



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ÚSTAV SOUDNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF FORENSIC ENGINEERING

ODBOR ZNALECTVÍ VE STROJÍRENSTVÍ, ANALÝZA DOPRAVNÍCH NEHOD A OCEŇOVÁNÍ MOTOROVÝCH VOZIDEL

DEPARTMENT OF EXPERTISE IN MECHANICAL ENGINEERING, ANALYSIS OF TRAFFIC ACCIDENTS AND
VEHICLE ASSESSMENT

VYTVOŘENÍ MODELU SÍTĚ VODÍKOVÝCH PLNICÍCH STANIC NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY

CREATION OF A MODEL OF THE HYDROGEN FILLING STATION NETWORK IN THE CZECH REPUBLIC

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Kotrla

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Maxera, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Kotrla**
Studijní program: **Expertní inženýrství v dopravě**
Studijní obor: **bez specializace**
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Maxera, Ph.D.**
Akademický rok: **2023/24**
Ústav/odbor: **Odbor znalectví ve strojírenství, analýza dopravních nehod a oceňování motorových vozidel**

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:

Vytvoření modelu sítě vodíkových plnicích stanic na území České republiky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat problematikou rozšiřování technologie vodíkového pohonu vozidel. Budou zkoumány relevantní technické parametry vodíkových vozidel a ekonomické a technické aspekty, související s výstavbou vodíkových plnicích stanic. Z takto získaných poznatků bude pomocí vhodného simulačního softwaru vytvořen model sítě vodíkových plnicích stanic na území České republiky.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce bude zpracovat rešerši současného stavu poznání o uplatnění vodíkové technologie, jakožto typu pohonu pro osobní i nákladní vozidla. Následně budou zmapovány počty vozidel s tímto typem pohonu a pro ně vybudované zázemí a také budou posouzeny ekonomické faktory a technické požadavky vodíkových plnicích stanic. Na základě těchto poznatků bude vytvořen vhodný model sítě vodíkových plnicích stanic.

Seznam literatury:

JANÍČEK, Přemysl. Systémová metodologie: brána do řešení problémů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.

CELLIER, François E. a Ernesto KOFMAN. Continuous System Simulation [online]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006. ISBN 0-387-26102-8. DOI:10.1007/0-387-30260-3.

SARJOUGHIAN, Hessam S. a François E. CELLIER, ed. Discrete Event Modeling and Simulation Technologies [online]. New York, NY: Springer New York, 2001. ISBN 978-1-4419-2868-9. DOI:10.1007/978-1-4757-3554-3.

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

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Bc. Marek Semela, Ph.D.
vedoucí odboru

prof. Ing. Karel Pospíšil, Ph.D., LL.M.
ředitel

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou vodíkových vozidel, jakožto jednou z alternativ klasických vozidel se spalovacími motory. Práce nejdříve zkoumá fungování vodíkové technologie, její infrastruktury a vlivů okolí, s cílem přiblížit její budoucí vývoj. Ten se odvíjí zejména od průzkumu budoucího počtu vodíkových vozidel. Pro ty musí být zajištěna dostatečná kapacita paliva. Proto musí být vyráběno dostatečné množství vodíku, které bude distribuováno na plnicí stanice, kterých musí být rovněž dostatečný počet. Hlavním cílem práce je tedy navrhnout model distribuční sítě, která bude schopná zajistit tyto požadavky. Výsledky práce jsou verifikovány pomocí simulačního modelování pro ověření funkčnosti navrženého modelu distribuční sítě.

Abstract

The diploma thesis deals with the issue of hydrogen vehicles, as one of the alternatives to classic vehicles with internal combustion engines. The work first researches the functioning of hydrogen technology, its infrastructure and influences of the third parties, with the aim of taking a closer look of its future development. This mainly depends on the research of the future number of hydrogen vehicles. Sufficient capacity of fuel must be ensured for them. That's why a sufficient amount of hydrogen must be produced, which will be distributed to filling stations. There also needs to be enough of them. The main goal of the work is to design a distribution network model that will be able to ensure these requirements. The results of the work are verified using simulation modeling to verify the functionality of the proposed distribution network model.

Klíčová slova

Vodík, vodíková vozidla, vodíkové plnicí stanice, infrastruktura, simulační modelování

Keywords

Hydrogen, hydrogen vehicles, hydrogen filling stations, infrastructure, simulation modeling

Citace elektronického zdroje:

KOTRLA, Tomáš. *Vytvoření modelu sítě vodíkových plnicích stanic na území České republiky* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-30]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153174>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Odbor znalectví ve strojírenství, analýza dopravních nehod a oceňování motorových vozidel. Vedoucí práce Pavel Maxera.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vytvoření modelu sítě vodíkových plnicích stanic na území České republiky“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně

.....

Podpis autora

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat v první řadě vedoucímu této diplomové práce, panu Ing. Pavlovi Maxerovi, Ph.D., za jeho odborné konzultace a rady, během jejího zpracování. Dále pak panu Ing. Adamovi Giurgovi, Ph.D., ze společnosti ORLEN UniCRE, za poskytnutí informací ohledně fungování vodíkových plnicích stanic, které byly velmi podstatné pro tvorbu simulačního modelu. V poslední řadě pak panu Ing. Christopherovi Koglerovi, Ph.D., z univerzity BOKU ve Vídni, za poskytnutí rad, jakým způsobem přistupovat ke tvorbě simulačního modelu.

OBSAH

OBSAH.....	13
1 ÚVOD	15
2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU.....	16
2.1 Vodík a jeho vlastnosti.....	16
2.2 Bezpečnost vodíku	17
2.3 Technologie vodíkového pohonu.....	20
2.4 Rozšíření technologie vodíkového pohonu	22
2.5 Infrastruktura a distribuce	24
2.6 Ekonomické a právní aspekty	27
2.7 Shrnutí analýzy současného stavu.....	29
3 FORMULACE PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ.....	31
4 ŘEŠENÍ	32
4.1 Vymezení limitujících faktorů a kvantifikace vstupních veličin	32
4.1.1 <i>Limitující faktory</i>	32
4.1.2 <i>Kvantifikace vstupních veličin</i>	35
4.2 Varianty vytvořených modelů distribuční sítě	37
4.3 Predikce vývoje počtu provozovaných vodíkových vozidel	37
4.4 Stanovení dostatečného počtu plnicích stanic a výroben vodíku	43
4.4.1 <i>Stanovení dostatečného počtu plnicích stanic</i>	43
4.4.2 <i>Stanovení dostatečného počtu výroben vodíku</i>	48
5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ A VERIFIKACE VÝSLEDKŮ.....	53
5.1 Dosažené výsledky řešení	53
5.1.1 <i>Návrh modelu distribuční sítě</i>	53
5.1.2 <i>Varianta modelu distribuční sítě č. 1</i>	55
5.1.3 <i>Varianta modelu distribuční sítě č. 2</i>	56
5.1.4 <i>Varianta modelu distribuční sítě č. 3</i>	59
5.2 Verifikace dosažených výsledků	61
5.2.1 <i>Metoda verifikace výsledků</i>	61
5.2.2 <i>Verifikace výsledků varianty modelu distribuční sítě č. 1</i>	64
5.2.3 <i>Verifikace výsledků varianty modelu distribuční sítě č. 2</i>	66
5.2.4 <i>Verifikace výsledků varianty modelu distribuční sítě č. 3</i>	68
5.2.5 <i>Shrnutí verifikace výsledků všech variant</i>	70
6 DISKUZE.....	71

7 ZÁVĚR	73
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	75
SEZNAM TABULEK.....	80
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	81
SEZNAM ZKRATEK	82
SEZNAM PŘÍLOH.....	84

1 ÚVOD

V současné době můžeme v automobilovém průmyslu pozorovat významný trend, kdy jednotlivé automobilky postupně ustupují od vývoje vozidel se spalovacími motory. Příčinou tohoto trendu je zejména stále větší důraz kladený na snižování emisí, což vede k podstatnému nárůstu vývoje vozidel s alternativními pohony. Ty při svém provozu neprodukují žádné emise a mají tak napomocť dlouhodobému cíli, dosažení uhlíkové neutrality. Prozatím jsou touto technologií zejména elektromobily, u kterých můžeme pozorovat významnou snahu o jejich zdokonalení. To se nejvíce projevuje u vývoje baterií, které těmto vozidlům umožňují stále větší dojezd, kratší dobu nabíjení a v neposlední řadě také delší životnost a snížení nákladů na jejich výrobu.

Jako další alternativa se nabízí technologie vodíkového pohonu, která však není prozatím natolik rozvinutá, jako elektromobily. Vozidla s touto technologií v současné době vyrábí zatím pouze několik automobilek, které nabízejí jen několik modelů. Nicméně v budoucnu lze očekávat významný nárůst počtu těchto vozidel, jakožto další ekologické alternativy. Z tohoto důvodu se na ně tato práce zaměřuje, s cílem přiblížit jejich problematiku, se kterou neodmyslitelně souvisí také jejich infrastruktura. Aby mohl být umožněn významný nárůst jejich počtů, musí být nejdříve vyřešena řada problémů týkajících se jejich provozování.

Z hlediska ekologie vodík, jakožto palivo, neprodukuje žádné emise. Avšak to ještě neznamená, že je zcela bezemisní. Záleží totiž na způsobu jeho výroby a logistiky, protože aby byl vodík zcela bezemisní, musí být k jeho výrobě a dalším logistickým procesům použito zelených zdrojů energie, což je při energetické náročnosti výrobního procesu a uchování vodíku v požadované formě poměrně problematické. S tím se dále pojí velice podstatný problém vysoké ceny tohoto paliva a nedostatečně rozvinutá infrastruktura. V současnosti je totiž síť vodíkových plnicích stanic v ČR ve svých prvopočátcích a míst, kde se dá vodíkové palivo doplnit, je jen málo. Dalšímu rozšíření také nepomáhá stále vysoká cena takovýchto vozidel, přičemž pro mnohé může být také odrazující problematika bezpečnosti. Na tyto problémy se práce zaměří prostřednictvím rešerše, na kterou bude dále navázáno návrhem modelu distribuční sítě, který bude zkoumat potřebné kapacity pro budoucí rozvoj sítě.

2 ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU

Analýza současného stavu se zabývá problematikou vodíkového paliva, nejdříve obecněji a poté podrobněji s cílem prozkoumat současnou situaci možností uplatnění vodíku. Podrobněji je zkoumáno uplatnění vodíkového paliva pro osobní vozidla, přičemž je také zmapováno, nakolik je již vybudovaná potřebná infrastruktura. Zkoumány jsou rovněž vlastnosti vodíku jako paliva a rozdílné charakteristiky při jeho použití ve srovnání s ostatními technologiemi pohonu vozidel. V návaznosti na ně je řešena otázka bezpečnosti vodíkové technologie a princip jejího fungování. V rámci analýzy jsou rovněž zmapovány počty vodíkových vozidel a vodíkových plnicích stanic (dále jen PS), tedy současné podoby infrastruktury vodíkové distribuční sítě. Závěrem je tato analýza doplněna o ekonomické a právní aspekty.

2.1 VODÍK A JEHO VLASTNOSTI

Vodík, jak je všeobecně známo, je prvním prvkem periodické tabulky prvků. Jeho název je latinsky Hydrogenium a značí se písmenem H. Jelikož se jedná o první, a tedy nejjednodušší chemický prvek, je to nejčastěji se vyskytující prvek ve vesmíru. V přírodě se běžně nevyskytuje v elementární formě a je vázán ve formě molekul, či jiných sloučenin. V následujících podkapitolách jsou popsány jeho základní charakteristiky. [1]

Fyzikální a chemické vlastnosti

Elementární vodík se vyskytuje v plynném skupenství, jakožto bezbarvý plyn, který nemá žádný zápach nebo chuť. Jedná se o nejllehčí prvek vůbec a je přibližně 14krát lehčí než vzduch. Vodík je vysoce hořlavý a pro jeho hoření je typický plamen modré barvy. K jeho zkapalnění dochází až při velmi nízkých teplotách, blížících se absolutní nule. [2]

Při tvorbě sloučenin je u vodíku typická jeho schopnost tvořit zvláštní vazbu, nazývanou tzv. vodíkový můstek. Vodík též tvoří mimořádně silnou vazbu s atomy kyslíku. S výjimkou vzácných plynů je schopen vytvářet sloučeniny se všemi prvky. Dále je vodík schopen v reakci s některými vzácnými kovy působit jako katalyzátor reakcí, a to díky schopnosti jeho malých molekul procházet jinými materiály. [1]

Přirozený výskyt

Ačkoliv je vodík základním a nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru, v zemských podmínkách se elementární vodík téměř nevyskytuje, s výjimkou vulkanicky aktivních oblastí. Nejčastěji se vodík v přírodě vyskytuje v podobě sloučenin molekuly H_2 . [2]

Podstatné jsou také jeho sloučeniny vyskytující se v zemním plynu a uhelných ložiscích. Voda, která pokrývá přibližně 2/3 povrchu země, je jeho nejvíce zastoupená sloučenina. Dále je také součástí široké řady nejrůznějších sloučenin, ze kterých jsou velice podstatné organické sloučeniny. Vodík spadá do tzv. biogenních prvků, mezi které se řadí zejména uhlík, kyslík a dusík, přičemž tyto prvky tvoří základy pro stavbu živých organismů. Jeho výroba může být termochemická nebo elektrochemická. Na rozdíl od ostatních forem obnovitelných zdrojů může být vyráběn a ukládán v různých formách. [1], [3]

Využití

Pro vodík existuje celá řada širokých uplatnění v chemickém průmyslu. Podstatné je jeho využití jakožto redukčního činidla v chemické výrobě a při metalurgickém zpracování. Dále se vodík používá k výrobě množství organických sloučenin. Též je klíčový pro zpracování ropných produktů v rafinériích, při přeměně těžkých ropných uhlovodíků na lehké. Vodík se také využívá při sváření, či řezání kovů, kdy kyslíkově-vodíkový plamen vyvíjí teploty přes 3000 °C. Také se dá využívat jako chladivo a dříve byl používán v letectví u balonů a vzducholodí. V současnosti je používán jako raketové palivo díky jeho vysokému obsahu energie při nízké hmotnosti. [1], [4]

Pro účely této práce jsou nejvýznamnější možnosti jeho využití v energetice a dopravě, kde se stále více rozvíjí možnosti jeho uplatnění. Zásadní roli totiž hraje ekologická stránka, kdy při spalování vodíku vzniká pouze voda a nejsou tak produkovány žádné škodlivé látky. Vodík je tedy celosvětově shledáván jako pozitivní náhrada za ropu a jako nadějně palivo budoucnosti. V současnosti probíhá intenzivní výzkum vodíkového pohonu v automobilovém průmyslu, a to především z důvodu čím dál přísnějších emisních opatření. [1]

Velmi podstatnou roli hraje problematika jeho bezpečnosti, která bude podrobněji řešena v následující **kap. 2.2.**

2.2 BEZPEČNOST VODÍKU

Jak už bylo zmíněno v **kap. 2.1**, vodík je vysoce vznětlivým prvkem, což při jeho uchování a transportování vyvolává celou řadu podstatných rizik, které vedou k vysokým nárokům na bezpečnost takovýchto zařízení. Z ekologického hlediska je vodík nadějnou odpovědí na dlouhodobý problém skleníkových plynů a emisí. Není toxický a oproti fosilním zdrojům poskytuje lepší energetickou hustotu a zároveň je mnohem čistější. Avšak problém činí bezpečnost při jeho uchování a transportu. Zejména problematické je jeho intenzivní hoření, při kterém může dojít i k výbuchům. Vznětová teplota vodíku činí 585 °C. [3]

Další rizikovou vlastností vodíku je jeho rozpínavost a nízká hustota, což znamená, že při jeho úniku vždy začne stoupat vzhůru, což vytváří problém zejména v uzavřených prostorech. Uchovávání vodíku je možné realizovat pomocí materiálových a fyzikálních metod. Ve fyzikálních metodách se vodík vyskytuje ve svých různých skupenstvích a v materiálových je obsažen v různých formách sloučenin. Často je vodík uchováván v kapalné formě při velkém tlaku. [3]

K výzkumu chování vodíku jsou také používány CFD (Computational Fluid Dynamics) simulace. Podstatou bezpečné aplikace jsou inherentní systémy. Dle nich jsou třeba brát v potaz dopady na bezpečnost z hlediska lidského zdraví hned při počátečním vývoji vodíkových systémů. Pro zkoumání bezpečnosti plnění se porovnávají simulační data se skutečnými experimenty a z těchto poznatků se pak stanovují potřebná bezpečnostní opatření. Především jde o prevenci úniku vodíku. Z tohoto důvodu vznikají opatření týkající se koncentrace, doby plnění, tlaku, rychlosti a předchlazení, přičemž je velmi podstatná i teplota přechlazení pro udržení bezpečného tlaku. [3], [5]

Podstatná je otázka bezpečnosti vodíku jak ve vztahu k technologii pohonu vozidel, tak i v rámci distribuční sítě.

Bezpečnost při uchovávání a přepravě

K bezpečnému uchovávání jsou klíčové zejména tyto dva parametry – teplota a tlak. S narůstající teplotou roste i tlak, z čehož vyplývá, že je vodík nutno udržovat při nízkých teplotách, aby nedocházelo k nárůstu tlaku, který by mohl vést k poškození zařízení, ve kterém je uchováván. Jeho vysoká rozpínavost a vznětové charakteristiky činí vodík obtížným pro uchovávání, protože mohou nastat potíže s únikem. Z tohoto důvodu znamená jeho bezpečné uchovávání a přeprava jeden z podstatných problémů pro budoucí rozvoj. Zatím se pro jeho uchovávání nejvhodněji osvědčily nádoby z pevné oceli. Ty však nejsou pro svoji vysokou hmotnost příliš vhodné k použití v dopravních prostředcích, kde je zpravidla žádoucí nízká hmotnost. Technologie a konstrukce palivových článků, sloužící k uchování vodíku, je přiblížena v následující **kap. 2.3**. [6]

Pro účely přepravy vodíku se nejvíce používá kovové potrubí, odolné vůči vysokým tlakům a nízké teplotě, a speciální přepravní nádrže. Mimo potrubí je v největším objemu přepravován speciálními loděmi. Nejčastějším problémem při uchovávání a přepravě vodíku jsou jeho úniky, zapříčiněné nejčastěji netěsnostmi, či nadměrně vysokým tlakem v systému. Tyto úniky je třeba zavčas rozpoznat a zabránit tak dalšímu unikání do okolí, které by mohlo způsobovat další závažnější komplikace. K detekci úniku slouží speciální senzory, které musí být vhodně rozmístěny v místech rizika vzniku úniku. [6]

Bezpečnost v rámci dopravních prostředků

Z hlediska průmyslové výroby je uchování vodíku zpravidla dostatečně bezpečné, avšak problémy nastávají při jeho distribuci a užití pro potřeby dopravního sektoru. Při použití vodíku, jakožto paliva pro osobní, či nákladní automobily, rostou kvůli jeho rizikovějším vlastnostem ve srovnání s běžnými palivy, požadavky na bezpečnost konstrukce těchto vozidel. [6], [7]

Vodíková vozidla, dále jen vozidla FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle), uchovávají stlačené palivo ve speciálních nádržích při tlaku 35 nebo 70 MPa. Při takovém tlaku hrozí riziko výbuchu nádrže, a proto jsou nádrže vybaveny systémy k regulaci tlaku. Ty vodík v případě detekce poškození postupně upouští bezpečně předem stanoveným způsobem, aby bylo zabráněno vzniku nebezpečné koncentrace, u které by hrozilo vzplanutí. Podstatné je uvést, že samotný únik vodíku nemusí nutně znamenat riziko vzplanutí. Při úniku je klíčová míra jeho koncentrace v okolním vzduchu. Aby ke vzplanutí došlo, musí tato koncentrace dosahovat určité míry, kterou je však velmi obtížné přesně kvantifikovat z důvodu proměnlivého chování proudícího plynu a celé další řady ostatních proměnlivých podmínek okolí. Pro správné fungování bezpečnostních systémů je nutno blíže kvantifikovat následky nehody vozidel FCEV. Pro simulaci fungování systémů regulace tlaku se užívají CFD systémy. [6], [7], [8]

Obzvláště rizikové jsou nárazy do zadní části vozidla FCEV, kde je ve většině případů nádrž uložena. To znamená, že vozidla FCEV musí být vybavena odolnější a lépe chráněnou palivovou nádrží než běžná vozidla se spalovacími motory. Další otázkou představuje problematika bezpečnosti vodíkové nádrže a baterie, od které by mohla prostřednictvím elektrického výboje nádrž vzplanout. Bez vznícení se uvolněný vodík neškodně rozplyne do okolního prostředí a nehrozí tak žádné zdravotní nebezpečí, či materiálové újmy. Souhrnně lze uvést, že při běžné dopravní nehodě bez vzplanutí vozidla FCEV nevznikají příliš velké rozdíly v bezpečnosti ve srovnání s klasickými vozidly. [6], [7], [8]

Bezpečnost v rámci infrastruktury

Na bezpečnost vozidel FCEV dále navazuje i problematika bezpečnosti dopravní infrastruktury, kde vznikají nové bezpečnostní hrozby. Například v podzemních garážích, či tunelech je vysoce rizikový únik vodíku. Ten díky své nízké hustotě stoupá vzhůru. Pokud není v uzavřeném prostoru dostatečně dobře řešeno odvětrávání, může dojít k navýšení koncentrace vodíku ve vzduchu na kritické hodnoty, kdy následně může dojít k jeho vzplanutí. Proto je pro budoucí rozšíření technologie nutné tyto hodnoty blíže kvantifikovat a náležitě upravit požadavky na bezpečnou konstrukci této infrastruktury. [6], [9], [10]

Dalším podstatným problémem bezpečnosti infrastruktury jsou vodíkové PS. Na ty jsou kladeny mnohem vyšší bezpečnostní požadavky než na klasické čerpací stanice nebo elektrické dobíjecí stanice. I zde je nejpodstatnějším rizikem možný únik paliva, který může vést ke vzplanutí, či explozi. Stanice uchovávají vodík pod vysokým tlakem, a proto musí být jeho distribuce kvalitně monitorována se zaměřením na možné úniky. K tomu slouží senzor vodíkové koncentrace. Důležité je také monitorovat teplotu během plnicího procesu. Zařízení pro uchovávání a distribuci vodíku musí být dostatečně chladná, aby vše probíhalo bezpečně. Vozidla také musí být vybavena senzory pro identifikaci úniku vodíku i pro bezpečné plnění. Pro zajištění správné a bezpečné činnosti PS mají klíčový význam kompresory udržující správnou teplotu a tlak paliva, kdy stále probíhá jejich vývoj a zlepšování technických vlastností. [5], [11]

Používání vodíkové technologie stále narůstá a s ním i její akceptace veřejností. Bezpečnost při manipulaci s vodíkem je klíčový faktor, a proto musí být zohledněny potenciální hrozby a vytvořeny standardy pro bezpečnost. [6]

2.3 TECHNOLOGIE VODÍKOVÉHO POHONU

Historie

První použití technologie vodíkového pohonu se datuje již do roku 1806, kdy se ovšem princip pohonu zásadně lišil od současné technologie. Vodíkový pohon, fungující na principu palivových článků, sloužících pro výrobu elektrické energie, která následně pohání elektromotor jako u současných vozidel, se objevil teprve až v roce 1959. V té době však sloužil pro pohon traktoru. Prvním vozidlem s touto technologií byl v šedesátých letech GM Electrovan, který sloužil pro experimentální výzkum. Od té doby s technologií vodíkového pohonu experimentovalo i několik dalších automobilek. Podstatného komerčního prodeje a dalšího vývoje se vodíková vozidla dočkala až teprve před několika málo lety. Prvním prodávaným vozidlem FCEV, jenž se dostalo do běžného provozu byla vozidla Toyota Mirai, vyrobená v roce 2014. [12]

