

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2022

**LUKÁŠ
KUČERA**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kučera** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **476126**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh výroby zeleného vodíku pro potřeby veřejné dopravy

Název bakalářské práce anglicky:

Design of green hydrogen production for public transportation

Pokyny pro vypracování:

Provedte návrh fotovoltaického zdroje a výroby vodíku pro využití ve veřejné autobusové dopravě. Dimenzování a návrh základních technických parametrů bude provedeno pro 10 autobusů, a to pro částečné i plné pokrytí spotřeby vodíku. Pro potřeby následného ekonomického hodnocení stanovte kritickou výkupní cenu vodíku z pohledu provozovatele veřejné dopravy. Součástí hodnocení bude stanovení klíčových parametrů a citlivostní analýza.

Práce bude obsahovat:

- 1) Rešerši problematiky výroby vodíku a jeho dalšího využití
- 2) Dimenzování fotovoltaického zdroje a výroby vodíku pro využití ve veřejné autobusové dopravě
- 3) Stanovení základních technických parametrů fotovoltaického zdroje a výroby vodíku
- 4) Ekonomické hodnocení výroby vodíku včetně citlivostní analýzy

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Opatřil, Ph.D. ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **03.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Jan Opatřil, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval zcela samostatně pod vedením Ing. Jana Opatřila, Ph.D. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, byly citovány v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Lukáš Kučera

Anotační list

Jméno autora:	Lukáš Kučera
Název BP:	Návrh výroby zeleného vodíku pro potřeby veřejné dopravy
Anglický název:	Design of green hydrogen production for public transportation
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Jan Opatřil, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 46 Počet obrázků: 15 Počet tabulek: 34
Klíčová slova:	zelený vodík, vodíkový autobus, FVE, vodíkové hospodářství, vodíková čerpací stanice
Keywords:	green hydrogen, hydrogen bus, FVE, hydrogen farm, hydrogen filling station
Anotace:	<p>Cílem této práce je představení zeleného vodíku jako takového, popis možné technologie výroby a následně možnosti použití vodíku dnes, popřípadě v budoucnu. V této práci je v první řadě potřeba definovat proč je toto téma v současné době tak aktuální a jakým způsobem nám tento vodík může pomoci k naplnění uzavřených dohod které se týkají životního prostředí, konkrétně snižování emisí v Evropské unii. Další, praktická část se zabývá návrhu čerpací stanice pro autobusy městské hromadné dopravy v Hradci Králové. Třetí část práce je zaměřena na ekonomické zhodnocení takového projektu. Ekonomické hodnocení je rozděleno na dva subjekty, první subjekt je majitel technologie výroby vodíku, čerpací stanice a fotovoltaických panelů. Druhý subjekt je provozovatel autobusů, pravděpodobně město, v našem případě tedy město Hradec Králové.</p>
Abstract:	<p>The aim of this work is to introduce green hydrogen as such, a description of possible production technology and then the possibility of using hydrogen today or in the future. In this work, it will first be necessary to define why this topic is nowadays so hot and how this hydrogen can help us to fulfill the concluded agreements that concern the environment, specifically reducing emissions in the European Union. The next, practical part will be devoted to the design of a gas station for public transport buses in Hradec Králové. The third part of the work will focus on the economic evaluation of such a project. The economic evaluation will be divided into two</p>

entities, the first entity will be the owner of the hydrogen production technology, gas stations and photovoltaic panels. The second entity will be the bus operator, probably the city, in our case the city of Hradec Králové.

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svým rodičům za podporu po celou dobu mého studia. Dále chci poděkovat především panu Ing. Janu Opatřilovi, Ph.D. za trpělivost, množství konstruktivních připomínek a rad ohledně postupu mého řešení této práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Popis vodíku	10
3	Výroba vodíku.....	10
3.1	Druhy vodíku	10
3.2	Výroba elektrolýzou	11
3.2.1	Elektrolýza s alkalickým elektrolytem (AWE)	11
3.2.2	Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou (PEM).....	12
3.2.3	Parní elektrolýza využívající keramický elektrolyt (HTEL, SOEL)	13
3.2.4	Porovnání všech tří metod elektrolýzy.....	14
3.2.5	Příklady konkrétních elektrolýzérů)	14
4	Skladování vyrobeného H ₂	16
4.1	Skladování vodíku v plynné fázi.....	16
4.2	Skladování vodíku v kapalně fázi	17
4.3	Skladování vodíku v pevné fázi.....	17
5	Možné následné zpracování odpadního produktu elektrolýzy – kyslíku (O₂).....	18
5.1	Zkapalnění a prodej.....	18
6	Využití vyrobeného vodíku	18
6.1	Uložení energie.....	19
6.2	Doprava	19
6.3	Vodík se zemním plynem	19
7	Návrh vodíkové čerpací stanice.....	20
7.1	Schéma projektu.....	20
7.2	Postup.....	21
7.2.1	Řešení číslo 1	21
7.2.2	Řešení číslo 2	23
7.3	Lokalita	25
7.4	Elektrolýzér.....	26
7.5	Vodíkové autobusy	27
8	Ekonomické zhodnocení.....	28
8.1	Analýza z pohledu provozovatele autobusů	28
8.1.1	Konvenční veřejná doprava.....	28
8.1.2	Vodíková veřejná doprava.....	29
8.1.3	Porovnání CAPEX a OPEX nákladů obou typů autobusů	29
8.1.4	Určení kritické ceny vodíku	30

8.2	Analýza z pohledu provozovatele vodíkového hospodářství	30
8.2.1	Hodnocení projektu přes letní špičku.....	30
8.2.1.1	Fotovoltaická elektrárna.....	30
8.2.1.1.1	Základní parametry FVE	31
8.2.1.2	Vodíkové hospodářství	31
8.2.1.3	Elektrolyzér	31
8.2.1.4	Čerpací stanice	31
8.2.1.5	Zhodnocení celého vodíkového hospodářství.....	32
8.2.1.5.1	Prostá návratnost	32
8.2.1.5.2	Diskontovaná návratnost	34
8.2.2	Hodnocení projektu přes zimní minimum.....	36
8.2.2.1	Základní parametry FVE.....	36
8.2.2.2	Cena elektrolyzéru.....	36
8.2.2.3	Čerpací stanice	37
8.2.2.4	Zhodnocení celého vodíkového hospodářství.....	37
8.2.2.4.1	Prostá návratnost	37
8.2.2.4.2	Diskontovaná návratnost	38
8.3	Citlivostní analýza	39
8.3.1	Přes letní maximum.....	39
8.3.1.1	Hodnocení	40
8.3.2	Přes zimní minimum	41
8.3.2.1	Hodnocení	42
9	Závěr	42
10	Citovaná literatura.....	44
11	Seznam obrázků	45
12	Seznam tabulek	46

1 Úvod

Vodík se dělí dle způsobu výroby do základních třech skupin, modrý, šedý a v této práci řešený zelený. Tato barevná klasifikace napovídá šetrnost k přírodě, a to sice zelený je nejšetrnější, následně modrý a šedý, vyráběný z fosilních paliv zatěžuje přírodu nejvíce.

Zelený vodík je takový vodík, který je vyrobený elektrolýzou, pro kterou je elektrická energie získána z obnovitelných zdrojů energie, tudíž jeho výroba prakticky vůbec nezatěžuje životní prostředí. Pokud nebude bráno v potaz zatížení prostřední výrobou elektrické energie, které bývá u obnovitelných zdrojů především zastavění půdy v případě solárních elektráren, přehrazení toků v případě vodních elektráren či opět záběr půdy v případě větrných elektráren. Odpadním produktem elektrolýzy je O_2 , neboli kyslík, který se dá následně dále využít. [1]

Díky Pařížské dohodě neboli dohodě o snížení emisí v oblasti dopravy, zemědělství, stavebnictví, zpracování odpadu a v dalších oblastech o 30 % v celé EU se hledají různé cesty, jak daného cíle dosáhnout a zelený vodík může pomoci prakticky ve všech odvětvích. Evropská komise na konci června 2020 přijala strategii pro rozvoj vodíkových energetických systémů. Je určena především pro těžkou nákladní dopravu a energetiku. Právě vodík se má podle plánů Evropské komise stát náhradou fosilních paliv v energeticky náročných oborech jako ocelářství a petrochemie, kde nelze spoléhat pouze na elektřinu. Využití vodíku v dopravě má být podle Evropské komise prosazováno tam, kde je elektrifikace nedosažitelná nebo obtížná. To znamená například městskou hromadnou autobusovou dopravu, flotily taxi nebo některé části železniční sítě. Za druhé, a především to ale znamená těžkou nákladní dopravu, zejména z a do přístavů. Vodík se také může stát alternativou nejspínavějších fosilních paliv využívaných v lodní dopravě. Další využití tohoto vodíku může být ukládání elektrické energie kde obrovskou výhodou oproti bateriím je to, že energii ukládá na neomezenou dobu.

Vedle šetrnosti k životnímu prostředí je ještě jeden důvod, proč je elektrolýza udržitelná. Při elektrolýze se zpravidla vyplývá jen naprostý zlomek energie. Tři čtvrtiny proudu se přemění na vodík, jedna čtvrtina na teplo, které popřípadě může také posloužit. Teplo se dá spotřebovat přímo v areálu, zatímco vodík se dá následně distribuovat.

2 Popis vodíku

Vodík je bezbarvý, lehký plyn, bez chuti a zápachu. Je hořlavý, plamen při hoření je lehce namodralý, pro jeho hoření je ale nutný oxidační prostředek, kterým je obvykle bývá obsažený ve vzduchu. Je přibližně 14x lehčí než vzduch a teplo vede sedmkrát lépe než vzduch. Vodík je za normální teploty stabilní. Je však reaktivnější při jeho zahřátí, zejména s kyslíkem a halogeny se slučuje velmi výbušně, i když pro spuštění této reakce je nutná inicializace (např. jiskra, která zapálí kyslíko-vodíkový plamen). Vodík je velmi málo rozpustný ve vodě, ale velkou zajímavostí vodíku je jeho schopnost „rozpouštět“ se v některých kovech, např. v palladiu nebo platině. Ty poté plní funkci katalyzátorů chemických reakcí. Je to zapříčiněno tím, že má vodík velmi malé molekuly, které mají schopnost procházet krystalovou mříží různých materiálů.

Vodík vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky (s výjimkou vzácných plynů), zejména pak s uhlíkem, kyslíkem, sírou a dusíkem. Což jsou prvky tvořící základní „stavební kameny“ života na Zemi.

Vodík tvoří zvláštní typ chemické vazby, nazývané vodíková vazba nebo také vodíkový můstek, kde vázaný atom vodíku vykazuje afinitu i k dalším atomům, s nimiž není poután klasickou chemickou vazbou. Velmi silná je jeho vazba s atomy kyslíku, což vysvětluje anomální fyzikální vlastnosti vody (vysoký bod varu a tání atd.). [2]

3 Výroba vodíku

Vodík je možné vyrobit různými způsoby. V současné době je nejrozšířenější výroba vodíku z fosilních paliv, chemickým štěpením zemního plynu (tzv. šedý vodík). Nejvíce vodíku se v současné době vyrábí ze zemního plynu, proces štěpení je doplněn ještě o technologii (tzv. CCS) zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (modrý vodík). Další technologie je parciální oxidace ropných frakcí a poslední technologie, která využívá fosilní palivo je zplyňování uhlí. Vodík by se dal pokládat za zdroj čisté energie. Samozřejmostí je, že vodík je tak čistý zdroj energie, jako je čistá jeho výroba. Proto je, z toho dnes tak důležitého a diskutovaného ekologického hlediska, nejvhodnější vodík vyrábět pomocí obnovitelných zdrojů energie. Zde je myšlena elektrolýza vody elektřinou získanou např. z větrné elektrárny nebo solární elektrárny. Oproti fosilním palivům má použití vodíku dvě hlavní výhody. Jednak je díky široké škále možností výroby prakticky nevyčerpatelný, a navíc jeho spalováním (v ideálním případě) vzniká pouze vodní pára. [3]

3.1 Druhy vodíku

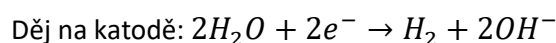
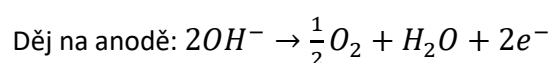
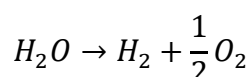
Podle způsobu výroby je vodík rozdělen dle takzvaných „barev“. Tato práce se zabývá primárně zeleným vodíkem. Způsobů výroby existuje mnoho, ale aktuálně jsou nejrozšířenější tyto základní tři typy: [3]

- **Šedý vodík** získáváme z fosilních paliv, respektive zemního plynu jako meziproduct. S ohledem na svůj původ není považován za zcela čistý zdroj. Výhodou jsou bezpochyby poměrně nízké výrobní náklady, to je hlavním důvodem, proč je tato technologie výroby nejrozšířenější.

- **Modrý vodík** je ekologičtější varianta, ačkoli i jeho původ je také ve fosilních palivech. Rozdílná je ale technologie, emise oxidu uhličitého jsou zachytávány pomocí CCS (Carbon Capture and Storage).
- **Zelený vodík** je vzhledem k životnímu prostředí nejlepší varianta, protože vzniká z obnovitelných zdrojů a při výrobě se neuvolňují skleníkové plyny. Tento vodík je však celkem „mladý“ a prozatím je tato technologie drahá, což limituje jeho masivnější využití.

