoteplotního napadání je oslabení mikrostruktury materiálu a zároveň vznik a růst bublin metanu, které svým tlakem způsobují praskání matrice. Průběh HTHA je znázorněn na obr. 2.4. Tento způsob poškození je spojen s vyššími teplotami, typicky od 200 °C, rychlost děje je závislá také na tlaku vodíku [26]. K poškození materiálu vlivem HTHA dochází po inkubační periodě, jejíž délka se pohybuje v řádu dní až let v závislosti na podmínkách [33]. Krátkodobé vystavení materiálu vyšším teplotám proto nepředstavuje riziko.



Obr. 2.4 Schéma průběhu vysokoteplotního napadání vodíkem. Vlastní dílo, založeno na [31].

2.2.5 Hydride formation (HF)

Hydride formation – někdy také hydride embrittlement – neboli tvorba hydridů je druh poškození typický pro slitiny Mg, V, Nb, Ta, Ti, Zr a U a v omezené míře oceli s obsahem těchto prvků [26]. Dochází při něm k reakci molekul vodíku s uvedenými prvky na křehké hydridy. Důsledkem je pak oslabení mikrostruktury materiálu a iniciace trhlin. Průběh HF je znázorněn na obr. 2.5. Tvorba hydridů je usnadněna přítomností napětí [26]. Ke vzniku proto dochází zejména na špičce trhlin, což vede k jejich dalšímu růstu. Na rozdíl od ostatních způsobů poškození je HF typicky spojena s vnosem vodíku do materiálu při výrobě nebo svařování, vznik hydridů při provozu však není vyloučen [31]. Obsah problematických prvků je v materiálech pro vodíkové aplikace nicméně velmi nízký, tato forma poškození proto nepředstavuje riziko.



Obr. 2.5 Schéma průběhu tvorby hydridů. M – kov. Vlastní dílo, založeno na [31].

2.3 Bezpečnostní aspekty vodíku

Specifické vlastnosti vodíku kladou zvýšené nároky na bezpečnostní opatření tak, aby byla snížena pravděpodobnost poruch a nehod na únosnou míru a omezeny jejich následky. Z hlediska bezpečnosti se nabízí srovnání se zemním plynem, jakožto široce rozšířeným plynným médiem využívaným v průmyslu, dopravě i domácnostech. Jak vodík, tak zemní plyn jsou lehčí než vzduch [22]. Detektory obou plynů je proto v uzavřených prostorách vhodné umístit na strop. Vodík se od zemního plynu odlišuje vyšší difuzivitou díky čemuž netvoří výbušný oblak, ale rychle uniká do okolí. Riziko dosažení výbušných koncentrací mimo uzavřené prostory je proto nízké [34]. Meze výbušnosti jsou širší než u zemního plynu, v praxi však bráníme dosažení dolní meze výbušnosti, dopady na bezpečnost proto nejsou zásadní. Problémem je ale velmi nízká minimální iniciační energie – energie potřebná k zahájení řetězové oxidační reakce – hoření nebo výbuchu. Ta je přibližně o rád nižší než u zemního plynu, za určitých okolností proto může dojít k samovznícení a výbuchu – např. při kritickém proudění vysokotlakého vodíku z trhliny vlivem vzniku rázových vln [34].

Oba plyny jsou bez chuti a zápachu a pro zvýšení bezpečnosti je třeba je odorizovat. Pro zemní plyn jsou zpravidla využívány odoranty na bázi síry – nejčastěji merkaptany [35]. Stejně odoranty je možné použít také pro vodík [35]. Takto odorizovaný plyn však není vhodný pro využití v palivových článcích – viz kap. 6.2 – jelikož sírné sloučeniny způsobují katalytickou otravu a tím pádem zničení palivového článku. Pro tyto aplikace je tak nutná jejich separace, nebo použití bezsírných odorantů [35]. Ostatní aplikace nejsou nijak ovlivněny.

3 MATERIÁLY PRO VODÍKOVÉ APLIKACE

Výběr materiálů pro vodíkové aplikace je ovlivněn provozními podmínkami – především teplotou a tlakem plynu. Dle těchto podmínek lze aplikace rozdělit na tlakové, probíhající při vyšším než atmosférickém tlaku (typicky 1–1000 bar) a běžných teplotách (typicky -20–80 °C) a kryogenní, probíhající při teplotách blízkých teplotě varu vodíku (-253 °C). Tlaky jsou v tomto případě zpravidla blízké atmosférickému.

3.1 Tlakové aplikace

Rozhodujícím faktorem při výběru materiálu pro tlakové aplikace je jeho odolnost vůči vodíkovému křehnutí, resp. ztrátě houževnatosti jím zapříčiněným. Nejčastěji využívanými materiály jsou oceli. Náhylnost ocelí vůči vodíkovému křehnutí je ovlivněna jejich mikrostrukturou, mechanickými vlastnostmi, chemickým složením, přítomností nekovových vměstků – zejména fosforu a síry, výrobním procesem a tepelným zpracováním [36]. Obecně jsou preferovány jemnozrnné nerezové austenitické, případně uhlíkové (nelegované i nízkolegované) oceli s nízkou nejvyšší dovolenou mezí pevnosti $R_m < 800$ MPa a homogenní mikrostrukturou [30][37]. Martenzitické, precipitačně vytvrzované a vysokopevnostní oceli jsou naopak vysoce náhylné ke křehnutí a proto nevhodné. Z hlediska chemického složení jsou obecně vhodnější oceli s nízkým obsahem uhlíku a nemetalických vměstků [30]. Výrobní proces by měl být vždy zakončen tepelným zpracováním pro homogenizaci a zjemnění mikrostruktury a odstranění vnitřního pnutí. Obdobně by měly být ošetřeny i svary a jejich tvrdost by stejně jako tvrdost tepelně ovlivněné oblasti neměla překročit 22 HRC, resp. 250 HB [30]. Navzdory výše uvedenému je možné využívat i obecně nevhodné skupiny ocelí, pokud je jejich namáhání omezeno. Ocelové materiály jsou využívány v celém hodnotovém řetězci od výroby po spotřebu – např. pro potrubí včetně plynovodů, tlakové nádoby, kompresory a další strojní a technologická zařízení ve styku s vodíkem. Litiny a ocelolitiny obecně nejsou pro vodíkové aplikace vhodné z důvodu nízké houževnatosti, za předpokladu omezení namáhání je však lze také využít [38].

Mezi další využívané materiály patří hliník a měď a jejich slitiny. Oba tyto kovy nejsou náhylné na vodíkové křehnutí a lze je bezpečně používat pro tlakové aplikace [37]. Oproti ocelím je však nutné zohlednit jejich nižší mechanické parametry, čímž je limitováno jejich využití pro vysokotlaké aplikace. Hliníkové slitiny jsou běžně využívány pro výrobu tlakových nádob, měď je kvůli vyšší ceně využívána jen výjimečně [39]. Nikl a titan a jejich slitiny jsou naopak křehnutím velmi ovlivněny a jejich využití se obecně nedoporučuje [37][40]. Polymerní materiály nejsou vodíkovým křehnutím ovlivněny, jejich mechanické vlastnosti nicméně limitují jejich provozní parametry na normální teploty a nižší tlaky [30]. Při nízkých teplotách dochází často k jejich křehnutí, při vysokých naopak k měknutí. Vysoké provozní tlaky mohou kromě překročení pevnosti materiálu vést také k napučání a tvorbě puchýřků [36]. Princip tohoto jevu je obdobný tvorbě puchýřků v oceli – viz kap. 2.2.3. Na rozdíl od něj však probíhá rychleji a za běžných teplot. Problémem je také permeace – průchod molekul H_2 skrze materiál, která probíhá díky porézní struktuře polymerů řádově rychleji než u oceli [36]. Porézní struktura umožňuje průchod celých molekul, není tedy nutná jejich disociace jako je tomu u ocelí. Navzdory těmto nevýhodám jsou polymery hojně využívány jako těsnicí materiály, materiály pro nízkotlaké potrubí nebo vložky do tlakových nádob [36]. Poslední skupinou materiálů hojně využívanou pro tlakové aplikace jsou kompozitní materiály – zejména na bázi skelných, aramidových nebo uhlíkových vláken [39]. Pro vysoké tlaky jsou nejčastěji využívána uhlíková vlákna. Pojivem je nejčastěji epoxidová pryskyřice. Kompozity nejsou ovlivněny vodíkovým křehnutím a oproti polymerům nabízí významně vyšší pevnosti. Oproti ocelím jsou pak významně lehčí, díky čemuž jsou využívány zejména pro výrobu lehkých tlakových nádob nebo vložek do nich [39]. Jejich nevýhodou je naopak vyšší výrobní cena.

3.2 Kryogenní aplikace

Při kryogenních teplotách k vodíkovému křehnutí nedochází, nebo dochází jen velmi omezeně [41]. S klesající teplotou však u řady materiálů dochází k přechodu z tvárného na křehké chování, což znemožňuje jejich využití [38]. Hlavním faktorem při výběru materiálu pro kryogenní aplikace je tedy houževnatost materiálu při těchto teplotách. Dalšími faktory jsou pak tepelná roztažnost – zejména při spojování odlišných materiálů – a tepelná vodivost [39]. Nejčastěji využívanými materiály jsou proto nerezové austenitické oceli a slitiny hliníku. Pro vyšší kryogenní teploty (do -200 °C) mohou být využívány také niklem legované feritické oceli [39]. Výjimečně mohou být využívány také slitiny titanu [42]. Austenitické oceli jsou využívány v celém vodíkovém hodnotovém řetězci obdobně jako u tlakových aplikací. Hliníkové slitiny jsou pak využívány zejména pro výrobu kryogenních nádob.

Polymery a kompozity je možné využívat i pro kryogenní aplikace, tyto materiály jsou však podobně jako oceli ovlivněny křehnutím při nízkých teplotách [38]. Je proto nutný jejich pečlivý výběr. Polymery jsou využívány zpravidla jen jako těsnící nebo izolační materiály, kompozitní materiály je pak možno využít pro výrobu lehkých kryogenních nádob, vhodných např. pro dekarbonizaci leteckého průmyslu [43].

3.3 Přehled využívaných materiálů

Pro usnadnění výběru vhodných materiálů pro tlakové aplikace bylo sestaveno několik publikací, z nichž nejvýznamnější je norma ASME B31.12 obsahující seznam materiálů vhodných pro použití s vodíkem [44]. Jejím předmětem jsou potrubí a plynovody, při zohlednění ostatních relevantních faktorů však může posloužit také jako vodítko při výběru materiálů pro jiné části vodíkové infrastruktury. Materiály uvedené v části tab. 3.1 – uhlíkové oceli byly s touto normou konzultovány, z důvodů ochrany autorských práv na ní však není tab. 3.1 založena. Nevýhodou této normy stejně jako řady dalších je orientace na materiály využívané v USA. Tyto materiály mohou mít ISO, EN nebo ČSN ekvivalenty, při jejich srovnávání je však nutná obezřetnost.

Tab. 3.1 Přehled vybraných materiálů využívaných pro vodíkové aplikace.

| Uhlíkové oceli | | | | | |
|----------------|------------|------------------|--------------------|-----------|-------|
| Norma | Materiál | Tlakové aplikace | Kryogenní aplikace | Využití | Zdroj |
| ASTM | A105 | × | – | Obecné | [30] |
| ASTM | A350 | × | – | | |
| ASTM | A516 | × | – | | |
| ISO | P265 | × | – | | |
| ISO | P355 | × | – | | |
| ASTM | A53 Gr. A | × | – | Plynovody | [30] |
| ASTM | A53 Gr. B | × | – | | |
| ASTM | A106 Gr. A | × | – | | |
| ASTM | A106 Gr. B | × | – | | |
| ASTM | A333 Gr. 1 | × | – | | |
| ASTM | A333 Gr. 6 | × | – | | |
| API 5L | Gr. B | × | – | | |
| API 5L | X42 | × | – | | |
| API 5L | X52 | × | – | | |

Pozn. Platné hodnoty označeny křížkem ×, neplatné pomlčkou –. Označení pomlčkou automaticky nevylučuje využití materiálu pro danou aplikaci. Jeho využití však nebylo dohledáno.

| Austenitické nerez oceli | | | | | |
|--------------------------|----------|------------------|--------------------|---------|--------------|
| Norma | Materiál | Tlakové aplikace | Kryogenní aplikace | Využití | Zdroj |
| AISI | 304 | × | × | Obecné | [30] [45] |
| AISI | 304L | × | × | | |
| AISI | 316 | × | × | | |
| AISI | 316L | × | × | | |
| AISI | 321 | × | × | | |
| AISI | 347 | × | × | | |

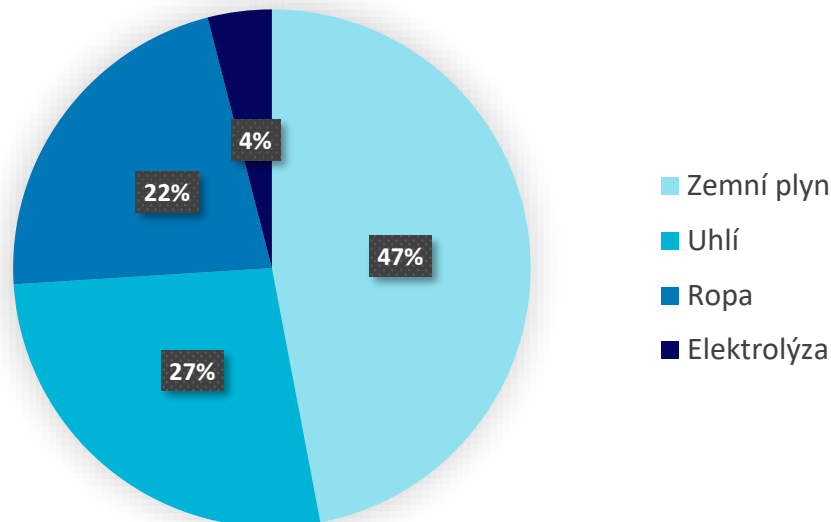
| Hliník a jeho slitiny | | | | | |
|-----------------------|----------|------------------|--------------------|---------|----------------------|
| Norma | Materiál | Tlakové aplikace | Kryogenní aplikace | Využití | Zdroj |
| AA | 2014 | – | × | Nádoby | [39] [45] [46] |
| AA | 2219 | – | × | | |
| AA | 3003 | – | × | | |
| AA | 3004 | – | × | | |
| AA | 5083 | – | × | | |
| AA | 5086 | – | × | | |
| AA | 5454 | – | × | | |
| AA | 6061 | × | × | | |

Pozn. Platné hodnoty označeny křížkem ×, neplatné pomlčkou –. AA – Aluminum Association. Průmyslové standardy této asociace jsou zpravidla přímo aplikovány, nejedná se však o normy v pravém smyslu a materiály bývají proto označovány jen číslem – viz sloupec Materiály.

Příkladem těchto ekvivalentů mohou být ISO L245, L290 a L360, které jsou dle své normy ekvivalentem ocelí API 5L Gr. B, X42 a X52 [47]. Dalšími zdroji informací ohledně vhodnosti materiálů pro tlakové aplikace mohou být dokumenty Sandia report a Hydrogen embrittlement, zahrnující výsledky laboratorních testů zaměřených na náchylnost materiálů vůči vodíkovému křehnutí [37][48]. V případě návrhu plynovodů a potrubních systémů může být zdrojem informací také Vodíkové kompendium, které obsahuje kromě detailních informací o kompatibilitě materiálů také popis vlivu vodíku na funkci armatur, strojních zařízení apod. [49]. Obdobné přehledové práce zaměřené na materiály pro kryogenní vodíkové aplikace nebyly dohledány, při výběru vhodných materiálů se však lze řídit obecnými pravidly pro kryogenní teploty. Materiály pro aplikace za snížených ale nikoli kryogenních teplot, při kterých je vodíkové křehnutí stále rizikem by měly splňovat oba požadavky.

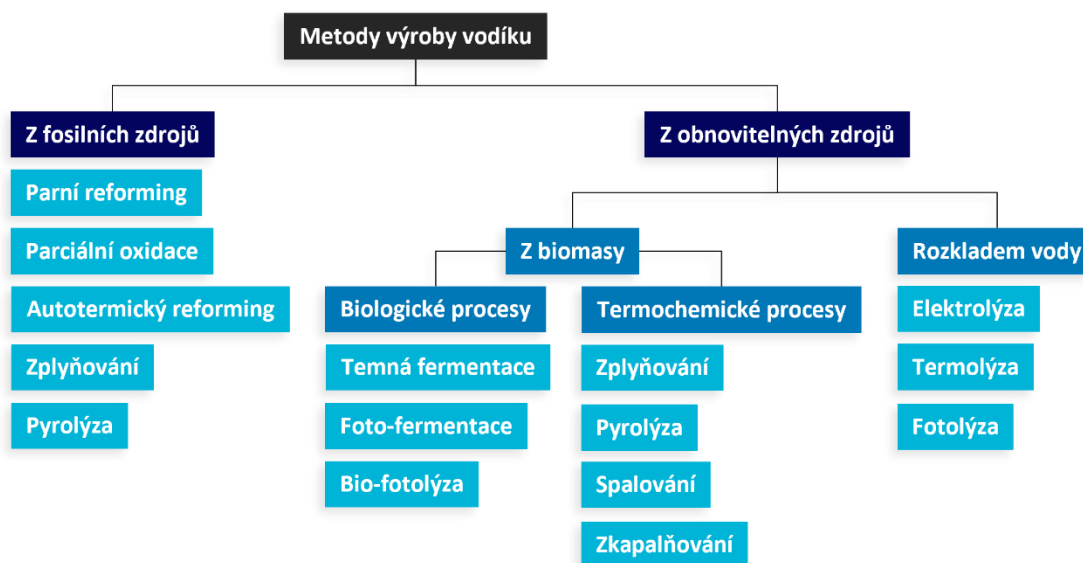
4 VÝROBA VODÍKU

Světová produkce čistého vodíku dnes dosahuje přibližně 75 Mt/rok a dalších 45 Mt/rok je součástí směsí plynů [50]. Naprostá většina přitom pochází z fosilních zdrojů – viz obr. 4.1. Jejich význam pro rozvoj vodíkové infrastruktury je tedy nezpochybnitelný. S využíváním fosilních zdrojů je nicméně spojeno vypouštění významného množství emisí CO₂. Jejich potenciál pro dlouhodobý provoz je proto závislý na rozvoji technologií pro zachytávání a využívání CO₂, které mohou snížit jejich celkovou emisní stopu [18].



Obr. 4.1 Produkce vodíku dle jednotlivých zdrojů. Hodnoty za rok 2021 [50].

Výroba vodíku z obnovitelných zdrojů nicméně také není zcela bezemisní. V případě elektrolýzy je výsledná emisní stopa vodíku závislá na zdroji elektrické energie – na jeho provozních emisích i emisích spojených s výstavbou, údržbou a vyražením z provozu. Při využití biomasy pak záleží na jejím druhu a v případě záměrně pěstované biomasy i na poměru mezi těžbou a obnovováním porostů. Přehled metod výroby vodíku je zobrazen na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Přehled metod výroby vodíku. Upraveno z [51].

4.1 Výroba z fosilních zdrojů

Popis v této podkapitole vychází z textu převzatého ze zdroje [52]. Využívanými metodami výroby vodíku z fosilních zdrojů jsou parní reforming zemního plynu, parciální oxidace zemního plynu a ropných derivátů, autotermický reforming zemního plynu a zplyňování uhlí [52]. Autotermický reforming zde není dále rozebírán. Jeho princip spočívá v sériovém řazení parciální oxidace a parního reformingu, přičemž teplo vzniklé v prvním procesu je využito v následujícím [53]. Na rozdíl od ostatních uvedených metod není autotermický reforming zatím využíván v průmyslovém měřítku [52].

4.1.1 Parní reforming zemního plynu

Parní reforming zemního plynu je kontinuální proces, při kterém dochází k reakci zemního plynu, resp. metanu, který je jeho hlavní složkou s vodní parou za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého [52]. Reakce je endotermická a probíhá při teplotách 800–1100 °C. Nezbytná je přítomnost katalyzátoru, nejčastěji na bázi niklu s příměsí cenných kovů [54]. Účinnost procesu se pohybuje mezi 70–85 % [52]. Požadované teploty bývá dosaženo spálením části vstupujícího zemního plynu. V první fázi dochází k samotnému parnímu reforming dle rovnice 4.1 za vzniku syntézního plynu:



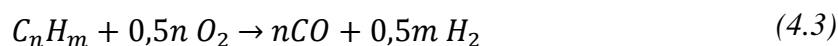
Vzniklý oxid uhelnatý je přeměněn na oxid uhličitý při takzvané water-gas shift reakci dle rovnice 4.2. Výsledná směs plynů obsahuje kromě 70–75 % H_2 také oxid uhličitý, oxid uhelnatý a metan [52].



Poslední fází je čištění vzniklého vodíku, a to takzvanou pressure swing adsorpcí ostatních složek za reaktorem, nebo využitím membránového reaktoru s polopropustnou membránou [55]. Ve druhé zmíněném případě je separace založena na rozdílných velikostech molekul a probíhá v reaktoru současně s water-gas shift reakcí [56]. Parní reforming je v současnosti nejrozšířenějším způsobem výroby vodíku pokrývajícím přibližně 50 % světové produkce [57]. Jeho výhodou je především nízká výrobní cena a možnost výroby v průmyslovém měřítku.

4.1.2 Parciální oxidace

Parciální oxidace je kontinuální proces primárně využívaný pro produkci vodíku z vyšších uhlovodíků, zejména z kapalných paliv [52]. Jako vstup lze nicméně využít i zemní plyn. Dochází při ní k reakci – hoření – uhlovodíků s podstechiometrickým množstvím kyslíku na oxid uhelnatý a vodík. Reakce je exotermická a probíhá zpravidla při teplotách okolo 1200 °C. Není tedy nutný vnější zdroj tepla a stejně tak není nezbytná přítomnost katalyzátoru. Účinnost procesu se nezávisle na vstupu pohybuje mezi 55–75 % [52]. Nejprve dochází k samotné parciální oxidaci dle rovnice 4.3, resp. 4.4 při parciální oxidaci zemního plynu:



Následuje opět water-gas shift reakce dle rovnice 4.2. Výtěžnost procesu je v porovnání s parním reformingem nižší, reakce však probíhá rychleji a zařízení je menší a konstrukčně jednodušší [58]. I proto je tato technologie běžně využívána. Nevýhodou je také nutnost spalování

s čistým kyslíkem. Spalování se vzduchem vede k významnému nárůstu nákladů na separaci vodíku vlivem přítomnosti dusíku [53].

4.1.3 Zplyňování uhlí

Zplyňování uhlí je diskontinuální proces, při kterém dochází ke střídavé reakci uhlíku v uhlí s kyslíkem a vodní parou za vzniku vodíku a oxidu uhličitého [52]. Reakce probíhá za vysokých teplot v rozsahu 800–1600 °C v závislosti na technologii zplyňování. Účinnost se pohybuje mezi 60–75 % [52]. Uhlí je vysušeno, rozdrveno a následně vedeno do zplyňovacího zařízení. V první fázi dochází k přívodu vzduchu a hoření části uhlí dle rovnice 4.5:



Po dosažení požadované teploty je přívod vzduchu uzavřen, a naopak otevřen přívod vodní páry. Ve zplyňovacím zařízení tak dochází ke vzniku vodního plynu dle rovnice 4.6:



Při poklesu teploty pod minimální hodnotu je přívod vodní páry zastaven, otevřen přívod vzduchu a cyklus se opakuje. Vzniklý oxid uhelnatý je opět přeměněn na oxid uhličitý při water-gas shift reakci dle rovnice 4.2. V poslední fázi dochází k separaci oxidu uhličitého ze směsi pomocí pressure-swing adsorpce nejčastěji dle rovnice 4.7 [52]:



Vzniklý uhličitán vápenatý může být regenerován. Výsledným produktem je vodík o vysoké čistotě. Zplyňování uhlí je navzdory nižší účinnosti a významně vyšším emisím oproti parnímu reformingu běžně komerčně využíváno, a to zejména v zemích s velkými zásobami uhlí.

4.2 Výroba z obnovitelných zdrojů

Popis v této podkapitole vychází z textu převzatého ze zdroje [52]. Pro výrobu vodíku z obnovitelných zdrojů lze využít biomasu nebo rozklad vody. Využívanou metodou je v případě biomasy parní zplyňování, v případě rozkladu vody elektrolýza [52]. Zbylé metody uvedené na obr. 4.2 jsou využívány zcela okrajově a zpravidla se nachází ve vývojové fázi. Z těchto důvodů zde nebudou dále rozebírány.

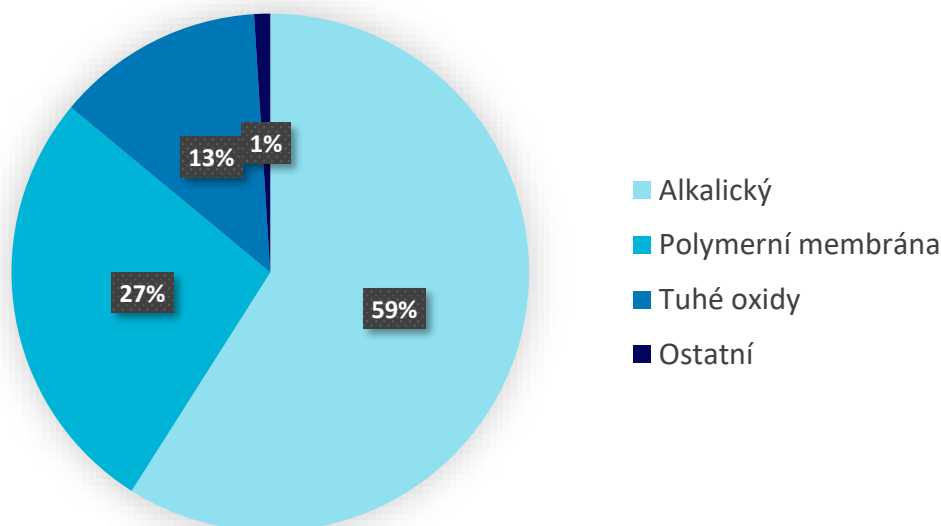
4.2.1 Elektrolýza vody

Elektrolýza vody je proces, při kterém dochází k rozkladu molekuly vody na vodík a kyslík působením stejnosměrného elektrického proudu [52]. Podmínky reakce a účinnost se liší v závislosti na typu elektrolyzátoru viz tab. 4.1. Používanými typy jsou elektrolyzátor s alkalickým elektrolytem (AEL), s polymerní membránou (PEM) a s tuhými oxidy (SOEL) [59]. Jejich příslušné podíly na trhu jsou zachyceny na obr. 4.3.

Tab. 4.1 Provozní teploty a účinnosti elektrolyzátorů [51][52][60].

| Technologie | Elektrolyt | Provozní teploty [°C] | Čistota H ₂ [%] | Účinnost elektrolýzy [%] | Celková účinnost [%] |
|-------------|------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------|
| AEL | KOH, NaOH | 30–80 | ≥ 99,8 | 70–80 | 62–82 |
| PEM | Polymer | 20–80 | ≥ 99,99 | 80–90 | 67–84 |
| SOEL | Tuhý oxid | 500–850 | – | 90–100 | 81–86 |

Konstrukce elektrolyzátorů je tvořena dvěma elektrodami, elektrolytem a zdrojem stejnosměrného proudu. Podrobný popis konstrukce a funkce je vzhledem k podobnosti s palivovými články uveden v kap. 6.2. Na záporné elektrodě – katodě – dochází ke vzniku bublinek vodíku, na anodě ke vzniku bublinek kyslíku [52]. Díky tomu je možná snadná separace obou plynů. Vznikající vodík má vysokou čistotu až 99,999 % a zpravidla nevyžaduje další čištění [51].

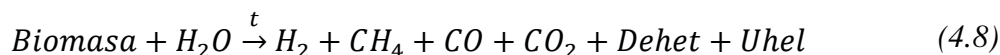


Obr. 4.3 Druhy elektrolyzátorů dle podílu na trhu. Hodnoty za rok 2021 [59].

Elektrolýza vody je navzdory vysoké účinnosti a vysoké čistotě produkovaného vodíku využívána pouze v omezené míře. Hlavní příčinou jsou vysoké provozní náklady navázané na cenu odebrané elektrické energie [52]. S rozvojem obnovitelných zdrojů energie i samotných elektrolyzátorů však lze do budoucna předpokládat pokles ceny takto produkovaného vodíku a jeho ekonomickou konkurenceschopnost [17][18].

4.2.2 Výroba z biomasy

Nejčastěji využívanou metodou pro výrobu vodíku z biomasy je parní zplyňování biomasy [52]. Jedná se o složitý proces, při kterém dochází k reakci biomasy s vodní parou za vzniku řady produktů. Reakce je endotermická a probíhá při teplotách 700–1200 °C [61]. Účinnost procesu se pohybuje kolem 50 % [62]. Požadované teploty může být dosaženo spálením části biomasy. V první fázi dochází k samotnému zplyňování dle rovnice 4.8:



Současně se zplyňováním probíhá přeměna oxidu uhelnatého na oxid uhličitý při water-gas shift reakci dle rovnice 4.2. V poslední fázi dochází k separaci příměsí ze směsi pomocí pressure-swing adsorpce [52]. Vznikající vodík se vyznačuje relativně nízkou čistotou. Vznikající dehet a uhel navíc způsobují ucpávání reaktoru. Jejich vzniku přitom není možné zcela zabránit, řešením je proto termický rozklad [52]. I přes tyto nevýhody jsou zařízení využívající technologii zplyňování biomasy komerčně dostupné. Biologické procesy výroby jsou založeny na mikroorganismech produkujících vodík při rozkladu biomasy [52]. Reakce probíhají zpravidla za normální teploty a tlaku a bez přítomnosti katalyzátoru, s čímž souvisí nízké výrobní náklady [63]. Nevýhodou biologických procesů je především nízká produkce vodíku [64]. I z tohoto důvodu se stále nachází ve fázi laboratorního testování a nejsou komerčně dostupné.

5 PŘEPRAVA A SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Přeprava a skladování vodíku využívají často stejné technologie. Z toho důvodu jsou v rámci této kapitoly rozebírány společně. Přpravou je přitom myšlena jak dálková přeprava, tak distribuce. Využívané technologie lze rozdělit na tlakové a kryogenní. Vodík je také možno přepřavovat a skladovat v podobě sloučenin – zejména amoniaku NH_3 a organických sloučenin LOHC, nebo uvnitř matrice materiálu [65]. Rozhodujícím parametrem při výběru technologie je objemová energetická hustota, definovaná jako výhřevnost vztažená na 1 m^3 látky.

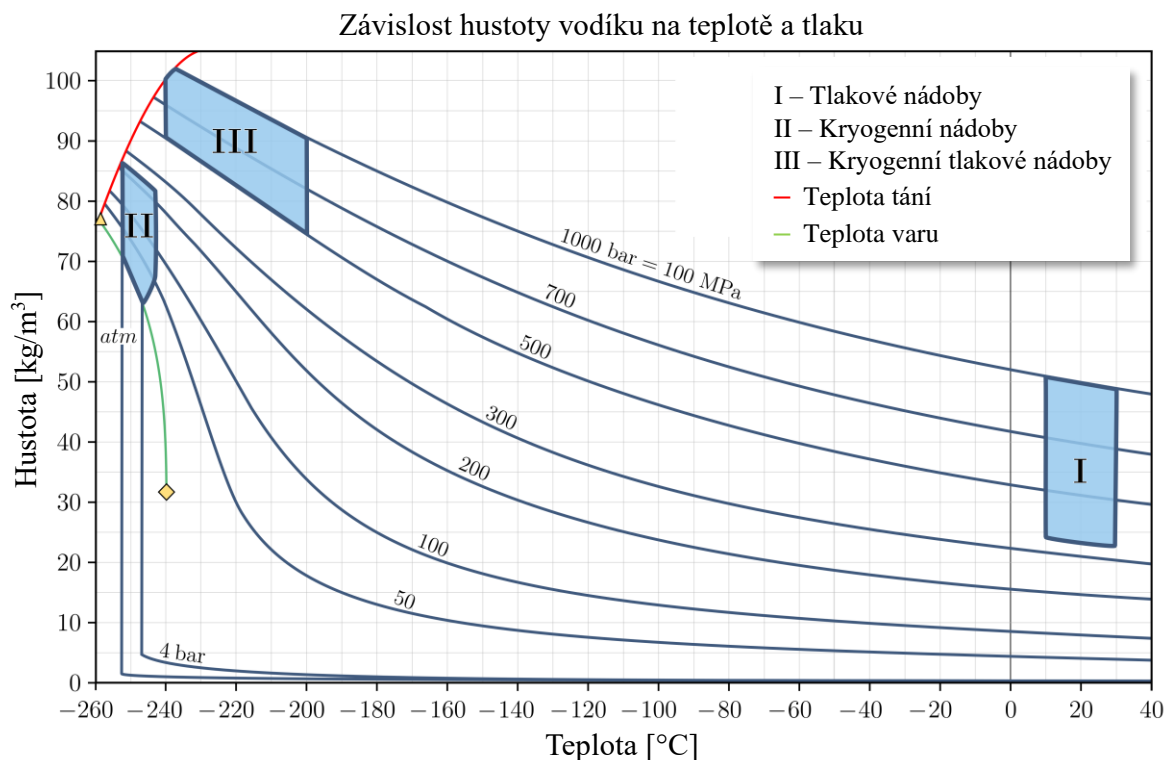
5.1 Stlačený vodík

Objemovou energetickou hustotu je možné zvýšit stlačením. K tomu jsou využívány zejména pístové a odstředivé kompresory schopné dosáhnout velmi vysokých tlaků [66]. Hodnoty tlaku dosahují 850 bar, výjimečně i více. V případě nádrží vozidel je standardně využívána tlaková úroveň 700 bar – viz tab. 8.1. Vyšší tlaky nejsou z pevnostních důvodů dosažitelné. Při stlačování dochází k energetickým ztrátám, které se pohybují mezi 5–20 % v závislosti na tlaku [67]. Vliv tlaku na objemovou energetickou hustotu je popsán v tab. 5.1. Závislost samotné hustoty vodíku na teplotě a tlaku je popsána na obr. 5.1

Tab. 5.1 Závislost objemové energetické hustoty vodíku na tlaku [68].

| Tlak [bar] | 1 | 100 | 200 | 350 | 500 | 700 | 850 | Kap. |
|---------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Hustota [kg/m^3] | 0,089 | 8,345 | 15,419 | 25,076 | 32,968 | 40,627 | 46,371 | 73,284 |
| Obj. en. h. [MJ/m^3] | 10,7 | 1003,2 | 1853,5 | 3014,4 | 3963,1 | 4883,8 | 5574,3 | 8809,5 |

Pozn. Hodnoty platné pro gravimetrickou energetickou hustotu $120,21 \text{ MJ/kg}$ a teplotu $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Hodnota pro zkapalněný vodík je platná pro teplotu $-255 \text{ }^\circ\text{C}$ a tlak 1 bar.



Obr. 5.1 Závislost hustoty vodíku na teplotě a tlaku. Upraveno z [69].

Pozn. Trojúhelník označuje trojný bod vodíku, kosočtverec označuje kritický bod.

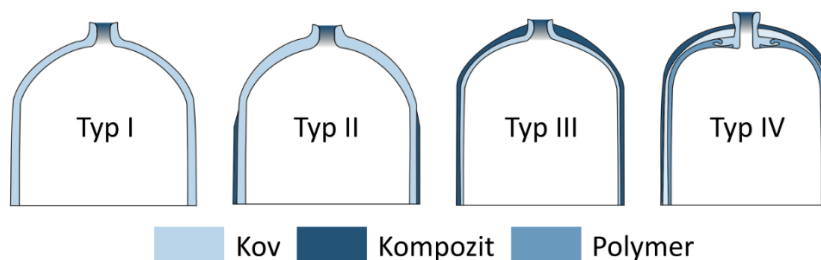
5.1.1 Plynovody

Plynovody jsou primárně určeny k přepravě velkých objemů vodíku. Jejich využití pro skladování je omezeno na akumulaci v rámci dovolených odchylek provozních tlaků. Tato kapacita může být využita pro vyrovnání rozdílů v poptávce v průběhu dne, pro středně a dlouhodobé skladování je však nedostatečná. Periodické tlakové pulzace mají nicméně negativní dopad na životnost plynovodu vlivem HIC [26]. Z toho důvodu je nutné srovnat křivku únavové životnosti při předpokládané amplitudě tlakových pulzacích s projektovanou životností plynovodu. Provozní tlaky lze předpokládat stejné jako u zemního plynu – od 2 kPa u místních sítí do desítek barů u přepravních plynovodů, případně mírně vyšší – viz níže. Provozní teploty jsou pak blízké teplotě okolí. Pro nízkotlaké (do 0,05 bar) a některé středotlaké plynovody (do 2 bar) lze využít plastové trubky [70]. Pro vyšší tlaky jsou standardně využívány ocelové materiály. Do tlaku 10 bar přitom obecně není nutné ověření kompatibility materiálu s vodíkem, jelikož je vliv HE, resp. HIC zanedbatelný [71].

Výhodou plynovodů jsou zejména nízké provozní náklady a – za předpokladu minimalizace úniků – ekologický provoz. Investiční náklady je pak možné snížit konverzí plynovodů v současnosti využívaných pro zemní plyn [72]. Problémem při úpravě již provozovaných plynovodů může být znečištění přepravovaného vodíku nečistotami, korozními úsadami a pozůstatky odorantu [72]. Takto znečištěný plyn je stále vhodný pro většinu aplikací, jeho využití v palivových článcích však vyžaduje čištění [73]. Změna média také může způsobit kapacitní problémy vyžadující zvýšení rychlosti proudění, tlaku nebo zvětšení průměru potrubí pro zachování energetického toku [72]. Alternativou je tak výstavba nových plynovodů, u nichž je možné zaručit přepravní kapacitu a zároveň i kompatibilitu všech použitých součástí a materiálů s vodíkem. Plynovody pro přepravu vodíku jsou dnes běžně využívány v chemických závodech. Využití v energetice je v Evropě zatím limitováno na pilotní projekty [74]. V České republice je výstavba bohužel brzděna chybějící legislativou. Česká vodíková strategie však počítá s výstavbou páteřní vodíkové sítě a lze tak předpokládat její brzké doplnění a následný rozvoj distribuční sítě [18]. Zásobování vodíkové plnicí stanice plynovodem nicméně v současné době není možné.

5.1.2 Tlakové nádoby

Tlakové nádoby je možné využít jak pro přepravu, tak pro skladování vodíku. Dle toho je lze rozdělit na mobilní – v podobě tahačových návěsů – a stacionární. Jejich výhodou je zejména velký rozsah velikostí od jednotek kWh (jednotek kg) až po desítky MWh (tisíců kg) [75][76]. Kapacita je závislá na objemu nádoby a tlaku a je limitována pevností použitých materiálů. V případě mobilních tlakových nádob je ovlivněna také rozměry a nejvyšší dovolenou hmotností umožňující přepravu [76]. Zásobování tlakovými nádobami je vhodné převážně pro nízké odběry. Důležité je zajištění bezpečnosti dodávek, která může být snadno narušena vlivem výjimečných okolností při transportu. Toto riziko narůstá s rostoucí frekvencí dodávek. Z hlediska skladování jsou tlakové nádoby dostatečné pro krátkodobé a střednědobé skladování – dle kapacity a velikosti odběru. Z pohledu konstrukce pak existují čtyři typy nádob – viz obr. 5.2.



Obr. 5.2 Typy tlakových nádob dle konstrukce. Upraveno z [69].

Typ I jsou kovové nádoby, nejčastěji z oceli, případně z hliníku pro tlaky vodíku do 500 MPa. Jejich výhodou jsou nízké výrobní náklady, nevýhodou naopak vysoká hmotnost, která jejich použití omezuje na stacionární aplikace [69]. Typ II jsou kovové nádoby s vnější kompozitní bandáží – často ze skelných nebo uhlíkových vláken, která nese část zátěže. Jejich výhodou je potenciálně vyšší tlaková odolnost, ale především nižší hmotnost oproti typu I, nevýhodou pak vyšší cena. Typ III jsou kompozitní nádoby s kovovou vložkou, která je však přítomná pouze pro zaručení těsnosti a nenesou zátěž. Jejich výhodou je nižší hmotnost oproti typu II [69]. Typ IV jsou pak kompozitní nádoby s polymerní vložkou a jsou vhodné pro tlaky až do 1000 bar, ze všech typů jsou nejlehčí, ale také nejdražší [69]. Díky těmto vlastnostem je využíván pro nádrže ve vozidlech na vodíkový pohon.

Zásobování tlakovými nádobami se vyznačuje nízkými investičními, ale vyššími provozními náklady. Výhodou je naopak vysoká zaručená kvalita dodávaného plynu [77]. Tato forma zásobování může být vhodná zejména v případě chybějící infrastruktury, např. pro pilotní projekty a testování. Dodávky tlakového vodíku jsou navíc na našem trhu již komerčně dostupné [77]. Díky těmto vlastnostem je využití tlakových nádob vhodné i pro zásobování vodíkových plnicích stanic, kde mohou být s výhodou využity také pro skladování. Skladování tlakového vodíku se vyznačuje jednodušší infrastrukturou než u zkapalněného vodíku [78]. Na druhou stranu však nedosahuje takových energetických hustot. Zvláštní variantou tlakových nádob jsou pak kryogenní tlakové nádoby, které umožňují dosažení vysokých hustot stlačením a současným ochlazením vodíku na teploty blízké teplotě varu. Jejich nároky na materiály jsou však velmi vysoké a jejich nevýhody podobné jako u kryogenních nádob – viz kap 5.2.