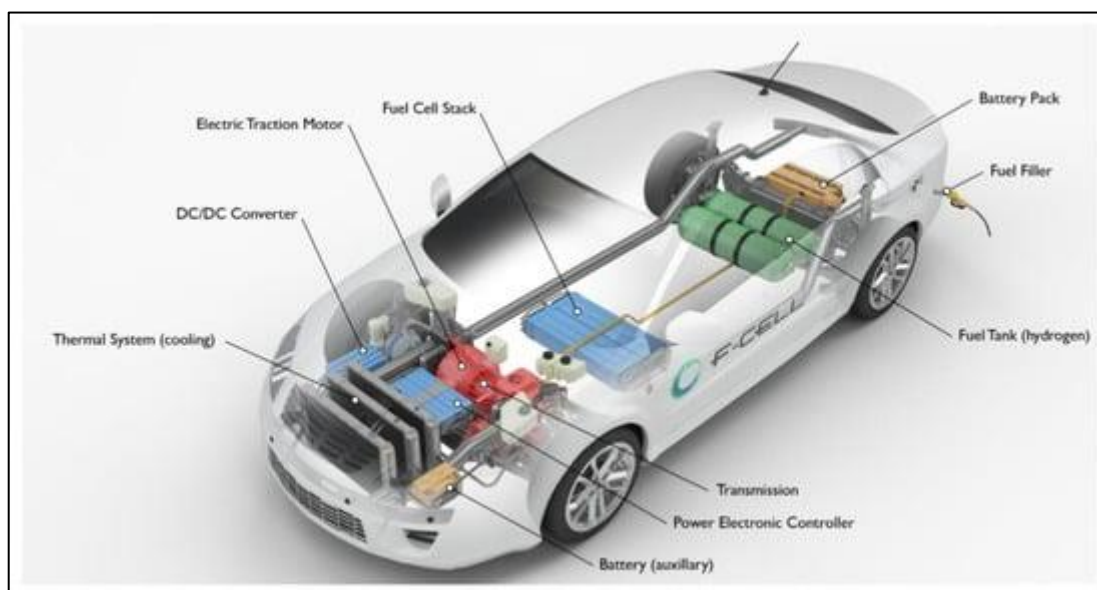
Fungování vodíkového pohonu

Princip fungování vozidel FCEV spočívá v technologii vodíkových palivových článků, které dodávají energii potřebnou k jízdě. Elektrický proud, který produkuje palivový článek, je stejnosměrný (DC) a pro přeměnu pro další přenos energie do motoru, či baterie slouží měnič stejnosměrného proudu (DC-DC). Ten upravuje proud generovaný palivovými články na požadované napětí. Elektromotor vozidla může být poháněn buďto přímo energií z palivových článků nebo energií uloženou v baterii. Elektromotor, který slouží k pohonu vozidla, je také stejnosměrný, a kromě rotoru se v něm nenachází žádné pohyblivé součásti. Díky tomu

neprodukují vozidla FCEV takový hluk, jako vozidla se spalovacími motory a jejich jízdní projevy se více podobají elektromobilům. Další podstatnou výhodou pohonu jsou výrazně nižší tepelné ztráty při přeměně energie. [13]

Princip fungování palivových článků je založen na nádobě s elektrolytem a dvěma elektrodami – anodou a katodou. Zde probíhá chemická reakce, při níž vzniká elektrický proud. Celý palivový článek se může skládat až ze stovek jednotlivých článků. Palivové články bývají nejčastěji umístěny blízko motoru v přední části vozidla za přední nápravou. [14]

Pro přísun vodíku k výrobě elektrické energie jsou zapotřebí nádoby s jeho zásobou. K jeho uchování ve vozidlech jsou určeny tlakové nádoby, které jsou nejčastěji umístěny v zadní části vozidla, v oblasti poblíž zadní nápravy. Tyto nádoby bývají zpravidla válcovitého tvaru a k jejich výrobě jsou použity výhradně lehké a pevné materiály, odolávající vysokému tlaku. Těmito materiály jsou speciální slitiny hliníku v kombinaci s kevlar, či karbonovým vláknem. Toto složení zajišťuje dostatečnou pevnost a odolnost. U nákladních vozidel jsou možné, díky jejich velkým rozměrům, různé oblasti pro umístění. Nejčastěji se jedná o umístění v bočnicích, či za kabinou nákladního vozidla. Tyto komponenty jsou vyobrazeny na **obr. 1**. [14], [15]



Obr. 1: Konstrukce vozidla FCEV [14]

Podstatnou charakteristikou vozidel FCEV je také jejich dojezd. Ten se pohybuje v rozmezí 385 až 700 km, což lze považovat za hodnoty vyšší, než u většiny elektromobilů a nižší než u klasických vozidel se spalovacími motory. Udává se, že na 1 kg vodíku ujede vozidlo přibližně 100 km. Ve srovnání s elektromobily je tu však zásadní výhoda krátké doby doplnění paliva, která je jako u vozidel se spalovacími motory, pouze v řádu několika minut (nejčastěji okolo 5 minut). [16], [17]

Při využití vodíku, jako pohonného paliva, je velmi příznivou vlastností jeho veliká energetická hustota vzhledem k hmotnosti. Ta je 120 MJ/kg. Ve srovnání s bateriemi elektromobilů, kdy v současnosti nejpokročilejší technologií disponuje společnost Tesla, která dosahuje hodnot energetické hustoty 250–260 Wh/kg, má vodík přibližně 125krát větší energetickou hustotu na jeden kg. Nevýhodou vodíku je jeho velký objem na hmotnost, kdy například u vozidel Hyundai Nexo dokáže nádrž o objemu 156 l pojmout pouze 6,3 kg vodíku. [17]

Ve srovnání s ostatními technologiemi nabízí vodíkový pohon podstatnou výhodu zejména v otázce ekologie. Při spalování vodíku totiž nedochází ke vzniku žádných zplodin a provoz takového vozidla je tedy bezemisní. Aby však bylo takové vozidlo skutečně bezemisní, musí být k jeho pohonu použit tzv. zelený vodík, k jehož výrobě byla použita pouze energie z obnovitelných zdrojů. To je v současné době, také s přihlédnutím na energetickou krizi, poměrně problematické, protože výroba vodíku je velmi energeticky náročná a stále je ekonomicky výhodnější vyrábět vodík za použití fosilních paliv. [14], [17]

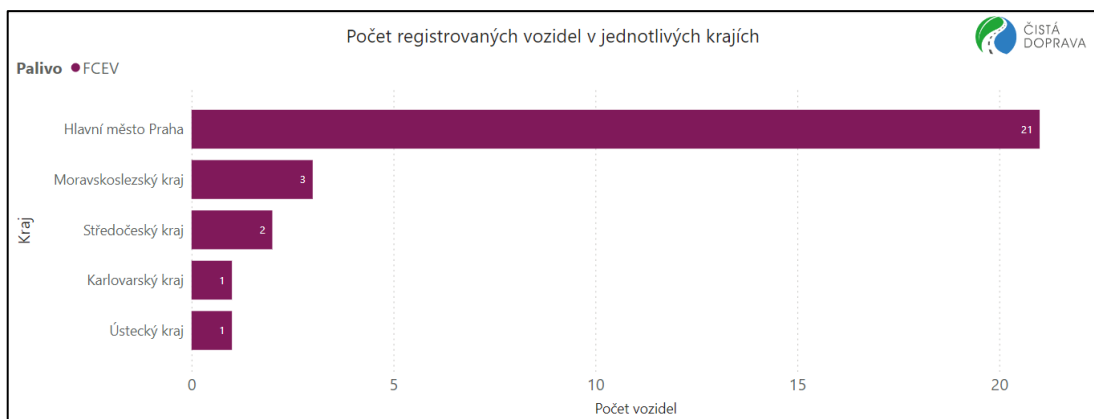
Servis

V neposlední řadě je také potřeba zohlednit rozdíly týkající se provádění servisních operací takovýchto vozidel. Jejich servis, v porovnávání s klasickými vozidly se spalovacími motory nebo elektromobily, vyžaduje odlišné nástroje a vybavení. Servisní úkony jsou více náročné na kvalifikaci personálu, který pro jejich vykonávání musí být řádně proškolen. Vznikají zde totiž nová rizika pracovních úrazů, zejména při manipulaci s palivovými články. Samotný servis však celkově zahrnuje méně úkonů. [18]

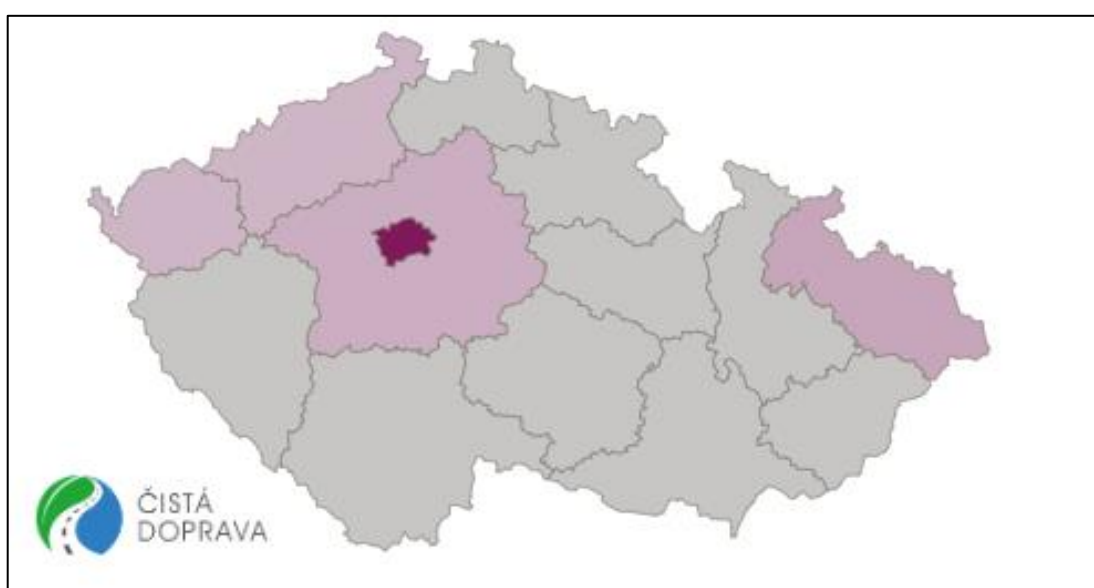
2.4 ROZŠÍŘENÍ TECHNOLOGIE VODÍKOVÉHO POHONU

Jak již bylo zmíněno v **kap. 2.3**, první komerční vozidel FCEV se do provozu dostala v roce 2014. Od této doby počty vozidel FCEV postupně narůstají, avšak stále se jedná o poměrně zanedbatelná čísla ve srovnání s elektromobily, jakožto hlavní alternativou klasických vozidel se spalovacími motory. Nejrozšířenější jsou tato vozidla v USA, kde jich bylo k říjnu roku 2023 zaznamenáno 17 742. V USA je tato technologie nejvíce rozšířená ve státě Kalifornie, kde je pro ni nejvíce rozvinutá infrastruktura s více jak 50 plnicími stanicemi. Velký počet vozidel FCEV vykazuje také Japonsko, kde sídlí dvě největší automobilky nabízející vodíkové vozidla. Zde bylo ke stejnému datu provozováno 7 404 vozidel. [19]

V České republice je k prvnímu pololetí roku 2024 evidováno 28 vozidel, z toho 22 značky Toyota a zbylých 6 značky Hyundai. Z hlediska regionálního zastoupení bylo nejvíce vozidel zaregistrováno v Praze, kde je jich evidováno 21, viz **obr. 2** a **obr. 3**. [20]



Obr. 2: Počet registrací vozidel FCEV v ČR dle krajů (březen 2024) [20]



Obr. 3: Mapa hustoty počtu registrací vozidel FCEV v ČR (březen 2024) [20]

V ČR se v současné době nabízejí pouze dva modely vozidel FCEV, kterými jsou Toyota Mirai a Hyundai Nexu. Dalším výrobcem vozidel FCEV je Honda s vozem Clarity. Vozidla FCEV sestrojili i některé další automobilky, jako například BMW a Mercedes, ovšem jen jako prototypy pro výzkum této technologie. [19]

V rámci všech 27 zemí EU bylo ke konci roku 2022 evidováno celkem 4 299 vozidel FCEV. Největší zastoupení na tomto počtu má Německo, ve kterém daný rok bylo evidováno 2 138 vozidel a které má nejvíce rozvinutou síť PS. Následuje Francie s počtem 862 vozidel. [21]

Z hlediska budoucího rozšíření čelí tato technologie prozatím podstatným problémům, kterými jsou v první řadě nedostatečně rozvinutá infrastruktura a také otázka ekonomičnosti, protože pořizovací a provozní náklady jsou stále značně vyšší než u dvou konkurenčních technologií. Těmito otázkami se blíže zabývají následující **kap. 2.5 a 2.6**. [14]

Také se jako zajímavá možnost jeví rozšíření vodíkového pohonu ve veřejné dopravě, kde by jej mohly využívat zejména autobusy, příp. i vozidla taxi služby. [22]

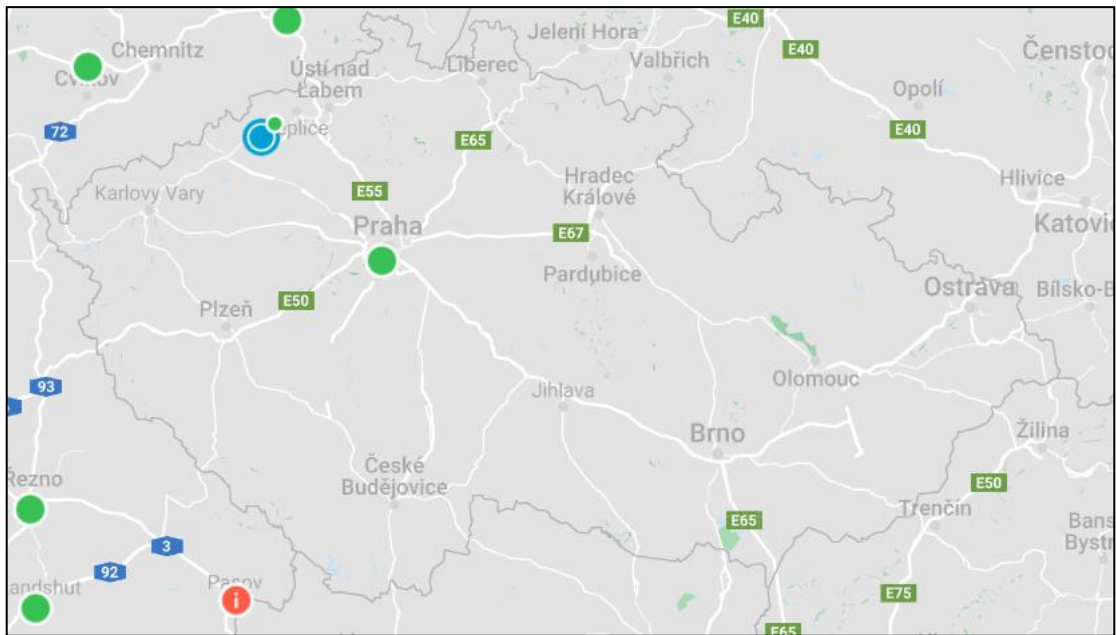
2.5 INFRASTRUKTURA A DISTRIBUCE

Zásadním problémem, kterému musí další rozšíření vodíkového pohodu čelit, je vybudování potřebné infrastruktury. Ta v sobě zahrnuje v první řadě dostatek PS, na kterých si budou moci vozidla FCEV doplnit palivo. Se vznikem PS je také neodmyslitelně spojeno vybudování potřebných výroben vodíku a také distribučních sítí, prostřednictvím kterých bude vodík přepravován na PS, kde si jej budou moci zákazníci zakoupit.

Jak už bylo dříve zmíněno, na rozdíl od klasických čerpacích stanic poskytujících benzin a naftu, disponují vodíkové PS nebezpečnější látkou a jsou tak na jejich vybudování a provoz kladeny větší bezpečnostní nároky. [5], [11]

V současné době je v České republice vybudováno 6 vodíkových PS, avšak pouze 2 z nich mají veřejnou přístupnost. K otevření první veřejné vodíkové stanice došlo dne 10. 3. 2023. Další 3 stanice jsou již ve fázi realizace, přičemž 2 z těchto stanic budou umožňovat veřejný přístup. Pro vybudování širší sítě bylo již vytvořeno několik plánů, které udávají, kolik nových PS by mělo být v budoucnu vybudováno. [23], [24]

Podstatné je také zaměřit se na jejich umístění z hlediska přístupnosti a možnosti budoucího navýšení počtů vozidel FCEV. První dvě veřejně přístupné PS, které jsou již v provozu, se nachází v Praze a v Litvínově. Tyto stanice jsou pro znázornění vyznačeny na následující mapě viz **obr. 4**. [23], [24]



Obr. 4: Mapa veřejně přístupných PS (březen 2024) [23]

Ke konci roku 2022 bylo v zemích EU v provozu 176 PS. Tyto stanice byly dále členěny na nízkotlaké (s tlakem 350 bar), kterých bylo 44, a vysokotlaké (s tlakem 700 bar), kterých bylo 132. Nejvyšší počet PS má, stejně jako vodíkových vozidel, opět Německo. Zde je v provozu 91 PS. [23], [25]

V návaznosti na počet stanic byly také zmapovány počty výroben vodíku. Těch je v současné době po České republice v provozu 10 a jedna další je ve fázi realizace. U těchto výroben je však zapotřebí rozlišovat způsob výroby a množství vodíku, které jsou schopné produkovat. [24]

Pro účely této práce je také podstatné zmapovat nebo alespoň přiblížit to, jaká je zamýšlena budoucí výstavba vodíkové distribuční sítě a jaké strategické plány tuto problematiku řeší. Budoucí počty PS a výroben vodíku uvádí následující **tab. 1**. [24]

Tab. 1: Počet vodíkových PS v ČR [24]

Počet vodíkových PS			
Fáze realizace	Počet stanic	Přístupnost	Počet stanic
V provozu	6	veřejné	2
		neveřejné	4
Realizace	3	veřejné	2
		neveřejné	1
V přípravě	7	veřejné	4
		neveřejné	3
Záměr	5	veřejné	3
		neveřejné	2
Celkově	21	veřejné	11
		neveřejné	10

Z **tab. 1** je patrné, že celkově je v České republice prozatím naplánováno 21 PS, avšak pouze 11 z nich má být veřejně přístupných, což je přibližně 52 %. Ve fázi přípravy je celkově 7 stanic a ve fázi záměru je jich 5. [24]

Jednou ze společností, které se zaměřili na budoucí výstavbu PS, je společnost ORLEN Unipetrol. Ta chce v rámci svého programu Hydrogen Eagle do roku 2030 vybudovat na území České republiky 28 PS. [26]

Tab. 2: Počet výroben vodíku [24]

Počet výroben vodíku	
Fáze realizace	Počet výroben
V provozu	10
Realizace	1
V přípravě	10
Záměr	20
Celkem	41

Během mapování počtu výroben vodíku v **tab. 2** bylo zjištěno, že má přibýt dalších 30 na celkový počet 41 výroben. U těchto výroben je podstatné uvést, že ne všechny bude možné použít pro zásobování PS. Klíčová je totiž jejich kapacita, kolik budou schopny vyrobit vodíku. Některé výrobní totiž slouží jen pro výrobu menšího množství vodíku, například pro výzkumné účely určitých institutů. [24]

Výrobní vodíku a PS jsou navzájem propojeny distribučními cestami, prostřednictvím kterých bude vodík přepravován. Tato přeprava je možná přes potrubí nebo může být vodík převážen po silnici speciálními trailery. V současnosti však v ČR není distribuční síť potrubí,

přepravující vodík, dostatečně rozvinutá, a proto bývá vodík převážně přepravován po silnici v trailerech. [24], [26]

Aby mohla být stanovena optimální distribuční cesta, musí být uvažována řada faktorů z oblasti logistiky, které umožní co nejlevnější a nejefektivnější variantu přepravy. [27]

2.6 EKONOMICKÉ A PRÁVNÍ ASPEKTY

Dále je velmi důležité zahrnout i ekonomické a právní aspekty mající vliv na budoucí rozšíření této technologie.

Ekonomické aspekty

Ačkoliv má otázka ekologie a udržitelnosti rok od roku větší váhu, stále hraje pro většinu spotřebitelů při koupi nového vozidla zásadní roli pořizovací cena vozidla a výše nákladů na provoz. Ceny vozidel FCEV se prozatím pohybují značně výše oproti ostatním technologiím. Pořizovací cena nejvíce rozšířeného vozidla Toyoty Mirai v základním provedení je 1 809 000,- Kč, u dalšího vodíkového vozidla, nabízeného v ČR, jímž je Hyundai Nexa, je pořizovací cena v základním provedení 1 900 000 Kč. Více modelů vozidel FCEV se prozatím v České republice nenabízí. Z uvedených dvou příkladů lze však jednoznačně říci, že je jejich pořizovací cena podstatně vyšší než u srovnatelných modelů se spalovacími motory. [28], [29]

Vyšší cena je také způsobena tím, že technologie vodíkového pohonu pro svoji výrobu vyžaduje více drahého materiálu a nákladnější technologické procesy. S navýšením výroby vozidel FCEV lze očekávat jejich podstatné zlevnění, avšak prozatím jsou vozidla se spalovacími motory výrazně levnější. [13]

Co se týče ceny vodíkového paliva, ta se v současné době pohybuje okolo 5 Kč v přepočtu na ujetý kilometr. Prodejní cenu vodíku stanovila společnost ORLEN Unipetrol, která jako první otevřela veřejnou PS, na 499 Kč/kg. Tuto stanici vybudovala v lokaci Praha – Barrandov a náklady na její vybudování činily 47 milionů Kč. [26]

Právní aspekty

Podstatné je také zohlednit i vliv aspektů vyplývajících z právních předpisů, které v tomto případě upravují podmínky a požadavky na ekologii v oblasti energetiky a dopravy. V dnešní době se rok od roku klade větší důraz na ekologii a zpravidla se zpřísňují požadavky vedoucí ke snížení emisí s dlouhodobým cílem dosáhnout uhlíkové neutrality. K tomu se EU zavázala do roku 2050 v rámci svého programu udržitelné energie Green Deal. [30], [31]

Na cestě za dosažením uhlíkové neutrality vydává EU řadu nařízení a směrnic, kterými prosazuje postupné snižování emisí. Přímými, či nepřímými projevy těchto nařízení mohou být změny v používané technologii, kterou je v tomto případě pohon motorových vozidel. Jelikož je vodík jedno z ekologických paliv, klasifikovaných jako RFNBO (Renewable fuels of non-biological origin), počítá se s ním jako s palivem sloužícím k dosažení těchto ekologických cílů v energetice a dopravě. To znamená, že i v rámci dopravního sektoru dochází k podpoře technologií užívajících toto čisté palivo, což jsou v tomto případě vozidla FCEV. [30], [31], [32]

Pro účely této práce je klíčová zejména směrnice Renewable Energy Directive – RED III. Ta je právním rámcem pro rozvoj čisté energie ve všech odvětvích hospodářství EU, při čemž pro dosažení tohoto cíle podporuje spolupráci mezi zeměmi EU. Primárním cílem směrnice je do roku 2030 navýšit využití energie z obnovitelných zdrojů na alespoň 42,5 % tak, aby EU byla globálním lídrem ve vývoji technologií obnovitelných zdrojů. Pro srovnání v roce 2021 dosahovala tato hodnota 21,8 %. [32], [33]

Směrnice RED III spadá pod záštitu politických opatření v rámci programu Green Deal. Jak už bylo výše zmíněno, Green Deal si dává za cíl dosažení toho, že Evropa bude do roku 2050 první uhlíkově neutrálním kontinentem. K tomu si vytyčila řadu dílčích cílů, kterým je například snížení emisí alespoň o 55 % do konce této dekády (vztaženo k roku 1990) v rámci opatření Fit for 55. Uplatnění těchto opatření přinese řadu změn jak pro evropské ekonomiky, tak i společnosti. K zachování rovnováhy má sloužit Social Climate Fund, který má spravedlivě přerozdělit podpůrné prostředky, aby nebyly někteří obyvatelé a podniky v EU znevýhodněny oproti ostatním při aplikaci těchto změn. Důležité je také zmínit, že všechna nová osobní vozidla a dodávky registrované v Evropě mají být od roku 2035 bezemisní. Aby toho bylo dosaženo musí být vybudována dostatečná síť zajišťující energii pro elektromobily a vozidla FCEV. [30], [31]

V rámci ČR se na tuto problematiku zaměřuje Vodíková strategie ČR, která usiluje o snižování skleníkových plynů a podporu ekonomického růstu. V rámci toho se zaměřuje na výrobu a využití nízkouhlíkového vodíku, na jeho dopravu a skladování a na vodíkové technologie. Tento plán má za cíl nasazovat vodík vzhledem k jeho efektivitě a ceně nejdříve v dopravě a následně jej dále rozšiřovat do energetiky a průmyslu s cílem transformovat český průmysl. Pro budoucnost předpokládá dovoz obnovitelného vodíku ze zemí, kde je jeho výroba výhodnější, což poukazuje na potřebu rozvinout vodíkovou infrastrukturu v ČR. Tento plán udává 6 stanic v realizaci (Praha, Litvínov, Brno, Plzeň, Praha-Horní Počernice, Ostrava), které má vybudovat společnost ORLEN Unipetrol, od které jsou již dvě stanice v provozu. [34]

Jako další se aplikací vodíkových technologií zabývá Národní akční plán čisté mobility, který podporuje rozvoj alternativních paliv v dopravě a který má za cíl vytvořit pro to adekvátní prostředí. Také udává predikce počtu plnicích a dobíjecích stanic a predikce pro počty vozidel s alternativními pohony. Pro tyto změny uvádí podporu v rámci evropských strukturálních a investičních fondů. Hlavním cílem opatření je dosažení 14 % obnovitelných zdrojů energie v dopravě. [35], [36]

Na rozvoj dopravní infrastruktury se zaměřuje také program Doprava 2021-2027, označovaný také jako OPD3. Ten usiluje o zvýšení konkurenceschopnosti ČR prostřednictvím zlepšení dopravní dostupnosti. Program se zaměřuje především na projekty Správy Železnic a ŘSD ČR a bylo na něj vyčleněno 4,9 miliardy eur. V rámci rozvoje silniční a dálniční infrastruktury má pomoci vybudovat síť pro doplnění alternativních paliv, pod které spadají i vodíkové PS. Jedná se o projekty v rámci Transevropské dopravní sítě TEN-T. [37], [38]

Síť dobíjecích a plnicích stanic řeší také již výše zmíněný program Fit for 55. Součástí tohoto opatření jsou nařízení o infrastruktuře pro alternativní paliva, které mají stanovit konkrétní cíle. Tato nařízení mají zajistit dostatečnou infrastrukturu pro čerpaní alternativních paliv, jak na mezinárodní, tak i národní úrovni v EU. Z hlediska vodíkové infrastruktury stanovuje, že do konce roku 2030 by měly být vybudovány PS alespoň každých 200 km na hlavních silnicích a dále by měla být alespoň jedna PS v každém městském uzlu. Následně uvádí požadavky na předpokládané parametry PS, kdy by měly mít kapacitu 1 tuny vodíku, při tlaku 700 barů. [39]

Zaváděním infrastruktury pro alternativní paliva se zabývá nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/1804 (AFIR). To například udává nutnost vybudovat PS podél silniční sítě TEN-T a dále řeší, jaká kapacita vodíku by měla připadat pro určitý úsek. [40]

2.7 SHRNUÍ ANALÝZY SOUČASNÉHO STAVU

V rámci analýzy současného stavu bylo v jednotlivých podkapitolách zjištěno, že vodík, jakožto palivo pro vozidla, poskytuje řadu výhod. V první řadě se jedná o ekologii. Vozidla FCEV totiž při provozu neprodukují žádné emise. Další výhodou těchto vozidel je jejich dojezd, vyšší než u většiny elektromobilů a výrazně kratší doba doplnění paliva. Za negativní lze považovat mírně zvýšené bezpečnostní riziko z důvodu vysoké vznětlivosti vodíku. To je však u vozidel řešeno speciálními tlakovými nádržemi s bezpečnostními prvky a závažnější bezpečnostní rizika tak vznikají v rámci dopravní infrastruktury. Například v uzavřených parkovacích garážích. Podstatná nevýhoda spočívá ve vysoké pořizovací ceně, která je prozatím výrazně vyšší než u srovnatelných vozidel se spalovacími motory, a také to, že jsou v současnosti v podmínkách ČR nabízeny

pouze 2 modely vozidel FCEV. Z průzkumů počtů vozidel FCEV v ČR bylo zjištěno, že je jich prozatím pouze 28.