3.2 Výroba elektrolýzou

Elektrolýza vody je proces, při kterém stejnosměrný proud během průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem podle reakce:

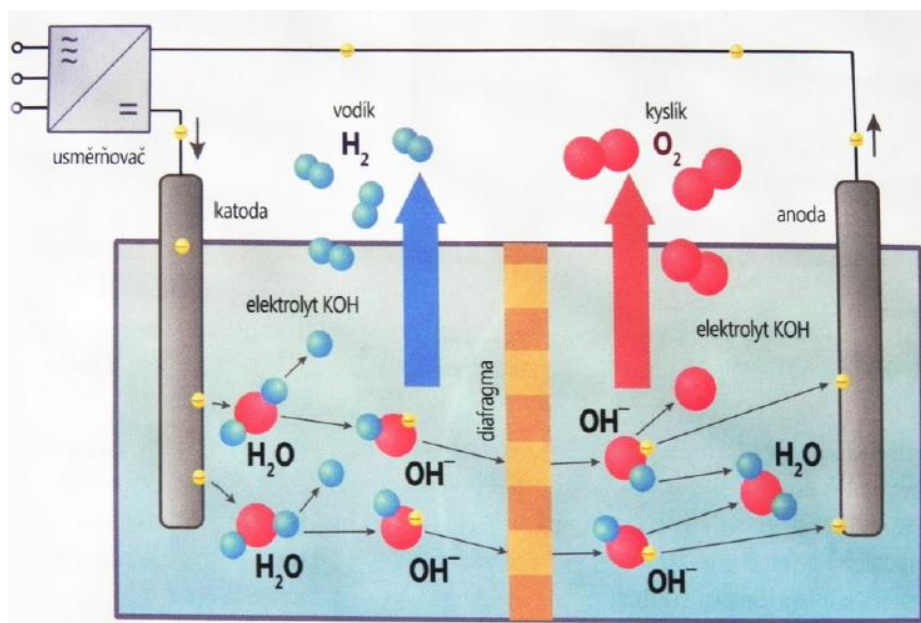


Stejnoseměrný elektrický proud prochází mezi dvěma oddělenými elektrodami, katodou a anodou, ponořenými v elektrolytu. Na anodě probíhá oxidace a vylučuje se kyslík. Na katodě probíhá redukce a vylučuje se vodík. Čistá voda je málo vodivá, proto se pro zvýšení vodivosti přidává elektrolyt. Podle druhu elektrolytu používaného pro přenos elektrického proudu v procesu, dělíme elektrolýzu vody na 4 základní typy.:

- Elektrolýza s alkalickým elektrolytem
- Elektrolýza s kyselinovým elektrolytem – zastaralý způsob, problémy s korozi (z toho důvodu nebude dále popisováno)
- Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou
- Parní elektrolýza využívající keramický elektrolyt [1]

3.2.1 Elektrolýza s alkalickým elektrolytem (AWE)

Nejrozšířenější, a průmyslově ověřená, je alkalická elektrolýza, kde elektrolytem je obvykle hydroxid draselný. Jádrem zařízení na vodní elektrolýzu je katoda, anoda, elektrolyt a oddělovač viz. Obr. 1. Katoda musí být odolná vůči korozi a umístěná v elektrolytu s redukčním potenciálem. Musí být dobrý vodič elektrického proudu a nesmí být přerušena. Pro průběh elektrolýzy je zapotřebí zajistit pohyb hydroxidových iontů (OH⁻) z katody na anodu a zároveň zabránit smíchání produkovaných plynů. K tomu se používá separátor (diafragma). [1]

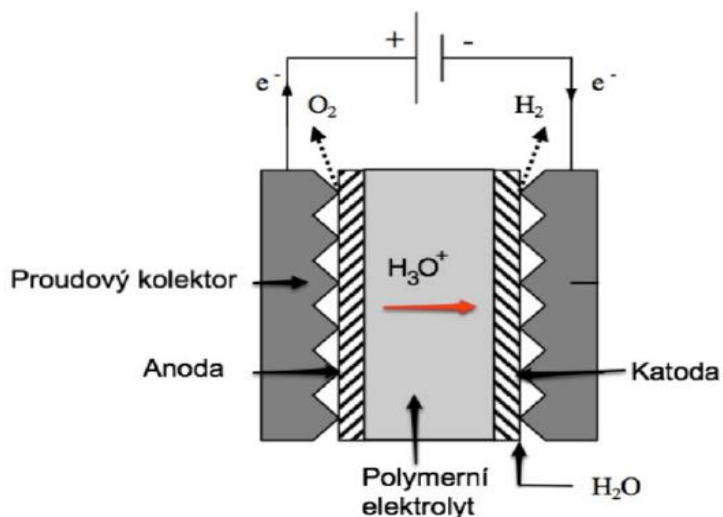


1 Schéma elektrolýzy s alkalickým elektrolytem [1]

Voda se přivádí do cirkulujícího elektrolytu, z důvodu odvodu tepla z reakce a kontrole teploty procesu. Většina alkalických elektrolýzérů je konstruována tzv. zero gap designem (bez mezery), kde anoda i katoda jsou umístěny do bezprostřední blízkosti separátoru. Elektrody se umísťují blízko sebe z důvodu snížení ztrát v důsledku odporu elektrolytu. Elektrolýza probíhá za teploty kolem 80 °C a tlaku 1–30 bar.

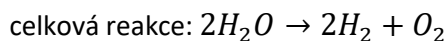
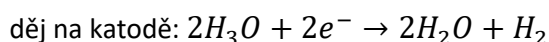
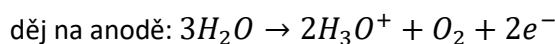
3.2.2 Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou (PEM)

Tento druh výroby je dnes nejrozšířenější u elektrolýzérů pro velké instalace v řádech MW. Elektrolýzér se skládá z katody a anody a polymerní membrány viz. Obr. 2. Elektrody se vyrábí z platiny nebo iridia. Polymerní membrána plní funkci elektrolytu a separátoru zároveň. Membrána má kyselý charakter, mřížkovou strukturu a je plynotěsná. Vyznačuje se velmi dobrou vodivostí protonů a špatnou vodivostí elektronů. Polymerní membrána tedy umožňuje tok protonů mezi elektrodami a zároveň zabraňuje stejnému pohybu elektronů. [1]



2 Schéma elektrolýzy s polymerní membránou [1]

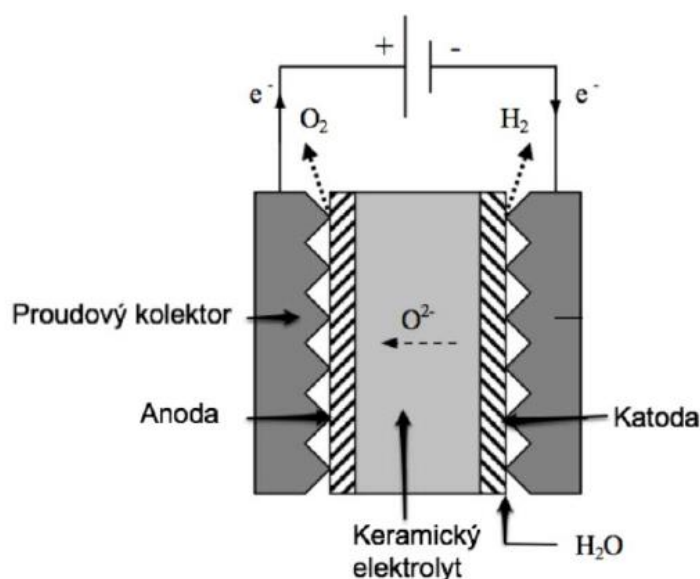
Elektrolýza probíhá při teplotě kolem 80 °C a tlaku do 85 bar.



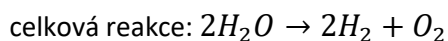
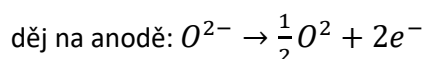
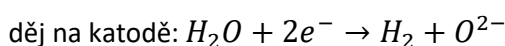
Kyslík je z anody odváděn v plynné formě. Protony vodíku procházejí přes protonově vodivou membránu na katodu a elektrony jsou na katodu přiváděny pomocí vnějšího okruhu. Na katodě dochází ke sloučení protonů a elektronů a vzniká tak plynný vodík. Elektrolýza s polymerní elektrolytickou membránou vyžaduje vyšší proudovou hustotu než elektrolýza s alkalickým elektrolytem, ale produkovaný vodík má vyšší čistotu. Nevýhodou oproti elektrolýze s alkalickým elektrolytem je vysoká cena elektrolýzéro, díky použitým drahým materiálům.

3.2.3 Parní elektrolýza využívající keramický elektrolyt (HTEL, SOEL)

Parní elektrolýza probíhá za teploty 900–1000 °C, a voda je do procesu přiváděna jako pára. Elektrolyt je vyroben z pevného keramického materiálu, který vede kyslíkové ionty. Princip parní elektrolýzy je podobný jako u elektrolýzy využívající polymerní elektrolyt. Je zřejmý z Obr. 3. Přes pevný keramický elektrolyt mohou procházet kyslíkové ionty od katody k anodě, elektrony přes elektrolyt neprojdou. Elektrony se přemísťují vnějším obvodem. Keramický elektrolyt také zabraňuje promíchávání vznikajících plynů. [1]



3 Schéma parní elektrolýzy [1]



Vodní pára je přiváděna do komory u anody, kde reaguje s elektrony a rozpadne se na vodíkové a kyslíkové ionty. Po přechodu k anodě, kyslíkové ionty uvolňují elektrony, a tak vytvoří plynný kyslík.

Výhoda parní elektrolýzy spočívá ve snížené spotřebě elektrické energie, díky energii dodané pomocí tepla páry. Celková energetická náročnost je vyšší než u jiných typů elektrolýzy, což je způsobeno ohřevem páry. Parní elektrolýza je výhodná pokud, máme levný zdroj tepla, např. geotermální energii na Islandu nebo něco obdobného.

3.2.4 Porovnání všech tří metod elektrolýzy

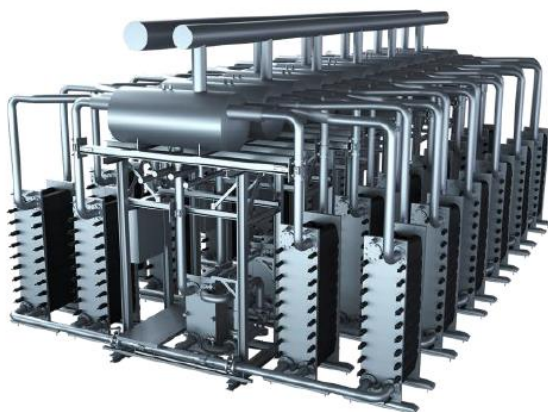
Tabulka 1 Porovnání metod elektrolýzy

Typ	Výhody	Nevýhody
Alkalická	<ul style="list-style-type: none"> • stará osvědčená technologie • nákladově nejefektivnější a nejnižší • katalyzátor – drahé kovy • dlouhodobá životnost • výkon MW • účinnost 70% • komerčně užívané 	<ul style="list-style-type: none"> • proudová hustota malá • čistota vodíku malá (přetoky vodíku, kyslíku) • elektrolyt korozivní kapalina • malá dynamika výroby • malé zatížení výroby • malý tlak výroby
Polymerní	<ul style="list-style-type: none"> • vysoká proudová hustota • vysoké napětí • dobré zatížení výroby • kompaktní systém výroby • vysoká čistota plynů • vysoká dynamika výroby • vysoká odezva výroby na změny 	<ul style="list-style-type: none"> • technologie nová, procesně nestabilizovaná • vysoké náklady za komponenty • katalyzátor drahé kovy • korozivní kyselé prostředí • životnost relativně nízká • výkon pod 1 MW • membrány dostupné limitovaně a velmi drahé • komerčně zatím nikoli, očekává se v blízké budoucnosti
Vysokoteplotní	<ul style="list-style-type: none"> • účinnost téměř 100 % • katalyzátor bez drahých kovů • vysoký tlak výroby plynů 	<ul style="list-style-type: none"> • proces jen v laboratorním měřítku • životnost nízká pro vysoký tok tepla a užití keramiky • zatím jen malé výroby

3.2.5 Příklady konkrétních elektrolyzérů)

- **Značka Siemens** – Silyzer 300 Hydrogen Generation Systém (PEM elektrolýza)

HY-20-1106



Technical data

Hydrogen production:

100 – 2,000 kg per hour

Plant efficiency: > 75,5%

Startup time: < 1 minute

Dynamics: 0 – 100% in 10% / s

Minimum load: $\geq 5\%$

Water consumption (DI):

10 l per kg hydrogen

Hydrogen quality:

Ultra high purity 5.0

4 Silyzer 300 Hydrogen Generation Systém [3]

- **Značka Plug Power** – Giner 30S, 60S nebo 90S Hydrogen Generation Systém (PEM elektrolýza)



5 Plug Power – Giner 30S, 60S nebo Plug Power Hydrogen Generation Systém [4]

- **Značka Hydrogenics**– HyLYZER 600-30 with a power intake of 1-3 MW (PEM elektrolýza)



6 Hydrogenics [5]

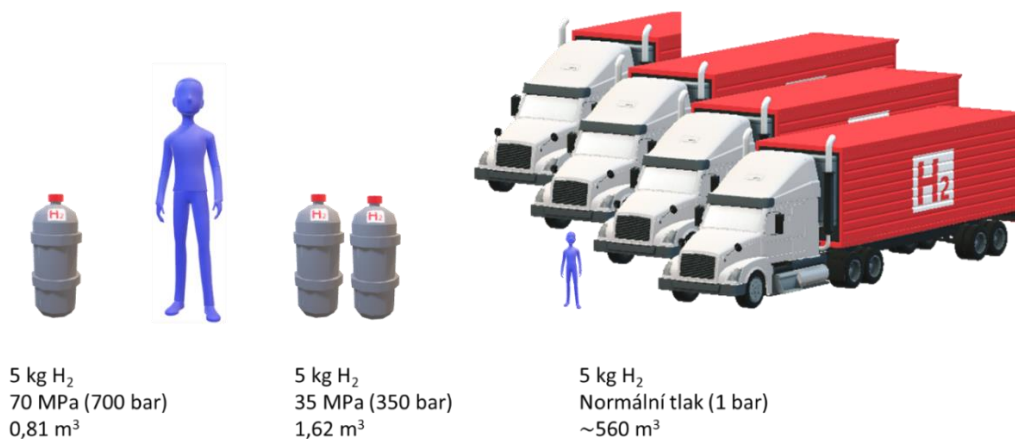
4 Skladování vyrobeného H₂

Pro budoucí využití vodíku jakožto paliva je zapotřebí vývoj cenově přijatelného, efektivního a v neposlední řadě bezpečného skladování. Tento prvek díky své malé hustotě, malému atomovému poměru a nízkému bodu varu je, pokud se budeme bavit o jeho skladování, zatížen určitými obtížemi. Zjednodušeně řečeno díky vlastnostem vypsáním v minulé větě vodík buď uniká, nebo poškozují materiál (vodíkové křehnutí). Výhoda je taková, že se dá skladovat ve všech třech skupenstvích, plynném, kapalném a případně i pevném. To nabízí mnohem širší možnosti přizpůsobit skladování dané aplikaci, či možnostem. Technologie skladování se rozdělují na základní dvě, konvenční (fyzikální) a alternativní (chemické). Konvenční jsou například tlakové nádoby pro plynný vodík, nebo kryogenní nádoby pro kapalný vodík. Popřípadě i kombinace, neboť s rostoucím tlakem nám poroste i bod varu (princip Papinova hrnce) a díky tomu není nezbytné vodík chladit na tak nízkou teplotu. Alternativní technologie je například skladování v tzv. metalhydridech, dále třeba absorbce v nanostrukturách uhlíku či skleněných mikrokuličkách anebo průmyslová přeměna na jiné chemické látky (čpavek, metan atd.). [6] [7] [8]

4.1 Skladování vodíku v plynné fázi

Tento způsob není technologicky složitá záležitost, neboť při něm nedochází k fázové přeměně. Pro aplikace, kde se neklade důraz na hmotnost či rozměry se využívají ocelové bezešvé láhve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Jsou vyráběny v několika různých variantách objemu od několika litrů až do zhruba 100 litrů pro běžné aplikace.