5.1.3 Podzemní zásobníky

Podzemní zásobníky plynu jsou vhodné zejména pro dlouhodobé skladování, které umožňuje kompenzaci sezónních rozdílů v poptávce. V současnosti jsou na světě v provozu čtyři zásobníky čistého vodíku kavernového typu – viz dále. Jejich kapacita se pohybuje řádově výše než u tlakových nádob – ve vysokých desítkách GWh [79]. Podzemní zásobníky v České republice jsou v současné době využívány výhradně pro skladování zemního plynu. Možnost jejich využití pro skladování vodíku je předmětem výzkumu. Podzemní zásobníky lze dle geologické struktury rozdělit na solné kaverny, aquifery a porézní zásobníky [80]. Porézní zásobníky – typicky vytěžená ložiska zemního plynu – využívají pro skladování plynu porézní horninu. Zvláštním druhem porézních zásobníků jsou aquifery, kde je plyn skladován v porézní hornině dříve nasáklé vodou, která byla plynem vytlačena [80]. Důležitým prvkem obou typů jsou nepropustné vrstvy bránící úniku plynu. Solné kaverny jsou uměle vytvořené dutiny v ložiscích solí, která zároveň zaručují těsnost zásobníku [80]. Kromě těchto základních druhů existují také kaverny vyhloubené v tvrdé hornině, často s ocelovou nebo plastovou vložkou zvyšující těsnost [80]. Jejich počet je ovšem velmi nízký, zejména kvůli vysoké ceně výstavby [81].

Jak již bylo zmíněno, v současnosti provozované podzemní zásobníky vodíku jsou typu solných kaveren [79]. Zkušenosti se skladováním vodíku v ostatních typech zásobníků nejsou k dispozici, jelikož tyto typy nebyly doposud pro vodík využívány [82][83]. Zásadním problémem pro využití porézních zásobníků a aquiferů mohou být zejména chemické reakce vodíku s horninou a mikrobiální reakce, mající za následek úbytek a znečištění vodíku [83][84]. U kaveren v tvrdé hornině lze při použití vhodného materiálu vložky předpokládat bezproblémovou kompatibilitu. Možnosti vybudování podzemních zásobníků jsou limitovány vhodnými geologickými strukturami a případná konverze na vodík pak dále zvyšuje nároky, zejména na těsnost nepropustných vrstev [85]. Rozšiřování skladovacích kapacit tak může být problematické. V České republice se aktuálně nachází devět podzemních zásobníků plynu z toho jeden je připojen na slovenskou plynárenskou soustavu. Ze zbylých osmi je šest zásobníků porézního typu, jeden aquifer a jedna kaverna vyhloubená v žulovém masivu [86]. Výsledky

výzkumu kompatibility vodíku s porézními zásobníky a aquifery proto budou mít zásadní dopady. Podzemní zásobníky plynu mají vzhledem ke svým kapacitám a nákladům význam pouze ve spojení s plynovody. Jejich využití pro skladování vodíku v plnicí stanici tedy není vhodné.

5.2 Zkapalněný vodík

Pro dosažení maximální objemové energetické hustoty je nutné vodík zkapalnit ochlazením pod teplotu varu -253 °C . K tomu je využíván Lindeho nebo Claudeho proces na základě Joule-Thomsonova jevu [87]. Zkapalněný vodík je následně uchováván v kryogenních nádobách při atmosférickém tlaku. Zkapalňování je energeticky velmi náročný proces, který má za následek významné energetické ztráty dosahující 30–40 % [65][67]. Zároveň vyžaduje výstavbu příslušné infrastruktury, a to jak na straně zkapalňování, tak i opětovného odpařování v místě spotřeby. Hodnota objemové energetické hustoty při zkapalnění je uvedena v tab. 5.1.

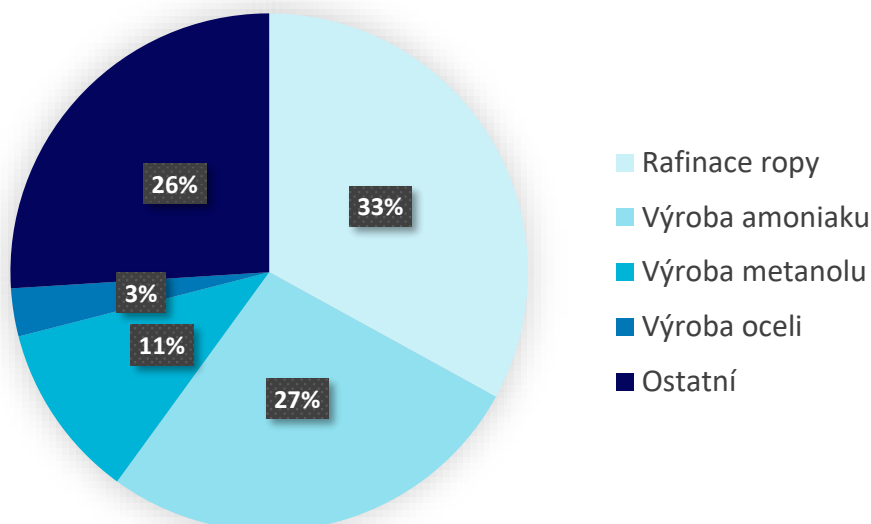
Kryogenní nádoby je možné využít jak pro přepravu, tak pro skladování a obdobně jako tlakové nádoby je lze rozdělit na mobilní a stacionární. Jejich kapacita je vyšší než u tlakových nádob – v řádu desítek až stovek MWh (stovek až tisíců kg) u mobilních a až jednotek GWh (stovek tisíc kg) u stacionárních [88][89]. Zásobování kapalným vodíkem je proto vhodné zejména pro střední odběry [65]. Vlivem velké teplotní diference mezi obsahem nádrže a okolím dochází ke kontinuálnímu odparu. Ten lze snížit vyšší kvalitou izolace, nelze mu však zabránit a je tedy nutné zajištění jeho bezpečného odvětrání [90]. Aktivní zkapalňování odparu je kvůli energetické náročnosti využíváno pouze výjimečně. Z tohoto důvodu jsou kryogenní nádoby vhodnější pro krátkodobé případně střednědobé skladování. Konstrukce nádob bývá dvouplášťová, ocelová pro zvýšení bezpečnosti. Prostor mezi pláštěmi je pak tepelně izolován vakuem [90]. Využití kryogenních nádob může být výhodné při námořní přepravě na velké vzdálenosti a následné distribuci kapalného vodíku z přístavu [65]. V případě lokálních dodávek je ale vlivem vyšších investičních i provozních nákladů zpravidla nekonkurenceschopné tlakovým nádobám. Zásobování vodíkové plnicí stanice tekutým vodíkem je tak vhodné zejména pro velké stanice při současné absenci plynovodní infrastruktury [65]. Jeho využití pro malé odběry jako je navrhovaná plnička není z ekonomického hlediska výhodné.

5.3 Vodík ve sloučeninách a materiálech

Vodík lze kromě stlačené a zkapalněné formy skladovat také v chemických sloučeninách – např. v amoniaku (NH_3), kapalných organických sloučeninách (LOHC) nebo kovových hydridech – nebo adsorbovaný na porézní matici vybraných materiálů [65]. Výhodou těchto metod jsou příznivější přepravní a skladovací podmínky – nejsou třeba vysoké tlaky ani velmi nízké teploty, což má za důsledek nižší cenu přepravních / skladovacích nádob [65]. Uchovávání vodíku v těchto formách má zároveň pozitivní dopady na bezpečnost a umožňuje snadnější manipulaci – například i díky využití již existující infrastruktury pro přepravu a skladování chemikálií. Nevýhodou chemických sloučenin je nutnost jejich výroby a především opětovného rozkladu v místě spotřeby, které má za následek významné energetické ztráty a zároveň vyžaduje vybudování příslušné infrastruktury [91][92]. V případě adsorpce jsou problémy obdobné, energetická náročnost rozkladu (desorpce) je nicméně nižší a hlavním překážkou je nízká kapacita využívaných porézních materiálů [93]. Je také třeba mít na paměti, že vodík v těchto sloučeninách tvoří jen malou část hmotnosti a z hlediska přepravy se proto jedná o relativně neefektivní variantu [87]. Množství vodíku uskladněného v daném objemu nicméně může být podobné jako u tlakových nádob [92]. V současné době jsou tyto metody převážně ve fázi výzkumu a nejsou připraveny pro komerční nasazení [65]. Jejich využití pro zásobování a skladování vodíku v navrhované plnicí stanici proto není možné.

6 VYUŽITÍ VODÍKU

Vodík je dnes dominantně využíván jako surovina v chemickém a petrochemickém průmyslu, a to zejména pro čištění a krakování ropy nebo pro výrobu metanolu a amoniaku – viz obr. 6.1. Využití vodíku v dopravě a energetice se tak na celkové spotřebě podílí pouze nepatrnou měrou. V blízké budoucnosti je nicméně plánován další rozvoj a rozšíření těchto aplikací a s tím i nárůst spotřeby vodíku v těchto oblastech [17][18]. Tato kapitola je vzhledem k cílům práce zaměřena právě na oblast dopravy a energetiky, ostatní aplikace zde nebudou dále rozebírány.



Obr. 6.1 Využití vodíku – čistého i ve směsích s jinými plyny – dle aplikace [94].

6.1 Spalování vodíku

Spalování je termochemický proces, při které dochází k přeměně chemické energie paliva na teplo, které lze využít buď přímo – např. pro vytápění budov, nebo nepřímo – např. pro výrobu elektrické energie v plynových spalovacích turbínách. Nepřímé využití dále zahrnuje přeměnu tepla na kinetickou energii pro pohon stroje – ať už v pístových spalovacích motorech, nebo v leteckých proudových motorech. Pro většinu aplikací však spalování vodíku není vzhledem k nutnosti jeho výroby – a tedy vysoké ceně – ekonomicky výhodné. Při výrobě, přepravě a skladování vodíku navíc dochází k významným energetickým ztrátám, a to nehlédě na využitou technologii. Obecně tedy platí, že energetické zdroje využívané pro výrobu vodíku je levnější a zároveň efektivnější využít přímo pro konečnou aplikaci. Přesto však existují situace a případy, kdy toto není možné a využití vodíku může být vhodným řešením. Typicky se jedná o požadavek na úplnou dekarbonizaci za využití elektřiny z obnovitelných zdrojů, kdy není přímé využití elektrické energie možné kvůli technologickým nárokům dekarbonizovaného procesu – např. požadavku na vysoké teploty [10]. V oblasti dopravy může být spalování vodíku zejména cestou pro dekarbonizaci letectví, pro které alternativní řešení v podobě palivových článků – viz kap. 6.2 nemusí poskytovat dostatečný výkon [95][96].

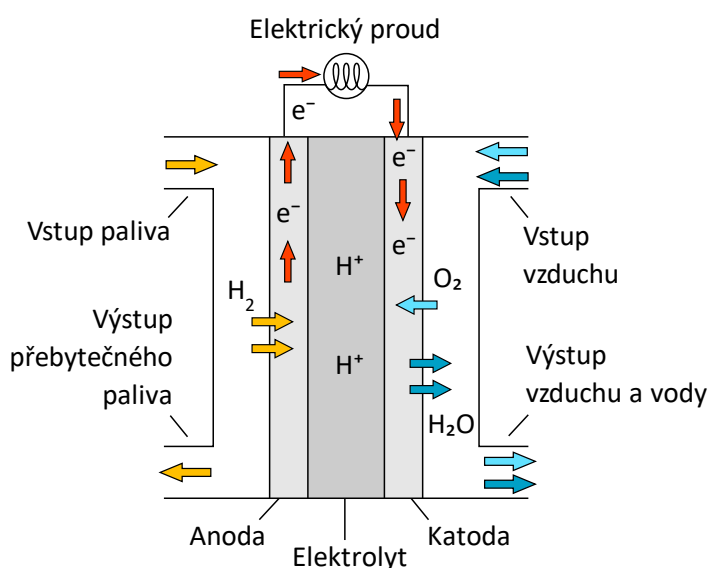


Spalování vodíku – viz rovnice 6.1 – je v mnohém podobné spalování zemního plynu, nejedná se však o záměnná paliva, a to zejména v důsledku zcela odlišné rychlosti plamene – viz tab. 2.1. Dalším významným rozdílem je odlišný spalovací poměr – poměr množství paliva a přiváděného vzduchu – 0,24 kg_{vz}/MJ oproti 0,31 kg_{vz}/MJ u zemního plynu [97]. Pro dokonalé

spálení vodíku je tedy třeba méně vzduchu a zároveň díky lepšímu promíšení a širším mezím výbušnosti stačí nižší přebytek vzduchu [97]. Vodík má dále mírně vyšší teplotu nechlazeného plamene – 2182 °C oproti 1937 °C u zemního plynu, což klade zvýšené nároky na materiály, které musí být zároveň odolné vůči poškození vodíkem [98]. V důsledku vyšších teplot také dochází ke zvýšené tvorbě termických NO_x (oxidů dusíku). Samotné spalování pak probíhá bez vzniku emisí CO₂ a nedokonalých produktů.

6.2 Palivové články

Palivový článek je zařízení, ve kterém dochází k přímé přeměně chemické energie paliva – v tomto případě vodíku – na elektrickou energii [99]. Je tvořen dvěma elektrodami, mezi nimiž je prostor vyplněný elektrolytem – viz obr. 6.2. Elektrolyt může být jak kapalný, tak pevný – dle typu palivového článku. Součástí elektrod je katalyzátor, který snižuje energetickou bariéru a umožňuje průběh elektrochemických reakcí [99].



Obr. 6.2 Základní schéma palivového článku. Upraveno z [100].

Základní konstrukce palivových článků je shodná s konstrukcí elektrolyzérů, rozdíl mezi nimi je dán směrem průběhu elektrochemických reakcí [101]. Jedno zařízení tedy může v principu sloužit jako palivový článek i jako elektrolyzér. V druhém zmiňovaném případě jsou pak reaktanty a produkty zaměněny a elektrický proud je do obvodu dodáván vnějším zdrojem [101].

Následující popis probíhajících reakcí vychází z [102]. Reakce jsou popsány ve směru, ve kterém probíhají v palivových článcích. Vodík je přiváděn na anodu, vzduch na katodu. Na anodě, resp. její katalytické vrstvě dochází k disociaci molekuly vodíku dle rovnice 6.2:



Vodíkové ionty prochází elektrolytem, elektrony prochází skrz vnější elektrický okruh a znovu se setkávají na katodě. Zde reagují spolu s přiváděným kyslíkem ve vzduchu za vzniku vody a tepla dle rovnice 6.3:



Jediným produktem probíhajících reakcí jsou voda a odpadní teplo. Nedochozí tedy ke vzniku emisí CO₂ ani jiných znečišťujících látek [102].

Tab. 6.1 Přehled a srovnání nejpoužívanějších typů palivových článků [103].

| Technologie | Elektrolyt | Provozní teploty [°C] | Typický výkon [kW] | Elektrická účinnost [%] | Aplikace | Výhody | Nevýhody |
|-------------|----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------|---|--|---|
| PEMFC | Polymerní membrána | < 120 | < 1–100 | 60 | Záložní zdroje Přenosné zdroje Vozidla | Kompaktnost Nízké provozní teploty Rychlý start | Drahý katalyzátor Citlivost na nečistoty v palivu |
| AFC | Alkalický elektrolyt | < 100 | 1–100 | 60 | Záložní zdroje Armádní vybavení Vesmírný výzkum | Nízké provozní teploty Rychlý start Levnější materiály | Citlivost na obsah CO ₂ v palivu Problematický elektrolyt |
| PAFC | Kyselina fosforečná | 150–200 | 5–400 | 40 | Kogenerace | Dobrá tolerance nečistot v palivu | Pomalý start Drahý katalyzátor Citlivost na obsah síry |
| MCFC | Roztavené uhličitany | 600–700 | 300–3000 | 50 | Decentralizovaná výroba elektřiny | Levný katalyzátor Vysoká účinnost | Vysoké provozní teploty Pomalý start Nízká energetická hustota |
| SOFC | Tuhé oxidy | 500–1000 | 1–2000 | 60 | Decentralizovaná výroba elektřiny | Vysoká účinnost Pevný elektrolyt | Vysoké provozní teploty Pomalý start Omezená životnost |

| Technologie | Název | Překlad |
|-------------|------------------------------------|---|
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell | Palivový článek s polymerní membránou |
| AFC | Alkaline Fuel Cell | Palivový článek s alkalickým elektrolytem |
| PAFC | Phosphoric Acid Fuel Cell | Palivový článek s kyselinou fosforečnou |
| MCFC | Molten Carbonate Fuel Cell | Palivový článek s roztavenými uhličitany |
| SOFC | Solid Oxide Fuel Cell | Palivový článek s tuhými oxidy |

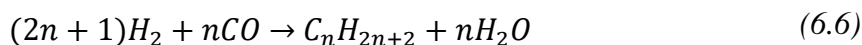
Existuje mnoho technologií palivových článků lišících se navzájem především použitým elektrolytem a provozními teplotami. V závislosti na typu se může lišit také druh iontů procházejících přes elektrolyt – kromě iontů H^+ to mohou být také OH^- nebo O^{2-} [87]. Přehled a srovnání nejpoužívanějších typů je uveden v tab. 6.1. Obdobné informace k elektrolyzérům jsou uvedeny v kap. 4.2.1. Z přehledu je patrné, že palivové články dosahují při výrobě elektřiny významně vyšších účinností než spalovací motory a turbíny. Vlivem absence pohyblivých částí jsou navíc tiché a po mechanické stránce spolehlivé. Ve vozidlech jsou díky své kompaktnosti a příznivým provozním teplotám nejčastěji využívány palivové články typu PEM (Proton Exchange Membrane) [104][105][106]. Ty se vyznačují použitím pevného polymeru jako elektrolytu a uhlíkových elektrod s platinovým katalyzátorem. Provozní teploty se pohybují okolo $80\text{ }^\circ\text{C}$, elektrická účinnost dosahuje 60 %. Výhodou je vysoká výkonová hustota, nízká hmotnost, rychlý start a nízká doba odezvy na změnu výkonu [104]. Nevýhodou je naopak požadavek na velmi vysokou čistotu paliva 99,97 % [107]. Řada příměsí – zejména oxid uhelnatý a sloučeniny síry působí jako katalytické jedy a způsobují nevratné poškození palivového článku a tím významné zkrácení jeho životnosti [104][108].

6.3 Syntetická paliva

Vyrobený vodík lze také využít pro výrobu syntetických paliv. Hlavní myšlenkou je přeměna vodíku na jiné, běžně využívané energetické nosiče, což umožňuje dekarbonizaci bez nutnosti změny využívaných technologií. Na rozdíl od skladování vodíku ve sloučeninách nedochází ke zpětné přeměně sloučenin na vodík. Energetické ztráty jsou proto nižší, ale stále přítomné oproti přímému využití vodíku. Produkovanými sloučeninami jsou pak zejména metan CH_4 , vyráběný metanizací (také nazývána Sabatierovou reakcí) dle rovnic 6.4 a 6.5 a kapalné uhlovodíky vyráběné Fischer-Tropschovou syntézou dle rovnice 6.6 [87]:



Metanizace probíhá – v závislosti na vstupu – ve dvou krocích dle rovnic výše, pokud je vstupem CO_2 , nebo pouze dle rovnice 6.5 je-li vstupem oxid uhelnatý CO . Reakce je exotermická, probíhá za teplot až $700\text{ }^\circ\text{C}$, ale vyžaduje iniciační energii – teplo a přítomnost katalyzátoru nejčastěji na bázi niklu. Výťažnost pak dosahuje až 80 % a vzniklý metan čistoty až 90 % [87].



Fischer-Tropschova syntéza probíhá jednostupňově dle rovnice výše. Změnou reakčních podmínek lze měnit výsledné produkty, kterými mohou být metan, metanol a oktan [87]. Reakce je opět exotermická a probíhá za zvýšených teplot mezi $200\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ a přítomnosti katalyzátoru, nejčastěji železa nebo kobaltu [109].

Obě tyto přeměny vyžadují jako vstup oxid uhelnatý, resp. uhličitý, které je možné získávat ze spalovacích procesů, chemických reakcí, nebo přímo z atmosféry za využití technologií pro zachytávání CO_2 . Vzniklá paliva tak mohou být uhlíkově neutrální a umožňují tak relativně rychlou a jednoduchou dekarbonizaci průmyslových odvětví u kterých není využití čistého vodíku z technologických nebo jiných důvodů možné. Nevýhodou syntetických paliv je pak pochopitelně vysoká cena závislá na ceně vodíku pro jejich výrobu.

7 EKONOMIKA A ENVIRONMENTÁLNÍ ASPEKTY VODÍKU

Kromě technických aspektů jednotlivých technologií pro výrobu, přepravu a skladování vodíku je nutné zohlednit také jejich ekonomickou relevanci a dopady na životní prostředí. Vysoká cena může mít za následek pomalejší akceptaci vodíku zákazníky a v krajním případě omezené využívání. Environmentální dopady pak hrají zásadní roli v užití vodíku jako obnovitelného paliva pro dekarbonizaci naší společnosti.

7.1 Ekonomika vodíku

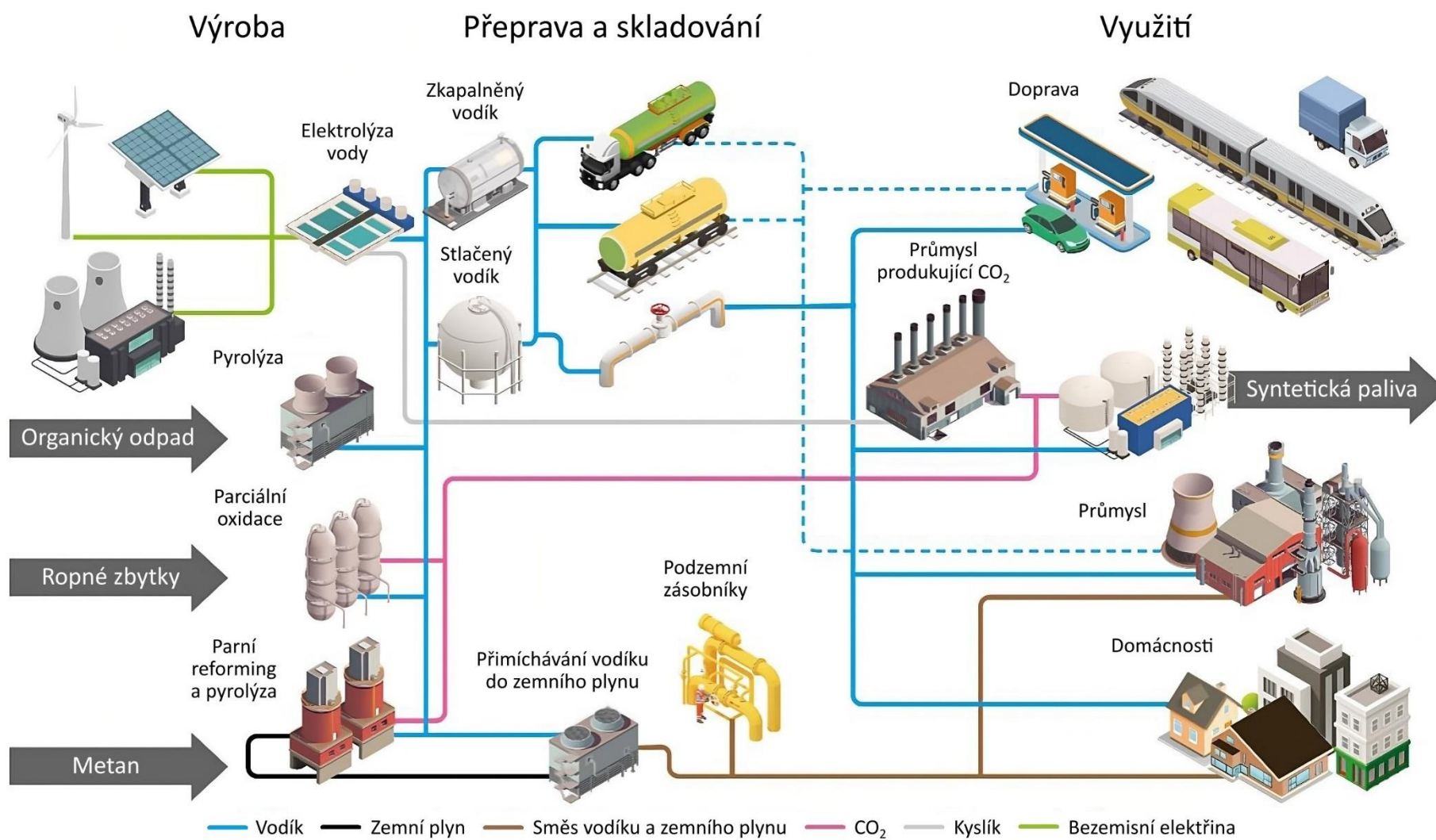
Výsledná cena vodíku je závislá na řadě faktorů, z nichž nejvýznamnější jsou samotné náklady na výrobu, přepravu a skladování vodíku. Tyto náklady lze rozdělit na kapitálové (CAPEX), zahrnující náklady na výstavbu a modernizaci a provozní (OPEX), spojené s obsluhou, údržbou a vlastní spotřebou zařízení. Dalšími faktory mohou být cena primárního zdroje energie, účinnost zařízení, míra jeho využití, cena emisních povolenek a přiměřený zisk. Významný vliv může mít také státní podpora. Cena vodíku se proto na plnicích stanicích v Evropě pohybuje mezi 10–28 €/kg H₂ [110]. Jednotlivé části hodnotového řetězce mají na výslednou cenu vodíku různý dopad. Výrobní náklady dle metody jsou uvedeny v tab. 7.1. Samotný vodíkový hodnotový řetězec je pak pro přehled zachycen na obr. 7.1.

Tab. 7.1 Přehled cen výroby vodíku dle výrobní metody. ZP označuje zemní plyn.

| Výrobní metoda | Cena [\$/kg H ₂] | Zdroj |
|--|------------------------------|-------|
| Parní reforming zemního plynu – ZP | 1,16–2,55 | [111] |
| Parní reforming ZP se zachytáváním CO ₂ | 1,39–3,25 | [111] |
| Autotermický reforming ZP se zachyt. CO ₂ | 1,48 | [112] |
| Pyrolýza ZP | 1,16–2,90 | [111] |
| Zplyňování uhlí | 1,34 | [112] |
| Zplyňování uhlí se zachyt. CO ₂ | 1,63 | [112] |
| Zplyňování biomasy | 1,77–2,05 | [112] |
| Pyrolýza biomasy | 1,25–2,20 | [112] |
| Temná fermentace biomasy | 2,57 | [112] |
| Fotofermentace biomasy | 2,83 | [112] |
| Elektrolýza – fotovoltaické elektrárny | 5,78–23,27 | [112] |
| Elektrolýza – větrné elektrárny | 5,89–6,03 | [112] |
| Elektrolýza – jaderné elektrárny | 4,15–7,00 | [112] |

Pozn. Při přepočtu měn byl využit kurz 1 EUR = 1,16 USD, odpovídající desetiletému průměru v období sběru dat dle údajů Evropské centrální banky.

Z tabulky výše vyplývá, že výroba vodíku za využití fosilních zdrojů – ať už se zachytávání CO₂ či nikoli je nejlevnějším způsobem, což je dáno zejména hojným rozšířením těchto technologií a dlouhodobou optimalizací výrobního procesu. Udržitelným a zároveň ekonomicky únosným řešením je v současnosti využití biomasy, která je však již hojně využívána pro výrobu elektrické energie. Její potenciál je proto jen omezený. Poslední možností je elektrolýza za využití energie z obnovitelných, nebo přinejmenším bezemisních zdrojů. Její cena je však zatím násobně vyšší. Do budoucna se však bude jednat o hlavní způsob výroby vodíku, v krátkodobém horizontu pak lze očekávat řadu projektů ve větším měřítku jako ověření konceptu. Nezmiňovanou možností je elektrolýza za využití elektřiny ze sítě, její přínos však spočívá spíše v regulaci přenosové soustavy. Při tomto způsobu využití však může být výhodná.



Obr. 7.1 Vodíkový hodnotový řetězec. Upraveno z [18].

Náklady na přepravu a skladování vodíku jsou v případě přepravy silně závislé na typu dopravního prostředku, vzdálenosti a podmínkách, v případě skladování pak zejména na délce skladování. Provozní náklady tak nemohou být určeny obecně, ale jsou kalkulovány pro konkrétní případy. V tab. 7.2 jsou proto uvedeny pouze hodnoty kapitálových výdajů na jednotlivé možnosti přepravy a skladování. Podrobný výpočet celkových nákladů pro vybrané případy je pak uveden například v dokumentu National Renewable Energy Laboratory [113].

Tab. 7.2 Přehled kapitálových nákladů přepravy a skladování vodíku dle příslušných metod.

| Metoda skladování | Podmínky | CAPEX | Zdroj |
|-------------------|----------|-------------------------|-------|
| Solná kaverna | 150 bar | 21 €/kg H ₂ | |
| Tlaková nádoba | 350 bar | 800 €/kg H ₂ | [111] |
| Tlaková nádoba | 500 bar | 600 €/kg H ₂ | |
| Kryogenní nádoba | Kapalina | 25 €/kg H ₂ | |

| Metoda přepravy | Kapacita | CAPEX | Zdroj |
|------------------|------------------------|-------------------------|-------|
| Plynovod | 2,4 t/h H ₂ | 500 €/m | |
| Plynovod | 245 t/h H ₂ | 3400 €/m | |
| Tlaková nádoba | 400 kg H ₂ | 500 €/kg H ₂ | [111] |
| Tlaková nádoba | 1100 kg H ₂ | 600 €/kg H ₂ | |
| Kryogenní nádoba | 4300 kg H ₂ | 200 €/kg H ₂ | |

Pozn. Tlakové a kryogenní nádoby pro přepravu jsou v mobilním provedení.

7.2 Environmentální aspekty vodíku

Dopady využívání vodíku na životní prostředí lze rozdělit do dvou skupin. První zahrnuje environmentální dopady samotného vodíku, spojené s jeho únikem do atmosféry. Do druhé skupiny pak náleží dopady spojené s jeho výrobou, přepravou, skladováním a přidruženými procesy. Výsledný vliv vodíku je pak dán součtem všech dílčích faktorů. Zatímco emise spojené s hodnotovým řetězcem jsou široce diskutovaným tématem, přímým dopadům vodíku je navzdory jejich významu věnována jen minimální pozornost. Cílem této kapitoly je proto přinést komplexní přehled o problematice.

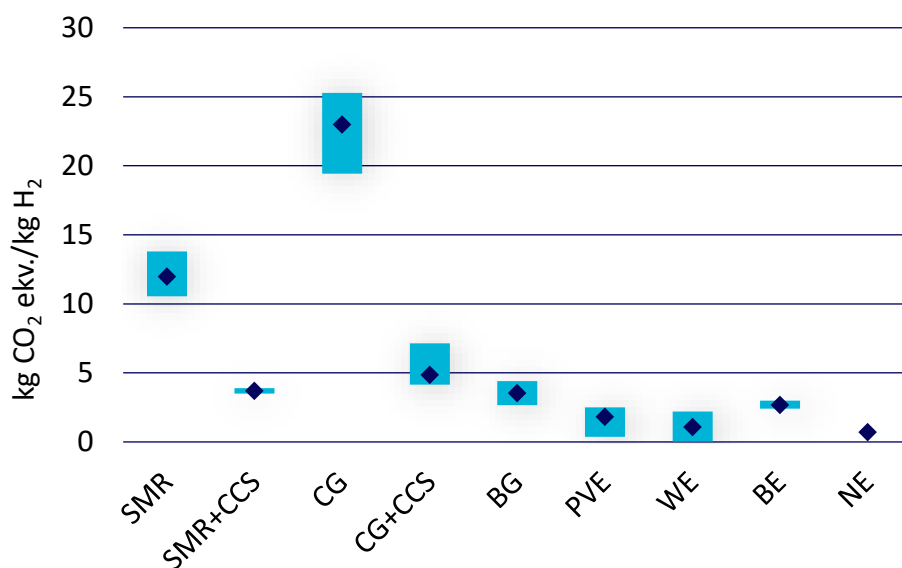
7.2.1 Přímé dopady vodíku

Vodík samotný není skleníkovým plynem, účastní se však reakcí, které prodlužují dobu setrvání jiných skleníkových plynů v atmosféře [114]. Při emisi vodíku do atmosféry proto dochází ke zvýšení dopadu již přítomných skleníkových plynů – po dobu desítek let [114]. Tento vliv nazýváme sekundárním skleníkovým efektem a pro jeho minimalizaci je nezbytná důsledná kontrola úniků ve všech fázích – od výroby až po konečné využití. Emise lze rozdělit na řízené a fugitivní. Do řízených patří emise vypouštěné z technologických, bezpečnostních nebo obdobných důvodů řízeným způsobem a je tedy možné je cíleně měřit a minimalizovat. Fugitivní emise jsou naproti tomu neřízené úniky netěsnostmi v potrubí, přírubách, kompresorech apod. a z principu je není možné přesně měřit [115]. Do této skupiny lze zařadit i permeaci – průchod vodíku skrze materiál. Hlavním faktorem je přitom druh materiálu, děj je naopak zpravidla nezávislý na tlaku vodíku. Obecně platí, že permeace skrze plastové materiály probíhá významně rychleji než skrze kovy, vhodnou volbou materiálu ji proto lze účinně omezit [48]. Z hlediska objemu úniků tak větší riziko představují netěsnosti.

Většina vodíku (70–80 %) je z atmosféry vstřebávána do půdy a využita mikroorganismy. Zbylá část (20–30 %) je pak odstraňována reakcí s hydroxylovými radikály OH^\cdot , což vede k poklesu jejich koncentrace v atmosféře [114]. Reakce s radikály OH^\cdot je však zároveň primárním způsobem rozkladu molekul metanu CH_4 . Emise vodíku tak mají za následek delší dobu setrvávání molekul metanu v atmosféře a tím i jejich větší dopad na globální oteplování. Druhou nežádoucí reakcí je vznik troposférického ozónu za účasti atomárního vodíku [114]. Posledním jevem je pak reakce vodíku s kyslíkem ve stratosféře za vzniku vodní páry. Zvýšení množství páry v této vrstvě atmosféry má za následek snížení její teploty a tím i tepla vyzařovaného do okolního vesmíru. Důsledkem je tak opět nárůst teploty Země. Výpočty bylo určeno, že celkový nepřímý vliv vodíku na globální oteplování – vztaženo na 1 kg – je přibližně 200× vyšší, než vliv CO_2 [114]. Z předchozího tak jasně vyplývá potřeba minimalizace emisí vodíku, jejich úplná eliminace však není – vlivem fugitivních emisí – proveditelná. V návaznosti na to lze do budoucna předpokládat vznik legislativy stanovující poplatek za množství vypouštěného vodíku podobně, jako je tomu nyní u oxidu uhličitého.

7.2.2 Dopady vodíkového hodnotového řetězce

Vodík je energetickým nosičem, nikoli primárním zdrojem energie. Jeho emisní stopa je tedy závislá na způsobu výroby. Jednotlivé výrobní metody se zásadně liší měrnými emisemi skleníkových plynů, které bývají zpravidla vztaženy na kg vyrobeného vodíku. Pro vyhodnocení celkových dopadů na klima je pak třeba zohlednit celý životní cyklus vstupů stejně jako samotné technologie [52]. K tomu je využíván přepočítání vypouštěných emisí jednotlivých skleníkových plynů na ekvivalent CO_2 . Výsledné hodnoty jsou uvedeny na obr. 7.2.



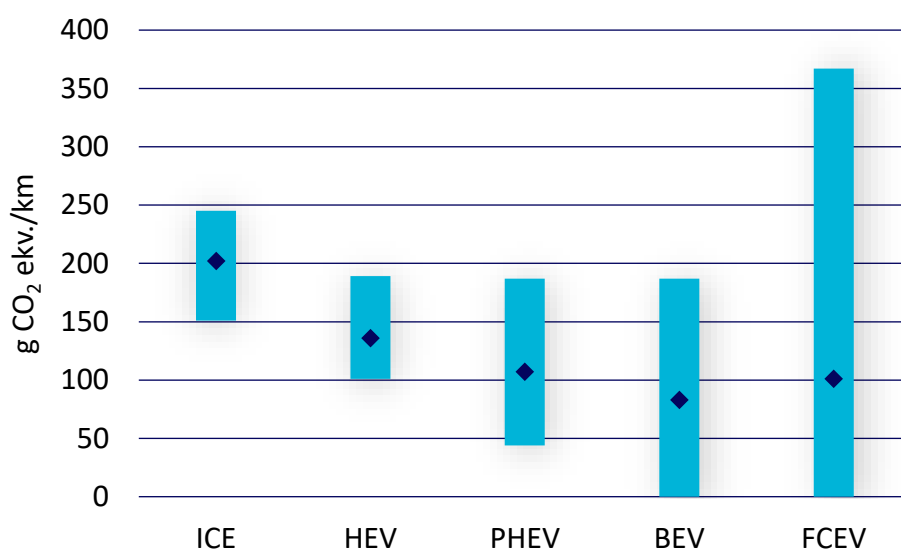
Obr. 7.2 Vypouštěné emise v ekvivalentu CO_2 na kg vyrobeného H_2 jednotlivých metod výroby během jejich životního cyklu. Upraveno z [52].

Pozn. SMR – parní reforming zemního plynu, CCS – zachytávání a ukládání CO_2 , CG – zplyňování uhlí, BG – zplyňování biomasy, PVE, WE, BE, NE – elektrolýza za využití energie z fotovoltaiky, větrných turbín, biomasy a jádra.

Z dohledaných vyplývá, že v současnosti nejrozšířenější metody výroby vodíku jsou zároveň těmi nejméně ekologickými. Emise uvolněné při výrobě parním reformingem zemního plynu a zejména zplyňováním uhlí jsou násobně vyšší než u ostatních metod. Emisní stopu lze v obou

případech snížit zachytáváním vypouštěného CO₂ (CCS), z environmentálního hlediska je však stále vhodnější výroba vodíku elektrolýzou za využití elektřiny z bezemisních zdrojů.

Obdobně jako v případě ekonomiky nelze tento postup – vzhledem k množství proměnných – jednoduše aplikovat na přepravu a skladování. Ekvivalent CO₂ je tedy opět nutné počítat pro konkrétní případy, častěji jsou však užívány ukazatele popisující – pro vybraný případ – celý cyklus včetně výroby. V případě využití vodíku v dopravě se jedná o ukazatele Well to tank (WTT) a Well to wheel (WTW), popisující množství vzniklých emisí od těžby až po naplnění nádrže, resp. až po využití energie pro pohon vozidla [116]. Hodnota WTT dosahuje průměrně 11,95 kg CO₂ ekv./kg H₂, hodnota WTW pak 0,15 kg CO₂ ekv./km [117]. Mezinárodní energetická agentura (IEA) pak udává průměrnou hodnotu WTW 0,101 kg CO₂ ekv./km viz obr. 7.3 [118]. Hodnoty pro konkrétní scénáře pak mohou být dohledány např. v dokumentu Evropské komise [119].



Obr. 7.3 Emise Well to wheel různých typů silničních vozidel. Vyznačeny jsou průměrné hodnoty. Upraveno z [118].

Pozn. ICE – vnitřní spalování, HEV – hybridní pohon, PHEV – plug-in hybridní pohon, BEV – bateriové elektromobily, FCEV – elektromobily s palivovým článkem.

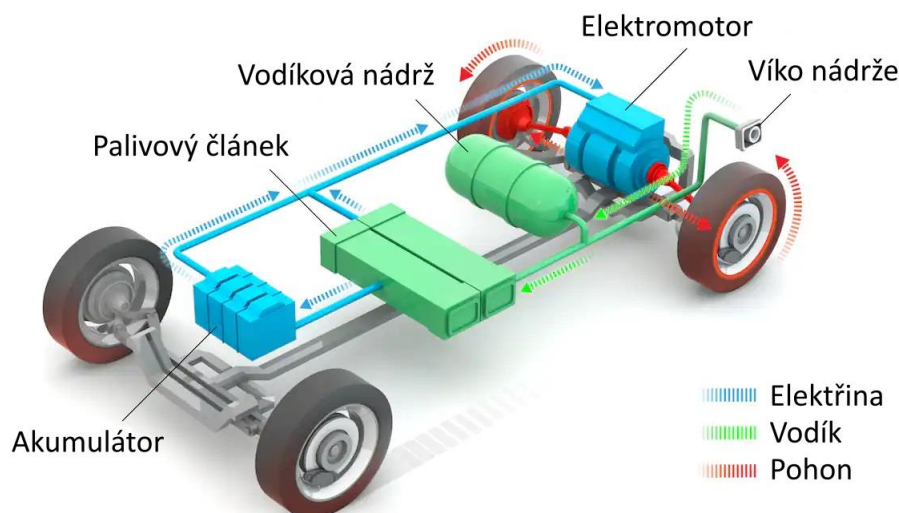
Z grafu výše je patrné, že vozidla využívající palivový článek mohou dosahovat nulových emisí, jejich skutečná hodnota se však pohybuje průměrně nad emisemi bateriových silničních vozidel a v některých případech i nad emisemi vozidel se spalovacími motory. S rozvojem výroby obnovitelného vodíku však lze očekávat jejich významný pokles.