Nicméně zásadním nedostatkem, hrajícím v neprospěch vozidel FCEV, je nedostatečně vybudovaná infrastruktura vodíkových PS. Ty jsou v současnosti v ČR pouze 2 volně přístupné veřejnosti, což je pro potřeby celostátní sítě zcela nedostatečné. Z důvodu vyšších požadavků na bezpečnost a také nových technologií jsou tyto stanice nákladnější na vybudování a zejména na provoz. Samotná distribuce paliva na stanice je prozatím možná pouze za použití silniční dopravy. ČR prozatím postrádá síť potrubí na přepravu vodíku. Nepříznivá je také vysoká cena vodíkové paliva, u které by však v budoucnu vlivem větší produkce mělo dojít ke snížení.

Právní předpisy a programy EU i ČR si kladou za cíl snižovat emise a uhlíkovou stopu, čehož chtějí dosáhnout podporou technologií udržitelné dopravy. To má vliv na podporu vodíkového pohonu, jakožto jedné z ekologických alternativ spalovacích motorů a tato podpora se týká i budování vodíkové infrastruktury. Klíčové jsou zejména nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/1804 o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva, směrnice RED III usilující o navýšení využívání obnovitelných zdrojů na 42,5 % a program Green Deal, který plánuje od roku 2035 výrobu bezemisních automobilů. V rámci ČR řeší předmětnou problematiku Česká vodíková strategie.

Z analýzy současného stavu je patrné, že s postupem času bude kladen čím dál větší důraz na snižování emisí s dlouhodobým cílem dosažení uhlíkové neutrality. Aby toho mohlo být dosaženo, bude třeba uplatnit a zdokonalit řadu technologií v různých oblastech, přičemž jednou z klíčových je právě dopravní sektor. Vodíkový pohon, který zajišťuje bezemisní provoz vozidel, je jednou z takových technologií a je žádoucí vytvořit vhodné podmínky, které napomohou jejímu rozšiřování.

Souhrnně bylo tedy zjištěno, že aby mohlo docházet k významnému navýšování počtů vozidel FCEV, musí být těchto plnicích stanic vybudováno podstatně více, než je v současnosti. To znamená, že plánovaný rozvoj sítě PS musí dostatečně splňovat požadavky na její celkovou kapacitu, aby byla schopna obsloužit všechny své uživatele. Toto je zásadní problematika, na jejíž řešení se tato práce zaměřuje.

Přínos výsledků řešení této problematiky spočívá v získání poznatků o tom, jak vhodně přistupovat k vybudování nové distribuční infrastruktury pro nově se rozvíjející technologii v dopravě. Výslednými poznatky bude určení potřebné kapacity, pro kterou bude navržena podoba vhodné distribuční sítě.

3 FORMULACE PROBLÉMU A STANOVENÍ CÍLŮ ŘEŠENÍ

Jak vyplývá z analýzy současného stavu, ČR se v současné době potýká s nedostatečně rozvinutou infrastrukturou vodíkových plnicích stanic, která neumožňuje výraznější navýšení počtů provozovaných vozidel FCEV. V ČR jsou prozatím jen 2 veřejné vodíkové plnicí stanice, což může bránit zákazníkům pořídit si vozidla FCEV. Aby byly v budoucnu vytvořeny vhodné podmínky pro zákazníky, kteří si chtějí vozidla FCEV pořídit, musí být v ČR vybudován dostatečný počet plnicích stanic. Ty by se také měly nacházet v dostatečné blízkosti, aby kvůli tomu uživatelé nemuseli jezdit výrazně větší vzdálenosti než na klasickou čerpací stanici.

Avšak v první řadě musejí tyto PS disponovat dostatečnou kapacitou, aby byly schopny obsloužit všechny své zákazníky. K zajištění potřebné kapacity je zapotřebí několika výroben vodíku, které budou schopny vyrábět požadované množství vodíku. Z nich se vodík bude distribuovat na jednotlivé plnicí stanice. Vzdálenosti mezi nimi by měly být, pokud možno co nejkratší a také musí být zvolen adekvátní způsob přepravy. Současně by také měly být zohledněny pozice nově vybudovaných plnicích stanic z hlediska přístupnosti. Je žádoucí, aby byly umístěny na dostatečně frekventovaném místě poblíž větších měst, či významných dopravních spojení a mohly tak poskytnout své služby co největšímu počtu uživatelů.

Na základě výše uvedeného lze vymezit jako problém neexistenci dostatečně rozvinuté distribuční infrastruktury sloužící pro vodíková vozidla.

Cílem řešení daného problému bude:

- stanovení dostatečného počtu plnicích stanic dle predikce vývoje počtu provozovaných vodíkových vozidel,
- vytvoření modelu sítě vodíkových plnicích stanic na území ČR, zohledňujícího predikce vývoje,
- verifikace výsledků pomocí simulačního modelování.

4 ŘEŠENÍ

Řešení vymezeného problému bude založeno na vytvoření modelu sítě vodíkových plnicích stanic na území ČR, který bude zohledňovat predikce vývoje počtu provozovaných vodíkových vozidel. Pro jednotlivé varianty modelu bude nutné s ohledem na počet vozidel stanovit dostatečný objem výroby vodíku a počet plnicích stanic tak, aby byla zabezpečena distribuce dostatečného množství vodíku. Pro řešení problematiky vybudování distribuční sítě budou vymezeny různé podstatné limitující faktory, které je nutno při tvorbě modelu distribuční sítě zohlednit. Výsledky jednotlivých variant vytvořeného modelu distribuční sítě budou verifikovány pomocí simulačního modelování.

4.1 VYMEZENÍ LIMITUJÍCÍCH FAKTORŮ A KVANTIFIKACE VSTUPNÍCH VELIČIN

4.1.1 Limitující faktory

Pro tvorbu modelu distribuční sítě je potřebné nejdříve vymežit patřičné limitující faktory pro jednotlivé subjekty a uživatele.

Těmito faktory jsou:

- Dostupnost plnicích stanic
- Přepavní forma a vzdálenost přepravy
- Kapacita dopravních prostředků a plnicích stanic
- Vytížení plnicích stanic
- Hustota rozmístění plnicích stanic
- Lokace výroben vodíku
- Provozní údaje vozidel FCEV

Dostupnost plnicích stanic

Dostupnost PS udává vzdálenost, kterou budou muset řidiči při cestě k PS urazit. Celkově by mělo být docíleno toho, aby byla tato vzdálenost pro všechny řidiče vodíkových vozidel přijatelná. V ideálním scénáři by neměla přesahovat 50 km.

Přepavní forma a vzdálenost přepravy

Dalším podstatným limitujícím faktorem je forma přepravy vodíku z výroby na PS. Jak už bylo uvedeno v **kap. 2.5** a v **kap. 2.6**, v ČR je prozatím možný pouze jeden způsob přepravy

vodíku, a to prostřednictvím silniční dopravy. Jako přepravní forma byla tedy z důvodu chybějících alternativ zvolena silniční přeprava. Limitující podmínkou pro tuto přepravní variantu je vzdálenost, kdy je možné vodík přepravovat do vzdálenosti 150 km. [41]

Kapacita dopravních prostředků a plnicích stanic

S přepravou také souvisí parametry nákladních vozidel převážejících vodík. Ty jsou v závislosti na použité technologii schopny převést rozdílné množství, kdy je rozhodující zejména tlak, při kterém je vodík v přepravní nádobě uchováván. Existuje několik různých modelů trailerů pro převoz, avšak pro zjednodušení a s důrazem na budoucí vývoj a snahu o sjednocení bude uvažována standardizovaná forma přepravy. Použitý trailer bude převážet vodík pod tlakem 300 barů, kdy je ho schopen pojmout až 700 kg. Velmi podstatné je ovšem uvést, že kvůli tlakovým rozdílům není tento trailer schopen vydat veškerý vodík, aby tak nedošlo k jeho poškození. Vždy v něm musí zůstat určité minimální množství. To činí přibližně 30 % jeho kapacity, což je při přepočtu na váhu přibližně 200 kg. Použitý vodíkový trailer má disponibilní kapacitu 500 kg vodíku, která může být použita na doplnění zásoby plnicích stanic. [41]

Následně je nutné zohlednit kapacity samotných PS. Na jejich základě bude dále stanoveno, kolik vozidel budou jednotlivé PS schopny obsloužit a jak často budou muset být doplňovány. Stejně jako u přepravní formy, nejsou nyní u PS standardizované hodnoty jejich parametrů, a to z důvodu, že jsou tyto stanice v prvopočátcích. Do budoucna je tedy žádoucí, aby byly PS standardizovány, což přinese řadu výhod. Těmi jsou např. sjednocení používané technologie a také standardizace operačních procesů. Mimo jiné dojde i k výraznému navýšení kapacit, kdy v současnosti první otevřená stanice v Praze na Barrandově má pohotovou disponibilní kapacitu prozatím pouze 60 kg. Stejně jako u přepravy vykazují i plnicí stanice rozdílnou kapacitu z hlediska použitelnosti, kdy kvůli uchování bezpečného tlaku musí v zásobovací nádrži stanice zůstat určité minimální množství vodíku. Kapacita PS je opět rozlišována na celkovou a disponibilní kapacitu, kterou může vydat. [41]

Hodnoty, se kterými se do budoucna uvažuje, jsou následující. Celková kapacita PS je plánovaná na 500 kg vodíku, z čehož je disponibilní množství 250 kg. PS bude tedy schopna vydat 250 kg vodíku při jejím doplnění na maximální hodnotu. Z těchto hodnot vyplývá, že zásobovací vozidlo bude schopné při plné kapacitě doplnit více stanic najednou.

Důležité je také uvést, že dle nařízení o zavádění infrastruktury pro alternativní paliva (AFIR) je požadována kumulativní celková kapacita PS 1 tona vodíku pro vzdálenost 200 km na úsecích silniční sítě TEN-T. To znamená, že úseku dlouhém 200 km musí být dostačený počet stanic, aby byly schopné toto množství pokrýt. Při plánovaných stanicích o celkové kapacitě 500 kg budou

na úsek dlouhý 200 km zapotřebí nejméně dvě PS. Jejich disponibilní množství bude sice nižší, ale to nařízení AFIR neřeší, protože se zaměřuje na celkovou kapacitu. [40] [41]

Při disponibilní kapacitě přepravního traileru 500 kg a disponibilní kapacitě PS 250 kg, je při jedné jízdě schopen doplnit až 2 stanice. Během tohoto doplnění však kamion nesmí překročit ujetou vzdálenost 150 km. [41]

Mimo jiné je potřeba zohlednit i dobu nutnou na doplnění vodíku z kamionu do zásobovací nádoby PS. Tento proces je totiž časově poměrně náročný z důvodu změny tlaku během přemísťování vodíku. Samotné doplnění stanice z přepravního traileru trvá přibližně 3 hodiny na doplnění plné kapacity 250 kg disponibilního množství. [41]

Vytížení plnicích stanic

Faktor vytížení má za cíl zmapovat chování uživatelů vozidel FCEV. Bude v něm zahrnut průměrný dojezd a průměrný denní nájezd, z čehož bude následně stanoveno, jak často budou muset uživatelé vozidel FCEV průměrně doplňovat palivo. Pro zohlednění časového hlediska bude také zahrnuta doba doplnění paliva.

Hustota rozmístění plnicích stanic

V návaznosti na dostupnost je potřeba zohlednit frekventovanost. Ta vyjadřuje potřebu vhodného rozmístění budoucích PS na místech, kde se pohybuje co nejvíce vozidel. Jde tedy o místa v blízkosti velkých měst a významných dopravních cest. Jedná se v první řadě dálnice a silnice I. třídy. Stanice nacházející se podél silniční sítě TEN-T by měli být umístěny v blízké vzdálenosti. Tou je dojezdová vzdálenost do 10 km od nejbližšího výjezdu ze silnice TEN-T. [40]

Lokace výroben vodíku

Z hlediska územního rozmístění je také důležité zohlednit lokace výroben vodíku, ze kterých bude vodík přemístěn do PS. Stejně jako u PS je žádoucí, aby byl počet výroben dostatečný a aby byly vhodně rozmístěny po ČR. Vzdálenosti mezi nimi a PS by měly být co nejmenší.

Provozní údaje vozidel FCEV

Zkoumání provozních údajů vozidel FCEV zohledňuje jejich provozní parametry, ale i chování jejich uživatelů. Je zapotřebí stanovit průměrnou spotřebu, průměrný dojezd na jednu naplněnou nádrž, průměrný roční nájezd. Z těchto parametrů poté mohou být stanoveny průměrný denní nájezd, interval doplnění paliva a množství doplněného paliva. Tyto informace

budou zásadní pro správné fungování simulačního modelu pro verifikaci výsledků, z hlediska zkoumané kapacity navrhnuté distribuční sítě.

4.1.2 Kvantifikace vstupních veličin

Na základě vymezení limitujících faktorů byly kvantifikovány následující vstupní veličiny, a to parametry uživatelů, parametry přepravy, parametry plnicích stanic a provozní údaje vozidel FCEV.

Parametry uživatelů

- Celkový počet vozidel
- Průměrný dojezd
- Průměrný denní nájezd
- Interval doplnění paliva
- Délka doplnění paliva
- Rozmístění

Parametry přepravy

- Disponibilní kapacita – 500 kg
- Tlak – 300 bar
- Limit ujeté vzdálenosti – 150 km
- Počet doplněných stanic – až 2 stanice
- Čas na doplnění stanice – 3 h

Parametry plnicích stanic

- Disponibilní kapacita – 250 kg
- Tlak při načerpání paliva – 200 bar
- Tlak při plnění vozidel – 700 bar
- Průměrné vydané množství – dle kategorií
- Čas na doplnění paliva – dle kategorií
- Časový interval doplňování – 1 za den
- Prodejní cena vodíku – 499 Kč/kg

Provozní údaje vozidel FCEV

Provozní údaje vozidel FCEV, rozdělené podle jednotlivých kategorií vozidel, jsou uvedeny v **tab. 3** a **tab. 4**.

Tab. 3: Průměrný roční nájezd vozidel FCEV [41]

Průměrný roční nájezd vozidel FCEV	
Kategorie vozidla	Počet km
Osobní vozidla	14 500
Městské autobusy	65 800
Lehká užitková vozidla N1	20 200
Nákladní vozidla typu N2	43 800
Nákladní vozidla typu N3	68 700

Tab. 4: Průměrná spotřeba vozidel FCEV [41]

Průměrná spotřeba vozidel FCEV	
Kategorie vozidla	kg/100 km
Osobní vozidla	1
Městské autobusy	10
Lehká užitková vozidla N1	2
Nákladní vozidla typu N2	4
Nákladní vozidla typu N3	10

Na základě těchto údajů byly odvozeny relevantní parametry, uvedené v **tab. 5**. Při určení dojezdu vozidel na jednu plnou nádrž je zohledněna i rezervní dojezdová vzdálenost, aby vozidlo nemuselo doplňovat palivo až při téměř prázdné nádrži.

Tab. 5: Parametry vozidel [vlastní zpracování dle [41]]

Parametry vozidel FCEV				
Kategorie vozidla	M1	N1	N2	N3
Průměrná spotřeba (kg/100 km)	1	2	4	10
Průměrný dojezd na 1 nádrž (km)	450	400	400	450
Průměrný roční nájezd (km)	14 500	20 200	43 800	68 700
Průměrný denní nájezd (km)	40	55	120	188
Interval doplnění paliva (dny)	11,25	7,27	3,33	2,39
Délka doplnění paliva (min)	10	15	20	30
Množství doplněného paliva (kg)	4,5	8	16	45

Tučně zvýrazněné hodnoty parametrů intervalu doplnění paliva a množství doplněného paliva budou podstatné pro verifikaci získaných výsledků.

4.2 VARIANTY VYTVOŘENÝCH MODELŮ DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

Návrh modelu distribuční sítě bude vytvořen ve 3 variantách.

Varianta modelu distribuční sítě č. 1

První varianta vychází ze situace nejbližší současnému stavu. Uvažuje počet PS a výroben, které jsou již v provozu, doplněné o ty, o nichž je již známo, že budou vybudovány.

Varianta modelu distribuční sítě č. 2

Ve druhé variantě bude uvažována situace již více rozvinuté distribuční sítě, kdy v ní bude zahrnut počet PS a výroben vodíku, nutný k pokrytí celého území ČR.

Varianta modelu distribuční sítě č. 3

V poslední třetí variantě bude zohledněna situace vytvořená na základě predikcí počtů vozidel FCEV pro rok 2030. Ta bude v porovnání s předchozími dvěma variantami nejkompexnější, z hlediska nejvyšších počtů vozidel FCEV, PS a výroben vodíku.

4.3 PREDIKCE VÝVOJE POČTU PROVOZOVANÝCH VODÍKOVÝCH VOZIDEL

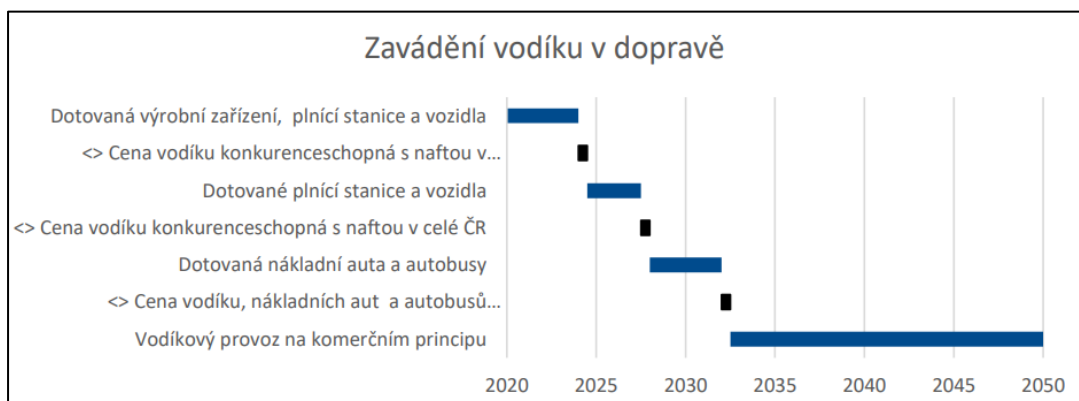
S rostoucí podporou ekologie a udržitelnosti se rozvíjí i trh vozidel s alternativním pohonem. Postupně je nabízeno čím dál více takových modelů od různých výrobců a začíná se také rozvíjet jejich infrastruktura. K podpoře rozvoje slouží řada národních i mezinárodních plánů, které byly blíže popsány v **kap. 2.6**. Dále také existuje několik publikací, které předpovídají, či stanovují cíle pro budoucí počet vozidel FCEV pro určité roky. Udávají tak, jaký by měl být přibližný nárůst jejich počtu.

Při průzkumu těchto publikací bylo zjištěno, že řada z nich uvádí budoucí počty vozidel FCEV v podobě např. nárůstu budoucího zastoupení, nebo budoucích prodejů vozidel FCEV v procentuálním vyjádření z celkového počtu prodaných vozidel a nejedná se tak o konkrétně stanovenou hodnotu.

Nalezeným dokumentem, který uvádí přesná čísla je Aktualizace NAP CM od MPO ČR. Ta predikuje na základě provedené studie počet 58 000 vozidel FCEV ke konci roku 2030. Tento počet se však jeví velice optimisticky, a proto cílí na rozmezí 40 000 až 50 000 vozidel FCEV. Dále také cílí na dosažení počtu 870 vodíkových autobusů ke stejnému roku. Dokument se rovněž zaměřuje na rozvoj vodíkového pohonu v nákladní dopravě. Pro ten však přepokládá pomalejší nárůst, kdy se odkazuje na dokument Hydrogen Roadmap Europe, jenž odhaduje pro rok 2030 zastoupení 1 % z celkového prodeje nákladních vozidel v Evropě. [35]

Dále dokument stanovuje cílové počty vodíkových PS. Pro rok 2025 je požadováno 15 stanic a pro rok 2030 je požadováno 80 stanic. Nicméně je podstatné uvést, že se jedná o přibližné hodnoty pro odhadované počty vozidel FCEV a v současnosti se nejeví tyto příliš reálné. [35]

Dalším významným dokumentem stanovujícím strategické cíle pro rozvoj vodíkové dopravy v ČR, je Vodíková strategie od MPO. Ta sice nestanovuje žádné konkrétní počty vozidel do budoucna, ale zaměřuje se na navyšování uplatnění této technologie a postupný přechod na ni. Na **obr. 5** jsou na časové ose vyznačeny jednotlivé fáze přechodu na vodíkovou mobilitu. [42]



Obr. 5: Zavádění vodíku v dopravě [42]

V rámci predikcí budoucího počtu vozidel FCEV se odkazuje na výše zmíněný dokument Aktualizace NAP CM. [35], [42]

Problematická je však doba vydání Aktualizace NAP CM, která byla publikována v roce 2019 a od té doby se mnohé změnilo. Zde uvedené předpokládané počty vozidel FCEV lze v dnešní době považovat za ne příliš realistické a lze tedy očekávat budoucí počty značně nižší. Tyto počty budou uvedeny v aktualizaci tohoto dokumentu. Ta však v době zpracování této práce nebyla doposud zveřejněna. Z tohoto důvodu byly pro aktuálnější a věrohodnější údaje použity informace z neveřejné studie nazvané: „Metodika výpočtu poptávky po nízkouhlíkovém a obnovitelném vodíku v dopravě v České republice do roku 2030“, zpracované Národním centrem vodíkové mobility ve spolupráci se společností ORLEN a dalšími institucemi zabývajícími se výzkumem vodíku v dopravě. V tomto dokumentu uvedené hodnoty, viz **tab. 6**, budou dále použity při řešení.