Pochopitelně pokud chceme uskladnit vodík ve vysokotlakých nádobách, nejprve je nutné ho stlačit. Tlak zastupuje v celém tomto procesu skladování velice důležitý faktor, rozhoduje o objemu nádrže, ale i o energii, kterou je potřeba dodat do systému. Například abychom stlačili vodík na 350 barů, bude nutné dodat energii dosahující přibližně 30% energie v palivu. [9]



7 Srovnání stejného množství vodíku při různém provozním tlaku [7]

4.2 Skladování vodíku v kapalně fázi

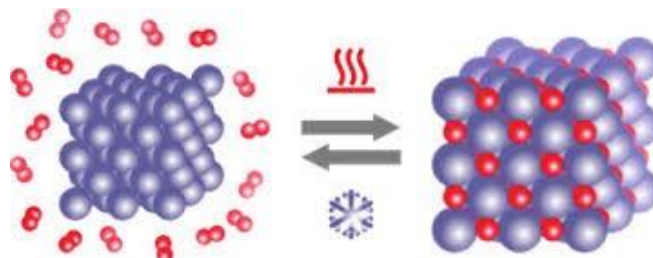
V tomto skupenství je nezbytné skladovat vodík při teplotě -253 °C (díky jeho nízkému bodu varu), a k tomu se váží vysoké nároky na použitý materiál a také vysoké energetické nároky na zkapalnění.

Pro uskladnění za takových podmínek se používají vícevrstevné nádoby s velmi dobrými izolačními vlastnostmi s maximálním přetlakem 5 barů. Při uskladnění v kryogenních nádobách dochází vlivem přestupu tepla z okolí k postupnému odpařování, tudíž se zvyšuje tlak uvnitř nádrže. Aby nedošlo k její destrukci, tak se přebytečný tlak reguluje odpouštěním odpařeného vodíku. Pro běžně využívané nádrže dosahují tyto ztráty až 3 % z objemu za den. Proto je takto unikající vodík shromažďován a stlačován do tlakových lahví.

Zkapalnění vodíku je technologicky i energeticky poměrně náročné. Energie potřebná ke zkapalnění dosahuje téměř poloviny (40 %) energie v palivu. Avšak i přesto bychom našli aplikace, kde je použití této technologie platné, například v transportu vodíku nákladními loděmi, či cisternami. [7] [8]

4.3 Skladování vodíku v pevné fázi

Tyto systémy skladování (v hydridech) jsou založeny na principu absorpce vodíku do materiálů na bázi kovů. Vodík je s jeho velmi malým atomovým poloměrem schopen proniknout mezi atomy kovu do tzv. intersticiálních poloh. Jedná se o exotermní reakci, tzn. že se při absorpci uvolňuje/vyvíjí teplo. Opačný děj – desorpce, tedy uvolňování vodíku z materiálu je naopak reakce endotermní a teplo je spotřebováváno (nebo je nutné do systému dodat).



8 Princip absorpce/desorpce vodíku do struktury kovu a vznik metalhydridu [7]

Nejdůležitějším faktorem u těchto systémů není tlak, ale hlavně provozní teplota, při které dochází k desorpce vodíku z materiálu. Mezi další sledované vlastnosti patří také hmotnostní a objemová kapacita a určitě také cena.

Vysoká cena metalhydridových nádrží je dána především použitou slitinou. Materiály vhodné pro absorpci vodíku jsou nejčastěji slitiny hořčíku, hliníku, titanu, vanadu či sodíku, které se v závislosti na jejich poměru, či kombinaci liší svou cenou, absorpčními vlastnostmi i celkovou hmotností. U sloučenin s lehkými kovy, jako je například hořčík, vychází celková hmotnost systému pouze o 30 % vyšší oproti systému skladující kapalný vodík. Tyto příznivé parametry však na druhou stranu „kazí“ potřeba vysoké desorpční teploty a nízký tlak produkovaného vodíku. [7]

5 Možné následné zpracování odpadního produktu elektrolýzy – kyslíku (O_2)

5.1 Zkapalnění a prodej

Kyslík se chemickým procesem především díky extrémně nízké teplotě zkapalní, a následně uskladní v zásobních tancích. Tyto tanky jsou dodávány na místo použití většinou včetně vaporizéru (odpařovače). Tyto odpařovače využívající okolní vzduch, realizují se jako pole trubek s mnoha žebry pro zajištění rychlosti odpařování až 1133 m³/h na jedno pole. Pro zajištění vyšší rychlosti odpařování se přidávají další jednotky.

Kapalný kyslík může být dodáván do nemocnic, svařoven atd. Dále se kapalný kyslík využívá jako raketové palivo. Obvykle má daná továrna (např.: Škoda v Kvasinách) smlouvenou dodávku kyslíku, který je nepřetržitě dodáván v určitých intervalech. Mění se nádrže s kyslíkem, který projde přes odpařovač a dále jako plynný rozváděn po dané továrně. [6]



9 Skladovací nádrž na kapalný kyslík [10]

6 Využití vyrobeného vodíku

Vodík by měl podle všeho v budoucnosti hrát významnou roli v řadě oblastí, a tak pomoci ke všem tak vytoužené budoucnosti bez uhlíkové stopy a bez závislosti na vyčerpatelných zdrojích.

6.1 Uložení energie

Vodík se dá použít v první řadě pro uložení energie bez výraznějších ztrát s časovou délkou (kromě kapalného vodíku) uložení jako je tomu u klasických bateriích. Vodík se také oceňuje především jako vhodný konzervátor energie ze zdrojů, jejichž přísun je nárazový a nedokáže zabezpečit stabilní výkon v kteroukoliv denní dobu (což se týká většiny obnovitelných zdrojů, zejména FVE a VTE). Následně by pak v ideálním případě mělo být možno regulovat výkyvy v rozvodné síti. Během dne se vyrábí a spotřebovává různé množství elektrické energie. Přes den, kdy lidé chodí do škol, zaměstnání a podnikové provozy jedou na plné obrátky, je energie potřeba více než v noci. A když svítí Slunce nebo fouká vítr, vyrábí solární a větrné elektrárny takové množství energie, které nelze okamžitě spotřebovat. Kolísání výroby a spotřeby elektřiny komplikuje život nejen provozovatelům přenosových a distribučních soustav. Nejjednodušší by bylo přeměnit přebytečnou elektrickou energii v nějaký lehce uchovatelný prvek a v případě potřeby z něj energii znovu získat a využít.

Už dlouho se o vodíku uvažuje jako o univerzálně použitelném „nosiči energie“, to znamená, že by se používal nejen pro ukládání přebytků elektřiny ze sítě a obnovitelných zdrojů, ale i jako náhradní palivo pro pohon dopravních prostředků nebo namísto baterií či akumulátorů v přenosné elektronice apod. [11]

6.2 Doprava

Veliký potenciál má vodík v dálkové dopravě. Již vznikají první prototypy vodíkových letadel. Vlaky na vodíkový pohon jsou již využívány například v Nizozemsku. Další velkou skupinou, která plánuje přejít na vodík je nákladní doprava anebo také autobusová doprava.

V momentě, kdy je vodík úspěšně extrahován, dá se využít v palivových článcích ke zpětnému získání energie podobným způsobem, jako funguje baterie. Elektrochemický proces zapříčiní sloučení vodíku s kyslíkem za vzniku elektřiny, tepla a vodní páry. Není tedy téměř rozdíl, jestli například automobil pohání lithium-iontové baterie, nebo jestli jezdí na vodík – elektřina je oním hybatelem v obou případech. Oproti dobíjení akumulátorů z elektrické sítě nabízí vodík zásadní výhodu; lze ho dočerpat téměř stejně rychle jako kapalné palivo. U dopravních prostředků se dá ale také použít jako palivo které je spalováno ve válcích, je však nutná úprava pohonné jednotky. Má však také zásadní nevýhodu; disponuje sice energetickou hustotou 142 MJ/kg, což je zhruba třikrát více než má kilogram benzínu, jenže při normálním tlaku zabere mnohem větší prostor než benzín. Což znamená, že pro jakékoliv využití v nádrži osobního auta je pravděpodobně nutná komprese, zhruba na 700 atmosfér. Každopádně s vodíkem se v oblasti dopravy do budoucna počítá.

6.3 Vodík se zemním plynem

Dále zde existuje plán přimíchávat vodík do zemního plynu. Opět kvůli snížení emisí, a také kvůli zvětšení výhřevnosti. Je zde však celkem problém s potrubím. Životnost plynodů je něco okolo sto let a přimíchaným vodíkem, díky jeho extrémně nízké hustotě a malému atomovému poměru, by se rapidně snížila. Tudíž, při realizace tohoto plánu bude nutné přimíchávat množství pouze do maximálně dvaceti procent, případně bude nutná výstavba nových rozvodných sítí, což by s sebou přinášelo obrovské investice.

7 Návrh vodíkové čerpací stanice

Vodíková čerpací stanice je dimenzována na základě následujících podmínek:

Roční nájezd autobusu: 60 000 km

Spotřeba autobusu: 8 kg/100 km

Spotřeba deseti autobusů za rok: 48 000 kg vodíku

Spotřeba deseti autobusů za měsíc: 4 000 kg *49,9 = 199,60 MWh...měsíc

Plug power elektrolyzér spotřeba: 49,9 kWh / kg

Potřeba proudu na pokrytí 100 % dodávky za měsíc: 199 600 kWh

7.1 Schéma projektu

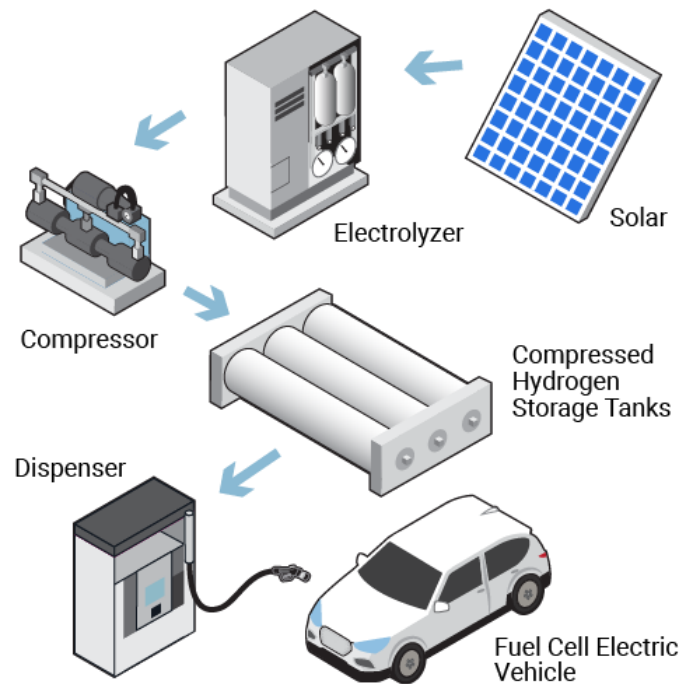
Na obrázku č.1 je vidět schéma navrhované čerpací stanice na zelený vodík. Jako první je zapotřebí mít elektřinu, tu musí obstarat nějaký obnovitelný zdroj (aby byl vodík „zelený“). V našem případě budou použity Fotovoltaické panely. Toto rozhodnutí vychází převážně z geografických dispozic, dále také například to, že FVE jsou mnohem snadnější na instalaci pořízení, či i povolení.

Dalším komponentem naší čerpací stanice musí být elektrolyzér, který zajistí výrobu vodíku z elektřiny dodané fotovoltaickými panely. Zde bude jako odpadní produkt vyráběn kyslík, který by pro zlepšení ekonomiky mohl být zachytáván, chemickým procesem především díky extrémně nízké teplotě zkapalněn a následně ho prodán, ideálně do nedaleko stojící Hradecké nemocnice.

Po elektrolyzéru musí následovat kompresor. Z elektrolyzéru dostaneme vodík o 40 barech, z důvodu rozměrů nádrže a tlaku potřebného pro vozidlo potřebuje pro čerpací stanici mnohem vyšší tlak. Vodíková čerpací stanice v Neratovicích například pracuje s tlakem 350 barů, u současných a budoucích čerpacích stanic se však počítá s tlaky až 700 barů. Pro autobusy ovšem 350 barů stačí, neboť jejich nádrž se plní pod tímto tlakem, u automobilů bychom pro plné využití nádrže potřebovali oněch 700 barů.