8 VODÍKOVÁ SILNIČNÍ VOZIDLA

Vodík lze pro pohon vozidel využít jak přímo – ve spalovacím motoru, tak nepřímo – v palivovém článku – pro výrobu elektrické energie. Ta je následně využita pro pohon elektromotoru. V praxi je však využívána pouze druhá zmíněná metoda, tato kapitola je proto zaměřena pouze na vozidla s palivovými články (FCEV). Tato vozidla lze dále rozdělit na vozidla využívající tlakový vodík (CH_2) a zkapalněný vodík (LH_2). Vozidla využívající zkapalněný vodík však zatím nejsou komerčně dostupná a nebudou zde proto rozebírána.

8.1 Technologie vozidel

Technologické celky vodíkových vozidel jsou viditelné na obr. 8.1. Při tankování je vodíková nádrž – tlaková nádoba – plněna vodíkem podobně, jako je tomu u stlačeného zemního plynu (CNG). Samotná tlaková nádoba je nejčastěji vyrobena plně z kompozitních materiálů kvůli zachování nízké hmotnosti [120]. Vodík je v ní uskladněn zpravidla při tlaku 700 bar. Při provozu putuje vodík z nádrže do palivového článku, kde dochází k výrobě elektrické energie. Využívány jsou přitom palivové články typu PEM [104]. Výstupní napětí z palivového článku je však nízké, pro další využití je proto nutné ho zvýšit DC-DC měničem [121].



Obr. 8.1 Základní schéma vodíkového silničního vozidla. Upraveno z [122].

Elektrická energie může být následně celá využita elektromotorem, nebo její část uložena do akumulátoru – běžně nazývaného baterií. Přítomnost akumulátoru je nezbytná z hlediska regulace výkonu palivového článku, který samotný neumožňuje okamžité změny výkonu nutné pro pokrytí výkonových špiček – např. při přidání plynu [123]. Palivový článek tak může být provozován na konstantním výkonu a zároveň nemusí být dimenzován na nominální výkon elektromotoru, což vede k nižší velikosti a ceně článku [123]. Přítomnost akumulátoru zároveň umožňuje rekuperaci energie při brzdění. Jeho kapacita pak může být mnohem nižší, než u bateriových elektrických vozidel (BEV). Tok energie se mění dle požadavku na výkon [121]:

Vysoký výkon: Do elektromotoru jde energie z palivového článku i z akumulátoru.

Klidná jízda: Do el. motoru jde energie z pal. článku, přebytek je ukládán do akumulátoru.

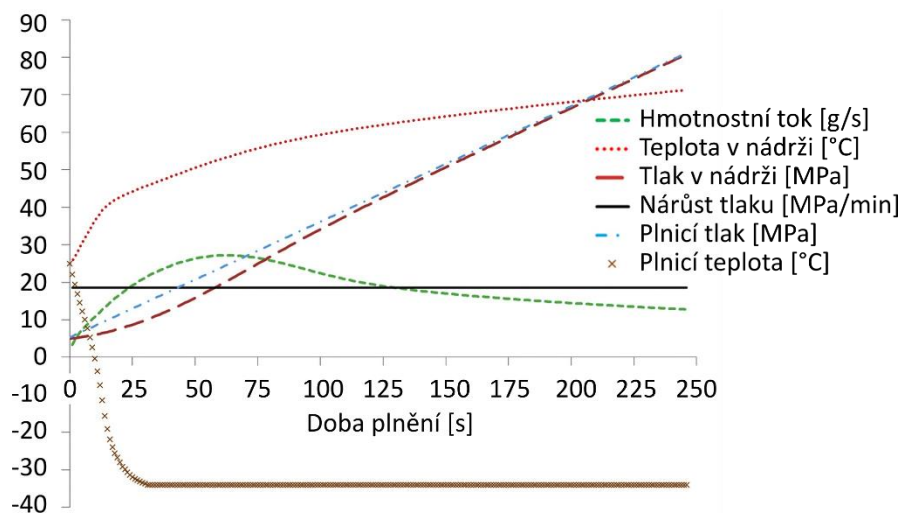
Brzdění: Energie z palivového článku i z rekuperace je ukládána do akumulátoru.

Nejčastěji používaným typem elektromotoru je bezkartáčový stejnosměrný (BLDC) s permanentními magnety, který nabízí vysokou účinnost, spolehlivost a snadnou regulaci otáček [121].

Samotný pohonný systém – od akumulátoru dále – je stejný jako v případě bateriových elektrických vozidel. Celková účinnost přeměny energie vodík – elektřina – pohon se pohybuje kolem 36–45 %, což jsou hodnoty blízké spalovacím motorům [121]. Na rozdíl od nich však tato technologie není omezena Carnotovou účinností a lze tak očekávat její další nárůst. Výhodou oproti bateriovým vozidlům je zejména rychlé doplnění energie v řádu nízkých jednotek minut a dojezd nezávislý na vnější teplotě. Nevýhodou vodíkových vozidel je pak vysoká cena, daná malým objemem produkce a drahými materiály využitými pro výrobu palivového článku a tlakové nádoby [124]. Samotná tlaková nádoba je pak – v závislosti na kapacitě – relativně velká a její integrace do malých vozidel je proto problematická.

8.2 Plnění vodíkových vozidel

Aby bylo možné dosáhnout v nádrži jmenovitého tlaku – 700 bar nebo 350 bar, musí být plnicí tlak vyšší – až 875 bar resp. 437,5 bar [125]. V případě nízkého plnicího tlaku pod 760 bar (pod 825 bar) hrozí neúplné naplnění nádrže a tím i nižší dojezd [126]. Vozidla stavěná na 700 bar mohou být plněna tlakem 350 bar – viz kap. 9.1.3, jejich dojezd tím však klesne přibližně na polovinu. V případě příliš vysokého tlaku pak hrozí překročení konstrukčních limitů. Důležitou součástí vozidel je proto tlaková ochrana. Rychlost plnění je závislá na řadě faktorů – kromě typu plnicí koncovky – viz kap. 9.1.3 zejména na teplotě okolního prostředí. Při expanzi vodíku z vysokého tlaku v tankovacím stojanu do nádrže dochází vlivem Joule-Thomsonova jevu k nárůstu jeho teploty. Při tlaku 350 bar není tento nárůst zásadní, při tlaku 700 bar je však již znatelný a vodík je z tohoto důvodu nutné před tankováním aktivně chladit – někdy až na teplotu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ [126]. Používané chladiče mají nicméně jen omezený výkon, obecně proto platí, že rychlost plnění s rostoucí teplotou klesá a při velmi vysokých teplotách okolí nemusí být možné [127]. Pro rychlý a bezpečný průběh plnění proto mezi vozidlem a plnicí stanicí probíhá obousměrná komunikace zahrnující informaci o aktuálním tlaku v nádrži, její kapacitě a teplotě. Samotnému plnění pak z bezpečnostních důvodů předchází zkouška těsnosti spojení [127]. Typický průběh teplot a tlaků je zachycen na obr. 8.2.



Obr. 8.2 Typický průběh teplot a tlaků při plnění vozidla. Upraveno z [128].

8.3 Přehled vozidel

Současný trh s vodíkovými vozidly je velmi malý a komerčně dostupný je jen omezený počet vozidel. Vzhledem k předpokládanému využití navrhované plnicí stanice je relevantní zejména skupina užitkových vozů, pro přehled však byly zahrnuty i osobní automobily.

Tab. 8.1 Přehled dohledaných osobních a užitkových silničních vozidel s palivovými články.

Osobní vozy

| Výrobce | Model | Kapacita H ₂ [kg] | Tlak [bar] | Doba plnění [min] | Hmotnost [kg] | Objem nákladového prostoru [m ³] | Dojezd [km] | Dostupnost | Zdroj |
|---------|-------|------------------------------|------------|-------------------|---------------|--|-------------|------------|------------|
| Toyota | Mirai | 5,6 | 700 | 5 | 1930 | 0,272 | 647 | Na trhu | [129] |
| Hyundai | Nexo | 6,3 | 700 | 5 | 1889 | 0,461 | 666 | Na trhu | [130][131] |

Lehké a střední užitkové vozy

| Výrobce | Model | Kapacita H ₂ [kg] | Tlak [bar] | Doba plnění [min] | Užitečné zatížení [kg] | Objem nákladového prostoru [m ³] | Dojezd [km] | Dostupnost | Zdroj |
|---------|----------------------------|------------------------------|------------|-------------------|------------------------|--|-------------|------------|------------|
| Citroën | ë-Jumpy Hydrogen | 4,4 | 700 | 3 | 1100 | 5,3 / 6,1 | 350 + 50 | Na trhu | [132][133] |
| Peugeot | e-Expert Hydrogen | 4,4 | 700 | 3 | 1100 | 5,3 / 6,1 | 350 + 50 | Na trhu | [134] |
| Opel | Vivaro-e Hydrogen | 4,4 | 700 | 3 | 1100 | 5,3 / 6,1 | 350 + 50 | Na trhu | [135] |
| Renault | Master Van H2-TECH | 6,4 | 700 | 5 | 1000 | 12 | 300 + 100 | Pilotní | [136] |
| Renault | Master Chassis Cab H2-TECH | 4 | 700 | 5 | 1000 | 20 | 250 + 100 | Prototyp | [137][138] |
| Iveco | eDaily FCEV | 12 | – | 15 | 3000 | 20 | 350* | Prototyp | [139][140] |

Těžké užitkové vozy

| Výrobce | Model | Kapacita H ₂ [kg] | Tlak [bar] | Doba plnění [min] | Maximální hmotnost vozidla [kg] | Maximální hmotnost soupravy [kg] | Dojezd [km] | Dostupnost | Zdroj |
|---------|-----------------------|------------------------------|------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------|------------|------------|
| Hyundai | XCIENT Fuel Cell | 31 | 350 | 20 | 19000 | 36000 | 400* | Pilotní | [141][142] |
| Daimler | GenH2 Truck fuel-cell | 80 | Kapalný | – | – | 40000 | 1000 | Prototyp | [143][144] |

*Včetně dojezdu na baterii

9 VODÍKOVÉ PLNÍČÍ STANICE

Plnicí stanice jsou klíčovým prvkem infrastruktury pro využití vodíku v dopravě. Obdobně jako dobíjecí stanice pro elektromobily nebo čerpací stanice pro vozidla se spalovacím motorem slouží pro doplnění energie. Zatímco bateriové elektromobily je však v případě potřeby možné nabíjet i ze zásuvky, plnicí stanice jsou pro provoz vodíkových elektromobilů nezbytné. Důsledkem je tak situace, kdy je problematické obhájit jejich výstavbu – kvůli malému počtu vozidel, a zároveň problematické tato vozidla provozovat – kvůli malému počtu plniček. Řešením může být výstavba veřejných plnicích stanic financovaná či dotovaná státem. Možností je také vznik soukromých stanic pro potřeby firem a jejich případné zpřístupnění veřejnosti. Tato varianta však předpokládá určitou cenovou konkurenceschopnost vodíku jako paliva.

9.1 Koncepte plnicích stanic

Koncepte vodíkových plnicích stanic lze rozdělit na základě řady kritérií, nejvýznamnější z nich je však způsob dodávek vodíku, resp. jeho skupenství. Důležitou roli pak hraje i velikost stanice, způsob jejího provozu nebo typ vozidel pro které je určena. Cílem této podkapitoly proto není poskytnutí komplexního přehledu o problematice, ale přiblížení vybraných, nejčastěji využívaných koncepcí. Jednotlivé komponenty jsou pak popsány v kap. 9.2.

9.1.1 Rozdělení dle způsobu dodávek vodíku

Dle způsobu dodávek vodíku lze plnicí stanice rozdělit do následujících kategorií:

Plnicí stanice s dodávkou tlakového vodíku

Plnicí stanice s dodávkou tlakového vodíku je nejběžnější koncepcí. Její zjednodušené schéma je zachyceno na obr. 9.1. Vodík může být přitom dodáván mobilními tlakovými nádobami, nebo plynovodem – viz kap. 5.1.



Obr. 9.1 Koncepte vodíkové plnicí stanice s dodávkou tlakového vodíku. Upraveno z [145].

V případě mobilní tlakové nádoby – o jmenovitém tlaku 200–500 bar – je vodík po připojení ke stanici přepouštěn do vysokokapacitní tlakové nádoby (není na obrázku) – o jmenovitém tlaku 50–200 bar, která slouží jako zásobárna vodíku pro stanici [146]. Alternativně může být

mobilní tlaková nádoba ponechána na místě a přebírá tak její roli [147]. Výhodou tohoto řešení je vyšší jmenovitý tlak – až 500 bar – jelikož není nutné přepouštění. Tlak ve vysokokapacitní tlakové nádobě je relativně nízký a dále klesá s klesajícím množstvím vodíku. Pro plnění vozidel je ho proto nutné zvýšit a zároveň stabilizovat. K tomu je využíván vícestupňový kompresor, který navýší tlak vodíku až na 450 bar v případě 350 bar plnicí stanice, respektive 900 bar v případě 700 bar plnicí stanice [148]. Plyn je následně uskladněn ve vysokotlaké tlakové nádobě – resp. častěji v kaskádě tlakových nádob, která je přímo spojena s výdejním stojanem. Tlak v této nádobě proto musí být trvale udržován nad úroveň tlaku v nádržích vozidel. Ten může při plném naplnění dosahovat až 437,5 bar v případě 350 bar vozidel a 875 bar v případě 700 bar vozidel [125]. Plnicí tlak poskytovaný výdejním stojanem dosahuje z bezpečnostních důvodů zpravidla stejných hodnot – 437,5 bar, resp. 875 bar. Rozdíl tlaků mezi vysokotlakou tlakovou nádobou a výdejním stojanem je důsledkem tlakových ztrát. Součástí stojanu je v případě 700 bar stanic také chladicí zařízení pro snížení teploty vodíku před expanzí [146]. V případě zásobování plynovodem není přítomnost vysokokapacitní tlakové nádoby teoreticky nutná, přesto je využívána pro zabránění nadměrných tlakových pulzací v potrubí [126]. V této konfiguraci je pak nutná přítomnost kompresoru mezi plynovodem a touto nádobou. Navazující technologie je pak stejná jako v případě dodávek v mobilních tlakových nádobách.

Plnicí stanice s dodávkou kapalného vodíku

Plnicí stanice s dodávkou zkapalněného vodíku jsou v současnosti využívány zcela výjimečně, a to z důvodu vyšších provozních nákladů, které nejsou – vzhledem k malé průměrné velikosti stanic – ospravedlněny požadavkem na vysoký objem dodávek vodíku. Zjednodušené schéma této koncepce je na obr. 9.2.

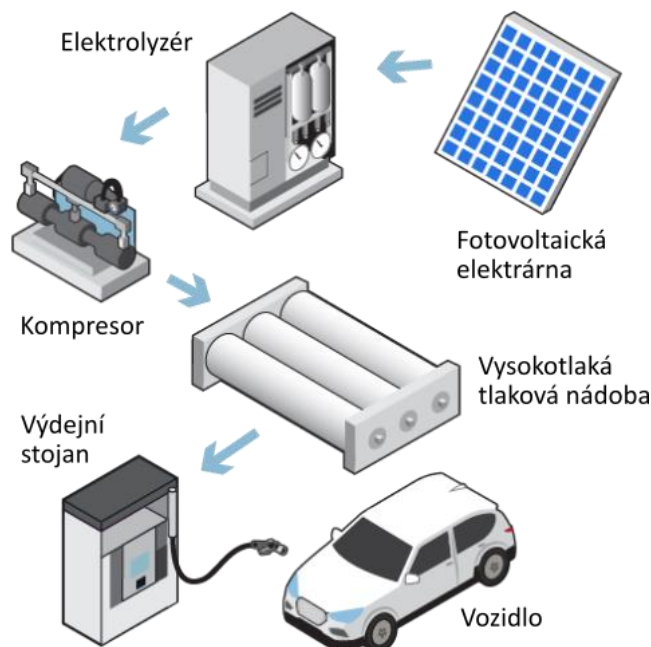


Obr. 9.2 Koncepce vodíkové plnicí stanice s dodávkou kapalného vodíku. Upraveno z [145].

Vodík je z mobilní kryogenní nádoby přečerpán do kryogenní nádoby, která slouží jako zásobárna vodíku pro stanici. Kapalný vodík následně prochází zplyňovacím zařízením – výměníkem tepla, kde dochází k jeho odpaření [146]. V případě potřeby je pak jeho tlak opět zvýšen kompresorem a vodík je uskladněn ve vysokotlaké tlakové nádobě, obdobně jako v případě plnicích stanic s dodávkami tlakového vodíku [146]. Navazující technologie je pak obdobná, na rozdíl od předchozího případu je však vodík ve stojanu nutné ohřívat, nikoli chladit.

Plnicí stanice s lokální výrobou vodíku

Plnicí stanice s lokální výrobou vodíku jsou v současnosti využívány spíše výjimečně, a to zejména při požadavku na velký objem dodávek a současně nepřítomnosti plynovodů. Výhodou této koncepce je absence rizik spojených s nutností dopravy vodíku, daní za to je však vyšší složitost a potřeba údržby výrobního zařízení. Zjednodušené schéma je zobrazeno na obr. 9.3.



Obr. 9.3 Koncepce vodíkové plnicí stanice s lokální výrobou vodíku. Upraveno z [145].

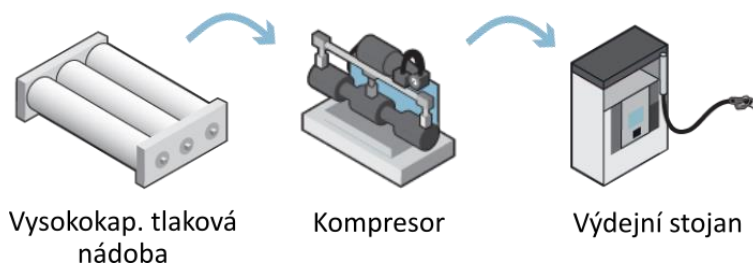
Vodík může být vyráběn jak elektrolýzou – optimálně za využití obnovitelných zdrojů energie, tak parním reformingem zemního plynu. Tlak na výstupu z výrobního zařízení se zpravidla pohybuje v řádu nízkých desítek bar, vodík je následně skladován ve vysokokapacitní tlakové nádobě (není na obrázku) [52]. Navazující technologie je pak stejná jako v případě dodávek vodíku v tlakových nádobách.

9.1.2 Rozdělení dle způsobu provozu

Plnicí stanice lze také rozdělit dle způsobu provozu do následujících kategorií:

Plnicí stanice se schopností kontinuální dodávky vodíku

Koncepce stanic se schopností kontinuální dodávky vodíku, nebo také Booster koncepce umožňuje dlouhodobé plnění jednoho vozidla za druhým (back-to-back filling) a je proto vhodná zejména pro lokace s vysokým vytížením, nebo významným nárazovým zatížením. Její zjednodušené schéma je na obr. 9.4.

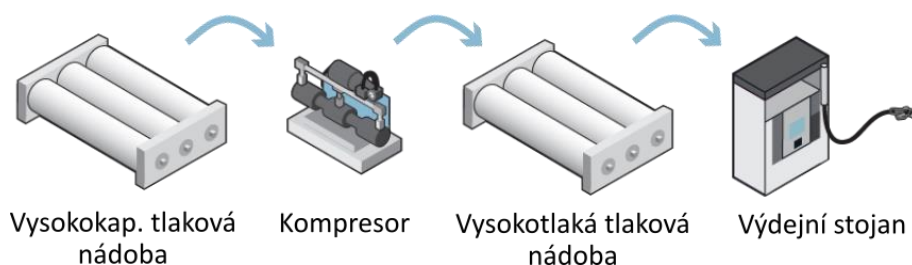


Obr. 9.4 Schéma plnicí stanice se schopností kontinuální dodávky vodíku. Upraveno z [145].

Princip této koncepce spočívá v úplném odstranění, resp. minimalizaci velikosti vysokotlaké tlakové nádoby a současném výběru výkonnějšího kompresoru schopného dodávat požadovaný hmotnostní tok vodíku z vysokokapacitní tlakové nádoby přímo do výdejního stojanu a následně do vozidla [126]. Přítomnost vysokotlaké nádoby v této koncepci není nezbytně nutná, nádoba je však běžně využívána pro stabilizaci plnicího tlaku za kompresorem – viz kap. 9.2 [149]. Na rozdíl od níže uvedené koncepce však nemá akumulární funkci, kompresor je tedy v provozu pouze při tankování. Tato koncepce může být v závislosti na okolnostech jediná možná, má však řadu nevýhod. Nejvýznamnější z nich jsou vysoké kapitálové i provozní náklady většího kompresoru, z toho důvodu je častěji využívána druhá koncepce [147].

Plnicí stanice bez schopnosti kontinuální dodávky vodíku

Koncepce stanic bez schopnosti kontinuální dodávky vodíku neumožňuje plnění velkého množství vozidel po sobě a z toho důvodu je vhodná spíše pro lokace s nižším vytížením, nebo s rovnoměrným rozložením vytížení v čase. Zjednodušené schéma je zachyceno na obr. 9.5.



Obr. 9.5 Schéma plnicí stanice bez schopnosti kontinuální dodávky vodíku. Upraveno z [145].

Přítomnost vysokotlaké nádoby v této koncepci umožňuje použití méně výkonného kompresoru s nižším hmotnostním tokem vodíku [126]. Vysokotlaká nádoba má v tomto případě akumulární funkci – hmotnostní tok ven do výdejního stojanu je vyšší než hmotnostní tok dovnitř z kompresoru. Její užitečná kapacita pak ovlivňuje maximální počet vozidel plněných za sebou. Po jeho dosažení musí dojít k omezení provozu plnicí stanice a doplnění vysokotlaké nádoby. Plnění většího množství vozidel po sobě je však velmi nepravděpodobné – např. kvůli prostojům pro placení a v tomto čase probíhá průběžné doplňování vodíku do vysokotlaké nádoby. Při vhodném dimenzování tak k omezení provozu nikdy nedojde. Vysokotlaká nádoba může být jen jedna – na jmenovitém tlaku pro plnění vozidla – potom mluvíme o Buffer koncepci, nebo jich může být více – nejčastěji tři – na různých tlakových úrovních – potom mluvíme o Kaskádové koncepci [150]. Výhodou Kaskádové koncepce je navíc nižší kompresní práce, jelikož většina vodíku je stlačována na nižší než jmenovitý tlak pro plnění vozidla a také nižší zahřívání vodíku při expanzi v nádrži [150]. Plnění vozidla pak probíhá nejprve z nádoby s nejnižším tlakem, následně se středním, a nakonec z nádoby se jmenovitým tlakem pro plnění vozidla. Kompresor přitom vždy doplňuje vodík do tlakové nádoby, ze které je aktuálně odebírán. Po ukončení plnění vozidla jsou potom nádoby doplňovány v opačném pořadí – od nejvyššího tlaku po nejnižší [150].

9.1.3 Rozdělení dle typu plněných vozidel

Vodíkové plnicí stanice využívají dvě různé kategorie plnicích koncovek – jednu pro lehká vozidla (osobní vozidla, lehké a střední užitkové vozy) a druhou pro těžká vozidla (těžké užitkové vozy, kamiony, vlaky, autobusy) [125]. Hlavní rozdíl spočívá – kromě tvaru – v odlišném maximálním hmotnostním toku vodíku, a tedy v odlišné rychlosti plnění vozidla. Ta se u lehkých vozidel pohybuje do 60 g/s, zatímco u těžkých vozidel do 120 g/s [151]. V rámci těchto

kategorií jsou plnicí koncovky dále rozděleny podle tlaku. Zatímco těžká vozidla využívají výhradně 350 bar plničky, lehká vozidla mohou využít jak 350 bar, tak 700 bar stanice [152]. Existují tedy celkem tři typy plnicích koncovek – H35 (350 bar, 60 g/s) a H70 (700 bar, 60 g/s) pro lehká vozidla a H35F (350 bar, 120 g/s) pro těžká vozidla, které se navzájem liší konstrukcí tak, aby nemohlo dojít k nevhodné záměně s tím k překročení parametrů při plnění [125]. Jak již bylo řečeno, konstrukce koncovky umožňuje plnění lehkého vozidla s nádrží na 700 bar tlakem 350 bar, nikoli však naopak. Plnicí koncovka H35 je nicméně využívána jen výjimečně a objevuje se zejména u soukromých stanic, u kterých nebylo plnění lehkých vozidel součástí původního návrhu, a tedy nedisponují technologií pro dosažení vyššího tlaku.

9.2 Komponenty plnicích stanic

Hlavní komponenty vodíkových plnicích stanic, jejich funkce a zapojení jsou uvedeny níže. Další podrobnosti o nich – např. materiály využívané pro jejich konstrukci – jsou pak uvedeny v předchozích kapitolách stejně jako informace o zde neuvedených komponentách. Součástí stanice jsou také potrubí a armatury, bezpečnostní prvky, měřicí přístroje a další.

9.2.1 Plnicí stanice s dodávkou plynného vodíku

Vysokokapacitní tlaková nádoba

Jak již bylo uvedeno, vysokokapacitní tlaková nádoba (ve výpočtu označovaná jako zásobník) o jmenovitém tlaku 50–200 bar slouží jako zásobárna vodíku pro plnicí stanici. Z pohledu konstrukce se zpravidla jedná o rozměrný svazek ocelových nádob typu I, zejména díky jejich nízké ceně [146]. Vysokokapacitní tlaková nádoba bývá na stanici zpravidla pouze jedna.

Kompresor

Pro kompresi vodíku je z důvodu vysoké tlakové diference využívána vícestupňová komprese s mezichlazením [153]. Z pohledu konstrukce se nejčastěji jedná o pístové, nebo membránové kompresory, případně kompresory s iontovou kapalinou (ionic liquid compressor) [154]. Důležitým faktorem je nutnost zachování vysoké čistoty vodíku. V případě pístových kompresorů to znamená využití bezolejových variant, jejichž nevýhodou je nízká životnost těsnících prvků, a tedy nutnost časté údržby [154]. U zbylých dvou typů tento problém nenastává. V případě ionic liquid kompresorů je píst nahrazen iontovou kapalinou, která umožňuje efektivnější odvod tepla, jehož důsledkem je významně vyšší účinnost komprese. Kompresor musí být vyroben z materiálů odolných vůči vodíkovému křehnutí i velmi vysokým tlakům, a musí být také schopen provozu ve velkém rozsahu tlaků na sání i na výtlaku. Velmi široký provozní rozsah platí také pro jeho pohon, který je v dnešní době často elektrický [154]. Z pohledu investičních i provozních nákladů je pak kompresor nejvýznamnější položkou, jeho vhodný návrh a výběr jsou proto klíčové [147]. Kompresor bývá na stanici pouze jeden.

Vysokotlaká tlaková nádoba

Vysokotlaké tlakové nádoby o jmenovitém tlaku až 900 bar slouží jako akumulátor vodíku (jako akumulátor jsou také souhrnně označovány ve výpočtu). Jejich význam – jak již bylo uvedeno – spočívá v oddělení hmotnostního toku vodíku do nádrže vozidla a hmotnostního toku vodíku kompresorem. Počet vysokotlakých nádob je závislý na návrhu a optimalizaci, běžně jsou však používány tři na různých tlakových úrovních [150]. Z pohledu konstrukce se jedná nejčastěji o nádoby typu II a IV z důvodu vysoké tlakové odolnosti [155].

Chladicí zařízení

Při plnění vozidla dochází k expanzi plynu z vyšší tlakové úrovně ve stojanu do nižší v nádrži a s tím spojenému maření kinetické energie plynu do tepla. Při expanzi zároveň dochází k dalšímu ohřevu vodíku vlivem Joule-Thomsonova jevu. Chladicí zařízení slouží k podchlazení vodíku před touto expanzí a tím k zabránění ohřevu plynu v nádrži nad 85 °C při zachování vysoké rychlosti plnění nádrže vozidla [128]. Vodík je přitom běžně ochlazován na -40 °C. Z pohledu konstrukce jsou dva možné přístupy: Použití velké chladicí jednotky, schopné dodat požadovaný chladicí výkon, ve spojení s kompaktním výměníkem tepla, nebo použití chladicí jednotky s nižším výkonem spolu s hliníkovým blokem, sloužícím současně jako výměník a akumulátor tepla [156]. První varianta (ve výpočtu označovaná jako On demand) je vhodná pro plnicí stanice s vysokým vytížením, nevýhodou je však vysoký elektrický příkon. Druhá zmíněná varianta (ve výpočtu označovaná jako Thermal mass) je pak vhodnější pro menší stanice s nižším vytížením. Její výhodou je nižší příkon, neumožňuje však plnění většího množství vozidel krátce po sobě a zároveň spotřebovává energii i během doby nečinnosti pro udržení teploty hliníkového bloku na požadované hodnotě [156].

9.2.2 Plnicí stanice s dodávkou kapalného vodíku

Kryogenní nádoba

Jak již bylo uvedeno, kryogenní nádoba slouží jako zásobárna vodíku pro stanici a nahrazuje tak vysokokapacitní tlakovou nádobu. Vodík je v ní uchováván při tlaku blízkém atmosférickému a příslušné teplotě varu. Její konstrukce je blíže popsána v kap. 5.2. Použité materiály musí být přitom odolné vůči velmi nízkým teplotám.

Zplyňovací zařízení

Zplyňovací zařízení slouží ke zpětnému převedení kapalného vodíku do plynného skupenství. K tomu lze využít dva postupy: Ohřev ve výměníku tepla následovaný změnou skupenství a následnou kompresí plynného vodíku, nebo kryokompresi kapalného vodíku až do superkritického stavu a následný ohřev [146]. Druhá zmíněná varianta se vyznačuje vyšší efektivitou, ale také nároky na materiály a není proto běžně využívána.

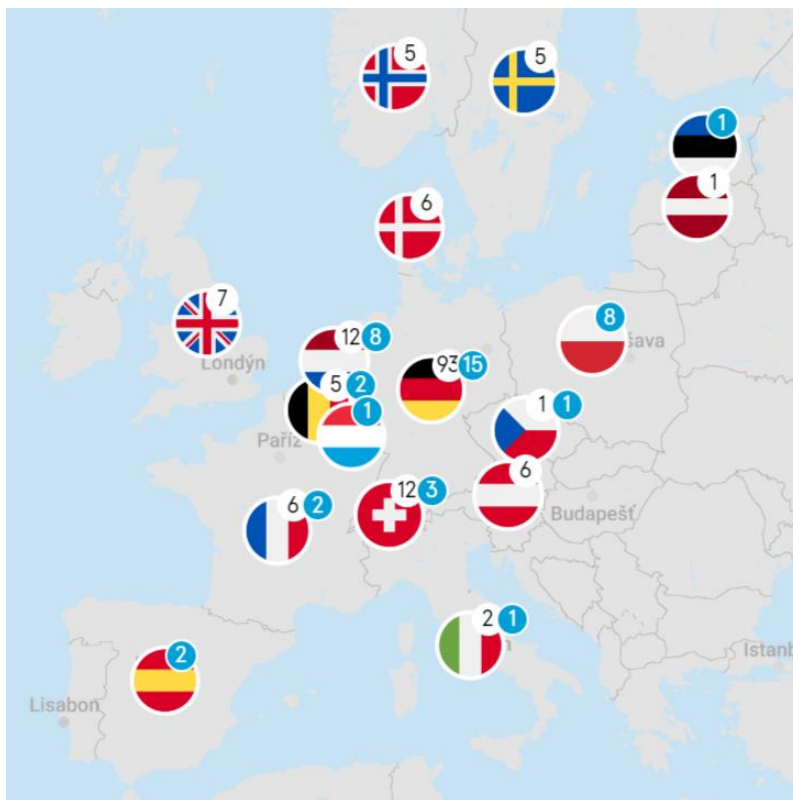
Výměník tepla pro ohřev

Zatímco v případě stanice s dodávkou plynného vodíku je třeba vodík před tankováním ochladit, v případě dodávek kapalného vodíku se jeho teplota po zplynění pohybuje pod minimální dovolenou hodnotou -40 °C. Ohřev je běžně realizován okolním vzduchem a pomocným elektrickým topným členem pro případ nízké teploty okolí [146]. Velikost výměníku je v tomto případě vždy dimenzována na jmenovitý hmotnostní tok vodíku.

9.3 Přehled vybraných realizací

V Evropě je aktuálně v provozu více než 160 veřejných vodíkových plnicíků a dalších přibližně 40 projektů se nachází ve fázi realizace [110]. Jejich rozmístění zachycené na obr. 9.6 je však značně nerovnoměrné. Nadpoloviční většina všech plnicíků se nachází v Německu (57 %), následuje Nizozemsko (7 %) a Švýcarsko (7 %). V České republice jsou v současnosti v provozu dvě plnicí stanice – v Praze a v Ostravě, přičemž v polovině roku 2023 by měla být dokončena nová stanice v Litvínově a další by měly dle Národního akčního plánu čisté mobility následovat v příštích letech [157]. Přehled vybraných realizací vodíkových plnicíků v České republice a Evropě je uveden v tab. 9.1. Je nutné podotknout, že uvedené plnicíčky byly vybrány pro svou velikost a/nebo umístění a nejedná se proto o reprezentativní vzorek.

Typická vodíková plnička je malá stanice s jedním výdejním stojanem a denní kapacitou do 100 kg. Zpravidla nabízí pouze tlakovou úroveň 700 bar pro osobní vozy, přibližně ve třetině případů pak také úroveň 350 bar s koncovkou pro plnění těžkých vozidel [110]. Plničky nabízející pouze tlak 350 bar se vyskytují jen minimálně a jedná se primárně o neveřejné stanice sloužící potřebám dopravních podniků a firem. Dodávky vodíku probíhají nejčastěji po silnici, mobilními tlakovými nádobami. V omezeném počtu případů (Frankfurt) je zásobování řešeno lokálním plynovodem z chemických nebo jiných závodů produkujících vodík, nebo napojením na již existující plynovodní síť pro přepravu vodíku (Rhoon) [158][159]. Výroba vodíku na místě se vyskytuje spíše výjimečně (Antverpy – elektrolyza, Arnhem – parní reforming bioplynu), lze však očekávat její rozvoj ve spojení s nárůstem výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů [160][161]. Veřejné vodíkové plnicí stanice vznikají kromě hlavních komunikací a center měst často také v klíčových dopravních uzlech – např. na letištích (Heathrow, Charles de Gaulle) nebo v přístavech (Antverpy), kde mohou být využívány více typy zákazníků. V případě letišť se jedná např. o flotily taxislužeb [162]. Rada dalších plniček pak vzniká primárně pro potřeby firem v logistických areálech, ale jsou přístupné veřejnosti (St. Gallen), což může být do budoucna i případ navrhované plnicí stanice [163].



Obr. 9.6 Rozmístění veřejných vodíkových plnicích stanic v Evropě [110].

Pozn. Uvedeny pouze plničky nabízející tlak 700 bar. V bílém poli je uveden počet již otevřených či ve zkušebním provozu, v modrém poli pak počet stanic ve výstavbě.

Tab. 9.1 Přehled vybraných realizací veřejných vodíkových plnicích stanic v České republice a v Evropě.

Česká republika

| Lokalita | Provozovatel | Rok uvedení do provozu | Způsob dodávek H ₂ | Kapacita [kg/den] | Tlakové úrovně [bar] | Cena [Kč/kg] | Zdroj |
|----------|---------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|--------------|-------|
| Praha | ORLEN Benzina | 2023 | Tlakové nádoby | 100 | 350 / 700 | 278 | [164] |
| Litvínov | ORLEN Benzina | Q2 2023 | – | – | – | – | – |
| Ostrava | Vítkovice | 2022 | – | 40 | 700 | Individuální | [165] |

Evropa

| Lokalita | Provozovatel | Rok uvedení do provozu | Způsob dodávek H ₂ | Kapacita [kg/den] | Tlakové úrovně [bar] | Cena [eur/kg] | Zdroj |
|-----------------|---------------|------------------------|-------------------------------|-------------------|----------------------|---------------|-------|
| AT – Vídeň | H2 Mobility | 2012 | – | – | 700 | 27,99 | |
| BG – Antverpy | CMB.TECH | 2021 | Výroba na místě | <100 | 350 / 700 | – | |
| BG – Zaventem | Air Liquide | 2016 | – | 100–500 | 350 / 700 | – | |
| CH – St. Gallen | Osterwalder | 2022 | – | – | 350 / 700 | 20,65 | |
| DE – Mnichov | H2 Mobility | 2020 | – | – | 700 | 13,85 | |
| DE – Berlín | H2 Mobility | 2019 | – | 100–500 | 700 | 13,85 | |
| DE – Frankfurt | Infraserv | 2006 | Plynovod | >500 | 350 / 700 | 9,99 | [110] |
| DK – Kodaň | Everfuel | 2021 | Tlakové nádoby | <100 | 350 / 700 | – | [166] |
| FR – Paříž | HYSETCO | 2018 | – | 100–500 | 350 / 700 | – | |
| FR – Versailles | Air Liquide | 2018 | – | 100–500 | 350 / 700 | – | |
| NL – Arnhem | TotalEnergies | 2019 | Výroba na místě | 100–500 | 350 / 700 | 18,50 | |
| NL – Rhoon | Air Liquide | 2014 | Plynovod | >500 | 350 / 700 | 18,82 | |
| UK – Londýn | Air Products | 2012 | Tlakové nádoby | <100 | 350 / 700 | – | |

Pozn. Pro získání informací nad rámec již publikovaných byli kontaktováni oba provozovatelé plnicích stanic v České republice, odpověď však zaslala pouze společnost ORLEN.

10 NÁVRH VODÍKOVÉ PLNÍCÍ STANICE

Následující výpočtová část této práce je věnována návrhu plnicí stanice pro potřeby vozového parku společnosti Zásilkovna s.r.o. v rámci zvažovaného provozu vodíkových vozidel. V rámci spolupráce byly pro potřeby výpočtu poskytnuty konkrétní údaje o flotile. Uvedené informace o způsobu využití stanice proto vychází ze skutečné potřeby. Při návrhu byl využit konzervativní přístup zaručující dosažení jmenovitých parametrů stanice i za mezních návrhových stavů. Důsledkem je významné naddimenzování jednotlivých komponent, které vyžaduje další optimalizaci. Zmíněná optimalizace však vyžaduje dohodu s budoucím provozovatelem ohledně přípustného poklesu parametrů a zároveň znalost skutečných parametrů komponent. S tímto vědomím byl zvolen zjednodušený výpočetní model, který umožňuje srovnání jednotlivých koncepcí, není však vhodný pro srovnání různých variant jedné koncepce. Výstupem návrhu je proto doporučení pro volbu nejvhodnější koncepce a orientační výpočet potřebných parametrů komponent a s nimi spojených provozních a kapitálových výdajů. Pro návrh kapacit tlakových nádob byl využit zejména dokument [167]. Pro návrh požadovaného výkonu kompresoru pak dokument [154] a pro návrh požadovaného výkonu chladicího zařízení dokument [156]. Vodíkové plnicí stanice jsou také předmětem normy ČSN ISO 19880-1 [168]. Ta je však věnována problematice nad rámec základního technického návrhu.

10.1 Potřebné množství vodíku

Uvedený projekt počítá s pilotním provozem jediného vozidla s předpokládaným rozšířením o dalších devět v případě úspěchu projektu. Uvažovaným modelovým vozidlem je Renault Master Van H2-Tech, který vyniká vysokým objemem nákladového prostoru. Navzdory nejvyšší dovolené hmotnosti přesahující 3,5 t pro jeho řízení také stále postačuje řídičský průkaz skupiny B [136]. Stejně vozidlo je navíc již využíváno v rámci pilotního provozu sesterské společnosti Packeta eCommerce GmbH, spadající taktéž do skupiny Packeta Group [169].

Výpočet potřebného množství vodíku byl proveden za základě udaného denního nájezdu 150–200 km, dojezdu na vodík a kapacity nádrže vozidla. Denní nájezd byl uvažován 200 km, denní spotřeba vodíku byla uvažována jako součin spotřeby jednoho vozidla a celkového počtu vozidel. Tato hodnota byla dále navýšena o 10% rezervu pro případ vyššího než očekávaného denního nájezdu, nebo zvýšené spotřeby dané odlišnými podmínkami než při certifikovaném testování dojezdu. Dále je označována jako denní potřeba vodíku. Výše rezervy byla zvolena poměrně liberálně s ohledem na možnost provozu vozidla jako bateriového elektromobilu, která minimalizuje riziko prostoje v důsledku nedostatku paliva. Relevantní parametry vozidla a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tab. 10.1. Vozidla budou provozována pouze 5 dní v týdnu, týdenní potřeba paliva je proto rovna pětinasobku denní potřeby.

