

ATHOS

**Softwarový nástroj pro simulaci
energetických bilancí a ekonomiky provozu
technologií na výrobu elektrické energie,
vodíku a souvisejících energetických komodit**

Návod a obecné informace o technologiích a zdrojích pro výrobu vodíku

duben 2023

Obsah

Popis a návod k aplikaci ATHOS	5
1. Výběr požadovaného energetického výstupu	5
2. Výběr zdrojů energie pro výrobu vodíku	6
3. Informace o pozemku pro instalaci FVE.....	7
4. Zadání parametrů fotovoltaické elektrárny	8
5. Zadání parametrů větrné turbíny.....	9
6. Zadání parametrů vodíkových technologií	10
7. Výstupní komodity.....	10
8. Pořizovací cena a roční provozní náklady zařízení na výrobu H ₂	13
9. Vstupní komodity pro výrobu H ₂	14
10. Financování.....	17
11. Projektová rozvaha	18
Obecný přehled vodíkových technologií	22
1. Technické a fyzikální vlastnosti vodíku.....	22
1.1. Vliv vodíku na kovové materiály.....	23
1.2. Chování vodíku při změně tlaku	24
2. Rozdělení vodíku podle emisní stopy při jeho výrobě	24
3. Výroba vodíku.....	26
3.1. Roční spotřeba vodíku ve světě.....	26
3.2. Roční produkce vodíku v ČR	27
3.3. Způsoby výroby vodíku.....	27
3.3.1 Parní reforming.....	28
3.3.2 Parciální oxidace (POX).....	29
3.3.3 Pyrolýza metanu	29
3.3.4 Srovnání různých způsobů výroby vodíku	30
4. Výroba vodíku pomocí elektrolýzy	31
4.1. PEM elektrolýzery.....	32
4.2. Elektrolýzery vysokoteplotní	33
4.3. Úprava vstupní vody pro elektrolýzery	33
4.3.1 Filtrační a demineralizační zařízení pro čištění vody.....	33
4.3.2 Zásobníky technologické vody.....	34
4.4. Tepelné hospodářství elektrolýzérů.....	34
4.5. Vybrané příklady dostupných elektrolýzérů na trhu	35
4.5.1 Siemens Silyzer 300	35

4.5.2	Elogen ELYTE 260.....	37
4.5.3	H-TEC SYSTEMS HCS 10 MW	38
4.6.	Současná měrná cena elektrolyzérů.....	39
5.	Skladování vodíku	39
5.1.	Příklady komerčních tlakových nádob.....	41
5.1.1	Ocelové tlakové nádoby	41
5.1.2	Kompozitní zásobník vodíku	42
5.2.	Současné ceny skladovacích zařízení pro vodík	43
6.	Přeprava vodíku.....	44
6.1.	Přeprava vodíku plynovody	44
6.2.	Doprava stlačeného vodíku po silnici či železnici	45
6.3.	Přeprava kapalného vodíku po silnici či železnici.....	45
6.4.	Doprava vodíku plynovody ve směsi se zemním plynem.....	45
6.4.1	Oddělení vodíku od směsi se zemním plynem s využitím membránové separace	46
7.	Kompresce vodíku	46
7.1.	Vysokotlaké kompresory vhodné pro plnicí stanice.....	46
7.1.1	Kompresory Mehrer řady MRX1300/MHX1300.....	46
7.1.2	Hiperbaric – Kompresní stanice „Puertollano Hydrogen Station“	47
7.2.	Středotlaké kompresory vhodné pro plnění trailerů	47
7.2.1	Mehrer MHE 400-22Ex	47
7.3.	Nízkotlaké kompresory vhodné pro plnění velkoobjemových zásobníků.....	48
7.3.1	Atlas Copco 1 EHN2 GT.....	48
8.	Využití vodíku	49
8.1.	Využití vodíku v průmyslu.....	49
8.1.1	Výroba amoniaku	49
8.1.2	Výroba metanolu.....	49
8.1.3	Výroba oceli.....	50
8.2.	Doprava	50
8.2.1	Dálková letecká doprava	51
8.2.2	Dálková lodní doprava.....	52
8.3.	Zařízení pro výrobu elektrické energie z vodíku.....	52
8.3.1	Vodíkové elektrocentrály	52
8.3.2	Vodíkové zdroje záložního napájení.....	53
8.3.3	Elektrické generátory na lodích.....	53
8.3.4	Vodíkové kogenerační jednotky	53
9.	Kyslík jako vedlejší produkt elektrolýzy	54

9.1.	Využití kyslíku ve zdravotnictví.....	55
9.2.	Využití kyslíku ve vodárenství.....	55
9.3.	Kyslíkem obohacené spalování.....	55
9.4.	Cena kyslíku na trhu	56
9.5.	Průmyslová výroba kyslíku	56
10.	Odpadní teplo z vodíkových technologií.....	57
10.1.	Využití odpadního tepla z elektrolýzy.....	57
10.2.	Teplo z komprese vodíku.....	58
	Zdroje energie pro výrobu vodíku pomocí elektrolýzy	59
1.	Fotovoltaické elektrárny	59
1.1.	Výpočtové modely pro návrh fotovoltaických elektráren.....	59
1.1.1	PVGIS	59
1.1.2	Solar Pro	60
1.1.3	Webové aplikace pro určení polohy slunce.....	60
1.2.	Solární mapa ČR.....	62
1.3.	Možnosti umístění fotovoltaických elektráren	63
1.4.	Nejvýkonnější fotovoltaické panely na trhu.....	64
1.4.1	Yolywood JW-HD132N.....	64
1.4.2	HUASUN Himalaya G12 – DS700	65
1.5.	Vývoj ceny fotovoltaických článků	65
1.6.	Současná měrná cena fotovoltaických elektráren	66
2.	Větrné elektrárny.....	66
2.1.	Větrné elektrárny v ČR	67
2.2.	Příklad obvyklých typů elektráren.....	68
2.2.1	Enercon E-82 E2 2.300.....	68
2.2.2	Vestas V90 2MW	69
2.3.	Největší současné větrné elektrárny	69
2.3.2	GE Haliade-X 14MW	70
2.4.	Současná měrná cena větrných elektráren	70
3.	Napájení ze sítě.....	71
3.1.	Podíl paliv na energetickém mixu ČR	71
3.2.	Emisní stopa při výrobě vodíku z energetického mixu ČR.....	71
	Seznam obrázků	72
	Seznam tabulek.....	73
	Reference.....	74

Popis a návod k aplikaci ATHOS

Aplikace Athos je navržena pro hrubý výpočet energetického potenciálu fotovoltaických a větrných elektráren na dostupných plochách, které jsou vyčleněny pro energetické účely, popřípadě určeny k multifunkčnímu využití plochy pro energetické i zemědělské účely například pomocí principů tzv. agrovoltaiky.

K výpočtu potenciálu výroby fotovoltaiky je nutné zadat plochu a souřadnice dostupného pozemku, účinnost použitých FV panelů, sklon panelů a tzv. návrhový úhel, který prakticky určuje odstup jednotlivých řad FV polí instalovaných na volné ploše. Předpokládá se čistě jižní orientace. Při vyšší hustotě instalace je uvažováno s možností stínění jednotlivých řad panelů, které může nastávat zejména v zimních měsících.

Při odhadu výroby VE jsou zadány souřadnice místa instalace a instalovaný výkon jedné, nebo více větrných elektráren, které jsou instalovány v okolí zadaných souřadnic.

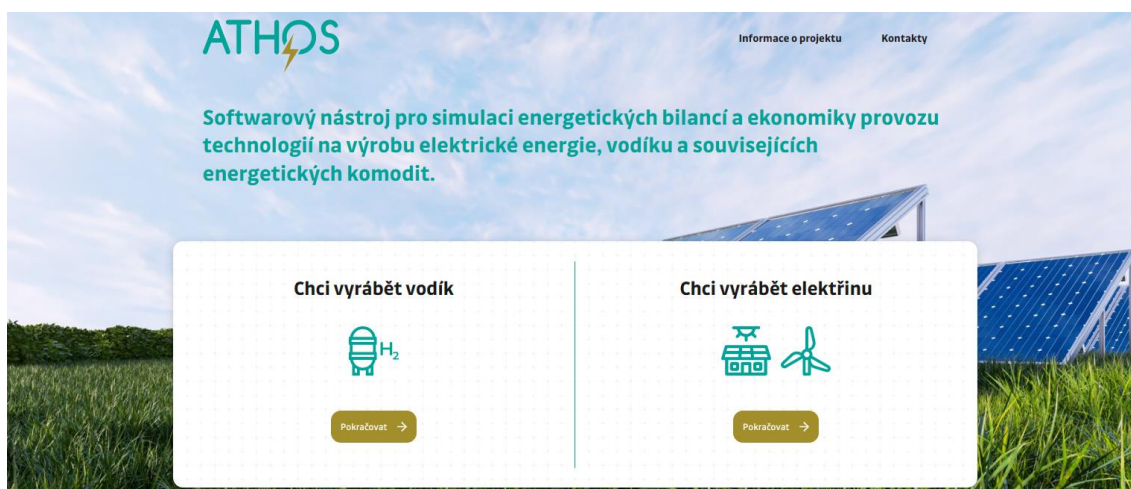
Vyrobená elektrická energie v případě potřeby i společně s energií z elektrické sítě je následně využívána k výrobě vodíku. Při produkci vodíku, jsou uvažovány účinnosti výroby i komprese vodíku.

Při výrobě vodíku vznikají „odpadní“ produkty, které je ale z velké části možné užitečně využít. Mezi tyto produkty patří kyslík a také teplo vznikající při elektrolýze i kompresi. Tyto produkty však obvykle není možné plně využít, a proto jsou ve výpočtech také uvažovány předpokládané koeficienty využití.

1. Výběr požadovaného energetického výstupu

Jednou z možností využití vlastních obnovitelných zdrojů je výroba elektřiny pro pokrytí vlastní spotřeby a dodávku do sítě. V případě potřeby, je možné vyrobenou elektřinu využít k výrobě vodíku.

Postupy výpočtů se podle požadovaných energetických výstupů částečně liší, a proto je potřeba vybrat režim výpočtu. Popis zadávaných vstupů a získaných výstupu je ale téměř shodný, proto budou dále popsány jen položky v režimu výpočtu „Chci vyrábět vodík“.



Obr. 1 - Výběr režimu výpočtu

2. Výběr zdrojů energie pro výrobu vodíku

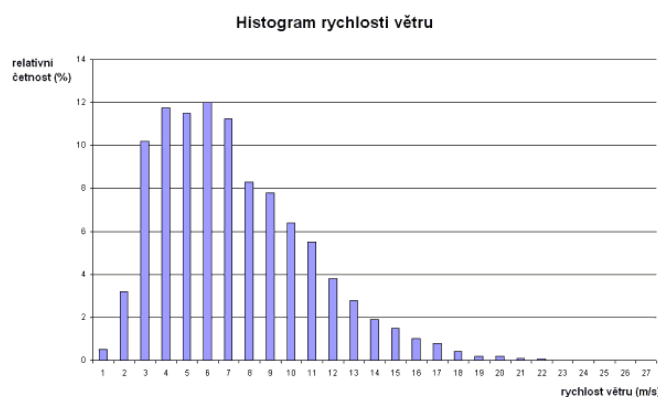
K lokální výrobě elektrické energie jsou nejnázne využitelné fotovoltaické a větrné elektrárny. Je potřeba ale respektovat popřípadě kompenzovat jejich z principu proměnlivý výkon. K tomuto účelu se nejčastěji používá elektrická distribuční síť. Její kapacita je v současnosti dostatečná na to aby bylo možné kdykoli nahradit výpadek vlastních zdrojů. S rostoucím podílem OZE v síti, v podmínkách ČR tedy především FVE a VE je pravděpodobné, že záložní kapacita sítě nebude dostatečná, a proto bude výhodné či dokonce nezbytné modulovat výrobu vodíku pouze podle výroby vlastních zdrojů.

Základní algoritmus výpočtů aplikace Athos předpokládá možnost neomezené dodávky či odběru energie z distribuční sítě tak aby byla využita veškerá výroba vlastních zdrojů a zároveň bylo vyrobeno požadované množství vodíku. Zároveň se ale předpokládá, že výkon elektrolyzéry je modulován především podle aktuální výroby a také podle ceny nakupované energie z distribuční sítě. Tímto způsobem řízení může být dosaženo maximálně ekonomického provozu a také stabilizačního efektu elektrické sítě, protože okamžitá cena nakupované energie odpovídá její faktické dostupnosti. Nízká cena tedy signalizuje dostatek energie v síti a naopak vysoká cena představuje nedostatek energie, který vyžaduje aktivaci záložních zdrojů. Provoz elektrolyzérů v době nedostatku energie v síti proto není ekonomicky ani energeticky výhodný.

V případě nemožnosti zálohy distribuční sítě, bude teoreticky vhodné dimenzovat příkon elektrolyzéry na hodnotu blízkou špičkovému výkonu vlastních zdrojů, tak aby mohla být využita veškerá výroba. V tomto případě by ale bylo využití instalovaného výkonu elektrolyzéry příliš nízké, a proto bude prakticky nutné provést redukci instalovaného příkonu elektrolyzéry, tak aby cena elektrolyzéry byla přijatelná, a zároveň nedocházelo k významným ztrátám vyrobené energie vlivem nemožnosti využití špičkové výroby vlastních zdrojů energie.

Jako příklad redukce využitelnosti vlastní výroby FVE v případě, že není možná dodávka do sítě, je možné uvést výsledky simulací pomocí aplikace PVGIS. Při instalaci elektrolyzéry s výkonem 2/3 špičkového výkonu FVE nebude pro výrobu vodíku využito 24% vyrobené energie, a při instalaci elektrolyzéry s výkonem 1/3 špičkového výkonu FVE nebude pro výrobu vodíku využito 45% vyrobené energie.

Redukce výroby větrné elektrárny závisí na četnosti výskytu různých rychlostí větru v konkrétní lokalitě a také na výkonové charakteristice použité větrné elektrárny. Nelze zde proto uvést ani orientační hodnoty redukce využití výroby, nicméně jako základní úvod do problematiky je možné uvést obecný histogram rychlosti větru, který naznačuje, že vyšší rychlosti větru jsou méně časté, a proto je částečná redukce výkonu elektrolyzéry možná.

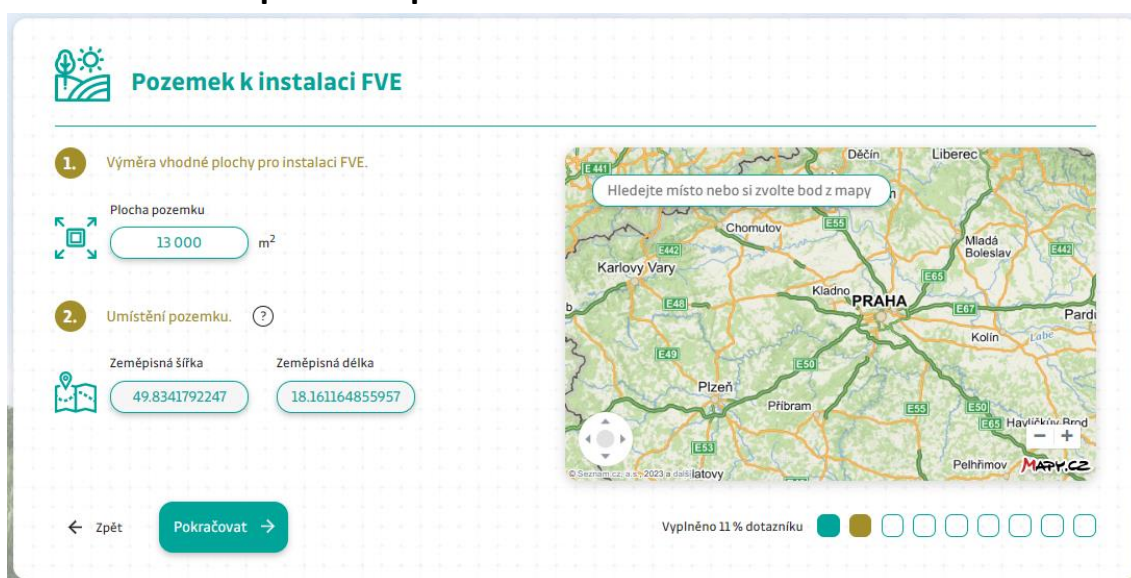


Obr. 2 - Histogram rychlosti větru [1]



Obr. 3 - Výběr zdrojů energie v režimu výpočtu „Chci vyrábět vodík“

3. Informace o pozemku pro instalaci FVE




Obr. 4 - Zadání parametrů pozemku k instalaci FVE

Výměra vhodné plochy k instalaci FVE - Podle zadané plochy pozemku bude vypočten možný instalovaný výkon FVE. Přesnější geometrie instalace PV panelů bude zadána v následujícím kroku.

Umístění pozemku - Místo instalace je možné vybrat kliknutím do mapy. Posuv mapy lze provádět pomocí čtyřcestného tlačítka na mapě, nebo pomocí klávesy Shift a pohybu myši. Způsob změny polohy souvisí s verzí internetového prohlížeče. K výpočtu předpokládané výroby je využita online aplikace Pvgis [2]. Při výpočtu výroby FVE je zohledněna geografická poloha pozemku i možné stínění vlivem nerovností terénu.

4. Zadání parametrů fotovoltaické elektrárny



Obr. 5 - Zadání parametrů fotovoltaické elektrárny

Účinnost FV panelů - Účinnost komerčně dostupných fotovoltaických panelů se pohybuje v rozsahu 10 – 24%. Zároveň probíhá vývoj, který umožní další navýšení účinnosti.

Sklon modulů β , Návrhový úhel α_D - Optimální sklon panelů β pro ČR je 35° , větší sklon zvýší výrobu z instalovaného výkonu v zimních měsících, zároveň se ale sníží instalovaný výkon na dané ploše a tím i celková roční výroba.



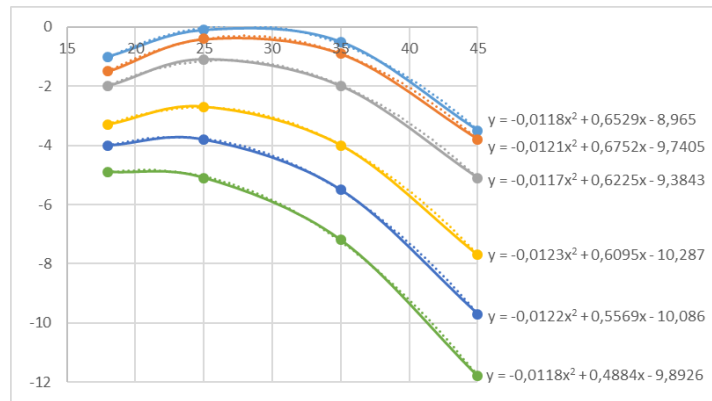
Obr. 6 - Geometrie rozmístění FV panelů má vliv na instalovaný výkon ploše

Návrhový úhel α_D má vliv na odstup jednotlivých řad panelů. Při vyšším úhlu než 17° dochází v zimních měsících k částečnému stínění jednotlivých řad panelů, zároveň se ale do jisté míry zvyšuje celková roční výroba energie z dané plochy.

Poklesu výtěžnosti vlivem stínění je odvozen pomocí korekčních křivek vyjádřených polynomem [3], kde:

y – Pokles výtěžnosti oproti referenci bez vzájemného stínění

x – sklon modulů β



Obr. 7 - Snížení roční výtěžnosti vlivem vzájemného stínění řad panelů

5. Zadání parametrů větrné turbíny

Parametry větrné turbíny

1. Součet výkonů větrných elektráren instalovaných v okolí zadaného umístění.

Instalovaný výkon: 1000 kW

2. Umístění pozemku.

Zeměpisná šířka: 49.8341792247
Zeměpisná délka: 18.161164855957

Hledejte místo nebo si zvolte bod z mapy

← Zpět Pokračovat →

Vyplněno 33% dotazníků

Obr. 8 - Zadání parametrů větrné turbíny

Instalovaný výkon - Součet výkonů větrných elektráren instalovaných v okolí zadaného umístění. Při rozdělení instalovaného výkonu na více větrných elektráren nemůže být dostatečně zohledněn reliéf terénu pro každou elektrárnu, a proto mohou být výsledky předpokládané výroby méně přesné.

Umístění - Při výpočtu výroby větrné elektrárny je zohledněna geografická poloha pozemku i nerovností terénu.

Výpočet roční výroby větrné elektrárny je proveden pomocí aplikace Global Wind Atlas [4].

6. Zadání parametrů vodíkových technologií

Zadání parametrů vodíkových technologií

Účinnost skladování vodíku (60 - 100 %) %

Instalovaný výkon elektrolyzáru MW

Fixní podíl jmenovitého příkonu - trvale využitý (0 - 100 %) %

Účinnost elektrolyzáru (60 - 82 %) %

Nominální spotřeba vody (9 - 17 l/kg H₂) l/kg H₂

← Zpět →

Vyplněno 44 % dotazníku

Obr. 9 - Zadání parametrů vodíkových technologií

Účinnost skladování vodíku - Účinnost skladování závisí na spotřebě komprese a s tím souvisejících zařízení. Při nízkotlakém skladování bez potřeby komprese může být účinnost 100%.

Instalovaný výkon elektrolyzáru - Pokud je instalovaný výkon elektrolyzáru výrazně nižší, než výkon vlastních zdrojů, nejsou špičky výroby těchto zdrojů využity. Tuto situaci ale zjednodušené výpočty nezohledňují.

Fixní podíl jmenovitého příkonu - Průměrný výkon elektrolyzáru v průběhu roku vztažený k instalovanému výkonu. Využití elektrolyzáru souvisí s dostupností zdrojů, ekonomikou provozu a požadavky na výrobu vodíku.

Účinnost elektrolyzáru - Účinnost přeměny elektrické energie na energii uloženou ve vodíku.

Nominální spotřeba vody - Na výrobu 1kg vodíku je fyzikálně potřeba 9 litrů čisté vody. Prakticky je spotřeba elektrolyzáru vyšší.

7. Výstupní komodity

Výstupní komodity

Ceny komodit a zařízení závisí na aktuální situaci na trhu. Bez znalosti aktuálních cen budou výsledné výpočty ekonomiky pouze orientační.

a) Výroba vodíku: výstupní komodity

1. Vodík

Roční produkce vodíku **90 390 kg/rok.**

Prodejní cena vodíku Kč/kg

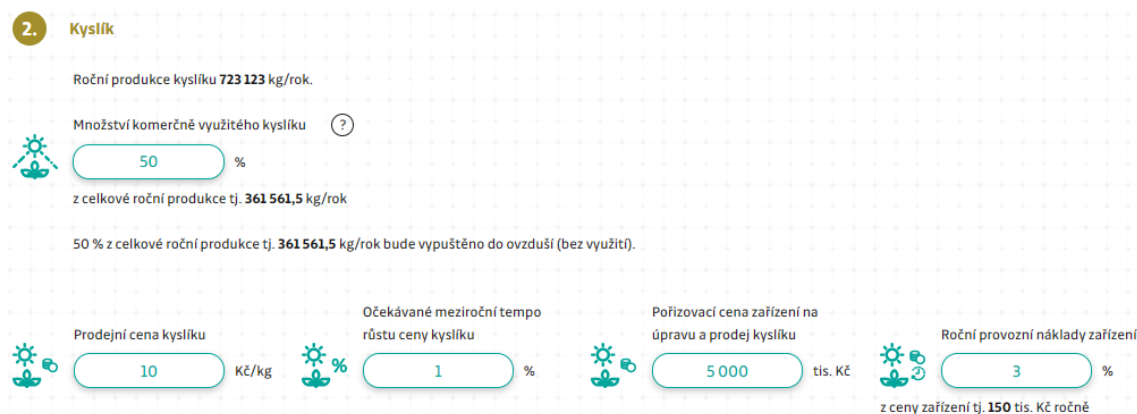
Očekávané meziroční tempo růstu ceny vodíku %

Obr. 10 - Výstupní komodity - Výroba vodíku

Roční produkce vodíku – vypočtená produkce vodíku na základě zadaných údajů

Prodejní cena vodíku – odpovídá aktuální situaci na trhu, v roce 2022 je přibližně 200 Kč/kg

Očekávané meziroční tempo růstu ceny vodíku – současná výroba vodíku je realizovaná převážně z fosilních zdrojů a tím je ovlivněna i jeho cena. S nárůstem výroby zeleného vodíku není dlouhodobý trend vývoje jednoznačný. Obvyklý růst cen komodit je přibližně 2%.