Nicméně je potřeba dodat, že normálně se vodík pod takto vysokými tlaky neskladuje, pouze se takto tlakuje do dalšího komponentu čerpací stanice, a tím je mezi zásobník. Záleží na jeho dimenzování, kolik nádrží/vozů dokáže takto rychle natankovat. Některé stanice zvládnou třeba jen dva vozy, u dalších se doba plnění bude prodlužovat. Před mezi zásobníkem použijeme pro skladování vodíku vysoko objemový, nízkotlaký, nadzemní zásobník.

Posledním komponentem je dávkovač. Autobusy mývají uzemňovací bod, kam se připojí kabel s kleštěmi od stanice, vodíková auta mají obvykle zemnicí bod integrovaný přímo v čerpacím ventilu. Hadice vedoucí ke stojanu zajistí přívod vodíku, jejich opletení pak uzemnění vozidla.



10 Schéma benzínky [12]

7.2 Postup

Nejprve bylo nutné spočítat spotřebu autobusů za měsíc, roční nájezd 60 000 km / 100 km = 600 následně toto číslo vynásobíme spotřebou autobusu čili 600*8 = 4800 kg vodíku za rok je spotřeba jednoho autobusu. V případě deseti bude celková spotřeba vodíku za rok 48 000 kg. Pokud spotřebu autobusů vydělíme dvanácti získáme hodnotu 4000 kg, což je měsíční spotřeba autobusů. Následně budeme vycházet z tabulky specifikací elektrolyzátoru a danou měsíční spotřebu vynásobíme spotřebou proudu na výrobu 1 kg našeho elektrolyzátoru, tedy hodnotou 49,9 kW/kg. Z poslední výpočtu dostaneme, že potřebujeme 199 600 MWh za měsíc abychom pokryli spotřebu všech deseti autobusů.

Nejprve se na dané zadání podíváme tak, že v letních měsících je potřeba pokrýt 100 % spotřebovaného vodíku danými autobusy, tudíž bude potřeba navrhnout fotovoltaiku tak, aby v letních maximech dodávala 199 600 MWh. V druhé fázi naopak k zadání přistoupíme opačně a to tak, že v zimním minimálním úhrnu potřebujeme pokrýt 100 % vodíku pro autobusy a ostatních měsících, kdy nám bude elektrolyzátor vyrábět více vodíku, než je potřeba můžeme přebytečný vodík prodávat.

7.2.1 Řešení číslo 1

Nejprve je potřeba si spočítat potřebnou plochu fotovoltaických panelů. Postup je takový, že pro měsíc s největším úhrnem slunečního záření (letní špičku) budeme uvažovat námi vypočtenou potřebu elektřiny (199 600 MWh) a zjistíme plochu panelů.

$$\text{Produkce } kW/m^2 = H_i \cdot \eta_{\text{panelů}}$$

H_i = úhrn záření v daném měsíci

$\eta_{\text{panelů}}$ = účinnost panelů

$$S_{\text{panelů}} = \frac{199\,600}{(\text{Nejvyšší hodnota Produkce } kW/m^2)} = 8221,27 \text{ m}^2$$

Vzorec pro produkci kW/m^2 použijeme pro každý měsíc a po vynásobení této produkce s výše vypočtenou pluchou panelů zjistíme kolik kWh nám FVE vyrobí každý jednotlivý měsíc (viz. Tabulka – Přes letní špičku).

Tabulka 2 Produkce kWh (přes letní špičku)

Přes letní špičku

kW/m ² :	kWh za měsíc:
2,51	20 656,59
3,87	31 829,25
7,50	61 638,07
14,99	123 200,76
21,46	176 410,33
24,28	199 600,00
24,07	197 881,13
17,90	147 129,23
9,70	79 776,67
5,14	42 293,25
2,83	23 249,98
2,15	17 641,03
	1 121 306,30

Již máme potřebné hodnoty pro zjištění produkce vodíku a kolik ho budeme muset dokupovat. Jako referenční hodnotu budeme brát oněch 4000 kg vodíku pro plné pokrytí spotřeby. Vydělíme 4000 kg číslem 199 600 kWh a zjistíme kolik vodíku se vyrobí za jednu kWh, dále postupně násobíme námi vypočtenými kWh za jednotlivé měsíce, které nám bude dodávat FVE.

$$\text{Vyroběný vodík} = \left(\frac{4000}{199\,600} \right) \cdot \text{Produkce kWh za měsíc}$$

V tabulce níže vidíme, že bychom museli dokoupit 25 528 kg vodíku. Při ceně 250 Kč za kilogram vodíku zaplatíme za dokup vodíku pro tuto benzínku 6 382 000 Kč (viz. Tabulka – Přes letní špičku).

Tabulka 3 Produkce vodíku (přes letní špičku)

Vyroběný vodík [kg]	Potřeba dokoupit [kg]
413,96	3 586,04
637,86	3 362,14
1 235,23	2 764,77
2 468,95	1 531,05
3 535,28	464,72
4 000,00	0,00
3 965,55	34,45
2 948,48	1 051,52
1 598,73	2 401,27
847,56	3 152,44
465,93	3 534,07
353,53	3 646,47

22 471,07	25 528,93
------------------	------------------

Dále jsem spočetl výrobu elektřiny pro každou denní hodinu (viz. Tabulka – Průměr kW/m² den). Použity byli hodnoty z PVGIS, z grafu na obr.3.

$$Denní\ produkce\ kW = (H_{i,pro\ danou\ hodinu} \cdot \eta_{panelů} \cdot S_{panelů}) \cdot 1000$$

Tabulka 4 Produkce kW/m² v průběhu dne

Průměr kW/m² den:

Hodina	Výroba	Hodina	Výroba
0	0,00	13,00	1 214,70
1	0,00	14,00	1 061,57
2	0,00	15,00	857,84
3	0,00	16,00	621,93
4	105,79	17,00	380,10
5	296,10	18,00	167,67
6	531,73	19,00	30,22
7	773,33	20,00	0,00
8	991,47	21,00	0,00
9	1 164,97	22,00	0,00
10	1 279,74	23,00	0,00
11	1 327,63	24,00	0,00
12	1 305,47		

Zde je třeba mít na paměti, že od 20:00 do 4:00 nám fotovoltaika nebude dodávat žádný proud, tudíž pokud bychom spoléhali pouze na elektřinu z FVE celá technologie v tu chvíli bude stát.

7.2.2 Řešení číslo 2

Zde jsme k danému zadání přistoupili z druhé strany, a to tak, že v zimních minimech úhrnu pokryjeme 100 % spotřeby vodíku pro autobusy. Postup včetně vzorců bude stejný, budou se lišit výchozí hodnoty.

$$S_{panelů} = \frac{199\ 600}{(Nejnižší\ hodnota\ Produkce\ kW/m^2)} = 93\ 019,79\ m^2$$

Tabulka 5 Produkce kWh (přes zimní minimum)

Přes zimní minimum

kW/m ² :	kWh za měsíc:
2,51	233 719,66
3,87	360 132,99
7,50	697 405,81
14,99	1 393 958,63
21,46	1 996 000,00

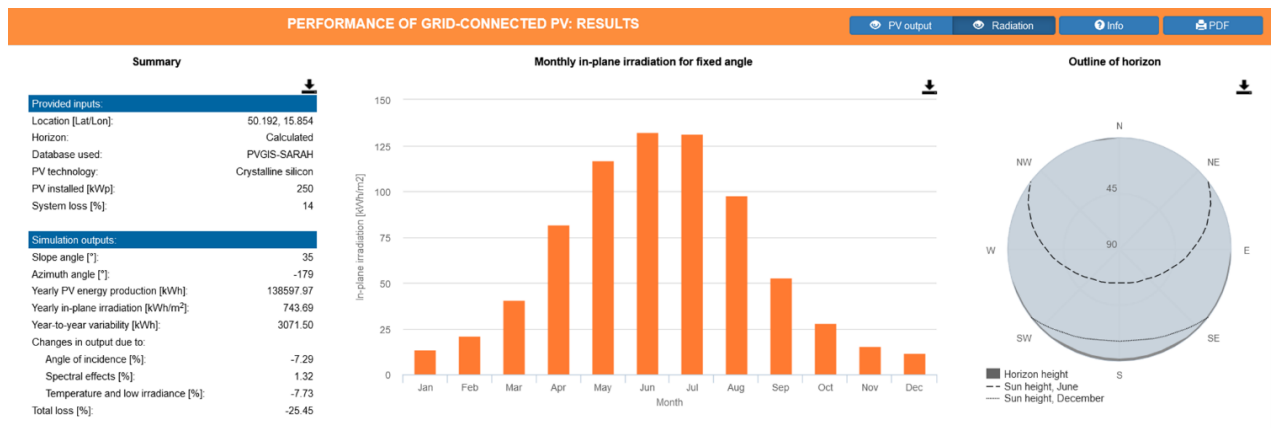
24,28	2 258 380,17
24,07	2 238 931,97
17,90	1 664 698,12
9,70	902 635,56
5,14	478 528,21
2,83	263 062,56
2,15	199 600,00
	12 687 053,68

Tabulka 6 Produkce vodíku (přes zimní minimum)

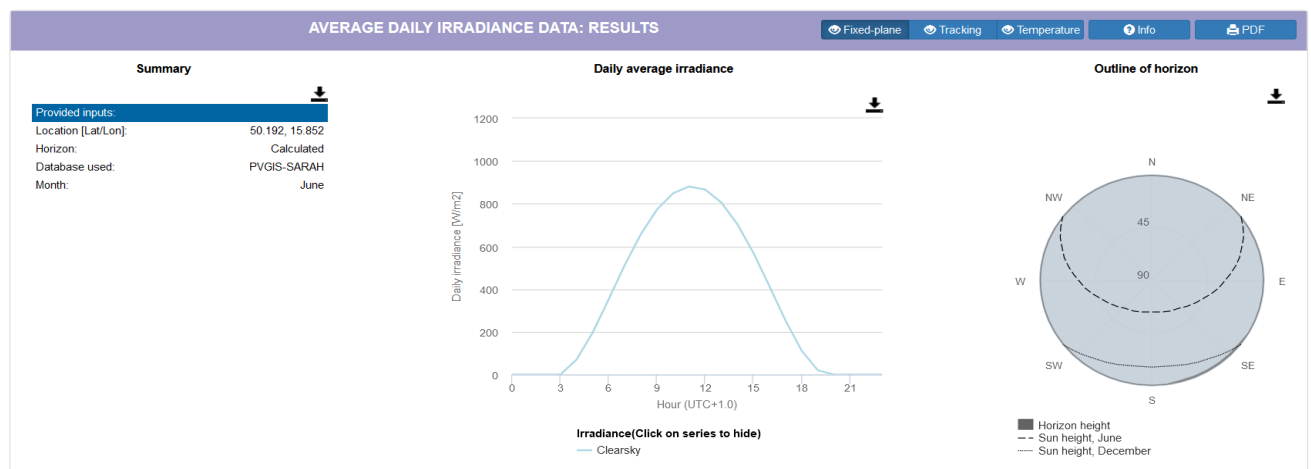
Vyrobený vodík [kg]	Možno prodat [kg]
4 683,76	683,76
7 217,09	3 217,09
13 976,07	9 292,31
27 935,04	23 251,28
40 000,00	35 316,24
45 258,12	40 574,36
52 538,18	47 854,42
33 360,68	28 676,92
18 088,89	13 405,13
9 589,74	4 905,98
5 271,79	588,03
4 000,00	0,00
261 919,38	207 765,53

Ve druhém řešení ovšem vyšlo, že by byla potřeba plocha $FVE\ 93\ 019\ m^2$ což je velká plocha a byl by zde velký problém s umístěním. Dále by zde bylo nutné vybrat jiný, výkonnější elektrolyzátor. Mnou vybraný stačí na produkci 18 kg za hodinu čili při plném výkonu celý měsíc by nám poskytl maximálně 13 000 kg vodíku. U tohoto řešení by se nabízelo abychom dimenzovali výrobu vodíku pro autobusy a zbytek proudu bychom využívali v daném areálu na provoz, případně ho prodávali do sítě apod.

Ve výpočtech jsem vycházel z PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Hodnoty úhrnu záření můžeme vidět na grafech níže.