Tab. 10.1 Vybrané parametry vozidla Renault Master Van H2-Tech a denní a týdenní potřeba vodíku při provozu daného počtu těchto vozidel [136].

| Vodík | | Pilotní provoz | | Výhled |
|----------|----------------|-----------------|------------|-----------|
| Kapacita | 6,4 kg | Počet vozidel | 1 | 10 |
| Dojezd | 300 km | Denní nájezd | 150–200 km | |
| Spotřeba | 2,13 kg/100 km | Denní spotřeba | 4,27 | 42,67 kg |
| | | Rezerva | 0,43 | 4,27 kg |
| Baterie | | Denní potřeba | | 46,93 kg |
| Kapacita | 33 kWh | Týdenní potřeba | 23,47 | 234,67 kg |
| Dojezd | 100 km | | | |
| Spotřeba | 33 kWh/100 km | | | |

Výkon plnicí stanice se doporučuje dimenzovat na součet plnění vozidel za jeden den – tedy na denní potřebu vodíku [170]. Ta je však v případě jediného vozidla extrémně nízká. Nejnižší běžná denní kapacita stanic se pohybuje okolo 50 kg/den, což odpovídá variantě s deseti vozidly. Návrh na nižší kapacitu by tak byl velice problematický z hlediska dostupnosti komponent. Stanice musí být zároveň již při návrhu dimenzována na konečné množství vodíku na ní přítomné [170]. To nevylučuje možnost postupného rozšiřování kapacity. Znamená to ale, že řada komponent a bezpečnostních opatření musí být od začátku dimenzována na konečnou kapacitu, což dále zhoršuje ekonomiku stanice s takto nízkou kapacitou. Bez dalších výpočtů můžeme na základě těchto faktů dojít k závěru, že návrh a výstavba vodíkové plnicí stanice pro jediné vozidlo nedává smysl. Možným řešením pro tento případ je využití veřejných plnicích stanic, které sice neposkytnou informace o ekonomice, ale umožní si vyzkoušet samotný provoz vozidel.

Na základě údajů v předchozím odstavci můžeme také dojít k závěru, že projekt vodíkové plnicí stanice pro deset vozidel se nachází na spodní hranici z pohledu velikosti stanic, ale je realizovatelný. Další část tohoto výpočtu tak bude zaměřena výhradně na něj. Je však třeba podotknout, že měrné náklady na kg vodíku s klesající denní kapacitou prudce narůstají [171]. Z ekonomického pohledu by tak byla výhodnější výstavba větší stanice pro více vozidel. Řešením tohoto problému může být kromě masivní investice do vozového parku také společný projekt více firem – optimálně s podobným způsobem využití stanice. Z pohledu konstrukce se pak vzhledem k velikosti a způsobu využití jeví jako nejvhodnější malá stanice s jediným výdejním stojanem, bez schopnosti kontinuální dodávky vodíku, ale s krátkou dobou mezi plněními pro relativně nepravděpodobný případ plnění dvou vozidel těsně po sobě. Za účelem ekonomického porovnání koncepcí však byl výpočet v následujících kapitolách proveden pro všechny tři varianty dle schopností dodávek vodíku – Booster, Buffer a Kaskáda koncepce.

10.2 Způsob dodávek vodíku

Způsob dodávek vodíku zásadním způsobem ovlivňuje celou koncepci navrhované vodíkové plnicí stanice – viz kap. 9.1.1. Možnými způsoby zásobování jsou plynovody, mobilní tlakové nádoby, mobilní kryogenní nádoby, dodávky vodíku ve sloučeninách a lokální výroba vodíku. Část z těchto způsobů však není v současnosti a v podmínkách České republiky realizovatelná a lze ji proto předem vyloučit z výběru. Zásobování stanice plynovodem – viz kap. 5.1.1 není možné z důvodu absence vodíkových plynovodů. Jejich výstavbu navíc neumožňuje současná legislativa, jelikož vodík v současnosti není plynem ve smyslu zákona č. 458/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetického zákona). Zásobování vodíkem ve sloučeninách – viz kap. 5.3 pak lze vyloučit z důvodu nízké úrovně technologické připravenosti [65].

Významným faktorem při posuzování zbylých metod je také jejich přiměřenost velikosti plnicí stanice a s tím spojená ekonomická náročnost. Dodávky kapalného vodíku mobilními kryogenními nádobami – viz kap. 5.2 jsou vhodné obecně pro velké stanice s vysokou potřebou vodíku. Existují nicméně i technicko-ekonomické analýzy malých plnicích stanic s dodávkami kapalného vodíku – viz zdroje [167] a [171]. V nich uvedená ekonomická srovnání plnicích stanic s dodávkami kapalného a plynného vodíku mobilními nádobami jsou nicméně při obdobné velikosti stanic v rozporu. Z dohledaných analýz tedy není zřejmé, která koncepce je v případě malých plnicích stanic vhodnější. Z provedené rešerše existujících vodíkových plnicích však jasně vyplývá, že naprostá většina plnicích stanic (různých velikostí a funkcí) využívá dodávky stlačeného vodíku. Lze tedy předpokládat, že tato varianta vychází v praxi po ekonomické stránce výhodněji a koncepce s dodávkami kapalného vodíku mobilními nádobami nebude dále zvažována. Tento závěr je však vhodné podrobit hlubší analýze.

Zbývajícími možnými variantami zásobování vodíkem jsou tak dodávky mobilní tlakovou nádobou a lokální výroba vodíku. Ta může probíhat jak elektrolýzou, tak parním reformingem zemního plynu. Jak ukázala provedená rešerše realizovaných plnicíků – viz kap. 9.3, oba tyto způsoby jsou možné, otázkou je však jejich ekonomická stránka. Ze srovnání lokální výroby a dodávek z centrálního zdroje v dokumentu [172] jasně vyplývá, že obě varianty výroby v místě spotřeby vychází po ekonomické stránce významně hůře než centrální výroba s dodávkami plynného vodíku mobilní tlakovou nádobou. Hlavní příčinou jsou přitom vysoké pořizovací náklady na zařízení pro parní reforming či elektrolýzér [172]. Můžeme tedy říct, že z ekonomického pohledu je preferovaným způsobem dodávek vodíku mobilní tlaková nádoba s plynným vodíkem. V návrhu plnicí stanice proto budeme uvažovat s touto variantou. Je však třeba zmínit, že dalšími faktory mohou být prostorové možnosti – lokální výroba vede ke kompaktnějšímu provedení, nebo možnosti elektrické distribuční soustavy.

V rámci dodávek vodíku mobilní tlakovou nádobou je nicméně stále řada faktorů, které mají vliv na výsledný návrh. Jsou jimi zejména perioda dodávek, dodávané množství a jeho limity a tlak dodávaného vodíku. Tyto parametry jsou podrobně rozebrány v kap. 11.1. poslední rozhodnutí pak spočívá ve fyzickém provedení dodávek vodíku. Jak již bylo zmíněno, vodík může být prepouštěn z mobilní tlakové nádoby do zásobníku na stanici, ale mobilní nádoba může být na stanici také ponechána. Obě možnosti jsou plně relevantní a závislé na možnostech dodavatele. Zároveň se také různě promítanou do ceny dodávaného vodíku. Při návrhu vodíkové plnicí stanice v této práci však byla uvažována pouze varianta s prepouštěním.

11 VYSOKOKAPACITNÍ TLAKOVÁ NÁDOBA

Návrh vysokokapacitní tlakové nádoby (dále jen zásobník) spočívá v určení jejího minimálního objemu, případně kapacity. Ten je kromě potřeby vodíku ovlivněn také možnostmi dodavatele. Z tohoto pohledu jsou nejvýznamnějšími parametry perioda dodávek, minimální a maximální množství vodíku, které je dodavatel ochoten, resp. schopen dodat a jeho tlaková úroveň.

11.1 Návrhové parametry

Teplota okolí

Stanice je navrhována na potřebu vodíku – tedy na množství včetně rezervy pro případ vyššího nájezdu, nebo vyšší než předpokládané spotřeby. V souladu s dříve uvedenou zásadou použitou při návrhu pak musí být toto množství schopná dodat i za mezích návrhových teplot. Ty byly pro účely tohoto výpočtu stanoveny na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to na základě nejvyššího očekávaného rozdílu teplot během skladování. Nejedná se tedy o mezní provozní teploty. Za vysokých teplot je kapacita zásobníku nižší – pro dosažení jmenovitého tlaku při plnění je třeba méně vodíku. Při vyprázdnění zásobníku na úroveň nejnižšího tlaku při nízkých teplotách je naopak zbytkové množství vodíku nejvyšší. Nejhorším scénářem je tedy prudké ochlazení mezi naplněním zásobníku a jejím vyprázdněním.

Perioda dodávek

Dodávky vodíku mohou dle dohody s dodavatelem denní, s delší periodou – např. týdenní, nebo nepravidelné dle aktuální potřeby. Vzhledem ke způsobu využití plnicí stanice lze předpokládat konstantní spotřebu vodíku. Z toho důvodu byla v následujících výpočtech uvažována denní a týdenní perioda. Dodávky s periodou mezi těmito hodnotami jsou možné, nicméně kladou zvýšené nároky na flexibilitu dodavatele, jelikož se konkrétní den dodávky neustále mění. Proto nebyla dále zvažována. Denní perioda dodávek vede k nižší potřebné kapacitě zásobníku, ale zároveň zvyšuje náklady na dopravu. Optimalizaci tohoto systému však nebylo možno provést z důvodu absence dat o ceně dopravy a samotného vodíku. Kromě výše uvedeného má perioda dodávek také nepřímý vliv na tlak v zásobníku na konci běžného dne, a to v souvislosti s podílem rezervní kapacity na celkové kapacitě zásobníku – viz dále.

Dodávané množství

Množství dodávaného vodíku je limitováno na spodní hranici dohodou s dodavatelem o nejnižším množství, které je ochoten pravidelně dodávat. Horní hranice je pak omezena nejvyšší dostupnou kapacitou mobilních tlakových nádob. Ve výše zmíněné optimalizaci by tyto hodnoty představovaly okrajové podmínky. Z pohledu dodávaného množství by obecně měla být jak denní, tak týdenní potřeba vodíku – viz tab. 10.1 – realizovatelná a žádný z těchto scénářů tak nelze předem vyloučit.

Velikost rezervy

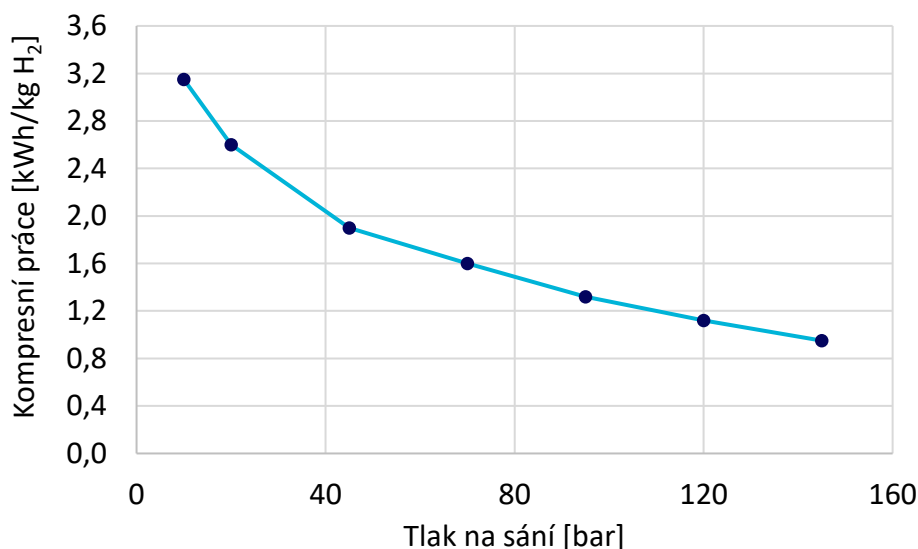
Kapacita navrhované nádoby musí být dimenzována s minimálně jednodenní rezervou pro případ zpoždění či výpadku dodávky [170]. V případě každodenních dodávek vodíku tedy musí být kapacita dimenzována na dva dny provozu, což znamená, že polovina kapacity není běžně využívána, ale projevuje se v kapitálových nákladech. Při týdenní periodě dodávek, tedy pěti pracovních dnech, pak podíl nevyužívané kapacity klesá na pětinu. Zároveň to však znamená, že tlak v zásobníku na konci běžného týdne je významně nižší než na konci běžného dne v případě každodenního zásobování. To má za následek vyšší kompresní práci – viz kap. 12, s čímž jsou spojeny vyšší provozní náklady.

Jmenovitý tlak zásobníku

Tlaková úroveň dodávaného vodíku má zásadní vliv na potřebný objem tlakových nádob pro přepravu a skladování vodíku. Zde je třeba rozlišovat tlak v mobilní tlakové nádobě a tlak v zásobníku na stanici. Při přepouštění vodíku z mobilní nádoby do zásobníku dochází k poklesu tlaku v této mobilní nádobě a dodávaný vodík tak obecně musí mít tlak vyšší než samotný zásobník na stanici. Pro potřeby výpočtu byl jmenovitý tlak zásobníku zvolen 200 bar, což je nejvyšší běžně dosahovaná hodnota a zároveň se typicky jedná o nejvyšší tlak, kterým je dodavatel schopen zásobník naplnit.

Nejnižší tlak v zásobníku

Nejnižší možný tlak vodíku v zásobníku odpovídá minimálnímu dovolenému tlaku na sání kompresoru. Ten je omezen jeho konstrukcí a zpravidla se pohybuje v řádu jednotek bar. S klesající hodnotou nicméně významně klesá dodávaný hmotnostní tok, a naopak silně narůstá kompresní práce – viz obr. 11.1. Minimální návrhový tlak vodíku na sání byl proto zvolen vyšší, a to 20 bar – v souladu se zdrojem [154]. Tato hodnota nicméně vykazuje vysoký potenciál pro budoucí optimalizaci – její navýšení vede k významnému snížení požadovaného jmenovitého výkonu kompresoru, zároveň ale zvyšuje i potřebnou velikost zásobníku. K poklesu na tento minimální návrhový tlak na sání nicméně dojde pouze při současném vyčerpání jednodenní rezervy vodíku, vyšším než předpokládaném nájezdu / vyšší spotřebě a extrémní změně teplot mezi plněním a vyprázdněním zásobníku. Jedná se tedy o extrémně nepravděpodobný scénář a skutečný tlak na sání bude téměř vždy vyšší.



Obr. 11.1 Závislost energie potřebné pro stlačení vodíku na tlaku na sání kompresoru. Ilustrační obrázek. Upraveno z [154].

11.2 Postup výpočtu

Nejprve stanovíme minimální užitečnou kapacitu zásobníku m_{ZUM} dle rovnice 10.1:

$$m_{ZUM} = m_P + m_R \quad (10.1)$$

- m_{ZUM} [kg] – Minimální užitečná kapacita zásobníku
 m_P [kg] – Denní či týdenní potřeba vodíku
 m_R [kg] – Množství vodíku v jednodenní rezervě

Minimální užitečná kapacita je dána rozdílem jmenovitého a nejnižšího tlaku v zásobníku a je proto nižší než skutečná kapacita. Pro potřeby výběru tlakové nádoby je nicméně vhodnější veličinou minimální objem zásobníku V_{ZM} , který určíme dle rovnice 10.2:

$$V_{ZM} = \frac{m_{ZUM}}{\rho_{ZJM} - \rho_{ZMIN}} \quad (10.2)$$

V_{ZM} [m³] – Minimální objem zásobníku
 ρ_{ZJM} [kg/m³] – Hustota vodíku v zás. při jmenovitém tlaku a horní mezní návrhové teplotě
 ρ_{ZMIN} [kg/m³] – Hustota vodíku v zás. při nejnižším tlaku a dolní mezní návrhové teplotě

Pro kontrolu lze vypočítaný minimální objem zásobníku srovnat s nabídkou výrobců. K tomu byl využit web Hyfindr zaměřený přímo na výběr součástí pro vodíkové aplikace [173]. Je však třeba poznamenat, že na něm uvedené komponenty pokrývají jen omezené množství výrobců a zdaleka nereflektují kompletní nabídku. Na základě tlakových nádob uvedených v sekci „Hydrogen Storage Systems“ na tomto webu lze tvrdit, že běžný rozsah velikostí nádob se jmenovitým tlakem 200 bar či vyšším činí 8–24 m³ [174]. Velikosti nejsou nijak standardizovány a mohou se lišit v závislosti na výrobcích. Cílem této práce není výběr konkrétních komponent, pro účely dalšího postupu výpočtu byl proto minimální objem zaokrouhlen nahoru na nejbližší celý m³. Tato hodnota je dále označována jako objem zásobníku V_Z . Při návrhu s výběrem komponent bude nahrazena objemem zvolené tlakové nádoby, přičemž musí platit $V_Z > V_{ZM}$. Zaokrouhlení je pro přehlednost uvedeno níže v rovnici 10.3:

$$V_Z = \text{ROUNDUP}(V_{ZM}) \quad (10.3)$$

V_Z [m³] – Objem zásobníku – minimální objem zaokrouhlený nahoru na celé m³
 V_{ZM} [kg/m³] – Minimální objem zásobníku

Tím je výpočet objemu zásobníku dokončen. Pro potřeby odhadu kapitálových nákladů však ještě určíme skutečnou kapacitu tohoto zásobníku m_Z dle rovnice 10.4. Hustotu vodíku v tomto případě určujeme za jmenovitého tlaku a normální teploty.

$$m_Z = \rho_{ZJMN} \cdot V_Z \quad (10.4)$$

m_Z [kg] – Skutečná kapacita zásobníku
 ρ_{ZJMN} [kg/m³] – Hustota vodíku v zás. při jmenovitém tlaku a normální teplotě
 V_Z [m³] – Objem zásobníku – minimální objem zaokrouhlený nahoru na celé m³

11.3 Výpočet a vypočítané hodnoty

Uvedený vzorový výpočet je proveden pro variantu s denními dodávkami vodíku. Výpočet minimální užitečné kapacity zásobníku dle rovnice 10.1:

$$m_{ZUM} = m_P + m_R$$

$$m_{ZUM} = 46,93 + 46,93 = 93,87 \text{ kg}$$

Výpočet minimálního objemu zásobníku dle rovnice 10.2. Hustoty vodíku zde, stejně jako ve všech ostatních částech výpočtu byly určeny za využití softwaru EES.

$$\rho_{ZJM} = f(p_{ZJM}, T_{MAX}) = f(200 \text{ bar}, 40^\circ\text{C}) = 13,85 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{ZMIN} = f(p_{MIN}, T_{MIN}) = f(20 \text{ bar}, -15^{\circ}\text{C}) = 1,855 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$V_{ZM} = \frac{m_{ZUM}}{\rho_{ZJM} - \rho_{ZMIN}}$$

$$V_{ZM} = \frac{93,87}{13,85 - 1,855} = 7,83 \text{ m}^3$$

Zaokrouhlení minimálního objemu zásobníku na objem zásobníku dle rovnice 10.3:

$$V_Z = \text{ROUNDUP}(V_{ZM})$$

$$V_Z = \text{ROUNDUP}(7,83) = 8 \text{ m}^3$$

Výpočet skutečné kapacity zásobníku dle rovnice 10.4:

$$\rho_{ZJMN} = f(p_{ZJM}, T_N) = f(200 \text{ bar}, 0^{\circ}\text{C}) = 15,69 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_Z = \rho_{ZJMN} \cdot V_Z$$

$$m_Z = 15,69 \cdot 8 = 125,52 \text{ kg}$$

Vypočítané hodnoty pro variantu denních i týdenních dodávek vodíku jsou uvedeny v tab. 11.1.

Tab. 11.1 Kapacity a objemy zásobníku pro denní a týdenní variantu dodávek vodíku.

| Dodávky vodíku | | | | |
|----------------|--------|---------|-------------------|---------------------------------------|
| Veličina | Denní | Týdenní | Jednotka | Popis |
| m_P | 46,93 | 234,67 | kg | Denní či týdenní potřeba vodíku |
| m_R | 46,93 | 46,93 | kg | Množství vodíku v jednodenní rezervě |
| m_{ZUM} | 93,87 | 281,60 | kg | Minimální užitečná kapacita zásobníku |
| ρ_{ZJM} | 13,85 | 13,85 | kg/m ³ | Hustota vodíku při 200 bar a +40 °C |
| ρ_{ZMIN} | 1,855 | 1,855 | kg/m ³ | Hustota vodíku při 20 bar a -15 °C |
| V_{ZM} | 7,83 | 23,48 | m ³ | Minimální objem zásobníku |
| V_Z | 8 | 24 | m ³ | Objem zásobníku |
| ρ_{ZJMN} | 15,69 | 15,69 | kg/m ³ | Hustota vodíku při 200 bar a 0 °C |
| m_Z | 125,52 | 376,56 | kg | Skutečná kapacita zásobníku |

12 KOMPRESOR

Návrh kompresoru spočívá ve stanovení jeho výkonu, případně příkonu a s tím spojené spotřeby elektrické energie. Hlavními parametry jsou přitom tlak na sání a výtlačku, teplota vodíku na sání a požadovaný hmotnostní tok. Na stanici bývá pouze jeden kompresor pro všechny provozní režimy, což klade vysoké nároky na jeho spolehlivost. Při návrhu byl proveden výpočet a srovnání tří základních koncepcí: Booster, Buffer a Kaskáda – viz kap. 9.1.2. Pro zpřesnění odhadu provozních nákladů byl výpočet rozdělen na část Dimenzování, ve které jsou uvažovány mezní návrhové podmínky a část Běžný provoz, ve které je stejný kompresor přepočítán na podmínky lépe reprezentující běžný provoz.

12.1 Návrhové parametry

Teplota na sání

Teplota vodíku na sání kompresoru má přímý vliv na jeho tlak a tím i na kompresní práci, ale také na návrh mezichladiče. Teplota na sání pro účely dimenzování byla uvažována 40 °C, tedy rovna horní mezní návrhové teplotě. Běžná teplota na sání byla zvolena 8 °C, tedy blízká roční průměrné teplotě v České republice. Tato hodnota je samozřejmě závislá na lokalitě.

Tlak na sání

Jak již bylo řečeno, tlak na sání je pro účely dimenzování kompresoru uvažován stejný jako nejnižší tlak v zásobníku, tedy 20 bar. V případě běžného provozu je pak určen výpočtem ze skutečné kapacity zásobníku při běžné teplotě a denní či týdenní spotřeby vodíku – viz dále.

Tlak na výtlačku

Požadovaný tlak vodíku na výtlačku kompresoru je závislý na zvolené koncepci. V případě Booster koncepce, kdy je kompresor přímo spojen s výdejním stojanem, resp. navrhovaná tlaková nádoba slouží pouze pro kompenzaci tlakových pulzací, postačuje nižší tlak na výtlačku vlivem menší tlakové ztráty. Jeho velikost byla zvolena 760 bar, což je limitní hodnota, pod kterou hrozí neúplné naplnění nádrže vozidla [126]. Střední tlak za běžného provozu byl určen výpočtem – viz dále. Pro případ Buffer koncepce, kdy je vodík po stlačení skladován v jednom vysokotlakém akumulátoru byl tlak na výtlačku pro účely dimenzování zvolen v souladu s běžnou praxí 900 bar. Střední tlak za běžného provozu pak byl opět určen výpočtem – viz dále. V případě koncepce Kaskáda s třemi vysokotlakými akumulátory na různých tlakových úrovních je tlak na výtlačku pro účely dimenzování opět roven 900 bar. Střední tlak na výtlačku za běžného provozu byl určen jako vážený průměr středních tlaků na úrovních jednotlivých tlakových nádob, přičemž váhy těchto tlaků byly rovny hmotnostem vodíku, které je na danou tlakovou úroveň nutno stlačit – viz dále.

Hmotnostní tok

Hmotnostní tok vodíku má významný dopad na rychlost plnění vozidla. V případě Booster koncepce jsou tyto hodnoty shodné, výhodou zbylých koncepcí je právě oddělení těchto dvou hmotnostních toků a tím nižší jmenovitý výkon kompresoru. Hmotnostní tok vodíku kompresorem byl v Booster koncepci uvažován stejný jako průměrná rychlost plnění vozidla stanovená z kapacity jeho nádrže 6,4 kg a udané doby plnění 5 min. Je třeba podotknout, že rychlost plnění není konstantní – viz obr. 8.2, přesný průběh nicméně závisí na řadě faktorů a nebyl dohledán. Proto bylo použito toto zjednodušení. Stejná rychlost plnění vozidla pak byla využita i u zbylých dvou koncepcí. Hmotnostní tok vodíku kompresorem v případě Buffer a Kaskáda koncepce pak byl zvolen tak, aby byl akumulátor, resp. skupina tří akumulátorů naplněn za 10 min

při uvažování potřeby vodíku pro jedno vozidlo – výpočet viz dále. Znamená to tedy, že stanice založená na těchto koncepcích je schopna naplnit 1 vozidlo za 10 min bez omezení počtu vozidel takto plněných za sebou. Zvolená doba se jeví jako dostatečná a případné zdržení při setkání několika vozidel současně jako přijatelné.

Parametry kompresoru

Parametry kompresoru, stejně jako vybrané fyzikální veličiny byly pro zjednodušení výpočtu zvoleny napevno. Kompresní poměr jednoho stupně kompresoru byl zvolen 2,5 na základě dat ze zdroje [154]. Účinnost komprese pak 55 % na základě téhož zdroje. Oba tyto parametry byly voleny konzervativně a lze je pravděpodobně dále navýšit. Přesné hodnoty jsou nicméně závislé na volbě konkrétního kompresoru.

Fyzikální veličiny

Hodnota Poissonovy konstanty byla uvažována 1,4, molární hmotnost molekuly vodíku 2 g/mol a hodnota molární plynové konstanty 8,314 J/(mol·K). Hodnoty ostatních veličin byly buď do počítány, nebo určeny na základě známých parametrů za využití softwaru EES.

12.2 Postup výpočtu

12.2.1 Dimenzování kompresoru

Nejprve stanovíme minimální počet stupňů kompresoru N_{KM} dle rovnice 10.5 [154]:

$$N_{KM} = \frac{\log\left(\frac{p_{KV}}{p_{KS}}\right)}{\log(x)} \quad (10.5)$$

| | | |
|----------|-------|---|
| N_{KM} | [-] | – Minimální počet stupňů kompresoru |
| p_{KV} | [bar] | – Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | [bar] | – Tlak vodíku na sání kompresoru |
| x | [-] | – Kompresní poměr jednoho stupně kompresoru |

Tuto hodnotu následně zaokrouhlíme nahoru na nejbližší celé číslo – viz rovnice 10.6:

$$N_K = \text{ROUNDUP}(N_{KM}) \quad (10.6)$$

| | | |
|----------|-----|-------------------------------------|
| N_K | [-] | – Skutečný počet stupňů kompresoru |
| N_{KM} | [-] | – Minimální počet stupňů kompresoru |

Dále určíme teplotu vodíku na výtlaku kompresoru T_{KV} dle rovnice 10.7 [154]:

$$T_{KV} = T_{KS} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{p_{KV}}{p_{KS}}\right)^{\frac{k-1}{N_K \cdot k}} - 1}{\eta_{KI}} \right] \quad (10.7)$$

| | | |
|-------------|-------|--|
| T_{KV} | [°C] | – Teplota vodíku na výtlaku kompresoru |
| T_{KS} | [°C] | – Teplota vodíku na sání kompresoru |
| p_{KV} | [bar] | – Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | [bar] | – Tlak vodíku na sání kompresoru |
| k | [-] | – Poissonova konstanta |
| N_K | [-] | – Skutečný počet stupňů kompresoru |
| η_{KI} | [-] | – Isentropická účinnost komprese |

Následně určíme průměrný tlak p_{KP} a teplotu T_{KP} při kompresi dle rovnic 10.8 a 10.9:

$$p_{KP} = \frac{p_{KS} + p_{KV}}{2} \quad (10.8)$$

p_{KP} [bar] – Průměrný tlak vodíku při kompresi
 p_{KS} [bar] – Tlak vodíku na sání kompresoru
 p_{KV} [bar] – Tlak vodíku na výtlaku kompresoru

$$T_{KP} = \frac{T_{KS} + T_{KV}}{2} \quad (10.9)$$

T_{KP} [°C] – Průměrná teplota vodíku při kompresi
 T_{KS} [°C] – Teplota vodíku na sání kompresoru
 T_{KV} [°C] – Teplota vodíku na výtlaku kompresoru

Pro tyto hodnoty dále určíme kompresibilitní faktor Z dle rovnice 10.10:

$$Z = f(p_{KP}, T_{KP}) \quad (10.10)$$

Z [-] – Kompresibilitní faktor
 p_{KP} [bar] – Průměrný tlak vodíku při kompresi
 T_{KP} [°C] – Průměrná teplota vodíku při kompresi

Nyní musíme určit hmotnostní tok \dot{m}_K vodíku kompresorem. Jeho hodnotu určíme pro Booster koncepci dle rovnice 10.11, pro Buffer a Kaskáda koncepci pak dle rovnice 10.12:

$$\dot{m}_K = \frac{m_V}{t_V \cdot 60} \cdot 1000 \quad (10.11)$$

\dot{m}_K [g/s] – Hmotnostní tok vodíku kompresorem
 m_V [kg] – Kapacita nádrže ve vozidle
 t_V [min] – Udaná doba plnění nádrže

$$\dot{m}_K = \frac{m_{P1}}{t_P \cdot 60} \cdot 1000 \quad (10.12)$$

\dot{m}_K [g/s] – Hmotnostní tok vodíku kompresorem
 m_{P1} [kg] – Potřeba vodíku pro jedno vozidlo
 t_P [min] – Zvolená doba plnění akumulátoru

Tuto hodnotu následně převedeme na tok látkového množství \dot{n}_K dle rovnice 10.13:

$$\dot{n}_K = \frac{\dot{m}_K}{M_{H2}} \quad (10.13)$$

\dot{n}_K [mol/s] – Tok látkového množství vodíku kompresorem
 \dot{m}_K [g/s] – Hmotnostní tok vodíku kompresorem
 M_{H2} [g/mol] – Molární hmotnost molekuly vodíku

V posledním kroku pak již můžeme vypočítat minimální požadovaný mechanický výkon P_K , tedy výkon na hřídeli kompresoru, dle rovnice 10.14 [154]:

$$P_{KM} = N_K \cdot \left(\frac{k}{k-1} \right) \cdot \left(\frac{Z}{\eta_{KI}} \right) \cdot T_{KS} \cdot \dot{n}_K \cdot R \cdot \left[\left(\frac{p_{KV}}{p_{KS}} \right)^{\frac{k-1}{N_K \cdot k}} - 1 \right] \quad (10.14)$$

| | | |
|-------------|-------------|---|
| P_{KM} | [W] | – Minimální mechanický výkon kompresoru |
| N_K | [–] | – Skutečný počet stupňů kompresoru |
| k | [–] | – Poissonova konstanta |
| Z | [–] | – Kompresibilitní faktor |
| η_{KI} | [–] | – Isentropická účinnost komprese |
| T_{KS} | [°C] | – Teplota vodíku na sání kompresoru |
| \dot{n}_K | [mol/s] | – Tok látkového množství vodíku kompresorem |
| R | [J/(mol·K)] | – Molární plynová konstanta |
| p_{KV} | [bar] | – Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | [bar] | – Tlak vodíku na sání kompresoru |

Tím je dimenzování kompresoru dokončeno. Srovnání požadovaných parametrů s nabídkou výrobců nebylo provedeno, jelikož nebyla dohledána relevantní data. Pro účely odhadu provozních nákladů je však ještě potřeba určit příkon jeho pohonu P_{0M} . Zde je pro jednoduchost uvažován pohon kompresoru elektromotorem s účinností 95 %. V praxi se však lze setkat s různými druhy pohonů. Výpočet je proveden dle rovnice 10.15:

$$P_{0M} = \frac{P_{KM}}{\eta_E} \quad (10.15)$$

| | | |
|----------|-----|---|
| P_{0M} | [W] | – Elektrický příkon elektromotoru |
| P_{KM} | [W] | – Minimální mechanický výkon kompresoru |
| η_E | [–] | – Účinnost elektromotoru |

12.2.2 Běžný provoz kompresoru

Běžný provoz kompresoru se od výpočtu pro dimenzování liší teplotou a tlakem vodíku na sání kompresoru a tlakem vodíku na výtlaku. Další změnou je pak snížení hmotnostního toku vodíku kompresorem díky snížení tankovaného množství na hodnotu odpovídající předpokládané běžné spotřebě vozidla při zachování stejné doby plnění nádrže v případě Booster koncepce, resp. doby plnění akumulátoru v případě Buffer a Kaskáda koncepce. Zbývající parametry byly uvažovány stejné – např. izentropická účinnost komprese, nebo musí z principu zůstat stejné – např. skutečný počet stupňů kompresoru.

Tlak na sání kompresoru:

Nejprve určíme skutečnou kapacitu zásobníku m_{ZB} při běžné teplotě 8 °C a jmenovitém tlaku 200 bar dle rovnice 10.16:

$$m_{ZB} = \rho_{ZJMB} \cdot V_Z \quad (10.16)$$

| | | |
|---------------|----------------------|---|
| m_{ZB} | [kg] | – Skutečná kapacita zásobníku při běžné teplotě |
| ρ_{ZJMB} | [kg/m ³] | – Hustota vodíku v zásobníku při jmenovitém tlaku a běžné teplotě |
| V_Z | [m ³] | – Objem zásobníku |

Od této hodnoty následně odečteme spotřebu vodíku všemi vozidly během jednoho dne, resp. týdne, čímž získáme zbývající množství vodíku v zásobníku m_{ZZ} na konci tohoto období – viz rovnice 10.17:

$$m_{ZZ} = m_{ZB} - m_S \quad (10.17)$$

m_{ZZ} [kg] – Zbývající množství vodíku v zásobníku
 m_{ZB} [kg] – Skutečná kapacita zásobníku při běžné teplotě
 m_S [kg] – Denní či týdenní spotřeba vodíku

Nyní můžeme určit hustotu zbývajícího množství vodíku v zásobníku ρ_{ZZ} dle rovnice 10.18:

$$\rho_{ZZ} = \frac{m_{ZZ}}{V_Z} \quad (10.18)$$

ρ_{ZZ} [kg/m³] – Hustota zbývajícího množství vodíku v zásobníku
 m_{ZZ} [kg] – Zbývající množství vodíku v zásobníku
 V_Z [m³] – Objem zásobníku

Ze znalosti této hustoty a běžné teploty pak můžeme určit tlak zbývajícího množství vodíku v zásobníku p_{ZZ} dle rovnice 10.19:

$$p_{ZZ} = f(\rho_{ZZ}, T_B) \quad (10.19)$$

p_{ZZ} [bar] – Tlak zbývajícího množství vodíku v zásobníku
 ρ_{ZZ} [kg/m³] – Hustota zbývajícího množství vodíku v zásobníku
 T_B [°C] – Běžná teplota

Následně vypočítáme tlakový rozdíl mezi jmenovitým tlakem zásobníku a tlakem zbývajícího množství vodíku v zásobníku Δp_Z dle rovnice 10.20:

$$\Delta p_Z = p_{ZJM} - p_{ZZ} \quad (10.20)$$

Δp_Z [bar] – Tlakový rozdíl mezi jmenovitým tlakem a tlakem zbývajícího množství vodíku
 p_{ZJM} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v zásobníku
 p_{ZZ} [bar] – Tlak zbývajícího množství vodíku v zásobníku

V posledním kroku pak určíme střední tlak vodíku v zásobníku p_{ZS} dle rovnice 10.21 [167]. Tento tlak odpovídá střední kompresní práci kompresoru a je tedy reprezentativnější z energetického hlediska. Je nicméně třeba poznamenat, že vzhledem ke zjednodušením provedeným při jeho odvozování je tento tlak téměř shodný s tlakem průměrným.

$$p_{ZS} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{ZJM}}\right)^{\left(\frac{p_{ZJM}}{\Delta p_Z}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{ZZ}}\right)^{-\left(\frac{p_{ZZ}}{\Delta p_Z}\right)}} \quad (10.21)$$

p_{ZS} [bar] – Střední tlak vodíku v zásobníku
 p_{ZJM} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v zásobníku
 Δp_Z [bar] – Tlakový rozdíl mezi jmenovitým tlakem a tlakem zbývajícího množství vodíku
 p_{ZZ} [bar] – Tlak zbývajícího množství vodíku v zásobníku

Tlak na sání kompresoru při běžném provozu p_{KSB} je uvažován jako rovný střednímu tlaku vodíku v zásobníku. Tím je tedy jeho výpočet dokončen.

Tlak na výtlaku kompresoru:

Booster koncepce:

V případě Booster koncepce je běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} závislý na jmenovitém tlaku na výtlaku kompresoru a tlaku zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla. Nejprve určíme objem nádrže vozidla V_V dle rovnice 10.22. Vycházíme přitom z předpokladu, že udaná kapacita nádrže byla měřena za normální teploty a jmenovitého tlaku.

$$V_V = \frac{m_V}{\rho_{VJMN}} \quad (10.22)$$

V_V [m³] – Objem nádrže vozidla
 m_V [kg] – Kapacita nádrže ve vozidle
 ρ_{VJMN} [kg/m³] – Hustota vodíku v nádrži vozidla při jmenovitém tlaku a normální teplotě

Z kapacity nádrže ve vozidle a spotřeby jednoho vozidla určíme zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla m_{VZ} dle rovnice 10.23:

$$m_{VZ} = m_V - m_{S1} \quad (10.23)$$

m_{VZ} [kg] – Zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla
 m_V [kg] – Kapacita nádrže ve vozidle
 m_{S1} [kg] – Denní spotřeba vodíku jednoho vozidla

Následně určíme hustotu zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla ρ_{VZ} dle rovnice 10.24:

$$\rho_{VZ} = \frac{m_{VZ}}{V_V} \quad (10.24)$$

ρ_{VZ} [kg/m³] – Hustota zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla
 m_{VZ} [kg] – Zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla
 V_V [m³] – Objem nádrže vozidla

Z této hustoty a běžné teploty můžeme následně určit tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla p_{VZ} dle rovnice 10.25:

$$p_{VZ} = f(\rho_{VZ}, T_B) \quad (10.25)$$

p_{VZ} [bar] – Tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla
 ρ_{VZ} [kg/m³] – Hustota zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla
 T_B [°C] – Běžná teplota

Dále pak vypočítáme tlakový rozdíl Δp_V mezi jmenovitým tlakem na výtlaku kompresoru a tlakem zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla dle rovnice 10.26:

$$\Delta p_V = p_{KV} - p_{VZ} \quad (10.26)$$

Δp_V [bar] – Tlakový rozdíl mezi tlakem na výtlaku kompresoru a tlakem vodíku v nádrži
 p_{KV} [bar] – Tlak na výtlaku kompresoru
 p_{VZ} [bar] – Tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla

Následně již můžeme vypočítat běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} jako střední tlak – popis viz rovnice 10.21 – dle rovnice 10.27:

$$p_{KVB} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{KV}}\right)^{\left(\frac{p_{KV}}{\Delta p_V}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{VZ}}\right)^{-\left(\frac{p_{VZ}}{\Delta p_V}\right)}} \quad (10.27)$$

- p_{KVB} [bar] – Běžný tlak na výtlaku kompresoru
 p_{KV} [bar] – Tlak na výtlaku kompresoru
 Δp_V [bar] – Tlakový rozdíl mezi tlakem na výtlaku kompresoru a tlakem vodíku v nádrži
 p_{VZ} [bar] – Tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla

Tím je výpočet tlaku na výtlaku pro případ Booster koncepce dokončen.

Buffer koncepce:

V případě Buffer koncepce je běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} závislý pouze na jmenovitém a minimálním tlaku vodíku v bufferu. Oba tato tlaky přitom volíme. Jak již bylo řečeno, zvolená hodnota jmenovitého tlaku je 900 bar v souladu s běžnou praxí. Minimální hodnota pak 760 bar s ohledem na to, že při nižším tlaku by nemuselo dojít k úplnému naplnění [126]. Nejprve vypočítáme tlakový rozdíl mezi jmenovitým a minimálním tlakem vodíku v bufferu Δp_B dle rovnice 10.28:

$$\Delta p_B = p_{BJM} - p_{BMIN} \quad (10.28)$$

- Δp_B [bar] – Tlakový rozdíl mezi jmenovitým a minimálním tlakem v bufferu
 p_{BJM} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v bufferu
 p_{BMIN} [bar] – Minimální tlak vodíku v bufferu

Následně již můžeme vypočítat běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} , který je roven střednímu tlaku vodíku v bufferu – popis viz rovnice 10.21 – dle rovnice 10.29:

$$p_{KVB} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{BJM}}\right)^{\left(\frac{p_{BJM}}{\Delta p_B}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{BMIN}}\right)^{-\left(\frac{p_{BMIN}}{\Delta p_B}\right)}} \quad (10.29)$$

- p_{KVB} [bar] – Běžný tlak na výtlaku kompresoru
 p_{BJM} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v bufferu
 Δp_B [bar] – Tlakový rozdíl mezi jmenovitým a minimálním tlakem v bufferu
 p_{BMIN} [bar] – Minimální tlak vodíku v bufferu

Tím je výpočet tlaku na výtlaku pro případ Buffer koncepce dokončen.

Kaskáda koncepce:

Výpočet běžného tlaku na výtlaku kompresoru p_{KVB} je v případě Kaskáda koncepce složitější, jelikož je jeho hodnota závislá na dimenzování a běžném provozu vysokotlakých akumulátorů. Postup výpočtu je proto uveden v kap. 13.2.

Další kroky postupu výpočtu kompresoru za běžného provozu jsou dále již shodné s výpočtem při dimenzování kompresoru a nejsou zde proto blíže rozepsány. Tím je výpočet kompresoru při běžném provozu dokončen.