Tab. 6: Počty vodíkových vozidel pro rok 2030 [41]

Počet vodíkových vozidel dle kategorie	
Kategorie vozidla	Počet vozidel
Osobní vozidla	4 000
Městské autobusy	250
Lehká užitková vozidla N1	1 200
Nákladní vozidla typu N2 a N3	600
Celkem	6 050

Jelikož se tato práce zaměřuje na rozvoj veřejné vodíkové infrastruktury, nebudou při řešení zohledňovány vodíkové autobusy, které již nyní využívají neveřejnou část umístěnou u samotných provozovatelů.

Pro získání lepší představy o tom, jak postupně může vznikat distribuční síť, lze pohlédnout na historii toho, jak byla postupně budována distribuční síť dobíjecích stanic pro elektromobily. Elektromobily jsou ve srovnání s klasickými vozidly se spalovacími motory v provozu pouze krátce, a tak ještě v nedávných letech čelily stejnému problému, jakému teď čelí vozidla FCEV. Elektromobily se v ČR začaly více rozšiřovat až v roce 2008 a dnes jsou již běžnou záležitostí. Nicméně pro ně musela být také vybudována náležitá infrastruktura, která se dodnes dále rozvíjí. Pro srovnání tedy bude zmapován současný stav a historický vývoj dobíjecích stanic i počtu elektromobilů, aby mohlo být lépe nastíněno, jakým směrem by se mohla distribuční síť vodíkových PS vyvíjet.

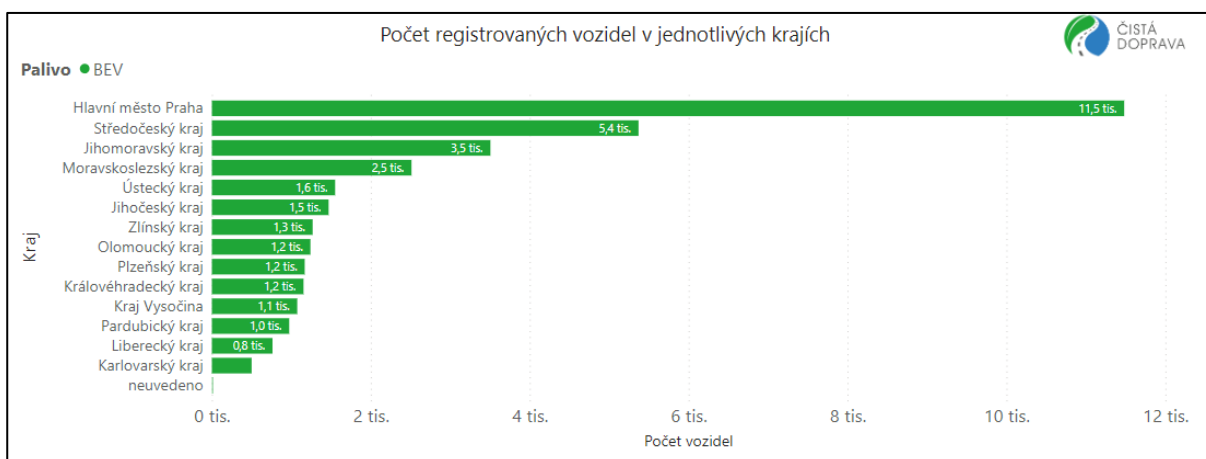
Vývoj počtu elektromobilů

Ke konci roku 2023 bylo v ČR registrováno 34 031 vozidel s elektrickým pohonem. K výraznějšímu nárůstu počtu elektromobilů došlo až v roce 2008, kdy jich bylo zaregistrováno 64, viz **obr. 6**. Od tohoto roku se počty nově registrovaných elektromobilů meziročně z pravidla navyšují. [20]

< Zpět k sestavě		POČET REGISTRACÍ VOZIDEL S OHLEDEM NA PRVNÍ A OPAKOVANÉ REGISTRACE																										
Rok první registrace	1997	1998	1999	2000	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Celkem	
1990											1																3	
1991		1									1					1							1				6	
1992														1					1							1	5	
1993																											9	
1994														1		1						1					5	
1995																			1								2	
1996											1	1				1	1				1		2				10	
1997		1	1				1	1							1		2		2	1	2						12	
1998			1				4		2			1								2	2						12	
1999				1				1	1	1	1		2	1			1	1	1	1	2			1			14	
2000				2			3	1	1		2	1		1	1	1			1	3		1					18	
2001										3										1	1	1	1			1	8	
2002					9					2					1	3			1	2			1	1			20	
2003						3	1																1				5	
2004							4			1				1							1	1	1				9	
2005								1											2						1		6	
2006									4						1									1	3		10	
2007										3							1				1	1			1		9	
2008											64					1			1	1				1			68	
2009												113		1		1		6	1			3		1			126	
2010													147			2	3	4	1			2	2		1	3	3	168
2011														315	3	5	5	11	7	4	6	11	3	6	12	6	394	
2012															423	2	4	14	6	9	19	16	15	19	20	9	556	
2013																224	10	4	14	34	42	23	10	18	41	32	452	
2014																	257	15	18	101	97	28	20	36	55	42	669	
2015																		301	11	30	76	73	36	43	53	37	660	
2016																				347	16	36	97	67	78	55	747	
2017																					603	22	68	90	98	102	78	1 061
2018																						1 147	38	30	119	153	134	1 621
2019																							1 699	93	161	205	275	2 633
2020																								4 027	127	216	481	4 851
2021																									3 876	319	548	4 743
2022																										5 798	581	6 379
2023																											8 740	8 740
Celkem		2	1	1	2	10	3	13	3	10	6	71	118	151	319	430	242	284	362	414	809	1 457	2 262	4 395	4 589	7 033	11 024	34 031

Obr. 6: Vývoj počtu registrací elektromobilů [20]

V návaznosti na vývoj počtu elektromobilů byl ještě zmapován počet jejich registrací dle jednotlivých krajů, viz **obr. 7** a mapy na **obr. 8**. Stejně jako u vozidel FCEV bylo nejvíce elektromobilů registrováno v Praze a dále ve Středočeském kraji (což může souviset mj. i se sídlem leasingových společností), nicméně jsou v registraci vozidel již zastoupeny všechny kraje. [20]



Obr. 7: Počet registrovaných elektromobilů dle krajů ke konci roku 2023 [20]

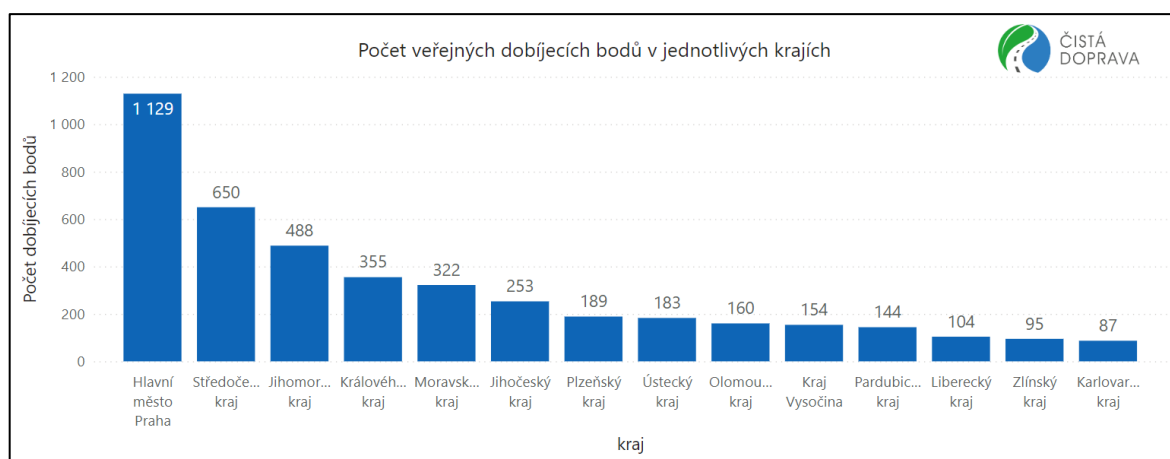


Obr. 8: Mapa hustoty počtu registrací elektromobilů dle krajů ke konci roku 2023 [20]

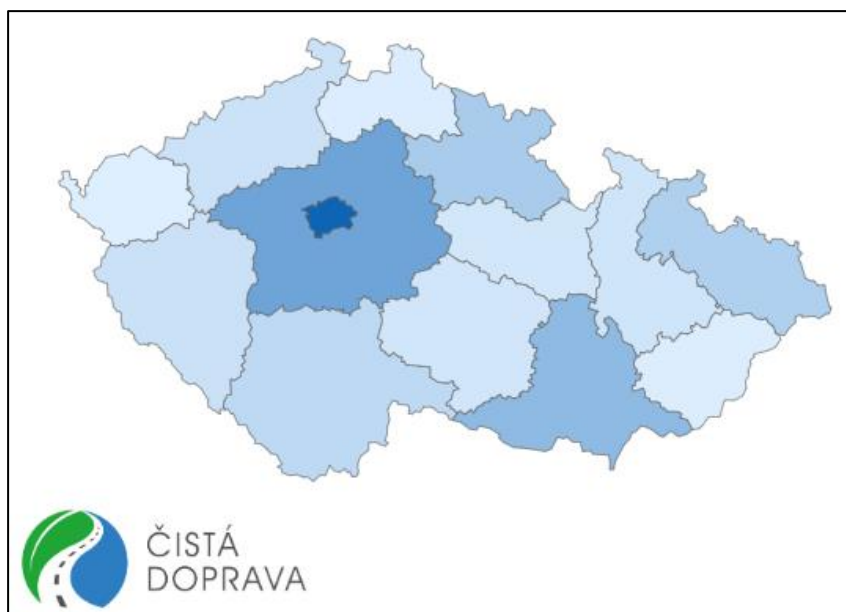
Vývoj počtu dobíjecích stanic

S narůstajícím počtem elektromobilů postupně narůstal také počet dobíjecích stanic. Těch bylo ke konci roku 2023 evidováno 2 313 a celkově 4 313 dobíjecích bodů, přičemž nejvíce jich bylo uvedeno do provozu v roce 2022, kdy bylo nově otevřeno 634 dobíjecích stanic. Stejně jako u PS, ne všechny dobíjecí stanice a body jsou veřejně přístupné. Tato práce se zaměří na zmapování pouze veřejné části, a to z hlediska vývoje počtu v uplynulých letech a dle počtu zastoupení v jednotlivých krajích. [43]

Počet dobíjecích bodů dle jednotlivých krajů je uveden na **obr. 9**, ze kterého je patrné, že nejvíce se jich opět nachází v Praze a Středočeském kraji. Hodnoty jsou rovněž vykresleny ve formě mapového podkladu, viz **obr. 10**.



Obr. 9: Počet dobíjecích bodů dle krajů ke konci roku 2023 [43]



Obr. 10: Mapa zastoupení dobíjecích bodů dle krajů ke konci roku 2023 [43]

Z této mapy je patrné, že počty dobíjecích bodů a registrovaných elektromobilů dle krajů, ve srovnání s mapou počtu registrací vozidel FCEV, viz **obr. 3**, vykazuje určité podstatné podobnosti. V obou případech je největší zastoupení v Praze a Středočeském kraji a dále je významné zastoupení také v Moravskoslezském kraji. Významná změna ovšem nastává v Jihomoravském kraji, kde prozatím nebyla registrována žádná vozidla FCEV a naopak vyšší počet registrací vozidel FCEV je v Karlovarském a Ústeckém kraji. Tento regionální nárůst je způsoben umístěním PS v Litvínově, kde se také nachází výrobná vodíku společnosti ORLEN.

Konkrétní hodnoty predikce počtu vozidel FCEV byly v dostupných zdrojích dohledány pouze pro rok 2030, což odpovídá variantě modelu distribuční sítě č. 3. Pro varianty modelu distribuční sítě č.1 a č.2 byly tyto odvozeny dle analýzy průběhu vývoje počtu elektromobilů. Počty vozidel FCEV, uvažované pro jednotlivé varianty modelu distribuční sítě, jsou uvedeny v **tab. 7**. Pro tvorbu modelu distribuční sítě byly jednotlivé kategorie vozidel sloučeny do 2 hlavních kategorií, a to kategorie osobní vozidla (zahrnující kromě osobních vozidel rovněž vozidla kategorie N1) a nákladní vozidla (zahrnující kategorie vozidel N2 a N3). Tyto hodnoty budou rovněž podstatnými vstupními veličinami pro model sloužící k verifikaci dosažených výsledků.

Tab. 7: Počet vozidel pro varianty řešení [vlastní]

Počet vozidel			
Kategorie	Varianta č.1	Varianta č.2	Varianta č.3
Osobní vozidla	790	2 205	5 200
Nákladní vozidla	91	254	600

4.4 STANOVENÍ DOSTATEČNÉHO POČTU PLNICÍCH STANIC A VÝROBEN VODÍKU

V návaznosti na provedené predikce vývoje počtu vozidel FCEV budou stanoveny potřebné počty PS a výroben vodíku pro jednotlivé varianty řešení. Zde je zapotřebí zohlednit podstatný rozdíl. Výrobní kapacity výroben vodíku nejsou na rozdíl od kapacit zásobníku PS standardizovány a liší se výrobnu od výroby. Proto bude výpočetně stanoven pouze počet potřebných PS. Počet výroben vodíku bude řešen dle dostupných informací o jejich plánované výstavbě. Výroby budou také muset splňovat určité požadavky, aby byly schopné zásobovat danou distribuční síť.

4.4.1 Stanovení dostatečného počtu plnicích stanic

V první fázi budou provedeny obecný postup výpočtu pro stanovení počtu PS, který bude dále aplikován pro jednotlivé varianty řešení.

Počet vozidel, jenž je stanice schopna obsloužit

V **kap. 4.1.2** jsou uvedeny provozní údaje vodíkových vozidel, rozdělených do jednotlivých kategorií. Z těchto údajů jsou nejpodstatnější ty, které se týkají spotřeby a času doplnění paliva.

$$\text{Počet obslužených vozidel} = \text{kapacita stanice} \div \text{průměrný odběr vodíku} \quad (1)$$

Tab. 8: Počet obslužených vozidel jednou PS [vlastní zpracování dle [41]]

Počet obslužených vozidel	
Kategorie vozidla FCEV	Počet vozidel
Osobní vozidla	55
Lehká užitková vozidla N1	31
Nákladní vozidla typu N2	15
Nákladní vozidla typu N3	5

V **tab. 8** bylo na základě disponibilní kapacity paliva spočítáno, kolik vozidel dle dané kategorie vozidel, je PS schopna plně obsloužit, než bude potřeba jejího doplnění (počítáno z disponibilní kapacity stanice 250 kg vodíku). Jedná se pouze o teoretický výpočet, v reálném provozu budou stanice využívat všechny kategorie vozidel současně, což bude zahrnuto v dalších výpočtech, blíže zohledňujících reálný provoz.

Časové vytížení stanice

Pro doplnění a kontrolu, zda jsou tyto hodnoty reálné, bude dále stanovena doba, během které budou všechna vozidla schopna doplnit palivo. Ta bude stanovena pro použití jednoho výdejního stojanu, kterým budou stanice vybaveny.

$$\text{Časové vytížení stanice} = \text{počet obslužených vozidel} \times \text{doba doplnění paliva} \quad (2)$$

Tab. 9: Časové vytížení plnicí stanice [vlastní zpracování dle [41]]

Časové vytížení stanice	
Kategorie vozidla FCEV	Celková délka (min)
Osobní vozidla	550
Lehká užitková vozidla N1	450
Nákladní vozidla typu N2	300
Nákladní vozidla typu N3	150

Z hodnot uvedených v **tab. 9**, bylo při kontrole časového vytížení zjištěno, že stanice během jednoho dne zvládne obsloužit všechny zákazníky, bez ohledu na kategorie vozidel. Nejdéle by to trvalo 55 zákazníkům s vozidly FCEV, kdy za použití jednoho plnicího stojanu by to mělo být zvládnutelné přibližně za 9,2 hodin (tento výpočet byl proveden zejména na základě problematiky dobíjecích stanic, u kterých může nastat situace, že uživatelé musí kvůli dlouhé době dobíjení baterií čekat, než se na ně dostane řada). Pro srovnání doplnění zásob vodíku stanice trvá přibližně 3 hodiny.

Samotný výpočet počtu potřebných PS je koncipován následovně:

- Nejdříve musí být stanoven průměrný počet vozidel doplňujících palivo během jednoho dne.
- Poté musí být stanoven denní odběr paliva pro všechna vozidla v rámci jedné kategorie, což bude následně sečteno na celkový denní odběr paliva.
- Toto množství musí být ještě upraveno koeficientem rezervní kapacity, aby byly zohledněny výkyvy od průměrných denních hodnot (zejména z toho důvodu, že řidiči mohou upřednostňovat doplňování paliva v určité dny, např. v pátek, na konci pracovního týdne). Cílem tohoto koeficientu je tedy zajištění dostatečné kapacity PS při nadměrném odběru v určitý den.
- Toto množství bude poté poděleno kapacitou stanic, z čehož bude zjištěn celkový počet potřebných PS.

Průměrný počet vozidel doplňujících palivo během jednoho dne

$$\text{Průměrný počet vozidel} = \text{celkový počet vozidel} \div \text{interval doplnění paliva} \quad (3)$$

Denní odběr paliva

$$\text{Denní odběr} = \text{počet vozidel} \times \text{denní odběr vozidel} \quad (4)$$

Celkový denní odběr paliva

$$\begin{aligned} \text{Celkový denní odběr} = & \text{denní odběr } M + \text{denní odběr } N1 + \text{denní odběr } N2 \\ & + \text{denní odběr } N3 \end{aligned} \quad (5)$$

Koeficient rezervní kapacity

Zmíněný koeficient rezervní kapacity byl stanoven na hodnotu 1,3, což znamená, že při výkyvech odběru mezi jednotlivými dny se uvažuje nárůst až 30 % oproti průměrným hodnotám. Počet vozidel doplňujících palivo během jednoho dne bude vypadat následovně.

Upravený denní odběr paliva:

$$\text{Upravený denní odběr} = \text{celkový denní odběr} \times \text{koef. rezervní kapacity} \quad (6)$$

Potřebný počet stanic

$$\text{Potřebný počet stanic} = \text{denní odběr} \div \text{disponibilní kapacita stanice} \quad (7)$$

Tento výpočet bude následně proveden pro každou variantu modelu distribuční sítě.

Varianta modelu distribuční sítě č. 1

V následujících **tab. 10**, **tab. 11** a **tab. 12** byly provedeny výpočty ke stanovení potřebného počtu PS.

Tab. 10: Průměrný počet vozidel doplňujících palivo [vlastní zpracování]

Průměrný počet vozidel doplňujících palivo			
Kategorie vozidla FCEV	Počet vozidel	Interval doplnění paliva (dny)	Průměrný počet vozidel
Osobní vozidla	608	11,25	54
Lehká užitková vozidla N1	182	7,27	25
Nákladní vozidla typu N2	46	3,33	14
Nákladní vozidla typu N3	46	2,39	19

Tab. 11: Celkový denní odběr všech vozidel [vlastní zpracování]

Celkový denní odběr			
Kategorie vozidla	Průměrný počet vozidel	Množství doplněného paliva (kg)	Denní odběr (kg)
Osobní vozidla	54	4,5	243
Lehká užitková vozidla N1	25	8	201
Nákladní vozidla typu N2	14	16	219
Nákladní vozidla typu N3	19	45	857
Celkový denní odběr			1 520

Tab. 12: Potřebný počet PS [vlastní zpracování]

Potřebný počet PS	
Položka	Hodnota
Celkový denní odběr (kg)	1 520
Koef. rezervní kapacity	1,3
Upravený denní odběr (kg)	1 976
Potřebný počet PS	8

Na základě výše provedených výpočtů lze stanovit, že pro variantu modelu distribuční sítě č. 1 bude zapotřebí 8 PS.

Varianta modelu distribuční sítě č. 2

V následujících **tab. 13**, **tab. 14** a **tab. 15** byly provedeny výpočty ke stanovení potřebného počtu PS.

Tab. 13: Průměrný počet vozidel doplňujících palivo [vlastní zpracování]

Průměrný počet vozidel doplňujících palivo			
Kategorie vozidla	Počet vozidel	Interval doplnění paliva (dny)	Průměrný počet vozidel
Osobní vozidla	1 652	11,25	147
Lehká užitková vozidla N1	496	7,27	68
Nákladní vozidla typu N2	124	3,33	37
Nákladní vozidla typu N3	124	2,39	52

Tab. 14: Celkový denní odběr všech vozidel [vlastní zpracování]

Celkový denní odběr			
Kategorie vozidla	Průměrný počet vozidel	Množství doplněného paliva (kg)	Denní odběr (kg)
Osobní vozidla	147	4,5	661
Lehká užitková vozidla N1	68	8	545
Nákladní vozidla typu N2	37	16	595
Nákladní vozidla typu N3	52	45	2 329
Celkový denní odběr			4 130

Tab. 15: Potřebný počet PS [vlastní zpracování]

Potřebný počet PS	
Položka	Hodnota
Celkový denní odběr (kg)	4 240
Koef. rezervní kapacity	1,3
Upravený denní odběr (kg)	5 512
Potřebný počet PS	23

Na základě výše provedených výpočtů lze stanovit, že pro variantu modelu distribuční sítě č. 2 bude zapotřebí 23 PS.

Varianta modelu distribuční sítě č. 3

V následujících **tab. 16**, **tab. 17** a **tab. 18** byly provedeny výpočty ke stanovení potřebného počtu PS.

Tab. 16: Průměrný počet vozidel doplňujících palivo [vlastní zpracování]

Průměrný počet vozidel doplňujících palivo			
Kategorie vozidla	Počet vozidel	Interval doplnění paliva (dny)	Průměrný počet vozidel
Osobní vozidla	4 000	11,25	356
Lehká užitková vozidla N1	1 200	7,27	165
Nákladní vozidla typu N2	300	3,33	90
Nákladní vozidla typu N3	300	2,39	125

Tab. 17: Celkový denní odběr všech vozidel [vlastní zpracování]

Celkový denní odběr			
Kategorie vozidla	Průměrný počet vozidel	Množství doplněného paliva (kg)	Denní odběr (kg)
Osobní vozidla	356	4,5	1 602
Lehká užitková vozidla N1	165	8	1 320
Nákladní vozidla typu N2	90	16	1 440
Nákladní vozidla typu N3	125	45	5 625
Celkový denní odběr			9 987

Tab. 18: Potřebný počet PS [vlastní zpracování]

Potřebný počet PS	
Položka	Hodnota
Celkový denní odběr (kg)	9 987
Koef. rezervní kapacity	1,3
Upravený denní odběr (kg)	12 983
Potřebný počet PS	52

Na základě výše provedených výpočtů lze stanovit, že pro variantu modelu distribuční sítě č. 3 bude zapotřebí 52 PS.

Pro ověření vypočteného množství potřebných PS lze použít projekt společnost ORLEN, která v rámci svého programu Hydrogen Eagle plánuje pro rok 2030 vybudovat 28 PS. Uvažuje tak s podstatně nižším počtem vozidel, než je uveden v aktualizaci NAP, což při počtu jimi plánovaných PS vychází přibližně na polovinu. Avšak další PS mohou být vybudovány i jinými společnostmi.

Výsledný počet potřebných PS byl stanoven se zahrnutím koeficientu rezervní kapacity, aby bylo možné pokrýt výkyvy zvýšení spotřeby v některé dny. Nicméně platí, že celkové množství denního odběru zůstane stejné a bude tak odpovídat průměrným hodnotám. Tyto průměrné hodnoty budou využity při verifikaci dosažených výsledků.