11 Úhrn záření po měsících z PVGIS [13]



Last update: 15/10/2019 [Top](#)

12 Úhrn záření v průběhu dne z PVGIS [13]

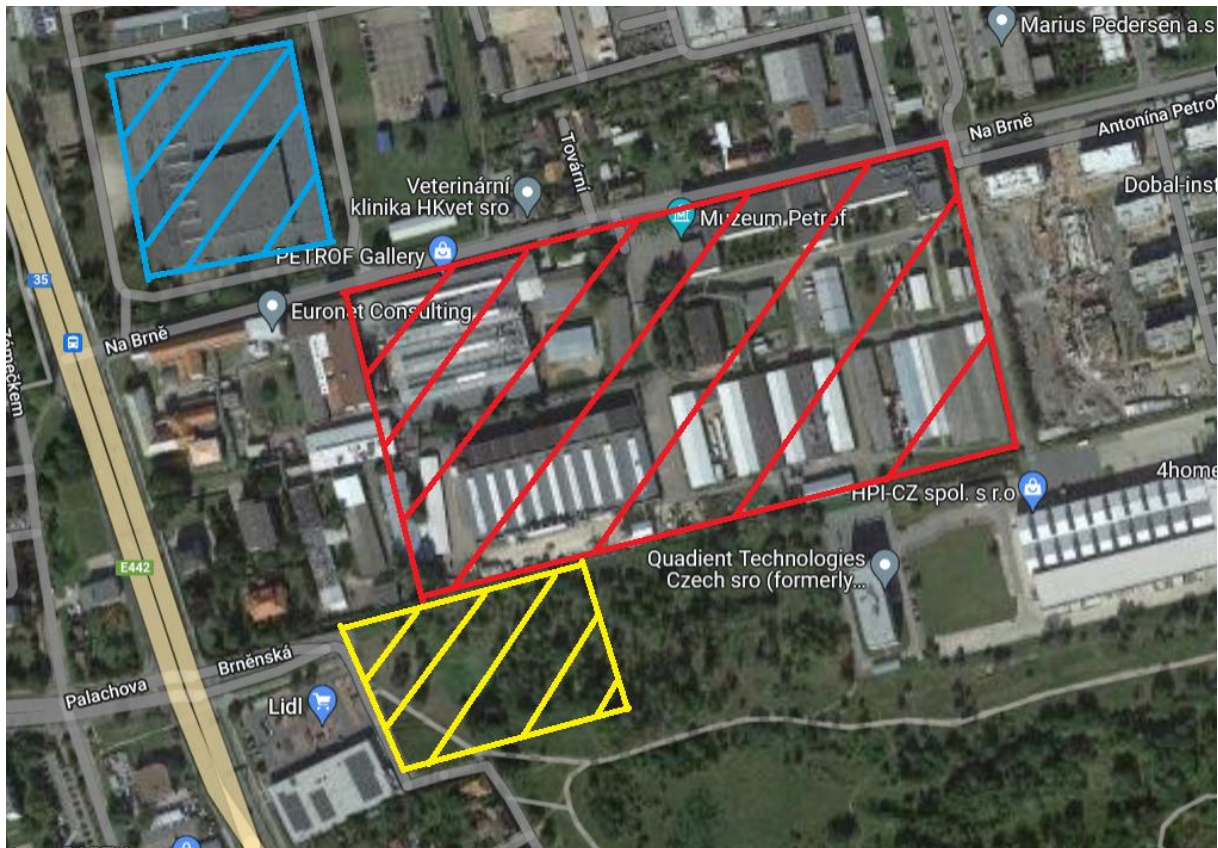
7.3 Lokalita

Danou čerpací stanicí, včetně fotovoltaiky i elektrolyzéry jsem navrhl pro městskou hromadnou dopravu v Hradci Králové. V Hradci Králové se uvažovalo o pokrytí střech po celém areálu Petrof FVE panely, dále je daná lokalita téměř v centru města, tudíž ideální místo, kde mohou autobusy případně i v průběhu dne dotankovat. Je zde k dispozici plocha nějakých 8000 m², takže pro řešení se 100 % pokrytím letního maxima bychom se s plochou 8 221 m² by bylo potřeba řešit rozšíření na nedaleko ležící sportovní halu.

V rozloze musíme počítat nejen s FVE, ale také s elektrolyzéry a dalšími připojenými technologiemi. Elektrolyzér je velký zhruba jako přepravní kontejner o rozměrech 12x2m, dále bude potřeba vodík skladovat. Nejvhodnější řešení pro naši benzínku bude vysoko objemový, nízkotlaký, nadzemní zásobník. Z legislativních důvodů musí být umístěn v protipožárním betonovém ohradníku poblíž kompresorové stanice. Dále zde bude potřeba kompresorová stanice. Obvykle bývá v takovýchto aplikacích umístěna v masivním železobetonovém kontejneru. Vnitřní prostor kompresorové stanice bývá z bezpečnostních důvodů fyzicky rozdělen na část s řídicími elektronikou, hydraulickým kompresorem a ostatní elektroinstalací a na část se zařízeními pro kompresi, rozvod a regulaci průtoku stlačeného vodíku. Stlačený vodík je skladován vně kompresorové stanice ve svazcích tlakových lahví.

Z hlediska tlaků jsou svazky rozděleny na nízko, středně a vysokotlaké. Přecherpávání do vozidla probíhá v pořadí od nejnižšího tlaku po nejvyšší. Pokud je vodík z těchto pohotovostních zásobníků při čerpání vyčerpán, zapojuje se do čerpání i kompresor. V případě čerpání menšího množství vodíku je kompresor využit až po načerpání vozidla pro doplnění tlakových zásobníků. [10]

Dle výše uvedeného by celé zařízení (FVE + elektrolyzér + benzínka + přídatné technologie) nemělo přesáhnout 12 000 m².



13 Mapa areálu [14]

Na mapě výše je zobrazena dispozice areálu. Červeně označený je zde samotný areál Petřof, kde bychom pro tento projekt mohli pokrýt všechny střechy FVE panely, nicméně celý areál má zhruba 8000 m² což by nám ve variantě se stoprocentním pokrytím letního maxima nestačilo. Tudíž se nabízí dále využít střechu sportovní haly označenou modře. Dále potřebujeme plochu se snadným přístupem pro benzínku jako takovou, tato plocha je označená žlutě. Tato plocha splňuje jak požadavek na snadný přístup, tak dostatečnou velikost pro kompresy a skladování vodíku.

7.4 Elektrolyzér

Pro tento projekt byl vybrán elektrolyzér PEM značky PlugPower, konkrétně Genfuel 1MW. [4]

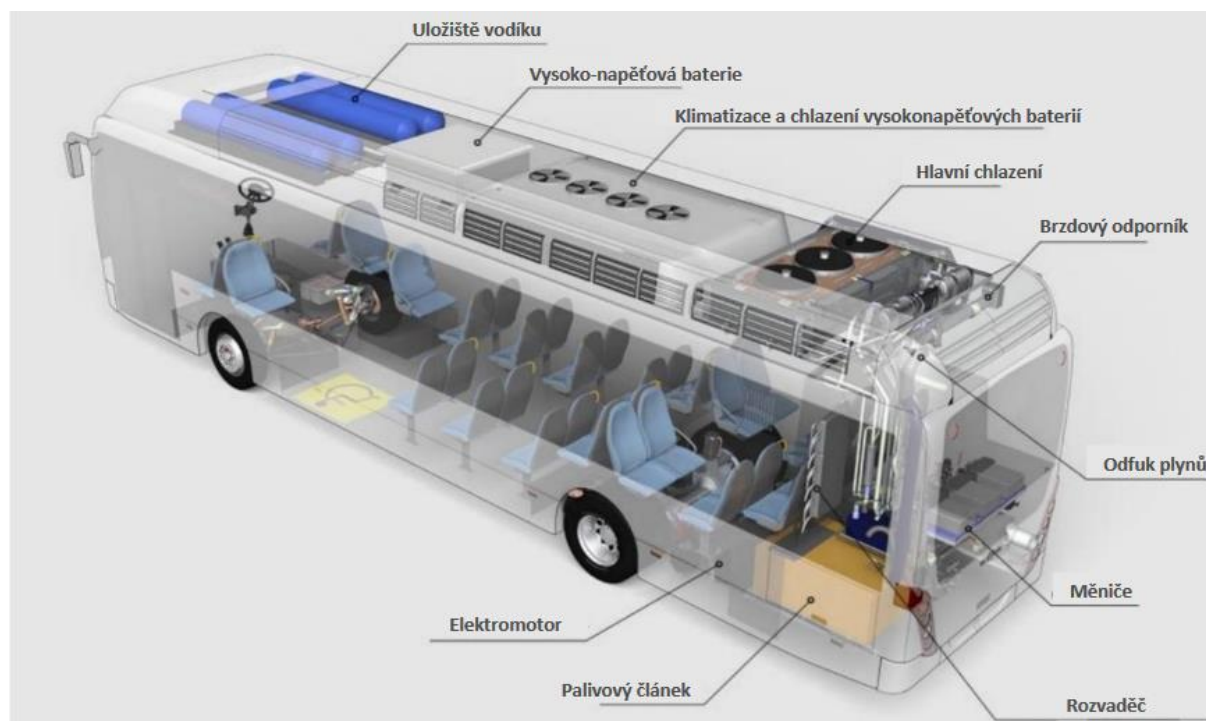
Specifikace:

Tabulka 7 Specifikace elektrolyzérů PlugPower

Specifikace produktu (systému)	
Specifikace	Hodnoty
Vstup	
Elektrický vstup	480VAC, 60 Hz (USA) / 400VAC, 50 Hz (EU)
Rovnováha zařízení	
Spotřeba vody (DI)	10 kg/kg vyprodukovaného vodíku
Parametry	
Rozměry (šířka X výška X délka)	8' x 9'6" x 40' (2,4m X 2,9m X 12,2m)
Váha	35 tun
Teplota okolí	-20 °C až +40 °C
Produkce	
Produkce vodíku	200 Nm ³ /hod / 18 kg/hod
Čistota vodíku	99,999 %
Tlak vodíku	40 bar
Čas spouštění	30 sekund (teplý start) / < 5minut (studený start)
Průměrná účinnost výroby	49,9 kWh/kg
Komunikace	24/7 získávání dat a možný dálkový monitoring
Konstrukční základ	V souladu s ISO 22734, NFPA 2, CRN, CE

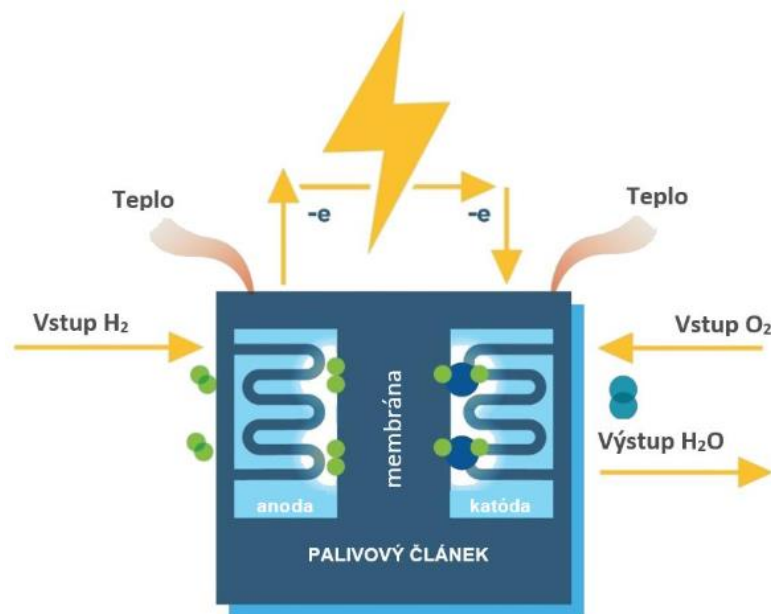
Specification Genfuel [4]

7.5 Vodíkové autobusy



14 Příklad hlavních komponent vodíkového autobusu od výrobce Van Hool [15]

Autobus na vodíkový pohon (FCEB – Fuel Cell Electric Bus), je vozidlo využívající elektromotor, který je napájen elektrickou energií získanou z vodíku pomocí chemické reakce s kyslíkem (tzv. palivový článek). Princip této reakce je znázorněn na Obr. 5.



15 Schéma palivového článku [15]

Vodíkové autobusy mají oproti elektrickým velkou výhodu v rychlé době doplňování paliva, spolu s dlouhým dojezdem (oproti elektrickým) to z nich dělá potenciální náhradu autobusů diesellových. Mezi další nesporné výhody výkon za chladného počasí, který je srovnatelný s autobusy na naftu či CNG. Dále nám nabízí nízkou hlučnost, podobně jako u elektrických autobusů, a poměrně dlouhou životnost palivových článků, která se pohybuje okolo 30 000 hodin.

Naopak nevýhody budou zejména vysoká pořizovací cena, nutnost vodíkových plnicích stanic, tudíž celého procesu výroby a dodání vodíku, a v neposlední řadě také servis, který vyžaduje nové metody a díky vlastnostem vodíku také bezpečnostní opatření. [14]

8 Ekonomické zhodnocení

Pro možnosti implementace výroby vodíku elektrolýzou je potřeba vyhodnotit, za jakých podmínek se investorům, či organizacím vyplatí se něčím takovým zabývat. V tomto ekonomickém zhodnocení je porovnávána převážně veřejná doprava klasická (nafta) a vodíková, dále také provoz a náklady na výstavbu vodíkového hospodářství. Toto hodnocení bude rozděleno na dva subjekty, na provozovatele autobusů a provozovatele vodíkového hospodářství.

8.1 Analýza z pohledu provozovatele autobusů

8.1.1 Konvenční veřejná doprava

Zástupce přepravy na diesellový pohon je autobus od společnosti SOR Libchavy. Takové autobusy jsou po celé republice, dle města záleží na procentuálním zastoupení ve vozovém parku daného města.

Cena za standardní (částečně nízkopodlažní) autobus je 4,3 milionů korun, za plně nízkopodlažní 7,1 milionů korun. Pro výpočet bude použita průměrná cena autobusu 5 milionů korun, která vychází z cen autobusů SOR a dalších značek (Irisbus, Solaris, atd.), používaných v českých městech. Průměrná spotřeba většiny těchto běžných autobusů se pohybuje mezi 20-30 l/100 km v závislosti na členitosti trasy a způsobu jízdy, budu tedy počítat s hodnotou 25 l/100 km. [14] [15]

Pro výpočet nákladů na provoz budu počítat s původním zadáním abychom se dostali k přímému porovnání dvou odlišných koncepcí autobusů. 10 autobusů s ročním nájezdem 60 000 km.

Náklady na pořízení 10 autobusů budou 50 000 000 Kč a ročně spotřebujeme 150 000 litrů nafty, a za spotřebovanou naftu zaplatíme 5 400 000 Kč. Počítáno s cenou nafty 36 Kč/litr. Měsíčně budeme muset zaplatit za naftu 450 000 Kč.

Náklady na provoz autobusy jsou dle dostupných zdrojů průměrně 15,1 Kč/ km, včetně paliva. Pokud vynásobíme toto číslo 600 000 km najetými našimi autobusy, dostaneme částku 9 060 000 Kč, a to je částka ročního provozu deseti dieselových autobusů s daným nájezdem. Když od této částky odečteme náklady na palivo (5 400 000 Kč) zjistíme, že údržba nás bude stát 3 660 000 Kč ročně. [16] [17]

8.1.2 Vodíková veřejná doprava

Ze počátečních podmínek návrhu čerpací stanice je známo, že 10 vodíkových autobusů se stejným nájezdem spotřebuje 48 000 kg vodíku za rok. A při ceně 250 Kč za kilogram vodíku bychom zaplatili za provoz těchto autobusů 12 000 000 Kč.