Obr. 11 - Výstupní komodity - Výroba kyslíku

Roční produkce kyslíku - vypočtená produkce kyslíku na základě zadaných údajů

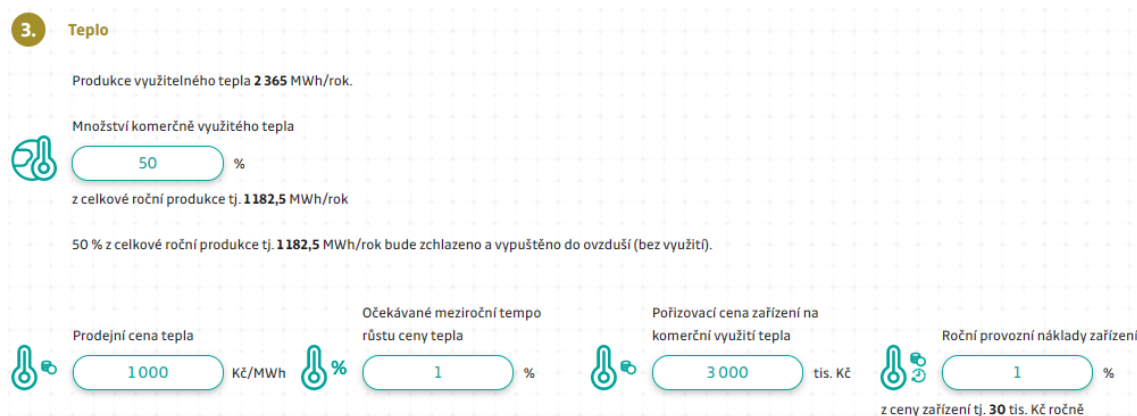
Množství komerčně využitého kyslíku - Při výrobě jednoho kg vodíku vznikne 8 kg kyslíku. Komerční využití tohoto „odpadního“ produktu zlepšuje ekonomiku celého zařízení. Na trhu nemusí být poptávka po veškerém vyrobeném kyslíku, a proto je možné zadat předpokládaný podíl využití.

Prodejní cena kyslíku – odpovídá aktuální situaci na trhu

Očekávané meziroční tempo růstu ceny kyslíku – současná výroba kyslíku se provádí extrakcí ze vzduchu. Trh s kyslíkem je do značné míry nasycený, nicméně existují také technologie, kde by našel kyslík uplatnění v případě poklesu jeho ceny. Kyslík je v podstatě odpadním produktem při výrobě vodíku a to by mělo zajistit pokles jeho ceny.

Požizovací cena zařízení na úpravu a prodej kyslíku – cena takto produkováného kyslíku je v podstatě dána amortizací zařízení na jeho zpracování.

Roční provozní náklady zařízení – náklady související s provozem jako jsou běžná údržba, řízení, popřípadě dohled.



Obr. 12 - Výstupní komodity - Výroba tepla

Produkce využitelného tepla – vypočtená produkce tepla při teoretické 100% účinnosti

Množství komerčně využitého tepla – veškeré produkované teplo nelze technicky využít, prakticky lze dosáhnout účinnosti využití maximálně 80%. Skutečně využité teplo pak odpovídá poptávce odběratelů, která je také ovlivněna souběhem výroby a spotřeby tepla.

Prodejní cena tepla – odpovídá aktuální situaci na trhu

Očekávané meziroční tempo růstu ceny tepla – uvádí se v % očekávaná meziroční změna prodejní ceny tepla. Může nabývat kladných (v případě očekávaného růstu prodejní ceny) nebo i záporných hodnot (v případě očekávaného poklesu prodejní ceny). Je-li nastavena nula, předpokládá se konstantní cena pro celé sledované období. Vzhledem k dynamické situaci na trhu s energiemi je tato položka těžce predikovatelná.

Požizovací cena zařízení na komerční využití tepla – Výsledná cena je dána nejen samotnými technologiemi pro zachycení tepla, ale také rozvody do místa spotřeby.

Roční provozní náklady zařízení – náklady související s provozem jako jsou běžná údržba, řízení, popřípadě dohled.



Obr. 13 - Výstupní komodity – Služba výkonové rovnováhy

Na proces mFRP₅ je poskytována záloha pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací do 5 minut (mFRR₅). Záloha mFRP₅ je poskytována například prostřednictvím zvýšení výkonu bloku, odpojení čerpání (platí pro přečerpávací vodní elektrárny) nebo odpojení odpovídajícího zatížení od elektrizační soustavy. V případě záporné regulační zálohy pak analogicky snížením výkonu bloku nebo připojením odpovídajícího zatížení do elektrizační soustavy.

mFRR₅ – Teoretické množství regulační energie, která může být teoreticky na vyžádání ročně poskytnuta. Hodnota je prakticky dána fixním podílem příkonu elektrolyzéro.

Cena mFRR₅ – platba za potenciálně rezervovanou regulační energii.

Cena regulační energie RE – platba za skutečně aktivovanou regulační energii

Podíl aktivované RE k mFRR₅ – podíl skutečně aktivované energie k teoretickému potenciálu

8. Pořizovací cena a roční provozní náklady zařízení na výrobu H₂

Vyplnění položek této karty má přímý vliv na výsledky výpočtů ekonomiky provozu. Položky jsou předvyplněné teoretickými odhady, které se zakládají na současných cenách a stavu technologií. Pro maximálně realistické výsledky by ale bylo potřeba zadat konkrétní ceny a servisní intervaly, které poskytne dodavatel technologie.

Pořizovací cena a roční provozní náklady zařízení na výrobu H₂

Ceny zařízení a jejich provozní náklady závisí na aktuální situaci na trhu. Bez znalosti aktuálních cen budou výsledné výpočty ekonomiky pouze orientační.

- 1. Skladování a čištění vody**
 - Pořizovací cena zařízení: 3 000 tis. Kč
 - Roční provozní náklady zařízení: 3 % z ceny zařízení tj. 90 tis. Kč ročně
 - Periodická výměna dílů (délka periody v letech): 3 roky
 - Náklady na periodickou výměnu dílů: 500 tis. Kč
- 2. Elektrolyzér**
 - Pořizovací cena zařízení: 40 000 tis. Kč
 - Roční provozní náklady zařízení: 3 % z ceny zařízení tj. 1 200 tis. Kč ročně
 - Periodická výměna dílů (délka periody v letech): 7 roky
 - Náklady na periodickou výměnu dílů: 7 000 tis. Kč
- 3. Systém pro skladování vodíku**
 - Pořizovací cena zařízení: 10 000 tis. Kč
 - Roční provozní náklady zařízení: 1 % z ceny zařízení tj. 100 tis. Kč ročně
 - Periodická výměna dílů (délka periody v letech): 3 roky
 - Náklady na periodickou výměnu dílů: 500 tis. Kč
- 4. Kompresor**
 - Pořizovací cena zařízení: 3 000 tis. Kč
 - Roční provozní náklady zařízení: 3 % z ceny zařízení tj. 90 tis. Kč ročně
 - Periodická výměna dílů (délka periody v letech): 3 roky
 - Náklady na periodickou výměnu dílů: 300 tis. Kč

← Zpět [Pokračovat](#) →

Vyplněno 67% dotazníku

Obr. 14 - Pořizovací cena a roční provozní náklady zařízení na výrobu H₂

U všech komponent systému pro výrobu H₂ (skladování a čištění vody, elektrolyzér, systém pro skladování vodíku, kompresor) se zadávají následující údaje:

Pořizovací cena zařízení – uvádí se celková pořizovací cena v tis. Kč. Zahrnuje jednak cenu pořízení zařízení a dále ostatní související náklady (doprava, instalace, clo apod.).

Roční provozní náklady zařízení – jsou dány % z pořizovací ceny příslušného zařízení. Zahrnují běžné provozní náklady v souvislosti s jeho provozem a údržbou. Zpravidla se uvádějí ve výši 2 %.

Periodická výměna dílů (délka periody v letech) – udává, po kolika letech je nutno pravidelně vyměňovat vybrané součásti jednotlivých komponent systému zajišťující jeho bezporuchový provoz.

Náklady na periodickou výměnu dílů – udává náklady na pořízení dílů, které se budou v pravidelných periodách u jednotlivých komponent vyměňovat. Náklady se zadávají v tis. Kč.

9. Vstupní komodity pro výrobu H₂

→ Vstupní komodity pro výrobu H₂

1. Elektřina

Roční spotřeba elektřiny na výrobu vodíku **5 375 MWh**.

a) Vlastní výroba z fotovoltaiky

Podíl vlastní výroby elektřiny na celkové plánované roční spotřebě

Pořizovací cena FVE

Roční provozní náklady

Stupeň degradace fotovoltaiky vlivem stárnutí

% tis. Kč/kWp % % / rok

z ceny zařízení tj. **300,2** tis. Kč ročně

Instalovaný výkon FVE **1501 kWp**.

Množství vlastní vyrobené elektřiny **1511 MWh**.

Pořizovací cena zařízení na vlastní výrobu elektřiny **30 020** tis. Kč.

b) Vlastní výroba z větru

Podíl vlastní výroby elektřiny na celkové plánované roční spotřebě

Pořizovací cena větrné elektrárny

Roční provozní náklady

% tis. Kč/kW %

z ceny zařízení tj. **400** tis. Kč ročně

Množství vlastní vyrobené elektřiny **2508 MWh**.

Pořizovací cena zařízení na vlastní výrobu elektřiny **40 000** tis. Kč.

c) Nákup z veřejné sítě

1356 MWh / rok

cena / MWh

Očekávané roční tempo růstu ceny elektřiny

Kč %

2. Voda

Roční spotřeba vody na výrobu vodíku **1 355 856 l**.

a) Vlastní zdroje

Množství vlastní vody **677 928 l**

Z vlastních zdrojů je celkem kryto

Výdaje na zajištění vlastního zdroje vody (retenční nádrž apod.)

% tis. Kč

b) Nákup z veřejných zdrojů


Množství nakupované vody **677 928 l**

Cena nakupované vody

Očekávané roční tempo růstu ceny vody

Kč/l %

← Zpět **Pokračovat** →

Vyplněno 78 % dotazníku 

Obr. 15 – Vstupní komodity pro výrobu H₂

Roční spotřeba elektřiny na výrobu vodíku – Hodnota je dána instalovaným výkonem elektrolyzérů a fixním podílem příkonu elektrolyzérů. Spotřeba elektřiny pro výrobu vodíku může být kryta vlastní výrobou (fotovoltaika, vítr nebo jejich kombinace) doplněné o nákup z veřejné sítě.

Podíl vlastní výroby elektřiny na celkové plánované roční spotřebě – Podíl výroby FVE na celkové výrobě vlastních zdrojů.

Pořizovací cena FVE – průměrná cena za jednotku výkonu FVE.

Roční provozní náklady – Náklady na provoz a údržbu FVE mezi které patří údržba pozemku, čištění FV panelů, dohled, případné servisní zásahy a výměna dílů. Zpravidla se uvádějí ve výši 2 %.

Stupeň degradace fotovoltaiky vlivem stárnutí – vlivem stárnutí zařízení dochází k postupnému poklesu účinnosti zařízení. U tohoto typu zařízení se zpravidla předpokládá ve výši 1% ročně z instalovaného výkonu.

Instalovaný výkon FVE – Vypočtený instalovaný výkon na základě dostupné plochy a geometrie uspořádání FV panelů.

Množství vlastní vyrobené elektřiny – Hodnota vypočtena pomocí aplikace PVGIS s uvážením možného vzájemného stínění jednotlivých řad FV panelů.

Pořizovací cena zařízení na vlastní výrobu elektřiny – Instalovaný výkon FVE násobený Pořizovací cenou FVE.

Podíl vlastní výroby elektřiny na celkové plánované roční spotřebě – Podíl výroby VE na celkové výrobě vlastních zdrojů.

Pořizovací cena větrné elektrárny – průměrná cena za jednotku výkonu VE.

Roční provozní náklady – Náklady na provoz a údržbu VE mezi které patří údržba pozemku, dohled, případné servisní zásahy a výměna dílů. Zpravidla se uvádějí ve výši 2 % z pořizovací ceny.

Množství vlastní vyrobené elektřiny – Hodnota vypočtena pomocí aplikace Global Wind Atlas

Pořizovací cena zařízení na vlastní výrobu elektřiny – průměrná cena za jednotku výkonu VE.

Nákup z veřejné sítě – Rozdíl mezi předpokládanou spotřebou elektrolyzérů a výrobou vlastních zdrojů. Záporná hodnota indikuje dodávku do sítě v případě když je vlastní výroba elektřiny větší než předpokládaná spotřeba.

Cena/MWh – Cena nákupu elektřiny ze sítě, kterou neposkytnou vlastní zdroje, zadává se aktuální cena nákupu či prodeje elektřiny v Kč za jednu MWh. Výpočty výroby a spotřeby elektřiny jsou bilanční, to znamená, že v době kdy výroba vlastních zdrojů přesahuje spotřebu elektrolyzérů, je elektřina do sítě dodávána a naopak při nedostatku energie je elektřina ze sítě odebírána. Zadanou cenou elektřiny je násobena výsledná bilance toků elektřiny, nicméně na výslednou ekonomiku provozu mohou mít také vliv provozní toky energií mezi vlastními zdroji a sítí. Vliv provozních toků elektřiny na výslednou ekonomiku je ale obtížně vyčíslitelný, závisí zejména na rozdílu mezi nákupní a prodejní cenou elektřiny.

Očekávané tempo růstu ceny elektřiny – V počátku přechodu fosilní energetiky na udržitelné zdroje se dá předpokládat růst ceny. V pokročilejším stádiu energetické transformace, kdy odpadnou náklady na těžbu, dopravu a další externality fosilní energetiky, může cena elektřiny stagnovat, nebo i klesat. Vzhledem k dynamické situaci na trhu s energiemi je tato položka těžce predikovatelná.

Roční spotřeba vody na výrobu vodíku – Hodnota vypočtená z uvažované výroby vodíku a spotřeby vody na výrobu 1kg vodíku, kterou udává výrobce elektrolyzéro.

Množství vlastní vody – Vypočtené množství vody z vlastních zdrojů jako jsou studna nebo povrchová voda na základě zadaného podílu krytí z vlastních zdrojů.

Z vlastních zdrojů celkem kryto – Zadaný podíl spotřeby vody, který může být pokryt vlastními zdroji. Podíl může být nastaven v rozsahu 0–100%.

Výdaje na zajištění vlastního zdroje vody – Pořizovací cena technologií, které jsou nezbytné k zajištění vlastní spotřeby vody, kde patří například čerpadla, potrubí nádrže, popřípadě zařízení na hrubé předčištění vody.

Množství nakupované vody – Rozdíl mezi celkovou roční spotřebou vody a množstvím vody z vlastních zdrojů.

Cena nakupované vody – Cena vody nakoupené z externího zdroje. V současné době se cena při nákupu z veřejného zdroje pohybuje na úrovni přibližně 0,071 Kč/litr.

Očekávané roční tempo růstu ceny vody – uvádí se v % očekávaná meziroční změna ceny. Může nabývat kladných (v případě očekávaného růstu ceny) nebo i záporných hodnot (v případě očekávaného poklesu ceny). Je-li nastavena nula, předpokládá se konstantní cena pro celé sledované období.

10. Financování

Financování

Celkové pořizovací výdaje projektu **135 227** tis. Kč.

Rok začátku provozu zařízení: **2024** Diskontní sazba: **5** %

1. Vlastní zdroje

Podíl vlastních zdrojů: **60** % = **81 136,2** tis. Kč

Podíl bankovního úvěru: **20** % = **27 045,4** tis. Kč

Podíl dotace: **20** % = **27 045,4** tis. Kč

Celkem **100** % = **135 227** tis. Kč.

2. Parametry bankovního úvěru

Úroková sazba: **6** p.a.

Splatnost: **15** let tj. v roce **2038**

Frekvence splácení: **12** splátek za rok

Výše úvěru **27 045,4** tis. Kč, Počet splátek **180**.

Výše splátky **228,224** tis. Kč/měs., **2 738,693** tis. Kč/rok.

← Zpět Pokračovat → Vyplněno 89% dotazníku

Obr. 16 – Financování

Rok začátku provozu zařízení – udává rok, v kterém bude zařízení uvedeno do provozu.

Diskontní sazba – slouží k přepočtu (diskontování) budoucích peněžních toků (příjmů i výdajů) na jejich současnou hodnotu. U tohoto typu projektu se zadává ve výši 5 %.

Struktura zdrojů financování – u vybraných zdrojů financování (vlastní zdroje, bankovní úvěr, dotace) se zadávají procentní podíly jednotlivých zdrojů na krytí celkových výdajů spojených s pořízením investice. Jednotlivé podíly se zadávají v rozsahu 0–100 %. Součet podílů musí být roven 100 %.

Parametry bankovního úvěru – v případě, že je jako jeden ze zdrojů pro financování investice vybrán bankovní úvěr, je nutno zadat jeho parametry.

Úroková sazba – zadává se jako roční úroková sazba (p.a.), kterou je úvěr (jeho nesplacená část) úročen. Předpokládá se konstantní úroková sazba po celou dobu trvání bankovního úvěru. Výše úrokové sazby je ovlivňována řadou faktorů (očekávaná míra inflace, bonita žadatele o úvěr, rizikovost investice apod.). Výsledná úroková sazba se tak pro jednotlivé žadatele může lišit i o několik procentních bodů.

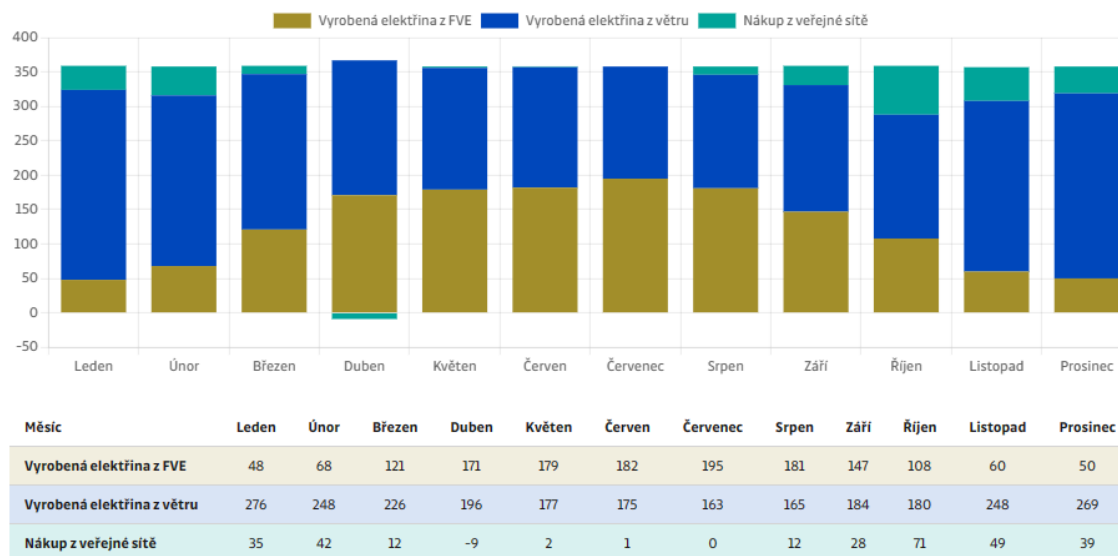
Splatnost – zadává se, po kolika letech má být celý úvěr včetně úroků splacen.

Frekvence splácení – zadává se počet splátek v rámci jednoho úrokovacího období. Standardně se předpokládá měsíční frekvence splácení (tj. 12 splátek v jednom roce).

11. Projektová rozvaha



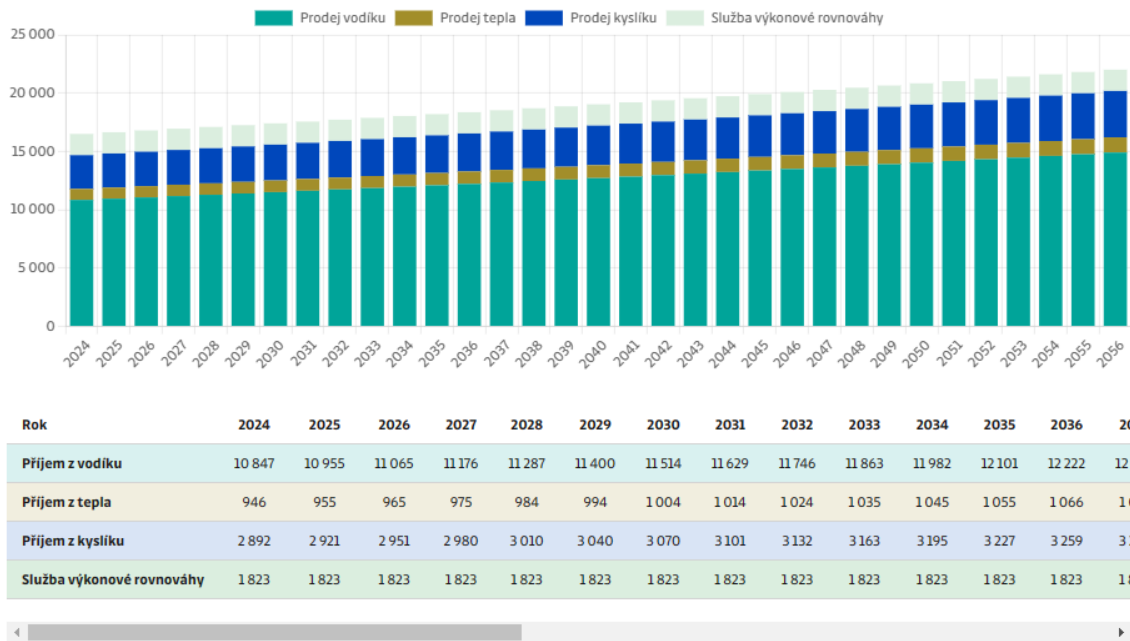
Pokrytí spotřeby technologií elektrolýzéry (MWh)



Obr. 17 – Pokrytí spotřeby technologií elektrolýzéry

Pokrytí spotřeby technologií elektrolýzéry – graf a tabulka zobrazuje strukturu (dle jednotlivých zdrojů) a množství elektřiny (MWh) potřebných pro výrobu vodíku elektrolýzou v jednotlivých měsících provozu. Lze volit až ze tří různých zdrojů elektřiny: fotovoltaika, větrná elektrárna, nákup z veřejné sítě.

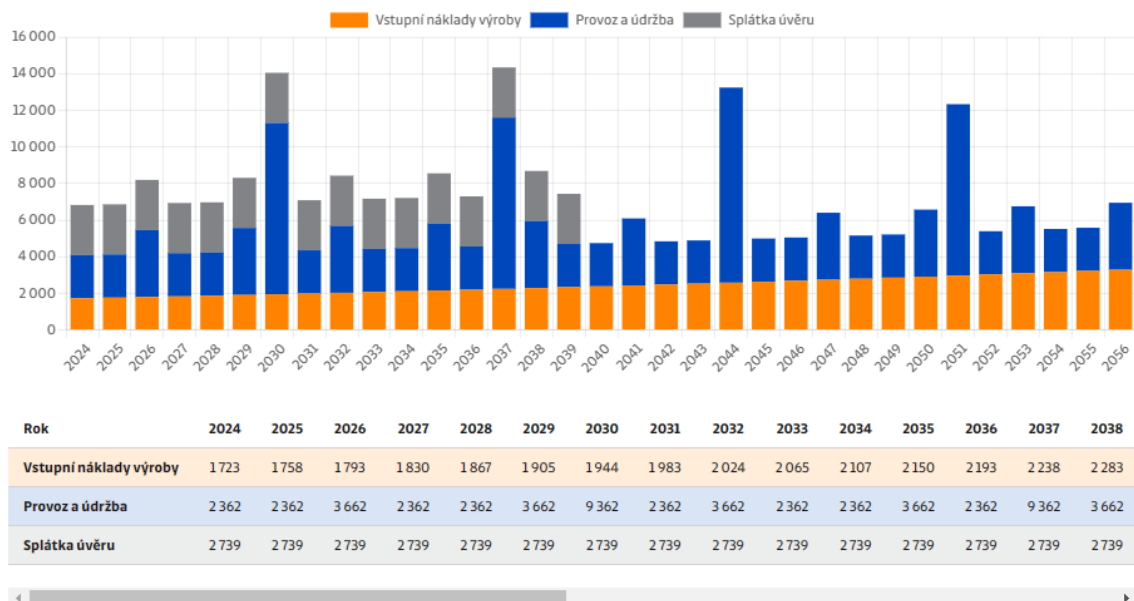
Plánované roční příjmy (tis. Kč)



Obr. 18 – Plánované roční příjmy

Plánované roční příjmy – graf a tabulka zachycují strukturu a výši ročních příjmů z investice v jednotlivých letech provozu. Výše příjmů v jednotlivých letech je určována zejména prodejními cenami výstupních komodit a jejich očekávaným budoucím cenovým vývojem a množstvím výstupních komodit (resp. podílem komerčně využitelného množství z roční produkce).

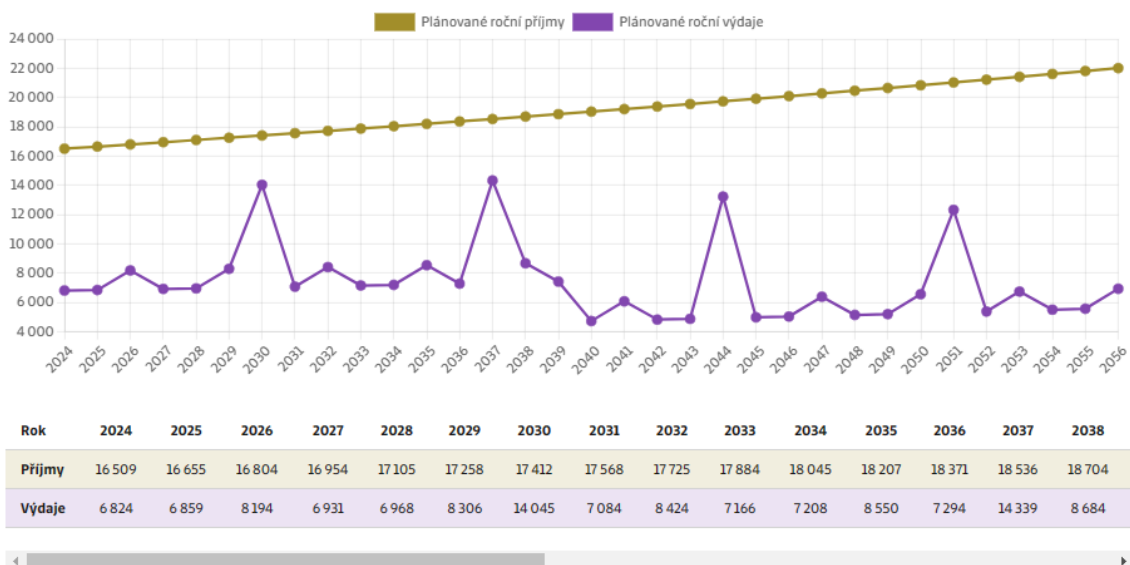
Plánované roční výdaje (tis. Kč)



Obr. 19 – Plánované roční výdaje

Plánované roční výdaje – graf a tabulka zachycují strukturu a výši ročních výdajů spojených s provozem investice. Tyto výdaje lze obecně rozdělit na provozní výdaje (výdaje spojené s provozem a údržbou zařízení, výdaje na nákup vstupních komodit nutných pro výrobu) a finanční výdaje (výdaje spojené se splácením úvěru a úroků). Celkovou výši ročních výdajů lze výrazně ovlivnit zejména způsobem financování investice (podílem úvěru na celkových pořizovacích výdajích projektu), doby splatnosti úvěru (s delší dobou splatnosti se výše splátek snižuje) a výší úrokové sazby (je určována bankou s ohledem na riziko investice, bonita klienta atd.).