12.3 Výpočet a vypočítané hodnoty

12.3.1 Dimenzování kompresoru

Vzorový výpočet je proveden pro Booster koncepci. Zvolená varianta denních či týdenních dodávek nemá na dimenzování kompresoru žádný vliv – proměnné i výsledek jsou totožné. Tlak vodíku na sání je uvažován 20 bar, což odpovídá nejnižšímu tlaku v zásobníku, tlak na výtlaku pak 760 bar. Teplota vodíku na sání je uvažována 40 °C, což odpovídá horní mezi – tedy nejméně příznivým podmínkám.

Nejprve stanovíme minimální počet stupňů kompresoru N_{KM} dle rovnice 10.5:

$$N_{KM} = \frac{\log\left(\frac{p_{KV}}{p_{KS}}\right)}{\log(x)} = \frac{\log\left(\frac{760}{20}\right)}{\log(2,5)} = 3,97$$

Tuto hodnotu následně zaokrouhlíme nahoru na nejbližší celé číslo dle rovnice 10.6:

$$N_K = \text{ROUNDUP}(N_{KM}) = \text{ROUNDUP}(3,97) = 4$$

Dále určíme teplotu vodíku na výtlaku kompresoru T_{KV} dle rovnice 10.7:

$$T_{KV} = T_{KS} \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{p_{KV}}{p_{KS}}\right)^{\frac{k-1}{N_K \cdot k}} - 1}{\eta_{KI}} \right]$$

$$T_{KV} = 40 \cdot \left[1 + \frac{\left(\frac{760}{20}\right)^{\frac{1,4-1}{4 \cdot 1,4}} - 1}{0,55} \right] = 208,93 \text{ °C}$$

Následně určíme průměrný tlak p_{KP} a teplotu T_{KP} při kompresi dle rovnic 10.8 a 10.9:

$$p_{KP} = \frac{p_{KS} + p_{KV}}{2} = \frac{20 + 760}{2} = 390 \text{ bar}$$

$$T_{KP} = \frac{T_{KS} + T_{KV}}{2} = \frac{40 + 208,93}{2} = 124,47 \text{ °C}$$

Pro tyto hodnoty za pomoci softwaru EES určíme kompresibilitní faktor Z dle rovnice 10.10:

$$Z = f(p_{KP}, T_{KP}) = f(390 \text{ bar}, 124,47 \text{ °C}) = 1,19$$

Nyní určíme hmotnostní tok \dot{m}_K vodíku kompresorem dle rovnice 10.11 a ten následně převedeme na tok látkového množství dle rovnice 10.13:

$$\dot{m}_K = \frac{m_V}{t_V \cdot 60} \cdot 1000 = \frac{6,4}{5 \cdot 60} \cdot 1000 = 21,33 \text{ g/s}$$

$$\dot{n}_K = \frac{\dot{m}_K}{M_{H_2}} = \frac{21,33}{2} = 10,67 \text{ mol/s}$$

V posledním kroku pak již vypočítáme minimální požadovaný mechanický výkon P_K , tedy výkon na hřídeli kompresoru, dle rovnice 10.14 a následně určíme velikost mechanického výkonu kompresoru zaokrouhlením na nejbližší vyšší „hezkou“ hodnotu.

$$P_{KM} = N_K \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \left(\frac{Z}{\eta_{KI}}\right) \cdot T_{KS} \cdot \dot{n}_K \cdot R \cdot \left[\left(\frac{p_{KV}}{p_{KS}}\right)^{\frac{k-1}{N_K \cdot k}} - 1 \right]$$

$$P_{KM} = 4 \cdot \left(\frac{1,4}{1,4-1}\right) \cdot \left(\frac{1,19}{0,55}\right) \cdot 40 \cdot 10,67 \cdot 8,314 \cdot \left[\left(\frac{760}{20}\right)^{\frac{1,4-1}{4 \cdot 1,4}} - 1 \right]$$

$$P_{KM} = 249591,9 \text{ W} \quad P_K = 250 \text{ kW}$$

Vypočítané hodnoty pro Booster, Buffer a Kaskáda koncepci jsou uvedeny v tab. 12.1. I v případě Buffer a Kaskáda nehraje volba denních či týdenních dodávek žádnou roli. Požadované mechanické výkony jsou v případě Buffer a Kaskáda koncepcí shodné, což je dáno shodnými návrhovými podmínkami a požadovaným hmotnostním tokem.

Tab. 12.1 Dimenzovaný mech. výkon kompresoru – Booster, Buffer a Kaskáda koncepce.

| Veličina | Booster | Buffer | Kaskáda | Jednotka | Popis |
|----------------|---------|--------|---------|-----------|---------------------------------------|
| p_{KV} | 760 | 900 | 900 | bar | Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | 20 | 20 | 20 | bar | Tlak vodíku na sání kompresoru |
| T_{KS} | 40 | 40 | 40 | °C | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| x | 2,5 | 2,5 | 2,5 | – | Kompresní poměr stupně kompresoru |
| k | 1,4 | 1,4 | 1,4 | – | Poissonova konstanta |
| η_{KI} | 0,55 | 0,55 | 0,55 | – | Isentropická účinnost komprese |
| N_{KM} | 3,97 | 4,15 | 4,15 | – | Minimální počet stupňů kompresoru |
| N_K | 4 | 5 | 5 | – | Skutečný počet stupňů kompresoru |
| T_{KV} | 208,93 | 178,35 | 178,35 | °C | Teplota vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KP} | 390 | 460 | 460 | bar | Průměrný tlak vodíku při kompresi |
| T_{KP} | 124,47 | 109,18 | 109,18 | °C | Průměrná teplota vodíku při kompresi |
| Z | 1,19 | 1,233 | 1,233 | – | Kompresibilitní faktor |
| m_V / m_{P1} | 6,4 | 4,69 | 4,69 | kg | Kapacita nádrže / potřeba vodíku |
| t_V / t_P | 5 | 10 | 10 | min | Doba plnění nádrže voz. / akumulátoru |
| \dot{m}_K | 21,33 | 7,82 | 7,82 | g/s | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| M_{H_2} | 2 | 2 | 2 | g/mol | Molární hmotnost molekuly vodíku |
| \dot{n}_K | 10,67 | 3,91 | 3,91 | mol/s | Tok látkového množství kompresorem |
| R | 8,314 | 8,314 | 8,314 | J/(mol·K) | Molární plynová konstanta |
| P_{KM} | 249,59 | 97,07 | 97,07 | kW | Min. mechanický výkon kompresoru |
| P_K | 250 | 100 | 100 | kW | Mechanický výkon kompresoru |

12.3.2 Běžný provoz kompresoru

Nejprve musíme určit běžný tlak na sání kompresoru. Ten je shodný pro všechny tři koncepce, liší se však v závislosti na volbě denních či týdenních dodávek vodíku. Ve výpočtu uvažujeme s běžnou teplotou vodíku na sání $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, jmenovitým, resp. minimálním tlakem vodíku v zásobníku 200 bar, resp. 20 bar a objemu zásobníku 8 m^3 v případě denních dodávek a 24 m^3 v případě týdenních dodávek vodíku. Spotřebu vodíku uvažujeme nezávislou na teplotě. Vzorový výpočet je proveden pro variantu s denní dodávkou vodíku.

Nejprve určíme kapacitu zásobníku m_{ZB} při běžné teplotě a jmenovitém tlaku dle rovnice 10.16. Pro zjednodušení tedy uvažujeme, že byl zásobník při běžné teplotě naplněn na jmenovitý tlak a zároveň že plnění vozidla probíhá při téže teplotě.

$$\rho_{ZJMB} = f(p_{ZJM}, T_B) = f(200\text{ bar}, 8^{\circ}\text{C}) = 15,28\text{ kg/m}^3$$

$$m_{ZB} = \rho_{ZJMB} \cdot V_Z = 15,28 \cdot 8 = 122,24\text{ kg}$$

Následně z této hodnoty a denní spotřeby vodíku všemi vozidly vypočítáme zbývající množství vodíku v zásobníku m_{ZZ} na konci dne dle rovnice 10.17:

$$m_{ZZ} = m_{ZB} - m_S = 122,24 - 42,67 = 79,57\text{ kg}$$

Nyní můžeme určit hustotu zbývajícího množství vodíku v zásobníku ρ_{ZZ} dle rovnice 10.18:

$$\rho_{ZZ} = \frac{m_{ZZ}}{V_Z} = \frac{79,57}{8} = 9,9467\text{ kg/m}^3$$

Ze znalosti této hustoty a běžné teploty pak můžeme určit tlak zbývajícího množství vodíku v zásobníku p_{ZZ} dle rovnice 10.19:

$$p_{ZZ} = f(\rho_{ZZ}, T_B)$$

$$p_{ZZ} = f(9,9467\text{ kg/m}^3, 8^{\circ}\text{C}) = 124,4\text{ bar}$$

Následně vypočítáme tlakový rozdíl mezi jmenovitým tlakem zásobníku a tlakem zbývajícího množství vodíku v zásobníku Δp_Z dle rovnice 10.20 a nakonec také střední tlak vodíku v zásobníku p_{ZS} dle rovnice 10.21:

$$\Delta p_Z = p_{ZJM} - p_{ZZ} = 200 - 124,4 = 75,6\text{ bar}$$

$$p_{ZS} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{ZJM}}\right)^{\left(\frac{p_{ZJM}}{\Delta p_Z}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{ZZ}}\right)^{-\left(\frac{p_{ZZ}}{\Delta p_Z}\right)}}$$

$$p_{ZS} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{200}\right)^{\left(\frac{200}{75,6}\right)} \cdot \left(\frac{1}{124,4}\right)^{-\left(\frac{124,4}{75,6}\right)}} = 160,71\text{ bar}$$

Vypočítané hodnoty pro denní a týdenní dodávky vodíku jsou uvedeny v tab. 12.2.

Tab. 12.2 Střední tlak vodíku v zásobníku za běžné teploty pro denní a týdenní dodávky.

| Veličina | Denní | Týdenní | Jednotka | Popis |
|---------------|--------|---------|-------------------|---|
| T_B | 8 | 8 | °C | Běžná teplota |
| V_Z | 8 | 24 | m ³ | Objem zásobníku |
| p_{ZJM} | 200 | 200 | bar | Jmenovitý tlak vodíku v zásobníku |
| p_{ZMIN} | 20 | 20 | bar | Minimální tlak vodíku v zásobníku |
| ρ_{ZJMB} | 15,28 | 15,28 | kg/m ³ | Hustota vodíku v zás. při jm. tlaku a běžné teplotě |
| m_{ZB} | 122,24 | 366,72 | kg | Skutečná kapacita zásobníku při běžné teplotě |
| m_S | 42,67 | 213,33 | kg | Denní či týdenní spotřeba vodíku |
| m_{ZZ} | 79,57 | 153,39 | kg | Zbývající množství vodíku v zásobníku |
| ρ_{ZZ} | 9,9467 | 6,3911 | kg/m ³ | Hustota zbývajícího množství vodíku v zásobníku |
| p_{ZZ} | 124,4 | 77,68 | bar | Tlak zbývajícího množství vodíku v zásobníku |
| Δp_Z | 75,6 | 122,32 | bar | Rozdíl mezi jm. tlakem a tlakem zbytku vodíku |
| p_{ZS} | 160,71 | 134,14 | bar | Střední tlak vodíku v zásobníku |

Pozn. Střední tlak v zásobníku je roven běžnému tlaku na sání kompresoru.

V následující části pak určíme běžný tlak na výtlaku kompresoru. Vzorový výpočet je opět proveden pro Booster koncepci, přičemž nezáleží na volbě denních či týdenních dodávek vodíku. Při výpočtu pro zjednodušení uvažujeme kapacitu a tlak vodíku v nádrži vozidla nezávislé na teplotě, jelikož nelze určit za jakých podmínek bylo plněno minule a jak se tyto podmínky mezi plněními změnily, a tedy nelze určit ani skutečný stav.

Nejprve určíme objem nádrže vozidla V_V dle rovnice 10.22. Vycházíme přitom z předpokladu, že udaná kapacita nádrže byla měřena za normální teploty a jmenovitého tlaku p_{VJM} .

$$\rho_{VJMN} = f(p_{VJM}, T_N) = f(700 \text{ bar}, 0^\circ\text{C}) = 41,69 \text{ kg/m}^3$$

$$V_V = \frac{m_V}{\rho_{VJMN}} = \frac{6,4}{41,69} = 0,1535 \text{ m}^3$$

Z kapacity nádrže ve vozidle a spotřeby jednoho vozidla určíme zbývající množství vodíku v nádrži vozidla m_{VZ} dle rovnice 10.23:

$$m_{VZ} = m_V - m_{S1} = 6,4 - 4,27 = 2,13 \text{ kg}$$

Následně určíme hustotu zbývajícího množství vodíku v nádrži vozidla ρ_{VZ} dle rovnice 10.24:

$$\rho_{VZ} = \frac{m_{VZ}}{V_V} = \frac{2,13}{0,1535} = 13,8967 \text{ kg/m}^3$$

Tato hustota odpovídá spolu s běžnou teplotou odpovídá tlaku zbývajícího množství vodíku v nádrži vozidla p_{VZ} dle rovnice 10.25:

$$p_{VZ} = f(\rho_{VZ}, T_B)$$

$$p_{VZ} = f(13,8967 \text{ kg/m}^3, 8^\circ\text{C}) = 179,7 \text{ bar}$$

Vypočítaný tlak je nižší než jmenovitý tlak vodíku v zásobníku. V praxi by to tedy znamenalo, že by kompresní práce byla za určitých podmínek záporná. Řešením pro tento případ může být přímé plnění nádrže vozidla přetokem ze zásobníku bez potřeby kompresoru. Pro účely tohoto výpočtu však navýšíme hodnotu tlaku zbývajících množství vodíku v nádrži na 200 bar. Tímto předejdeme případným problémům. Chyba vzniklá touto záměnou je zároveň relativně nízká a na bezpečné straně – vede k vyššímu výkonu kompresoru.

Dále tedy vypočítáme tlakový rozdíl Δp_V mezi jmenovitým tlakem na výtlaku kompresoru a tímto tlakem zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla dle rovnice 10.26:

$$\Delta p_V = p_{KV} - p_{VZ} = 760 - 200 = 560 \text{ bar}$$

Následně již můžeme vypočítat běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} jako střední tlak – popis viz rovnice 10.21 – dle rovnice 10.27:

$$p_{KVB} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{KV}}\right)^{\left(\frac{p_{KV}}{\Delta p_V}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{VZ}}\right)^{-\left(\frac{p_{VZ}}{\Delta p_V}\right)}}$$

$$p_{KVB} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{760}\right)^{\left(\frac{760}{560}\right)} \cdot \left(\frac{1}{200}\right)^{-\left(\frac{200}{560}\right)}} = 450,39 \text{ bar}$$

Výpočet minimálního mechanického výkonu kompresoru pak již probíhá obdobně jako při dimenzování kompresoru a není zde proto uveden. Vypočítané hodnoty tlaku na výtlaku pro Booster, Buffer a Kaskáda koncepti jsou uvedeny v tab. 12.3. I v případě Buffer a Kaskáda nehraje volba denních či týdenních dodávek žádnou roli – hodnoty se neliší. Jak již bylo zmíněno, výpočet tlaku na výtlaku kompresoru pro Kaskáda koncepti bude uveden dále.

Tab. 12.3 Tlak na výtlaku za běžného provozu kompresoru pro Booster, Buffer a Kaskáda koncepti. Hodnoty uvedeny ve třech částech tabulky.

| Veličina | Booster | Jednotka | Popis |
|--------------|---------|-------------------|---|
| m_V | 6,4 | kg | Kapacita nádrže ve vozidle |
| ρ_{VJM} | 41,69 | kg/m ³ | Hustota vod. v nádrži voz. při jm. tlaku a normální teplotě |
| V_V | 0,1535 | m ³ | Objem nádrže vozidla |
| m_{S1} | 4,27 | kg | Denní spotřeba vodíku jednoho vozidla |
| m_{VZ} | 2,13 | kg | Zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla |
| ρ_{VZ} | 13,8967 | kg/m ³ | Hustota zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla |
| p_{VZ} | 179,7 | bar | Tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla |
| p_{VZ} | 200 | bar | Revidovaný tlak zbývajících mn. vod. v nádrži vozidla |
| p_{KV} | 760 | bar | Tlak na výtlaku kompresoru |
| Δp_V | 560 | bar | Rozdíl mezi tlakem na výtlaku komp. a tlakem v nádrži |
| p_{KVB} | 450,39 | bar | Běžný tlak na výtlaku kompresoru – Booster koncepte |

| Veličina | Buffer | Jednotka | Popis |
|--------------|--------|----------|---|
| p_{BJM} | 900 | bar | Jmenovitý tlak vodíku v bufferu |
| p_{BMIN} | 760 | bar | Minimální tlak vodíku v bufferu |
| Δp_B | 140 | bar | Tlakový rozdíl mezi jm. a minimálním tlakem v bufferu |
| p_{KVB} | 829,01 | bar | Běžný tlak na výtlaku kompresoru – Buffer koncepce |

| Veličina | Kaskáda | Jednotka | Popis |
|-----------|---------|----------|---|
| p_{KVB} | 612,67 | bar | Běžný tlak na výtlaku kompresoru – Kaskáda koncepce |

Vypočítané hodnoty mechanického výkonu kompresoru a příkonu elektromotoru pro jeho pohon za běžného provozu jsou uvedeny v tab. 12.4 pro Booster koncepci, v tab. 12.5 pro Buffer koncepci a v tab. 12.6 pro Kaskáda koncepci, a to pro variantu s denními i týdenními dodávkami vodíku na plnicí stanici. Je nutné zmínit, že při výpočtu hmotnostního toku vodíku kompresorem u Booster koncepce (tab. 12.4) bylo upřednostněno snížení hmotnostního toku a tím i provozních nákladů oproti zkrácení doby plnění nádrže. Toto rozhodnutí má vliv také na potřebný chladicí výkon při běžném provozu – viz kap. 14.2.

Tab. 12.4 Mechanický výkon kompresoru a příkon elektromotoru pro jeho pohon za běžného provozu – Booster koncepce.

| Veličina | Denní | Týdenní | Jednotka | Popis |
|-------------|--------|---------|-----------|---|
| p_{KV} | 450,39 | 450,39 | bar | Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | 160,71 | 134,14 | bar | Tlak vodíku na sání kompresoru |
| T_{KS} | 8 | 8 | °C | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| x | 2,5 | 2,5 | – | Kompresní poměr jednoho stupně kompresoru |
| k | 1,4 | 1,4 | – | Poissonova konstanta |
| η_{KI} | 0,55 | 0,55 | – | Isentropická účinnost komprese |
| N_{KM} | 1,12 | 1,32 | – | Minimální počet stupňů kompresoru |
| N_K | 4 | 4 | – | Skutečný počet stupňů kompresoru |
| T_{KV} | 47,05 | 54,19 | °C | Teplota vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KP} | 305,55 | 292,26 | bar | Průměrný tlak vodíku při kompresi |
| T_{KP} | 27,52 | 31,10 | °C | Průměrná teplota vodíku při kompresi |
| Z | 1,19 | 1,18 | – | Kompresibilitní faktor |
| m_{S1} | 4,27 | 4,27 | kg | Spotřeba vodíku jednoho vozidla |
| t_v | 5 | 5 | min | Doba plnění nádrže vozidla |
| \dot{m}_K | 14,22 | 14,22 | g/s | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| M_{H2} | 2 | 2 | g/mol | Molární hmotnost molekuly vodíku |
| \dot{n}_K | 7,11 | 7,11 | mol/s | Tok látkového množství vodíku kompresorem |
| R | 8,314 | 8,314 | J/(mol·K) | Molární plynová konstanta |
| P_{KMB} | 38,46 | 45,12 | kW | Min. mech. výkon komp. za běžných podm. |
| η_E | 0,95 | 0,95 | – | Účinnost elektromotoru |
| P_{OMB} | 40,48 | 47,49 | kW | El. příkon elektromotoru za běžných podm. |

Tab. 12.5 Mechanický výkon kompresoru a příkon elektromotoru pro jeho pohon za běžného provozu – Buffer koncepce.

| Veličina | Denní | Týdenní | Jednotka | Popis |
|-------------|--------|---------|-----------|---|
| p_{KV} | 829,01 | 829,01 | bar | Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | 160,71 | 134,14 | bar | Tlak vodíku na sání kompresoru |
| T_{KS} | 8 | 8 | °C | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| x | 2,5 | 2,5 | – | Kompresní poměr jednoho stupně kompresoru |
| k | 1,4 | 1,4 | – | Poissonova konstanta |
| η_{KI} | 0,55 | 0,55 | – | Isentropická účinnost komprese |
| N_{KM} | 1,79 | 1,99 | – | Minimální počet stupňů kompresoru |
| N_K | 5 | 5 | – | Skutečný počet stupňů kompresoru |
| T_{KV} | 58,24 | 64,07 | °C | Teplota vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KP} | 494,86 | 481,58 | bar | Průměrný tlak vodíku při kompresi |
| T_{KP} | 33,12 | 36,03 | °C | Průměrná teplota vodíku při kompresi |
| Z | 1,309 | 1,297 | – | Kompresibilitní faktor |
| m_{S1} | 4,27 | 4,27 | kg | Spotřeba vodíku jednoho vozidla |
| t_P | 10 | 10 | min | Doba plnění akumulátoru – Bufferu |
| \dot{m}_K | 7,11 | 7,11 | g/s | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| M_{H2} | 2 | 2 | g/mol | Molární hmotnost molekuly vodíku |
| \dot{n}_K | 3,56 | 3,56 | mol/s | Tok látkového množství vodíku kompresorem |
| R | 8,314 | 8,314 | J/(mol·K) | Molární plynová konstanta |
| P_{KMB} | 34,02 | 37,62 | kW | Min. mech. výkon komp. za běžných podm. |
| η_E | 0,95 | 0,95 | – | Účinnost elektromotoru |
| P_{OMB} | 35,81 | 39,60 | kW | El. příkon elektromotoru za běžných podm. |

Tab. 12.6 Mechanický výkon kompresoru a příkon elektromotoru pro jeho pohon za běžného provozu – Kaskáda koncepce.

| Veličina | Denní | Týdenní | Jednotka | Popis |
|-------------|--------|---------|-----------|---|
| p_{KV} | 612,67 | 612,67 | bar | Tlak vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KS} | 160,71 | 134,14 | bar | Tlak vodíku na sání kompresoru |
| T_{KS} | 8 | 8 | °C | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| x | 2,5 | 2,5 | – | Kompresní poměr jednoho stupně kompresoru |
| k | 1,4 | 1,4 | – | Poissonova konstanta |
| η_{KI} | 0,55 | 0,55 | – | Isentropická účinnost komprese |
| N_{KM} | 1,46 | 1,66 | – | Minimální počet stupňů kompresoru |
| N_K | 5 | 5 | – | Skutečný počet stupňů kompresoru |
| T_{KV} | 48,62 | 54,35 | °C | Teplota vodíku na výtlaku kompresoru |
| p_{KP} | 386,69 | 373,41 | bar | Průměrný tlak vodíku při kompresi |
| T_{KP} | 28,31 | 31,18 | °C | Průměrná teplota vodíku při kompresi |
| Z | 1,243 | 1,232 | – | Kompresibilitní faktor |
| m_{S1} | 4,27 | 4,27 | kg | Spotřeba vodíku jednoho vozidla |
| t_P | 10 | 10 | min | Doba plnění akumulátoru – Kaskády |
| \dot{m}_K | 7,11 | 7,11 | g/s | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| M_{H_2} | 2 | 2 | g/mol | Molární hmotnost molekuly vodíku |
| \dot{n}_K | 3,56 | 3,56 | mol/s | Tok látkového množství vodíku kompresorem |
| R | 8,314 | 8,314 | J/(mol·K) | Molární plynová konstanta |
| P_{KMB} | 26,12 | 29,54 | kW | Min. mech. výkon komp. za běžných podm. |
| η_E | 0,95 | 0,95 | – | Účinnost elektromotoru |
| P_{OMB} | 27,50 | 31,10 | kW | El. příkon elektromotoru za běžných podm. |

13 VYSOKOTLAKÝ AKUMULÁTOR

Návrh vysokotlakého akumulátoru (dále jen akumulátor) spočívá v určení jeho minimálního objemu, případně kapacity – stejně jako je tomu u zásobníku. Velikost akumulátoru je přitom závislá na volbě konkrétní koncepce. Pojem „akumulátor“ je zde používán jako zastřešující pojem pro jednoduchý akumulátor (Booster koncepce), buffer (Buffer koncepce) a kaskádu, tlakových nádob (Kaskáda koncepce). Jak již bylo zmíněno, v případě Booster koncepce není přítomnost akumulátoru nutná, pomáhá však kompenzovat tlakové pulzace vyvolané periodickým chodem nejčastěji využívaných typů kompresorů. Kapacita akumulátoru nehraje v tomto případě významnou roli a hlavním parametrem je tlaková odolnost. Pro účely ekonomického zhodnocení proto byly objem i kapacita akumulátoru určeny výběrem nejmenšího dohledaného modelu z nabídky výrobců v sekci „Hydrogen tanks“ databáze Hyfindr [175]. Potřebné objemy a kapacity akumulátoru u zbylých dvou koncepcí byly určeny výpočtem. Platí přitom, že potřebný objem je nezávislý na variantě dodávek vodíku.

13.1 Návrhové parametry

Teplota okolí

Při dimenzování byla využita horní mezní teplota okolí 40 °C, která je uvažována jako shodná s teplotou vodíku v akumulátoru, přičemž opět odpovídá nejméně příznivým podmínkám, a tedy nejvyšší požadované velikosti nádoby. Na rozdíl od zásobníku však nepředpokládáme významnější změny teplot mezi jeho dotlakováním a plněním dalšího vozidla. V případě potřeby je nicméně možné regulovat tlak v akumulátoru na konstantní hodnotu. Vliv této změny teplot byl proto při výpočtu zanedbán. Teplota při běžném provozu byla opět uvažována 8 °C.

Hmotnostní toky

Hmotnostní tok vodíku do akumulátoru je roven hmotnostnímu toku vodíku kompresorem. Ten činí v případě Booster koncepce 21,33 g/s, v případě Buffer a Kaskáda koncepce pak 7,82 g/s. Připomeňme, že tyto hodnoty byly určeny při dimenzování kompresorů. Hmotnostní tok vodíku z akumulátoru do plnicího stojanu a následně do vozidla je pak pro všechny koncepce zvolen na úrovni 21,33 g/s pro shodnou dobu tankování při všech koncepcích. Rozdíl v hmotnostním toku do a z akumulátoru musí být pokryt jeho užitečnou kapacitou. Tok vodíku z a do akumulátoru probíhá při plnění vozidla současně, po dotankování zůstává pouze tok do akumulátoru, a to až do okamžiku dosažení jmenovitého tlaku [150].

Tlaky a provedení akumulátoru

Užitečná kapacita je dána jmenovitým a dolním mezním tlakem vodíku v akumulátoru. V případě Buffer koncepce tyto hodnoty činí 900 bar a 760 bar. V případě Kaskáda koncepce tyto hodnoty volíme, jediným omezením je přitom dolní mezní tlak vodíku v tlakové nádobě s nejvyšším tlakem, který by pro úplné naplnění nádrže vozidla neměl podkročit 760 bar. Běžnou praxí je využití tří kaskádově zapojených tlakových nádob. Ty jsou při plnění vozidla vyprazdňovány postupně – od té s nejnižším jmenovitým tlakem, po tu s nejvyšším. Jak již bylo uvedeno, dotlakování nádob kompresorem po dokončení plnění vozidla naopak probíhá od té s nejvyšším jmenovitým tlakem po tu s nejnižším [150].

Volba tlaků v jednotlivých nádobách je otázkou optimalizace. Hodnoty uvedené v tab. 13.1 byly zvoleny dle běžně dostupných tlakových úrovní s přihlédnutím k doporučení uvedeném ve zdroji [167]. Tlaky v nádrži vozidla na konci plnění z dané tlakové nádoby akumulátoru byly pro zjednodušení výpočtu zvoleny napevno a to tak, aby byl zaručen dostatečný tlakový rozdíl mezi tlakem nádoby a nádrže i ke konci plnění. Tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla pro případ dimenzování činí 140,4 bar, pro případ běžného provozu pak 179,7 bar.

Tyto hodnoty odpovídají potřebě, resp. spotřebě vodíku jednoho vozidla. Rozdíl tlaků je považován za zcela dostatečný pro dosažení požadované rychlosti plnění vozidla, kontrola proto nebyla považována za nutnou a nebyla provedena.

Tab. 13.1 Mezní tlaky vodíku ve třech nádobách akumulátoru a v nádrži vozidla při plnění.

| Fáze | Vozidlo | | Akumulátor | | Jednotka | Popis |
|------|---------|-----|------------|-------|----------|--|
| | pVZ | pVK | pAJM | pAMIN | | |
| 1. | 140,4 | 350 | 500 | 400 | bar | Plnění vozidla z první nádoby akumulátoru |
| 2. | 350 | 550 | 700 | 600 | bar | Plnění vozidla z druhé nádoby akumulátoru |
| 3. | 550 | 700 | 900 | 760 | bar | Plnění vozidla ze třetí nádoby akumulátoru |

Pozn. Hodnoty platné pro dimenzování. Při běžném provozu uvažujeme pouze odlišnou velikost pVZ v první fázi plnění, kdy činí 179,7 bar, ostatní hodnoty nejsou ovlivněny.

| | | | |
|-------|-------|---|---|
| pVZ | [bar] | – | Tlak vodíku v nádrži vozidla na začátku fáze plnění |
| pVK | [bar] | – | Tlak vodíku v nádrži vozidla na konci fáze plnění |
| pAJM | [bar] | – | Jmenovitý tlak vodíku v akumulátoru |
| pAMIN | [bar] | – | Dolní mezní tlak vodíku v akumulátoru |

13.2 Postup výpočtu

Buffer koncepce

Nejprve stanovíme dobu, po kterou probíhá současně plnění akumulátoru a tankování vozidla t_{PT} dle rovnice 10.30. Tato doba je odlišná od doby plnění akumulátoru i udané doby plnění nádrže vozidla, u které předpokládáme, že platí pro prázdnou nádrž.

$$t_{PT} = \frac{m_{P1} \cdot 1000}{\dot{m}_T} \quad (10.30)$$

| | | | |
|-------------|-------|---|--|
| t_{PT} | [s] | – | Doba současného plnění a vyprazdňování akumulátoru – tankování |
| m_{P1} | [kg] | – | Potřeba vodíku jednoho vozidla |
| \dot{m}_T | [g/s] | – | Hmotnostní tok vodíku při tankování – do nádrže vozidla |

Následně vypočítáme, jakou část musí pokrýt kapacita akumulátoru dle rovnice 10.31:

$$m_{AUM} = \frac{\dot{m}_T - \dot{m}_K}{1000} \cdot t_{PT} \quad (10.31)$$

| | | | |
|-------------|-------|---|--|
| m_{AUM} | [kg] | – | Minimální užitečná kapacita akumulátoru |
| \dot{m}_T | [g/s] | – | Hmotnostní tok vodíku při tankování – do nádrže vozidla |
| \dot{m}_K | [g/s] | – | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| t_{PT} | [s] | – | Doba současného plnění a vyprazdňování akumulátoru – tankování |

Dále již můžeme vypočítat minimální objem akumulátoru V_{AM} dle rovnice 10.32:

$$V_{AM} = \frac{m_{AUM}}{\rho_{AJMH} - \rho_{AMINH}} \quad (10.32)$$

| | | | |
|----------------|----------------------|---|---|
| V_{AM} | [m ³] | – | Minimální objem akumulátoru |
| m_{AUM} | [kg] | – | Minimální užitečná kapacita akumulátoru |
| ρ_{AJMH} | [kg/m ³] | – | Hustota vod. v ak. při jmenovitém tlaku a horní mezní návrhové teplotě |
| ρ_{AMINH} | [kg/m ³] | – | Hustota vod. v ak. při dolním mezním tlaku a horní mezní návrhové teplotě |

Tím je dimenzování akumulátoru dokončeno. Běžně vyráběné velikosti tlakových nádob se jmenovitým tlakem 900 bar nebyly dohledány. Hodnoty tedy nebylo možné srovnat s nabídkou výrobců. Vzhledem k nízkým objemům nebylo provedeno ani zaokrouhlení těchto hodnot, jelikož by do výsledku mohlo vnést významnější chybu. Pro potřeby odhadu kapitálových nákladů ještě určíme skutečnou kapacitu tohoto akumulátoru m_A dle rovnice 10.33. Uvažujeme přitom tedy minimální objem akumulátoru. Hustotu vodíku v tomto případě určujeme za jmenovitého tlaku a normální teploty.

$$m_A = \rho_{AJMN} \cdot V_{AM} \quad (10.33)$$

m_A [kg] – Skutečná kapacita akumulátoru
 ρ_{AJMN} [kg/m³] – Hustota vodíku v akumulátoru při jmenovitém tlaku a normální teplotě
 V_{AM} [m³] – Minimální objem akumulátoru

Kaskáda koncepce

Nejprve vypočítáme tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla. Pro běžný provoz jsme tuto hodnotu určili již dříve v části „Běžný provoz kompresoru“ kap. 12.3 a to výpočtem dle rovnic 10.22 až 10.25. Dle stejných rovnic můžeme vypočítat i tlak zbývajících množství vodíku v nádrži pro účely dimenzování. Rozdíl je pouze v množství zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla – v případě dimenzování uvažujeme s potřebou vodíku (4,69 kg) oproti spotřebě vodíku (4,27 kg) při běžném provozu. Postup výpočtu zde proto nebude znovu uveden, vypočítané tlaky jsou uvedeny v tab. 13.1 – viz její popis.

V případě, že je množství vodíku v nádrži ještě nižší, než v případě dimenzování může dojít ke třem různým scénářům, které jsou platné i pro Buffer koncepci: Zprv, kapacita akumulátoru je naddimenzovaná do té míry, že i při vyšší vydaném množství vodíku neklesne tlak v akumulátoru pod dolní mezní tlak. Jediným důsledkem je pak delší doba běhu kompresoru po ukončení plnění pro doplnění vyššího odebraného množství a potenciálně také mírně delší čas plnění vozidla kvůli nižší tlakové diferenci. Zadrž, při poklesu tlaku v akumulátoru na dolní mezní tlak omezí řídicí elektronika hmotnostní tok do nádrže vozidla tak, aby byl shodný s hmotnostním tokem vodíku kompresorem. Důsledkem je pak delší čas plnění vozidla, ale také dosažení jmenovitého tlaku v nádrži vozidla a tím i jmenovitého dojezdu. Ve třetím případě pak dojde k poklesu tlaku v akumulátoru pod dolní mezní tlak a tím i k neúplnému naplnění nádrže vozidla a snížení dojezdu. Této variantě je vhodné zabránit.

V následujícím kroku vypočítáme množství vodíku, které je třeba přesunout do nádrže vozidla z první tlakové nádoby akumulátoru m_{T1} dle rovnice 10.34:

$$m_{T1} = V_V \cdot (\rho_{VK1} - \rho_{VZ1}) \quad (10.34)$$

m_{T1} [kg] – Množství vodíku tankované do vozidla při první fázi plnění
 V_V [m³] – Objem nádrže vozidla
 ρ_{VK1} [kg/m³] – Hustota vodíku v nádrži vozidla na konci první fáze plnění
 ρ_{VZ1} [kg/m³] – Hustota vodíku v nádrži vozidla na začátku první fáze plnění

Poměrné množství vodíku, které je třeba pokrýt kapacitou akumulátoru je stejné, jako v případě Buffer koncepce. Minimální užitečnou kapacitu první tlakové nádoby v akumulátoru m_{AUM1} tedy vypočítáme dle rovnice 10.35:

$$m_{AUM1} = \frac{m_{AUM}}{m_{P1}} \cdot m_{T1} \quad (10.35)$$

m_{AUM1} [kg] – Minimální užitečná kapacita první tlakové nádoby akumulátoru

- m_{AUM} [kg] – Minimální užitečná kapacita akumulátoru – viz Buffer koncepce
 m_{P1} [kg] – Potřeba vodíku jednoho vozidla
 m_{T1} [kg] – Množství vodíku tankované do vozidla při první fázi plnění

Dále již určíme minimální objem první tlakové nádoby akumulátoru V_{AM1} dle rovnice 10.36:

$$V_{AM1} = \frac{m_{AUM1}}{\rho_{AJMH1} - \rho_{AMINH1}} \quad (10.36)$$

- V_{AM1} [m³] – Minimální objem první tlakové nádoby akumulátoru
 m_{AUM1} [kg] – Minimální užitečná kapacita první tlakové nádoby akumulátoru
 ρ_{AJMH1} [kg/m³] – Hust. vod. v první tl. n. ak. při jm. tlaku a horní mezní návrhové teplotě
 ρ_{AMINH1} [kg/m³] – Hust. vod. v první tl. n. ak. při dolním mez. tlaku a horní mezní návrh. tep.

Tím je dimenzování první tlakové nádoby akumulátoru dokončeno. Ze stejných důvodů jako u Buffer koncepce pracujeme i nadále s hodnotou minimálního objemu. Obdobně také pro potřeby odhadu kapitálových nákladů určíme skutečnou kapacitu tohoto akumulátoru m_{A1} dle rovnice 10.37. Hustotu vodíku opět určíme za jmenovitého tlaku a normální teploty.

$$m_{A1} = \rho_{AJMN1} \cdot V_{AM1} \quad (10.37)$$

- m_{A1} [kg] – Skutečná kapacita první tlakové nádoby akumulátoru
 ρ_{AJMN1} [kg/m³] – Hust. vod. v první tl. n. ak. při jmenovitém tlaku a normální teplotě
 V_{AM1} [m³] – Minimální objem první tlakové nádoby akumulátoru

Výpočet dalších tlakových nádob akumulátoru pro účely dimenzování, stejně jako výpočet všech tlakových nádob akumulátoru při běžném provozu pak probíhá zcela obdobně a jeho postup zde proto není uveden. Je vhodné poznamenat, že rozdíl mezi dimenzováním a běžným provozem se projevuje pouze v minimální užitečné kapacitě první tlakové nádoby a navázaných veličinách. Jednou z těchto veličin je i střední tlak vodíku v celém akumulátoru, který odpovídá běžnému tlaku na výtlaku kompresoru při využití Kaskáda koncepce.

Běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} tedy určíme následovně. Nejprve určíme rozdíly tlaků vodíku Δp_{A1} , Δp_{A2} , Δp_{A3} , v tlakových nádobách akumulátoru na začátku a konci plnění z nich. Pro případ první tlakové nádoby dle rovnice 10.38, pro ostatní nádoby obdobně.

$$\Delta p_{A1} = p_{AJM1} - p_{AMIN1} \quad (10.38)$$

- Δp_{A1} [bar] – Rozdíl jmenovitého a dolního mezního tlaku v první tl. n. akumulátoru
 p_{AJM1} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v první tl. nádobě akumulátoru
 p_{AMIN1} [bar] – Dolní mezní tlak vodíku v první tl. nádobě akumulátoru

Dále již vypočítáme střední tlaky vodíku ve všech tlakových nádobách akumulátoru p_{AS1} , p_{AS2} , p_{AS3} – pro případ první tlakové nádoby dle rovnice 10.39, pro ostatní nádoby obdobně.

$$p_{AS1} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{AJM1}}\right)^{\left(\frac{p_{AJM1}}{\Delta p_{A1}}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{AMIN1}}\right)^{-\left(\frac{p_{AMIN1}}{\Delta p_{A1}}\right)}} \quad (10.39)$$

- p_{AS1} [bar] – Střední tlak vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru během plnění
 p_{AJM1} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v první tl. nádobě akumulátoru
 Δp_{A1} [bar] – Rozdíl jmenovitého a dolního mezního tlaku v první tl. n. akumulátoru
 p_{AMIN1} [bar] – Dolní mezní tlak vodíku v první tl. nádobě akumulátoru

Následně můžeme určit běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} jako vážený průměr těchto středních tlaků dle rovnice 10.40:

$$p_{KVB} = \frac{p_{AS1} \cdot m_{T1} + p_{AS2} \cdot m_{T2} + p_{AS3} \cdot m_{T3}}{m_{T1} + m_{T2} + m_{T3}} \quad (10.40)$$

- p_{KVB} [bar] – Běžný tlak na výtlaku kompresoru – Kaskáda koncepce
 p_{AS1} [bar] – Střední tlak vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru během plnění z ní
 m_{T1} [kg] – Množství vodíku tankované do vozidla při první fázi plnění
 p_{AS2} [bar] – Střední tlak vodíku v druhé tlakové nádobě akumulátoru během plnění z ní
 m_{T2} [kg] – Množství vodíku tankované do vozidla při druhé fázi plnění
 p_{AS3} [bar] – Střední tlak vodíku ve třetí tlakové nádobě akumulátoru během plnění z ní
 m_{T3} [kg] – Množství vodíku tankované do vozidla při třetí fázi plnění

13.3 Výpočet a vypočítané hodnoty

Booster koncepce

V případě Booster koncepce nehraje velikost nádoby významnou roli. Objem a minimální kapacita akumulátoru proto byly určeny výběrem konkrétního modelu, který splňuje požadavky z nabídky výrobců v databázi Hyfindr [175]. Hodnoty jsou pro přehled uvedeny v tab. 13.2.