4.4.2 Stanovení dostatečného počtu výroben vodíku

V návaznosti na stanovení počtu potřebných PS je rovněž zapotřebí stanovit i potřebný počet výroben vodíku. Těch je v současné době v ČR 10, avšak zdaleka ne všechny budou moci být použity pro zásobování PS. K tomu totiž musí být výrobní dostatečně velké, aby mohly produkovat požadované množství v řádech alespoň několikaset kilogramů za den.

Další podmínkou, kterou musejí výrobní splňovat je ekologický způsob výroby. V rámci právních předpisů jsou totiž na vodík prodáváný na PS kladeny ekologické požadavky. Ty musí

výrobní splňovat, aby se jednalo o RFNBO, neboli zelený vodík. K jeho výrobě tedy musí být použita metoda elektrolýzy. K průzkumu současných i budoucích výroben byla využita data z interaktivní mapy ze stránky cistadoprava.cz s doplněním o data od společnosti ORLEN. [24], [41]

Z těchto dat byly vyřazeny výrobní s nedostatečnou kapacitou. Jako vhodné byly vybrány následující výrobní, které byly rozděleny do skupin podle stavu a podle způsobu výroby.

V provozu

Zelený vodík: Litvínov, Ústí nad Labem (není prozatím využívána k zásobování PS)

Šedý vodík: Kralupy, Valašské Meziříčí, Ostrava, Ostrava – OKK

V realizaci

Zelený vodík: Přerov, Frýdek Místek, Krnov, Prostějov, České Budějovice, Neratovice

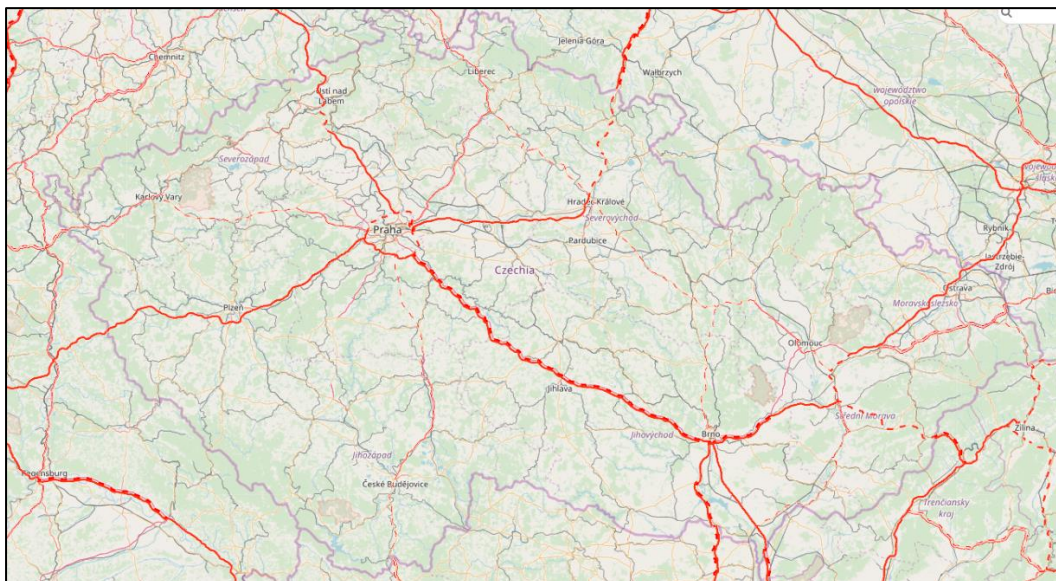
(Ve fázi realizace je také jedna výrobní v Ostravě. Ta však nebude do modelu zařazena z důvodu jejího plánovaného neveřejného využití. Vlastníkem bude Dopravního podnik města Ostrava, který ji bude využívat pro vlastní potřebu, a to doplňování paliva pro vodíková vozidla MHD).

Tyto vybrané stanice byly uspořádány do následující **tab. 19**, ve které je uvedeno množství, které budou jednotlivé výrobní schopny produkovat a zda jsou tyto vhodné pro zohlednění v rámci modelu distribuční sítě. Dále je však podstatné uvést, že ne všichni vodík, vyrobený v těchto výrobních, slouží jen pro zásobování PS.

Tab. 19: Údaje o výrobních vodíku [vlastní zpracování dle [41]]

Výrobní vodíku				
Umístění	Výroba elektrolýzou	Stav	Maximální denní výroba (kg)	Vyhovuje
Litvínov	Ano	V provozu	12 000	Ano
Ústí nad Labem	Ano	V provozu	5 750	Ano
Kralupy	Ne	V provozu	52 000	Ne
Valašské Meziříčí	Ne	V provozu	3 800	Ne
Ostrava	Ne	V provozu	35 500	Ne
Ostrava - OKK	Ne	V provozu	37 400	Ne
Ostrava - DP	Ano	V realizaci	1 000	Ne
Přerov	Ano	V realizaci	Neznámo	Ano
Frýdek Místek	Ano	V realizaci	400	Ano
Krnov	Ano	V realizaci	400	Ano
Prostějov	Ano	V realizaci	Neznámo	Ano
České Budějovice	Ano	V realizaci	440	Ano
Neratovice	Ano	V realizaci	Neznámo	Ano

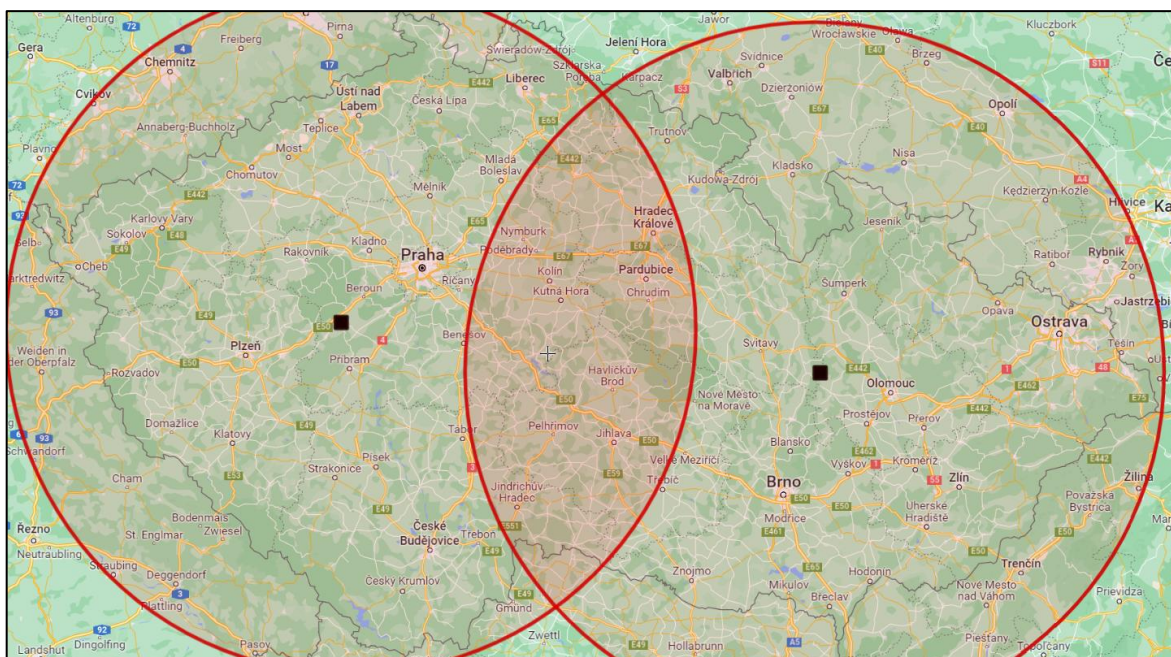
Doplňující informací pro tvorbu modelu distribuční sítě je i mezinárodní síť TEN-T, která v ČR tvoří úseky vyznačené na mapě na **obr. 11**.



Obr. 11: Mapa silniční dopravní sítě TEN-T ČR [44]

Celkově se jedná o souhrn silničních úseků o délce přibližně 600 km. To s ohledem na nařízení AFIR znamená, že na těchto silničních úsecích musí být k dispozici alespoň 3krát 1 tunu celkové kapacity vodíku, což znamená vybudování nejméně 6 PS na úsecích silniční sítě TEN-T. [41]

Pro doplnění bylo ještě na základě oblastí pokrytí zkoumáno, jaký minimální počet výroben vodíku by byl na území ČR zapotřebí. K tomu by teoreticky stačily pouze 2 výroby, viz **obr. 12**, kdy by byla první umístěna západně ve Středočeském kraji (přibližně mezi Prahou a Plzní) a druhá v severní části Moravy (přibližně mezi Svitavami a Olomoucí).



Obr. 12: Minimální počet výroben vodíku [vlastní]

Tyto zjištěné informace dále poslouží ke stanovení počtu potřebných výroben vodíku pro jednotlivé varianty řešení.

Varianta modelu distribuční sítě č. 1

Jak už bylo výše zmíněno, první varianta je nejbližší současnému stavu a z tohoto důvodu v ní bude použita pouze jedna výroba vodíku, která je již současně v provozu. Jedná se o výrobu v Litvínově, která v současnosti zásobuje obě PS již v provozu, které jsou veřejně přístupné. Jelikož se jedná o výrobu vodíku s největší výrobní kapacitou za použití elektrolýzy, neměla by mít problém obsloužit všech 8 PS.

Varianta modelu distribuční sítě č. 2

Druhá varianta uvažuje již s podstatně vyšším počtem PS, pro které už by bylo vhodné zajistit více výroben. Na základě odhadů časového vývoje počtu vodíkových vozidel lze ve zkoumaném období očekávat přibližně poloviční počet výroben, vztážený k roku 2030. To odpovídá počtu 4 výroben vodíku.

Varianta modelu distribuční sítě č. 3

Poslední varianta uvažuje predikce pro rok 2030, kdy lze předpokládat, že do této doby budou všechny výše uvedené výroby již vybudovány. Proto tato varianta bude analyzovat distribuční síť za použití již všech 8 výroben vodíku.

Pro přehlednost jsou všechny tyto údaje pro jednotlivé varianty uspořádány v následujícím

tab. 20.

Tab. 20: Přehled variant řešení – počet potřebných výroben vodíku a PS

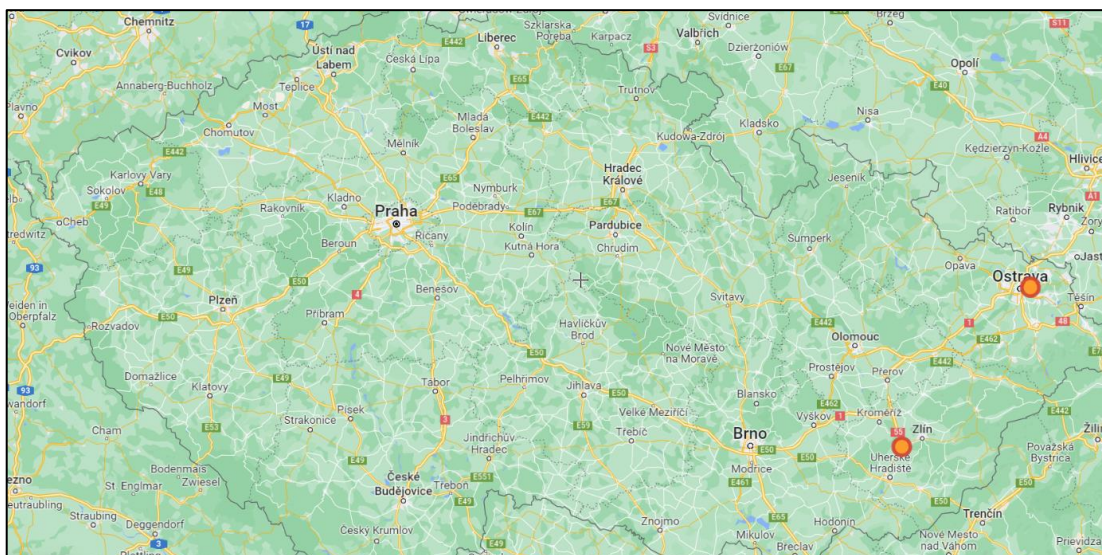
Množství objektů			
Položka	Varianta č.1	Varianta č.2	Varianta č.3
Výrobna vodíku	1	4	8
Plnicí stanice	8	23	52

5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ A VERIFIKACE VÝSLEDKŮ

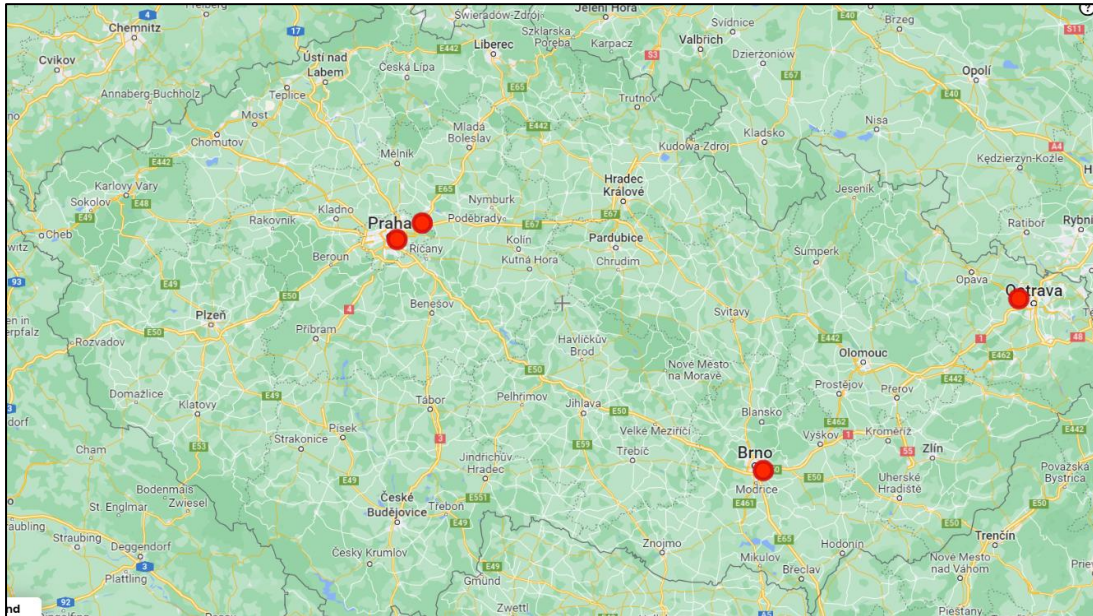
5.1 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY ŘEŠENÍ

5.1.1 Návrh modelu distribuční sítě

V předchozí **kap. 4.4** byly stanoveny počty potřebných PS a výroben vodíku pro jednotlivé varianty řešení. Na základě těchto hodnot bude navržen model distribuční sítě z hlediska rozmístění PS. Zohledněny byly rovněž některé veřejné PS, které jsou již nyní ve fázi realizace (Ostrava, Otrokovice) či přípravy (Praha, Brno, Ostrava), viz **obr. 13** a **obr. 14**. Ve všech variantách řešení bylo uvažováno rozmístění výroben vodíku dle **kap. 4.4.2**. Pro vytváření mapových podkladů bylo využito softwaru Scribble Maps. [45]

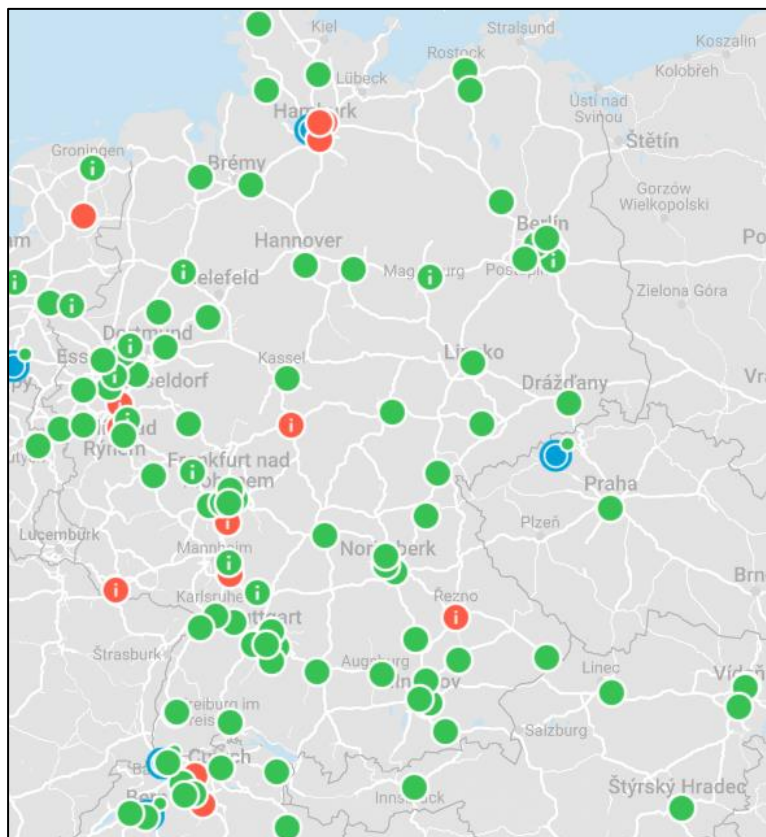


Obr. 13: Plyní stanice ve fázi realizace [24]



Obr. 14: Plnicí stanice ve fázi přípravy [24]

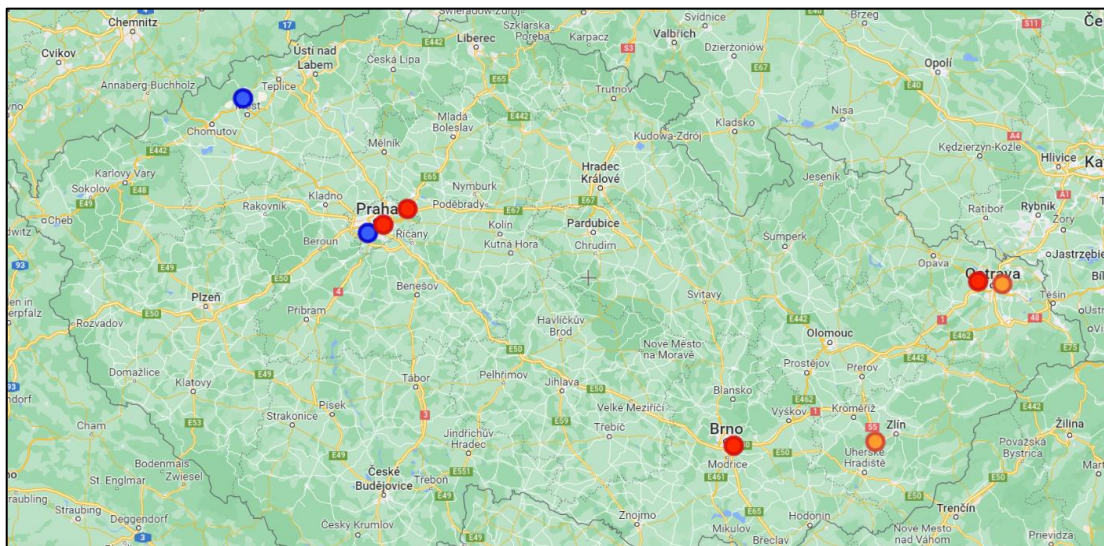
Pro porovnání je možno blíže se podívat na současnou distribuční síť v naší sousední zemi, Německu. Zde je totiž nejvíce stanic a také nejvíce vozidel FCEV v celé Evropě, viz Momentálně se zde nachází 91 PS, což je přibližně polovina z celkového počtu všech PS v Evropě. Jedná se tedy prozatím o nejvíce rozvinutou distribuční síť v Evropě.



Obr. 15: Mapa PS v Německu [23]

5.1.2 Varianta modelu distribuční sítě č. 1

První varianta vychází ze situace blízké současnému stavu, kdy se uvažuje 8 PS, které již mají určenou svoji lokalitu. Jejich místa jsou vyznačena na následující mapě na **obr. 16**.



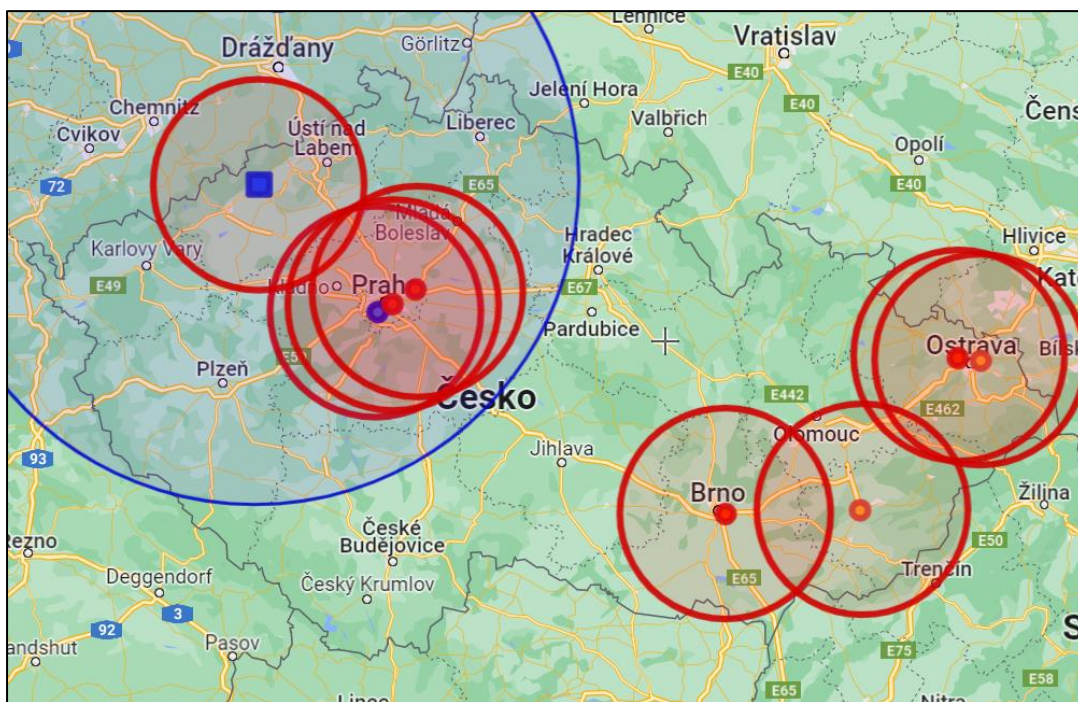
Obr. 16: Rozmístění PS (modré body – PS v provozu; oranžové body – PS ve fázi realizace; červené body – PS ve fázi přípravy) [vlastní zpracování s využitím [45]]

První varianta řešení uvažuje pouze jednu výrobní vodíku, a to v Litvínově, která je zobrazena na následující mapě na **obr. 17**. Tato výrobní je již v provozu a slouží k zásobování stávajících PS.



Obr. 17: Umístění výrobní vodíku (modrý čtverec) [vlastní zpracování s využitím[45]]

Návrh modelu distribuční sítě pro variantu č. 1 je uveden na **obr. 18**.



Obr. 18: Návrh modelu distribuční sítě – varianta č. 1 (modré body – PS v provozu; oranžové body – PS ve fázi realizace; červené body – PS ve fázi přípravy; modrý čtverec – výrobní vodíku v provozu) [vlastní zpracování s využitím [45]]

Při takto zvolené variantě by však vznikl zásadní problém s převozem vodíku. Ten by totiž kvůli velké vzdálenosti nebylo možné přemístit na všechny PS. Z tohoto hlediska by bylo možné obsloužit pouze 4 PS a zbylé 4 PS na Moravě a Slezsku by musely být zásobovány z jiné výroby v jejich okolí, která by musela být vybudována. Nabízela by se tu i možnost použití druhé výroby vodíku již v provozu. Ta se však nachází v Ústí nad Labem, tj. od zbylých 4 PS srovnatelně daleko jako výroba v Litvínově, tedy by tyto PS nebyla rovněž schopna obsloužit. V rámci verifikace výsledků tak bude tato varianta řešení analyzována teoreticky pouze z hlediska celkové kapacity.