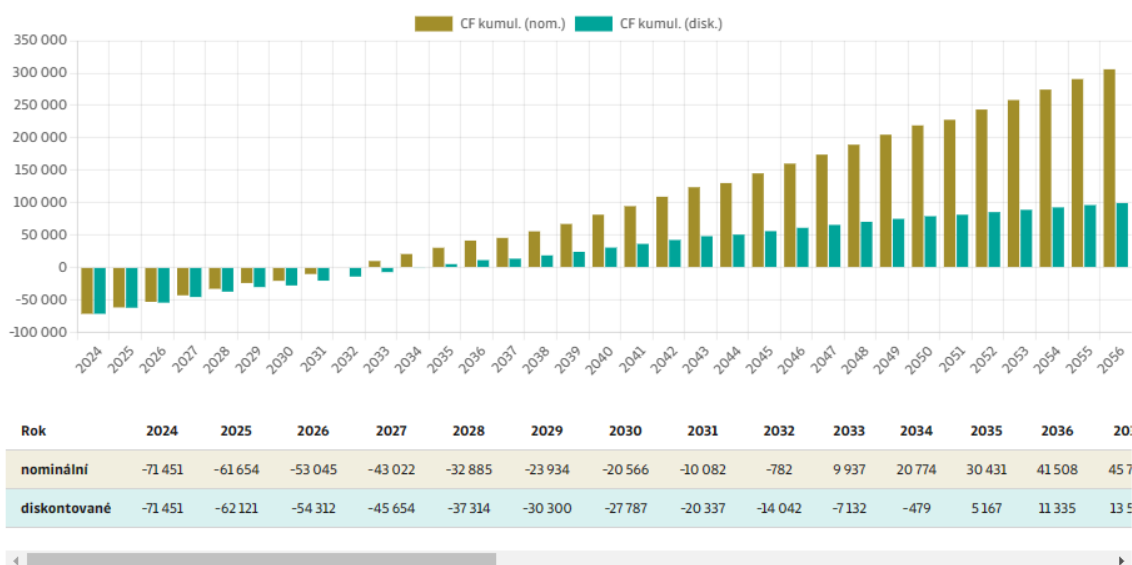
Celkové roční příjmy/výdaje (tis. Kč)



Obr. 20 – Celkové roční příjmy/výdaje

Celkové roční příjmy/výdaje – graf zachycuje celkové plánované příjmy a výdaje (v absolutní výši) v jednotlivých letech provozu investice bez ohledu na zdroj příjmu případně na co jsou vynakládány. Rozdíl celkových příjmů a výdajů v příslušném roce vyjadřuje čistý cash flow.

Celkový cash flow kumulovaně (tis. Kč)



Obr. 21 – Celkový cash flow (kumulovaně)

Celkový cash flow (kumulovaně) – graf zachycuje kumulativní výši nominálních (nediskontovaných) a diskontovaných cash flow v jednotlivých letech životnosti investice. Výpočet probíhá tak, že se k počátečním celkovým pořizovacím výdajům (-) postupně přičítá roční cash flow a to tak dlouho, dokud není roven nule. Bod, kdy je celkový kumulativní cash flow roven nule, odpovídá době návratnosti investice (nominální doba návratnosti, diskontovaná doba návratnosti). Obecně platí, že doba návratnosti by měla být kratší, než je doba životnosti investice. Čím kratší je doba životnosti, tím rychleji (za kratší dobu) čistý cash flow uhradí celkové výdaje spojené s pořízením investice.

Obecný přehled vodíkových technologií

S rostoucím instalovaným výkonem obnovitelných zdrojů elektrické energie, mezi které patří zejména fotovoltaické a větrné elektrárny, vyvstává otázka akumulace velkého množství energie v případě jejího přebytku na dobu, kdy je jí nedostatek.

Způsobů jak akumulovat elektrickou energii je mnoho. Jedním z nejstarších a nejosvědčenějších způsobů akumulace elektrické energie ve velkém měřítku jsou přečerpávací vodní elektrárny (PVE). Pro řádově menší výkony jsou zase vhodné elektrické akumulátory. Oba zmíněné způsoby akumulace energie mají své výhody a nevýhody, avšak jedno mají společné, a to že nemohou poskytovat akumulaci v dlouhodobém časovém měřítku. Řešením dlouhodobé akumulace může být právě akumulace do vodíku.

Hned na úvod je nutné zmínit fakt, že vodík neslouží jako zdroj primární energie, ale pouze jako její vhodný nosič. Z toho důvodu je zapotřebí vynaložit na výrobu vodíku více energie než z něj lze posléze získat. To ovšem neznamená, že by byl vodík jakkoli zatracován, naopak, využití vodíku se jeví jako vhodný prostředek k akumulaci velkého množství energie po relativně dlouhou dobu.

Předkládaný text se snaží shrnout a objasnit nejen problematiku výroby a akumulace vodíku, ale ve své druhé části také oblast fotovoltaických a větrných elektráren, jelikož při výrobě bezemisního vodíku je uvažováno zejména s těmito zdroji čisté energie.

1. Technické a fyzikální vlastnosti vodíku

Vodík (H_2) je bezbarvý plyn, jenž je bez zápachu, není toxický, zato je však velmi hořlavý v širokém rozsahu koncentrací ve směsi se vzduchem, respektive kyslíkem. Hustota vodíku se pohybuje v závislosti na teplotě od $0,084 - 0,089 \text{ kg/m}^3$. Teplota varu vodíku je $-253 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vzhledem k tomu, že jádro vodíku je složeno pouze z jednoho protonu, je vodík nejjednodušším prvkem ve vesmíru. Dle odhadů je 90 % atomů ve vesmíru právě atomy vodíku. Na zemi se však vodík nevyskytuje téměř vůbec samostatně (výjimkou mohou být sopečné plyny), zato je součástí mnoha sloučenin, nejvýznamnější je voda (H_2O) případně metan (CH_4).

Rozsah hořlavosti ve směsi se vzduchem se u vodíku pohybuje od 4 do 74 %, přičemž při koncentraci 19 – 59 % je směs výbušná. Rychlost hoření vodíku je $2,8 \text{ m/s}$. Ve srovnání se zemním plynem (hranice výbušnosti 5 – 13 % obj., rychlost hoření $0,42 \text{ m/s}$) je nutné u vodíkových technologií dbát zvláště vysoké bezpečnosti.

Minimální energie potřebná pro vznícení vodíku je pouze $0,017 \text{ mJ}$, což je výrazně méně než u zemního plynu ($0,27 \text{ mJ}$). Energie potřebná pro vznícení vodíku je ovšem závislá na jeho koncentraci, přičemž nejnižší energie je zapotřebí při koncentraci okolo 25 %. Teplota samovznícení vodíku i zemního plynu se pohybuje okolo $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

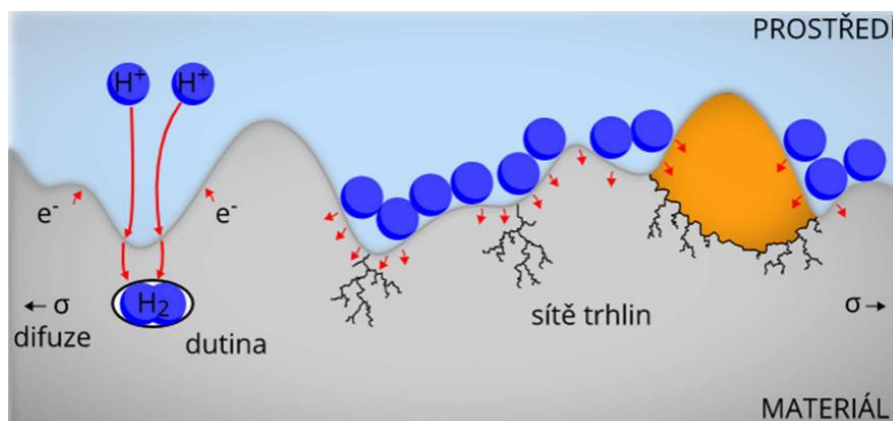
Vodík má ze všech známých paliv největší hmotnostní hustotu energie, a to 120 MJ/kg (přibližně $33,3 \text{ kWh/kg}$). Toto prvenství je však vykompenzováno velice nízkou objemovou hustotou energie, kdy při atmosférickém tlaku 1 m^3 vodíku obsahuje pouze $10,8 \text{ MJ}$ (jen 3 kWh/m^3), proto je nutné jej skladovat při vysokém tlaku (až 900 bar) nebo v kapalně podobě. V následující tabulce je uvedeno energetické srovnání vodíku s ostatními palivy.

Tab. 1 - Srovnání vodíku s ostatními palivy

Palivo	Hustota (kg·m ⁻³)	Měrný objem (l·kg ⁻¹)	Výhřevnost (MJ·kg ⁻¹)	Hustota energie (MJ·l ⁻¹)
H ₂ (1 bar)	0,084	11 939	119	0,01
H ₂ (250 bar)	17	58,8	119	2,024
H ₂ (350 bar)	22,2	45,2	119	2,64
H ₂ (700 bar)	39	25,9	119	4,6
H ₂ kapalný (-253 °C)	71,08	14,1	119	8,46
Zemní plyn (1 bar)	0,69	1 450	55,1	0,038
Propan (kapalný)	498	2	46,3	23,08
Benzín (kapalný)	700	1,43	44,5	31,15

1.1. Vliv vodíku na kovové materiály

Vodík je známý, mimo jiné tím, že způsobuje významné poškození v kovových součástech. Při teplotách pod 190 °C difunduje do oceli (zejména při technologických procesech jako je např. moření, pokovování apod.). Rekombinace difundujícího vodíku v místě poruchy struktury oceli způsobuje vznik velkých vnitřních tlaků (až stovky MPa), které způsobí mechanické porušení materiálu. Toto porušení se pak projevuje jako dutiny, trhliny apod. Tento jev se nazývá vodíková křehkost. Nebezpečí vodíkové křehkosti spočívá zejména v tom, že celý proces probíhá uvnitř materiálu. Poškození vodíkovou křehkostí je vratné, lze jej odstranit vhodným tepelným zpracováním. [5] , [6]



Obr. 22 - Vznik vodíkové křehkosti [6]

K tzv. vodíkové korozi dochází za teplot vyšších než 200 °C. V tomto případě difundující atomární vodík reaguje s uhlíkem obsaženým v oceli za vzniku metanu. Molekuly metanu však nemohou v oceli difundovat, a tak nahromaděný metan ve struktuře materiálu vyvolává pnutí. Vodíková koroze je nevratný děj.



Obr. 23 - Materiál porušený vodíkovou korozí [7]

1.2. Chování vodíku při změně tlaku

Zjednodušeně řečeno, Joule-Thomsonův jev je fyzikální děj, při kterém se během expanzi plynu mění jeho teplota. Pro každý plyn (a daný tlak) existuje tzv. inverzní teplota (teplota, při které je teplota během expanze konstantní). Pokud dojde k expanzi plynu s teplotou nižší než je inverzní, plyn se ochlazuje. V případě, že má expandující plyn vyšší teplotu než inverzní, dojde k jeho ohřevu.

Inverzní teplota vodíku je zhruba -80 °C , z toho plyne, že při expanzi vodíku nad touto teplotou se expandující vodík zahřívá (při pokojové teplotě se tedy bude vodík během expanze zahřívát). Naopak při expanzi vodíku pod touto teplotou se bude ochlazovat (toho se využívá při zkapalňování).

Expanze vodíku z 1000 barů na 13 barů způsobí nárůst jeho teploty o 50 K.

Pro srovnání: inverzní teplota vzduchu je několik set stupňů celsia, pro hélium pak zhruba -258 °C . Mezi plyny, které se za pokojové teploty při expanzi zahřívají patří vodík, hélium a neon.

Nutno však zmínit, že během komprese vodíku rovněž způsobí nárůst jeho teploty. Tento nárůst je dokonce vyšší než v případě expanze vodíku. Tento jev se negativně projeví při plnění tlakové nádoby, kdy se během plnění zvýší teplota nádrže. Po následném ochlazení pak úměrně tomu poklesne tlak v nádrži, což způsobí to, že nádoba zůstane pod jmenovitým plnicím tlakem. Této ztrátě tlaku lze zabránit tím, že vodík je v průběhu plnění ochlazován (např. kapalným dusíkem). [8], [9]

2. Rozdělení vodíku podle emisní stopy při jeho výrobě

Ačkoli je vodík bezbarvý plyn, lze jej rozdělit podle způsobu jeho výroby na několik barev, třemi základními jsou: [10], [11]

- **Zelený vodík**

Při výrobě zeleného vodíku nevznikají žádné emise oxidu uhličitého, přičemž k jeho výrobě pomocí elektrolýzy vody slouží čisté zdroje energie jako jsou například větrné nebo fotovoltaické elektrárny. Zelený vodík je tedy bezemisní. Aktuálně je procentní zastoupení zeleného vodíku ve výrobě velmi malé, dosahuje pouze několik málo procent, ale v dohledné době by se mohlo toto číslo postupně zvětšovat. Současnou překážkou v rozvoji zeleného vodíku je ještě stále vysoká cena potřebné technologie (zejména elektrolyzérů).

- **Modrý vodík**

Je obdoba šedého vodíku s tím rozdílem, že vznikající emise CO_2 jsou zachytávány a ukládány prostřednictvím procesu CCS (Carbon Capture and Storage) nebo CCU (Carbon Capture and Utilization). Nejčastěji je modrý vodík vyráběn parním reformingem zemního plynu, vzniklý oxid

uhličitý je poté ukládán například do vytěžených ropných ložisek. Tato metoda výroby vodíku je proto značně nákladná a proto se prozatím příliš nepoužívá.

Vodík může být označován jako modrý, pokud emise oxidu při jeho výrobě uhličitého nepřekročí 36,4 g/MJ (1 MJ odpovídá cca 0,28 kWh).

- **Šedý vodík**

V současnosti tvoří zhruba 96 % objemu vyráběného vodíku. Tento vodík je vyráběn z fosilních paliv procesy, kterými jsou například parní reformování zemního plynu nebo zplyňování uhlí. Při těchto metodách vznikají velké emise CO₂, ale za to má tento druh vodíku nízké výrobní náklady.

Šedý vodík má emise vyšší než 36,4 g CO₂/MJ.

Kromě uvedených tří základních barevných označení vodíku existují i další barvy. Jako příklad lze uvést tyrkysovou, růžovou, hnědou či černou. Tyrkysový vodík je vyráběn pyrolýzním rozkladem zemního plynu, růžový vodík pak pomocí elektrolýzy, která je napájena z jaderných elektráren, hnědý respektive černý vodík pak z uhlí. V následující tabulce jsou přehledně uvedeny všechny současně uváděné „barvy“ vodíku.

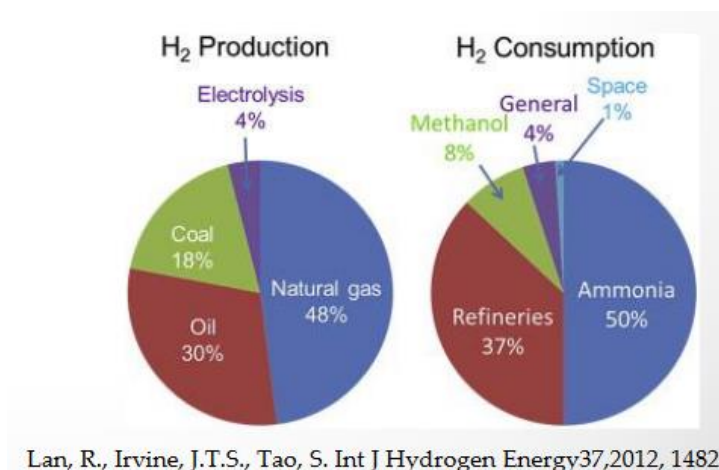
Tab. 2 - Barevné spektrum vodíku [12]

Barevné označení vodíku	Způsob výroby
Zelený	Elektrolýza vody pomocí OZE
Tyrkysový	Pyrolýza metanu
Modrý	Fosilní zdroje s ukládáním CO ₂ (CCS)
Šedý	Fosilní zdroje (bez CCS)
Hnědý a černý	Uhlí
Fialový, růžový, červený	Jaderná energie
Žlutý	Fotovoltaická energie
Zlatý	Vodík získaný těžbou v zemské kůře

3. Výroba vodíku

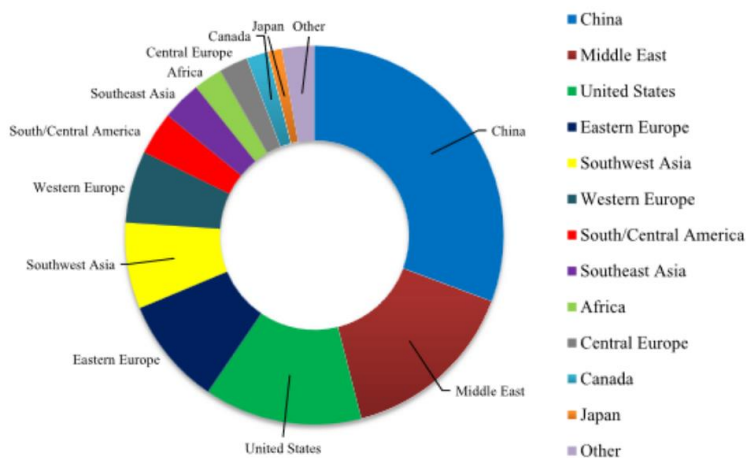
3.1. Roční spotřeba vodíku ve světě

Ve světě se ročně vyrobí a spotřebuje okolo 90 mil. tun vodíku. Převážná část vodíku se využije zejména v oblasti průmyslu. Podstatný podíl spotřeby vodíku je zapotřebí při výrobě amoniaku (čpavku), další velkou část spotřebuje rafinace ropy, třetí největší část připadá na výrobu metanolu (obr. 3 - pravá část). V současné době vodík vyráběn v drtivé většině z fosilních paliv, zejména pak ze zemního plynu a ropy (levá část obr. 3).



Obr. 24 - Způsob výroby a oblasti spotřeby vodíku [13]

Pokud se zaměříme na spotřebu vodíku podle jednotlivých států, zjistíme, že největší spotřebu má Čína následovaná oblastí Blízkého východu a Spojenými státy americkými (obr. 4). Tyto tři státy, respektive oblasti, tvoří více než polovinu světové spotřeby vodíku.



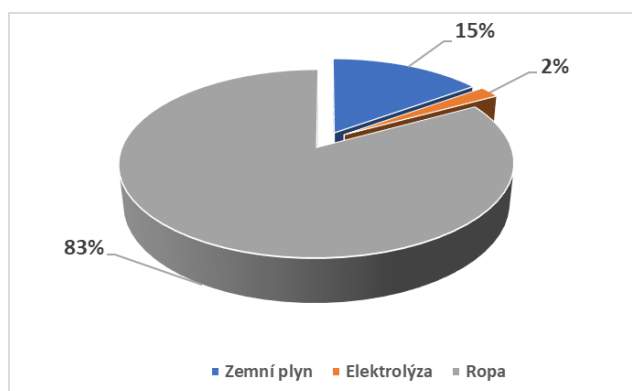
Obr. 25 - Zastoupení spotřeby vodíku ve světě podle států (v roce 2017) [14]

3.2. Roční produkce vodíku v ČR

V ČR činí roční výroba vodíku přes 100 000 t. Veškerý vyrobený vodík bývá zpravidla spotřebován v místě jeho výroby, a to na výrobu amoniaku či v petrochemickém průmyslu. Jelikož je k výrobě vodíku v ČR využíváno fosilních zdrojů, lze veškerý vyprodukovaný vodík označit jako šedý. V tab. 3 je uvedeno množství vyrobeného vodíku a technologie jeho výroby.

Tab. 3 - Množství vodíku a technologie jeho výroby v ČR

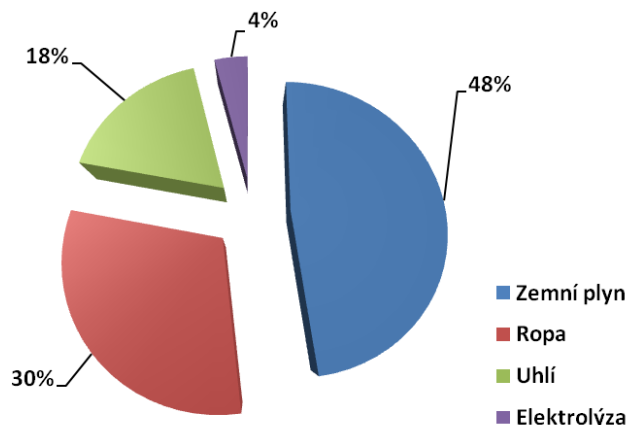
Výrobní závod	Množství (t/rok)	Technologie
Unipetrol Litvínov	55 000	Parciální oxidace (POX)
	7 000	Etylenová jednotka
	12 000	Reforming benzínu
Unipetrol Kralupy	7 000	Reforming benzínu
Synthos Kralupy	2 500	Dehydrogenace etylbenzenu
BC MCHZ Ostrava	13 650	Parní reforming ZP
DEZA Valašské Meziříčí	1 400	Parní reforming ZP
Spolchemie Ústí n. Labem	2 100	Elektrolýza Na/K Cl



Obr. 26 - Původ vyrobeného vodíku v ČR [13]

3.3. Způsoby výroby vodíku

Vodík lze průmyslově získávat mnoha způsoby. Největší část vodíku je vyráběna parním reformováním zemního plynu nebo ropných frakcí. Druhá největší část vodíku se vyrábí z ropy pomocí parciální oxidace (POX). Část vodíku se získává i z uhlí. Menší část vodíku je získávána jako vedlejší produkt při elektrolytické výrobě chlóru, vodík je rovněž součástí koksárenského plynu a v menší míře i plynu vysokopecního. Elektrolýza vody je využívána většinou tehdy, pokud je k dispozici přebytek levné elektrické energie.

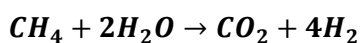
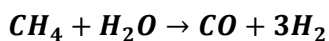


Obr. 27 - Podíl na výrobě vodíku [15]

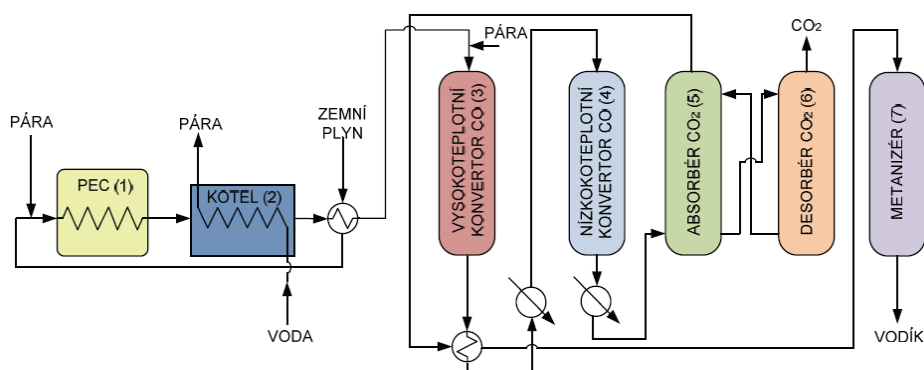
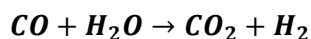
3.3.1 Parní reforming

Parní reforming představuje nejlevnější způsob získávání vodíku. Nejčastěji reformovaným palivem je zemní plyn, který je složen především z metanu (CH_4), ale může být použit například zkapalněný ropný plyn nebo i nafta.

Během procesu parního reformování metan reaguje s vodní párou za relativně vysokých teplot a tlaků (teplota až $800\text{ }^\circ\text{C}$, tlak 3 – 5 MPa), přičemž vzniká oxid uhelnatý, oxid uhličitý a vodík.



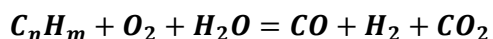
Reakční produkty jsou poté vedeny dále do konvertorů, kde se oxid uhelnatý přemění na oxid uhličitý spolu s vodíkem.