Tab. 13.2 Objem a kapacita akumulátoru – Booster koncepce.

| Veličina | Booster | Jednotka | Popis |
|----------|---------|----------|-------------------------------|
| V_A | 0,05 | m^3 | Objem akumulátoru |
| m_A | 2,10 | kg | Skutečná kapacita akumulátoru |

Buffer koncepce

Nejprve stanovíme dobu, po kterou probíhá současně plnění akumulátoru a tankování vozidla t_{PT} dle rovnice 10.30:

$$t_{PT} = \frac{m_{P1} \cdot 1000}{\dot{m}_T} = \frac{4,69 \cdot 1000}{21,33} = 220 \text{ s}$$

Následně vypočítáme, jakou část musí pokrýt kapacita akumulátoru dle rovnice 10.31:

$$m_{AUM} = \frac{\dot{m}_T - \dot{m}_K}{1000} \cdot t_{PT} = \frac{21,33 - 7,82}{1000} \cdot 220 = 2,97 \text{ kg}$$

Dále již můžeme vypočítat minimální objem akumulátoru V_{AM} dle rovnice 10.32:

$$V_{AM} = \frac{m_{AUM}}{\rho_{AJMH} - \rho_{AMINH}} = \frac{2,97}{44,84 - 40,09} = 0,63 \text{ m}^3$$

Na závěr ještě určíme skutečnou kapacitu tohoto akumulátoru m_A dle rovnice 10.33:

$$m_A = \rho_{AJMN} \cdot V_{AM} = 48,92 \cdot 0,63 = 30,61 \text{ kg}$$

Vypočítané hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny také v tab. 13.3. Jak již bylo zmíněno, hodnoty nejsou závislé na periodě dodávek vodíku – pro obě varianty jsou shodné.

Tab. 13.3 Objem a kapacita akumulátoru – Buffer koncepce.

| Veličina | Buffer | Jednotka | Popis |
|----------------|--------|-------------------|---|
| p_{AJM} | 900 | bar | Jmenovitý tlak vodíku v akumulátoru |
| p_{AMIN} | 760 | bar | Dolní mezní tlak vodíku v akumulátoru |
| m_{P1} | 4,69 | kg | Potřeba vodíku jednoho vozidla |
| \dot{m}_K | 7,82 | g/s | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| \dot{m}_T | 21,33 | g/s | Hmotnostní tok vodíku při tankování – do nádrže vozidla |
| t_{PT} | 220 | s | Doba současného plnění a vyprazdňování akumulátoru |
| m_{AUM} | 2,97 | kg | Minimální užitečná kapacita akumulátoru |
| T_{KS} | 40 | °C | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| ρ_{AJMH} | 44,84 | kg/m ³ | Hustota vod. v ak. při jm. tlaku a horní mezní návrh. tep. |
| ρ_{AMINH} | 40,09 | kg/m ³ | Hustota vod. v ak. při dol. mez. tlaku a horní mez. návrh. tep. |
| ρ_{AJMN} | 48,92 | kg/m ³ | Hustota vodíku v ak. při jmenovitém tlaku a normální teplotě |
| V_{AM} | 0,63 | m ³ | Minimální objem akumulátoru |
| m_A | 30,61 | kg | Skutečná kapacita akumulátoru |

Kaskáda koncepce

Ukázkový výpočet je proveden pro dimenzování první tlakové nádoby akumulátoru. Nejprve vypočítáme množství vodíku, které je třeba přesunout do nádrže vozidla z první tlakové nádoby akumulátoru m_{T1} dle rovnice 10.34:

$$m_{T1} = V_V \cdot (\rho_{VK1} - \rho_{VZ1})$$

$$m_{T1} = 0,1535 \cdot (24,5 - 11,12) = 2,05 \text{ kg}$$

V dalším kroku vypočítáme minimální užitečnou kapacitu první tlakové nádoby v akumulátoru m_{AUM1} dle rovnice 10.35:

$$m_{AUM1} = \frac{m_{AUM}}{m_{P1}} \cdot m_{T1} = \frac{2,97}{4,69} \cdot 2,05 = 1,30 \text{ kg}$$

Dále již určíme minimální objem první tlakové nádoby akumulátoru V_{AM1} dle rovnice 10.36:

$$V_{AM1} = \frac{m_{AUM1}}{\rho_{AJMH1} - \rho_{AMINH1}} = \frac{1,30}{29,65 - 24,92} = 0,28 \text{ m}^3$$

Na závěr ještě určíme skutečnou kapacitu tohoto akumulátoru m_A dle rovnice 10.37:

$$m_{A1} = \rho_{AJMN1} \cdot V_{AM1} = 32,97 \cdot 0,28 = 9,07 \text{ kg}$$

V následující části je uveden vzorový výpočet běžného tlaku na výtlačku kompresoru p_{KVB} . Nejprve určíme rozdíly tlaků vodíku Δp_{A1} , Δp_{A2} , Δp_{A3} dle rovnice 10.38:

$$\Delta p_{A1} = p_{AZ1} - p_{AK1} = 500 - 400 = 100 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{A2} = p_{AZ2} - p_{AK2} = 700 - 600 = 100 \text{ bar}$$

$$\Delta p_{A3} = p_{AZ3} - p_{AK3} = 900 - 760 = 140 \text{ bar}$$

Dále vypočítáme střední tlaky vodíku ve všech tlakových nádobách akumulátoru p_{AS1} , p_{AS2} , p_{AS3} dle rovnice 10.39:

$$p_{AS1} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{p_{AZ1}}\right)^{\left(\frac{p_{AZ1}}{\Delta p_{A1}}\right)} \cdot \left(\frac{1}{p_{AK1}}\right)^{-\left(\frac{p_{AK1}}{\Delta p_{A1}}\right)}}$$

$$p_{AS1} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{500}\right)^{\left(\frac{500}{100}\right)} \cdot \left(\frac{1}{400}\right)^{-\left(\frac{400}{100}\right)}} = 449,07 \text{ bar}$$

$$p_{AS2} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{700}\right)^{\left(\frac{700}{100}\right)} \cdot \left(\frac{1}{600}\right)^{-\left(\frac{600}{100}\right)}} = 649,36 \text{ bar}$$

$$p_{AS3} = \frac{1}{e \cdot \left(\frac{1}{900}\right)^{\left(\frac{900}{140}\right)} \cdot \left(\frac{1}{760}\right)^{-\left(\frac{760}{140}\right)}} = 829,01 \text{ bar}$$

Následně již můžeme určit běžný tlak na výtlaku kompresoru p_{KVB} jako vážený průměr těchto středních tlaků dle rovnice 10.40. Pozor, hmotnostní toky v tomto vzorci jsou hodnoty za běžného provozu. Odlišná je nicméně pouze první hodnota.

$$p_{KVB} = \frac{p_{AS1} \cdot m_{T1B} + p_{AS2} \cdot m_{T2B} + p_{AS3} \cdot m_{T3B}}{m_{T1B} + m_{T2B} + m_{T3B}}$$

$$p_{KVB} = \frac{449,07 \cdot 1,63 + 649,36 \cdot 1,54 + 829,01 \cdot 0,97}{1,63 + 1,54 + 0,97}$$

$$p_{KVB} = 612,67 \text{ bar}$$

Tab. 13.4 Tlak zbývajícího množství vodíku ve vozidle při dimenzování – Kaskáda koncepce.

| Veličina | Kaskáda | Jednotka | Popis |
|--------------|---------|-------------------|---|
| m_V | 6,4 | kg | Kapacita nádrže ve vozidle |
| ρ_{VJM} | 41,69 | kg/m ³ | Hustota vod. v nádrži voz. při jm. tlaku a normální teplotě |
| V_V | 0,1535 | m ³ | Objem nádrže vozidla |
| m_{P1} | 4,69 | kg | Denní potřeba vodíku jednoho vozidla |
| m_{VZ} | 1,71 | kg | Zbývající množství vodíku v nádrži vozidla |
| ρ_{VZ} | 11,1173 | kg/m ³ | Hustota zbývajícího množství vodíku v nádrži vozidla |
| p_{VZ} | 140,4 | bar | Tlak zbývajícího množství vodíku v nádrži vozidla |

Tab. 13.5 Dimenzování objemů a kapacit tlakových nádob akumulátoru – Kaskáda koncepce.

| Veličina | N1 | N2 | N3 | Jednotka | Popis |
|-----------------|--------|--------|--------|----------|--|
| V_V | 0,1535 | 0,1535 | 0,1535 | m^3 | Objem nádrže vozidla |
| ρ_{VZX} | 11,12 | 24,5 | 34,56 | kg/m^3 | Hust. vod. v nádrži voz. na zač. X. fáze |
| ρ_{VKX} | 24,5 | 34,56 | 40,87 | kg/m^3 | Hust. vod. v nádrži voz. na konci X. fáze |
| m_{TX} | 2,05 | 1,54 | 0,97 | kg | Množ. vod. tankované do voz. při X. fázi |
| m_{AUMX} | 1,30 | 0,98 | 0,61 | kg | Min. užit. kapacita X. tlakové nádoby ak. |
| ρ_{AJMHX} | 29,65 | 37,88 | 44,84 | kg/m^3 | Hust. vod. v X. tl. n. ak. při p_{AJM} a T_{KS} |
| ρ_{AMINHX} | 24,92 | 33,95 | 40,09 | kg/m^3 | Hust. vod. v X. tl. n. ak. při p_{AMIN} a T_{KS} |
| ρ_{AJMNX} | 32,97 | 41,69 | 48,92 | kg/m^3 | Hust. vod. v X. tl. n. ak. při p_{AJM} a T_N |
| V_{AMX} | 0,28 | 0,25 | 0,13 | m^3 | Minimální objem X. tlakové nádoby ak. |
| m_{AX} | 9,07 | 10,38 | 6,32 | kg | Skutečná kapacita X. tlakové nádoby ak. |

Pozn. Čísla nádob (N1–3) odpovídají fázím plnění vozidla, index X u označení proměnných je zástupný znak pro číslo nádoby, resp. fázi plnění.

Tab. 13.6 Tankované množství vodíku a tlak vodíku na výtlaku kompresoru při běžném provozu – Kaskáda koncepce.

| Veličina | N1 | N2 | N3 | Jednotka | Popis |
|-----------------|--------|--------|--------|----------|--|
| V_V | 0,1535 | 0,1535 | 0,1535 | m^3 | Objem nádrže vozidla |
| ρ_{VZX} | 13,9 | 24,5 | 34,56 | kg/m^3 | Hust. vod. v nádrži voz. na zač. X. fáze |
| ρ_{VKX} | 24,5 | 34,56 | 40,87 | kg/m^3 | Hust. vod. v nádrži voz. na konci X. fáze |
| m_{TX} | 1,63 | 1,54 | 0,97 | kg | Množ. vod. tankované do voz. při X. fázi |
| Δp_{AX} | 100 | 100 | 140 | bar | Rozdíl tlaků mezi p_{AJM} a p_{AMIN} při X. fázi |
| p_{ASX} | 449,07 | 649,36 | 829,01 | bar | Střední tlak vodíku v ak. během X. fáze |
| p_{KVB} | | 612,67 | | bar | Běžný tlak na výtlaku kompresoru |

Pozn. Čísla nádob (N1–3) odpovídají fázím plnění vozidla, index X u označení proměnných je zástupný znak pro číslo nádoby, resp. fázi plnění.

14 CHLADÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Cílem návrhu chladicího zařízení je stanovení potřebného chladicího výkonu. Hlavními faktory jsou přitom hmotnostní tok vodíku při tankování a jeho teplota na vstupu. Vzhledem k jedinému výdejnímu stojanu je uvažováno pouze jedno chladicí zařízení, opět jsou proto kladeny vysoké nároky na spolehlivost. Jeho výpočet je shodný pro všechny koncepce – jediným rozdílem je tlak vodíku, ten má nicméně na rozdíl entalpií a tím i chladicí výkon zcela minimální vliv. Z toho důvodu byl také využit zjednodušený postup výpočtu dle zdroje [156]. Jak bylo dříve zmíněno, existují dvě základní koncepce chladicího zařízení: On demand a Thermal mass. V souladu s běžnou praxí pro malé plnicí stanice byla zvolena Thermal mass koncepce s nízkým výkonem chladicí jednotky a velkým hliníkovým blokem, sloužícím jako akumulátor tepla. Ekonomická optimalizace jejich velikostí nebyla provedena.

14.1 Návrhové parametry

Počet vozidel

Nejvyšší počet plněných vozidle byl omezen na 6/hod. Tato hodnota v případě Buffer a Kaskáda koncepce vychází z doby plnění akumulátoru a nepřináší tedy nové omezení. V případě Booster koncepce je tato hodnota limitující, alternativou je nicméně jen využití koncepce On demand s významně vyššími nároky na elektrickou přípojku. Zvolená hodnota by měla být dostatečná pro vychlazení hliníkového bloku zpět na původní teplotu v dostupném čase mezi plněními. Toto tvrzení však nebylo možno ověřit z důvodu nedostupnosti zdroje [176].

Teplota vodíku na výstupu

Teplota vodíku na výstupu z chladicího zařízení byla zvolena -40 °C v souladu s normou ČSN ISO 19880-1 pro umožnění maximální rychlosti plnění [168]. Horní hranice, která nesmí být při plnění překročena činí -33 °C . Dovolené oteplení vodíku je tedy 7 °C . Pro účely výpočtu minimální hmotnosti hliníkového bloku však bylo zvoleno konzervativněji na 5 °C a je uvažováno shodné s dovoleným oteplením bloku.

14.2 Postup výpočtu

Minimální chladicí výkon chladicí jednotky P_{CJM} vypočítáme dle rovnice 10.41 [156]:

$$P_{CJM} = \frac{N_V \cdot m_{P1}}{3600} \cdot c_{PH2} \cdot (T_{KS} - T_C) \quad (10.41)$$

| | | |
|-----------------------|---|---|
| P_{CJM} [kW] | – | Minimální chladicí výkon chladicí jednotky |
| N_V [–] | – | Počet plněných vozidel za jednu hodinu |
| m_{P1} [kg] | – | Denní potřeba vodíku jednoho vozidla |
| c_{PH2} [kJ/(kg·K)] | – | Měrná tepelná kapacita vodíku |
| T_{KS} [°C] | – | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| T_C [°C] | – | Teplota vodíku na výstupu z chladicího zařízení |

Minimální hmotnost hliníkového bloku m_{CBM} pak vypočítáme dle rovnice 10.42 [156]:

$$m_{CBM} = \frac{m_{P1} \cdot c_{PH2} \cdot (T_{KS} - T_C)}{c_{PAL} \cdot \Delta T_C} \quad (10.42)$$

| | | |
|-----------------------|---|--------------------------------------|
| m_{CBM} [kg] | – | Minimální hmotnost hliníkového bloku |
| m_{P1} [kg] | – | Denní potřeba vodíku jednoho vozidla |
| c_{PH2} [kJ/(kg·K)] | – | Měrná tepelná kapacita vodíku |

| | | |
|--------------|-------------|---|
| T_{KS} | [°C] | – Teplota vodíku na sání kompresoru |
| T_C | [°C] | – Teplota vodíku na výstupu z chladicího zařízení |
| c_{PAL} | [kJ/(kg·K)] | – Měrná tepelná kapacita hliníku |
| ΔT_C | [°C] | – Dovolené oteplení hliníkového bloku |

Tím je dimenzování chladicího zařízení složeného z chladicí jednotky a hliníkového bloku dokončeno. Ekonomika běžného provozu bude vyhodnocena jiným způsobem než v případě předchozích komponent na základě hodnot z dimenzování.

14.3 Výpočet a vypočítané hodnoty

Nejprve vypočítáme minimální chladicí výkon chladicí jednotky P_{CJM} dle rovnice 10.41. Použitá hodnota c_{PH_2} pochází ze zdroje [156].

$$P_{CJM} = \frac{N_V \cdot m_{P1}}{3600} \cdot c_{PH_2} \cdot (T_{KS} - T_C)$$

$$P_{CJM} = \frac{6 \cdot 4,69}{3600} \cdot 14,8 \cdot (40 - (-40)) = 9,26 \text{ kW}$$

Následně určíme minimální hmotnost hliníkového bloku m_{CBM} dle rovnice 10.42. Použitá hodnota c_{PAL} opět pochází ze zdroje [156].

$$m_{CBM} = \frac{m_{P1} \cdot c_{PH_2} \cdot (T_{KS} - T_C)}{c_{PAL} \cdot \Delta T_C}$$

$$m_{CBM} = \frac{4,69 \cdot 14,8 \cdot (40 - (-40))}{0,837 \cdot 5} = 1327,82 \text{ kg}$$

Vypočítané hodnoty je následně třeba porovnat s nabídkou výrobců. Informace o hmotnosti hliníkového bloku, nebo způsobu dimenzování chladicího zařízení však nebyly u dohledaných zařízení uvedeny. Pro účely odhadu kapitálových nákladů proto byly použity vypočítané hodnoty, zaokrouhlené nahoru na nejbližší „hezkou“ hodnotu. Tyto proměnné budou nazývány jako chladicí výkon chladicí jednotky P_{CJ} a hmotnost hliníkového bloku m_{CB} .

$$P_{CJ} = 10 \text{ kW} \quad m_{CB} = 1400 \text{ kg}$$

Zadané a vypočtené hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v tab. 14.1.

Tab. 14.1 Dimenzované hodnoty chladícího zařízení.

| Veličina | Dimenzování | Jednotka | Popis |
|--------------|-------------|-----------|---|
| N_V | 6 | – | Počet plněných vozidel za jednu hodinu |
| m_{P1} | 4,69 | kg | Denní potřeba vodíku jednoho vozidla |
| c_{PH2} | 14,8 | kJ/(kg·K) | Měrná tepelná kapacita vodíku |
| T_{KS} | 40 | °C | Teplota vodíku na sání kompresoru |
| T_C | -40 | °C | Teplota vodíku na výstupu z chladícího zařízení |
| P_{CJM} | 9,26 | kW | Minimální chladící výkon chladící jednotky |
| P_{CJ} | 10 | kW | Chladící výkon chladící jednotky |
| c_{PAL} | 0,837 | kJ/(kg·K) | Měrná tepelná kapacita hliníku |
| ΔT_C | 5 | °C | Dovolené oteplení hliníkového bloku |
| m_{CBM} | 1327,82 | kg | Minimální hmotnost hliníkového bloku |
| m_{CB} | 1400 | kg | Hmotnost hliníkového bloku |

15 EKONOMIKA VODÍKOVÉ PLNICÍ STANICE

Ekonomické zhodnocení navržených variant plnicí stanice je obtížnou disciplínou z hlediska dostupnosti informací o cenách jednotlivých komponent i samotné výstavby. Z toho důvodu nebylo možné provést vyčíslení kapitálových nákladů (CAPEX) – viz dále. Místo toho bylo provedeno pouze vyčíslení pořizovacích nákladů hlavních komponent, které mohou poskytnout jen obecnou představu o celkové ceně projektu. Z hlediska provozních nákladů (OPEX) – viz dále – pak byly vyhodnoceny pouze náklady hlavních komponent na údržbu a energie.

15.1 Definice a měny

Kapitálové náklady (CAPEX)

Kapitálové náklady jsou zpravidla jednorázové náklady na pořízení, údržbu – pokud vede k prodloužení životnosti, vylepšení, nebo obměnu majetku. V kontextu navrhované plnicí stanice se jedná o náklady na pořízení hlavních i vedlejších komponent, náklady na jejich instalaci, které mohou tvořit další významnou složku ceny a náklady na výstavbu – kromě samostatně uvedených nákladů na instalaci. S tím jsou spojené i náklady na projektování, návrh, přípravu, případný nákup pozemku a náklady na stavební řízení.

Provozní náklady (OPEX)

Provozní náklady jsou zpravidla pravidelné náklady na provoz a běžnou údržbu majetku. V kontextu navrhované stanice se jedná o náklady na nákup vodíku, běžnou údržbu, elektrickou energii, případný pronájem pozemku, daně, licence, pojištění a případné náklady spojené se zajištěním kapitálu – např. úvěrem.

Měny a uvedené ceny

Vztahy pro výpočet i přímo uvedené ceny komponent pochází z různých zdrojů a let a jsou zpravidla uvedeny v USD nebo EUR. Hlavní měnou výpočtu bylo proto zvoleno euro. Při převodu měn byl využit kurz 1 EUR = 1,11 USD, využitý v jednom ze zdrojů, ze kterého byla čerpána data [167] a kurz 1 EUR = 25,50 CZK, odpovídající dlouhodobému průměru. Uvedené ceny nebyly kompenzovány o inflaci z důvodu absence dat o inflaci v odvětví. Opačný vliv měl však souběžný pokles cen s nárůstem objemu produkce. Výsledný dopad všech činitelů je tak nejasný. Vzhledem k již provedeným zjednodušením však pravděpodobně není zásadní. Cena silové elektřiny byla po konzultaci s odborníkem z praxe zvolena 4 Kč/kWh.

15.2 Postup výpočtu

Zásobník

Měrné pořizovací náklady na vysokokapacitní tlakovou nádobu typu I se jmenovitým tlakem 200 bar byly stanoveny na 500 €/kg_{H2} na základě rozsahu uvedeného v dokumentu [177] tak, aby zároveň nepřesahovaly náklady na nádobu typu IV, určené dle zdroje [167]. Náklady na údržbu byly stanoveny na 2 % pořizovacích nákladů za rok v souladu s [167].

Kompresor

Pořizovací náklady na kompresor byly vypočteny dvěma nezávislými způsoby dle zdrojů [154] a [167]. V prvním případě na základě příkonu elektromotoru pro jeho pohon, ve druhém pak na základě maximálního hodinového průtoku vodíku kompresorem. Oba vztahy by měly být vhodné pro daný typ plnicí stanice a plnění vozidel na tlakové úrovni 700 bar, výsledky výpočtu

se však extrémně liší. Z toho důvodu byla využita střední hodnota. Náklady na údržbu byly stanoveny na 4 % pořizovacích nákladů za rok v souladu s [167], náklady na energie výpočtem. Nejprve vypočítáme jmenovitý příkon elektromotoru pro pohon kompresoru P_{0M} dle rovnice 10.15. Účinnost elektromotoru uvažujeme opět 95 % – viz kap. 12.2.1, jediný rozdíl tak spočívá v dosazení mechanického výkonu kompresoru P_K místo minimálního mech. výkonu P_{KM} .

Následně již určíme pořizovací náklady kompresoru PN_{K1} dle zdroje [154] – rovnice 10.43 a pořizovací náklady kompresoru PN_{K2} dle zdroje [167] – rovnice 10.44:

$$PN_{K1} = 62909,9 \cdot P_{0M}^{0,6038} \quad (10.43)$$

PN_{K1} [\$] – Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [154]
 P_{0M} [kW] – Jmenovitý příkon elektromotoru pro pohon kompresoru

$$PN_{K2} = 51901 \cdot \left(\frac{\dot{m}_K \cdot 3600}{1000} \right)^{0,65} \quad (10.44)$$

PN_{K2} [\$] – Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [167]
 \dot{m}_K [g/s] – Jmenovitý hmotnostní tok vodíku kompresorem

Skutečné pořizovací náklady kompresoru určíme jako aritmetický průměr těchto dvou hodnot a zároveň mezi sebou převedeme měny – viz rovnice 10.45. V tabulce výsledků je tato položka označena jako $Nákup_K$.

$$Nákup_K = \frac{PN_{K1} + PN_{K2}}{2 \cdot 1,11} \quad (10.45)$$

$Nákup_K$ [€] – Skutečné pořizovací náklady kompresoru
 PN_{K1} [\$] – Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [154]
 PN_{K2} [\$] – Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [167]

Náklady na údržbu byly stanoveny na 3,5 % pořizovacích nákladů ročně v souladu s [167]. Náklady na spotřebovanou elektrickou energii, v tabulce výsledků označené jako $Energie_K$, byly vypočteny dle rovnice 10.45:

$$Energie_K = \frac{4}{25,5} \cdot P_{0MB} \cdot \frac{t_P \cdot N_{VD} \cdot 250}{60} \quad (10.46)$$

$Energie_K$ [€/rok] – Roční náklady kompresoru na spotřebovanou elektrickou energii
 P_{0MB} [\$] – Elektrický příkon elektromotoru za běžných podmínek
 t_P [min] – Doba plnění vozidla / akumulátoru
 N_{VD} [-] – Počet plněných vozidel za jeden den

Akumulátor

Pořizovací náklady na vysokotlaký akumulátor – tlakovou nádobu typu IV byly určeny za využití vztahu uvedeného v dokumentu [167]. Náklady na údržbu byly uvažovány 3,5 % pořizovacích nákladů za rok v souladu se zdrojem [167].

Nejprve stanovíme měrné pořizovací náklady – označené jako $Cena_A$ – dle rovnice 10.47 [167]:

$$Cena_A = 343,06 \cdot e^{0,02005 \cdot \frac{P_{AJM}}{10}} \quad (10.47)$$

$Cena_A$ [€/kg_{H2}] – Měrné pořizovací náklady akumulátoru
 p_{AJM} [bar] – Jmenovitý tlak vodíku v akumulátoru

Skutečné pořizovací náklady akumulátoru – označené jako $Nákup_A$ – pak vypočítáme vynáso-
bením měrných nákladů – $Ceny_A$ – skutečnou kapacitou tlakové nádoby akumulátoru.

Chladicí zařízení

Pořizovací náklady jsou v případě chladicího zařízení rozděleny na dvě části – chladicí jednotku
a hliníkový blok, sloužící jako akumulátor chladu. Obě hodnoty byly určeny výpočtem za vy-
užití vztahu uvedeného ve zdroji [156]. Náklady na údržbu byly uvažovány ve výši 2 % poři-
zovacích nákladů za rok – v souladu s dokumentem [167]. Náklady na elektrickou energii pak
byly vypočteny za využití vztahů ze zdrojů [156] a [178].

Nejprve stanovíme pořizovací náklady na chladicí jednotku PN_C dle rovnice 10.48 a pořizovací
náklady hliníkového bloku PN_B dle rovnice 10.49 [156]:

$$PN_C = 14000 \cdot \left(\frac{28,43 \cdot P_{CJ}}{T_C + 273} \right)^{0,8579} \quad (10.48)$$

PN_C [\$] – Pořizovací náklady na chladicí jednotku
 P_{CJ} [kW] – Chladicí výkon chladicí jednotky
 T_C [°C] – Teplota vodíku na výstupu z chladicího zařízení

$$PN_B = 35000 \cdot \left(\frac{m_{CB}}{1000} \right)^{0,9} \quad (10.49)$$

PN_B [\$] – Pořizovací náklady na hliníkový blok
 m_{CB} [kg] – Hmotnost hliníkového bloku

Pořizovací náklady na chladicí zařízení – dále označené jako $Nákup_C$ – jsou pak součtem těchto
hodnot. Výpočet provedeme dle rovnice 10.50, kde je zároveň realizován převod měn:

$$Nákup_C = \frac{PN_C + PN_B}{1,11} \quad (10.50)$$

$Nákup_C$ [€] – Pořizovací náklady chladicího zařízení
 PN_C [\$] – Pořizovací náklady na chladicí jednotku
 PN_B [\$] – Pořizovací náklady na hliníkový blok

V dalším kroku pak vypočítáme chladicí faktor (COP_C – coefficient of performance for cooling)
chladicí jednotky dle rovnice 10.51 [156]. Rovnice je zapsána v podobě pro dimenzování – tedy
uvažuje teplotu okolí 40 °C. Stejná rovnice je však využita i pro výpočet běžného provozu, kdy
teplota okolí dosahuje pouze 8 °C.

$$COP_C = 1,6 \cdot e^{-0,018 \cdot T_{KS}} \quad (10.51)$$

COP_C [–] – Chladicí faktor chladicí jednotky
 T_{KS} [°C] – Teplota vodíku na sání kompresoru
 T_B [°C] – Běžná teplota (nahrazuje T_{KS} při běžném provozu)

Dále pak určíme měrnou energetickou náročnost chlazení E_{CM} dle rovnice 10.52 [156]. Rovnice
je zapsána v podobě pro běžný provoz. Výpočet pro dimenzování se neprovádí.

$$E_{CM} = \frac{0,3}{COP_C} + \left(\frac{25 \cdot \ln(T_B) - 21}{m_S} \right) \quad (10.52)$$

| | | |
|----------|-------------------------|--|
| E_{CM} | [kWh/kg _{H2}] | – Měrná energetická náročnost chlazení |
| COP_C | [°C] | – Chladicí faktor chladicí jednotky |
| T_B | [°C] | – Běžná teplota |
| m_S | [kg] | – Denní spotřeba vodíku |

Následně již můžeme vypočítat náklady na spotřebovanou elektrickou energii – opět označené jako Energie – dle rovnice 10.53:

$$Energie_c = \frac{4}{25,5} \cdot m_S \cdot 250 \cdot E_{CM} \quad (10.53)$$

| | | |
|-------------|-------------------------|--|
| $Energie_c$ | [€/rok] | – Náklady na spotřebovanou elektrickou energii |
| m_S | [kg] | – Denní spotřeba vodíku |
| E_{CM} | [kWh/kg _{H2}] | – Měrná energetická náročnost chlazení |

Pro účely dimenzování elektrické přípojky pak ještě určíme jmenovitý příkon chladicí jednotky P_{0c} za nejméně příznivých podmínek – teploty okolí 40 °C dle rovnice 10.54 [178]:

$$P_{0c} = \frac{P_{cJ}}{COP_C} \quad (10.54)$$

| | | |
|----------|------|---|
| P_{0c} | [kW] | – Jmenovitý elektrický příkon chladicí jednotky |
| P_{cJ} | [kW] | – Chladicí výkon chladicí jednotky |
| COP_C | [–] | – Chladicí faktor chladicí jednotky |

Tankovací stojan

Pořizovací náklady na tankovací stojan byly v souladu se zdrojem [167] stanoveny na 58559 €, resp. 65000 \$, náklady na údržbu pak na 2 % z této částky.

Elektrická přípojka

Na základě vypočítaných jmenovitých elektrických příkonů – viz dále – můžeme říct, že se zejména v případě Booster koncepce nachází na hraně toho, co je možno připojit do soustavy nízkého napětí. Z toho důvodu bylo po konzultaci s odborníkem z praxe – i s ohledem na možné budoucí rozšíření – upřednostněno připojení stanice na soustavu vysokého napětí. S tím je spojený jednorázový poplatek za rezervovaný příkon ve výši 39216 €/MW (1 mil Kč/MW) a také pořizovací náklady na trafostanici, jejíž součástí je i transformátor 22 kV/400 V. Pořizovací náklady trafostanice byly opět po konzultaci stanoveny na 58824 € (1,5 mil Kč), náklady na údržbu nebyly vyhodnoceny. Do provozních nákladů tak spadají platby za roční rezervovanou kapacitu ve výši 6813 €/MW měsíčně (173735 Kč/MW měsíčně) a samotné náklady na silovou elektřinu v odhadované výši 156,86 €/MWh (4000 Kč/MWh). Ostatní položky – např. poplatek za systémové služby jsou v tomto kontextu zanedbatelné a nebylo s nimi dále kalkulováno.

15.3 Výpočet a vypočítané hodnoty

Z důvodu přehlednosti výpočtů – jelikož se týkají různých koncepcí, variant dodávek vodíku a provozu, a tedy na sebe přímo nenavazují – nebylo provedeno dosazení a vzorový výpočet dle výše uvedených rovnic. Zadané a vypočtené hodnoty jsou místo toho rovnou uvedeny v přehlednějších tabulkách – viz dále. Indexy komponent nejsou pro vyšší přehlednost uvedeny.

Tab. 15.1 Pořizovací a provozní náklady na zásobník.

| | Booster + Buffer + Kaskáda | | | Jednotka | Popis |
|----------|----------------------------|--------|---------|----------------|------------------------------------|
| | Dimenzování + Běžný provoz | | | | |
| Zásobník | Veličina | Denní | Týdenní | | |
| | V _Z | 8 | 24 | m ³ | Objem zásobníku |
| | m _Z | 125,52 | 376,56 | kg | Skutečná kapacita zásobníku |
| | Cena | 500 | 500 | €/kg | Měrné pořizovací náklady zásobníku |
| | Nákup | 62760 | 188280 | € | Pořizovací náklady zásobníku |
| | Údržba | 1255 | 3766 | €/rok | Náklady na údržbu zásobníku |
| | Energie | – | – | €/rok | Náklady na spotřebovanou energii |

Tab. 15.2 Pořizovací a provozní náklady na akumulátor.

| | Denní + Týdenní | | | | | Jednotka | Popis |
|-------------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|--|
| | Dimenzování + Běžný provoz | | | | | | |
| | Booster | Buffer | Kaskáda | | | | |
| Veličina | N1 | N1 | N1 | N2 | N3 | | |
| V _{AMX} | 0,05 | 0,63 | 0,28 | 0,25 | 0,13 | m ³ | Minimální objem X. nádoby akumulátoru |
| m _{AX} | 2,10 | 30,61 | 9,07 | 10,38 | 6,32 | kg | Skutečná kapacita X. nádoby akumulátoru |
| p _{AJMX} | 760 | 900 | 500 | 700 | 900 | bar | Jmenovitý tlak X. nádoby akumulátoru |
| Cena | 1574,52 | 2084,75 | 934,87 | 1396,05 | 2084,75 | €/kg | Měrné pořizovací náklady X. nádoby ak. |
| Nákup | 3306 | 63821 | 8477 | 14485 | 13172 | € | Pořizovací náklady X. nádoby akumulátoru |
| Údržba | 116 | 2234 | 297 | 507 | 461 | €/rok | Náklady na údržbu X. nádoby akumulátoru |
| Energie | – | – | – | – | – | €/rok | Náklady na spotřebovanou energii |

Tab. 15.3 Pořizovací a provozní náklady kompresoru.

| | Dimenzování | | | Běžný provoz | | | | | | Jednotka | |
|-----------|-----------------|---------|--------|--------------|---------|--------|---------|---------|--------|----------|---------|
| | Denní + Týdenní | | | Denní | | | Týdenní | | | | |
| | Veličina | Booster | Buffer | Kaskáda | Booster | Buffer | Kaskáda | Booster | Buffer | | Kaskáda |
| Kompresor | P_K | 250 | 100 | 100 | – | – | – | – | – | – | kW |
| | \dot{m}_K | 21,33 | 7,82 | 7,82 | 14,22 | 7,11 | 7,11 | 14,22 | 7,11 | 7,11 | g/s |
| | P_{0M} | 263,16 | 105,26 | 105,26 | – | – | – | – | – | – | kW |
| | P_{0MB} | – | – | – | 40,48 | 35,81 | 27,50 | 47,49 | 39,60 | 31,10 | kW |
| | N_{VD} | – | – | – | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | – |
| | t_P | – | – | – | 5 | 10 | 10 | 5 | 10 | 10 | min |
| | t_{KR} | – | – | – | 208,33 | 416,67 | 416,67 | 208,33 | 416,67 | 416,67 | h/rok |
| | E_{KR} | – | – | – | 8433 | 14921 | 11458 | 9894 | 16500 | 12958 | kWh/rok |
| | PN 1 | 1,82 | 1,05 | 1,05 | – | – | – | – | – | – | mil \$ |
| | PN 2 | 0,87 | 0,45 | 0,45 | – | – | – | – | – | – | mil \$ |
| | Nákup | 1,21 | 0,68 | 0,68 | – | – | – | – | – | – | mil € |
| | Údržba | 48508 | 27045 | 27045 | – | – | – | – | – | – | €/rok |
| | Energie | – | – | – | 1323 | 2341 | 1797 | 1552 | 2588 | 2033 | €/rok |

| Kompresor | Veličina | Popis |
|-----------|-------------|---|
| | P_K | Mechanický výkon kompresoru |
| | \dot{m}_K | Hmotnostní tok vodíku kompresorem |
| | P_{0M} | Jmenovitý příkon elektromotoru pro pohon kompresoru |
| | P_{0MB} | Běžný příkon elektromotoru pro pohon kompresoru |
| | N_{VD} | Počet vozidel plněných za jeden den |
| | t_P | Doba plnění vozidla / akumulátoru |
| | t_{KR} | Roční doba provozu kompresoru |

| Veličina | Popis |
|----------|--|
| E_{KR} | Roční spotřeba energie kompresoru |
| PN 1 | Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [154] |
| PN 2 | Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [167] |
| Nákup | Pořizovací náklady kompresoru |
| Údržba | Náklady na údržbu kompresoru |
| Energie | Náklady na spotřebovanou energii |

Tab. 15.4 Pořizovací a provozní náklady chladicího zařízení.

| | Denní + Týdenní | | Jednotka | Popis | |
|-------------------|----------------------------|--------------|----------|---------|---|
| | Dimenzování | Běžný provoz | | | |
| | Booster + Buffer + Kaskáda | | | | |
| Chladicí zařízení | Veličina | | | | |
| | P _{CJ} | 10 | – | kW | Chladicí výkon chladicí jednotky |
| | m _{CB} | 1400 | – | kg | Hmotnost hliníkového bloku |
| | T _C | -40 | – | °C | Teplota vodíku na výstupu z chladicího zařízení |
| | P _{NC} | 16606 | – | \$ | Pořizovací náklady chladicí jednotky |
| | P _{NB} | 47379 | – | \$ | Pořizovací náklady hliníkového bloku |
| | Nákup | 57644 | – | € | Pořizovací náklady chladicího zařízení |
| | Údržba | 1153 | – | €/rok | Náklady na údržbu chladicího zařízení |
| | ms | – | 42,67 | kg | Denní spotřeba vodíku |
| | T _B | – | 8 | °C | Běžná teplota |
| | T _{KS} | 40 | – | °C | Teplota na sání kompresoru |
| | COP _C | 0,78 | 1,39 | – | Chladicí faktor chladicí jednotky |
| | E _{CM} | – | 0,94 | kWh/kg | Měrná energetická náročnost chlazení |
| | E _{CR} | – | 10056 | kWh/rok | Roční spotřeba energie chladicího zařízení |
| | Energie | – | 1577 | €/rok | Náklady na spotřebovanou energii |
| | P _{0C} | 12,84 | – | kW | Jmenovitý elektrický příkon chladicí jednotky |

Tab. 15.5 Pořizovací a provozní náklady tankovacího stojanu.

| Stojan | Veličina | Hodnota | Jednotka | Popis |
|---------|----------|---------|----------|---------------------------------------|
| | Nákup | 58559 | € | |
| Údržba | 1171 | €/rok | | Náklady na údržbu tankovacího stojanu |
| Energie | – | €/rok | | Náklady na spotřebovanou energii |

Tab. 15.6 Pořizovací náklady trafostanice a elektrické přípojky a provozní náklady stanice spojené s dodávkami elektrické energie.

| | Dimenzování | | | Běžný provoz | | | | | | Jednotka | |
|---------------------|------------------|---------|--------|--------------|---------|--------|---------|---------|--------|----------|---------|
| | Denní + Týdenní | | | Denní | | | Týdenní | | | | |
| | Veličina | Booster | Buffer | Kaskáda | Booster | Buffer | Kaskáda | Booster | Buffer | | Kaskáda |
| Elektrická přípojka | P _{OSM} | 276,00 | 118,10 | 118,10 | – | – | – | – | – | – | kW |
| | P _{OS} | 300 | 140 | 140 | – | – | – | – | – | – | kW |
| | E _{SR} | – | – | – | 18,49 | 24,98 | 21,51 | 19,95 | 26,56 | 23,01 | MWh/rok |
| | Trafostanice | 58824 | 58824 | 58824 | – | – | – | – | – | – | € |
| | Rez. příkon | 11765 | 5490 | 5490 | – | – | – | – | – | – | € |
| | Rez. kapacita | 24527 | 11446 | 11446 | – | – | – | – | – | – | €/rok |
| | Silová el. | – | – | – | 2900 | 3918 | 3375 | 3129 | 4166 | 3610 | €/rok |

| Elektrická přípojka | Veličina | Popis |
|---------------------|------------------|--|
| | P _{OSM} | Minimální kapacita elektrické přípojky – součet jmenovitých příkonů kompresoru a chladicí jednotky |
| | P _{OS} | Doporučená kapacita elektrické přípojky – minimální kapacita navýšená o odhad spotřeby dalších komponent a rezervu |
| | E _{SR} | Roční spotřeba energie stanice – součet roční spotřeby energie kompresoru a chladicí jednotky za běžného provozu |
| | Trafostanice | Pořizovací náklady trafostanice |
| | Rez. příkon | Jednorázový poplatek za rezervovaný příkon – za připojení stanice na soustavu vysokého napětí |
| | Rez. kapacita | Pravidelný poplatek za roční rezervovanou kapacitu – za nejvyšší nasmlouvaný příkon stanice |
| | Silová el. | Náklady na silovou elektřinu |

15.4 Vyhodnocení a diskuze

Vypočtené hodnoty můžeme také roztrždit dle koncepce (Booster, Buffer a Kaskáda) a varianty dodávek vodíku (Denní, Týdenní) – viz tab. 15.7. Tabulka zahrnuje pouze položky vyčíslované v této práci, řada faktorů tak nebyla zohledněna – viz kap. 15 (úvod) a 15.1.

Tab. 15.7 Pořizovací náklady, náklady na údržbu a elektrickou energii v závislosti na volbě koncepce vodíkové plnicí stanice a varianty dodávek vodíku.