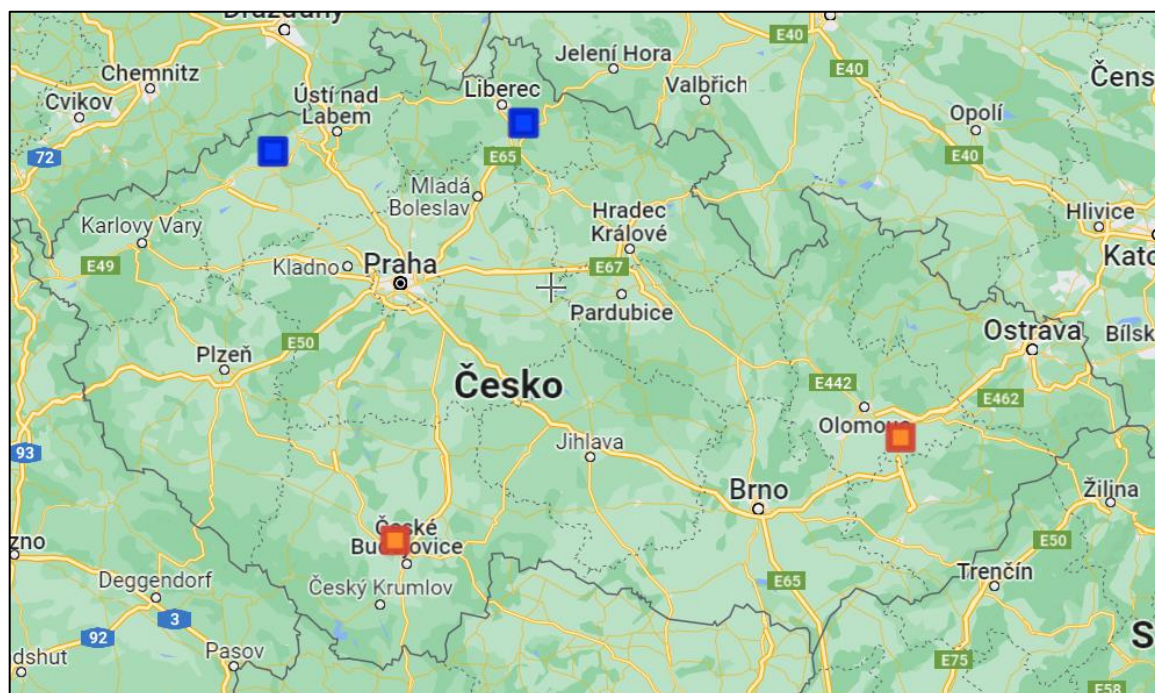
5.1.3 Varianta modelu distribuční sítě č. 2

Ve druhé variantě řešení je 8 PS s již danou lokací (uvažovány v rámci varianty řešení č. 1) doplněno o dalších 14 PS tak aby bylo dosaženo celkové pokrytí ČR. Toto rozmístění je zobrazeno na následujícím **obr. 19**.



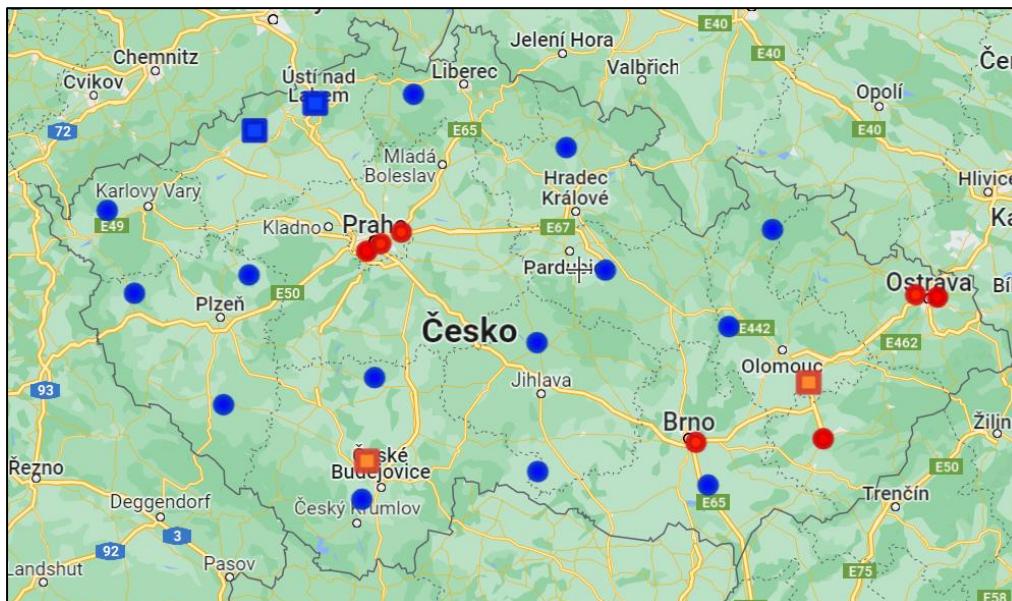
Obr. 19: Rozmístění PS (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací) [vlastní zpracování s využitím[45]]

Rozmístění vybraných 4 výroben je zobrazeno na **obr. 20**. V prvním kroku byly do mapy zaznačeny 2 stávající výrobní vodíku, které byly poté doplněny o další 2 na požadovaný počet 4 výroben. Také již bylo bráno v potaz jejich rozmístění, aby by docíleno celkového pokrytí ČR.



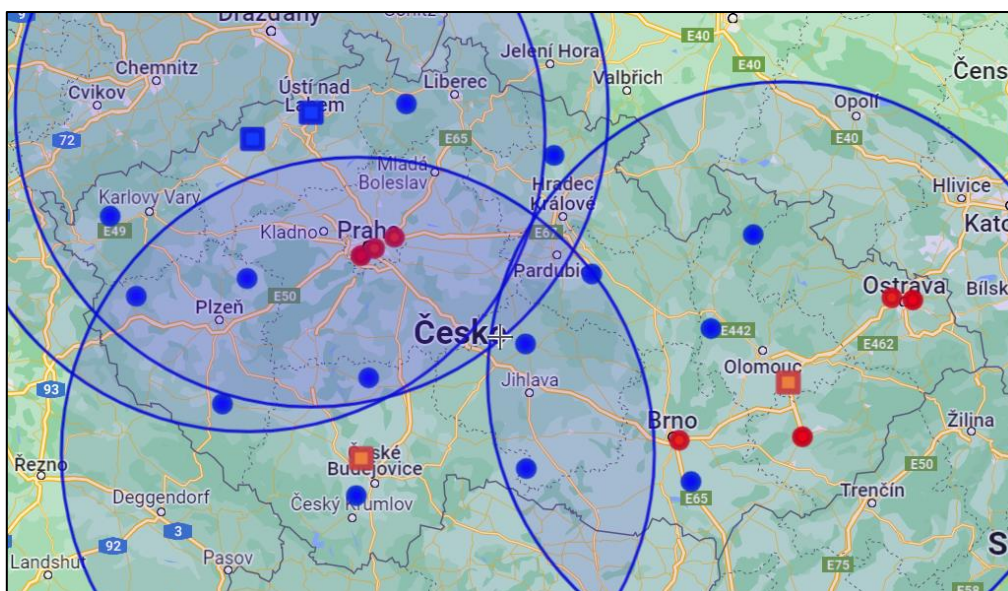
Obr. 20: Rozmístění výroben (modré čtverce – výrobní vodíku v provozu; oranžové čtverce – výrobní vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím[45]]

Souhrnně je rozmístění PS a výroben vodíku v rámci varianty řešení č. 2 uvedena na **obr. 21**.



Obr. 21: Rozmístění PS a výroben vodíku PS (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací; modré čtverce – výrobní vodíku v provozu; oranžové čtverce – výrobní vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]

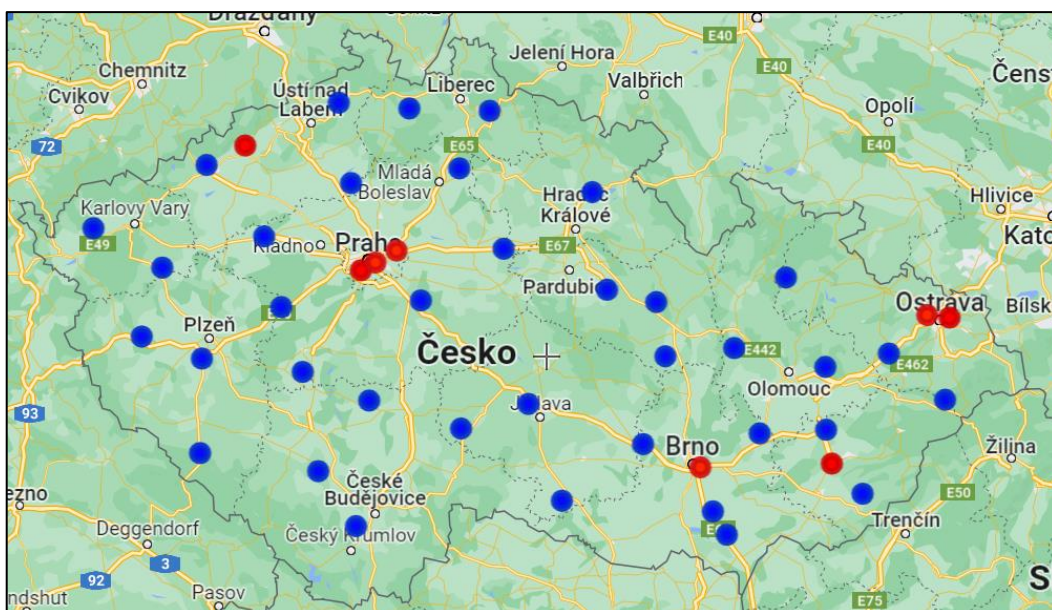
Návrh modelu distribuční sítě pro variantu č. 2 je představen na **obr. 21**. Z tohoto modelu vyplývá, že zvolené 4 výrobní by již zajistily dostatečné pokrytí pro distribuci vodíku na PS, a to kdekoliv na území ČR.



Obr. 22: Návrh modelu distribuční sítě – varianta č. 2 (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací; modré čtverce – výrobní vodíku v provozu; oranžové čtverce – výrobní vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]

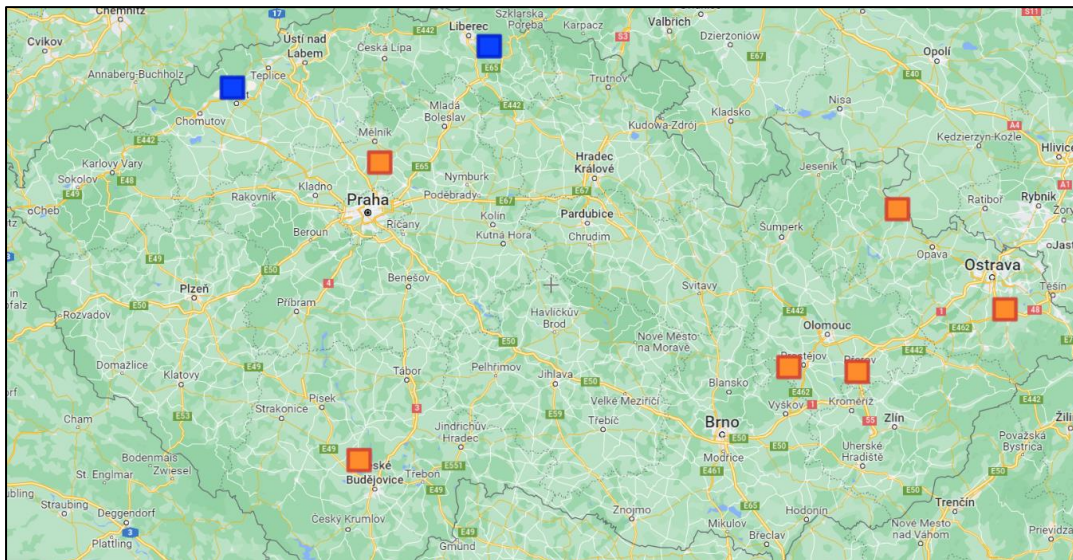
5.1.4 Varianta modelu distribuční sítě č. 3

Třetí varianta je vytvořena pro predikce k roku 2030, kdy bude dle provedených analýz, zapotřebí 52 PS. Způsobů, kterými by šlo přistupovat k jejich rozmístění se nabízí hned několik a při takovém množství PS je obtížné držet se jen jednoho z nich. Proto při jejich rozmístění byly zohledněny nejdříve již známé pozice PS. Další PS byly rozmístovány podél významných silničních úseků, zejména podél úseků v rámci mezinárodní silniční sítě TEN-T. To bylo následně doplněno rozmístěním zbývajících PS na pozice, které zajistili více rovnoměrné pokrytí území ČR. Výsledná síť PS je znázorněna na **obr. 23**.



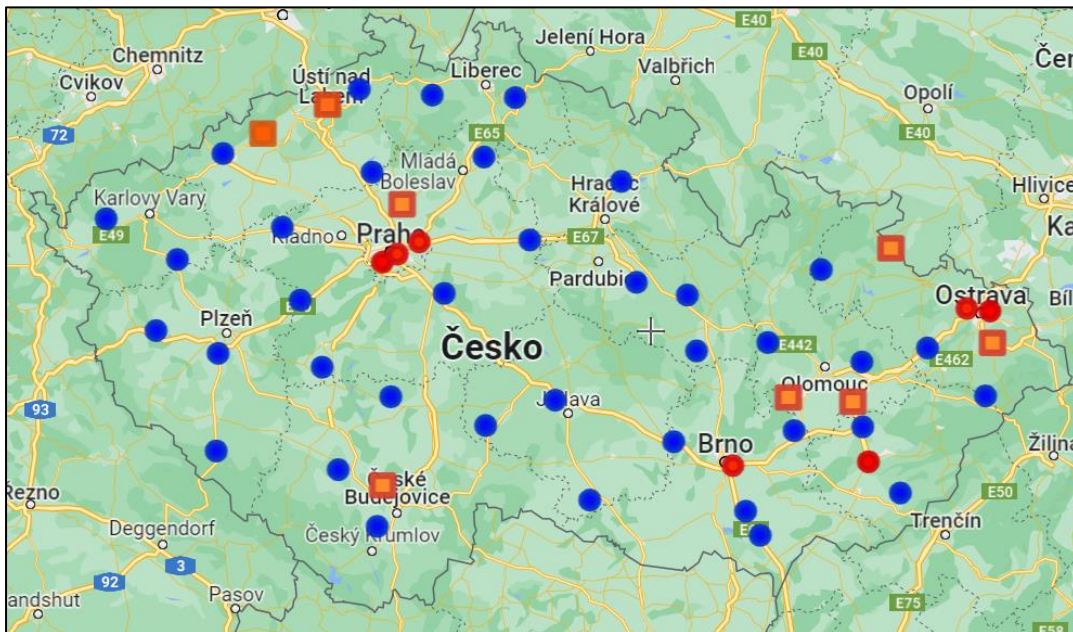
Obr. 23: Rozmístění PS (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací)
[vlastní zpracování s využitím[45]]

Pro tuto variantu je již uvažováno se všemi 8 známými výrobkami vodíku, označenými na **obr. 24**.



Obr. 24: Rozmístění výroben vodíku (modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]

Návrh modelu distribuční sítě pro variantu č. 3 je uveden na **obr. 25** (již bez zakreslených oblastí pokrytí, jelikož v této variantě je plně pokryto celé území ČR jak PS, tak i výrobny vodíku).



Obr. 25: Návrh modelu distribuční sítě – varianta č. 3 (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací; modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]

5.2 VERIFIKACE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

5.2.1 Metoda verifikace výsledků

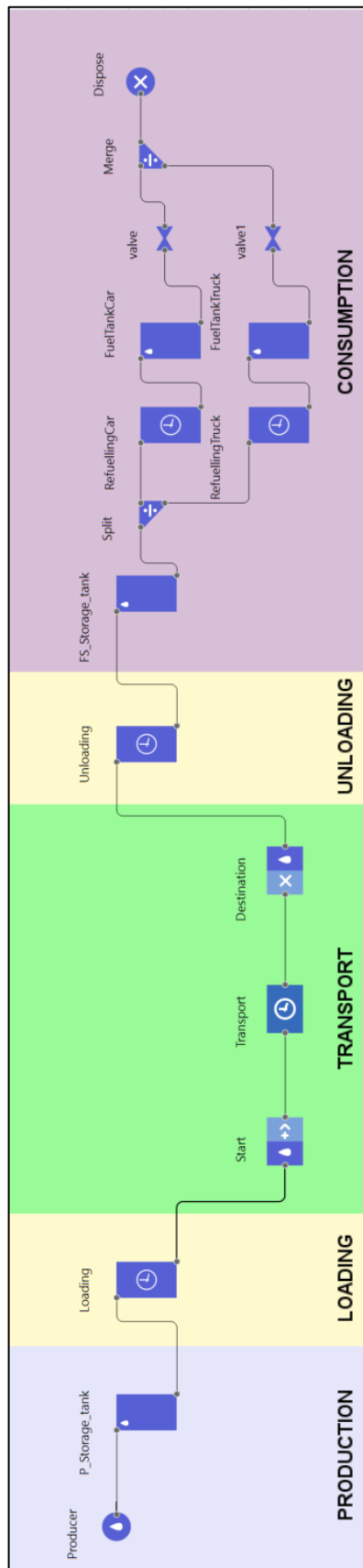
Dosažené výsledky řešení, tedy návrhy jednotlivých variant modelu distribuční sítě, je dále nutné verifikovat pro ověření správného fungování distribuční sítě při stanovených parametrech. Pro účely verifikace výsledků bylo využito metod simulačního modelování k provedení analýz kapacity a toku materiálu a analýz výkonu pro jednotlivé varianty řešení. [46], [47]

Pro tvorbu modelu sloužícího pro verifikaci výsledků byl zvolen vhodný simulační nástroj, a to software AnyLogic. Jedná se o univerzální simulační software, který umožňuje využití různých metod simulačního modelování. Pro účely této práce byl vytvořen model pro verifikaci výsledků založený na metodě Discrete Event Modeling. [46], [48]

Tato metoda spočívá ve vytvoření procesu, jako sekvencí jednotlivých disktrétních událostí a zaměřuje se na procesy systému o střední úrovni abstrakce. Tato metoda se využívá například v logistice pro přepravní operace, kdy je v ní možno vhodně namodelovat jednotlivé kroky přepravního procesu. [46], [47]

Vytvořený model pro verifikaci výsledků, viz **obr. 26**, znázorňuje proces výroby, distribuce a spotřeby vodíku v závislosti na počtu výroben vodíku, počtu PS a počtu vodíkových vozidel. Jednotlivé fáze procesu byly v modelu barevně rozlišeny – fáze výroby světle modrou barvou, nakládka a vykládka vodíku žlutou barvou, přeprava vodíku k PS zelenou barvou a spotřeba vodíku vozidly FCEV fialovou barvou.

Počet uvažovaných vozidel FCEV v jednotlivých variantách řešení vychází z predikcí provedených v **kap. 4.3, tab. 7**, tedy uvažovány byly 2 hlavní kategorie vozidel, a to kategorie osobní vozidla (zahrnující kromě osobních vozidel rovněž vozidla kategorie N1) a nákladní vozidla (zahrnující kategorie vozidel N2 a N3). Pro tyto kategorie byly stanoveny: vážený průměr množství odebraného paliva a vážený průměr doby doplnění paliva. dalším rozdílným parametrem je rozdílná hodnota kapacita nádrže. Pro účely zohlednění těchto rozdílů byla fáze spotřeby vodíku vozidly FCEV rozdělena na 2 větve, kdy každá odpovídá dané uvažované kategorii vozidel FCEV.



Obr. 26 Model pro verifikaci výsledků – proces výroby, distribuce a spotřeby vodíku [vlastní zpracování s využitím [46]]

Celý proces výroby, distribuce a spotřeby vodíku je tvořen různými funkčními bloky. Každému z těchto bloků byly nastaveny příslušné hodnoty vstupních parametrů, které udávají zejména to, jakou rychlostí a v jakém množství se bude vodík v celém procesu pohybovat. Některé podstatné parametry (např. množství vyráběného vodíku, počet výroben, počet PS, počet osobních a nákladních FCEV vozidel) je možné variovat také v průběhu provádění jednotlivých simulací. Pro jednotlivé bloky byly rozhodující následující parametry.

- Výrobce – Zde byl zvolen parametr vyjadřující množství výroby vodíku v kilogramech za sekundu. Toto množství se mění na základě celkové poptávky po vodíku, určující potřebné vyráběné množství.
- Zásobník výrobce – Udává množství vyrobeného vodíku v kilogramech, který je zde uchován, než dojde k následné distribuci. Jeho velikost se odvíjí od počtu výroben.
- Nakládka – Jedná se o časový parametr, kdy naložení jednoho přepravní traileru trvá 3 hodiny. Tato doba se dělí počtem výrobců z důvodu zohlednění současného plnění více přepravních trailerů dle počtu výrobců.
- Cesta – Jedná se o další časový parametr, který vyjadřuje rozdílnou dobu přepravy vodíku traileru na PS. Předpokládaná doba se může pohybovat v rozmezí 2 až 3 hodin.
- Vykládka – Stejně jako u nakládky se jedná o časový parametr, vyjádřený v hodinách, který je taktéž dělen počtem výrobců. Vyjadřuje činnost více přepravních trailerů naráz. Vykládka jednoho nákladního traileru trvá 3 hodiny.
- Zásobník PS – Parametr popisuje objem uskladněného vodíku v PS, který bude následně vydán vozidlům doplňujícím palivo. Jedná se o hodnotu 250 kg, která je násobena počtem PS.
- Plnění (osobních, nákladních) vozidel – Těmto blokům náleží 3 parametry, kdy první z nich vyjadřuje množství odebraného paliva v kilogramech, druhý časový parametr zohledňuje dobu plnění a třetí udává, za jakou dobu bude vozidlo opět muset doplnit palivo.

Omezující podmínkou výroby vodíku jsou plné zásobníky PS, v tomto okamžiku je v rámci celého procesu zastaven přísun vodíku od výrobce a tento se spustí až v okamžiku, kdy stav zásob PS poklesne pod 20 %. Na vytvořeném modelu byly provedeny simulace jednotlivých variant řešení, kdy simulační čas byl nastaven na 30 dní.

Pro možnost lepšího znázornění výsledků jednotlivých simulací byly v softwaru AnyLogic přidány do modelu grafické výstupy, viz **příloha. 1**, kdy tyto umožňují zobrazit např.:

- stav zásobníků výrobců – poměr hodnoty zásoby vodíku k celkové kapacitě (%)

- stav zásobníků výrobců – celkové množství vodíku (kg)
- poměr výroby a spotřeby (kg/s)
- poměr doplněného a vydaného množství PS (kg)
- stav zásobníku PS – poměr hodnoty zásoby vodíku k celkové kapacitě (%)
- stav zásobníku PS – celkové množství vodíku (kg)
- počet naplněných osobních vozidel FCEV (ks)
- počet naplněných nákladních vozidel FCEV (ks)

5.2.2 Verifikace výsledků varianty modelu distribuční sítě č. 1

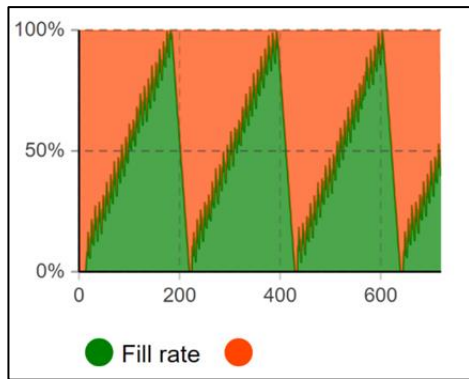
Vstupní hodnoty pro variantu č. 1 jsou uvedeny v následující **tab. 21**. Tato varianta je zobrazena na řešení problematiky kapacity distribuční sítě. Při této konfiguraci by zde vzniknul problém s velkou vzdáleností na přepravu vodíku, jak už bylo uvedeno v **kap. 5.1.2**.

Tab. 21: Vstupní hodnoty varianty č. 1 [vlastní]

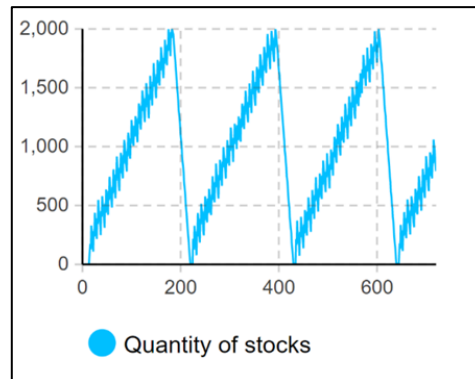
varianta č.1	
Položka	Množství
Výrobna vodíku	1
Plnicí stanice	8
Osobní vozidla	790
Nákladní vozidla	91

Výsledné hodnoty provedené simulace

- vyrobené množství za den – 1 600 kg
- vyrobené množství celkem – 40 500 kg
- vydané množství celkem – 38 650 kg
- vydané množství pro osobní vozidla celkem – 11 500 kg
- vydané množství pro nákladní vozidla celkem – 27 150 kg
- poměr vydaného paliva mezi vozidly – osobní vozidla odebrala 29,75 % a nákladní 70,25 %
- počet obslužených osobních vozidel – 2 553
- počet obslužených nákladních vozidel – 603
- počet obslužených vozidel celkem – 3 156
- počet uskutečněných transportů – 80
- stav zásobníku PS – Na **obr. 27** je stav zásobníků vyjádřený v procentech a na **obr. 28** je vyjádřený v množství v kg. Z uvedených grafů vyplývá kapacita vyráběného množství je dostačující pro udržení zásob PS.