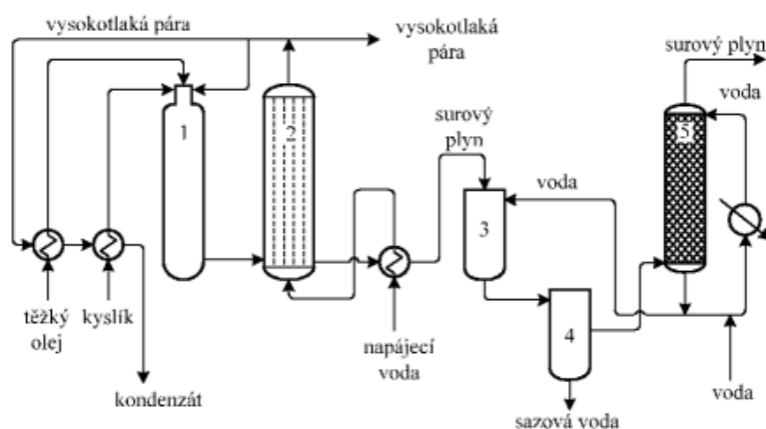
Obr. 28 - Schéma systému parního reformování [16]

3.3.2 Parciální oxidace (POX)

Parciální oxidace uhlovodíků (obecně C_nH_m) je velmi rozšířený způsob výroby vodíku. Jako vstupní surovina slouží jak plynné, tak kapalně suroviny z primárního i sekundárního zpracování ropy. Nejčastěji se však používají těžké ropné frakce (vakuové zbytky, propanové asfalty, apod.). Vstupní surovina se zplyňuje kyslíkem (v množství menším než je zapotřebí pro úplnou oxidaci na oxid uhličitý a vodu) a vodní párou při teplotách 1 300 – 1 500 °C a tlacích 3 – 8 MPa. Velmi zjednodušeně lze celý proces popsat:



Výhodou tohoto procesu je, že dochází k úplné destrukci C-C vazeb, což znamená že jediným uhlovodíkem, který zůstává v reakční směsi je metan. Jednou z nevýhod tohoto procesu však je to, že je zapotřebí mít k dispozici kyslík o čistotě 95 – 99 %, který se získává destilací vzduchu, což zvyšuje investiční i provozní náklady. [17]



(1 – generátor, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – chladič, 4 – separátor, 5 – pračka)

Obr. 29 - Schéma procesu POX [17]

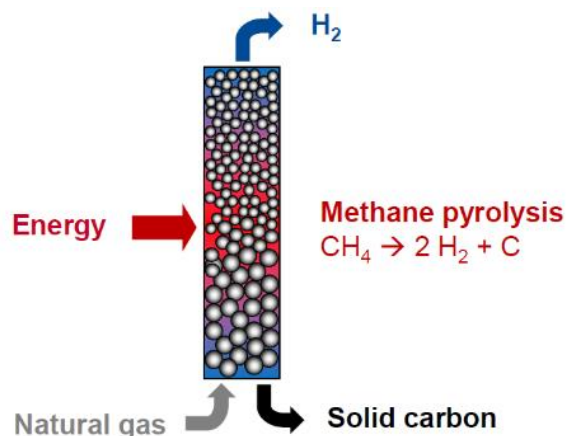
Tab. 4 - Složení plynů získaných parciální oxidací mazutu (v % obj.) [17]

Složka	Surový generátorový plyn	Za vypírkou CO ₂	Za metanizací
CO ₂	6,7	0,1	< 0,001
CO	46	0,4	< 0,001
H ₂	49,3	98,1	98,1
CH ₄	0,2	0,2	0,8
N ₂ +Ar	1,1	1,2	1,2
H ₂ S	0,7	< 0,002	< 0,002

3.3.3 Pyrolýza metanu

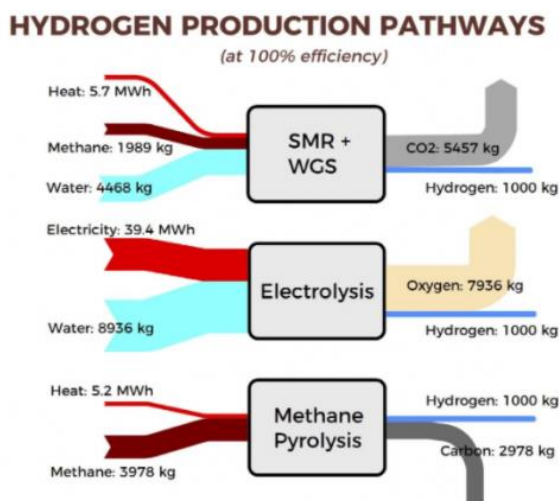
Pyrolýza metanu je poměrně nový způsob získávání vodíku ze zemního plynu. Základní princip pyrolýzy spočívá ve štěpení kratších uhlovodíků na vodík a uhlík. V současné době společnost BASF provozuje první testovací zařízení v pilotním provozu, avšak do komerčního provozu by se tato

technologie mohla dostat již po roce 2025. Vodík vyrobený pomocí pyrolýzy metanu se označuje jako tyrkysový.



Obr. 30 - Princip pyrolýzy metanu [18]

Výhodou pyrolýzy oproti parnímu reformingu je to, že v případě pyrolýzy nevzniká oxid uhelnatý, ale pouze čistý uhlík. Ten může být využitý jako cenná surovina v průmyslových odvětvích jako jsou například hutnictví či gumárenství.

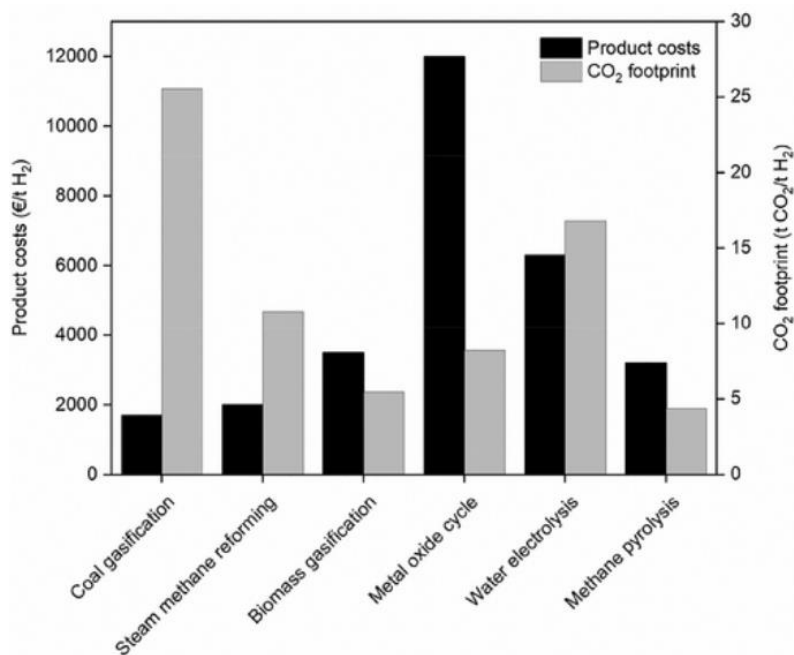


Obr. 31 - Srovnání vstupů a výstupů u parního reformingu, elektrolýzy a pyrolýzy metanu [19]

3.3.4 Srovnání různých způsobů výroby vodíku

Nejlevnějším způsobem výroby vodíku je v současné době zplyňování uhlí a parní reforming zemního plynu. Tyto dva způsoby výroby vodíku mají naopak jednu z nejvyšších emisních stop (viz obr. 11). Elektrolýza vody v tomto grafu zobrazena jako relativně drahá s vysokou emisní stopou z důvodu uvažování využití energetického mixu. V případě využití ryze obnovitelných zdrojů by emisní stopa značně poklesla.

Nutno zdůraznit, že s ohledem na současnou napjatou energetickou situaci nelze brát zde prezentované informace jako relevantní.



Obr. 32 - Srovnání výrobních nákladů a emisní stopy různých způsobů výroby vodíku [20]

V tab. 5 je uvedeno srovnání různých způsobů výroby vodíku s ohledem na účinnost přeměny vstupní suroviny na vodík. V levém sloupci je pak uvedena výsledná účinnost s využitím zachytávání ukládání uhlíku.

Tab. 5 - Srovnání energetické účinnosti různých způsobů výroby vodíku [20]

Technologie	Účinnost přeměny energie na vodík (%)	Celková účinnost s využitím CCS (%)
Zplyňování uhlí	60	43
Parní reforming ZP	75	60
Zplyňování biomasy	35 - 50	-
Termochemický rozklad vody	20 - 45	-
Elektrolýzy vody	50 - 70	-
Pyrolýza metanu	58	58

4. Výroba vodíku pomocí elektrolýzy

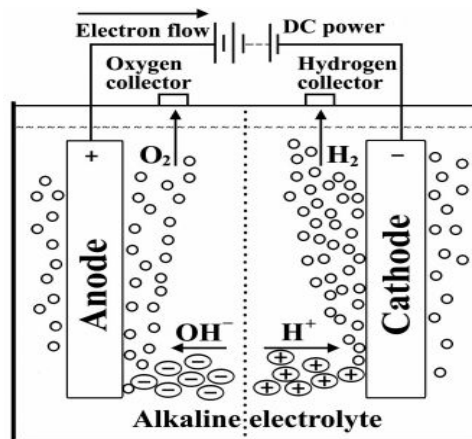
Elektrolýza je proces, kdy při průchodu stejnosměrného proudu vodným roztokem dochází k rozkladu vody na vodík a kyslík. Elektrická energie je tedy v elektrolyzáru přeměněna na energii chemickou, která je pak vázána v produktech elektrolýzy.

Obvyklá účinnost elektrolýzy se pohybuje v rozmezí 60 - 90 %. Výhodou oproti jiným způsobům výroby vodíku je, že k výrobě vysoce čistého vodíku je potřeba pouze zdroj vody (demineralizované) a elektrické energie.

Rozlišujeme několik druhů elektrolyzérů:

- **Alkalické elektrolyzéry**
- **Elektrolyzéry s protonově vodivou membránou (PEM)**
- **Vysokoteplotní elektrolyzéry**

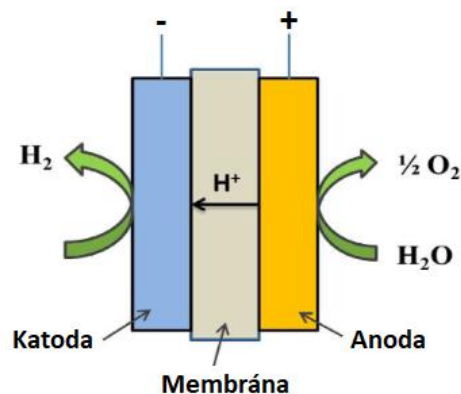
Odpadní teplo z vodíkových technologií Alkalické elektrolyzéry obsahují elektrolyt, který se skládá z vodného roztoku hydroxidu draselného (KOH). Tyto elektrolyzéry pracují při poměrně nízké proudové hustotě (< 0.4 A/cm²) a jejich účinnost se pohybuje okolo 75 %. Čistota vyrobeného vodíku dosahuje až 99,5 % (se zbytkovým obsahem vodní páry a kyslíku). K následnému dočištění vodíku se využívá katalytické spálení kyslíku a sušení. V současnosti se jedná se o nejrozšířenější druh elektrolyzérů. [1]



Obr. 33 - Schéma alkalického elektrolyzéro

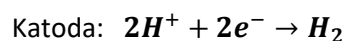
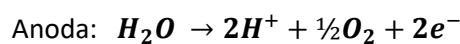
4.1. PEM elektrolyzéry

Voda v elektrolyzéro PEM reaguje na anodě za vzniku kyslíku a pozitivně nabitých iontů vodíku (protonů). Elektrony protékají vnějším obvodem a vodíkové ionty se selektivně pohybují přes PEM ke katodě. Na katodě se ionty vodíku spojují s elektrony z vnějšího okruhu za vzniku vodíku.



Obr. 34 - Schéma PEM elektrolyzéro [21]

Chemické reakce probíhající v PEM elektrolyzéro jsou:





Hlavními rozdíly elektrolyzérů PEM oproti alkalickým jsou:

- Bez využití kapalného elektrolytu, oproti tomu PEM elektrolyzéry obsahují platinu jako katalyzátor
- Menší hmotnost a rozměry
- Nižší spotřeba energie
- Vyšší čistota produkovaného vodíku
- Provoz s vysokou proudovou hustotou
- Možnost pracovat s přechodovými odchylkami v příkonu elektrického proudu (proto má vynikající flexibilitu při použití s ohledem na variabilní dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů, jako je větrná a solární energie).

4.2. Elektrolyzéry vysokoteplotní

Pro vysokoteplotní elektrolýzu, nazývanou též někdy parní elektrolýza, je charakteristické, že část dodávané energie tvoří elektrická energie a část je přivedena ve formě tepla. Reakce probíhající v elektrolyzérovi je reverzní k reakci probíhající v palivových článcích s pevnými oxidy (SOFC). Do elektrolyzérovi vstupuje pára a vodík v poměru 50:50. Vystupuje z něho obohacená směs obsahující 75 % hmotnostních vodíku a 25 % hmotnostních páry. Z ní je na anodě oddělen iont kyslíku, který prochází skrz membránu (ZrO_2). Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce. Výhodou je zvýšení účinnosti procesu díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Při růstu teploty vstupní páry klesá spotřeba elektrické energie. Celková energie mírně roste, což je způsobeno právě nutným ohřevem páry. Další výhodou spočívá v cirkulaci samotných H_2O , H_2 a O_2 bez jiných chemických látek, což odstraňuje problémy s korozí. [1]

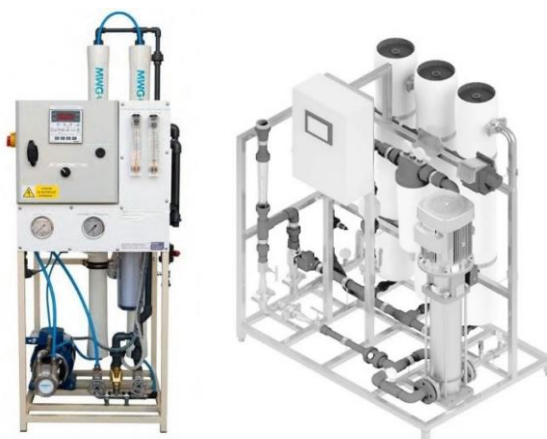
4.3. Úprava vstupní vody pro elektrolyzéry

4.3.1 Filtrační a demineralizační zařízení pro čištění vody

Elektrolyzér potřebuje ke svému provozu vysoce čistou vodu s vodivostí menší než $1 \mu S/cm^{-1}$. Požadované parametry čistoty vody jsou dány parametry použitého elektrolyzérovi. Kapacita filtračního zařízení musí umožnit trvalý provoz elektrolyzérovi. Filtrační zařízení může být součástí modulu elektrolyzérovi, nebo může být také vestavěno v samostatném objektu.

K čištění jsou využívány filtry hrubých nečistot, a také filtry využívající principů reverzní osmózy. Příkladem zařízení na čištění vody je jednotka Aquarex Vision která představuje spolehlivé řešení pro průmyslové i komerční provozy.

Velkou výhodou jednotek Vision je jejich kompaktní provedení, díky kterému zabírají jen minimum prostoru.



Obr. 35 - Příklady zařízení pro reverzní osmózu [22], [23]

Na trhu existuje několik druhů provedení, lišící se v hodinovém výkonu v rozmezí 100 až 1000 l/h. Obvyklá cena za kapacitu 1000 l/h se pohybuje okolo 250 000 Kč. [22]

4.3.2 Zásobníky technologické vody

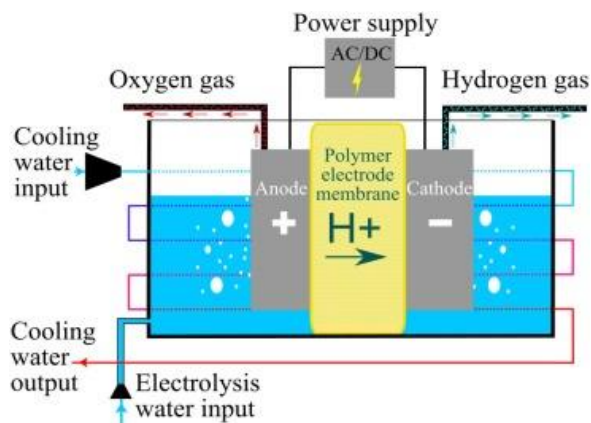
Pro zajištění maximální spolehlivosti provozu je potřeba počítat s výpadky dodávky vody, ale také s poruchou nebo údržbou filtrace vody. Z tohoto důvodu je potřeba zajistit akumulaci vody alespoň na jeden den provozu jak na straně vstupní „špinavé“ vody, tak na straně vyčištěné vody.

4.4. Tepelné hospodářství elektrolyzérů

Elektrolyzéry mohou být chlazeny buď vzduchem anebo mnohem častěji vodou. Oba způsoby chlazení konají identickou funkci, tedy odvádí odpadní teplo z elektrolyzéro a zároveň udržují konstantní teplotu nutnou pro jeho provoz.

Vzduchové chlazení elektrolyzéro je provedeno tak, že do kanálků v tělese elektrolyzéro je hnán kompresorem chladný vzduch z okolí, který se po průchodu elektrolyzéro ohřeje. Jedná se tedy o otevřený systém. Tento způsob chlazení vyžaduje s ohledem na tepelnou kapacitu vzduchu jeho relativně velký průtok.

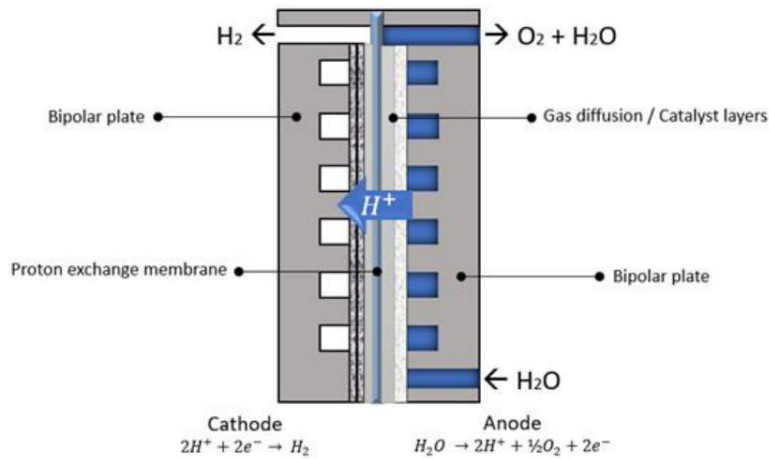
Vodní chlazení elektrolyzéro pracuje obdobně, jen s tím rozdílem, že v kanálcích proudí voda (demineralizovaná). Tento systém je uzavřený, zpravidla doplněný o výměník tepla. Průtok chladicí kapaliny zajišťuje čerpadlo. Vodní chlazení je oproti vzduchovému kompaktnější. [24]



Obr. 36 - Vodní chlazení elektrolyzéro jako samostatný okruh [25]

U obou druhů chlazení lze odpadní teplo dále využít, v současné době je však ve velké části instalací mařeno. Více o možnostech využití odpadního tepla je uvedeno v jedné z následujících kapitol.

Další možností může být využití vody zároveň jako chladiva i elektrolytu, jak je uvedeno na obr. 16 níže.



Obr. 37 - Chlazení elektrolyzérů procesní vodou [26]

4.5. Vybrané příklady dostupných elektrolyzérů na trhu

4.5.1 Siemens Silyzer 300

Jedná se o elektrolyzér typu PEM, s modulární koncepcí. Základním prvkem elektrolyzérů je samostatný článek s příkonem 0,72 MW. Články lze skládat sériově, největší současný elektrolyzér je s příkonem 17,5 MW (24 článků). Součástí dodávky je elektrolyzér, usměrňovač, transformátor a regulační systém.



Obr. 38 - Uspořádání elektrolyzérů Silyzer 300

Tab. 6 - Základní parametry elektrolyzáru Silyzer 300 [27], [28]

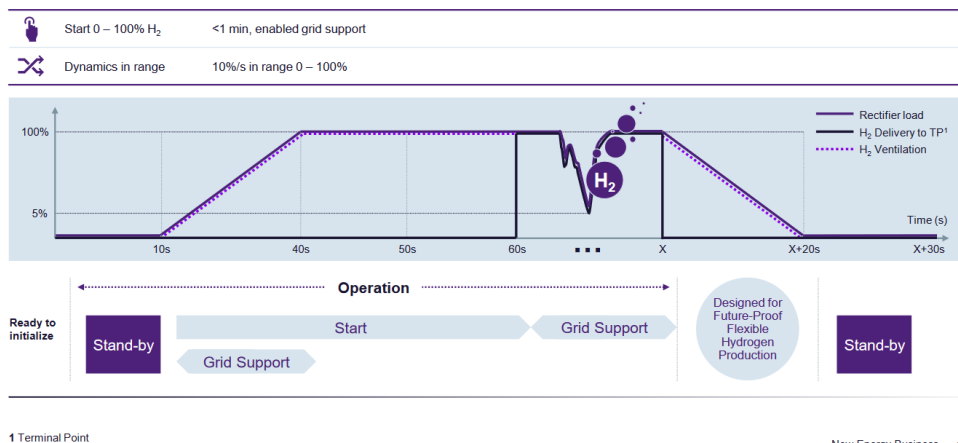
Čas najetí na 100 % výkonu	do 10 s
Dynamika	10 %/s (0 – 100 %)
Výstupní tlak	3,5 MPa (35 bar)
Výstupní teplota vodíku	80 °C
Čistota vodíku	99,5 – 99,9 %
Měrná výroba vodíku	19,6 kg/MWh
Životnost	> 80 000 hodin
Měrná spotřeba vody	17,8 l/kg H ₂
Účinnost	75,5 %
Měrná spotřeba el. energie	51,5 kWh/kg H ₂
Měrné investiční náklady	700 EUR/kW

Elektrolyzář Silyzer 300 (uvedený na obrázku níže) je součástí výzkumného projektu H2FUTURE v železárnách v rakouském Linci. Vodík vyrobený pomocí tohoto elektrolyzáru slouží k výrobním procesům v železárnách.



Obr. 39 - Budova s elektrolyzárem Silyzer 300 v rakouském Linci [29]

The Silyzer 300 enables grid support services with efficient hydrogen yield and maximum dynamics



Obr. 40 - Časový průběh najetí elektrolyzáru Silyzer 300 [30]

4.5.2 Elogen ELYTE 260

Francouzská firma Elogen se zabývá PEM elektrolyzéry pro výrobu zeleného vodíku. V nabídce mají několik kontejnerových elektrolyzérů: ELYTE 10, ELYTE 50, ELYTE 200, ELYTE 260 (číslo modelu udává maximální množství vodíku v Nm³/h) a tzv. „Open Power“ (Open Power může mít výkon až 10 MW). V tabulce níže jsou uvedeny základní parametry elektrolyzáru ELYTE 260.

Tab. 7 - Parametry elektrolyzáru Elogen ELYTE 260 [31]

Produkce vodíku	260 Nm ³ /h (cca 21 kg/h)
Produkce kyslíku	130 Nm ³ /h (cca 186 kg/h)
Provozní rozsah	2 – 100 %
Spotřeba vody	< 2 l/Nm ³ H ₂
Příkon	1 300 kW (1 680 kVA)
Celková spotřeba	4,9 kWh/Nm ³ H ₂
Čistota vodíku	99,9 % (99,999 % s čištěním)
Napájení	400 V AC nebo VN



Obr. 41 - Elektrolyzér Elogen ELYTE 260 [32]

4.5.3 H-TEC SYSTEMS HCS 10 MW

H-TEC SYSTEMS je německá firma zabývající se vývojem PEM elektrolyzérů. V nabídce mají dva druhy kontejnerových elektrolyzérů: prvním je H-TEC SYSTEMS Hydrogen Cube System (HCS) o výkonech 10, 4 a 2 MW a H-TEC SYSTEMS ME450/1400 o výkonu 1 MW. V tabulce níže jsou uvedeny základní parametry největšího elektrolyzéru HCS o výkonu 10 MW.

Tab. 8 - Parametry elektrolyzéru HCS 10 MW [33]

Produkce vodíku	2 100 Nm ³ /h (4 500 kg/den)
Výstupní tlak vodíku	15 – 30 bar(g)
Provozní rozsah	20 – 100 %
Spotřeba vody	16 kg/kg H ₂
Příkon	10 MW
Celková spotřeba	4,8 kWh/Nm ³ H ₂
Čistota vodíku	99,9 % (99,999 % s čištěním)
Rozměry	15 venkovních kontejnerů (6,8 x 2,7 x 3,2 m každý)



Obr. 42 - Elektrolyzér HCS 10 MW [33]

4.6. Současná měrná cena elektrolyzérů

Investiční náklady se liší dle typu technologie elektrolyzérů a možného příslušenství, obecně se ceny pohybují v rozmezí 29 000 až 40 000 Kč/kW. Cena samotného elektrolyzérů se přitom na výsledné ceně celého zařízení podílí zhruba z 50 %. [34]

Související investice závisí na lokálních podmínkách. Na základě již existující infrastruktury je nutno zajistit, nebo ověřit:

- Transformátor vhodný pro napájení konkrétního typu elektrolyzérů
- Potrubí pro přívod vody v dostatečném množství (cca 300 l/h při výkonu 1 MW)
- Kanalizaci pro odpadní vodu z reverzní osmózy
- Dostatek místa pro veškerou technologii

5. Skladování vodíku

Vodík lze ve velkém měřítku skladovat dvěma základními způsoby. Prvním je skladování vodíku v plynném stavu při vysokém tlaku, druhým způsobem pak skladování v kapalném stavu za nízkých teplot. Oba způsoby skladování mají své přednosti a nevýhody. Základní srovnání stlačeného a zkapalněného vodíku je uvedeno v tab. 9.