Obecně se uvádí, že provoz vodíkového autobusu je prozatím výrazně dražší než provoz dieselového autobusu. Toto je způsobeno nejen cenou paliva, ale také údržbou, která je mnohem složitější a díky tomu také nákladnější. Uvádí se, že údržba vodíkových autobusů stojí průměrně 0,6 EUR za ujetý kilometr, což by v našem případě deseti autobusů s nájezdem dohromady 600 000 km znamenalo náklady pouze na údržbu 8 870 075 Kč. Náklady na údržbu jsou však velice proměnné a v každé studii se liší, pravděpodobně je to způsobeno „mladím“ těchto projektů. Nicméně do budoucna by se cena údržby i paliva u vodíkových autobusů měla výrazně snížit. Pokud bychom tedy brali v potaz aktuálně dostupné hodnoty, celkově nás bude stát provoz 10 autobusů 20 870 075 Kč ročně. [17]

8.1.3 Porovnání CAPEX a OPEX nákladů obou typů autobusů

Pokud budeme porovnávat pořizovací ceny autobusů zjistíme, že vodíkový bude 3x dražší. Nicméně na pořízení vodíkového autobusu lze čerpat dotaci až 85 % z Integrovaného regionálního operačního programu (IROP). V případě čerpání dotace je cena takového autobusu velice zajímavá, přibližně poloviční oproti ceně dieselového. [18]

Tabulka 8 Capex autobusy

CAPEX	Diesel bus	Vodík bus
Cena bez dotace [Kč]	5 000 000	15 000 000
Cena s dotací [Kč]	5 000 000	2 250 000

Běžně požadovaná životnost autobusů se pohybuje mezi 15 až 20 lety provozu, z toho důvodu jsou provozní náklady v tabulce níže spočítány pro 20 let.

Tabulka 9 Opex autobusy

OPEX	Diesel bus	Vodík bus
Údržba [Kč/rok]	366 000	887 008
Palivo [Kč/rok]	540 000	1 200 000
Náklady celkem [Kč/rok]	906 000	2 087 008
Náklady celkem pro 10 autobusů [Kč/rok]	9 060 000	20 870 075
20 let provozu [Kč]	135 900 000	313 051 125

8.1.4 Určení kritické ceny vodíku

Kritická cena vodíku bude taková cena, při které se budou provozní náklady autobusu vodíkového rovnat nákladům konvenčního, naftového autobusu. V prvním případě je brána v potaz i údržba, výpočet je následující:

$$Cena_{krit} = (\text{údržba diesel bus} + \text{palivo diesel bus}) - \text{údržba vodík bus} = \text{potřebné náklady na palivo (vodík)}$$

$$Cena_{krit} = (366\,000 + 540\,000) - 887\,008 = 18\,992\text{ Kč}$$

Vypočtených 18 992 Kč je částka, kterou bychom museli zaplatit za vodík pro provoz jednoho autobusu ročně aby se provozní náklady včetně údržby rovnali. Pokud tuto částku vydělíme 4 800 kg spotřebovanými jedním autobusem pro roční nájezd 60 000 km, dostaneme kritickou cenu za kilogram vodíku, která činí 3,95 Kč za kilogram vodíku. Tato částka je pro reálný případ nesmyslně nízká, tudíž ve druhém případě porovnáme pouze náklady na palivo a spočteme kritickou cenu kilogramu vodíku z nich. Cenu servisu tedy zanedbáme. V budoucnosti, s rozvojem aplikací vodíkových autobusů by se měla cena za údržbu snižovat, tudíž by tento případ jednou mohl mít reálný scénář. [14]

$$Cena_{krit,kg} = \frac{\text{cena za vodík rovnající se konvenčnímu palivu}}{\text{kg vodíku spotřebované pro 60 000 km}} = \frac{540\,000}{4\,800} = 112,5\text{ Kč/kg}$$

Pokud by cena vodíku dosáhla vypočtených 112,5 Kč za kilogram, roční náklady za palivo by byli totožné s náklady na palivo dieselového autobusu.

8.2 Analýza z pohledu provozovatele vodíkového hospodářství

Zde se zaměřím nejprve na fotovoltaické panely, následně na část výroby, skladování a distribuce vodíku. Tato analýza bude rozdělena na dvě části, v první části bude hodnocena ekonomika návrhu vodíkového hospodářství přes letní špičku, v druhé části potom přes zimní minimum.

8.2.1 Hodnocení projektu přes letní špičku

8.2.1.1 Fotovoltaická elektrárna

V této části budu počítat s parametry pouze pro případ návrh FVE přes letní špičku. V tomto případě je složité získat dotaci, v rámci modernizačního fondu se dotace pohybují na úrovních 6 až 7 tis Kč na KWp, dle velikosti a případné akumulace, jsou zde však provozní omezení, tudíž zde nebude dotace počítána. Bude započítána pro tzv. optimistický scénář.

8.2.1.1.1 Základní parametry FVE

Tabulka 10 Parametry FVE (přes letní letní špičku)

Sluneční osvit	
Max. dopadající sluneční záření [kW/m ²]	1
Průměrné zář. - PVGIS [kWh/m ² /rok]	743,69
FVE	
Plocha panelů [m ²]	8 221,27
Účinnost FVE [%]	18,38
účin. Modulu [%]	20,15
účin. Střídače [%]	95,0
účin. Transformátoru [%]	97,0
účin. Rozvodů [%]	99,0
Degradace účinnosti [%/rok]	0,8
Výkon a výroba	
Výkon FVE [kW]	1 511,28
Výroba elektřiny [MWh/rok]	1 124,40

Budu počítat s průměrnou cenou 30 000 Kč za kWp. V tom případě by náš naše fotovoltaická elektrárna stála 32 125 714 Kč.

8.2.1.2 Vodíkové hospodářství

Zde budu vycházet převážně ze studie ÚJV Řež, a. s. s názvem: Technicko-ekonomické posouzení implementace vodíkového pohonu v Ústeckém kraji. Je velice obtížné dohledat ceny komponent čerpací stanice a elektrolyzérů, pravděpodobně z důvodu začátků výroby podobných zařízení a malému výskytu realizací. Na stavbu vodíkových plnicích stanic je možné získat dotaci až do výše 85 % nákladů, v závislosti na hospodárnosti, připravenosti a relevanci projektu. [19]

8.2.1.3 Elektrolyzér

Cena elektrolyzérů včetně nutného příslušenství se pohybuje někde v rozpětí 29 000 až 40 000 Kč za kW, pro případ našeho Plugpower elektrolyzérů budu brát cenu 33 000 Kč za kW. Vybraný elektrolyzér je PlugPower konkrétně Genfuel 1MW, tudíž pořizovací náklady budou 33 000 000 Kč k tomu připočteme cenu zásobníku vodíku 5 000 000 Kč. Výsledná cena elektrolyzérů včetně všeho nezbytně nutného pro provoz je tedy 38 000 000 Kč. [20]

Dále je potřeba počítat s provozními náklady (běžný roční servis, výměna iontoměničů), a ty se pohybují někde okolo 660 000 Kč. [20]

8.2.1.4 Čerpací stanice

V tomto řešení je denní kapacita vodíku zhruba 130 kg, dle výše zmíněné studie se pro tuto kapacitu náklady na technologii pohybují okolo 25 000 000 Kč. Na roční provoz je nutno počítat s 3-10 %

počátečních nákladů, pro výpočty použijí 6 % z investičních nákladů, tudíž za rok zaplatím za provoz 1 500 000 Kč. [20]

Uvádí se ovšem, že vlivem plánované většího počtu takovýchto stanic by se cena do roku 2025 měla výrazně snížit, optimistický scénář předpokládá se snížením investičních nákladů o 50 % při srovnání s rokem 2017. [20]

8.2.1.5 Zhodnocení celého vodíkového hospodářství

Hospodářství jako celek od výroby až po plnicí pistoli, kterou plníme nádrže autobusů.

Tabulka 11 Capex vodíkového hospodářství

CAPEX	Elektrolyzér	Čerpací stanice	FVE	Celkem
Pořizovací cena [Kč]	38 000 000	25 000 000	32 125 714	95 125 714
Pořizovací cena s dotací [Kč]	38 000 000	3 750 000	32 125 714	73 875 714

Je velká škoda, že neexistuje oficiálně vypsána dotace na elektrolyzér. Za určitých podmínek lze dotaci získat, nicméně jedná se o konkrétní projekt a individuální řešení dotace.

Tabulka 12 Opex vodíkového hospodářství

Opex	Elektrolyzér	Čerpací stanice	FVE	Celkem
Roční náklady [Kč]	660 000	1 500 000	—	2 160 000

V tabulce výše vidíme roční provozní náklady našeho vodíkového hospodářství.

8.2.1.5.1 Prostá návratnost

V této části bude vypočtena prostá návratnost celého projektu. V návrhu čerpací stanice bylo zjištěno, že pokud budu počítat 100 % dodávku vodíku přes letní špičku, budeme muset díky nedostatečné výrobě elektřiny navržené FVE dokoupit ještě 25 529 kg vodíku, abychom pokryli spotřebu všech deseti autobusů. Toto množství vodíku, s cenou 250 Kč za kilogram, nás ovšem bude stát 6 382 000 Kč. Tuto částku budeme muset připočítat k ročním provozním nákladům. Zisky z prodaného vodíku budeme potom počítat jako potřebných 48 000 kg potřebných pro provoz 10 autobusů vynásobených cenou 250 Kč za kilogram. Toto hodnocení bude počítáno s cenami po započtení dotace na čerpací stanici.

Tabulka 13 Prostá návratnost (přes letní špičku)

Rok	Provozní náklady [Kč]	Zisky z prodaného vodíku [Kč]	Návratnost [Kč]
1.	-8 542 000	12 000 000	-70 417 714
2.	-8 542 000	12 000 000	-66 959 714
3.	-8 542 000	12 000 000	-63 501 714
4.	-8 542 000	12 000 000	-60 043 714
5.	-8 542 000	12 000 000	-56 585 714

6.	-8 542 000	12 000 000	-53 127 714
7.	-8 542 000	12 000 000	-49 669 714
8.	-8 542 000	12 000 000	-46 211 714
9.	-8 542 000	12 000 000	-42 753 714
10.	-8 542 000	12 000 000	-39 295 714
11.	-8 542 000	12 000 000	-35 837 714
12.	-8 542 000	12 000 000	-32 379 714
13.	-8 542 000	12 000 000	-28 921 714
14.	-8 542 000	12 000 000	-25 463 714
15.	-8 542 000	12 000 000	-22 005 714
16.	-8 542 000	12 000 000	-18 547 714
17.	-8 542 000	12 000 000	-15 089 714
18.	-8 542 000	12 000 000	-11 631 714
19.	-8 542 000	12 000 000	-8 173 714
20.	-8 542 000	12 000 000	-4 715 714
21.	-8 542 000	12 000 000	-1 257 714
22.	-8 542 000	12 000 000	2 200 286
23.	-8 542 000	12 000 000	5 658 286
24.	-8 542 000	12 000 000	9 116 286
25.	-8 542 000	12 000 000	12 574 286

Investice se se nám vrátí 22. rok., po 25. letech bychom potom byli v 12 574 286 Kč v plusu. Je patrné, že velkou roli hraje cena dokoupeného vodíku, která v provozních nákladech činí výše zmíněných 6 382 000 Kč.

Další možností je nedokupovat vodík, ale dokoupit elektřinu pro elektrolyzátor. Zde ovšem narážíme na problém „zeleného vodíku“, elektřina pro výrobu musí být z obnovitelných zdrojů a pokud bychom dokupovali elektrickou energii ze sítě pomocí PPA smluv (zelenou), cena by byla výrazně vyšší než standartní cestou. Pro toto porovnání bude počítáno s cenou normální elektřiny ze sítě.

V tomto případě k provozním nákladům připočtu místo ceny za dokoupený vodík cenu elektrické energie pro provoz elektrolyzátoru při produkci 48 000 kg za rok. Z návrhu FVE víme, že je elektrolyzátor potřebuje 199 600 kWh za měsíc, aby vyrobil 4000 kg vodíku a v součtu ročně tedy potřebuje 2 385,2 MWh na výrobu autobusy spotřebovaných 48 000 kg vodíku. Naše fotovoltaická elektrárna nám dodá 1 121,3 MWh ročně, budeme tedy muset dokoupit 1 263,9 MWh. Při ceně 3 400 Kč za MWh bychom za dodanou elektrickou energii zaplatili 4 297 260 Kč. Tuto částku připočteme k provozním nákladům našeho vodíkového hospodářství, roční provozní náklady by se rovnaly částce 6 457 260 Kč, následně budeme opakovat postup z tabulky výše a zjistíme prostou návratnost této varianty.

Tabulka 14 Prostá návratnost (s nákupem elektřiny)

Rok	Provozní náklady [Kč]	Zisky z prodaného vodíku [Kč]	Návratnost [Kč]
1.	-6 457 260	12 000 000	-68 332 974
2.	-6 457 260	12 000 000	-62 790 234

3.	-6 457 260	12 000 000	-57 247 494
4.	-6 457 260	12 000 000	-51 704 754
5.	-6 457 260	12 000 000	-46 162 014
6.	-6 457 260	12 000 000	-40 619 274
7.	-6 457 260	12 000 000	-35 076 534
8.	-6 457 260	12 000 000	-29 533 794
9.	-6 457 260	12 000 000	-23 991 054
10.	-6 457 260	12 000 000	-18 448 314
11.	-6 457 260	12 000 000	-12 905 574
12.	-6 457 260	12 000 000	-7 362 834
13.	-6 457 260	12 000 000	-1 820 094
14.	-6 457 260	12 000 000	3 722 646
15.	-6 457 260	12 000 000	9 265 386
16.	-6 457 260	12 000 000	14 808 126
17.	-6 457 260	12 000 000	20 350 866
18.	-6 457 260	12 000 000	25 893 606
19.	-6 457 260	12 000 000	31 436 346
20.	-6 457 260	12 000 000	36 979 086
21.	-6 457 260	12 000 000	42 521 826
22.	-6 457 260	12 000 000	48 064 566
23.	-6 457 260	12 000 000	53 607 306
24.	-6 457 260	12 000 000	59 150 046
25.	-6 457 260	12 000 000	64 692 786

Toto řešení by bylo z pohledu investora mnohem výhodnější. Investice by se mu vrátila již 14. rok. a po 25. letech by byl 64 692 786 Kč v kladných číslech.