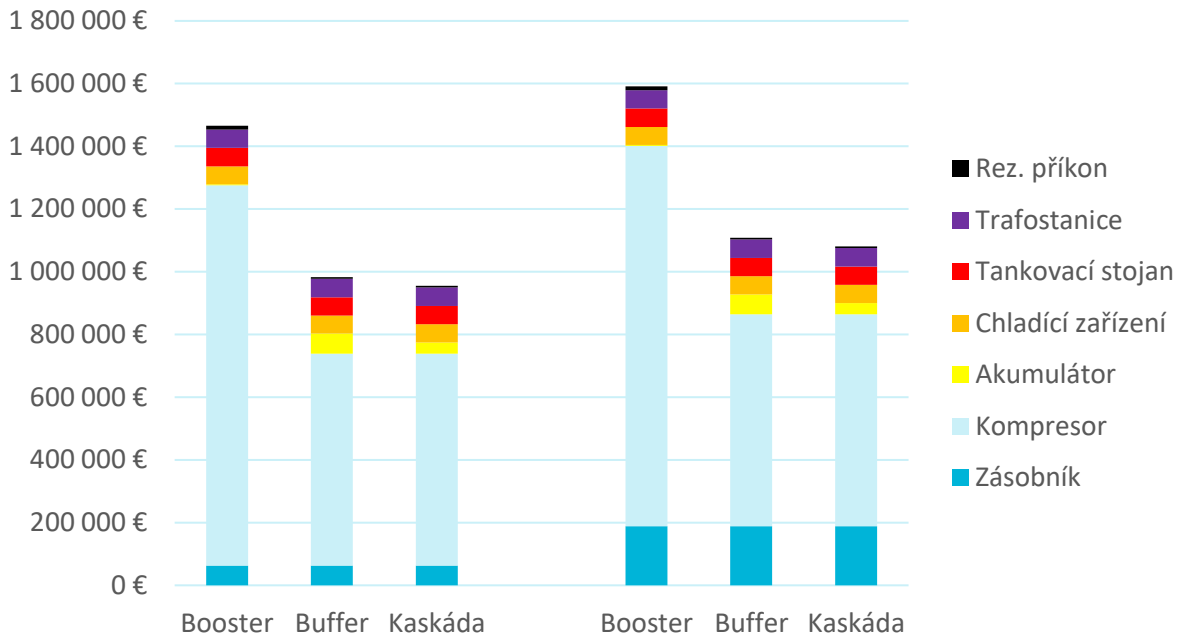
| Položka | Denní | | | Týdenní | | | Jednotka | |
|---------|-------------------|--------|---------|---------|--------|---------|----------|-------|
| | Booster | Buffer | Kaskáda | Booster | Buffer | Kaskáda | | |
| Nákup | Zásobník | 62760 | 62760 | 62760 | 188280 | 188280 | 188280 | € |
| | Kompresor | 1,21 | 0,68 | 0,68 | 1,21 | 0,68 | 0,68 | mil € |
| | Akumulátor | 3306 | 63821 | 36134 | 3306 | 63821 | 36134 | € |
| | Chladicí zařízení | 57644 | 57644 | 57644 | 57644 | 57644 | 57644 | € |
| | Tankovací stojan | 58559 | 58559 | 58559 | 58559 | 58559 | 58559 | € |
| | Trafostanice | 58824 | 58824 | 58824 | 58824 | 58824 | 58824 | € |
| | Rez. příkon | 11765 | 5490 | 5490 | 11765 | 5490 | 5490 | € |
| Celkem | 1,47 | 0,98 | 0,96 | 1,59 | 1,11 | 1,08 | mil € | |
| Údržba | Zásobník | 1255 | 1255 | 1255 | 3766 | 3766 | 3766 | €/rok |
| | Kompresor | 48508 | 27045 | 27045 | 48508 | 27045 | 27045 | €/rok |
| | Akumulátor | 116 | 2234 | 1265 | 116 | 2234 | 1265 | €/rok |
| | Chladicí zařízení | 1153 | 1153 | 1153 | 1153 | 1153 | 1153 | €/rok |
| | Tankovací stojan | 1171 | 1171 | 1171 | 1171 | 1171 | 1171 | €/rok |
| | Celkem | 52203 | 32858 | 31888 | 54713 | 35368 | 34399 | €/rok |
| Energie | Kompresor | 1323 | 2341 | 1797 | 1552 | 2588 | 2033 | €/rok |
| | Chladicí zařízení | 1577 | 1577 | 1577 | 1577 | 1577 | 1577 | €/rok |
| | Silová elektrina | 2900 | 3918 | 3375 | 3129 | 4166 | 3610 | €/rok |
| | Rez. kapacita | 24527 | 11446 | 11446 | 24527 | 11446 | 11446 | €/rok |
| | Celkem | 27427 | 15364 | 14821 | 27656 | 15612 | 15056 | €/rok |

Pozn. Nákup označuje pořizovací náklady, údržba a energie dohromady tvoří provozní náklady.

Pro vyšší přehlednost byla data zpracována také do grafické podoby. Podíl pořizovacích nákladů jednotlivých komponent na celku je patrný z obr. 15.1, podíl jejich provozních nákladů, tedy nákladů na údržbu a energie na celku pak z obr. 15.2.

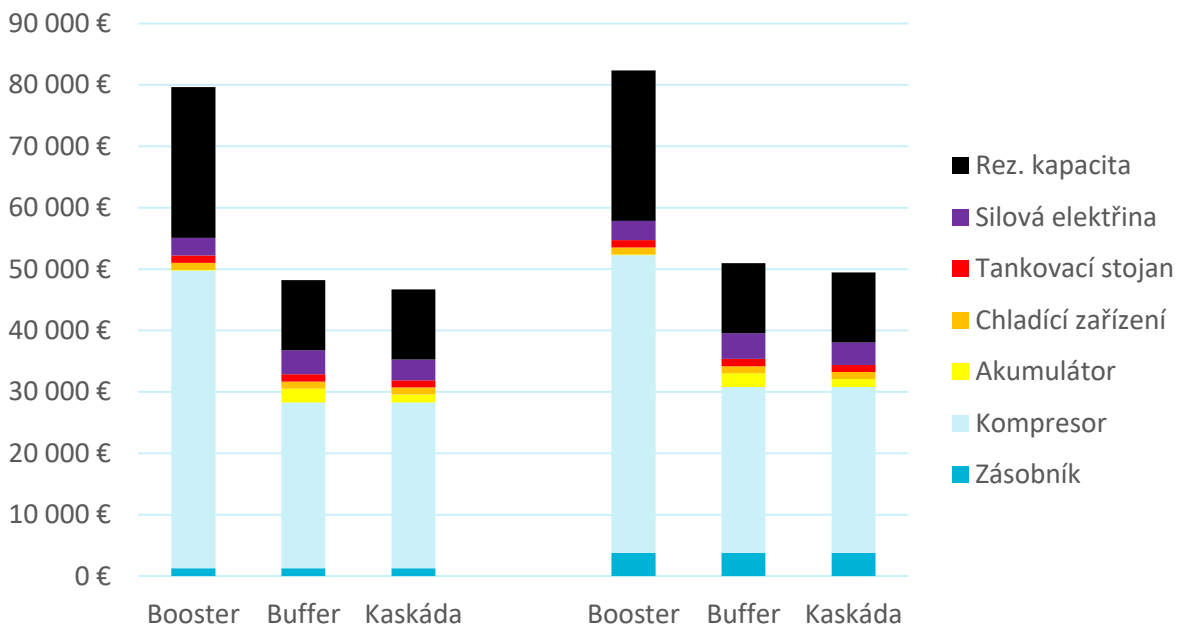
Perioda dodávek

Z důvodu absence relevantních dat ohledně ceny dopravy vodíku nelze provést přesné srovnání variant s denními a týdenními dodávkami. Budeme-li však uvažovat životnost zařízení 20 let, konstantní náklady na údržbu a elektrickou energii a konstantní kurz měn, pak budou celkové náklady na plnicí stanici (pořizovací + provozní) za tuto dobu u týdenních dodávek přibližně o 0,18 mil € (4,6 mil Kč) vyšší než v případě denních dodávek vodíku. Za předpokladu, že roční náklady na dopravu v případě denních dodávek vodíku nepřesáhnou náklady na dopravu při týdenních dodávkách vodíku o více než 9000 € (230000 Kč) mohou být denní dodávky vodíku výhodnější. Podmínkou je však stále umožnění této varianty dodavatelem.



Obr. 15.1 Podíl pořizovacích nákladů jednotlivých komponent na celku v závislosti na volbě koncepce vodíkové plnicí stanice.

Pozn. Vlevo jsou data pro denní dodávky vodíku, vpravo pak pro týdenní dodávky vodíku.



Obr. 15.2 Podíl provozních nákladů (energie a údržba) jednotlivých komponent na celku v závislosti na volbě koncepce vodíkové plnicí stanice.

Pozn. Vlevo jsou data pro denní dodávky vodíku, vpravo pak pro týdenní dodávky vodíku.

Koncepce stanice

Za předpokladu shodných nákladů na položky mimo rámec této práce je ekonomicky nejvýhodnější koncepcí Kaskáda koncepce, což odpovídá dostupné literatuře. Rozdíl mezi Buffer a Kaskáda koncepcí je však překvapivě malý. Hlavní úspora by měla spočívat v nižší spotřebě elektrické energie kompresoru, z uvedených hodnot je však patrné, že silová elektřina tvoří jen malou část celkových nákladů na energie. Větší položkou je vysoká roční rezervovaná kapacita, která je dominantně ovlivněna jmenovitým příkonem kompresoru. Tento problém bude adresován dále. Zatímco v případě Booster koncepce jsou možnosti optimalizace jen velmi omezené, v případě Buffer a zejména Kaskáda koncepce lze s optimalizací velikostí a výkonů jednotlivých komponent očekávat relativně významný pokles celkových nákladů.

Požizovací náklady

Požizovací náklady hlavních komponent vodíkové plnicí stanice se v případě ekonomicky výhodnějších konfigurací pohybuje okolo 1 mil €, tedy přibližně 25,5 mil Kč. Navíc je třeba připomenout, že tato cena nezahrnuje jejich instalaci, další komponenty nezbytné pro její výstavbu a provoz a řadu dalších faktorů uvedených v kap. 15 (úvod) a 15.1. Přesto můžeme říct, že je tato cena vzhledem k velikosti stanice velmi vysoká, což je z části zapříčiněno řadou provedených voleb při jejím návrhu – viz dále. Tato práce by proto neměla sloužit jako podklad pro investiční rozhodnutí. Uvedené poznatky, zjištěné vztahy a využití zdroje nicméně mohou být kvalitním pokladem pro budoucí detailní návrh stanice.

Kompresor a tlakové nádoby

Kompresor je dominantní položkou jak z pohledu pořizovacích nákladů, tak nákladů na údržbu a jeho dimenzování a výběr má zásadní vliv na ekonomiku stanice. Z vypočtených hodnot jasně vyplývá nepoměr mezi náklady na kompresor a tlakové nádoby. Tento problém má dvě možná řešení. Prvním je zvýšení minimálního tlaku na sání kompresoru, který byl zvolen zbytečně nízký (20 bar). Tento krok povede k vyšší velikosti zásobníku, ale významně nižší kompresní práci a potřebném jmenovitém výkonu kompresoru. Zároveň ale ovlivní množství vodíku, které je dodavatel schopen dodat a je proto třeba ověřit realizovatelnost týdenních dodávek.

Druhým řešením je snížení jmenovitého hmotnostního toku vodíku kompresorem, což opět povede k nižšímu jmenovitému výkonu kompresoru. Současně však bude třeba upravit velikost akumulátoru. V této práci bylo uvažováno s maximálním počtem šesti plněných vozidel za hodinu, což odpovídá 10 minutám na vozidlo. Snížení hmotnostního toku vodíku kompresorem by vedlo k dalšímu – a pravděpodobně již nepřipustnému – prodloužení tohoto intervalu. Akumulátor je proto v tomto případě nutné dimenzovat na více plnění bezprostředně po sobě s významnou pauzou pro jeho doplnění po vyčerpání této kapacity. Uvedený přístup byl při návrhu zvažován, klade však vyšší nároky na přesnost dimenzování – dimenzovaný počet vozidel plněných za sebou musí být za všech okolností vyšší nebo roven počtu skutečně plněných vozidel. V opačném případě hrozí významné prodlevy. Z toho důvodu byl při návrhu upřednostněn konzervativnější přístup s dimenzováním velikosti akumulátoru na plnění jediného vozidla. V případě Kaskáda koncepce lze kromě velikostí tlakových nádob akumulátoru dále optimalizovat také jejich tlakové úrovně. Přínos tohoto kroku však bude pravděpodobně nízký. Z pohledu samotného kompresoru by pak měl být kladen důraz na co nejvyšší účinnost, i za cenu vyšších pořizovacích nákladů. Úspory se přitom projeví zejména ve výši poplatku za roční rezervovanou kapacitu – viz dále. V praxi by pak měla být využita kombinace všech uvedených možností pro snížení požadovaného jmenovitého výkonu kompresoru.

Při dimenzování vodíkové plnicí stanice je také třeba vzít v úvahu hmotnostní tok vodíku do vozidla. V této práci byla využita průměrná hodnota 21,33 g/s, stanovená z kapacity nádrže vozidla a udané doby plnění. Jmenovitá hodnota je nicméně vyšší (dodatečně bylo zjištěno, že

dosahuje 33 g/s) [156]. Vliv tohoto zjednodušení se však pravděpodobně projevil jen v případě Booster koncepce. V případě Buffer a Kaskáda koncepce jsou rozdíly v hmotnostních tocích kompenzovány přítomností akumulátoru. Chladicí zařízení pak využívá ve všech koncepcích akumulaci chladu, díky čemuž chladicí výkon chladicího zařízení nijak nelimituje hmotnostní tok. Zmíněná Booster koncepce byla tímto zjednodušením zvýhodněna, navzdory tomu se po ekonomické stránce stále jeví jako nejméně výhodná. Dopad zjednodušení je tedy minimální.

Připojení na elektrickou distribuční soustavu

Požadavek na kapacitu elektrické přípojky je dominantně závislý na jmenovitém příkonu elektromotoru pro pohon kompresoru. Jak již bylo řečeno, tento příkon lze snížit další optimalizací stanice – viz výše. Je pravděpodobné, že tento příkon lze snížit natolik, aby bylo možné stanici bez problémů připojit na soustavu nízkého napětí. Tím by odpadla potřeba trafostanice a vyúčtování spotřeby by vypadalo zcela odlišně. Tato varianta nicméně není dále uvažována.

Jmenovitý příkon elektromotoru pro pohon kompresoru – a tím i jmenovitý příkon plnicí stanice – je využíván pouze v případě využití jednodenní rezervy vodíku v zásobníku. Tento stav je spojen s problémem v dodavatelském řetězci vodíku a nelze jej předvídat. Zároveň však lze předpokládat, že nastane jen velmi vzácně. Relevantním přístupem pro snížení provozních nákladů je tak platba za nižší roční rezervovanou kapacitu – odpovídající nejvyššímu příkonu stanice bez vyčerpání jednodenní rezervy – a pokuty za její překročení v případě potřeby vyššího příkonu. Nejvyšší příkon vodíkové plnicí stanice bez vyčerpání jednodenní rezervy nicméně nebyl v této práci stanoven.

ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se zabývá vodíkovými plnicími stanicemi, jejich koncepcemi, návrhem a provozem. Plnicí stanice jsou nezbytnou součástí infrastruktury pro využití vodíku v silniční dopravě. Hlavním cílem rešeršní části této práce je proto poskytnout teoretický základ nezbytný pro jejich návrh a pro pochopení souvislostí.

Atomy vodíku jsou nejmenšími atomy, díky čemuž snadno pronikají do krystalických struktur jiných materiálů a mění tím jejich vlastnosti. Za normálních podmínek je nejvýznamnějším dopadem vodíkové křehnutí – tedy snížení houževnatosti materiálu. Kompatibilita materiálů s vodíkem je proto v případě tlakových aplikací ovlivněna zejména mírou křehnutí. V případě kryogenních aplikací vodíkové křehnutí neprobíhá a dominantním faktorem je odolnost materiálu vůči nízkým teplotám. Přehled běžně využívaných materiálů a jejich využití je uveden v tab. 3.1. Jedná se především o vybrané uhlíkové oceli nižších pevností, austenitické nerez oceli a slitiny hliníku.

Navazující část práce je věnována životnímu cyklu vodíku. Vodík je v současnosti vyráběn dominantně z fosilních zdrojů. Příčinou je především významně nižší cena produkce ve srovnání s obnovitelnými zdroji. Úspory emisí při minimálním růstu nákladů však lze dosáhnout využitím technologií pro zachytávání a ukládání uhlíku (CCS). Přeprava a skladování vodíku je v současnosti omezena na tlakové a kryogenní nádoby. Smyslem obou metod je zvýšení objemové energetické hustoty vodíku ať už stlačením, nebo zkapalněním a v obou případech dochází k energetickým ztrátám. Ty mohou v případě stlačování dosáhnout až 20 %, v případě zkapalňování pak až 40 %. Další metody přepravy a skladování vodíku nejsou komerčně dostupné z důvodu nízké úrovně technologické připravenosti – podzemní zásobníky plynu a vodík ve sloučeninách a materiálech, nebo chybějící legislativy – plynovody. Vodík může být následně využit v palivových článcích pro výrobu elektrické energie.

Ve vozidlech jsou využívány palivové články s polymerní membránou (PEM), které dosahují účinnosti 60 %. Jejich výhodou je kompaktnost, vyžadují však vysokou čistotu paliva >99,97 %. Palivový článek ve vozidlech nebývá dimenzován na jmenovitý výkon elektromotoru. Rozdíl mezi výkonem článku a příkonem elektromotoru bývá kompenzován malým akumulátorem, který zároveň umožňuje provoz článku v oblasti optimálních parametrů. Jmenovitý tlak vodíku v nádržích vozidel dosahuje zpravidla 700 bar, doba plnění se pohybuje okolo 5 min. Přehled dohledaných osobních a užitkových vozidel je uveden v tab. 8.1. Výhodou elektrických vozidel s palivovými články (FCEV) oproti bateriovým elektromobilům je kratší doba plnění a potenciálně vyšší užitečné zatížení a objem nákladového prostoru při podobném dojezdu. Jejich emise přitom mohou dosahovat podobně nízkých hodnot.

Vodíkové plnicí stanice jsou klíčovým prvkem infrastruktury pro využití vodíku v dopravě. Jejich omezený počet je v současnosti hlavním limitujícím prvkem rozvoje. V České republice jsou aktuálně v provozu dvě veřejné plnicí stanice, další by pak měly přibývat již v průběhu tohoto roku. Situace v řadě evropských států je podobná. Výjimkou je Německo, kde se nachází nadpoloviční většina z více než 160 veřejných vodíkových plnicíček v Evropě. Přehled vybraných realizací je uveden v tab. 9.1. Plnicí stanice lze rozdělit na základě řady kritérií. Nejvýznamnějším z nich je skupenství dodávaného vodíku. To může být plynné (tlakový vodík) nebo kapalné. Dominantní je však první možnost, což souvisí zejména s typickou velikostí plnicích stanic. Ta se zpravidla pohybuje do 100 kg/den, zatímco zásobování kapalným vodíkem je výhodné zejména u větších stanic.

Plnicí stanice lze dále rozdělit dle schopnosti kontinuální dodávky vodíku – tedy dlouhodobého plnění jednoho vozidla za druhým. Tato schopnost vyžaduje dimenzování kompresoru na vyšší hmotnostní tok vodíku, daný rychlostí plnění nádrže vozidla. Tato koncepce je pracovně označována jako Booster koncepce. U stanic bez schopnosti kontinuální dodávky vodíku

se mezi kompresorem a výdejním stojanem nachází akumulční tlaková nádoba. Ta umožňuje snížení hmotnostního toku vodíku kompresorem a tím i snížení jeho požadovaného výkonu při zachování vysoké rychlosti plnění vozidla. Tento akumulátor je však po čase nutné doplnit. Jeho velikost proto limituje počet vozidel plněných krátce po sobě. Tlaková nádoba může být jedna – pracovně nazváno Buffer koncepcí, nebo jich může být více (nejčastěji tři) na různých tlakových úrovních, což přináší úsporu nákladů při provozu – nazváno Kaskáda koncepcí.

Mezi hlavní součásti vodíkové plnicí stanice s dodávkou tlakového vodíku patří zásobník vodíku – vysokokapacitní tlaková nádoba typicky na tlaku 50–200 bar, kompresor – typicky pístový nebo membránový, akumulátor – vysokotlaká tlaková nádoba na tlaku až 900 bar a chladicí zařízení. To je vyžadováno pro ochlazení vodíku před vozidlem až na $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, jelikož při expanzi a měření kinetické energie v nádrži vozidla dochází k jeho ohřevu. Cílem je zachování bezpečnosti a vysoké rychlosti plnění. V případě stanic s dodávkou kapalného vodíku je zásobník nahrazen kryogenní nádobou, ze které proudí vodík do zplyňovacího zařízení, kde dochází ke změně skupenství. Následuje opět kompresor a výměník tepla, který v tomto případě slouží k dalšímu ohřevu vodíku.

Výpočetní část práce je věnována návrhu vodíkové plnicí stanice pro potřeby společnosti Zásilkovna s.r.o. a jeho technicko-ekonomické analýze. Stanice má být využita v rámci pilotního projektu testování jednoho středního užitkového vozidla s možností rozšíření vozového parku na 10 vozidel v případě úspěchu projektu. Návrh počítá s využitím vozidla Renault Master Van H2-Tech a denním nájezdem 150–200 km. Z provedeného výpočtu denní potřeby vodíku a požadavků technických předpisů jasně vyplývá, že návrh stanice pro jediné vozidlo s myšlenkou následného rozšíření nedává smysl. Plnicí stanice proto byla dimenzována na variantu s 10 vozidly. Pro výpočet byla zvolena koncepce stanice se stlačeným vodíkem a jeho dodávkami po silnici. Dále byla zvolena koncepce bez schopnosti kontinuálních dodávek vodíku, ale s vysokou kapacitou 6 vozidel za hodinu. Pro možnost srovnání byly zahrnuta Booster, Buffer i Kaskáda koncepce a denní i týdenní perioda dodávek vodíku. Řada dalších parametrů byla volena v souladu s normou, běžnou praxí, nebo dohledanou literaturou. Volba všech významných parametrů a jejich vlivu byla řádně odůvodněna. Při výpočtu byla provedena řada zjednodušení, které mají spolu s absencí dat o reálných cenách komponent zásadní dopad na aplikovatelnost výsledků. Tato práce by proto neměla sloužit jako podklad pro investiční rozhodnutí. Uvedené poznatky, zjištěné vztahy a využití zdroje nicméně mohou být kvalitním podkladem pro další úvahy.

Z vyhodnocovaných variant se jako ekonomicky nejvýhodnější jeví Kaskáda koncepce. Nabízí jak nejnižší pořizovací náklady hlavních komponent (0,96–1,08 mil €), tak nejnižší náklady na údržbu (31,89–34,40 tis €/rok) a elektrickou energii (14,82–15,06 tis €/rok). První hodnota odpovídá variantě s denními dodávkami vodíku, druhá variantě s týdenními dodávkami. Přesné vyhodnocení tohoto faktoru nebylo možné provést z důvodu absence dat o cenách dopravy vodíku. Přibližně bylo stanoveno, že pokud roční náklady na dopravu vodíku u denní varianty nepřesáhnou hodnotu při týdenních dodávkách o více než 9 tis €, je vhodnější volit denní variantu dodávek vodíku. V opačném případě pak variantu týdenních dodávek. Celkové náklady na výstavbu ani měrné náklady na kg vodíku nebylo možno stanovit. Doporučená velikost zásobníku pro tuto koncepci činí 8, resp. 24 m³, velikosti nádob akumulátoru 0,28, 0,25 a 0,13 m³, doporučený jmenovitý výkon kompresoru 100 kW a příkon elektromotoru pro jeho pohon 105,26 kW. Doporučený jmenovitý chladicí výkon chladicího zařízení je 10 kW, hmotnost hliníkového bloku sloužícího jako výměník tepla a akumulátor chladu pak 1400 kg. Doporučená kapacita elektrické přípojky je 140 kW. Hodnoty pro jednotlivé varianty jsou přehledně uvedeny v tab. 15.1 až tab. 15.6. Podrobné srovnání, vyhodnocení vlivu parametrů a doporučení pro budoucí návrhy je uvedeno v kap. 15.4.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Emise skleníkových plynů v ČR podle sektorů detailně: Celkové emise ČR za rok 2020. *Fakta o klimatu* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, c2023, 28. 3. 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-cr-detail>
- [2] Emise skleníkových plynů v EU podle sektorů detailně: Celkové emise EU za rok 2019. *Fakta o klimatu* [online]. Brno: Otevřená data o klimatu, c2023, 14. 7. 2022 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/emise-eu-detail>
- [3] *BP Statistical Review of World Energy* [online]. 71st edition. London: BP, 2022 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/primary-energy.html>
- [4] Czech republic: Energy supply - Total energy supply (TES) by source. *IEA - International energy agency* [online]. Paris: International energy agency, c2022, 2022 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.iea.org/countries/czech-republic>
- [5] *Státní energetická koncepce České republiky* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2016 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/energetika/statni-energeticka-politika/statni-energeticka-koncepce--223620>
- [6] Zelená dohoda pro Evropu: Unijní cíl dosáhnout do roku 2050 klimatické neutrality. *Evropská rada – Rada Evropské unie* [online]. Brusel, 2022, 6. 12. 2022 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/green-deal/>
- [7] EDMONDS, J., D. EMBERSON, S. A. GABRIEL, et al., NEUMANN, Anne, ed. *The role of natural gas in Europe towards 2050* [online]. Trondheim: NTNU, 2021 [cit. 2022-12-10]. ISBN 978-82-994575-5-2. Dostupné z: <https://www.ntnu.edu/energytransition/the-role-of-natural-gas-in-europe-towards-2050>
- [8] *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation: Update* [online]. Golden (Colorado): National Renewable Energy Laboratory, 2021 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80580.pdf>
- [9] KEPPLER, Jan Horst, Sebastien PHAN a Yannick LE PEN. The Impacts of Variable Renewable Production and Market Coupling on the Convergence of French and German Electricity Prices. *The Energy Journal* [online]. Cleveland: International Association for Energy Economics, 2016, July 2016, **37**(3), 343-359 [cit. 2022-12-13]. ISSN 1944-9089. Dostupné z: doi:10.5547/01956574.37.3.jkep
- [10] GROSS, Samantha. The challenge of decarbonizing heavy industry. In: *Brookings* [online]. Washington, D.C.: The Brookings Institution, c2022, June 2021 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.brookings.edu/research/the-challenge-of-decarbonizing-heavy-industry/>
- [11] Hydrogen: A clean, flexible energy carrier. In: *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2022, 21 February 2017 [cit. 2022-12-13]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/articles/hydrogen-clean-flexible-energy-carrier>
- [12] *Ročenka dopravy České republiky* [online]. Praha: Ministerstvo dopravy, 2021 [cit. 2022-12-13]. ISSN 1801-3090. Dostupné z: <https://www.sydos.cz/cs/rocenky.htm>
- [13] BAE, Youngeun, Suman Kumar MITRA, Craig R. RINDT a Stephen G. RITCHIE. Factors influencing alternative fuel adoption decisions in heavy-duty vehicle fleets. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2022, 3 January 2022, (102), 103150 [cit. 2022-12-26]. ISSN 1361-9209. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921004454>

- [14] ZETI: Zero-emission technology inventory. *Global commercial drive to zero program* [online]. Clean energy ministerial, c2022 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti/>
- [15] What is Bio-LNG? *Nordsol: The future is liquid* [online]. Bunnik: Nordsol, c2022 [cit. 2022-12-26]. Dostupné z: <https://nordsol.com/what-is-biolng/>
- [16] *Working paper – National hydrogen strategies* [online]. London: World Energy Council, 2021 [cit. 2022-08-07]. Dostupné z: https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Working_Paper_-_National_Hydrogen_Strategies_-_September_2021.pdf
- [17] *Sdělení komise evropskému parlamentu, radě, evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů: Vodíková strategie pro klimaticky neutrální Evropu* [online]. Brusel: Evropská komise, 2020 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301>
- [18] *Vodíková strategie České republiky* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2021 [cit. 2022-08-09]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategie-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf
- [19] *Sdělení komise evropskému parlamentu, evropské radě, evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů: Plán REPowerEU* [online]. Brusel: Evropská komise, 2022 [cit. 2022-12-27]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:230:FIN>
- [20] JOLLY, William Lee. Hydrogen: Chemical element. In: *Encyklopedia Britannica* [online]. Chicago: The Britannica Group, c2023, 6 Oct 2022 [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>
- [21] Basic hydrogen properties. *Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/basic-hydrogen-properties>
- [22] Comparative properties of hydrogen and other fuels. *Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/comparative-properties-hydrogen-and-other-fuels>
- [23] GRABNER, P., A. WIMMER, F. GERBIG a A. KROHMER. Hydrogen as a Fuel for Internal Combustion Engines: Properties, problems and chances. In: *5th International Colloquium Fuels*. 2005, s. 3-13.
- [24] Methane – Density – Heat Capacity – Thermal Conductivity. *Material properties* [online]. c2023 [cit. 2023-02-12]. Dostupné z: <https://material-properties.org/methane-density-heat-capacity-thermal-conductivity/>
- [25] Hydrogen flames. *Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-01-29]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-flames>
- [26] KNOSHNAW, Fuad a Rolf GUBNER, ed. Part II: Corrosion Topics. In: *Corrosion Atlas Case Studies* [online]. 2021 ed. Amsterdam: Elsevier, 2021, s. 43–68 [cit. 2023-01-28]. ISBN 978-0-323-85849-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85849-6.02003-5>
- [27] Hydrogen embrittlement. *Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/hydrogen-embrittlement>
- [28] STAYKOV, Aleksandar, Junichiro YAMABE a Brian P. SOMERDAY. Effect of Hydrogen Gas Impurities on the Hydrogen Dissociation on Iron Surface. *International Journal of Quantum Chemistry* [online]. 2014, 21 February 2014, **114**(10), 626–635 [cit. 2022-10-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qua.24633>

- [29] SAN MARCHI, Chris, R. SHRESTHA a J. RONEVICH. *Hydrogen compatibility of structural materials in natural gas networks* [online]. Livermore: Sandia National Laboratories, 2021 [cit. 2022-12-28]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/1878454>
- [30] *Hydrogen pipeline systems: IGC Doc 121/14* [online]. Brussels: European Industrial Gases Association, 2014 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC121.pdf>
- [31] USTOLIN, Federico, Nicola PALTRINIERI a Filippo BERTO. Loss of integrity of hydrogen technologies: A critical review. *International journal of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2020, **45**(43), 23809-23840 [cit. 2023-01-29]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2020.06.021
- [32] LI, Xinfeng, Weihong HUANG, Xubin WU, Jin ZHANG, Yao WANG, Eiji AKIYAMA a Dewen HOU. Effect of hydrogen charging time on hydrogen blister and hydrogen-induced cracking of pure iron. *Corrosion science* [online]. Elsevier, 2021, **181**, 109200 [cit. 2023-01-28]. ISSN 0010-938X. Dostupné z: doi:10.1016/j.corsci.2020.109200
- [33] What is high temperature hydrogen attack (HTHA) / hot hydrogen attack?: Frequently asked questions. *TWI* [online]. Cambridge: The welding institute, c2023 [cit. 2023-01-28]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-high-temperature-hydrogen-attack-htha-hot-hydrogen-attack>
- [34] YANG, Fuyuan, Tianze WANG, Xintao DENG, Jian DANG, Zhaoyuan HUANG, Song HU, Yangyang LI a Minggao OUYANG. Review on hydrogen safety issues: Incident statistics, hydrogen diffusion, and detonation process. *International journal of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2021, **46**(61), 31467-31488 [cit. 2023-01-30]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.07.005
- [35] MURUGAN, Arul, Sam BARTLETT, James HESKETH, Hans BECKER a Gareth HINDS. *Hydrogen odorant and leak detection part 1, hydrogen odorant: Project closure report* [online]. V1.4. Horley: SGN, 2020 [cit. 2023-01-30]. Dostupné z: <https://sgn.co.uk/about-us/future-of-gas/hydrogen/h100-nia/hydrogen-odorant-and-gas-detection>
- [36] Compatibility of hydrogen with different materials. In: *HyResponder: European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders* [online]. HyResponder Consortium, June 2021 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2021/06/Lecture-4-slides.pdf>
- [37] LEE, Jonathan A. *Hydrogen embrittlement: NASA/TM-2016-218602* [online]. Huntsville: NASA, 2016 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20160005654>
- [38] Material Compatibility: Materials for Hydrogen Gas Applications. *Hydrogen Tools* [online]. Richland: Pacific Northwest National Laboratory [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://h2tools.org/bestpractices/material-compatibility>
- [39] BARTHELEMY, Herve. Hydrogen storage – Industrial perspectives. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2012, **37**(22), 17364-17372 [cit. 2023-02-26]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2012.04.121
- [40] TAL-GUTELMACHER, Ervin a Dan ELIEZER. The hydrogen embrittlement of titanium-based alloys. *JOM (1989)* [online]. NEW YORK: Springer Nature, 2005, **57**(9), 46-49 [cit. 2023-02-26]. ISSN 1047-4838. Dostupné z: doi:10.1007/s11837-005-0115-0
- [41] OGATA, Toshio. Hydrogen Environment Embrittlement on Austenitic Stainless Steels from Room Temperature to Low Temperatures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. Bristol: IOP Publishing, 2015, **102**(1), 12005-

- 12012 [cit. 2023-02-26]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/102/1/012005
- [42] Liquid Hydrogen Tanks. *Hylium Industries, inc.* [online]. Osan: Hylium Industries, c2023 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <http://hylium-industries.com/tank>
- [43] GARDINER, Ginger. HyPoint partners with GTL to extend zero-emission flight with ultralight liquid hydrogen tanks. In: *Composites World* [online]. Cincinnati: Gardner Business Media, c2023, 30. 3. 2022 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/news/hypoint-partners-with-gtl-to-extend-zero-emission-flight-with-ultralight-liquid-hydrogen-tanks>
- [44] B31.12. *Hydrogen Piping and Pipelines*. 2011 edition. New York: ASME, 2011.
- [45] QIU, Yinan, Huan YANG, Lige TONG a Li WANG. Research progress of cryogenic materials for storage and transportation of liquid hydrogen. *Metals (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2021, **11**(7), 1101 [cit. 2023-03-01]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met11071101
- [46] KIM, Myung-sung, Taehyun LEE, Yeonhong SON, Junesung PARK, Minsung KIM, Hyeonjun EUN, Jong-won PARK a Yongjin KIM. Metallic Material Evaluation of Liquid Hydrogen Storage Tank for Marine Application Using a Tensile Cryostat for 20 K and Electrochemical Cell. *Processes* [online]. Basel: MDPI, 2022, **10**(11), 2401 [cit. 2023-03-01]. ISSN 2227-9717. Dostupné z: doi:10.3390/pr10112401
- [47] ČSN EN ISO 3183. *Naftový a plynárenský průmysl – Ocelové trubky pro potrubní přepravní systémy*. 01/2021. Praha: ČAS, 2021. Dostupné také z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [48] SAN MARCHI, Chris a Brian P. SOMERDAY. *Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials: Sandia report* [online]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2012 [cit. 2023-02-04]. Dostupné z: <https://h2tools.org/technical-reference-for-hydrogen-compatibility-of-materials>
- [49] POLTRUM, Marek. DBI GAS- UND UMWELTTECHNIK. *Kompodium Wasserstoff in Gasfernleitungsnetzen (H2-Kompodium-FNB): Abschlussbericht*. Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches, 2021, 186 s. Dostupné také z: <https://shop.wvgw.de/Forschungsbericht-G-201901-07-2021/511732>
- [50] Hydrogen. *IRENA: International Renewable Energy Agency* [online]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, c2011-2022 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- [51] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* [online]. KeAi Communications Co., 2019, **2**(3), 442-454 [cit. 2023-01-21]. ISSN 2589-2991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [52] JI, Mengdi a Jianlong WANG. Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. *International journal of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2021, **46**(78), 38612-38635 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.09.142
- [53] TURPEINEN, E., R. RAUDASKOSKI, E. PONGRÁCZ a R.L. KEISKI. Thermodynamic analysis of conversion of alternative hydrocarbon-based feedstocks to hydrogen. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2008, **33**(22), 6635-6643 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2008.08.037
- [54] ZHANG, Haotian, Zhuxing SUN a Yun Hang HU. Steam reforming of methane: Current states of catalyst design and process upgrading. *Renewable & sustainable*

- energy reviews* [online]. Elsevier, 2021, **149**, 111330 [cit. 2023-01-20]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.111330
- [55] KIM, Chang-hyun, Jae-yun HAN, Sehwa KIM, Boreum LEE, Hankwon LIM, Kwan-young LEE a Shin-kun RYI. Hydrogen production by steam methane reforming in a membrane reactor equipped with a Pd composite membrane deposited on a porous stainless steel. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2018, **43**(15), 7684-7692 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.11.176
- [56] BARBIERI, G., A. BRUNETTI, G. TRICOLI a E. DRIOLI. An innovative configuration of a Pd-based membrane reactor for the production of pure hydrogen. Experimental analysis of water gas shift. *Journal of power sources* [online]. AMSTERDAM: Elsevier, 2008, **182**(1), 160-167 [cit. 2023-01-20]. ISSN 0378-7753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2008.03.086
- [57] ABDIN, Zainul, Ali ZAFARANLOO, Ahmad RAFIEE, Walter MÉRIDA, Wojciech LIPÍŃSKI a Kaveh R. KHALILPOUR. Hydrogen as an energy vector. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. Elsevier, 2020, **120**, 109620 [cit. 2023-01-20]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109620
- [58] Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2022 [cit. 2023-01-16]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>
- [59] Electrolyzer market: Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2022-2030. *Precedence research* [online]. Ottawa: Precedence research, c2023, September 2022 [cit. 2023-01-21]. Dostupné z: <https://www.precedenceresearch.com/electrolyzer-market>
- [60] GUO, Yujing, Gendi LI, Junbo ZHOU a Yong LIU. Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* [online]. Bristol: IOP Publishing, 2019, **371**(4), 42022 [cit. 2023-01-22]. ISSN 1755-1307. Dostupné z: doi:10.1088/1755-1315/371/4/042022
- [61] ARREGI, Aitor, Maider AMUTIO, Gartzzen LOPEZ, Javier BILBAO a Martin OLAZAR. Evaluation of thermochemical routes for hydrogen production from biomass: A review. *Energy conversion and management* [online]. OXFORD: Elsevier, 2018, **165**, 696-719 [cit. 2023-01-23]. ISSN 0196-8904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2018.03.089
- [62] ISHAQ, H. a I. DINCER. A new energy system based on biomass gasification for hydrogen and power production. *Energy reports* [online]. Elsevier, 2020, **6**, 771-781 [cit. 2023-01-23]. ISSN 2352-4847. Dostupné z: doi:10.1016/j.egyr.2020.02.019
- [63] LEPAGE, Thibaut, Maroua KAMMOUN, Quentin SCHMETZ a Aurore RICHEL. Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment. *Biomass & bioenergy* [online]. Elsevier, 2021, **144**, 105920 [cit. 2023-01-23]. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:10.1016/j.biombioe.2020.105920
- [64] CAO, Leichang, Iris K.M. YU, Xinni XIONG, et al. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. *Environmental research* [online]. Netherlands: Elsevier, 2020, **186**, 109547-109547 [cit. 2023-01-23]. ISSN 0013-9351. Dostupné z: doi:10.1016/j.envres.2020.109547
- [65] MORADI, Ramin a Katrina M. GROTH. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. *International journal*

- of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2019, **44**(23), 12254-12269 [cit. 2023-02-05]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.03.041
- [66] TAHAN, Mohammad-reza. Recent advances in hydrogen compressors for use in large-scale renewable energy integration. *International journal of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2022, **47**(83), 35275-35292 [cit. 2023-02-08]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2022.08.128
- [67] GARDINER, Monterey. *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs: DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2009 [cit. 2023-02-05]. Dostupné z: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/9013_energy_requirements_for_hydrogen_gas_compression.pdf
- [68] Hydrogen Tools: The easy way to calculate quantities of hydrogen. *CMB.TECH* [online]. Antwerpen: CMB.TECH, c2023 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://cmb.tech/hydrogen-tools>
- [69] VIDAS, Leonardo, Rui CASTRO a Armando PIRES. A Review of the Impact of Hydrogen Integration in Natural Gas Distribution Networks and Electric Smart Grids. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI, 2022, **15**(9), 3160 [cit. 2023-02-15]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en15093160
- [70] HERMKENS, R. J. M., H. COLMER a H. A. OPHOFF. Modern PE pipe enables the transport of hydrogen. In: *Proceedings of the 19th plastic pipes conference* [online]. Las Vegas: Plastic Pipes Conference Association, 2018, 24–26 September 2018 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.kiwa.com/4acac6/globalassets/netherlands/kiwa-technology/downloads/ppxix-modern-pe-pipe-enables-the-transport-of-hydrogen-rene-hermkens-and-others-vs20180710.pdf>
- [71] *Approval requirement 214: Fitness for admixtures up to and including 100% hydrogen gas* [online]. Rijswijk: Kiwa, 2021 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://www.kiwa.com/4a8255/contentassets/a3f94baefa854f1fb1551de377e01271/concept_ke-214-_2021_en.pdf
- [72] *Transporting Pure Hydrogen by Repurposing Existing Gas Infrastructure: Overview of existing studies and reflections on the conditions for repurposing* [online]. Ljubljana: European Union Agency for the Cooperation of Energy Regulators, 2021 [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: https://acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Publication/Transporting%20Pure%20Hydrogen%20by%20Repurposing%20Existing%20Gas%20Infrastructure_Overview%20of%20studies.pdf
- [73] DU, Zhemin, Congmin LIU, Junxiang ZHAI, Xiuying GUO, Yalin XIONG, Wei SU a Guangli HE. A review of hydrogen purification technologies for fuel cell vehicles. *Catalysts* [online]. MDPI, 2021, **11**(3), 1-19 [cit. 2023-02-08]. ISSN 2073-4344. Dostupné z: doi:10.3390/catal11030393
- [74] Hydrogen Pipelines. *Fuel cells and hydrogen observatory* [online]. Brussels: Fuel cells and hydrogen observatory [cit. 2023-02-08]. Dostupné z: <https://www.fchobservatory.eu/observatory/technology-and-market/hydrogen-pipelines>
- [75] ELBERRY, Ahmed M., Jagruti THAKUR, Annukka SANTASALO-AARNIO a Martti LARMI. Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. *International journal of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2021, **46**(29), 15671-15690 [cit. 2023-02-11]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.02.080