Tab. 9 - Srovnání stlačeného a zkapalněného vodíku

	Stlačený vodík	Zkapalněný vodík
Tlak	700 bar	1 bar
Teplota	25 °C	-253 °C
Hustota	42,2 kg/m ³	70,9 kg/m ³
Spotřeba energie	6 kWh/kg	12 – 15 kWh/kg
Ztráta objemu	neuvádí se	až 3 % denně



Obr. 43 - Velkoobjemový, nízkotlaký zásobník na vodík v plynném stavu

Stlačený vodík zaujímá ve srovnání s kapalným vodíkem sice větší prostor (s nižším plnicím tlakem je zapotřebí větší prostor), avšak jinak má celou řadu nevýhod. Energie potřebná pro zkapalnění může dosahovat bezmála polovinu energie skladovaného vodíku, což znamená, že kapalný vodík je vhodný pouze pro vybrané aplikace (např. vesmírné technologie).

V případě výroby zeleného vodíku se jeví jeho skladování v kapalném stavu jako energeticky nevýhodné, protože je zapotřebí vynaložit neúměrně vysoké množství energie na jeho zkapalnění, která by mohla být využita na výrobu dalšího vodíku. Za zmínku také stojí to, že i přes sebelepší izolaci dochází k vypařování části vodíku (udává se až 3 % objemu za den), který je zapotřebí z nádoby kvůli přetlaku odvést pryč. Tento vodík lze však využít, nejedná se o ztrátu vodíku, ale pouze o zmenšení skladovací kapacity.



Obr. 44 - Velkoobjemový zásobník na kapalný vodík – 3 800 m³, 270 t (NASA)

5.1. Příklady komerčních tlakových nádob

Vodíkové tlakové nádoby se dělí podle konstrukce do pěti kategorií. V tab. 10 je uvedeno srovnání všech současných typů tlakových nádob.

Tab. 10 - Typy tlakových nádob dle konstrukce a tlaků [35], [36]

Typ	Materiál	Typický tlak	Vlastnosti	Použití
Typ I	Ocel, hliník	175 – 200 bar	Vysoká hmotnost, vnitřní koroze, malá kapacita	Stacionární použití
Typ II	Kovová nádoba obalená kompozitním materiálem	263 – 299 bar	Vysoká hmotnost, krátká životnost, vodíková křehkost	Průmysl
Typ III	Kovová vložka + kompozit	305 – 700 bar	Nízká hmotnost, vysoký tlak při roztržení, bez prostupnosti vodíku	Vozidla
Typ IV	Polymery vyztužené uhlíkovými vlákny	700 bar	Nízká hmotnost, nižší tlak při roztržení, prostup vodíku skrze stěny	Vozidla
Typ V	Celokompozitní	1 000 bar	Vysoký tlak, vysoká hustota energie	Vozidla

5.1.1 Ocelové tlakové nádoby

Pro nenáročné stacionární vodíkové aplikace postačují menší ocelové tlakové láhve, které jsou plněny vodíkem o tlaku až 300 bar. Nevýhodou těchto láhví je relativně velká hmotnost. Láhve plněné vodíkem jsou označeny červenou barvou.

Obvyklý vodní objem ocelových láhví je 50 l, přičemž jedna taková láhev pojme při tlaku 200 bar zhruba 0,78 kg vodíku (8,8 Nm³). Hmotnost prázdné láhve je 65 kg. [37]

Většinou jsou však tyto láhve spojeny do tzv. svazku, typicky o dvanácti láhvích (obr. 24). V takovém případě je pak svazek schopen pojmout až 9,36 kg vodíku (při 200 bar).



Obr. 45 - Svazek 12-ti tlakových láhví o celkovém vodním objemu 600 l (12x50 l)

5.1.2 Kompozitní zásobník vodíku

Pro náročnější aplikace jsou vhodné tlakové láhve vyrobeny z kompozitních materiálů. Výhoda kompozitu spočívá především v nižší hmotnosti a vyšším plnicím tlaku ve srovnání s ocelovými lahvemi. Kompozitní láhve nalézají své uplatnění především v oblasti dopravy.



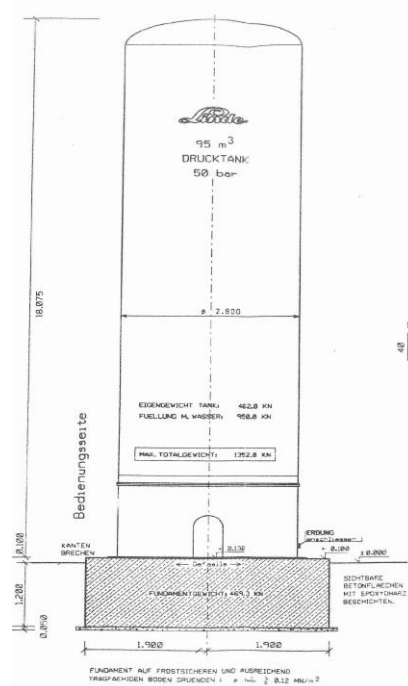
Obr. 46 - Vysokotlaký zásobník vodíku

Na obr. 25 je uveden příklad svazku vysokotlakých nádrží na vodík od firmy MAHYTEC. Objem jednotlivých nádrží se může dle varianty pohybovat od 160 l do 300 l. Jedna nádrž o objemu 300 l pojme při tlaku 500 barů zhruba 9,5 kg vodíku. Jako konkrétní příklad využití těchto nádrží využití lze uvést plnicí stanice pro automobily.

Tab. 11 - Základní parametry jedné vysokotlaké nádrže o objemu 300 l [38]

Obsah vodíku (500 bar, 15 °C)	9,5 kg
Maximální provozní tlak	500 bar
Vodní objem	300 l
Rozměry nádrže	Ø 49 cm x 307 cm
Materiál nádrže	kompozit
Životnost	10 let nebo 5 000 cyklů

5.2. Současné ceny skladovacích zařízení pro vodík



Obr. 47 - Zásobník o objemu 95 m³ a tlaku 50 bar

Na obr. 26 je uveden příklad zásobníku stlačeného vodíku o vodním objemu 95 m³ a tlaku 50 bar. Cena jednoho takového zásobníku činí zhruba 5 mil. Kč. [34] Při plnicím tlaku 45 bar plný zásobník obsahuje 375 kg vodíku, což znamená 4200 Nm³ při 15°C.

Kromě uvedeného velkoobjemového zásobníku existuje i celá řada vysokotlakých skladovacích nádob. Jako příklad lze uvést stacionární kontejner o rozměru 20ti stop, který obsahuje 95 tlakových lahví s plnicím tlakem 200 bar o vodním objemu 200 l. Cena takového řešení je okolo 3,7 mil. Kč. Druhá možná varianta se skládá rovněž z 95 tlakových lahví, ovšem s plnicím tlakem 300 bar a vodním objemem 150 l. Cena takového kontejneru pak činí téměř 4 mil. Kč.

Řešením pro menší objemy skladovaného vodíku mohou být svazky tlakových lahví o vodním objemu 50 l s plnicím tlakem 500 bar. Existují dvě varianty, jedna s 12ti tlakovými lahvemi (celkově 600 l) a druhá s 16 lahvemi (800 l). Cena menší varianty se pohybuje okolo 525 tis. Kč, u větší varianty pak okolo 700 tis. Kč.

Řešením pro přepravu vodíku může být trailer, jako příklad lze uvést model se 125 tlakovými lahvemi o vodním objemu 240 l a plnicím tlakem 200 bar. Přepravované množství vodíku v takovémto traileru může dosahovat až 500 kg. Cena takového řešení je 6 mil. Kč.



Obr. 48 - Příklad silničního traileru pro přepravu vodíku

6. Přeprava vodíku

Vodík je běžně přepravován buď pomocí dálkových plynovodů anebo jako uskladněný v tlakových nádobách. Přeprava plynovody je výhodná při kumulaci mnoha výrobců a spotřebitelů v jedné lokalitě. Významná je například síť v Německu o délce cca 200 km a provozním přetlaku 2,5 MPa. Průměr potrubí činí 20 cm, přičemž přepravní kapacita sítě dosahuje 50 mil. m³ za hodinu. Provozní ztráty při přepravě se pohybují kolem 1 %.

Další, i když menší sítě, se nacházejí například v USA, Francii či Velké Británii. U přepravy plynovody způsobuje největší problémy vodíkové křehnutí a vodíková koroze materiálu spolu s požadavky na těsnost zařízení. Přeprava v tlakových nádobách probíhá v plynném nebo kapalném skupenství. Pro přepravu vodíku v plynném stavu se používá bateriových vozů s tlakem nejčastěji 20 – 60 MPa. Pro přepravu v kapalném stavu se obvykle používají dvouplášťové vakuové zásobníky. Kvalita izolace musí být taková, aby vodík v kapalném stavu vydržel po dobu několika dní. [5]

6.1. Přeprava vodíku plynovody

Ve většině případů jsou místa výroby a spotřeby vodíku od sebe vzdálena, takže vodík je nutno přepravovat, což dále zvyšuje jeho cenu pro koncového uživatele. Nejeefektivnějším způsobem dopravy vodíku je využití plynovodů. Výstavba nových liniových staveb je poměrně investičně náročná a dá se uskutečnit teprve tehdy, když existuje stabilní a jasné legislativní a regulatorní prostředí pro výstavbu vodíkových sítí. Také musí být známo jaká množství vodíku budou dlouhodobě přepravována/distribována. Je nutné počítat s tím, že výstavba nového plynovodu je záležitostí několika let. Pravděpodobnější variantou bude možnost upravit stávající plynovody na zemní plyn na přepravu vodíku, což je rychlejší a levnější než pokládka nového potrubí, tato úprava (repurposing) ale musí být časově sladěna se současným nastavením přepravních kontraktů, na které je použití některých plynovodů v ČR částečně navázáno.

Pro přepravu čistého vodíku je nutné buď vybudovat zcela novou infrastrukturu, speciálně navrženou pro vodík, nebo upravit tu stávající, která není využita pro přepravu zemního plynu. Úprava existující infrastruktury je vždy nákladově výhodnější.

Do budoucna se předpokládá, že, Evropská přepravní soustava pro vodík by mohla být až ze tří čtvrtin založena na již existující infrastruktuře, zbývající čtvrtinu bude nutné nově vybudovat.

V některých evropských zemích existují provozní zkušenosti s plynovody postavenými nově za účelem dopravy čistého vodíku. Budování nových plynovodů mimo stávající trasy však může narážet na řadu

typických komplikací spojených s jejich výstavbou, tak jako tomu je u různých druhů nově budované liniových staveb technické infrastruktury, a to zejména z důvodů zajišťování nezbytných věcných břemen k pozemkům. Problematické mohou být i relativně vysoké investiční náklady na novou stavbu. Výhodou je naopak plynovod navržený plně dle požadavků na dopravu vodíku. [39]

6.2. Doprava stlačeného vodíku po silnici či železnici

V současné době se vodík nejčastěji přepravuje jako stlačený plyn v tlakových nádobách vyrobených z oceli nebo kompozitních uhlíkových vláken. Vodík v tlakových nádobách lze přepravovat v tlakových lahvích při tlaku 200 bar. Čtyřicetitunový kamion může na čerpací stanici dopravit 26 tun benzínu. Stejný kamion vezoucí stlačený vodík může převést 500 kg vodíku (v tlakových lahvích při tlaku 200 bar). To proto, že tlakové nádoby musí vydržet velmi vysoký tlak. Kamion s vodíkem váží téměř stejně jako kamion bez vodíku, rozdíl je jen těch 500 kg. Nádrž na stlačený vodík je robustní. Kvůli nízkému množství vodíku přepravovaného v jednom návěsu je tento způsob přepravy ekonomický pouze do vzdálenosti kolem 150 km.



Obr. 49 - Příklad vodíkového traileru se svazkem deseti ocelových tlakových lahví

Nevýhodou dopravy v tlakových nádržích je nutnost úpravy vodíku pro transport, neboli jeho stlačení na 200 bar. Následně se tento tlak jen obtížně využije v místě spotřeby, protože dojde-li k přepuštění do nádrže s nižším tlakem, je energie vložena do komprese ztracena. Tento moment je možno proto chápat jako energetické zatížení vodíkového řetězce. Transport samotný představuje zatížení jak energií vlastní dopravy, tak i z hlediska ochrany životního prostředí a cílů nízké emisní dopravy.

6.3. Přeprava kapalného vodíku po silnici či železnici

Alternativní cestou, která by mohla výrazně zvýšit množství přepravovaného vodíku, je jeho zkapalnění. Kapalným vodíkem je skladován při teplotě -253 °C . S tím souvisejí zvýšené nároky na použité materiály a vysoké energetické nároky na zkapalnění, zásadní nevýhodou je tedy ztráta kolem 40 % energie při samotném zkapalňování. K dalším ztrátám dochází díky únikům způsobeným nezbytným odparem kapalného vodíku z kryogenních nádrží, které nejsou tlakovými nádobami. Tento odpar je kontrolovaný a nemá vliv na bezpečnost přepravy.

6.4. Doprava vodíku plynovody ve směsi se zemním plynem

V podmínkách ČR je reálné postupné přimíchávání vodíku do stávající infrastruktury. Plynárenská soustava ČR je po technické stránce prakticky připravena na přepravu, distribuci a skladování

zemního plynu s příměsí H₂ až do výše 2 % (viz ČPS). Teoreticky jsou však možné i vyšší poměry vodíku (při současné úrovni poznání se nejčastěji hovoří o 10 %) s technickými úpravami menšího rozsahu.

Omezení množství vodíku přidaného do zemního plynu je dáno hlavně omezeními na straně koncových spotřebičů. Výhodou by tato forma přepravy poskytovala v případě, že by na jejím konci byl vodík využíván spolu se zemním plynem pro spalování. V opačném případě bude záležet na technické dokonalosti zpětného rozdělení směsi, oddělení vodíku od zemního plynu.

Vodík má při stejném tlaku a objemu nižší výhřevnost než zemní plyn (okolo 30 % výhřevnosti zemního plynu). Při prodeji plynu zákazníkům to nezpůsobí problém, protože již dnes se cena za dodaný plyn účtuje v energetických jednotkách (dodaných KWh) podle jeho výhřevnosti a používané fakturační systémy musí měnit výhřevnost plynu na základě změřené skutečnosti. Pro dodání stejného množství tepla je nutné dodat více vodíku než zemního plynu. Výhodou vodíku je, že má menší odpor při průtoku potrubím a směs zemního plynu s vodíkem může proto téct rychleji. Stávající průtočná kapacita potrubí nepředstavuje pro směs zemního plynu a vodíku omezení z hlediska množství přepravovaného tepla.

Přeprava potrubím se začíná vyplácet při vysokých objemech a také v případě větší koncentrace výrobců a spotřebitelů v jednom regionu. Podle současných kalkulací vychází, že pro přepravu 100 000 tun vodíku lze použít 1 200 vagónů, 600 lodí, nebo 82 cm široké potrubí (Německá vodíková strategie).

6.4.1 Oddělení vodíku od směsi se zemním plynem s využitím membránové separace

Přechodným řešením může být využít stávající sítě pro zemní plyn, do které se bude vtláčet vodík. Místo toho, aby se vodík spálil společně se zemním plynem, oddělí se membránovou separací před následujícím větvením přepravní sítě. Zemní plyn a vodík se pak využívají odděleně a zemní plyn se používá jen jako transportní medium.

7. Komprese vodíku

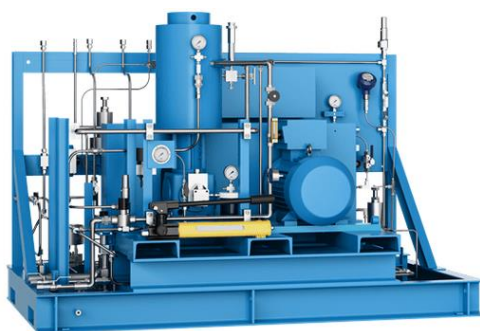
Pro skladování vodíku je nutné jej stlačit na relativně vysoký tlak (200 – 900 bar). Na vodíkové kompresory jsou kladeny zvlášť vysoké požadavky, mezi které patří zejména vysoký výstupní tlak a také nulové znečištění stlačovaného vodíku (např. olejem). Existuje několik druhů vodíkových kompresorů, mezi základní se řadí pístové a membránové kompresory.

V následující části je uvedeno několik konkrétních modelů vodíkových kompresorů.

7.1. Vysokotlaké kompresory vhodné pro plnicí stanice

7.1.1 Kompresory Mehrer řady MRX1300/MHX1300

Jedná se o membránový kompresor od německé firmy Mehrer, jehož maximální výstupní tlak může dosahovat až 1000 bar. Obě varianty se liší pouze horizontálním nebo vertikálním uspořádáním.



Obr. 50 - Membránový kompresor MRX 1300/MHX 1300 [40]

Tab. 12 - Parametry kompresor MRX 1300/MHX 1300 [40]

Výstupní tlak	až 1000 bar
Výkon	160 kW
Počet stupňů	1 nebo 2
Kompresní poměr (na stupeň)	1:10

7.1.2 Hiperbaric – Kompresní stanice „Puertollano Hydrogen Station“

Španělská firma Hiperbaric je světovým leaderem v oblasti vysokotlakých technologií. Kompresní stanice „Puertollano Hydrogen Station“ umožňuje stlačit až 260 kg vodíku denně na tlak až 1 000 bar. Stanice najde své uplatnění zejména v oblasti vodíkových vozidel.



Obr. 51 - Kompresní stanice Puertollano Hydrogen Station [41]

7.2. Středotlaké kompresory vhodné pro plnění trailerů

7.2.1 Mehrer MHE 400-22Ex

Jedná se opět o výrobek firmy Mehrer. Tento kompresor má maximální výstupní tlak 350 bar, díky čemuž je vhodný pro plnění trailerů nebo jiných tlakových láhví na této tlakové hladině.



Obr. 52 - Kompresor Mehrer MHE 400-22Ex [42]

Tab. 13 - Parametry kompresoru MHE 400-22Ex [42]

Výstupní tlak	350 bar
Vstupní tlak	40 – 100 bar
Výkon	22 kW
Kapacita	173 Nm ³ /h

7.3. Nízkotlaké kompresory vhodné pro plnění velkoobjemových zásobníků

7.3.1 Atlas Copco 1 EHN2 GT

Výstupní tlak tohoto kompresoru od firmy Atlas Copco je poměrně nízký (57 bar), což ale plně postačuje pro plnění velkoobjemových nízkotlakých zásobníků (do tlaku 50 bar).



Obr. 53 - Kompresor Atlas Copco 1 EHN2 GT [43]

Tab. 14 - Parametry kompresoru 1 EHN2 GT [43]

Výstupní tlak	57,2 bar
Vstupní tlak	24 bar
Kapacita	13 150 Nm ³ /h

8. Využití vodíku

8.1. Využití vodíku v průmyslu

Největší část vyrobeného vodíku se v současnosti spotřebovává v průmyslu. Vodík zde slouží v především jako reakční činidlo nebo palivo v celé řadě odvětví, avšak nelze opomenout ani na jeho menší, zato důležitá uplatnění. Výčet průmyslových oblastí, ve kterých se používá vodík je následující: [44]

- **Metalurgický průmysl** – součást ochranných atmosfér nebo jako redukční činidlo, vodík lze využít i k výrobě surového železa
- **Sklářský průmysl** – součást ochranné atmosféry cínové lázně při výrobě plochého skla nebo jako topné médium pro zpracování tvrdých skel plamenem
- **Potravinářský průmysl** – výroba ztužených jedlých tuků hydrogenací rostlinných olejů
- **Elektrotechnický průmysl** – součást ochranné atmosféry při výrobě integrovaných obvodů
- **Energetika** – použití pro chlazení alternátorů v elektrárnách z důvodu vysoké tepelné vodivosti
- **Chemický průmysl** – syntéza čpavku a metanolu
- **Kosmický program** – palivo k pohonu raket

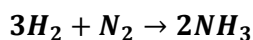
Vodík vyrobený pomocí elektrolýzy dosahuje poměrně vysoké čistoty, tudíž se nabízí celá řada možností jeho využití. Nejčistší vodík lze využít v zejména v palivových článkách, které jsou na nečistoty právě nejvíce náchylné. Méně kvalitní vodík lze pak využít v průmyslu (např. výroba anilínu, hnojiv a v budoucnu i oceli).

8.1.1 Výroba amoniaku

Největší část vyrobeného vodíku (okolo 50 %) se spotřebuje na výrobu amoniaku (NH₃).

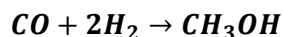
Amoniak je bezbarvý, toxický, velmi štiplavý plyn. Používá se zejména na výrobu hnojiv pro zemědělství (80 %). Uvádí se, že více než 1 % vyráběné energie lidstvem se spotřebuje právě na výrobu amoniaku.

Průmyslově se amoniak vyrábí katalytickým slučováním dusíku a vodíku za vysokého tlaku (200 až 1000 bar) a vysoké teploty (více než 500 °C). Jako katalyzátor se používá houbové železo. Tato metoda výroby amoniaku se nazývá Haberova–Boschova syntéza.



8.1.2 Výroba metanolu

V současné době se metanol vyrábí převážně pomocí katalytické hydrogenace oxidu uhelnatého z vodního plynu (směs vodíku a oxidu uhelnatého) za vysokých tlaků a teplot.



Metanol má v průmyslu celou řadu využití. Jako příklad lze uvést jeho využití při výrobě bionafty z řepkového oleje, případně jako součást pohonných látek. Kromě jiného existují i palivové články, které umožňují použití metanolu jako jejich palivo. Při provozu takového palivového článku pak vzniká na rozdíl od vodíkového palivového článku i oxid uhličitý.

8.1.3 Výroba oceli

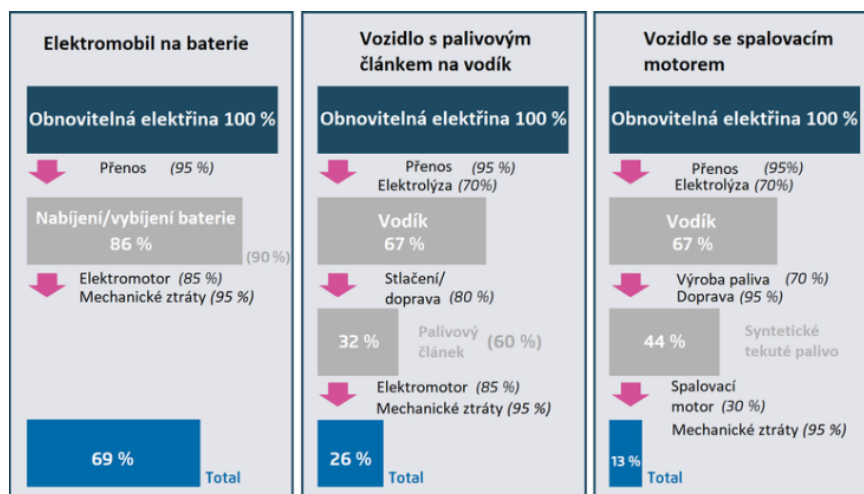
Jako velice perspektivní způsob výroby surového železa se jeví využití vodíku. Na výrobu 1 tuny surového železa postačí zhruba 90 kg vodíku. Redukcí vodíkem však nejprve vznikne tzv. železná houba, kterou je nutné dále zpracovat v elektrických obloukových pecích. V roce 2018 byl zahájen pilotní projekt výroby bezemisní oceli v závodě SSAB ve švédském městě Luleå.

8.2. Doprava

Přestože jsou často do vodíkové dopravy vkládají velké naděje, tak v době řešení energetické krize 2022 je nutné upřednostnit využití vodíku, které je maximálně efektivní a zatím nemá jiné uspokojujivé alternativní řešení. Z tohoto důvodu se aktuální vodíková vize EU z prosince 2021 soustředí zejména na těžký průmysl, jako je například ocelářství či chemický průmysl. Tato odvětví, na rozdíl od dopravy, nelze zcela elektrifikovat a potřeba tekutých a plynových paliv jako zdroj pro vysokoteplotní procesy zde bude i nadále přetrvávat. Pro určení "nevyhnutelného" použití vodíku se zavedl termín "no regret" (= bez lítosti). Scénáře obsahující "no regret" jsou založeny na analýzách a reportech mnoha vodíkových studií a výzkumů. Pokud se většina zdrojů shodne na nutnosti použití vodíku, daný proces/aplikace dostane označení "no regret".

V současné době "no regret" aplikace a procesy pro vodík jsou průmyslová reakční činidla a suroviny, letecká doprava na dlouhé vzdálenosti, námořní doprava, záloha pro obnovitelné zdroje a velké topné sítě. [45], [46]

Základní problém vodíkové dopravy je energetická efektivita ve srovnání s elektromobily napájenými bateriemi.