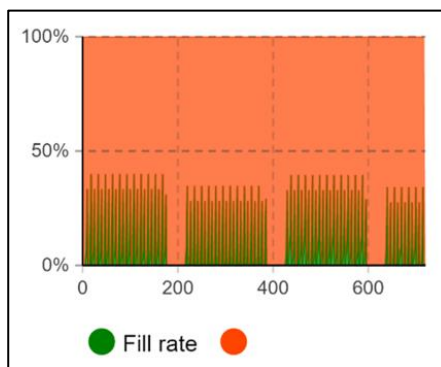


Obr. 27: Stav zásobníků PS v % [vlastní zpracování s využitím [46]]

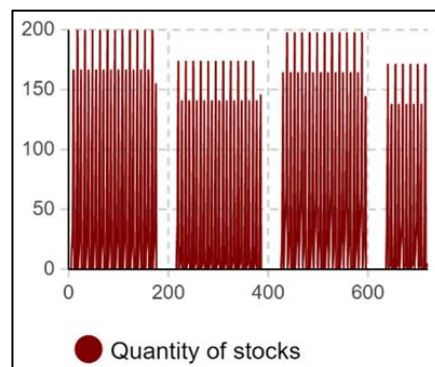


Obr. 28: Stav zásobníků PS v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]

- stav zásobníků výrobců – Dle **obr. 29** **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** se stav zásobníku výrobce vodíku pohybuje v rozmezí cca 0 až 42 %, na **obr. 30** **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je zobrazen stav zásobníku vyjádřený množstvím v kg.



Obr. 29: Stav zásobníku výrobce v % [vlastní zpracování s využitím [46]]



Obr. 30: Stav zásobníku výrobce v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]

Kompletní výsledky provedené simulace jsou součástí **příloha. 2**. Shrnutí provedené simulace

Během sledovaného období 30 dní bylo celkem vyrobeno 40 500 kg a spotřebováno 38 650 kg vodíku. K zajištění plynulé distribuce je zapotřebí denní výroba vodíku alespoň 1600 kg. Provedeno bylo celkem 80 transportů vodíku na PS, přičemž bylo celkově obslouženo 3 156 vozidel napříč všemi kategoriemi. Přibližně 70 % vodíku bylo spotřebováno nákladními vozidly.

Celkové vyráběné množství vodíku je plně dostačující pro tuto variantu. Z pohledu kapacity je tak nastavení varianty modelu distribuční sítě č. 1 funkční, avšak s ohledem na skutečnost, že výroba vodíku není schopna obsloužit všechny uvažované PS, není toto nastavení zcela optimální a je nutné vybudovat další lépe přístupnou výrobu vodíku.

5.2.3 Verifikace výsledků varianty modelu distribuční sítě č. 2

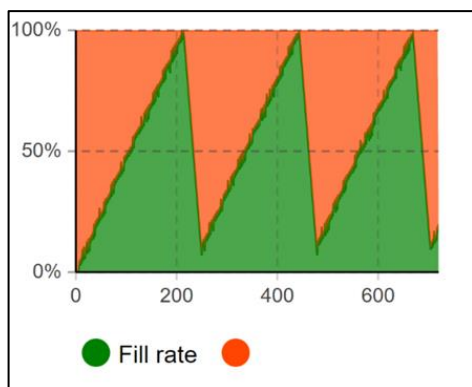
Ve druhé variantě je uvažováno 23 PS, které by měly zajistit dostatečné uzemní pokrytí pro celou ČR. Vstupní parametry pro tento scénář jsou uvedeny v **tab. 22**.

Tab. 22: Vstupní hodnoty varianty č.2 [vlastní]

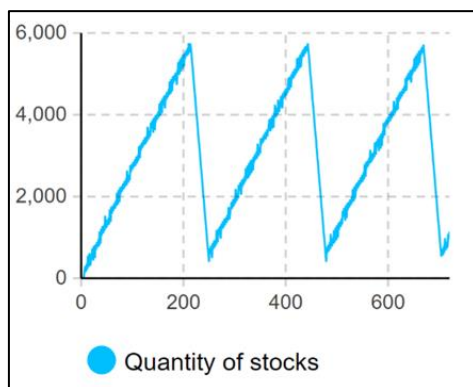
Varianta č.2	
Položka	Množství
Výrobná vodíku	8
Plnicí stanice	23
Osobní vozidla	2 205
Nákladní vozidla	254

Výsledné hodnoty provedené simulace

- vyrobené množství za den – 4 200 kg
- vyrobené množství celkem – 107 800 kg
- vydané množství celkem – 105 800 kg
- vydané množství pro osobní vozidla celkem – 31 700 kg
- vydané množství pro nákladní vozidla celkem – 74 100 kg
- poměr vydaného paliva mezi vozidly – osobní vozidla odebrala 29,96 % a nákladní 70,04 %
- počet obslužených osobních vozidel – 7 044
- počet obslužených nákladních vozidel – 1 646
- počet obslužených vozidel celkem – 8 690
- počet uskutečněných transportů – 214
- stav zásobníku PS – Dle **obr. 31** se stav zásobníků pohybuje v rozmezí přibližně 11 až 100 % (600 až 5 700 kg, viz **obr. 32**).

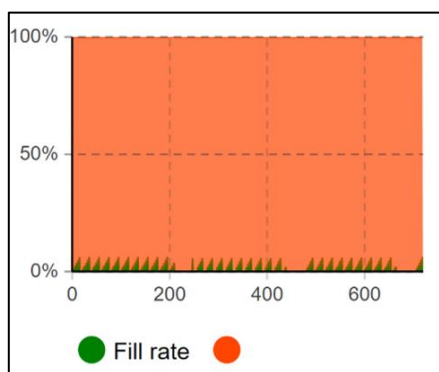


Obr. 31: Stav zásobníku PS v % [vlastní zpracování s využitím [46]]

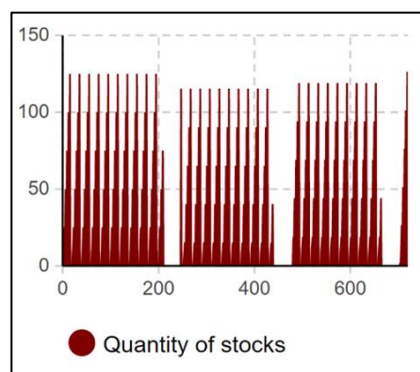


Obr. 32: Stav zásobníku PS v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]

- stav zásobníků výrobců – Dle **obr. 33** se stav zásobníku výrobce vodíku pohybuje v rozmezí cca 0 až 4 %, na **obr. 34** je zobrazen stav zásobníku vyjádřený množstvím v kg.



Obr. 33: Stav zásobníku výrobce v % [vlastní zpracování s využitím [46]]



Obr. 34: Stav zásobníku výrobce v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]

Kompletní výsledky provedené simulace jsou součástí **příloha. 3**.

Shrnutí provedené simulace

Během sledovaného období bylo celkem vyrobeno 107 800 kg a spotřebováno 105 800 kg vodíku. Minimální potřebná denní výroba vodíku byla 4 200 kg. Celkově bylo provedeno 214 transportů vodíku a bylo obsluženo 8 690 vozidel.

Oproti variantě č. 1 zde dochází k plynulejšímu zásobování PS ze strany 4 výroben a během simulace nedojde zcela k vyprázdnění zásobníků PS. Ve variantě č. 2 se výrazně urychlila distribuce paliva na jednotlivé PS, díky využití více výroben vodíku. Tato varianta je tak funkční a dokáže již zajistit dostatečný a plynulý přesun vodíku na PS.

5.2.4 Verifikace výsledků varianty modelu distribuční sítě č. 3

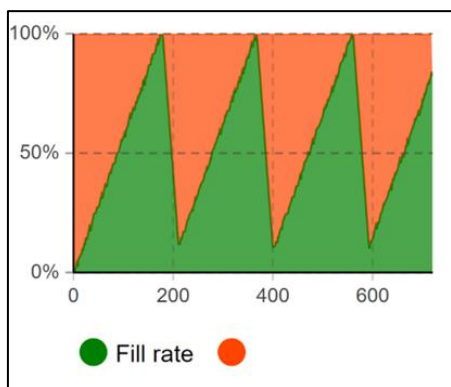
Ve variantě č. 3 je uvažováno s 52 PS, které byly stanoveny výpočtem v **kap. 4.4.1**. Další parametry jsou uvedeny v následující **tab. 23**.

Tab. 23: Vstupní hodnoty varianty č.3 [vlastní]

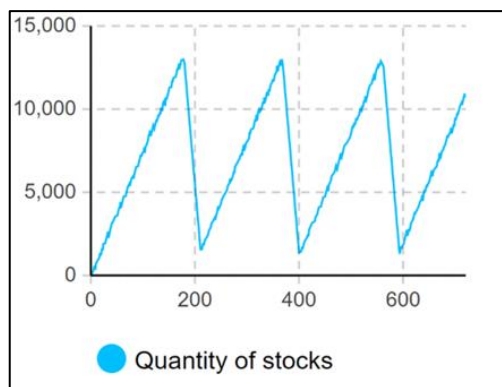
Varianta č.3	
Položka	Množství
Výrobní vodíku	8
Plnicí stanice	52
Osobní vozidla	5200
Nákladní vozidla	600

Výsledné hodnoty provedené simulace

- vyrobené množství za den – 10 500 kg
- vyrobené množství celkem – 272 350 kg
- vydané množství celkem – 259 750 kg
- vydané množství pro osobní vozidla celkem – 79 300 kg
- vydané množství pro nákladní vozidla celkem – 180 450 kg
- poměr vydaného paliva mezi vozidly – osobní vozidla odebrala 30,53 % a nákladní 69,47 %
- počet obslužených osobních vozidel – 17 628
- počet obslužených nákladních vozidel – 4 009
- počet obslužených automobilů celkem – 21 637
- počet uskutečněných transportů – 542
- stav zásobníku PS – Dle **obr. 35** se stav zásobníků pohybuje v rozmezí přibližně 15 až 100 % (2300 až 13 000 kg, viz **obr. 36**).

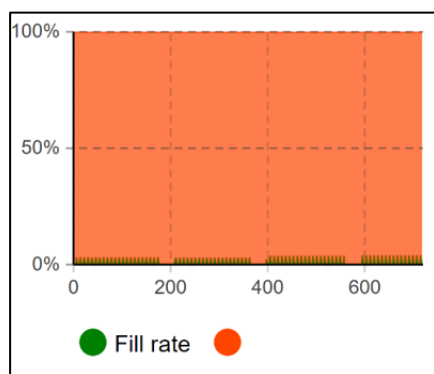


Obr. 35: Stav zásobníku PS v % [vlastní zpracování s využitím [46]]

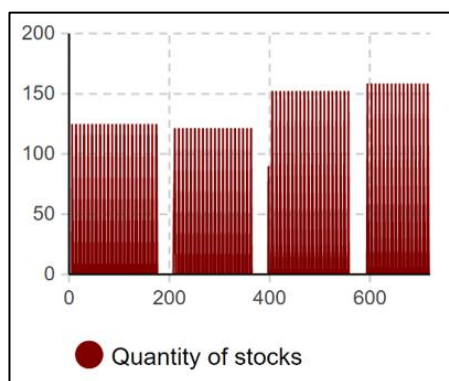


Obr. 36: Stav zásobníku PS v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]

- stav zásobníků výrobců – Dle **obr. 37** se stav zásobníku výrobce vodíku pohybuje v rozmezí cca 0 až 2 %, na **obr. 38** je zobrazen stav zásobníku vyjádřený množstvím v kg.



Obr. 37: Stav zásobníku výrobce v % [vlastní zpracování s využitím [46]]



Obr. 38: Stav zásobníku výrobce v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]

Kompletní výsledky provedené simulace jsou součástí **příloha. 4**.

Shrnutí provedené simulace

Během sledovaného období bylo vyrobeno 272 350 kg a spotřebováno 259 750 kg vodíku, při denní výrobě 10 500 kg. K zajištění toho bylo zapotřebí 542 transportů vodíku. Celkově bylo během sledovaného období obslouženo 21 637 vozidel.

Obdobně jako u varianty č. 2 nedojde během simulace zcela k vyprázdnění zásobníků PS, tyto si udržují větší zásoby. Velmi nízká je však hodnota zásob výrobce, což by mohlo být problematické v případě nečekaného výpadku výroby. I tato varianta je však funkční a dokáže opět zajistit dostatečný a plynulý přesun vodíku na PS.

5.2.5 Shrnutí verifikace výsledků všech variant

Provedené simulace všech 3 navržených variant modelu distribuční sítě potvrdily jejich funkčnost. Neoptimálnějšího nastavení bylo dosaženo ve variantě č. 2, která dokáže zajistit dostatečný a plynulý přesun vodíku na PS. Podobných výsledků bylo rovněž dosaženo ve variantě č. 3, kde však s ohledem na nízký stav zásob výrobce vzniká riziko v případě nečekané odstávky výroby. Varianta č. 1 je z kapacitního hlediska rovněž funkční, avšak pro dosažení lepších výsledků a uvedení tohoto modelu do provozu je nutné vybudování další vhodně umístěné výroby vodíku, což by vedlo i ke zvýšení zásob v PS.

6 DISKUZE

Model distribuční sítě byl vytvářen ve třech různých variantách. Varianta č.1 se nejvíce přibližuje současnému stavu, avšak pro pokrytí celého území ČR je nedostatečná. Poslední varianta č. 3, dle predikcí pro rok 2030, zase naopak uvažuje s relativně vysokým počtem vozidel FCEV, jenž se v současné chvíli jeví jako ne příliš reálný.

Z tohoto pohledu nejslibněji působí druhá varianta, ve které je již dosaženo cíleného pokrytí celého území ČR a zároveň uvažuje s nižšími počty vozidel FCEV, které lze považovat za bližší skutečnému vývoji. Také se nejeví zcela reálně skutečnost, že pro uskutečnění varianty č. 3 by muselo být do roku 2030 vybudováno dalších 44 veřejných PS, aby bylo dosaženo požadovaného počtu 52 PS, (za předpokladu, že 2 veřejné PS jsou již v provozu a dalších 6 se buduje).

Pro všechny tyto analyzované varianty však souhrnně platí, že uvažují pouze s přepokládanými počty vozidel, na základě odhadů budoucího vývoje počtu vozidel FCEV. Tyto počty mohou být ve skutečnosti velmi odlišné, což byl jeden z hlavních důvodů vytvoření a analyzování více variant. Vývoj počtů vodíkových vozidel totiž záleží na celé řadě faktorů, na základě kterých si je uživatelé budou, či nebudou chtít pořizovat.

Nejpodstatnějším z těchto faktorů je cena, jak už samotných vozidel, tak i paliva. Aby byly vozidla FCEV pro uživatele více atraktivní, musejí být zejména jejich provozní náklady srovnatelné s provozními náklady elektromobilů, či klasických automobilů se spalovacími motory. To je v současné době poměrně problematické, protože cena vodíku je 499 Kč/kg i při skutečnosti, že je na něj osobní vozidlo FCEV schopno ujet přibližně 100 km. To znamená, že v budoucnu musí dojít k výraznému zlevnění tohoto paliva, aby tato technologie byla více konkurenceschopná. Dalším limitujícím faktorem je zatím nedostatečný počet PS. V současnosti jsou však již budovány další PS, tedy tento problém nebude postupně tak významný.

Značný vliv na rozšiřování vozidel FCEV bude mít i energetická politika, která by například mohla více prosazovat používání vodíku. To by mělo značný vliv zejména na průmysl a také i dopravní sektor, kdy by prostřednictvím nově vzniklých právních předpisů mohl být kladen větší důraz na používání vodíku, či k tomu alespoň byly nastaveny příznivější podmínky. S tím se také pojí snaha o postupné snižování závislosti na fosilních palivech, kterou prosazuje řada programů EU. Jak už bylo dříve zmíněno v **kap. 2.6**, v zemích EU má být do roku 2035 zakázána výroba nových vozidel se spalovacími motory. To by mohlo do značné míry také napomoci rozvoji vozidel FCEV.

Souhrnně lze tedy říci, že budoucí vývoj počtu vozidel FCEV, je v současnosti značně nejasný a bude ovlivněn řadou faktorů, ze kterých budou mít zřejmě největší vliv cena a ekologie. Rozvoj

distribuční sítě vodíkových PS by sám o sobě neměl smysl, kdyby se nenavýšoval počet vozidel FCEV.

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout vhodný model distribuční sítě vodíkových plnicích stanic na území ČR. Nejdříve byl prozkoumán současný stav, ve kterém byla blíže představena technologie vozidel FCEV a jejich infrastruktury. Zde byl také zmapován současný počet vozidel FCEV a vodíkových plnicích stanic. Jako další zde byly zkoumány ostatní aspekty, které mají vliv na rozšiřování této technologie, přičemž hlavními z nich jsou ekonomika, ekologie a politické a právní vlivy. Jako problém k řešení byla vymezena nedostatečně rozvinutá distribuční síť vodíkových plnicích stanic.

Následně bylo prozkoumáno fungování vodíkových PS a dalších prvků distribuční sítě, ze kterých byly vymezeny limitující podmínky pro tvorbu modelu distribuční sítě. Ty se týkaly zejména množství výroby a kapacity, kterou disponují PS a přepravní trailery. Také zde byly stanoveny časové intervaly potřebné pro přepravu vodíku a pro jeho přečerpání z jednotlivých členů distribuční sítě. Tyto limitující podmínky byly následně kvantifikovány a využity i při verifikaci výsledků.

Poté byly představeny tři různé varianty pro návrh modelu distribuční sítě. Tyto varianty jdou vzestupně z časového hlediska, což se projevuje nárůstem počtu prvků distribuční sítě a nárůstem počtu uživatelů.

Jednotlivé varianty se odvíjely především od počtu vozidel FCEV, pro které byly navrhovány. Proto byl proveden průzkum budoucího vývoje počtu vozidel FCEV, kdy byl nalezen konkrétní odhad pro rok 2030. Pro tento rok byla navrhována poslední třetí varianta modelu distribuční sítě. Počet vozidel pro předešlé dvě varianty byl stanoven na základě vývoje počtu elektromobilů v ČR. Pro jednotlivé varianty bylo prostřednictvím výpočtu stanoveno potřebné množství vodíku pro všechna vozidla. To bylo následně poděleno kapacitou plnicí stanice a bylo zjištěno, kolik PS bude zapotřebí vybudovat.

Dále byla provedena analýza prvků distribuční sítě. Bylo zde zjištěno, že v současnosti jsou již známé pozice 8 PS. Byla provedena analýza výroben vodíku, které by byly vhodné pro zásobování PS. Tyto výroby musely tedy splňovat požadovaná kritéria výroby dostatečného množství vodíku, za použití vhodné ekologické metody výroby. Těmto požadavkům vyhovělo celkem 8 výroben vodíku (pro rok 2030).

Dosaženými výsledky řešení byly návrhy distribuční sítě pro jednotlivé varianty. Ty udávaly jednak počty PS a výroben vodíku, ale také řešily návrh modelu distribuční sítě i z územního

hlediska, tedy rozmístění PS a výroben vodíku. Výsledné návrhy modelů distribuční sítě byly zpracovány ve formě mapových podkladů.

Výsledky jednotlivých variant modelu distribuční sítě byly pomocí simulačního modelování verifikovány, kdy na základě provedených simulací byla potvrzena jejich funkčnost. Všechny navržené varianty umožňovaly pokrýt spotřebu stanoveného počtu FCEV vozidel.

Souhrnně lze uvést, že pro fungování distribuční sítě je velmi podstatný počet výroben vodíku, který umožňuje navýšení přepravní kapacity, což dále ovlivňuje stav minimálních zásob PS. Při více výrobnách je možno současně plnit více přepravních trailerů a převážet tak větší množství vodíku současně, což zajišťuje vyšší minimální úroveň zásob PS. To ovšem zároveň způsobuje, že výrobní vodíku nestačí doplňovat své zásoby do značného množství.

Na závěr je ještě důležité uvést, že vývoj počtu vodíkových vozidel může být značně ovlivněn řadou různých faktorů, a proto je obtížné stanovit exaktní hodnoty pro potřebnou kapacitu distribuční sítě. Vytvořený simulační model, který byl v této práci využit k verifikaci výsledků a který funguje na principu distribučního řetězce, je však díky jeho univerzálnosti možné využít k otestování jakékoliv varianty. Další vývoj tohoto modelu by mohl spočívat v úpravě, která by umožňovala provádění optimalizačních experimentů pro zjištění optimálních hodnot jednotlivých parametrů pro zabezpečení ideálního fungování celé distribuční sítě.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Prvky.com. Online. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>. [cit. 2023-10-08].
- [2] Web.vscht.cz. Online. <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>. [cit. 2023-10-08].
- [3] ABOHAMZEH, Elham; SALEHI, Fatemeh; SHEIKHOESLAMI, Mohsen; ABBASSI, Rouzbeh a KHAN, Faisal. Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. Online. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021, roč. 72. ISSN 09504230. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>. [cit. 2024-02-15].
- [4] Prvky.com. Online. Dostupné z: <http://www.prvky.com/1.html>. [cit. 2023-10-08].
- [5] PERRETTE, Lionel; PAILLERE, Henri a JONCQUET, Guillaume. Presentation of the French National Project DRIVE: Experimental Data for the Evaluation of Hydrogen Risks Onboard Vehicles, the Validation of Numerical Tools and the Edition of Guidelines. Online. In: . 2007, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2007-01-0434>. [cit. 2024-02-15].
- [6] NAJJAR, Yousef S.H. Hydrogen safety: The road toward green technology. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013, roč. 38, č. 25, s. 10716-10728. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.126>. [cit. 2024-02-15].
- [7] SUN, Ke a LI, Zhiyong. Quantitative risk analysis of life safety and financial loss for road accident of fuel cell vehicle. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019, roč. 44, č. 17, s. 8791-8798. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.10.065>. [cit. 2024-02-15].
- [8] RODIONOV, Andrei; WILKENING, Heinz a MORETTO, Pietro. Risk assessment of hydrogen explosion for private car with hydrogen-driven engine. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, roč. 36, č. 3, s. 2398-2406. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.089>. [cit. 2024-02-15].

- [9] ADAMS, P.; BENGOUER, A.; CARITEAU, B.; MOLKOV, V. a VENETSANOS, A.G. Allowable hydrogen permeation rate from road vehicles. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2011, roč. 36, č. 3, s. 2742-2749. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.161>. [cit. 2024-02-15].
- [10] HUANG, Teng; ZHAO, Mingbin; BA, Qingxin; CHRISTOPHER, David M. a LI, Xuefang. Modeling of hydrogen dispersion from hydrogen fuel cell vehicles in an underground parking garage. Online. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022, roč. 47, č. 1, s. 686-696. ISSN 03603199. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.196>. [cit. 2024 02-15].
- [11] KURTZ, Jennifer; SPRIK, Sam; PETERS, Mike a BRADLEY, Thomas H. Retail Hydrogen Station Reliability Status and Advances. Online. *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. ISSN 09518320. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106823>. [cit. 2024-02-15].
- [12] *Fastechus.com*. Online. Dostupné z: <https://www.fastechus.com/blog/the-surprising-history-of-hydrogen-vehicles>. [cit. 2024-02-15].
- [13] MUTHUKUMAR, M.; RENGARAJAN, N.; VELLIYANGIRI, B.; OMPRAKAS, M.A.; ROHIT, C.B. et al. The development of fuel cell electric vehicles – A review. Online. *Materials Today: Proceedings*. 2021, roč. 45, s. 1181-1187. ISSN 22147853. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679>. [cit. 2024-02-15].
- [14] MANOHARAN, Yogesh; HOSSEINI, Seyed Ehsan; BUTLER, Brayden; ALZHAHRANI, Hisham; SENIOR, Bhi Thi Fou et al. Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. Online. *Applied Sciences*. 2019, roč. 9, č. 11. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app9112296>. [cit. 2024-02-15].
- [15] HAN, Min-Gu a CHANG, Seung-Hwan. Evaluation of structural integrity of Type-III hydrogen pressure vessel under low-velocity car-to-car collision using finite element analysis. Online. *Composite Structures*. 2016, roč. 148, s. 198-206. ISSN 02638223. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.060>. [cit. 2024-02-15].
- [16] *H2me.eu*. Online. Dostupné z: <https://h2me.eu/about/fcevs/>. [cit. 2023-10-28].