8.2.1.5.2 Diskontovaná návratnost

NPV bere v úvahu časovou hodnotu peněz a převádí budoucí peněžní toky na dnešní peníze s použitím požadované míry návratnosti danou investorem. Čistá současná hodnota investice je vypočtena dle vzorce:

$$NPV = -N_{inv} + \frac{V_1 - N_1}{1+i} + \frac{V_2 - N_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{V_n - N_n}{(1+i)^n} \quad [21]$$

kde: i = úroková (diskontní) sazba

n = počet let

V = odhadované příjmy

N = náklady na provoz

N_{inv} = investované náklady

Úroková sazba byla zvolena 7 %, příjmy a náklady jsou stejné jako u výpočtu prosté návratnosti. Dosazením příslušných hodnot do vzorce pro NPV vznikne následující tabulku:

Tabulka 15 Diskontovaná návratnost (přes letní špičku)

Rok	NPV	Rok	NPV
1.	-70 643 938	16.	-41 209 203
2.	-67 623 587	17.	-40 114 489
3.	-64 800 829	18.	-39 091 391
4.	-62 162 737	19.	-38 135 226
5.	-59 697 231	20.	-37 241 613
6.	-57 393 020	21.	-36 406 460
7.	-55 239 551	22.	-35 625 944
8.	-53 226 964	23.	-34 896 490
9.	-51 346 041	24.	-34 214 757
10.	-49 588 169	25.	-33 577 623
11.	-47 945 298	26.	-32 982 171
12.	-46 409 905	27.	-32 425 674
13.	-44 974 958	28.	-31 905 583
14.	-43 633 886	29.	-31 419 517
15.	-42 380 547	30.	-30 965 250

Z tabulky je patrné, že čistá současná hodnota investice ani po 30-ti letech nedosáhne kladných hodnot, což výrazně převyšuje běžně udávanou životnost komponent technologie.

„Optimistický scénář“

Zde bude počítáno s dotací 40 % na fotovoltaické panely a také s dotací 30 % na elektrolyzér. Dotace na FVE by za určitých podmínek šlo získat nicméně dotaci na elektrolyzér v současné době nikdo neposkytuje. Jak je však v této práci psáno několikrát tyto projekty jsou ve fázi rozvoje a podpory takovýchto projektů se pravděpodobně rozšiřovat, proto zde bude uvedena tabulka s diskontovaně návratnosti s těmito dvěma dotacemi

Tabulka 16 Diskontovaná návratnost "optimistický scénář" (letní špička)

Rok	NPV
1.	-46 393 652
2.	-43 373 301
3.	-40 550 543
4.	-37 912 451
5.	-35 446 945
10.	-25 337 883
15.	-18 130 261
20.	-12 991 327
25.	-9 327 337
30.	-6 714 964

Z tabulky je patrné, že ani s výše uvedenými vstupy se během třiceti let nepodaří dosáhnout kladné hodnoty NPV.

8.2.2 Hodnocení projektu přes zimní minimum

Zde budu hodnotit druhou možnost projektu, a to že v zimních minimech úhrnu pokryjeme 100 % spotřeby vodíku pro autobusy z elektřiny z FVE. V tomto řešení bude ve většině měsíců výrazná nadvýroba vodíku, který mohou v čerpací stanici čerpat osobní automobily, či ho při velkém přebytku budeme moci prodávat i někam jinam. Roční výroba elektřiny fotovoltaické elektrárny činí 12 687 MWh. Pro tento případ bude však nutné zvolit jiný elektrolyzátor, vybraný elektrolyzátor PlugPower Genfuel 1MW nebude stačit pro námi dodávaný proud. Vypočteme z něj měrné hodnoty a přepočteme pro naši dodávku proudu. Elektrolyzátor o stejných parametrech, jen s větší kapacitou výroby a výkonem nám dodá 261 919 kg vodíku ročně.

8.2.2.1 Základní parametry FVE

Tabulka 17 Parametry FVE (přes zimní minimum)

Sluneční osvit	
Max. dopadající sluneční záření [kW/m ²]	1,00
Průměrné zář. - PVGIS [kWh/m ² /rok]	744,00
FVE	
Plocha panelů [m ²]	93 019,79
Účinnost FVE [%]	0,18
úč. Modulu [%]	0,20
úč. Střídače [%]	0,95
úč. Transformátoru [%]	0,97
úč. Rozvodů [%]	0,99
Výkon a výroba	
Výkon FVE [kW]	17 099,40
Výroba elektřiny [MWh/rok]	12 721,96

Budu počítat opět s průměrnou cenou 30 000 Kč za kWp. V tom případě by naše fotovoltaická elektrárna stála 363 457 143 Kč.

8.2.2.2 Cena elektrolyzátoru

V tomto případě budeme muset mít zhruba 10x větší elektrolyzátor, protože vyrobíme přibližně 10x tolik elektrického proudu. Tudíž náš elektrolyzátor bude mít při podobné dimenzaci výkon 10 MW. Pro výpočet budu brát stejnou cenu za kW, 33 000 Kč. Pořizovací náklady budou tedy činit 330 000 000 Kč. K ceně připočteme cenu zásobníků, v tomto řešení bude odpovídat zhruba 50 000 000, následně tyto dvě čísla sečteme a dostaneme pořizovací náklady, které činí 380 000 000 Kč. V podstatě je přepočten elektrolyzátor z minulého případu měrně na tuto mnohem větší aplikaci.

Dále je potřeba počítat s provozními náklady (běžný roční servis, výměna iontoměničů), a ty se pohybují někde okolo 6 600 000 Kč. [20]

8.2.2.3 Čerpací stanice

Pro kapacitu téměř 720 kg vodíku denně (využití veškerého proudu z FVE) se bude cena čerpací stanice pohybovat okolo 140 000 000 Kč. Na roční provoz je opět nutno počítat s 3-10 % počátečních nákladů, pro výpočty znovu zvolím 6 % z investičních nákladů, tudíž za rok zaplatím za provoz 8 400 000 Kč. Na výstavbu vodíkových plnicích stanic je možné získat již zmíněnou dotaci až do výše 85 % nákladů. [20]

8.2.2.4 Zhodnocení celého vodíkového hospodářství

Hospodářství jako celek od výroby až po pistoli, kterou plníme nádrže autobusů.

Tabulka 18 Capex vodíkového hospodářství (přes zimní minimum)

CAPEX	Elektrolyzér	Čerpací stanice	FVE	Celkem
Požizovací cena [Kč]	380 000 000	140 000 000	363 457 143	883 457 143
Požizovací cena s dotací [Kč]	380 000 000	21 000 000	363 457 143	764 457 143

V tomto případě je sleva díky dotaci velice výrazná.

Tabulka 19 Opex vodíkového hospodářství (přes zimní minimum)

Opex	Elektrolyzér	Čerpací stanice	FVE	Celkem
Roční náklady [Kč]	6 600 000	8 400 000	—	15 000 000

V tabulce výše vidíme roční provozní náklady našeho vodíkového hospodářství.

8.2.2.4.1 Prostá návratnost

Nejprve bude opět určena prostá návratnost. Investiční náklady této varianty jsou 764 457 143 Kč.

Tabulka 20 Prostá návratnost (přes zimní minimum)

Rok	Provozní náklady [Kč]	Zisky z prodaného vodíku [Kč]	Návratnost [Kč]
1.	-15 000 000	65 479 750	-713 977 393
2.	-15 000 000	65 479 750	-663 497 643
3.	-15 000 000	65 479 750	-613 017 893
4.	-15 000 000	65 479 750	-562 538 143
5.	-15 000 000	65 479 750	-512 058 393
6.	-15 000 000	65 479 750	-461 578 643
7.	-15 000 000	65 479 750	-411 098 893
8.	-15 000 000	65 479 750	-360 619 143
9.	-15 000 000	65 479 750	-310 139 393
10.	-15 000 000	65 479 750	-259 659 643
11.	-15 000 000	65 479 750	-209 179 893
12.	-15 000 000	65 479 750	-158 700 143
13.	-15 000 000	65 479 750	-108 220 393
14.	-15 000 000	65 479 750	-57 740 643
15.	-15 000 000	65 479 750	-7 260 893
16.	-15 000 000	65 479 750	43 218 857

17.	-15 000 000	65 479 750	93 698 607
18.	-15 000 000	65 479 750	144 178 357
19.	-15 000 000	65 479 750	194 658 107
20.	-15 000 000	65 479 750	245 137 857
21.	-15 000 000	65 479 750	295 617 607
22.	-15 000 000	65 479 750	346 097 357
23.	-15 000 000	65 479 750	396 577 107
24.	-15 000 000	65 479 750	447 056 857
25.	-15 000 000	65 479 750	497 536 607

Z této tabulky je patrné, že investice by se nám vrátila po šestnácti letech.

8.2.2.4.2 Diskontovaná návratnost

Zde je počítáno stejným způsobem, jako v předchozím případě hodnocení čisté současné hodnoty investice.

Tabulka 21 Diskontovaná návratnost (přes zimní minimum)

Rok	NPV	Rok	NPV
1.	-707 279 807	16.	-277 592 683
2.	-663 188 838	17.	-261 612 087
3.	-621 982 325	18.	-246 676 951
4.	-583 471 566	19.	-232 718 879
5.	-547 480 201	20.	-219 673 952
6.	-513 843 413	21.	-207 482 432
7.	-482 407 161	22.	-196 088 488
8.	-453 027 487	23.	-185 439 942
9.	-425 569 848	24.	-175 488 030
10.	-399 908 503	25.	-166 187 178
11.	-375 925 937	26.	-157 494 792
12.	-353 512 324	27.	-149 371 067
13.	-332 565 023	28.	-141 778 801
14.	-312 988 105	29.	-134 683 226
15.	-294 691 921	30.	-128 051 846

Z tabulky je opět patrné, že čistá současná hodnota investice po 30-ti letech nedosáhne kladných hodnot.

„Optimistický scénář“

Zde bude počítáno se stejně upravenými vstupy jako v případě „optimistického scénáře“ analýzy projektu přes letní špičku. A to sice s dotací 40 % na FVE a 30 % na elektrolyzér.

Tabulka 22 Diskontovaná návratnost "optimistický scénář" (zimní minimum)

Rok	NPV
1.	-457 896 950

2.	-413 805 981
3.	-372 599 468
4.	-334 088 709
5.	-298 097 344
10.	-150 525 646
15.	-45 309 064
20.	29 708 905
25.	83 195 679
30.	121 331 011

V této tabulce je patrné výrazné zlepšení diskontované návratnosti. Již před dvacátým rokem investice bychom dosáhli kladných hodnot NPV a po třiceti letech by tato hodnota nabývala výše + 121 331 011 Kč.

8.3 Citlivostní analýza

V citlivostní analýze bude zjištěno, jak by se změnila návratnost projektu, pokud by se změnili vstupní parametry. Konkrétně je citlivost řešena v oblasti investice do projektu, protože zde je pravděpodobně možné získat nějakou dodatečnou dotaci, a také je velmi pravděpodobná změna cen použitých komponentů v podobných projektech. Dále je řešena změna nákladů opex, a v neposlední řadě diskontní sazba. U všech parametrů je provedena změna hodnot o + 20 % a následně o -20 %.

8.3.1 Přes letní maximum

Změna investice o +20 %

Tabulka 23 Změna investice +20 %

Rok	NPV
1.	-81 540 949
2.	-78 520 598
3.	-75 697 840
4.	-73 059 748
5.	-70 594 242
10.	-60 485 180
15.	-53 277 558
20.	-48 138 624
25.	-44 474 634
30.	-41 862 261

Změna investice o -20 %

Tabulka 24 Změna investice -20 %

Rok	NPV
1.	-53 283 374
2.	-50 263 023
3.	-47 440 265
4.	-44 802 173
5.	-550 973 021
10.	-32 227 605
15.	-25 019 983
20.	-19 881 049
25.	-16 217 059
30.	-13 604 686

Změna opex o +20 %

Tabulka 25 Změna opex +20 %

Rok	NPV
1.	-72 240 574
2.	-70 712 405
3.	-69 284 211
4.	-67 949 449
5.	-66 702 009
10.	-61 587 256
15.	-57 940 508
20.	-55 340 427
25.	-53 486 605
30.	-52 164 856

Změna opex o -20 %

Tabulka 26 Změna opex -20 %

Rok	NPV
1.	-69 047 303
2.	-64 534 769
3.	-60 317 448
4.	-56 376 026
5.	-52 692 454
10.	-37 589 082
15.	-26 820 587
20.	-19 142 799
25.	-13 668 642
30.	-9 765 644

Změna diskontní sazby na 4 %

Tabulka 27 Změna diskontní sazby na 4 %

Rok	NPV
1.	-70 550 714
2.	-67 353 599
3.	-64 279 449
4.	-61 323 536
5.	-58 481 312
10.	-45 828 236
15.	-35 428 330
20.	-26 880 365
25.	-19 854 562
30.	-14 079 863

Změna diskontní sazby na 10 %

Tabulka 28 Změna diskontní sazby na 10 %

Rok	NPV
1.	-70 732 078
2.	-67 874 226
3.	-65 276 180
4.	-62 914 319
5.	-60 767 173
10.	-52 627 801
15.	-47 573 891
20.	-44 435 811
25.	-42 487 310
30.	-41 277 444

8.3.1.1 Hodnocení

V tabulkách lze vidět, že největší rozdíl v návratnosti způsobila změna provozních nákladů. V případě snížení provozních nákladů o 20 % by čistá současná hodnota investice nabývala – 9765 644 Kč oproti původně vypočteným – 30 965 250 Kč. Naopak zvýšením provozních nákladů by se radikálně snížila NPV hodnota investice.