Obr. 54 - Porovnání účinnosti vybraných pohonů využívajících elektřinu [47]

Na obrázku jsou energetické ztráty vznikající s každou přeměnou energie. Z čisté elektřiny se „na kola“ dostane u čistého elektromobilu 69 % energie, u elektromobilu s palivovým článkem 26 % a u auta se spalovacím motorem 13 %. Na ujetí stejné vzdálenosti vozidlo s vodíkovým palivovým článkem potřebuje více než dvojnásobek elektřiny, než klasický elektromobil. Vozidlo se spalovacím motorem využívající syntetická paliva potřebuje na ujetí stejné vzdálenosti dokonce pětinasobně více elektřiny, než elektromobil s bateriemi. Nejvyšší účinnosti by naopak dosáhla trolejová vozidla, kde z řetězce odpadá i baterie.

Vodíková pozemní doprava je tedy funkční. Jako hlavní výhoda se zde uvádí vyšší dojezd a rychlost doplňování energie. Dokud ale nebude k dispozici dostatek čistých zdrojů energie pro průmysl, energetiku i dopravu, měla by být upřednostněna energetická efektivita dopravy. V tomto parametru jsou zatím nejlepší bateriové elektromobily.



Obr. 55 - Vodíková pozemní doprava [48]

Existují ale segmenty dopravy, které zatím není možné uspokojivě vyřešit bateriovými zásobníky energie. Zde je prioritou technická realizovatelnost.

8.2.1 Dálková letecká doprava

Letadla s bateriovým zdrojem energie jsou zatím limitována doletem řádově stovky kilometrů. Při současných parametrech baterií je realizovatelný dolet maximálně 1000 km. Pro větší vzdálenosti je bezemisní alternativou vodík, nebo syntetická paliva.

Existují prototypy malých vodíkem napájených letadel. Existují ale i projekty větších dopravních letadel. Například Airbus vyhlásil plány, kde letadla s vodíkovým pohonem určená pro běžné cestující by podle něj měla vzlétnout do roku 2035. Jedna z navrhovaných konstrukcí poháněná speciálními vrtulemi a plynovou turbínou by mohla přepravit až 200 cestujících na vzdálenost více než 3 000 kilometrů. Motory těchto strojů by kombinovaly energii vzniklou spalováním vodíku a elektřiny z vodíkových článků. Airbus připustil, že jedním z problémů tohoto řešení je nutná investice do infrastruktury letišť, aby bylo možné bezpečně tankovat tekutý vodík.



Obr. 56 - Koncepty vodíkových letadel Airbus [49]

8.2.2 Dálková lodní doprava

Zaoceánské lodě mají energetické nároky, které také přesahují možnosti dnešních baterií. Alternativou fosilních paliv pak může být opět vodík, nebo syntetická paliva.



Obr. 57 - Nákladní loď poháněná vodíkem [50]

8.3. Zařízení pro výrobu elektrické energie z vodíku

8.3.1 Vodíkové elektrocentrály

Vodíkové elektrocentrály je možné realizovat ve venkovním i vnitřním provedení. Instalace obsahuje moduly palivových článků, podpůrná zařízení, včetně ŘS a tlakových zásobníků H_2 . Příkladem vodíkového generátoru může být generátor H2BASE.

Jedná se o generátor elektrické a tepelné energie s vodíkovým palivovým článkem. V základní konfiguraci je systém vybaven tlakovými lahvemi s kapacitou 14,1 kg při tlaku 500 bar. Tento vodík obsahuje 469,5 kWh energie. Výstupem pak je až 230 kWh elektrické energie a 230 kWh tepla. Palivový článek o výkonu až 30 kW společně s vyrovnávací baterií 8,5 kWh je schopen zajistit nepřetržitou dodávku elektrické energie.



Obr. 58 - Mobilní instalace vodíkového generátoru

8.3.2 Vodíkové zdroje záložního napájení

Dalším příkladem využití malých vodíkových generátorů může být zálohování zařízení s požadavkem na nepřerušené napájení. Praktickým příkladem mohou být základnové vysílací a přijímací stanice BTS s typickou spotřebou 3 kW. Při spotřebě 0,06 kg H₂/kWh je pro splnění minimálního požadavku zálohování 2 hodiny potřeba 0,38 kg H₂. Doba zálohování může být ale podstatně delší. Pro 24 h zálohu je pak potřeba 4,5 kg vodíku, který může být skladován například v šesti lahvích při tlaku 200 bar.



Obr. 59 - Stacionární instalace vodíkového generátoru

8.3.3 Elektrické generátory na lodích

Vodíkové generátory je možné realizovat i v řádech MW. Příkladem může být náhrada diesellových agregátů na lodích. Lodě zakotvené v přístavišti musí pro své systémy (manipulační jeřáby, osvětlení, elektronika, atd.) vyrábět elektrickou energii pomocí diesellových generátorů. Odhaduje se, že lodě tímto způsobem vytvářejí třetinu až polovinu všech emisí produkovaných přístavou. Vodíkové generátory by tedy umožnily v přístavech snížit množství emisí.

Palivové články a nádrže s vodíkem mají být umístěny ve standardních námořních kontejnerech o délce 40 stop. Ve své podstatě, kontejnery mají sloužit jako obří baterky pro lodě. Pro středně velké kontejnerové lodě se počítá se čtyřmi kontejnery. Dva poslouží jako nádrž s vodíkem a dva jako palivové články. Podle propočtů podobná kombinace může produkovat po dobu 48 hodin elektrický výkon až 1,4 MW. Pro menší lodě pak postačí kombinace „1+1“ kontejner. Umístění palivových článků a nádrží do námořních kontejnerů má obrovskou výhodu. Veškerá lodní a přístavní infrastruktura (např. jeřáby) je dimenzovaná právě pro manipulaci s lodními kontejnery. Nakládka nebo výměna prázdných nádrží s vodíkem do a z lodi je tak otázkou doslova několika minut. [51]

8.3.4 Vodíkové kogenerační jednotky

Velice efektivním způsobem využití vodíku je kombinovaná výroba elektrické energie a tepla v kogenerační jednotce tvořené palivovými články.

Jako konkrétní příklad provedení kogenerační jednotky lze uvést model z řady PemGen CHP-FCPS-500 od firmy Nedstack (obr. 39) v kontejnerovém provedení. [52]



Obr. 60 - Vodíková kogenerační jednotka řady PemGen [52]

Tento kontejner má jmenovitý elektrický výkon 500 kW_e , přičemž špičkový výkon dosahuje až 626 kW_e . Maximální spotřeba vodíku při plném výkonu dosahuje 40 kg/h , za současného vzniku tepelné energie v množství až 900 kW_t , z čehož je možno dále využít množství přesahující 400 kW_t .

Kontejner o standartním rozměru 20 stop obsahuje 60 dílčích modulů palivových článků FCS13-XXL (každý o výkonu až 13 kW_e).

9. Kyslík jako vedlejší produkt elektrolýzy

Kromě samotného vodíku produkují elektrolýzéry i kyslík. Jelikož kyslík není v tomto případě energeticky využitelný, je tedy mnohdy nezajímavý. Velmi často proto bývá vypouštěn bez užitku do okolního atmosféry. Pokud by však byl elektrolýzér umístěn v bezprostřední blízkosti vhodného (nejen) průmyslového objektu, bylo by možné jej efektivně využít. Vybranými možnostmi využití kyslíku jsou:

- **Potravinářský průmysl** - Chov ryb, výroba ozónu (odstranění hmyzu a sterilizace při výrobním procesu), balení v modifikované atmosféře.
- **Výroba oceli** - obohacení vzduchu ke zvýšení spalovací teploty ve vysokých pecích, v kyslíko-konvertorových ocelárnách, v elektrických obloukových pecích (EOP).
- **Kovovýroba** - zvýšení spalovací teploty při řezání a svařování.
- **Chemický průmysl** - oxidace vstupních surovin např. při výrobě kyseliny dusičné, ethylenoxid, propylenoxid, monomerní vinylchlorid atd., ke zvýšení kapacity a účinnosti rozkladu spaloven odpadů.
- **Papírenský průmysl** - odstranění ligninu, bělení, oxidační extrakce, chemická regenerace, oxidace louhu atd.
- **Výroba skla** - podpora spalování ve sklářských pecích, snižování produkce emisí oxidů dusíku (NO_x)
- **Ropný průmysl** - zvýšení kapacity krakování s fluidním katalyzátorem, snížení emisí síry v rafineriích
- **Vodárenství** - využití k úpravě vody v ČOV

- **Zdravotnictví** - resuscitace, anestézie, podpora životních funkcí při léčbě respiračních onemocnění
- **Energetika** - podpora hoření v elektrárnách.
- **Potápění** – součást různých směsí pro potápění (např. Nitrox – 32 % kyslíku a 68 % dusíku, pro extrémní ponory byl použit Hydreliox – 0,56 % kyslíku, 71,27 % hélia a 28,17 % **vodíku**).

V následující části jsou uvedena odvětví, která jsou zvláště výhodná pro využití odpadního kyslíku z elektrolyzérů.

9.1. Využití kyslíku ve zdravotnictví

Pro zdravotnické účely je kyslík skladován v kapalné formě ve venkovních kryogenních zásobnících (nutnost kvalitní izolace). Používá se pro zejména pro podporu dýchání případně v přetlakových komorách při otravě např. oxidem uhelnatým (CO).

Pro menší spotřebu se dodává v tlakových láhvích (200 bar) nebo ve svazcích 12-ti láhví s obsahem cca 130 m³ plynného kyslíku. V případě větší spotřeby (typicky velké nemocnice) je dodáván v kapalné formě. V takovém případě je v nemocnici stabilní kryogenní zásobník s odpařovačem, do kterého se kyslík v kapalné formě zaváží cisternou. Z 1 litru kapalného kyslíku se odpaří 853 litrů plynného kyslíku (za atm. tlaku a 15 °C).

9.2. Využití kyslíku ve vodárenství

V případě přetížení čistírny odpadních vod (ve smyslu vysoké koncentrace organických látek) je možné využít přimíchávání kyslíku do biologické části čistírny.

„Čistý kyslík se v nádržích s aktivovaným kalem rozpouští několikanásobně rychleji než vzduch. Ten navíc obsahuje 78 procent balastního dusíku, který naopak procesy brzdí. Kyslíkem lze řídit optimální prostředí pro aktivitu mikroorganismů a urychlit tak procesy nitrifikace, denitrifikace a odbourávání rozpuštěných nečistot. Tím je docíleno zvýšení kapacity komunálních čistíren až o 20 % bez nutnosti zvětšování nádrží. U průmyslových čistíren, kde je voda více znečištěná, může nasazení kyslíku navýšit kapacitu až o 50 %.

Technologie se díky tomu vyplatí. Výsledná kvalita výstupní vody splňuje nejpřísnější normy a náklady na instalaci a provoz nepřesahují horní hranice možných pokut, které by firma zaplatila v případě vypouštění špatně vyčištěné vody.

Sycení plyny se dá se aplikovat do všech stávajících čističek, bez nutnosti úprav. Pouze je potřeba instalovat stacionární zásobník plynu a panel s řídicí jednotkou, která čidly snímá informace o vlastnostech odpadní vody a podle potřeby dávkuje množství plynu probublávajícího vodou.“ [53]

9.3. Kyslíkem obohacené spalování

Efektivitu spalovacích zařízení lze zlepšit zvýšením koncentrace kyslíku ve spalovacím zařízení. Vzduch je tvořen z 21 % kyslíkem, 78 % dusíkem a 1 % ostatními plyny. Při spalování je část energie ze spalovacího zařízení odvedena prostřednictvím horkých spalin. Zvýšením podílu kyslíku lze snížit energetické ztráty, čímž se zvýší tepelná účinnost. Koncentrace kyslíku se dosáhne buď přidáním kyslíku do vzduchu vstupujícího do spalovacího procesu, nebo naopak odebráním dusíku pomocí adsorbčního zařízení.

Výhody spalování při vyšší koncentraci kyslíku jsou:

- **Zvýšení účinnosti** – menší koncentrace dusíku ve spalinách, který zbytečně vynáší teplo.
- **Snížení emisí** – lze dosáhnout nižších emisí oxidů dusíku, oxidu uhelnatého a uhlovodíků ve spalinách.
- **Zlepšení stability hoření** – vyšší teplota spalování a stabilnější plamen.

9.4. Cena kyslíku na trhu

Nabídka firmy Linde - kyslík 2.5 – svazek (600 l, 12 x 50 l lahví, 200 bar)



Obr. 61 - Svazek tlakových lahví s kyslíkem

Parametry kyslíku ve svazku:

- Čistota 99,5 %
- Objem plynu v jedné 50 l láhvi při 200 bar cca 10 m³ (udává se 10,8 m³)
- Hustota kyslíku: 1,429 kg/m³ (při atm. tlaku)
- Hmotnost kyslíku v jedné láhvi: cca 15 kg
- Hmotnost plynu ve svazku tlakových lahví: cca 180 kg (téměř 130 Nm³)

Cena svazku dne 26.9.2022 byla **17 900 Kč** (bez DPH). 1 kg kyslíku tedy vychází při uvedené ceně na cca 100 Kč (bez DPH). [54]

9.5. Průmyslová výroba kyslíku

V průmyslovém měřítku se kyslík vyrábí zásadně destilací zkapalněného vzduchu. Po zkapalnění vzduchu se pomocí frakční destilace posléze oddělí kyslík. Čistota takto vyrobeného kyslíku se pohybuje okolo 99 %.

Energie potřebná pro zkapalnění vzduchu se uvádí v rozpětí 4 300 – 6 500 kJ/kg, což by odpovídalo 1,19 – 1,81 kWh/kg. Celková energie potřebná pro výrobu kyslíku bude však mnohem vyšší. [55]

Využitím odpadního kyslíku z elektrolyzérů lze dosáhnout vyšší čistoty vyrobeného kyslíku a také značné energetické úspory.

10. Odpadní teplo z vodíkových technologií

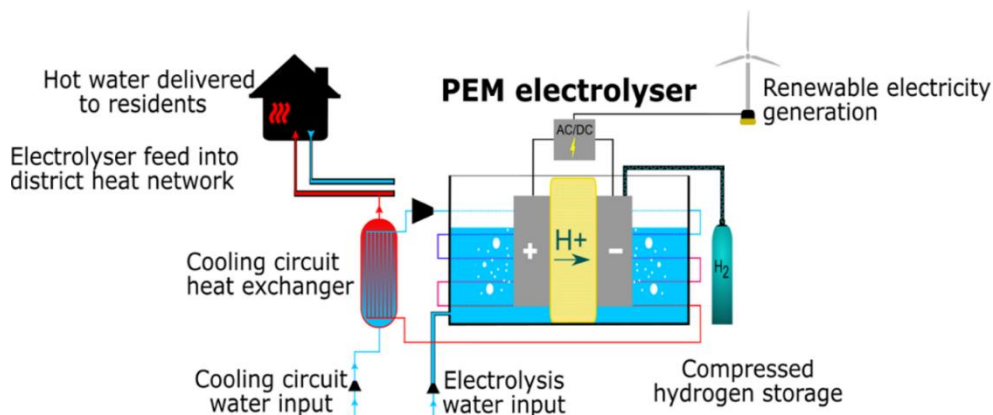
Účinnost PEM elektrolyzérů dosahuje zhruba okolo 70 - 80 %, zbytek energie se přemění na teplo. Tuto tepelnou energii je potřeba odvést z elektrolyzéro pomocí systému chlazení, které bývá zpravidla vodní. Nabízí se dvě možnosti, jak s touto energií naložit. Teplo lze buď bez užitku mařit, například v chladicích věžích a nebo využít jako cenný zdroj energie. Využitím odpadního tepla dojde ke zvýšení celkové účinnosti elektrolyzérů. V současné době je však tepelná energie zpravidla odvedena bez užitku.

10.1. Využití odpadního tepla z elektrolyzy

Vzhledem k tomu, že výkony elektrolyzérů mohou dosahovat řádově stovek megawattů, tak tomu odpovídá i množství vyprodukovaného odpadního tepla, se po které se může pohybovat v řádech desítek megawattů. Jeví se tedy jako ekonomicky výhodné využít vznikající odpadní teplo z elektrolyzérů.

Odpadní teplo z elektrolyzérů lze využít několika způsoby:

- k vytápění objektů v bezprostřední blízkosti elektrolyzérů
- dodávky do horkovodní sítě (k vytápění objektů, k ohřevu TUV)
- v průmyslových technologických procesech
- předehřev energeticky náročných technologií
- k výrobě elektrické energie pomocí organického Rankinova cyklu (ORC)
- odsolování vody
- v zemědělství (skleníky, chovy zvířat)



Obr. 62 - Integrace elektrolyzéro do sítě dálkového vytápění [56]

Problémem pro efektivní využití odpadního tepla je však především relativní nestálost výroby elektrolyzérů. Zejména pokud by byly elektrolyzéry napájeny z fotovoltaické elektrárny, bude produkce vodíku, ale posléze i tepla závislá na aktuálních atmosférických podmínkách a také denní době. Jednou z možností, jak se s touto nepravidelností výroby vypořádat je akumulace části tepelné energie. Dalším problémem může být to, že odpadní teplo z elektrolyzérů je tzv. nízkopotenciálové, kdy se teplota chladicího média pohybuje v rozmezí 70 - 90 °C.

Efektivním řešením, jak využít odpadní tepelnou energii z elektrolyzérů je tepelné čerpadlo. Jelikož chladicí médium při výstupu z elektrolyzéro má relativně vysokou teplotu, tak i topný faktor (COP) je v tomto případě vysoký a může dosahovat hodnoty dalece přesahující hodnotu 5. [57]

10.2. Teplo z komprese vodíku

Při kompresi vodíku vzniká rovněž nezanedbatelné množství tepelné energie, které by bylo vhodné alespoň částečně zužitkovat. Další část tepla by bylo možno získat při jeho expanzi během konečné spotřeby.

Po průzkumu dostupné literatury je však nutno konstatovat, že tato problematika získávání tepla za účelem jeho dalšího využití nebyla doposud podrobně prozkoumána. S ohledem na složitost takového řešení se však myšlenka získávání tepla z komprese vodíku jeví jako ne příliš ekonomická. Mnohem perspektivnější je získávání tepla přímo z procesu elektrolýzy (viz předchozí podkapitola). Nicméně není vyloučeno, že do budoucna bude využito i této odpadní energie.

Zdroje energie pro výrobu vodíku pomocí elektrolýzy

1. Fotovoltaické elektrárny

V podmínkách České republiky se jeví fotovoltaické elektrárny (FVE) jako stěžejní zdroj pro výrobu zeleného vodíku. V následující části jsou uvedeny vybrané informace a poznatky, které mohou být užitečné pro jejich návrh.

1.1. Výpočtové modely pro návrh fotovoltaických elektráren

1.1.1 PVGIS

Jedním z neznámějších výpočtových modelů je PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System). Jedná se o bezplatný model, který umožňuje výpočet roční výroby elektrické energie z fotovoltaické elektrárny v konkrétním místě. Ve výpočtu je, mimo jiné, zohledněn i vliv stínění terénních nerovností (hory či kopce), s vlivem stínění budov však model nepočítá. Tato aplikace slouží zejména jako užitečný pomocník při návrhu fotovoltaické elektrárny.

K výpočtovému modelu lze přistoupit přes odkaz uvedený v [2].

Pro úspěšné provedení výpočtu je nutné zadat několik údajů:

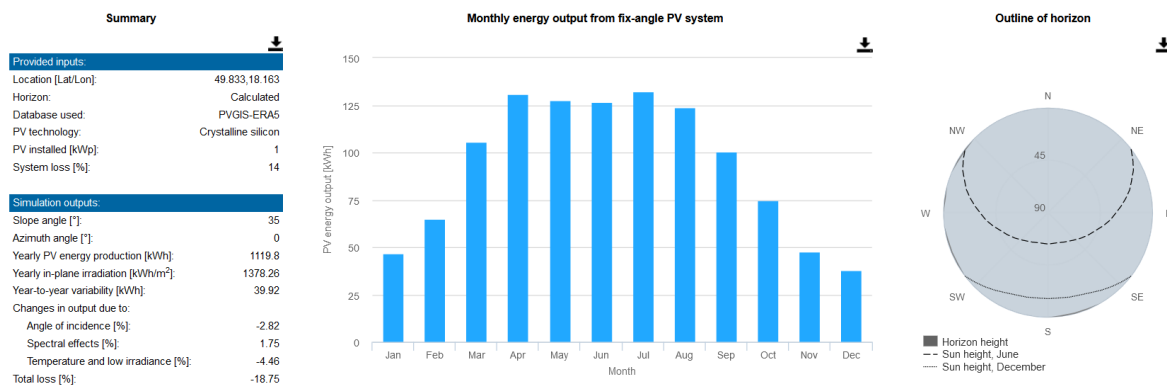
- Poloha (lze vybrat kliknutím do mapy)
- Instalovaný výkon
- Sklon panelů
- Azimut (směr) panelů

The screenshot displays the PVGIS web interface. On the left is a map of the Ostrava region in the Czech Republic. The right-hand panel contains the following input fields and options:

- Cursor:** 49.920, 18.052
- Selected:** 49.833, 18.163
- Elevation (m):** 266
- PVGIS ver.:** 5.2
- Use terrain shadows:** Calculated horizon, Upload horizon file
- Buttons:** Download CSV, Download JSON, Procházet..., Soubor nevybrán.
- GRID CONNECTED:** PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV
- TRACKING PV:** Solar radiation database* (PVGIS-ERA5), PV technology* (Crystalline silicon), Installed peak PV power [kWp], System loss [%]
- Fixed mounting options:** Mounting position* (Free-standing), Optimize slope, Optimize slope and azimuth
- HOURLY DATA:** Slope [°], Azimuth [°]
- INPUTS:** PV electricity price, PV system cost (your currency), Interest [%/year], Lifetime [years]
- Buttons:** Visualize results, Download CSV, Download JSON

Obr. 63 - Zadávání vstupních údajů PvGis

Po zadání vstupních údajů lze zobrazit výsledek. Ten obsahuje zejména roční výrobu (v kWh) a rozložení výroby dle měsíců. V neposlední řadě výsledek obsahuje kulový graf, který znázorňuje výšku slunce nad horizontem mezi dvěma extrémy (zimní a letní slunovrat). V tomto grafu lze pozorovat i vliv terénních nerovností.

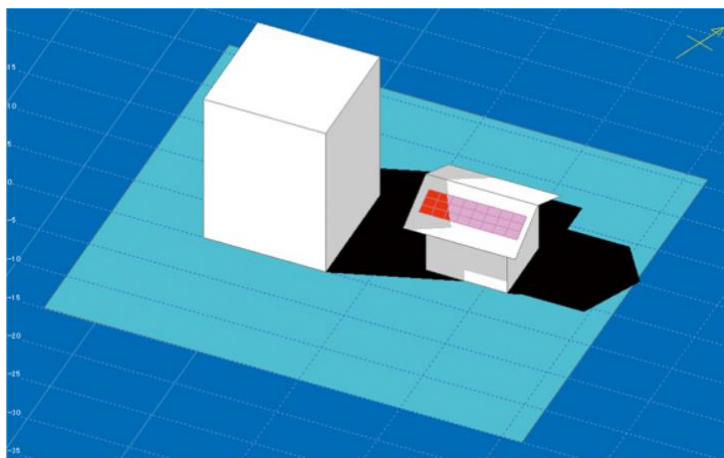


Obr. 64 - Výsledek simulace PvGis

Kromě již zmíněné výpočtové aplikace PVGIS existuje i celá řada jiných nástrojů k výpočtu, avšak mnohé z nich jsou placené, což ovšem naznačuje, že umožňují mnohem kvalitnější simulaci. Jako jeden příklad za všechny lze uvést například program Solar Pro.

1.1.2 Solar Pro

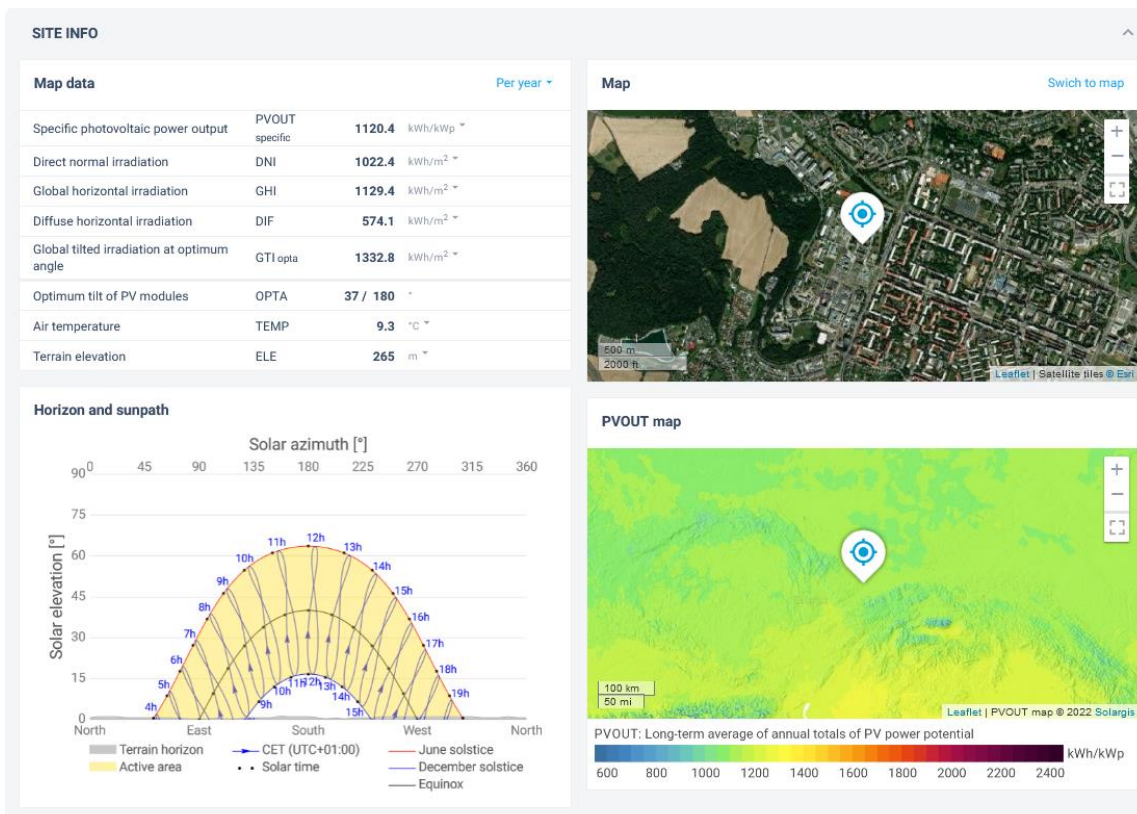
Tento software umožňuje kromě jiného i 3D modelování, díky kterému lze provést výpočet s uvažováním stínění různých objektů (stožáry, jiné budovy atp.).