- [76] RÖDL, Anne, Christina WULF a Martin KALTSCHMITT. Assessment of Selected Hydrogen Supply Chains - Factors Determining the Overall GHG Emissions. In: AZ-ZARO-PANTEL, Catherine, ed. *Hydrogen supply chains: Design, Deployment and Operation* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2018, s. 81-109 [cit. 2023-02-11]. ISBN 978-0-12-811197-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811197-0.00003-8
- [77] Vodík H₂: Nejčistší hořící a nejučinnější palivo. *Air Products* [online]. Allentown: Air Products, c1996-2023 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.airproducts.cz/gases/hydrogen#/>
- [78] Why high-pressure gas storage beats liquid Hydrogen. *Nproxx* [online]. Heerlen: Nproxx, c2022, 8th March 2022 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://www.nproxx.com/why-high-pressure-gas-storage-beats-liquid-hydrogen/>
- [79] HÉVIN, Grégoire. *Underground storage of hydrogen in salt caverns* [online]. Paris: Storengie, 2019 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://energnet.eu/wp-content/uploads/2021/02/3-Hevin-Underground-Storage-H2-in-Salt.pdf>
- [80] THIYAGARAJAN, Sukan Raj, Hossein EMADI, Athar HUSSAIN, Prathamesh PATANGE a Marshall WATSON. A comprehensive review of the mechanisms and efficiency of underground hydrogen storage. *Journal of energy storage* [online]. Elsevier, 2022, **51**, 104490 [cit. 2023-02-11]. ISSN 2352-152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2022.104490
- [81] LORD, Anna S., Peter H. KOBOS a David J. BORNS. Geologic storage of hydrogen: Scaling up to meet city transportation demands. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2014, **39**(28), 15570-15582 [cit. 2023-02-11]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2014.07.121
- [82] Selection of aquifers or depleted fields for pure hydrogen storage: a new (under)ground. In: *Hystories* [online]. Rueil-Malmaison: Geostock, c2020-2023 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://hystories.eu/selection-of-aquifers-or-depleted-fields-for-pure-hydrogen-storage-a-new-underground/>
- [83] Underground storage of renewable hydrogen in depleted gas fields and other geological stores. *CORDIS: EU Research results* [online]. Brusel: Evropská komise, 18 December 2019 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_FCH-02-5-2020
- [84] HADDAD, P. G, M RANCHOU-PEYRUSE, M GUIGNARD, et al. Geological storage of hydrogen in deep aquifers - an experimental multidisciplinary study. *Energy & environmental science* [online]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2022, **15**(8), 34-3415 [cit. 2023-02-11]. ISSN 1754-5692. Dostupné z: doi:10.1039/d2ee00765g
- [85] TARKOWSKI, R. a B. ULIASZ-MISIAK. Towards underground hydrogen storage: A review of barriers. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. Elsevier, 2022, **162**, 112451 [cit. 2023-02-11]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2022.112451
- [86] OČENÁŠKOVÁ, Adéla a Štefan NOVÁK. Kde se v Česku skladuje zemní plyn. Každý zásobník je unikát, jeden využívají Slováci. In: *Aktuálně.cz* [online]. Praha: Economia, c1999-2023, 20. 7. 2022 [cit. 2023-02-11]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/mapa-zasobniky-plynu-v-cesku/r~aa46490c040d11eda25a0cc47ab5f122/>
- [87] BOUDELAL, Méziane. *Power-to-gas: Renewable hydrogen economy*. Berlin: De Gruyter, 2018, 226 s. ISBN 978-3-11-055881-4. Dostupné také z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/vutbrno/detail.action?docID=5157882>

- [88] *Liquid hydrogen: Safetygram 9* [online]. Allentown: Air Products, 2014 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: <https://www.airproducts.com/company/sustainability/safetygrams>
- [89] SWANGER, Adam. World's Largest Liquid Hydrogen Tank Nears Completion. In: *Cryogenic society of America: The go-to place for cryogenics* [online]. Glen Ellyn: Cryogenic society of America, c2022, 6 May 2022 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: https://www.cryogenicsociety.org/index.php?option=com_dailyplanet-blog&view=entry&year=2022&month=05&day=05&id=48:world-s-largest-liquid-hydrogen-tank-nears-completion
- [90] RATNAKAR, Ram R., Nikunj GUPTA, Kun ZHANG, Casimir VAN DOORNE, James FESMIRE, Birol DINDORUK a Vemuri BALAKOTAIAH. Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation. *International journal of hydrogen energy* [online]. Elsevier, 2021, **46**(47), 24149-24168 [cit. 2023-02-13]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.05.025
- [91] CHATTERJEE, Sudipta, Rajesh Kumar PARSAPUR a Kuo-Wei HUANG. Limitations of Ammonia as a Hydrogen Energy Carrier for the Transportation Sector. *ACS Energy Lett.* [online]. Washington, D.C.: American chemical society, 2021, 15 November 2021, **6**(12), 4390-4394 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.1c02189>
- [92] MODISHA, Phillimon M, Cecil N. M OUMA, Rudaviro GARIDZIRAI, Peter WASERSCHIED a Dmitri BESSARABOV. The Prospect of Hydrogen Storage Using Liquid Organic Hydrogen Carriers. *Energy & fuels* [online]. WASHINGTON: American Chemical Society, 2019, **33**(4), 2778-2796 [cit. 2023-02-15]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/acs.energyfuels.9b00296
- [93] SHET, Sachin P., S. SHANMUGA PRIYA, K. SUDHAKAR a Muhammad TAHIR. A review on current trends in potential use of metal-organic framework for hydrogen storage [online]. 11782-11803 [cit. 2023-02-15]. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.01.020
- [94] *The future of hydrogen: Seizing today's opportunities* [online]. Revised version, July 2019. Paris: International energy agency, 2019 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [95] The ZEROe demonstrator has arrived: A giant leap towards zero-emission aircraft by 2035. In: *Airbus: Pioneering sustainable aerospace* [online]. Leiden: Airbus, c2023, 22 February 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-02-the-zeroe-demonstrator-has-arrived>
- [96] Why hydrogen as an aviation fuel is in for the long haul. In: *Aerospace testing international* [online]. Dartford: Mark Allen Group, c2020, 1 February 2023 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.aerospacetestinginternational.com/features/why-hydrogen-as-an-aviation-fuel-is-in-for-the-long-haul.html>
- [97] GUARCO, John, Bob LANGSTINE a Michael TURNER. Practical considerations for firing hydrogen versus natural gas. *Combustion engineering association* [online]. Sedgfield: Combustion engineering association, c2018 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://cea.org.uk/practical-considerations-for-firing-hydrogen-versus-natural-gas/>
- [98] HILL, Philip G. Combustion (Second Edition), by Irvin Glassman, Academic Press, Orlando, Florida, U.S.A., ISBN 0-12-285851-4, 501 pages, 1987. *Canadian journal of chemical engineering* [online]. Hoboken: Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, 1988, **66**(2), 350-351 [cit. 2023-02-19]. ISSN 0008-4034. Dostupné z: doi:10.1002/cjce.5450660231

- [99] SCHUMM, Brooke. Fuel Cell. In: *Encyklopedia Britannica* [online]. Chicago: The Britannica Group, c2022, 30 Aug 2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell>
- [100] DERVISOGLU, R. Scheme of a proton-conducting fuel cell. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 1 May 2012 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell#/media/File:Solid_oxide_fuel_cell_protonic.svg
- [101] SPIEGEL, Colleen. Introduction to Electrolyzers. In: *Fuel cell store* [online]. Bryan: Fuel cell store, c2023, 05. 10. 2021 [cit. 2023-02-20]. Dostupné z: <https://www.fuel-cellstore.com/blog-section/introduction-to-electrolyzers>
- [102] Fuel Cells. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- [103] *Comparison of Fuel Cell Technologies* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2016 [cit. 2022-10-30]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuel-cells/articles/comparison-fuel-cell-technologies-fact-sheet>
- [104] Types of Fuel Cells. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2022 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
- [105] Gore's Membrane Technology Enables Toyota's Second-Generation Fuel Cell Vehicle. In: *Gore: Improving lives through advanced materials* [online]. Newark: Gore, c2022, 10 December 2020 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.gore.com/news-events/press-release/gore-membrane-enables-toyota-second-generation-fuel-cell-vehicle>
- [106] Gore's Fuel Cell Technology Helps Power Latest Hyundai Fuel Cell Vehicle. In: *Gore: Improving lives through advanced materials* [online]. Newark: Gore, c2022, 26 February 2018 [cit. 2022-10-23]. Dostupné z: <https://www.gore.com/news-events/press-release/gore-s-fuel-cell-technology-helps-power-latest-hyundai-fuel-cell-vehicle>
- [107] ČSN ISO 14687. *Kvalita vodíkového paliva – Specifikace produktu*. 09/2020. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/>
- [108] SETHURAMAN, Vijay A. a John W. WEIDNER. Analysis of sulfur poisoning on a PEM fuel cell electrode. *Electrochimica acta* [online]. OXFORD: Elsevier, 2010, **55**(20), 5683-5694 [cit. 2022-10-23]. ISSN 0013-4686. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.05.004>
- [109] Fischer-Tropsch synthesis. *National energy technology laboratory* [online]. U.S. Department of energy [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasifipedia/ftsynthesis>
- [110] *H2.LIVE: Hydrogen Stations in Germany & Europe* [online]. Berlin: H2 MOBILITY Deutschland [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: <https://h2.live/en/>
- [111] HAFNER, Manfred a Giacomo LUCIANI. *The Palgrave Handbook of International Energy Economics*. Cham: Springer Nature, 2022. ISBN 9783030868840. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-86884-0
- [112] KAYFECI, Muhammet, Ali KEÇEBAŞ, Mutlucan BAYAT, a , ed. Chapter 3 – Hydrogen production. In: CALISE, Francesco, Massimo DENTICE D'ACCADIA, Massimo SANTARELLI, Andrea LANZINI a Domenico FERRERO. *Solar Hydrogen*

- Production: Processes, Systems and Technologies* [online]. Cambridge (Massachusetts): Academic press, 2019, s. 45–83 [cit. 2023-03-11]. ISBN 978-0-12-814853-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814853-2.00003-5>
- [113] SIMBECK, Dale R. a Elaine CHANG. SFA PACIFIC. *Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways – Scoping Analysis* [online]. Golden (Colorado): National Renewable Energy Laboratory, 2002 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: [doi:10.2172/15002482](https://doi.org/10.2172/15002482)
- [114] OCKO, Ilissa B a Steven P HAMBURG. Climate consequences of hydrogen emissions. *Atmospheric chemistry and physics* [online]. Katlenburg-Lindau: Copernicus, 2022, **22**(14), 9349-9368 [cit. 2023-01-31]. ISSN 1680-7324. Dostupné z: [doi:10.5194/acp-22-9349-2022](https://doi.org/10.5194/acp-22-9349-2022)
- [115] Fugitive emissions from piping and valves. In: SOTOODEH, Karan. *Prevention of Valve Fugitive Emissions in the Oil and Gas Industry* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2021, s. 37–65 [cit. 2023-02-04]. ISBN 978-0-323-91862-6. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91862-6.00002-2>
- [116] T is for Tank-to-wheel (TTW). *Volkswagen Newsroom* [online]. Wolfsburg: Volkswagen, c2023 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/t-is-for-tank-to-wheel-ttw-4865>
- [117] RINAWATI, Dyah Ika, Alexander Ryota KEELEY, Shutaro TAKEDA a Shunsuke MANAGI. A systematic review of life cycle assessment of hydrogen for road transport use. *Progress in Energy* [online]. 2021, **4**(1) [cit. 2023-03-12]. ISSN 2516-1083. Dostupné z: [doi:10.1088/2516-1083/ac34e9](https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac34e9)
- [118] IEA. Well-to-wheels greenhouse gas emissions for cars by powertrains. *IEA - International energy agency* [online]. Paris: IEA, c2023, 26 October 2022 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/well-to-wheels-greenhouse-gas-emissions-for-cars-by-powertrains>
- [119] PRUSSI, M, M YUGO, L DE PRADA, M PADELLA, R EDWARDS a L LONZA. *JEC well-to-tank report V5* [online]. Luxembourg: Publications Office, 2020, **30269** [cit. 2023-03-12]. ISBN 9789276199267. ISSN 1831-9424. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a857087a-fe0c-11ea-b44f-01aa75ed71a1/language-en>
- [120] Hydrogen Tank – FAQ Guide. *Hyfindr* [online]. Stuttgart: Hyfindr, c2023, 15. 1. 2023 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/hydrogen-tank/>
- [121] BHASKAR, Kannihalli, Jenoris Muthiya SOLOMON, Ravishankar SATHYAMURTHY, Shridhar ANAIMUTHU a Nadana Kumar VINAYAGAM. *A Review on PEM Fuel Cells Used for Automotive Applications, Models and Hydrogen Storage for Hybrid Electric Fuel Cell Vehicle*. 2020. ISSN 0148-7191. Dostupné z: [doi:10.4271/2020-01-5173](https://doi.org/10.4271/2020-01-5173)
- [122] Hydrogen fuel cell cars: Everything you need to know. *BMW* [online]. Mnichov: BMW, c2023, 5 December 2019 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://www.bmw.com/en/innovation/how-hydrogen-fuel-cell-cars-work.html>
- [123] VOELCKER, John. Hydrogen Fuel-Cell Vehicles: Everything You Need to Know. In: *Car and Driver* [online]. Ann Arbor: Hearst Digital Media, 26 September 2022 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/features/a41103863/hydrogen-cars-fcev/>
- [124] CANO, Zachary P., Dustin BANHAM, Siyu YE, Andreas HINTENNACH, Jun LU, Michael FOWLER a Zhongwei CHEN. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy* [online]. 2018, **3**(4), 279-289 [cit. 2023-03-05]. ISSN 2058-7546. Dostupné z: [doi:10.1038/s41560-018-0108-1](https://doi.org/10.1038/s41560-018-0108-1)

- [125] ČSN EN ISO 17268. *Plynný vodík – Spojovací zařízení pro doplňování paliva pro pozemní vozidla na plynný vodík*. Červenec 2022. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2022. Dostupné také z: <https://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [126] PARKS, George, R. BOYD, J. CORNISH a R. REMICK. *Hydrogen station compression, storage, and dispensing technical status and costs: Independent review* [online]. Golden (Colorado): National Renewable Energy Laboratory, 2014 [cit. 2023-03-05]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.23768.34562
- [127] JAMES, Will. FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE. *An Introduction to SAE Hydrogen Fueling Standardization* [online]. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2014 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/introduction-sae-hydrogen-fueling-standardization>
- [128] REDDI, Krishna, Amgad ELGOWAINY, Neha RUSTAGI a Erika GUPTA. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2017, 42(26), 16675-16685 [cit. 2023-03-15]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.04.233
- [129] 2022 Toyota Mirai Specs & Options. *Toyota* [online]. Toyota: Toyota Motor Company, c2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: https://www.toyota.com/mirai/features/mpg_other_price/3002/3003
- [130] *Hyundai NEXO: Technická data* [online]. Soul: Hyundai Motor Company, c2021 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.hyundai.com/cz/modely/nexo/ke-stazeni.html>
- [131] Introducing the NEXO: MyHyundai. *MyHyundai* [online]. Fountain Valley: Hyundai Motor America, c2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://owners.hyundaiusa.com/us/en/resources/getting-started/the-first-things-you-want-to-know-about-your-nexo.html>
- [132] Citroen e-Jumpy hydrogen on trial. *Vanguide* [online]. Liverpool: Auto Network (GB), c2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.vanguide.co.uk/news/citroen-e-jumpy-hydrogen-on-trial/>
- [133] Citroën dodal skupině SUEZ první e-Jumpy Hydrogen. In: *Stellantis: Media website* [online]. Hoofddorp: Stellantis, c2022, 13 pro 2021 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.media.stellantis.com/cz-cs/citroen/press/citroen-dodal-skupine-suez-prvni-e-jumpy-hydrogen>
- [134] Nový Peugeot e-Expert Hydrogen. In: *Stellantis: Media website* [online]. Hoofddorp: Stellantis, c2022, 27 kvě 2021 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.media.stellantis.com/cz-cs/peugeot/press/novy-peugeot-e-expert-hydrogen>
- [135] Opel Vivaro-e Hydrogen: Plug-In Fuel Cell Electric Vehicle Offers Zero Emissions and Quick Refuelling. In: *Stellantis: Media website* [online]. Hoofddorp: Stellantis, c2022, 17 May 2021 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.media.stellantis.com/em-en/opel/press/opel-vivaro-e-hydrogen-plug-in-fuel-cell-electric-vehicle-offers-zero-emissions-and-quick-refuelling>
- [136] Renault Master Van H2-Tech. *HYVIA* [online]. Villiers-Saint-Frédéric: HYVIA, c2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.hyvia.eu/en/vehicle/master-van-h2-tech/>
- [137] Renault Master Chassis Cab H2-Tech. *HYVIA* [online]. Villiers-Saint-Frédéric: HYVIA, c2023 [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.hyvia.eu/en/vehicle/master-chassis-cab-h2-tech/>
- [138] HYVIA back to Hyvolution with Renault Master Chassis Cab H2-TECH. In: *Renault Group global media website* [online]. Boulogne-Billancourt: Renault Group, c2022, 9

- May 2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://media.renaultgroup.com/hyvia-back-to-hyvolution-with-renault-master-chassis-cab-h2-tech/?lang=eng>
- [139] Hyundai and IVECO present the first fuel cell large van at IAA in Hannover as their partnership develops. In: *Hyundai* [online]. Soul: Hyundai Motor Company, c2022, 19. 9. 2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.hyundai.com/worldwide/en/company/newsroom/hyundai-and-iveco-present-the-first-fuel-cell-large-van-at-iaa-in-hannover-as-their-partnership-develops-0000016885>
- [140] *IVECO eDaily* [online]. Amsterdam: Iveco Group, c2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://edaily.iveco.com/en/>
- [141] *XCIENT Fuell Cell: e-Brochure* [online]. Soul: Hyundai Motor Company, c2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient-fuel-cell>
- [142] Hyundai Motor's XCIENT Fuel Cell Heavy-Duty Trucks to Hit German Roads. In: *Hyundai Motor Group* [online]. Soul: Hyundai Motor Group, c2022, 2 Aug 2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://www.hyundaimotorgroup.com/news/CONT0000000000046014>
- [143] Mercedes-Benz Trucks provides outlook on hydrogen-based GenH2 Truck at IAA Transportation 2022 in Hanover. In: *Daimler Truck: Global Media Site* [online]. Leinfelden-Echterdingen: Daimler Truck, c2022, 18 Sep 2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/ko/en/52032506>
- [144] Development milestone: Daimler Truck tests fuel-cell truck with liquid hydrogen. In: *Daimler Truck: Global Media Site* [online]. Leinfelden-Echterdingen: Daimler Truck, c2022, 27 Jun 2022 [cit. 2022-10-16]. Dostupné z: <https://media.daimlertruck.com/marsMediaSite/ko/en/51975637>
- [145] Costs and financing. *H2 Station Maps* [online]. West Sacramento: California fuel cell partnership [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://h2stationmaps.com/costs-and-financing>
- [146] BAUER, Artur, Thomas MAYER, Malte SEMMEL, Martin Alberto GUERRERO MORALES a Joerg WIND. Energetic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2019, **44**(13), 6795-6812 [cit. 2023-04-02]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.01.087
- [147] SCHNELL, Patrick. Refueling Station Layout. In: *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology* [online]. Weinheim, Germany, 2016, s. 891-916 [cit. 2023-04-02]. ISBN 9783527674268. Dostupné z: doi:10.1002/9783527674268.ch37
- [148] REDDI, Krishna, Amgad ELGOWAINY a Erika SUTHERLAND. Hydrogen refueling station compression and storage optimization with tube-trailer deliveries. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2014, **39**(33), 19169-19181 [cit. 2023-04-02]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2014.09.099
- [149] GENOVESE, Matteo, David BLEKHMANN, Crystal XIE, Michael DRAY a Petronilla FRAGIACOMO. Assuring pulsation-free flow in a directly pressurized fuel delivery at a retail hydrogen station. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2018, **43**(34), 16623-16637 [cit. 2023-04-02]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2018.07.024
- [150] FARZANEH-GORD, Mahmood, Mahdi DEYMI-DASHTEBAYAZ, Hamid Reza RAHBARI a Hamid NIAZMAND. Effects of storage types and conditions on

- compressed hydrogen fuelling stations performance. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2012, **37**(4), 3500-3509 [cit. 2023-05-16]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2011.11.017
- [151] Refueling Protocols for Medium and Heavy-Duty Vehicles. *CORDIS: EU Research results* [online]. Brusel: Evropská komise, 13 April 2022 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://cordis.europa.eu/programme/id/H2020_FCH-04-2-2019
- [152] *Fueling the Toyota Mirai* [online]. Revision date: February 2022. Toyota: Toyota Motor Corporation, 2022 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: https://www.toyota.com/content/dam/toyota/brochures/pdf/2022/mirai_fueling.pdf
- [153] LÉON, Aline. Hydrogen Storage. In: *Hydrogen Technology* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, s. 81-128 [cit. 2023-04-02]. Green Energy and Technology. ISBN 978-3-540-79027-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-540-69925-5_3
- [154] KHAN, Mohd Adnan, Cameron YOUNG, Catherine MACKINNON a David B. LA-YZELL. *The Techno-Economics of Hydrogen Compression: Technical Brief* [online]. 1. The Transition Accelerator, 2021 [cit. 2023-04-22]. ISSN 2564-1379. Dostupné z: <https://transitionaccelerator.ca/techbrief-techno-economics-hydrogen-compression/>
- [155] STETSON, N.T., S. MCWHORTER a C.C. AHN. Introduction to hydrogen storage. In: *Compendium of Hydrogen Energy* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2016, 2016, s. 3-25 [cit. 2023-04-02]. ISBN 9781782423621. Dostupné z: doi:10.1016/B978-1-78242-362-1.00001-8
- [156] ELGOWAINY, Amgad, Krishna REDDI, Dong-yeon LEE, Neha RUSTAGI a Erika GUPTA. Techno-economic and thermodynamic analysis of pre-cooling systems at gaseous hydrogen refueling stations. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2017, **42**(49), 29067-29079 [cit. 2023-05-16]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2017.09.087
- [157] *Aktualizace Národního akčního plánu čisté mobility* [online]. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, Ministerstvo dopravy, Ministerstvo životního prostředí, 2020 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility-254445/>
- [158] Weiterbetrieb der Wasserstofftankstelle Industriepark Höchst. *NOW-GMBH.DE* [online]. Berlin: NOW [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/industriepark-hoechst/>
- [159] Eerste waterstof tankstation Air Liquide Rhoon. *Hoppenbrouwers Techniek* [online]. Udenhout: Hoppenbrouwers Techniek [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.hoppenbrouwerstechniek.nl/projecten/eerste-waterstof-tankstation-air-liquide-rhoon/>
- [160] Hydrogen Refuelling Station Antwerp. *CMB.TECH* [online]. Antwerpen: CMB.TECH, c2023 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://cmb.tech/business-units/h2-infra/antwerp-refuelling-station>
- [161] Groene waterstof. *Waterstofgate: Op naar een parlementaire enquête?* [online]. [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://waterstofgate.nl/Waterstof/Groene-waterstof/>
- [162] Taking a taxi in Paris: Now with hydrogen!. In: *FuelCellsWorks* [online]. Montreal: Fuel cells works, c1999-2023, 29 March 2019 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://fuelcellworks.com/news/taking-a-taxi-in-paris-now-with-hydrogen/>
- [163] ENZ, Kaspar. Avia Osterwalder eröffnet zweite Wasserstoff-Tankstelle in der Region St. Gallen. In: *Tagblatt* [online]. St. Gallen: St. Galler Tagblatt, 23 March 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.tagblatt.ch/wirtschaft/dekarbonisierung->

- avia-osterwalder-eroeffnet-zweite-wasserstoff-tankstelle-in-der-region-stgallen-
id.2267007
- [164] KAIDL, Pavel. *Plnicí vodíková stanice ORLEN Benzina* [fact sheet pro novináře]. Praha: ORLEN Benzina, 2023.
- [165] Otevíráme novou vodíkovou stanicí. *Vítkovice, a.s.* [online]. Ostrava: Vítkovice, 26. 6. 2022 [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://www.vitkovice.cz/otevirame-novou-vodikovou-stanici/a-364/>
- [166] *HRS Availability Map* [online]. Brussels: Clean Hydrogen Partnership [cit. 2023-04-02]. Dostupné z: <https://h2-map.eu/>
- [167] MAYER, Thomas, Malte SEMMEL, Martin Alberto GUERRERO MORALES, Karla Maria SCHMIDT, Artur BAUER a Joerg WIND. Techno-economic evaluation of hydrogen refueling stations with liquid or gaseous stored hydrogen. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier, 2019, **44**(47), 25809-25833 [cit. 2023-04-16]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.08.051
- [168] ČSN ISO 19880-1. *Plynný vodík – Čerpací stanice – Část 1: Obecné požadavky*. 09/2020. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/>
- [169] ČISAŘOVÁ, Petra. Jako první v Evropě provedeme testovací jízdy vodíkových dodávek. In: *Zásilkovna* [online]. Praha: Zásilkovna, c2022, 23. 9. 2022 [cit. 2022-10-22]. Dostupné z: <https://www.zasilkovna.cz/blog/jako-prvni-v-evrope-provedeme-testovaci-jizdy-vodikovych-dodavek>
- [170] *Plnicí stanice stlačeného vodíku pro mobilní zařízení: Refuelling compressed gaseous hydrogen stations for mobile device : TPG G 304 03 : schválena dne: 19.5.2020* [online]. [Praha]: Český plynárenský svaz, [2020] [cit. 2023-04-15]. Technická pravidla. ISBN 978-80-87992-67-8.
- [171] PRATT, Joseph, Danny TERLIP, Chris AINSCOUGH, Jennifer KURTZ a Amgad ELGOWAINY. *H2FIRST Reference Station Design Task: Project Deliverable 2-2* [online]. Golden (Colorado): National Renewable Energy Laboratory, 2015 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/64107.pdf>
- [172] HECHT, Ethan S. a Joseph PRATT. *Comparison of conventional vs. modular hydrogen refueling stations, and on-site production vs. delivery* [online]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2017 [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/comparison-conventional-vs-modular-hydrogen-refueling-stations-and-site>
- [173] *Hyfindr* [online]. Stuttgart: Hyfindr, c2023 [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/>
- [174] Hydrogen Storage Systems. *Hyfindr* [online]. Stuttgart: Hyfindr, c2023 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/product-category/systems/hydrogen-storage-systems/>
- [175] Hydrogen Type 4 Cylinder 700 bar 51 L. *Hyfindr* [online]. Stuttgart: Hyfindr, c2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://hyfindr.com/marketplace/components/hydrogen-tanks/hydrogen-type-4-cylinder-700-bar-51l/>
- [176] ELGOWAINY, A. a K. REDDI. *DOE hydrogen and fuel cells program. Annual merit review. Hydrogen fueling station pre-cooling analysis*. Washington D.C.: U.S. Department of energy, 2015.
- [177] VAN LEEUWEN, Charlotte a Andreas ZAUNER. *Innovative large-scale energy storage technologies and Power-to-Gas concepts after optimisation: Report on the costs involved with PtG technologies and their potentials across the EU* [online]. V1.7. Brusel: Evropská komise, 2018 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: doi:10.3030/691797

- [178] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Význam |
|-----------------|--|
| AA | Aluminum association |
| AEL | Alkalický elektrolyt |
| AFC | Palivový článek s alkalickým elektrolytem |
| AISI | American iron and steel institute |
| API | American petroleum institute |
| ASTM | American society for testing and materials |
| BE | Biomasové elektrárny |
| BEV | Bateriové elektrické vozy |
| BG | Zplyňování biomasy |
| BLDC | Bezkartáčový stejnosměrný motor |
| CAPEX | Kapitálové náklady |
| CCS | Zachytávání a ukládání oxidu uhličitého |
| CG | Zplyňování uhlí |
| CNG | Stlačený zemní plyn |
| ČSN | Česká technická norma |
| EN | Evropská norma |
| FCEV | Elektrický vůz s palivovým článkem |
| HB | Tvorba puchýřků |
| HE | Vodíkové křehnutí |
| HEV | Hybridní pohon |
| HF | Tvorba hydridů |
| HIC | Vodíkem vyvolané praskání |
| HTHA | Vysokoteplotní napadání vodíkem |
| CH ₂ | Stlačený vodík |
| ICE | Motor s vnitřním spalováním |
| IEA | Mezinárodní energetická agentura |
| ISO | Mezinárodní organizace pro normalizaci |
| LH ₂ | Zkapalněný vodík |
| LNG | Zkapalněný zemní plyn |
| LOHC | Kapalné organické nosiče vodíku |
| LPG | Zkapalněný ropný plyn |
| MCFC | Palivový článek s roztavenými uhličitany |
| NE | Jaderné elektrárny |
| OPEX | Provozní náklady |
| OZE | Obnovitelný zdroj energie |
| PAFC | Palivový článek s kyselinou fosforečnou |
| PEM | Polymerní membrána |
| PEMFC | Palivový článek s polymerní membránou |
| PHEV | Plug-in hybridní pohon |
| PVE | Fotovoltaické elektrárny |

| | |
|------|--------------------------------|
| SMR | Parní reforming zemního plynu |
| SOEL | Tuhé oxidy |
| SOFC | Palivový článěk s tuhými oxidy |
| USA | Spojené státy americké |
| WE | Větrné elektrárny |
| WTT | Well to tank |
| WTW | Well to wheel |
| ZP | Zemní plyn |

| Symbol | Veličina | Jednotka |
|---------------|---|--|
| c_{PAL} | Měrná tepelná kapacita hliníku | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| c_{PH2} | Měrná tepelná kapacita vodíku | $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ |
| C_{naA} | Měrné pořizovací náklady akumulátoru | $\text{€}\cdot\text{kg}_{H2}^{-1}$ |
| COP_C | Chladicí faktor chladicí jednotky | – |
| E_{CM} | Měrná energetická náročnost chlazení | $\text{kWh}\cdot\text{kg}_{H2}^{-1}$ |
| E_{CR} | Roční spotřeba energie chladícího zařízení | $\text{kWh}\cdot\text{rok}^{-1}$ |
| E_{KR} | Roční spotřeba energie kompresoru | $\text{kWh}\cdot\text{rok}^{-1}$ |
| E_{SR} | Roční spotřeba energie stanice | $\text{MWh}\cdot\text{rok}^{-1}$ |
| $E_{nergieK}$ | Roční náklady elektromotoru pro pohon kompresoru na elektrickou energii | $\text{€}\cdot\text{rok}^{-1}$ |
| k | Poissonova konstanta | – |
| m_A | Skutečná kapacita akumulátoru | kg |
| m_{A1} | Skutečná kapacita první tlakové nádoby akumulátoru | kg |
| m_{AUM} | Minimální užitečná kapacita akumulátoru | kg |
| m_{AUM1} | Minimální užitečná kapacita první tlakové nádoby akumulátoru | kg |
| m_{AUMX} | Minimální užitečná kapacita X. tlakové nádoby akumulátoru | kg |
| m_{AX} | Skutečná kapacita X. tlakové nádoby akumulátoru | kg |
| m_{CB} | Hmotnost hliníkového bloku | kg |
| m_{CBM} | Minimální hmotnost hliníkového bloku | kg |
| M_{H2} | Molární hmotnost molekuly vodíku | $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ |
| \dot{m}_K | Hmotnostní tok vodíku kompresorem | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| m_P | Denní či týdenní potřeba vodíku | kg |
| m_{P1} | Denní potřeba vodíku jednoho vozidla | kg |
| m_R | Množství vodíku v jednodenní rezervě | kg |
| m_S | Denní / týdenní spotřeba vodíku | kg |
| m_{S1} | Denní spotřeba vodíku jednoho vozidla | kg |
| \dot{m}_T | Hmotnostní tok vodíku do nádrže vozidla při tankování | $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| m_{T1} | Množství vodíku tankované do vozidla při první fázi plnění | kg |
| m_{T2} | Množství vodíku tankované do vozidla při druhé fázi plnění | kg |
| m_{T3} | Množství vodíku tankované do vozidla při třetí fázi plnění | kg |

| | | |
|---------------------|--|--------------------------------|
| m_{TX} | Množství vodíku tankované do vozidla při X. fázi plnění | kg |
| m_V | Kapacita nádrže ve vozidle | kg |
| m_{VZ} | Zbývající množství vodíku v nádrži vozidla | kg |
| m_Z | Skutečná kapacita zásobníku | kg |
| m_{ZB} | Skutečná kapacita zásobníku při běžné teplotě | kg |
| m_{ZUM} | Minimální užitečná kapacita zásobníku | kg |
| m_{ZZ} | Zbývající množství vodíku v zásobníku | kg |
| N_K | Skutečný počet stupňů kompresoru | – |
| \dot{n}_K | Tok látkového množství vodíku kompresorem | $\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| N_{KM} | Minimální počet stupňů kompresoru | – |
| N_V | Počet plněných vozidel za jednu hodinu | – |
| N_{VD} | Počet plněných vozidel za jeden den | – |
| $N_{\text{ákup}_A}$ | Pořizovací náklady akumulátoru | € |
| $N_{\text{ákup}_C}$ | Pořizovací náklady chladícího zařízení | € |
| $N_{\text{ákup}_K}$ | Skutečné pořizovací náklady kompresoru | € |
| P_{0C} | Jmenovitý elektrický příkon chladící jednotky | kW |
| P_{0M} | Jmenovitý elektrický příkon elektromotoru pro pohon kompresoru | kW |
| P_{0MB} | Elektrický příkon elektromotoru pro pohon kompresoru za běžných podmínek | kW |
| P_{0S} | Doporučená kapacita elektrické přípojky | kW |
| P_{0SM} | Minimální kapacita elektrické přípojky | kW |
| p_{AJM} | Jmenovitý tlak vodíku v akumulátoru | bar |
| p_{AJM1} | Jmenovitý tlak vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| p_{AMIN} | Dolní mezní tlak vodíku v akumulátoru | bar |
| p_{AMIN1} | Dolní mezní tlak vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| p_{AS1} | Střední tlak vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| p_{AS2} | Střední tlak vodíku ve druhé tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| p_{AS3} | Střední tlak vodíku ve třetí tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| p_{ASX} | Střední tlak vodíku v X. tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| p_{BJM} | Jmenovitý tlak vodíku v bufferu | bar |
| p_{BMIN} | Minimální tlak vodíku v bufferu | bar |
| P_{CJ} | Chladicí výkon chladící jednotky | kW |
| P_{CJM} | Minimální chladicí výkon chladící jednotky | kW |
| P_K | Mechanický výkon kompresoru | kW |
| P_{KM} | Minimální mechanický výkon kompresoru | kW |
| P_{KMB} | Minimální mechanický výkon kompresoru za běžných podmínek | kW |
| p_{KP} | Průměrný tlak vodíku při kompresi | bar |
| p_{KS} | Tlak vodíku na sání kompresoru | bar |
| p_{KSB} | Tlak vodíku na sání kompresoru při běžném provozu | bar |

| | | |
|-----------------|--|---------------------------------|
| p_{KV} | Tlak vodíku na výtlaku kompresoru | bar |
| p_{KVB} | Běžný tlak na výtlaku kompresoru | bar |
| p_{MIN} | Nejnižší tlak | bar |
| p_{VK} | Tlak vodíku v nádrži vozidla na konci fáze plnění | bar |
| p_{VZ} | Tlak zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla | bar |
| p_{ZJM} | Jmenovitý tlak vodíku v zásobníku | bar |
| p_{ZS} | Střední tlak vodíku v zásobníku | bar |
| p_{ZZ} | Tlak zbývajících množství vodíku v zásobníku | bar |
| PN_B | Pořizovací náklady na hliníkový blok | \$ |
| PN_C | Pořizovací náklady na chladicí jednotku | \$ |
| PN_{K1} | Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [154] | \$ |
| PN_{K2} | Pořizovací náklady kompresoru dle zdroje [167] | \$ |
| R | Molární plynová konstanta | $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ |
| R_m | Mez pevnosti materiálu | MPa |
| T_B | Běžná teplota | $^{\circ}C$ |
| T_C | Teplota vodíku na výstupu z chladicího zařízení | $^{\circ}C$ |
| T_{KP} | Průměrná teplota vodíku při kompresi | $^{\circ}C$ |
| t_{KR} | Roční doba provozu kompresoru | $h \cdot rok^{-1}$ |
| T_{KS} | Teplota vodíku na sání kompresoru | $^{\circ}C$ |
| T_{KV} | Teplota vodíku na výtlaku kompresoru | $^{\circ}C$ |
| T_{MAX} | Horní mezní návrhová teplota | $^{\circ}C$ |
| T_{MIN} | Dolní mezní návrhová teplota | $^{\circ}C$ |
| T_N | Normální teplota | $^{\circ}C$ |
| t_p | Doba plnění nádrže vozidla / akumulátoru | min |
| t_{PT} | Doba současného plnění a vyprazdňování akumulátoru | s |
| t_v | Udaná doba plnění nádrže vozidla | min |
| V_A | Objem akumulátoru | m^3 |
| V_{AM} | Minimální objem akumulátoru | m^3 |
| V_{AM1} | Minimální objem první tlakové nádoby akumulátoru | m^3 |
| V_{AMX} | Minimální objem X. tlakové nádoby akumulátoru | m^3 |
| V_V | Objem nádrže vozidla | m^3 |
| V_Z | Objem zásobníku | m^3 |
| V_{ZM} | Minimální objem zásobníku | m^3 |
| X | Kompresní poměr jednoho stupně kompresoru | – |
| Z | Kompresibilitní faktor | – |
| Δp_{A1} | Rozdíl jmenovitého a dolního mezního tlaku vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru | bar |
| Δp_{AX} | Rozdíl mezi jmenovitým a dolním mezním tlakem v X. tlakové nádobě akumulátoru | bar |

| | | |
|-----------------|--|--------------------|
| Δp_B | Rozdíl mezi jmenovitým a minimálním tlakem vodíku v bufferu | bar |
| Δp_V | Rozdíl mezi tlakem na výtlaku kompresoru a tlakem zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla | bar |
| Δp_Z | Rozdíl mezi jmenovitým tlakem a tlakem zbývajících množství vodíku v zásobníku | bar |
| ΔT_C | Dovolené oteplení hliníkového bloku | °C |
| η_E | Účinnost elektromotoru | – |
| η_{KI} | Isentropická účinnost komprese | – |
| ρ_{AJMH} | Hustota vodíku v akumulátoru při jmenovitém tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AJMH1} | Hustota vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru při jmenovitém tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AJMHX} | Hustota vodíku v X. tlakové nádobě akumulátoru při jmenovitém tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AJMN} | Hustota vodíku v akumulátoru při jmenovitém tlaku a normální teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AJMN1} | Hustota vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru při jmenovitém tlaku a normální teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AJMNX} | Hustota vodíku v X. tlakové nádobě akumulátoru při jmenovitém tlaku a normální teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AMINH} | Hustota vodíku v akumulátoru při dolním mezním tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AMINH1} | Hustota vodíku v první tlakové nádobě akumulátoru při dolním mezním tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{AMINHX} | Hustota vodíku v X. tlakové nádobě akumulátoru při dolním mezním tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{VJMN} | Hustota vodíku v nádrži vozidla při jmenovitém tlaku a normální teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{VK1} | Hustota vodíku v nádrži vozidla na konci první fáze plnění | kg·m ⁻³ |
| ρ_{VKX} | Hustota vodíku v nádrži vozidla na konci X. fáze plnění | kg·m ⁻³ |
| ρ_{VZ} | Hustota zbývajících množství vodíku v nádrži vozidla | kg·m ⁻³ |
| ρ_{VZ1} | Hustota vodíku v nádrži vozidla na začátku první fáze plnění | kg·m ⁻³ |
| ρ_{VZX} | Hustota vodíku v nádrži vozidla na začátku X. fáze plnění | kg·m ⁻³ |
| ρ_{ZJM} | Hustota vodíku v zásobníku při jmenovitém tlaku a horní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{ZJMB} | Hustota vodíku v zásobníku při jmenovitém tlaku a běžné teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{ZJMN} | Hustota vodíku v zásobníku při jmenovitém tlaku a normální teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{ZMIN} | Hustota vodíku v zásobníku při nejnižším tlaku a dolní mezní návrhové teplotě | kg·m ⁻³ |
| ρ_{ZZ} | Hustota zbývajících množství vodíku v zásobníku | kg·m ⁻³ |