8.3.2 Přes zimní minimum

Změna investice o +20 %

Tabulka 29 Změna opex +20 %

Rok	NPV
1.	-870 171 236
2.	-826 080 267
3.	-784 873 754
4.	-746 362 995
5.	-710 371 630
10.	-562 799 932
15.	-457 583 350
20.	-382 565 381
25.	-329 078 607
30.	-290 943 275

Změna opex o +20 %

Tabulka 31 Změna opex +20 %

Rok	NPV
1.	-710 083 545
2.	-668 612 892
3.	-629 855 273
4.	-593 633 199
5.	-559 780 794
10.	-420 979 247
15.	-322 015 663
20.	-251 455 995
25.	-201 147 927
30.	-165 278 970

Změna diskontní sazby na 4 %

Tabulka 33 Změna diskontní sazby na 4 %

Rok	NPV
1.	-705 918 922
2.	-659 247 555
3.	-614 371 241
4.	-571 220 940
5.	-547 480 201
10.	-345 021 152
15.	-193 203 725
20.	-68 420 867
25.	34 141 547
30.	118 440 375

Změna investice o -20 %

Tabulka 30 Změna opex -20 %

Rok	NPV
1.	-564 388 378
2.	-520 297 409
3.	-479 090 896
4.	-440 580 137
5.	-404 588 772
10.	-257 017 074
15.	-151 800 492
20.	-76 782 523
25.	-23 295 749
30.	14 839 583

Změna opex o -20 %

Tabulka 32 Změna opex -20 %

Rok	NPV
1.	-704 476 068
2.	-657 764 783
3.	-614 109 377
4.	-573 309 932
5.	-535 179 609
10.	-378 837 758
15.	-267 368 179
20.	-187 891 910
25.	-131 226 428
30.	-90 824 723

Změna diskontní sazby na 10 %

Tabulka 34 Změna diskontní sazby na 10 %

Rok	NPV
1.	-708 566 461
2.	-666 847 660
3.	-628 921 476
4.	-594 443 128
5.	-563 099 175
10.	-444 280 932
15.	-370 504 151
20.	-324 694 575
25.	-296 250 432
30.	-278 588 857

8.3.2.1 Hodnocení

V tomto případě měla největší dopad změna diskontní sazby na 4 %, kde je z tabulek patrné, že čistá současná hodnota nabývá kladných čísel již 25. rok a po třiceti letech je hodnota + 118 440 375 Kč. Další významnou změnou bylo snížení investice o 20 %, zde je čistá současná hodnota investice po třiceti letech také kladná. Při snížení provozních nákladů v tomto řešení nenastala tak velká změna, tyto výsledky jsou pravděpodobně způsobeny hlavně velkými finančními toky (příjmy a náklady na provoz).

9 Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval nejprve popisem vodíku, konkrétně zeleného. Na základě literární rešerše následně popisoval vodík jako takový, výrobu, možné využití, skladování a také využití odpadního produktu (kyslíku). V rešeršní části jsem také detailněji popsal jednotlivé typy elektrolyzy. Dále jsem provedl návrh čerpací stanice pro 10 autobusů městské hromadné dopravy. Nejprve bylo zapotřebí navrhnout fotovoltaické panely, které vyrábějí proud pro elektrolyzér. K tomuto jsem přistoupil dvěma možnými způsoby. První způsob bylo navržení FVE pro maximální letní sluneční svit, principiálně šlo o to, že v tomto letním maximu bude dostatek elektřiny pro výrobu veškerého potřebného proudu pro elektrolyzér takového, aby vyrobený vodík pokryl spotřebu autobusů. Druhým způsobem bylo navržení FVE pro minimální zimní sluneční svit. Zde byl použit stejný princip, avšak vstupní parametr byl pokrytí vlastní výrobou vodíku spotřebu autobusů v zimní minimu výroby elektřiny. Výsledkem byla plocha fotovoltaických panelů očekávaná výroba vodíku v kilogramech. Benzínku jsem umístil na strategické místo na okraji Hradce Králové.

Dále jsem řešil ekonomické zhodnocení obou těchto variant, kdy se ani u jedné z těchto variant nepodařilo dostat do kladných čísel v hodnocení NPV. Vycházel jsem však ze zprůměrovaných hodnot z různých studií a hodnoty jako je například cena vodíku, cena čerpací stanice či převážně provoz autobusů se v dohledaných zdrojích velmi lišili. Ceny potřebné pro tento projekt jsou v této době velice volatilní, což je způsobeno pravděpodobně tím, že zelený vodík je teprve ve svém rozvoji a s přibývajícimi aplikacemi se ceny sníží a ustálí.

V citlivostní analýze bylo zjištěno, že u menší aplikace (přes letní špičku) je diskontovaná návratnost projektu citlivá převážně na změnu provozních nákladů, nicméně ani při snížení opex nákladů o 20 % se nepodařilo dosáhnout kladné hodnoty NPV do třiceti let od investice. U větší aplikace (přes zimní minimum) bylo patrné, že NPV hodnota je nejcitlivější na zvolenou hodnotu diskontní sazby a také snížení počáteční investice, změna provozních nákladů zde nehrála tak velkou roli jako v aplikaci menší, a to pravděpodobně díky velkým ročním finančním tokům. Při změně diskontní sazby ze 7 % na 4 % jsem se dostali na kladnou hodnotu NPV před 25. rokem od investice a při snížení investice o 20 % jsem dostal kladnou hodnotu NPV třicátý rok. Je zde však kolize s životností daných komponent, která se například u FVE pohybuje někde okolo dvaceti let.

Dle dohledaných informací se předpokládá výrazné snížení například ceny vodíku v nejbližších letech. Je však nutné poznamenat, že snížení ceny za kilogram vodíku bude mít negativní dopad na NPV, a to sice pro provozovatele vodíkového hospodářství, nicméně naopak pro provozovatele vodíkových autobusů by snížení cen znamenalo změnu pozitivní. Momentálně se tedy dle zjištěných hodnot investice do vodíkového hospodářství nevyplatí, nicméně v nejbližší budoucnosti může být situace podstatně jiná.

Závěrem bych shrnul, že zelený vodík je zajímavou alternativou ke stávajícímu energetickému mixu, může sloužit jako uchování energie z obnovitelných zdrojů, nicméně větší potenciál vidím v jeho aplikaci v dopravě. Autobusy městské hromadné, silniční nákladní doprava a v neposlední řadě také lodní a letadlová doprava, to jsou oblasti kde by zelený vodík mohl pomoci k našim cílům snižování uhlíkové stopy a zachování vlastností spalovacích pohonů jako jsou rychlé doplnění paliva či rozumně dlouhý dojezd.

10 Citovaná literatura

- [1] O. Pelán, „VÝROBA VODÍKU ELEKTROLÝZOU,“ 2017. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150073. [Přístup získán 23 listopad 2021].
- [2] „web.vscht.cz,“ prosinec 2007. [Online]. Available: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>.
- [3] Siemens, „Silyzer 300,“ [Online]. Available: <https://new.siemens.com/content/dam/internet/siemens-com/global/products-services/energy/renewable-energy/hydrogen-solutions/silyzer/>. [Přístup získán 9 leden 2022].
- [4] PLUGPOWER.COM, „Product specifications (system),“ Plugpower, Latham, 2020.
- [5] Hydrogenics, 25 říjen 2018. [Online]. Available: https://klasterwodorowy.pl/images/pliki/aktualnosc_15_11_2018/hydrogenics.pdf. [Přístup získán 12 2 2022].
- [6] S. Mannan, Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Texas: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [7] J. Drobný, „hydro race,“ 10 říjen 2019. [Online]. Available: <https://hydro-race.eu/Skladov%C3%A1n%C3%AD-vod%C3%ADku?highlight=Skladov%C3%A1n%C3%AD-od%C3%ADku>. [Přístup získán 8 leden 2022].
- [8] P. a. J. L. Dlouhý, „Transport a skladování vodíku,“ 17 květen 2007. [Online]. Available: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/transport-a-skladovani-vodiku/618-i>. [Přístup získán 12 únor 2022].
- [9] „devinn,“ 16 srpen 2019. [Online]. Available: <https://www.devinn.cz/blog/skladovani-vodiku/>. [Přístup získán 15 únor 2022].
- [10] [Online]. Available: <http://cz.cncdstoragetank.com/cryogenic-liquid-tank/liquid-oxygen-tank/popular-hospital-usage-cryogenic-liquid.html>.
- [11] „tuvsud,“ TÜV SÜD CZECH, 2021. [Online]. Available: <https://www.tuvsud.com/cs-cz/odvetvi/energetika/konvencni-energie/vodikova-energie>. [Přístup získán 30 listopad 2021].
- [12] CALIFORNIA FUEL CELL PARTNERSHIP, „COSTS AND FINANCING,“ [Online]. Available: <https://h2stationmaps.com/costs-and-financing>. [Přístup získán 16 únor 2022].
- [13] *PVGIS Photovoltaic Geographical Information System*, European Commission website.
- [14] ÚJV Řež, a. s., „Technicko-ekonomické posouzení,“ duben 2020. [Online]. Available: https://www.kr-ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1748691. [Přístup získán 28 leden 2022].

- [15] J. Sůra, „Praha koupí od SOR dalších 50 autobusů, zveřejnila ceny za miliardový kontrakt,“ 26 září 2017. [Online]. Available: <https://zdopravy.cz/praha-koupi-od-sor-dalsich-50-autobusu-zverejnili-ceny-za-miliardovy-kontrakt-2256/>. [Přístup získán 29 březen 2022].
- [16] „SOR NBG,“ SOR Libchavy spol. s r.o, Libchavy.
- [17] pmdp, „Dotaz č. 3,“ pmdp.cz.
- [18] L. Hinčica, „Československý dopravák,“ 5 červen 2019. [Online]. Available: <https://www.cs-dopravak.cz/2019-6-5-prvn-zkaznk-pro-vodkov-autobusy-od-solarisu/>. [Přístup získán 27 duben 2022].
- [19] „Dopravní podnik ostrava,“ duben 2021. [Online]. Available: <https://www.dpo.cz/pro-cestujici/aktuality/novinky/5421-vodikove-autobusy-v-roce-2023.html>. [Přístup získán 18 květen 2022].
- [20] Zprávy a informace ČKAIT, „Dotace pro vodíkové čerpací stanice,“ 22 duben 2020. [Online]. Available: <http://zpravy.ckait.cz/vydani/2020-02/dotace-pro-vodikove-cerpaci-stance/>. [Přístup získán 24 květen 2022].
- [21] „Cashbot,“ 24 únor 2022. [Online]. Available: <https://cashbot.cz/blog/hodnoceni-investic-pomoci-ciste-soucasne-hodnoty-net-present-value/>. [Přístup získán 26 květen 2022].
- [22] Google, „Google maps,“ Google.
- [23] Hejl Servis, „enviweb,“ 30 květen 2021. [Online]. Available: <https://www.enviweb.cz/119182>. [Přístup získán 18 květen 2022].

11 Seznam obrázků

1 Schéma elektrolýzy s alkalickým elektrolytem [2].....	12
2 Schéma elektrolýzy s polymerní membránou [2].....	12
3 Schéma parní elektrolýzy [2]	13
4 Silyzer 300 Hydrogen Generation Systém [3].....	15
5 Plug Power – Giner 30S, 60S nebo Plug Power Hydrogen Generation Systém [4]	15
6 Hydrogenics [5].....	16
7 Srovnání stejného množství vodíku při různém provozním tlaku [7].....	17
8 Princip absorbce/desorbce vodíku do struktury kovu a vznik metalhydridu [7]	17
9 Skladovací nádrž na kapalný kyslík [10].....	18
10 Schéma benzínky [12].....	21
11 Úhrn záření po měsících z PVGIS [13].....	25
12 Úhrn záření v průběhu dne z PVGIS [13]	25
13 Mapa areálu [14]	26
14 Příklad hlavních komponent vodíkového autobusu od výrobce Van Hool [15]	27
15 Schéma palivového článku [15].....	28

12 Seznam tabulek

Tabulka 1 Porovnání metod elektrolýzy	14
Tabulka 2 Produkce kWh (přes letní špičku)	22
Tabulka 3 Produkce vodíku (přes letní špičku)	22
Tabulka 4 Produkce kW/m ² v průběhu dne	23
Tabulka 5 Produkce kWh (přes zimní minimum)	23
Tabulka 6 Produkce vodíku (přes zimní minimum)	24
Tabulka 7 Specifikace elektrolyzérou PlugPower	27
Tabulka 8 Capex autobusy	29
Tabulka 9 Opex autobusy	30
Tabulka 10 Parametry FVE (přes letní letní špičku)	31
Tabulka 11 Capex vodíkového hospodářství	32
Tabulka 12 Opex vodíkového hospodářství	32
Tabulka 13 Prostá návratnost (přes letní špičku)	32
Tabulka 14 Prostá návratnost (s nákupem elektřiny)	33
Tabulka 15 Diskontovaná návratnost (přes letní špičku)	35
Tabulka 16 Diskontovaná návratnost "optimistický scénář" (letní špička)	35
Tabulka 17 Parametry FVE (přes zimní minimum)	36
Tabulka 18 Capex vodíkového hospodářství (přes zimní minimum)	37
Tabulka 19 Opex vodíkového hospodářství (přes zimní minimum)	37
Tabulka 20 Prostá návratnost (přes zimní minimum)	37
Tabulka 21 Diskontovaná návratnost (přes zimní minimum)	38
Tabulka 22 Diskontovaná návratnost "optimistický scénář" (zimní minimum)	38
Tabulka 23 Změna investice +20 % Tabulka 24 Změna investice -20 %	39
Tabulka 25 Změna opex +20 % Tabulka 26 Změna opex -20 %	40
Tabulka 27 Změna diskotní sazby na 4 % Tabulka 28 Změna diskotní sazby na 10 %	40
Tabulka 29 Změna opex +20 % Tabulka 30 Změna opex -20 %	41
Tabulka 31 Změna opex +20 % Tabulka 32 Změna opex -20 %	41
Tabulka 33 Změna diskotní sazby na 4 % Tabulka 34 Změna diskotní sazby na 10 %	41