- [17] *Hytep.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>. [cit. 2023-10-22].
- [18] LÓPEZ-ARQUILLOS, Antonio; RUBIO-ROMERO, Juan Carlos; SÚAREZ-CEBADOR, Manuel a PARDO-FERREIRA, María del Carmen. Comparative risk assessment of vehicle maintenance activities: Hybrid, battery electric, and hydrogen fuel cell cars. Online. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2015, roč. 47, s. 53-60. ISSN 01698141. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.02.005>. [cit. 2024-02-15].
- [19] *H2fcp.org*. Online. Dostupné z: [h2fcp.org/by the numbers](https://h2fcp.org/by-the-numbers). [cit. 2023-10-29].
- [20] *Cistadoprava.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/registrace-vsech-cistych-vozidel-v-cr-dle-nap-cm/>. [cit. 2024-03-30].
- [21] *Alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu*. Online. Dostupné z: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/infrastructure>. [cit. 2023-10-29].
- [22] TURÓN, Katarzyna. Hydrogen-powered vehicles in urban transport systems – current state and development. Online. *Transportation Research Procedia*. 2020, roč. 45, s. 835-841. ISSN 23521465. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.086>. [cit. 2024-02-15].
- [23] *H2.live*. Online. Dostupné z: <https://h2.live/en/>. [cit. 2024-03-30].
- [24] *Cistadoprava.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/mapy/h2/>. [cit. 2024-03-30].
- [25] *Alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu*. Online. Dostupné z: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/infrastructure>. [cit. 2023-10-29].
- [26] *Orlenbenzina.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.orlenbenzina.cz/pro-media/orlen-unipetrol-otevrel-verejnou-vodikovou-stantici-v-praze-na-barrandove>. [cit. 2023-11-05].

- [27] REUSS, Markus; DIMOS, Paris; LÉON, Aline; GRUBE, Thomas; ROBINIUS, Martin et al. Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050. Online. *Energies*. 2021, roč. 14, č. 11. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14113166>. [cit. 2024-02-15].
- [28] *Toyota.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/nova-auta/mirai>. [cit. 2023 10 28].
- [29] *Hyundai.com*. Online. Dostupné z: <https://www.hyundai.com/cz/modely/nexo.html>. [cit. 2023-10-28].
- [30] *Commission.europa.eu*. Online. Dostupné z: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_cs. [cit. 2023-11-05].
- [31] *Europarl.europa.eu*. Online. Dostupné z: https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20200618STO81513/green-deal-key-to-a-climate-neutral-and-sustainable-eu?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=green%20deal&at_topic=Green_Deal&at_location=CZ&gclid=Cj0KCQjw-pyqBhDmARIsAKd9XIMIVsw1FYAVX3ji0wzcOpicMp9xWfuYju3lJO7338kiTVa5xk8a_YwaAqC8EALw_wcB. [cit. 2023-11-12].
- [32] *Energy.ec.europa.eu*. Online. Dostupné z: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en. [cit. 2023-11-05].
- [33] *Sustainablefutures.linklaters.com*. Online. Dostupné z: <https://sustainablefutures.linklaters.com/post/102ipy5/european-renewable-energy-directive-red-iii-updated-ambitious-targets-to-boost>. [cit. 2023-11-05].
- [34] *Mpo.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-schvalena-vladou--262590/>. [cit. 2023-11-20].

- [35] *Mpo.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/automobilovy-prumysl/aktualizace-narodniho-akcniho-planu-ciste-mobility--254445/>. [cit. 2023-11-20].
- [36] *Mdcr.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Vlada-schvalila-aktualizovany-Narodni-akcni-plan-c>. [cit. 2023-11-20].
- [37] *Mdcr.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.mdcr.cz/Media/Media-a-tiskove-zpravy/Prvni-vyzvy-programu-OPD3-byly-vyhlaseny,-celkem-j>. [cit. 2023-11-20].
- [38] *Opd3.opd.cz*. Online. Dostupné z: <https://opd3.opd.cz/stranka/Vyzvy-OPD3>. [cit. 2023-11-20].
- [39] *Consilium.europa.eu*. Online. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/infographics/fit-for-55-afir-alternative-fuels-infrastructure-regulation/>. [cit. 2023-11-20].
- [40] *Data.consilium.europa.eu*. Online. Dostupné z: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9111-2022-INIT/cs/pdf>. [cit. 2024 01 17].
- [41] *Informace poskytnuté společností ORLEN UniCRE*.
- [42] *Mpo.cz*. Online. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf#page=37&zoom=100,90,134. [cit. 2024-01-17].
- [43] *Cistadoprava.cz*. Online. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/stanice-ceska-republika/>. [cit. 2024-02-16].
- [44] *Ec.europa.eu*. Online. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html>. [cit. 2024-02-11].
- [45] *Scribblemaps*. Online. Dostupné z: <https://www.scribblemaps.com/>. [cit. 2024-03 16].

- [46] CELLIER, François E. a KOFMAN, Ernesto. *Continuous System Simulation*. Online. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006. ISBN 0-387-26102-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/0-387-30260-3>. [cit. 2024-02-16].
- [47] ... *International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines: KOKA ... : proceedings ..* 2010-. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010-. ISBN 978-80-214-6164-2.

Výchozí literatura

JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.

CELLIER, François E. a Ernesto KOFMAN. *Continuous System Simulation* [online]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006. ISBN 0-387-26102-8. DOI:10.1007/0-387-30260-3.

SARJOUGHIAN, Hessam S. a François E. CELLIER, ed. *Discrete Event Modeling and Simulation Technologies* [online]. New York, NY: Springer New York, 2001. ISBN 978-1-4419-2868-9. DOI:10.1007/978-1-4757-3554-3.

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Počet vodíkových PS v ČR [24]	26
Tab. 2: Počet výroben vodíku [24].....	26
Tab. 3: Průměrný roční nájezd vozidel FCEV [41]	36
Tab. 4: Průměrná spotřeba vozidel FCEV [41]	36
Tab. 5: Parametry vozidel [vlastní zpracování dle [41]]	36
Tab. 6: Počty vodíkových vozidel pro rok 2030 [41]	39
Tab. 7: Počet vozidel pro varianty řešení [vlastní]	42
Tab. 8: Počet obslužených vozidel jednou PS [vlastní zpracování dle [41]]	43

Tab. 9: Časové vytížení plnicí stanice [vlastní zpracování dle [41]]	44
Tab. 10: Průměrný počet vozidel doplňujících palivo [vlastní zpracování]	45
Tab. 11: Celkový denní odběr všech vozidel [vlastní zpracování]	46
Tab. 12: Potřebný počet PS [vlastní zpracování]	46
Tab. 13: Průměrný počet vozidel doplňujících palivo [vlastní zpracování]	46
Tab. 14: Celkový denní odběr všech vozidel [vlastní zpracování]	47
Tab. 15: Potřebný počet PS [vlastní zpracování]	47
Tab. 16: Průměrný počet vozidel doplňujících palivo [vlastní zpracování]	47
Tab. 17: Celkový denní odběr všech vozidel [vlastní zpracování]	48
Tab. 18: Potřebný počet PS [vlastní zpracování]	48
Tab. 19: Údaje o výrobnách vodíku [vlastní zpracování dle [41]]	49
Tab. 20: Přehled variant řešení – počet potřebných výroben vodíku a PS	52
Tab. 21: Vstupní hodnoty varianty č. 1 [vlastní]	64
Tab. 22: Vstupní hodnoty varianty č.2 [vlastní]	66
Tab. 23: Vstupní hodnoty varianty č.3 [vlastní]	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Konstrukce vozidla FCEV [14].....	21
Obr. 2: Počet registrací vozidel FCEV v ČR dle krajů (březen 2024) [20]	23
Obr. 3: Mapa hustoty počtu registrací vozidel FCEV v ČR (březen 2024) [20]	23
Obr. 4: Mapa veřejně přístupných PS (březen 2024) [23]	25
Obr. 5: Zavádění vodíku v dopravě [42]	38
Obr. 6: Vývoj počtu registrací elektromobilů [20]	40
Obr. 7: Počet registrovaných elektromobilů dle krajů ke konci roku 2023 [20]	40
Obr. 8: Mapa hustoty počtu registrací elektromobilů dle krajů ke konci roku 2023 [20].....	41
Obr. 9: Počet dobíjecích bodů dle krajů ke konci roku 2023 [43]	41
Obr. 10: Mapa zastoupení dobíjecích bodů dle krajů ke konci roku 2023 [43]	42
Obr. 11: Mapa silniční dopravní sítě TEN-T ČR [44]	50
Obr. 12: Minimální počet výroben vodíku [vlastní].....	51
Obr. 13: Plnicí stanice ve fázi realizace [24]	53
Obr. 14: Plnicí stanice ve fázi přípravy [24].....	54
Obr. 15: Mapa PS v Německu [23]	54
Obr. 16: Rozmístění PS (modré body – PS v provozu; oranžové body – PS ve fázi realizace; červené body – PS ve fázi přípravy) [vlastní zpracování s využitím [45]]	55

Obr. 17: Umístění výroby vodíku (modrý čtverec) [vlastní zpracování s využitím[45]].....	55
Obr. 18: Návrh modelu distribuční sítě – varianta č. 1 (modré body – PS v provozu; oranžové body – PS ve fázi realizace; červené body – PS ve fázi přípravy; modrý čtverec – výroba vodíku v provozu) [vlastní zpracování s využitím [45]].....	56
Obr. 19: Rozmístění PS (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací) [vlastní zpracování s využitím[45]].....	57
Obr. 20: Rozmístění výroben (modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím[45]]	57
Obr. 21: Rozmístění PS a výroben vodíku PS (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací; modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]	58
Obr. 22: Návrh modelu distribuční sítě – varianta č. 2 (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací; modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]	58
Obr. 23: Rozmístění PS (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací) [vlastní zpracování s využitím[45]].....	59
Obr. 24: Rozmístění výroben vodíku (modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]	60
Obr. 25: Návrh modelu distribuční sítě – varianta č. 3 (červené body – PS s již danou lokací; modré body – PS s navrženou lokací; modré čtverce – výroby vodíku v provozu; oranžové čtverce – výroby vodíku ve fázi záměru) [vlastní zpracování s využitím [45]]	60
Obr. 26 Model pro verifikaci výsledků – proces výroby, distribuce a spotřeby vodíku [vlastní zpracování s využitím [46]]	62
Obr. 27: Stav zásobníků PS v % [vlastní zpracování s využitím [46]]	65
Obr. 28: Stav zásobníků PS v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]	65
Obr. 29: Stav zásobníku výrobce v % [vlastní zpracování s využitím [46]].....	65
Obr. 30: Stav zásobníku výrobce v kg [vlastní zpracování s využitím [46]].....	65
Obr. 31: Stav zásobníku PS v % [vlastní zpracování s využitím [46]]	67
Obr. 32: Stav zásobníku PS v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]	67
Obr. 33: Stav zásobníku výrobce v % [vlastní zpracování s využitím [46]].....	67
Obr. 34: Stav zásobníku výrobce v kg [vlastní zpracování s využitím [46]].....	67
Obr. 35: Stav zásobníku PS v % [vlastní zpracování s využitím [46]]	69
Obr. 36: Stav zásobníku PS v kg [vlastní zpracování s využitím [46]]	69
Obr. 37: Stav zásobníku výrobce v % [vlastní zpracování s využitím [46]].....	69
Obr. 38: Stav zásobníku výrobce v kg [vlastní zpracování s využitím [46]].....	69

SEZNAM ZKRATEK

FCEVs.... Fuel Cell Electric Vehicles

PS..... Plnicí stanice

RFNBO.. Renewable Fuels of Non-Biological Origin

CFD..... Computational Fluid Dynamics

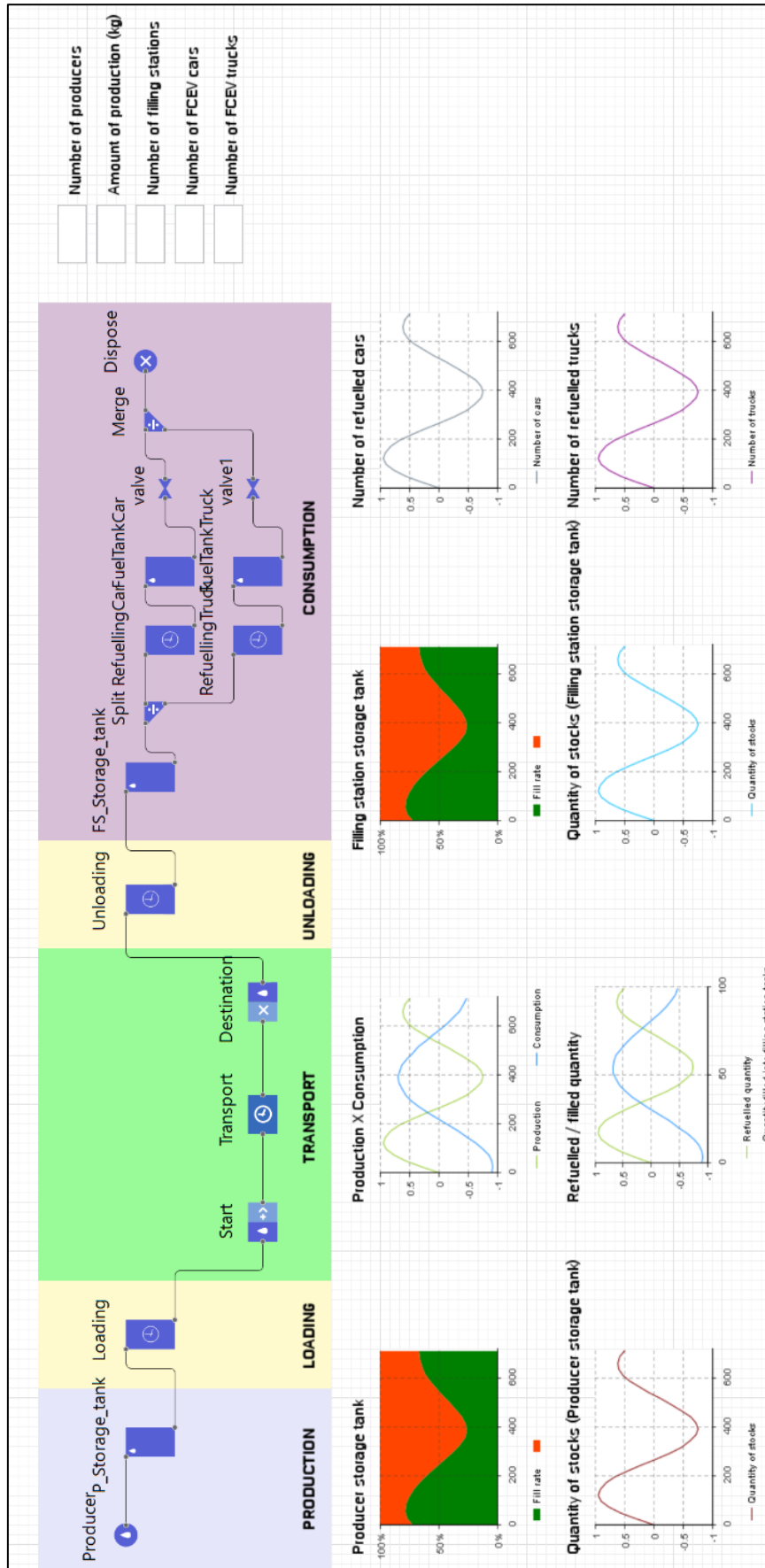
NAP..... Národní akční plán

MPO..... Ministerstvo průmyslu a obchodu

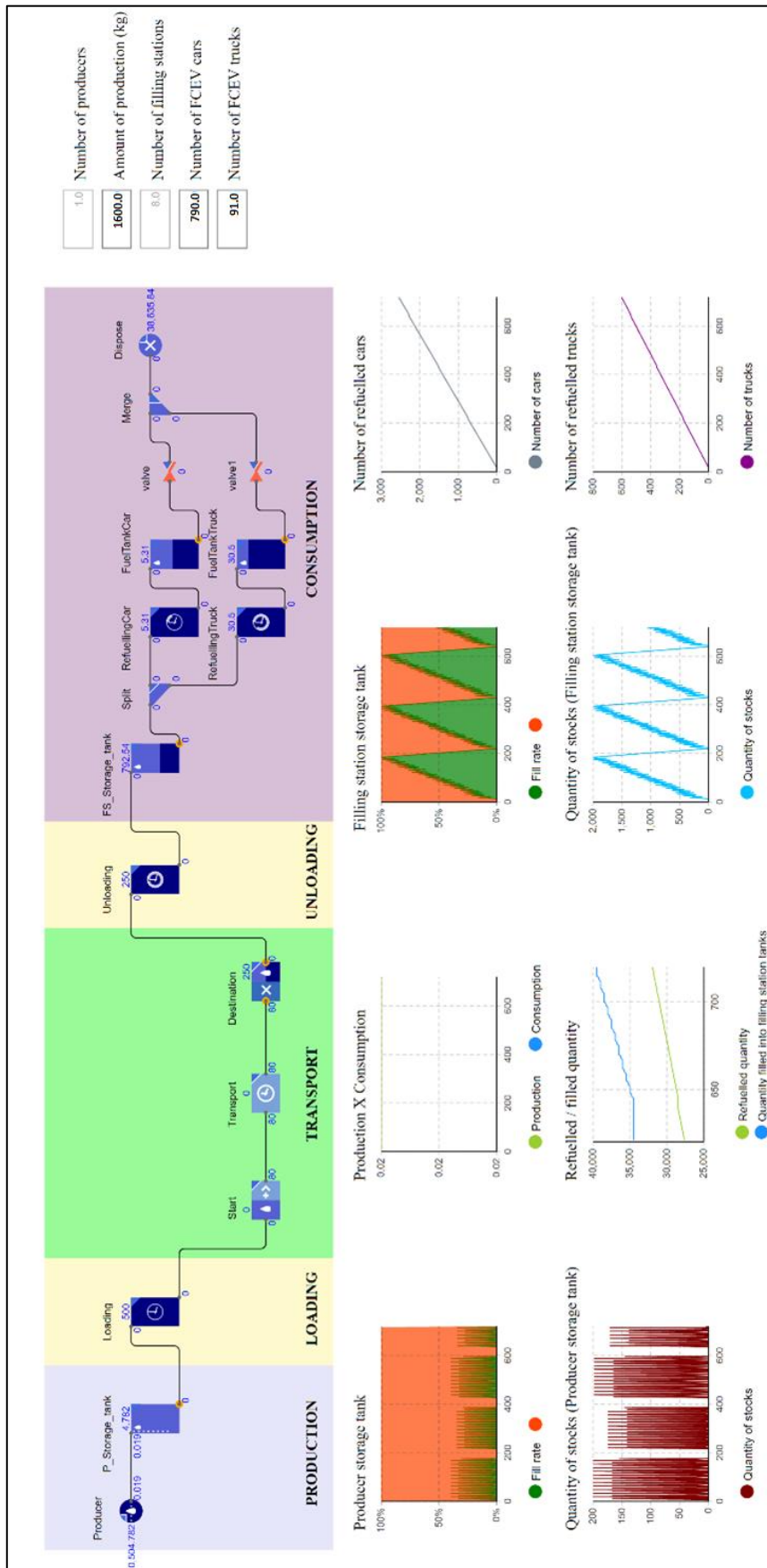
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha. 1: Model pro verifikaci výsledků [vlastní zpracování s využitím [46]]	85
Příloha. 2: Kompletní výsledky provedené simulace – varianta č. 1 [vlastní zpracování s využitím [46]]	86
Příloha. 3: Kompletní výsledky provedené simulace – varianta č. 2 [vlastní zpracování s využitím [46]]	87
Příloha. 4: Kompletní výsledky provedené simulace – varianta č. 3 [vlastní zpracování s využitím [46]]	88

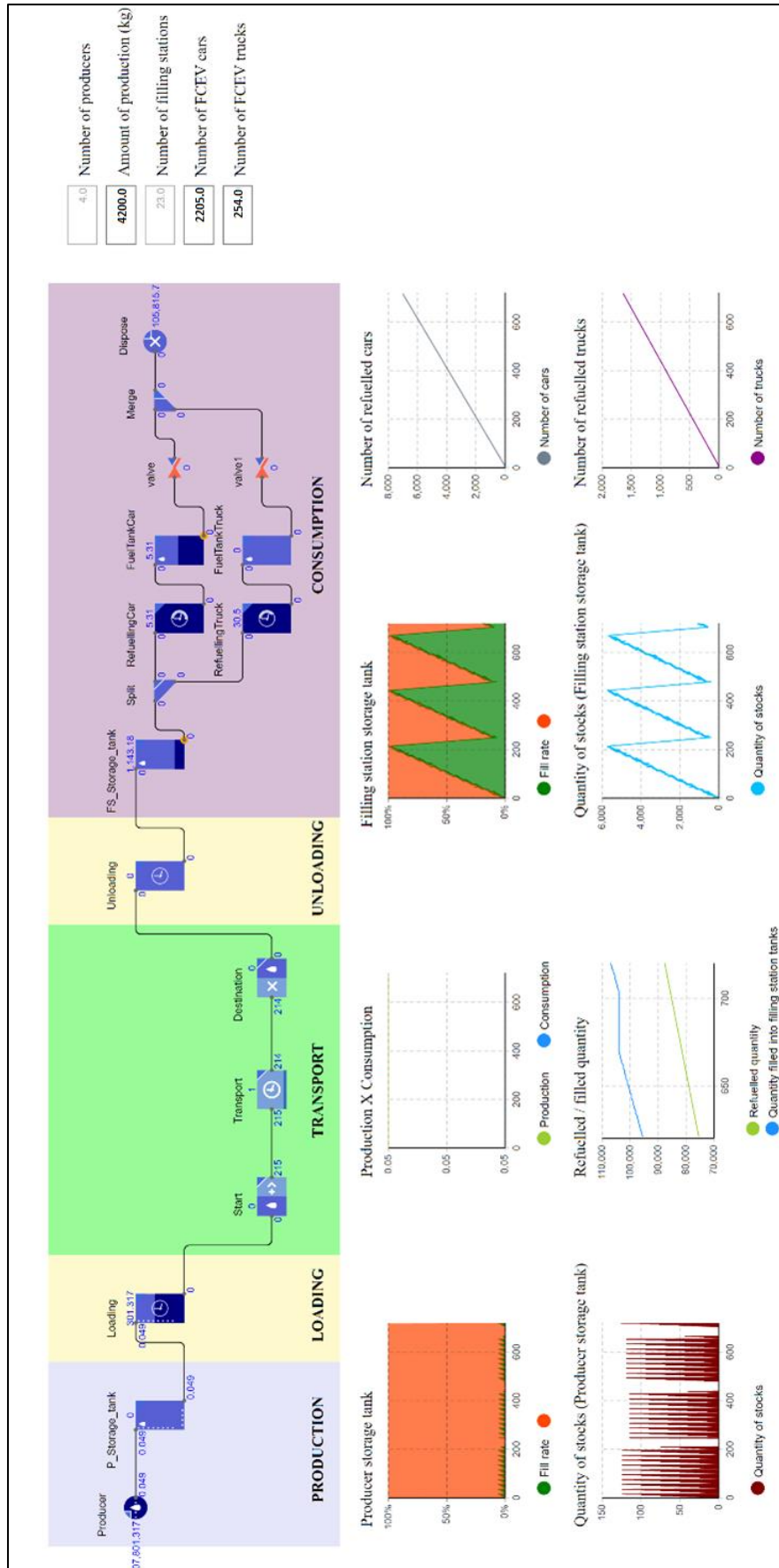
Příloha. 1: Model pro verifikaci výsledků [vlastní zpracování s využitím [46]]



Příloha. 2: Kompletní výsledky provedené simulace – varianta č. 1 [vlastní zpracování s využitím [46]]



Příloha. 3: Kompletní výsledek provedené simulace – varianta č. 2 [vlastní zpracování s využitím [46]]



Příloha. 4: Kompletní výsledky provedené simulace – varianta č. 3 [vlastní zpracování s využitím [46]]