Obr. 65 - Prostředí Solar Pro [58]

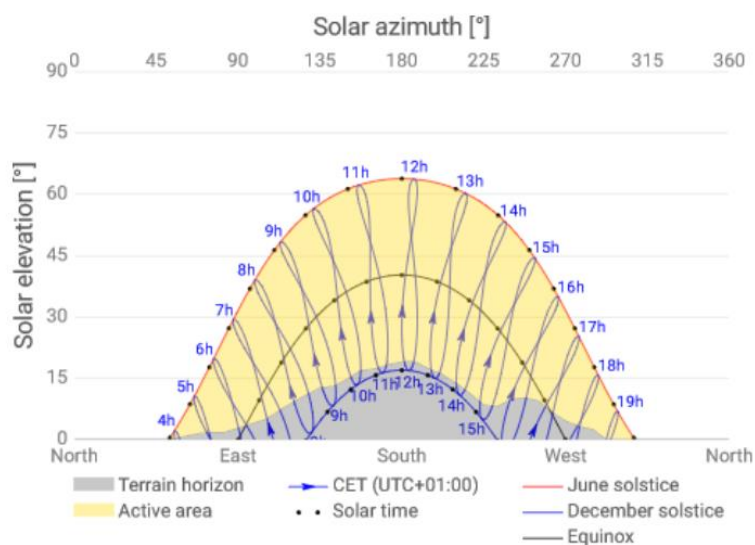
1.1.3 Webové aplikace pro určení polohy slunce

Mimo softwaru určené pro návrh a výpočet výroby fotovoltaických elektráren existují také užitečné aplikace umožňující určení polohy slunce během roku spolu s vlivem terénních nerovností. Jedním z nich je například Global Solar Atlas (dostupné z [59]).



Obr. 66 - Výstup z aplikace Global Solar Atlas [59]

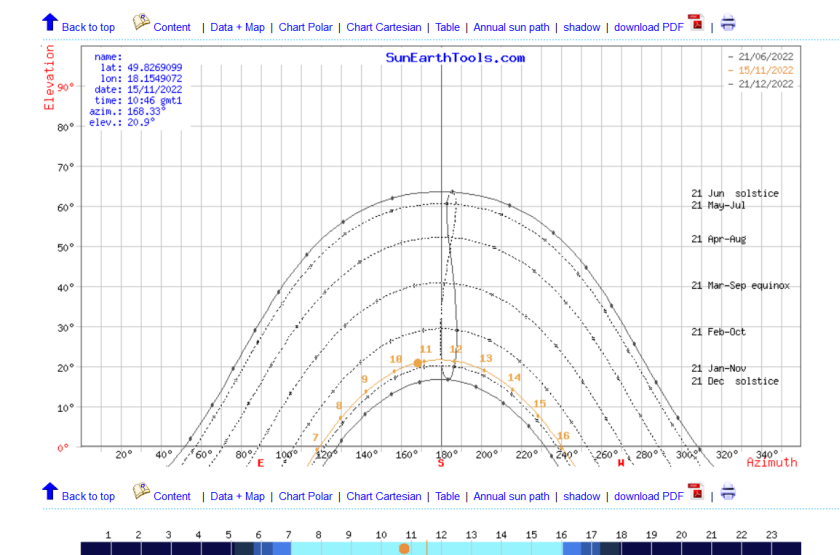
Za zmínku stojí graf průběhu slunce v průběhu celého roku (spodní část obr. 45 resp. obr. 46). Žlutá oblast grafu je ohraničena dvěma extrémů, totiž letním a zimním slunovratem. Pro každou hodinu dne v průběhu roku lze nakreslit křivku, která udává přesnou polohu slunce na obloze, tato křivka se nazývá analema. Ta má tvar osmičky a v průběhu celého roku ji slunce (pro daný čas) kompletně opíše.



Obr. 67 - Roční graf polohy slunce ve zvoleném místě na mapě – vliv stínění hor [59]

Na konkrétním obrázku výše se jedná o extrémní případ podhorské oblasti. Z grafu je patrné, že v období okolo zimního slunovratu na vybrané místo nedopadají téměř žádné sluneční paprsky (šedá část), tudíž výroba fotovoltaické elektrárny bude značně omezená (využita bude pouze difúzní složka světla).

Alternativou k předchozí uvedené aplikaci mohou být i webové rozhraní s názvem SunEarthTools (dostupné z [60]). Zde je, mimo jiné, i zobrazena aktuální pozice a dráha slunce (obr. 47).

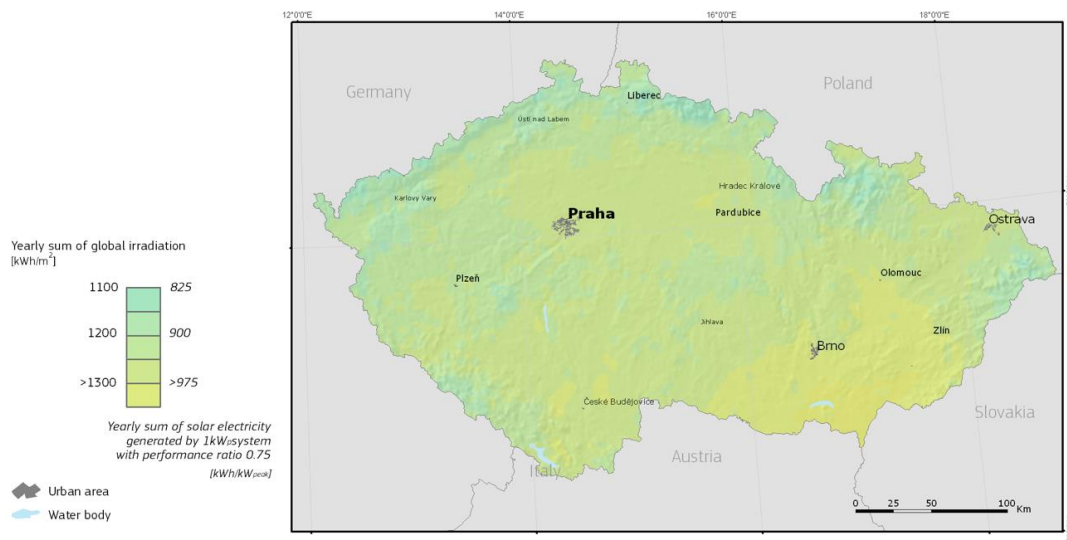


Obr. 68 - Výstupní graf pro zvolenou lokalitu v ČR (pro den 15.11.2022) [60]

Všechny zde uvedené aplikace a rozhraní umožňují udělat prvotní obrázek o umístění fotovoltaické elektrárny a nemalou měrou mohou přispět k jejímu vhodnému návrhu.

1.2. Solární mapa ČR

Na následujícím obrázku je solární mapa ČR, která udává roční množství sluneční energie dopadající na zemský povrch a zároveň množství vyrobené elektrické energie jedním kW_p instalovaného výkonu fotovoltaických panelů (při jejich optimálním sklonu). Je patrné, že nejvyšších výnosů lze dosáhnout na Jižní Moravě (více než 975 kW/kW_p). V rámci ČR jsou téměř všechny lokality vhodné pro stavbu FVE, až na některé horské oblasti, ve kterých by mohly být energetické výnosy výrazně nižší než ve zbytku ČR.



Obr. 69 - Solární mapa ČR [61]

1.3. Možnosti umístění fotovoltaických elektráren

Fotovoltaické elektrárny (FVE) jsou velice náročné na zastavěnou plochu, tudíž je vhodné je stavět v takových místech, která jsou jiným způsobem obtížně využitelná. Vhodnými lokalitami pro stavbu FVE jsou zejména brownfieldy, skládky, bývalé vojenské prostory, lokality vzniklé jako pozůstatek důlní činnosti jako například haldy. Velice zajímavý potenciál také nabízí střechy různých průmyslových hal.

Technický potenciál FVE postavených na brownfieldech odhaduje EGÚ Brno na přibližně 15,3 GW. [62] Na rozdíl od sousedního Německa je náš potenciál v této oblasti značně nevyužitý, což by se mohlo do budoucna výrazně změnit. [63]

Velký potenciál pro instalaci fotovoltaických elektráren také nabízí, jak již bylo zmíněno, také rovné střechy různých průmyslových hal či logistických center, čímž je i do značné míry zajištěn odběr vyrobené elektrické energie bez nutnosti její akumulace. Jako příklad lze uvést jednu z největších českých střešních fotovoltaických elektráren o výkonu 4 MW, která vznikla na logistickém centru u Kojetína. [64] O výstavbě 8 MW střešní fotovoltaické elektrárny uvažuje i společnost Hyundai, jenž má výrobní závod v Nošovicích. [65]

Velký potenciál pro stavbu fotovoltaických elektráren rovněž skýtají velká venkovní parkoviště. Jako příklad je zde uvedeno zastřešené parkoviště v jaderné elektrárně v Dukovanech. V době svého vzniku (2021), byla tato elektrárna s výkonem 831 kW_p největší svého druhu v ČR. Výhodou je použití bifaciálních FV panelů, které dokáží zužitkovat i část světla odraženou od zaparkovaných vozidel.



Obr. 70 - Carport v areálu JE Dukovany [66]

1.4. Nejvýkonnější fotovoltaické panely na trhu

V této části nejsou záměrně uváděny různé dostupné varianty fotovoltaických panelů, jelikož jich existuje nepřehledné množství. Je zde pro zajímavost uvedeno pouze několik aktuálně nejvýkonnějších panelů vyskytujících se na světovém trhu, které se jeví jako vhodné pro stavbu velkých FVE. Výkony nejvýkonnějších panelů již dosáhly hranice 700 W_p.

1.4.1 Yolywood JW-HD132N

Jedná se o čínského výrobce fotovoltaických panelů, jenž má poměrně vysoké postavení na světovém trhu. V roce 2022 firma uvedla na trh řadu bifaciálních fotovoltaických panelů typu JW-HD132N, přičemž jmenovitý výkon panelů z této řady dosahuje hodnoty 700 W_p.



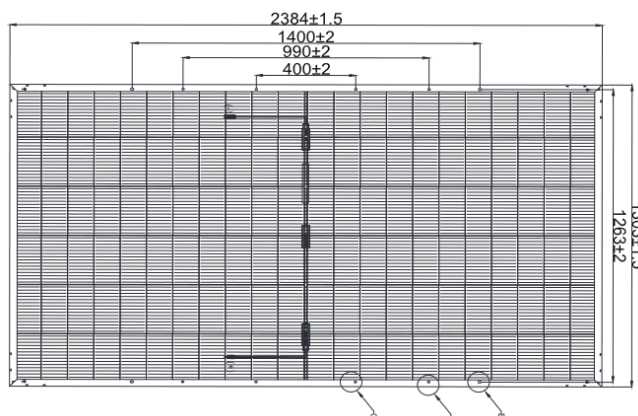
Obr. 71 - Fotovoltaický panel Yolywood JW-HD132N [67]

Tab. 15 - Parametry FV panelu JW-HD132N [67]

P_{max} (W)	700
U_{mp} (V)	39,5
I_{mp} (A)	17,73
U_{oc} (V)	47,1
I_{sc} (A)	18,82
η (%)	22,53

1.4.2 HUASUN Himalaya G12 – DS700

Dalším zástupcem současných nejvýkonnějších fotovoltaických panelů je například model DS700 z řady Himalaya G12 od čínského výrobce HUASUN. Při standartních testovacích podmínkách (STC) dosahuje výkon uvedeného panelu 700 W, při bifaciálním provozu (BSTC = 1000 W/m² + 135 W/m²) může jeho výkon dosahovat až 772 W.



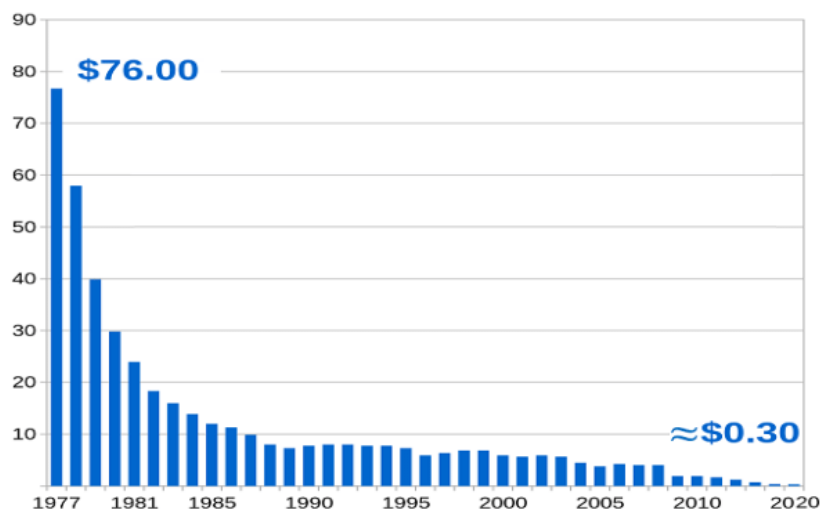
Obr. 72 - Rozměry FV panelů řady Himalaya G12 [68]

Tab. 16 - Parametry panelů řady Himalaya G12 [68]

	STC	BSTC
P_{max} (W)	700	772
U_{mp} (V)	42,1	42,1
I_{mp} (A)	16,63	18,34
U_{oc} (V)	50,13	50,13
I_{sc} (A)	16,63	19,22
η (%)	22,5	-

1.5. Vývoj ceny fotovoltaických článků

Na obr. 52 je uveden graf vývoje ceny za jeden watt výkonu fotovoltaických článků od roku 1977 až do současnosti. Z grafu je patrný výrazný pokles ceny fotovoltaických článků, ke kterému došlo zejména okolo roku 2010, kdy nastal tzv. „solární boom“. I přes průběžnou inflaci pohybující se v řádu jednotek procent ročně, která má snahu navyšovat veškeré ceny, dochází k neustálému poklesu výrobních nákladů fotovoltaických článků, respektive panelů samotných.



Obr. 73 - Vývoj ceny fotovoltaických článků (cena za 1 W_p) [69]

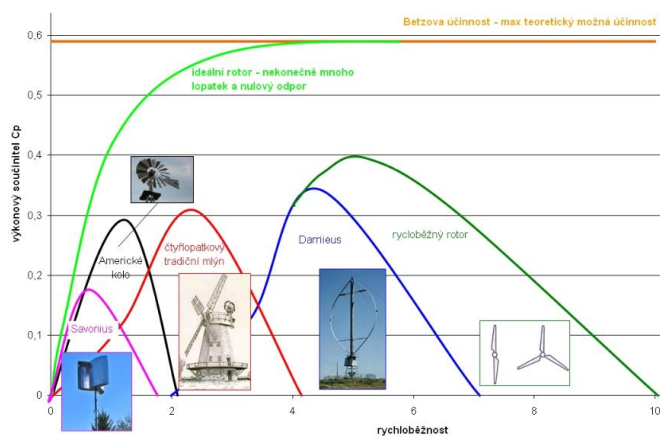
Lze předpokládat, že tak jako docházelo a stále dochází k poklesu cen fotovoltaických panelů na světovém trhu, dojde k jistému poklesu cen i u vodíkových technologií. Ceny vodíkových technologií jsou prozatím stále na vysoké úrovni, jelikož jsou pořád před svým opravdu masovým rozšířením.

1.6. Současná měrná cena fotovoltaických elektráren

Cena za instalovanou jednotku výkonu u elektráren s výkony v řádech MW_p na volné ploše se může pohybovat v rozsahu okolo 15 000 – 25 000 Kč za instalovaný kW_p. [70]

2. Větrné elektrárny

Základní částí větrných elektráren jsou větrné motory, které slouží k přeměně kinetické energie větru na mechanickou energii. Ve větrných elektrárnách se nejprve kinetická energie větru přeměňuje v mechanickou energii, která je následně transformována na elektrickou energii. Větrné motory lze obecně realizovat s vertikální osou, nebo s horizontální osou. Každá z konstrukcí má svoje výhody, nevýhody i omezení. Prakticky jsou pro velké výkony nejvýhodnější rotory s horizontální osou.



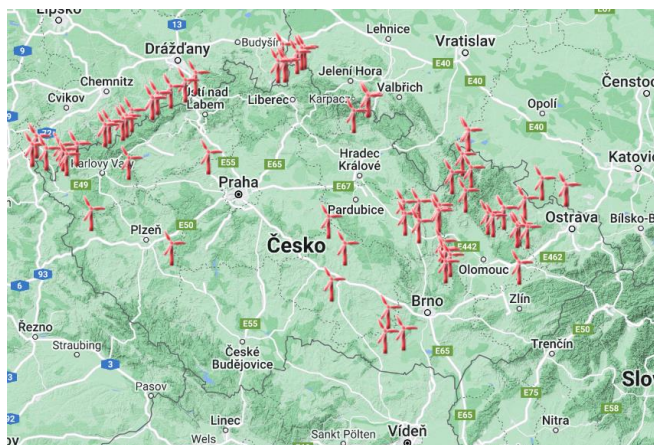
Obr. 74 - Rozdělení rotorů větrných elektráren dle rychloběžnosti rotorů [71]

Nejčastěji používanou konstrukcí je třílístý rychloběžný rotor s horizontální osou otáčení, který patří mezi větrné motory pracující na vztakovém principu. Účinnost těchto motorů dosahuje až 45 %, přičemž teoretické maximum je 59,3 % . [5]

2.1. Větrné elektrárny v ČR

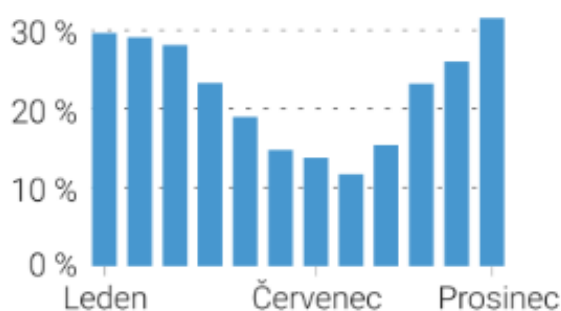
V roce 2020 byl v České Republice instalován výkon větrných elektráren 340 MW, který ročně vyrobí 699 MWh elektrické energie. [72]

Na stránkách České společnosti pro větrnou energii (ČSVE) lze nalézt interaktivní mapu s aktuálně nainstalovanými větrnými elektrárnami. [73]



Obr. 75 - Instalované větrné elektrárny v ČR [73]

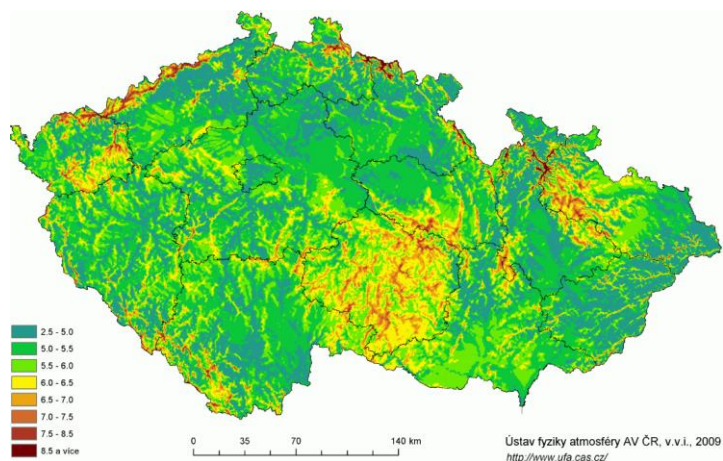
Studie Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR odhaduje, že větrné elektrárny by kolem roku 2040 mohly na území Česka vyrábět až 18,8 TWh elektřiny, což by odpovídalo pokrytí zhruba 28 % spotřeby elektrické energie v roce 2019. [74]



Obr. 76 - Průměrný koeficient využití větrných elektráren v letech 2015 – 2020 [74]

Výhodou větrných elektráren je rozložení výroby energie v průběhu dne i v průběhu roku. Nedochozí zde k tak výrazným špičkám výroby jako u FVE a navíc je výroba vyšší v zimě, což odpovídá obvyklému profilu spotřeby energie.

Na výrobu VE má vliv geografická poloha, nadmořská výška, drsnost terénu a výška rotoru nad terénem.



Obr. 77 - Větrné podmínky ve výšce 100 m [75]

2.2. Příklad obvyklých typů elektráren

V současnosti jsou v České republice obvykle instalovány elektrárny o výkonu okolo 2 MW. Jako příklad je možné uvést:

2.2.1 Enercon E-82 E2 2.300



Obr. 78 - Větrná elektrárna Enercon E-82 E2 2.300 [76]

Tab. 17 - Parametry větrné elektrárny E-82 E2 2.300 [76]

Jmenovitý výkon	2300 kW
Jmenovitá rychlost větru	12,0 m/s
Průměr rotoru	82,0 m
Maximální otáčky rotoru	18 /min
Generátor	synchronní
Převod	přímý pohon
Výška stožáru	78/85/98/108/138 m

2.2.2 Vestas V90 2MW



Obr. 79 - Větrná elektrárna Vestas V90 [77]

Tab. 18 - Parametry větrné elektrárny Vestas V90 [77]

Jmenovitý výkon	2000 kW
Jmenovitá rychlost větru	13,0 m/s
Průměr rotoru	90,0 m
Maximální otáčky rotoru	14,9 /min
Generátor	asynchronní
Převod	planetový
Výška stožáru	80/95/105 m

2.3. Největší současné větrné elektrárny

Obecně je možné říci, že je výhodné navyšovat výkon větrných elektráren. Studie UFA zkoumající energetický potenciál využití větru v České republice uvažuje, že budou dále instalovány elektrárny o výkonu 3 - 5 MW, tak aby mohly být optimálně využity přijatelné lokality.

Současné nejvýkonnější modely elektráren dosahují výkonu 11 – 14 MW. Jako příklad již realizovaných elektráren dosahujících těchto výkonů je možné uvést:

2.3.2 GE Haliade-X 14MW



Obr. 80 - Větrná elektrárna GE Haliade-X 14MW [78], [79]

Tab. 19 - Parametry větrné turbíny SG 11.0-193 DD [78], [79]

Jmenovitý výkon	14 000 kW
Jmenovitá rychlost větru	
Průměr rotoru	220,0 m
Maximální otáčky rotoru	7 /min
Generátor	synchronní PM
Převod	přímý pohon
Výška stožáru	150 m

2.4. Současná měrná cena větrných elektráren

Náklady spojené s výstavbou větrné elektrárny představuje nejen nákup stroje, ale také projekční a schvalovací aktivity, náklady spojené se zajištěním pozemků, stavební práce a vyvedení výkonu do sítě. Nutno je i počítat s náklady na údržbu a příspěvky obcím. Celkové náklady na postavení jedné větrné elektrárny se mohou pohybovat v rozmezí 35 až 40 milionů Kč za instalovaný megawatt výkonu v závislosti na celkovém počtu strojů, rozsahu úprav přístupových komunikací, vzdálenosti a provedení elektrické přípojky. [80]

Jako konkrétní příklad lze uvést větrný park Václavice o výkonu 13 x 2 MW, přičemž celková cena činí 1100 mil. Kč, z čehož lze odvodit cenu jedné 2 MW turbíny na 84 mil. Kč (42 mil. Kč/MW). [81]

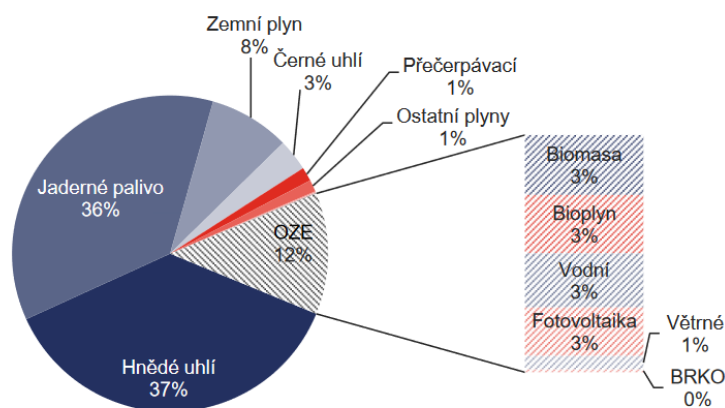
Se zvyšováním výkonu a snižujícími se výrobními náklady, je možné v roce 2022 uvažovat o ceně 100mil za 4,2 MW elektrárnu. [82]

3. Napájení ze sítě

Jelikož se elektrolyzéry chovají jako poměrně velké spotřebiče elektrické energie, počítá se s jejich zapojením k výkonové regulaci elektrické sítě. V takovém případě by část elektrické energie sloužící pro napájení elektrolyzérů pocházela z veřejné sítě, což by ovšem znamenalo, že vodík vyrobený s přispěním elektrické sítě již nebude možné označit jako zelený, tedy bezemisní.

3.1. Podíl paliv na energetickém mixu ČR

Na následujícím obrázku je podíl paliv a technologií na výrobě elektrické energie v ČR za rok 2021.



Obr. 81 - Podíl paliv na výrobě elektrické energie v ČR za rok 2021 [83]

Z roční zprávy o provozu elektrizační soustavy za rok 2021 je patrné, že poměr elektřiny vyrobené z fosilních paliv a bezemisních zdrojů byl takřka vyrovnaný (zejména zásluhou jaderných elektráren). Samotné obnovitelné zdroje byly zastoupeny celkově z 12,4 %, přičemž podíl biomasy, bioplynu, fotovoltaiky a vodní energie na celkové produkci se pohyboval okolo 3 %. Na větrné elektrárny připadlo méně než 1 % (zhruba 0,7 %). [83]

3.2. Emisní stopa při výrobě vodíku z energetického mixu ČR

V roce 2019 odpovídaly průměrné emise CO_2 vznikající při výrobě 1 kWh elektrické energie v České republice 428 g/kWh. [84] Pokud bychom uvažovali, že na výrobu 1 kg vodíku v elektrolyzáru je zapotřebí zhruba 55 kWh elektrické energie, vycházela by emisní stopa takto vyrobeného vodíku na cca 23,5 kg $\text{CO}_2/\text{kg H}_2$. Oproti vodíku vyrobenému ze zemního plynu parním reformingem, při kterém vznikají emise okolo 7 kg $\text{CO}_2/\text{kg H}_2$ [85], je na tom emisní stopa vodíku vyrobeného z energetického mixu ČR podstatně hůře.

Seznam obrázků

Obr. 1 - Výběr režimu výpočtu	5
Obr. 2 - Histogram rychlosti větru [1]	6
Obr. 3 - Výběr zdrojů energie v režimu výpočtu „Chci vyrábět vodík“	7
Obr. 4 - Zadání parametrů pozemku k instalaci FVE	7
Obr. 5 - Zadání parametrů fotovoltaické elektrárny	8
Obr. 6 - Geometrie rozmístění FV panelů má vliv na instalovaný výkon ploše	8
Obr. 7 - Snížení roční výtěžnosti vlivem vzájemného stínění řad panelů	9
Obr. 8 - Zadání parametrů větrné turbíny	9
Obr. 9 - Zadání parametrů vodíkových technologií	10
Obr. 10 - Výstupní komodity - Výroba vodíku	10
Obr. 11 - Výstupní komodity - Výroba kyslíku	11
Obr. 12 - Výstupní komodity - Výroba tepla	11
Obr. 13 - Výstupní komodity – Služba výkonové rovnováhy	12
Obr. 14 - Pořizovací cena a roční provozní náklady zařízení na výrobu H ₂	13
Obr. 15 – Vstupní komodity pro výrobu H ₂	14
Obr. 16 – Financování	17
Obr. 17 – Pokrytí spotřeby technologií elektrolyzéro	18
Obr. 18 – Plánované roční příjmy	19
Obr. 19 – Plánované roční výdaje	19
Obr. 20 – Celkové roční příjmy/výdaje	20
Obr. 21 – Celkový cash flow (kumulovaně)	21
Obr. 22 - Vznik vodíkové křehkosti [6]	23
Obr. 23 - Materiál porušený vodíkovou korozí [7]	24
Obr. 24 - Způsob výroby a oblasti spotřeby vodíku [13]	26
Obr. 25 - Zastoupení spotřeby vodíku ve světě podle států (v roce 2017) [14]	26
Obr. 26 - Původ vyrobeného vodíku v ČR [13]	27
Obr. 27 - Podíl na výrobě vodíku [15]	28
Obr. 28 - Schéma systému parního reformování [16]	28
Obr. 29 - Schéma procesu POX [17]	29
Obr. 30 - Princip pyrolýzy metanu [18]	30
Obr. 31 - Srovnání vstupů a výstupů u parního reformingu, elektrolyzy a pyrolýzy metanu [19]	30
Obr. 32 - Srovnání výrobních nákladů a emisní stopy různých způsobů výroby vodíku [20]	31
Obr. 33 - Schéma alkalického elektrolyzéro	32
Obr. 34 - Schéma PEM elektrolyzéro [21]	32
Obr. 35 - Příklady zařízení pro reverzní osmózu [22], [23]	34
Obr. 36 - Vodní chlazení elektrolyzéro jako samostatný okruh [25]	34
Obr. 37 - Chlazení elektrolyzéro procesní vodou [26]	35
Obr. 38 - Uspořádání elektrolyzéro Silyzer 300	35
Obr. 39 - Budova s elektrolyzéro Silyzer 300 v rakouském Linci [29]	36
Obr. 40 - Časový průběh najetí elektrolyzéro Silyzer 300 [30]	37
Obr. 41 - Elektrolyzéro Elogen ELYTE 260 [32]	38
Obr. 42 - Elektrolyzéro HCS 10 MW [33]	39
Obr. 43 - Velkoobjemový, nízkotlaký zásobník na vodík v plynném stavu	40
Obr. 44 - Velkoobjemový zásobník na kapalný vodík – 3 800 m ³ , 270 t (NASA)	40
Obr. 45 - Svazek 12-ti tlakových láhví o celkovém vodním objemu 600 l (12x50 l)	41
Obr. 46 - Vysokotlaký zásobník vodíku	42
Obr. 47 - Zásobník o objemu 95 m ³ a tlaku 50 bar	43
Obr. 48 - Příklad silničního traileru pro přepravu vodíku	44
Obr. 49 - Příklad vodíkového traileru se svazkem deseti ocelových tlakových lahví	45
Obr. 50 - Membránový kompresor MRX 1300/MHX 1300 [40]	47
Obr. 51 - Kompresní stanice Puertollano Hydrogen Station [41]	47

Obr. 52 - Kompresor Mehrer MHE 400-22Ex [42]	48
Obr. 53 - Komresor Atlas Copco 1 EHN2 GT [43]	48
Obr. 54 - Porovnání účinnosti vybraných pohonů využívajících elektřinu [47]	50
Obr. 55 - Vodíková pozemní doprava [48]	51
Obr. 56 - Koncepty vodíkových letadel Airbus [49]	51
Obr. 57 - Nákladní loď poháněná vodíkem [50]	52
Obr. 58 - Mobilní instalace vodíkového generátoru	52
Obr. 59 - Stacionární instalace vodíkového generátoru	53
Obr. 60 - Vodíková kogenerační jednotka řady PemGen [52]	54
Obr. 61 - Svazek tlakových lahví s kyslíkem	56
Obr. 62 - Integrace elektrolyzéry do sítě dálkového vytápění [56]	57
Obr. 63 - Zadávání vstupních údajů PvGis	59
Obr. 64 - Výsledek simulace PvGis	60
Obr. 65 - Prostředí Solar Pro [58]	60
Obr. 66 - Výstup z aplikace Global Solar Atlas [59]	61
Obr. 67 - Roční graf polohy slunce ve zvoleném místě na mapě – vliv stínění hor [59]	61
Obr. 68 - Výstupní graf pro zvolenou lokalitu v ČR (pro den 15.11.2022) [60]	62
Obr. 69 - Solární mapa ČR [61]	63
Obr. 70 - Carport v areálu JE Dukovany [66]	64
Obr. 71 - Fotovoltaický panel Yolywood JW-HD132N [67]	64
Obr. 72 - Rozměry FV panelů řady Himalaya G12 [68]	65
Obr. 73 - Vývoj ceny fotovoltaických článků (cena za 1 W _p) [69]	66
Obr. 74 - Rozdělení rotorů větrných elektráren dle rychloběžnosti rotorů [71]	66
Obr. 75 - Instalované větrné elektrárny v ČR [73]	67
Obr. 76 - Průměrný koeficient využití větrných elektráren v letech 2015 – 2020 [74]	67
Obr. 77 - Větrné podmínky ve výšce 100 m [75]	68
Obr. 78 - Větrná elektrárna Enercon E-82 E2 2.300 [76]	68
Obr. 79 - Větrná elektrárna Vestas V90 [77]	69
Obr. 80 - Větrná elektrárna GE Haliade-X 14MW [80], [81]	70
Obr. 81 - Podíl paliv na výrobě elektrické energie v ČR za rok 2021 [85]	71

Seznam tabulek

Tab. 1 - Srovnání vodíku s ostatními palivy	23
Tab. 2 - Barevné spektrum vodíku [12]	25
Tab. 3 - Množství vodíku a technologie jeho výroby v ČR	27
Tab. 4 - Složení plynů získaných parciální oxidací mazutu (v % obj.) [17]	29
Tab. 5 - Srovnání energetické účinnosti různých způsobů výroby vodíku [20]	31
Tab. 6 - Základní parametry elektrolyzéry Silyzer 300 [27], [28]	36
Tab. 7 - Parametry elektrolyzéry Elogen ELYTE 260 [31]	37
Tab. 8 - Parametry elektrolyzéry HCS 10 MW [33]	38
Tab. 9 - Srovnání stlačeného a zkapalněného vodíku	39
Tab. 10 - Typy tlakových nádob dle konstrukce a tlaků [35], [36]	41
Tab. 11 - Základní parametry jedné vysokotlaké nádrže o objemu 300 l [38]	42
Tab. 12 - Parametry kompresor MRX 1300/MHX 1300 [40]	47
Tab. 13 - Parametry kompresoru MHE 400-22Ex [42]	48
Tab. 14 - Parametry kompresoru 1 EHN2 GT [43]	48
Tab. 15 - Parametry FV panelu JW-HD132N [67]	65
Tab. 16 - Parametry panelů řady Himalaya G12 [68]	65
Tab. 17 - Parametry větrné elektrárny E-82 E2 2.300 [76]	68
Tab. 18 - Parametry větrné elektrárny Vestas V90 [77]	69
Tab. 19 - Parametry větrné turbíny SG 11.0-193 DD [78], [79]	70

Reference

- [1] T. Sýkora, „Problematika připojování větrných elektráren do distribuční sítě,“ 2007. [Online]. Available: <https://www.tzb-info.cz/4279-problematika-pripojovani-vetrnych-elektren-do-distribucni-site>.
- [2] E. Commission, „PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM,“ [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- [3] P. H. Petr Wolf, „Návrh fotovoltaických systémů na rovných plochách s ohledem na efektivní využití technologie i dostupné plochy,“ Tzb Info, 2020. [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/20966-navrh-fotovoltaickych-systemu-na-rovných-plochach-s-ohledem-na-efektivni-vyuziti-technologie-i-dostupne-plochy>.
- [4] „Global Wind Atlas,“ [Online]. Available: <https://globalwindatlas.info/>.
- [5] T. Komrska, „Větrná elektrárna jako zdroj pro vytápění obce,“ 2015. [Online]. Available: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61107/F3-DP-2015-Komrska-Tomas-Vetrna_elektrarna_jako_zdroj_vytapeni_obce.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [6] M. Machalínek, „Problematika vodíkové křehkosti v materiálu,“ [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84803/F2-BP-2019-Machalinek-Martin-Problematika%20vodikove%20krehkosti%20v%20materialu.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.
- [7] Wikipedia, „Hydrogen embrittlement,“ [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement.
- [8] T. Báborský, „Vodíkové nádrže pro automobilní aplikace,“ 2017. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147124.
- [9] „How can helium heat up when expanding,“ [Online]. Available: <https://www.quora.com/How-can-helium-heat-up-when-expanding>.
- [10] „Clearing Up the Colours,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.enapter.com/hydrogen-clearing-up-the-colours>.
- [11] „The hydrogen colour spectrum,“ [Online]. Available: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>.
- [12] Wikipedia, „Hydrogen economy,“ [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy.
- [13] „Výroba vodíku v ČR a její,“ [Online]. Available: https://www.ujv.cz/file/edee/produkty_sluzby/veda_a_vyzkum/dotacni_projekty/vodikove-vlaky/prezentace-vyroba-vodiku-v-cr-a-jeji-uhlikova-stopa.pdf.
- [14] S. Direct, „High temperature production of hydrogen: Assessment of non-renewable resources technologies and emerging trends,“ 2019. [Online]. Available:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919331726>.

- [15] M. Paidar, „Výroba vodíku v ČR a její,“ [Online]. Available: https://www.ujv.cz/file/edee/2022/05/vyroba_h2_vcr_vscht_paidar.pdf.
- [16] P. MASTNÝ, Obnovitelné zdroje elektrické energie, Praha: České vysoké učení technické, ISBN 978-80-01-04937-2, 2011.
- [17] R. V. Blažek J., Základy zpracování a využití ropy. 2. vyd. Str. 107. ISBN 80-7080-619-2, Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2006.
- [18] C. Philibert, „Ammonia energy association,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/methane-splitting-and-turquoise-ammonia/>.
- [19] D. Tramba, „Ekonomický deník,“ 2021. [Online]. Available: <https://ekonomickydenik.cz/bezemisni-vyroba-vodiku-tyrkysova-je-nova-zelena/>.
- [20] R. S. a. H. R. Nuria Sánchez-Bastardo*, „ACS Publications,“ 2021. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.1c01679>.
- [21] V. H. S. Shiva Kumar, Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review, Pages 442-454, ISSN 2589-2991, Materials Science for Energy Technologies, Volume 2, Issue 3, 2019.
- [22] „Aqua shop,“ [Online]. Available: https://www.aqua-shop.cz/prumyslova-filtrace-vody/prumyslova-reverzni-osmoza-s-vykonem-100-az-1000-lh/?variantId=4172&gclid=Cj0KCQiA1NebBhDDARIsAANiDD3Xj3R13KD2StinxKbOqRUafoBGdFL_cDuSM7Ai5m90wxhYjCtSXDEaAstBEALw_wcB.
- [23] „Aquarex,“ [Online]. Available: <https://www.aquarex.cz/produkty/reverzni-osmoza>.
- [24] „Enapter,“ [Online]. Available: https://www.enapter.com/newsroom/kb_post/what-are-the-differences-between-the-air-cooled-and-the-liquid-cooled-electrolyser.
- [25] S. R. A. P. R. A. S. Dominic Burrin, „Science Direct,“ [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421008621>.
- [26] A. Ottosson, „Integration of Hydrogen Production via Water Electrolysis at a CHP Plant,“ 2021. [Online]. Available: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1544746/FULLTEXT01.pdf>.
- [27] Siemens, „Large Scale PEM Electrolysis for Industrial Applications,“ 2019. [Online]. Available: https://www.hypos-eastgermany.de/fileadmin/content/downloads/HYPOS-Dialog_8/09_HYPOS_Dialog_Wagner.pdf.
- [28] M. Suchý, „UKLÁDÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE DO VODÍKU VE SPOLEČNOSTI C-ENERGY PLANÁ S.R.O.,“ [Online]. Available: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/94801>.
- [29] „Voestalpine,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.voestalpine.com/blog/en/innovation-en/the-run-up-for-a-high-performance-facility/>.
- [30] S. Energy, „PEM electrolyser technology,“ 2021. [Online]. Available: https://www.energyforum.in/fileadmin/user_upload/india/media_elements/Presentations/202

10714_h2_large/Siemens_Energy.pdf.

- [31] T. C. Electrolysers. [Online]. Available: <https://elogenh2.com/en/our-products/electrolysers-containerises/>.
- [32] „PEM - Electrolysers,“ [Online]. Available: https://elogenh2.com/wp-content/uploads/2021/04/Elogen_Product_sheet-Elyte260.pdf.
- [33] „H-TEC SYSTEMS,“ [Online]. Available: <https://www.h-tec.com/en/products/detail/h-tec-pem-elektrolyseur-hcs/10-mw-hcs/>.
- [34] „Technicko-ekonomické posouzení implementace vodíkového pohonu v Ústeckém kraji,“ 2020. [Online]. Available: https://www.kr-ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1750654.
- [35] H. tank, „WikipediA,“ [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_tank.
- [36] „An Analysis on the Compressed Hydrogen Storage System for the Fast-Filling Process of Hydrogen Gas at the Pressure of 82 MPa,“ [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2635/htm>.
- [37] „Air Liquide,“ [Online]. Available: <https://specialty.airliquide.co.uk/product/hydrogen-5-0-501/?industry=oil-and-gas>.
- [38] C. H. STORAGE, „Mahytec,“ [Online]. Available: <https://www.mahytec.com/en/compressed-hydrogen-storage/>.
- [39] V. s. Č. republiky, 2021. [Online]. Available: https://www.mpo.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2021/8/Vodikova-strategie_CZ_G_2021-26-07.pdf.
- [40] „Meher,“ [Online]. Available: <https://www.mehrer.de/en/products/diaphragm-compressors/126-mrx-1300-mhx-1300>.
- [41] „Hyperbaric,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.hiperbaric.com/en/hiperbaric-becomes-first-spanish-manufacturer-of-high-pressure-hydrogen-compressors/>.
- [42] „Meher,“ [Online]. Available: <https://www.mehrer.de/service/downloads?view=document&id=24&format=raw>.
- [43] „Atlas Copco,“ [Online]. Available: https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/compressor-technique/oil-free-air/documents/HX_HN_series_leaflet_EN_Antwerp_2935052813.pdf.
- [44] Č. A. T. PLYNŮ, „Vodík,“ [Online]. Available: <https://adoc.pub/eska-asociace-technicky-plyn-ada-informace-normy-pedpisy-v.html>.
- [45] J. Votruba, „Oenergetice,“ 2021. [Online]. Available: https://oenergetice.cz/akumulace-energie/dvoumiliardova-iniciativa-evropske-komise-signalizuje-zmenu-priority-ve-vyuzivani-vodiku?utm_source=www.seznam.cz&utm_medium=sekce-z-internetudop_ab_variant=0&dop_source_zone_name=hpfeed.sznhp.box&dop_req_id=bcVto.

- [46] N. J. Kurmayer, „Euroactiv,“ 2021. [Online]. Available: <https://euractiv.cz/section/energetika/news/vodik-bude-pohanet-spise-prumysl-nez-osobni-auta-pocita-s-tim-i-nove-partnerstvi-pro-cisty-vodik/>.
- [47] J. Zilvar, „Tzbinfo,“ 2020. [Online]. Available: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20711-synteticka-paliva-power-to-gas-power-to-liquid-vyroba-a-ucinnost>.
- [48] „Michelin,“ [Online]. Available: <https://www.michelin.com/en/hydrogen/>.
- [49] P. Bílek, „Oenergetice,“ 2020. [Online]. Available: <https://otechnice.cz/airbus-predstravil-koncepci-letadel-vyuzivajicich-vodik/>.
- [50] „ČT24,“ 2021. [Online]. Available: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/3295389-po-parizske-seine-se-bude-plavit-prvni-komercni-nakladni-lod-pohanena-vodikem>.
- [51] J. Grohmann, „Hybrid.cz,“ 2013. [Online]. Available: <https://www.hybrid.cz/vodikova-budoucnost-pro-lodni-pristavy/>.
- [52] „Nedstack,“ [Online]. Available: <https://nedstack.com/en/pemgen-solutions/stationary-fuel-cell-power-systems/pemgen-chp-fcps-500>.
- [53] „Naše voda,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.nase-voda.cz/aplikace-cisteho-kysliku-do-biologicke-casti-cov/>.
- [54] „Linde,“ [Online]. Available: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z/kysl%C3%ADk/kysl%C3%ADk-25-svazek-201-2#product1>.
- [55] J. Štěpánek, „TECHNOLOGIE PRO ZKAPALŇOVÁNÍ PLYNŮ A JEHO VYUŽITÍ A DISTRIBUCCE,“ 2013. [Online]. Available: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66560.
- [56] S. Direct, „A combined heat and green hydrogen (CHH) generator integrated with a heat network,“ 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421008621>.
- [57] A. M. FREDRIK JONSSON, „UTILIZATION OF WASTE HEAT FROM HYDROGEN PRODUCTION,“ Malardalen University, [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1670187/FULLTEXT01.pdf>.
- [58] „Laplace System,“ [Online]. Available: <https://www.lapsys.co.jp/english/products/pro.html>.
- [59] „Global Solar Atlas,“ [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- [60] „SunEarthTools.com,“ [Online]. Available: <https://www.sunearthtools.com/>.
- [61] „PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM,“ [Online]. Available: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_index.html#.
- [62] O. Sklenář, „Potenciál obnovitelných zdrojů v České republice: Fotovoltaické elektrárny na brownfieldech,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.czechsight.cz/potencial-obnovitelnych-zdroju-v-ceske-republice-fotovoltaicke-elektrarny-na-brownfieldech/>.

- [63] „Český Solar Global postavil solární elektrárnu na rekultivované skládce v Německu a hodlá expandovat dále na západ,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.enviweb.cz/113004>.
- [64] „Největší česká solární střecha vznikne na logistickém areálu u Kojetína,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.hybrid.cz/nejvetsi-ceska-solarni-strecha-vznikne-na-logistickem-arealu-u-kojetina/>.
- [65] „8 MWp: Hyundai postaví největší střešní solární elektrárnu v Česku,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.solarninovinky.cz/8-mwp-hyundai-postavi-nejvetsi-stresni-solarni-elektrarnu-v-cesku/>.
- [66] M. Vacovský, „V jaderné elektrárně Dukovany vzniklo největší parkoviště s fotovoltaikou u nás,“ 2021. [Online]. Available: <https://fzone.cz/clanky/v-jaderne-elektrarne-dukovany-vzniklo-nejvetsi-parkoviste-s-fotovoltaikou-u-nas-2358>.
- [67] „jolywood.cn,“ [Online]. Available: <http://www.jolywood.cn/upload/202110/14/202110141307425527.pdf>.
- [68] „Himalaya G12 Series,“ huasun.net, [Online]. Available: https://huasun.net/wp-content/uploads/2022/05/Huasun-G12-132-DS_EN_20220514.pdf.
- [69] S. E.-S. S. A. Mohamed, „A Different Visions for Uninterruptible Load using Hybrid Solar-Grid Energy“ .pp381-387., International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS), 2019.
- [70] „Jak se promítne extrémní zdražení panelů do cen fotovoltaických elektráren v Česku?,“ oenergetice.cz, 2021. [Online]. Available: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/se-promitne-extremniho-zdrazeni-panelu-cen-fotovoltaickych-elektraren-cesku>.
- [71] „Počet listů rotoru větrné elektrárny,“ csve.cz, [Online]. Available: <https://csve.cz/cz/clanky/pocet-listu-rotoru-vetrne-elektrarny/310#prettyPhoto>.
- [72] „Aktuální instalace,“ csve.cz, [Online]. Available: <https://csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>.
- [73] „Mapa,“ csve.cz, [Online]. Available: <https://csve.cz/cz/aktualni-instalace>.
- [74] „Potenciál větrné energie v ČR,“ faktaoklimatu.cz, [Online]. Available: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/potencial-vetrne-energie-cr>.
- [75] „Pole průměrné rychlosti větru ve výšce 100m nad povrchem,“ 2009. [Online]. Available: https://www.ufa.cas.cz/wp-content/uploads/2020/07/vetrna_mapa.gif.
- [76] „Enercon E-82 E2 2.300,“ <https://en.wind-turbine-models.com>, [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/550-enercon-e-82-e2-2.300>.
- [77] „Vestas V90,“ en.wind-turbine-models.com, [Online]. Available: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/16-vestas-v90>.
- [78] „Haliade-X offshore wind turbine,“ GE Renewable Energy, [Online]. Available: <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>.

- [79] „The World’s Most Powerful Wind Turbines,“ <https://ecohungry.com/>, 2019. [Online]. Available: <https://ecohungry.com/worlds-most-powerful-wind-turbines/>.
- [80] „INVESTICE A NÁVRATNOST VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN,“ SKUPINA ČEZ, [Online]. Available: <https://www.pro-vetrniky.cz/cs/fakta-o-vetrnych-elektrarnach/investice-a-navratnost-ve>.
- [81] „Větrný park Václavice - tříleté zkušenosti s provozem větrné elektrárny,“ Electro Dad, 2022. [Online]. Available: <https://youtu.be/yftrGib2lUg?list=PLKV-6KPNb3JMFUanA3Xh72Bp3u0IjVozC&t=1386>.
- [82] „Po dvouleté pauze vyroste v Česku nová větrná elektrárna. Postaví ji S & M Develop na Svitavsku,“ ekonomickydenik.cz, 2021. [Online]. Available: <https://ekonomickydenik.cz/po-dvoulete-pauze-vyroste-v-cesku-nova-vetrna-elektrarna-postavi-ji-s-m-develop-na-svitavsku/>.
- [83] „ROČNÍ ZPRÁVA O PROVOZU ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR,“ eru.cz, 2021. [Online]. Available: <https://www.eru.cz/rocni-zprava-o-provozu-elektrizacni-soustavy-cr-pro-rok-2021>.
- [84] J. Hodbod, „Český emisní faktor CO₂ výroby elektřiny v letech 2010–2020 a aktuální stav v Německu,“ TZB-info, [Online]. Available: <https://www.tzb-info.cz/energeticka-narocnost-budov/22337-cesky-emisni-faktor-co2-vyroby-elekriny-v-letech-2010-2020-a-aktualni-stav-v-nemecku>.
- [85] M. R. I. D. R. Soltani, Assessment of CO₂ capture options from various points in steam methane reforming for hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 39. 10.1016/j.ijhydene.2014.09.161., 2014.