



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

KONCEPČNÍ STUDIE MINIATURIZACE PALIVOVÉHO ČLÁNKU PRO PODVODNÍ SONDU

CONCEPTUAL STUDY OF FUEL CELL MINIATURIZATION FOR A RESEARCH SUBMERSIBLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Röder

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

BRNO 2024

Ing. Václav Miklas

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství
Student: Dominik Röder
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Václav Miklas

Akademický rok: 2023/24

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

Koncepční studie miniaturizace palivového článku pro podvodní sondu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Podvodní sondy hrají důležitou roli v mapování zatopených jeskyní, jejich morfologie a ekosystémů. Kvůli pohybu ve stísněných prostorech však často narážejí na limity z důvodu použití kabelového vedení pro komunikaci a napájení. Výrazným příslibem pro eliminaci kabelového vedení je použití palivového článku jako zdroje energie. Aktuální komerční řešení v této oblasti však cílí buďto na větší měřítka (vozidla, vlaky), nebo naopak velmi malá (RC auto, modul vzdělávacích her), navíc bez zohlednění specifíků podvodního prostředí. Aplikace pro podvodní sondu je předmětem aktivního výzkumu, přičemž zatím neexistuje technicky dotažené zařízení. Jedná se tedy o velmi aktuální téma bakalářské práce, která by představila koncepční studii miniaturizace palivového článku pro konkrétní podvodní sondu studentského týmu strojLAB.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše palivových článků s důrazem na limitaci jejich měřítka a environmentální stopu
2. Popis podvodní sondy a s ní spojených omezení a návrhových parametrů (prostor, hmotnost, energetické nároky, tepelné zatížení)
3. Konceptní návrh palivového článku (parametry klíčových zařízení systému, dispozice v sondě, materiálová a energetická bilance)

Seznam doporučené literatury:

CANO, Zachary P., Dustin BANHAM, Siyu YE, Andreas HINTENNACH, Jun LU, Michael FOWLER a Zhongwei CHEN. Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nature Energy*. 2018, 3(4), 279–289. ISSN 20587546.

SHIH, Nai Chien, Biing Jyh WENG, Jiunn Yih LEE a Yung Chia HSIAO. Development of a small fuel cell underwater vehicle. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013, 38(25), 11138–11143. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJHYDENE.2013.01.095

BARNALTE SANCHEZ, Pedro José, Fausto Pedro GARCÍA MÁRQUEZ a Mayorkinos PAPAELIAS. Life cycle assessment of an autonomous underwater vehicle that employs hydrogen fuel cell. *Sustainable Futures*. 2023, 6, 100121. ISSN 26661888. Dostupné z: doi:10.1016/J.SFTR.2023.100121

QUEIRÓS, Hugo, António LAFUENTE, João SEPÚLVEDA a João Sena ESTEVES. Microcontroller-Driven Hydrogen Fuel Cell Car. *International Journal on Hands-on Science*. 2010, 3(1), 28–31.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
děkan fakulty

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

Abstrakt

Hranická propast je, s předpokládanou hloubkou 1 km, nejhlubší propastí světa. Jejího dna se však ještě nepodařilo dosáhnout žádným z dostupných konvenčních prostředků. Kabelové nebo bateriové napájení malých podvodních sond však mají svá omezení. Pomocť ve splnění tohoto cíle by pak mohla pomoci integrace vodíkových palivových článků do průzkumné podvodní sondy Argo, aktuálně vyvíjené studentským týmem strojLAB na VUT v Brně. Palivové články jsou aktuálně hojně diskutovaným a perspektivním zdrojem napájení, především kvůli celosvětové snaze o snížení emisí CO₂. Tato bakalářská práce se zabývá detailním srovnáním palivových článků s důrazem na možné použití v malé podvodní sondě. Taktéž byla popsána možná řešení pro skladování vodíku a kyslíku v těchto sondách. Byla provedena koncepční studie integrace vhodného palivového článku do sondy Argo, zahrnující výběr palivového článku, popis jeho komponent a výpočet množství reaktantů, potřebných pro splnění cílů mise. Byl proveden výběr skladování reaktantů a navrženy vhodné velikosti zásobníků, přičemž největší důraz byl kladen na zachování co nejmenších rozměrů podvodní sondy. Dále byl proveden návrh vhodného uspořádání klíčových systému palivového článku v sondě tak, aby nebyla ohrožena rovnováha během mise. Tato práce přispívá k rozvoji nových technologií v oblasti podvodního průzkumu a nabízí perspektivy pro budoucí aplikace vodíkových článků.

Klíčová slova

podvodní sonda, palivové články, PEMFC, vodík, Hranická propast

Abstract

The Hranice Abyss, with an estimated depth of 1 km, is the deepest abyss in the world. However, no conventional means have yet managed to reach its bottom. The cable or battery power of small underwater probes has its limitations. The integration of hydrogen fuel cells into the Argo underwater exploration probe, currently being developed by the strojLAB student team at the Brno University of Technology, could help achieve this goal. Fuel cells are currently a widely discussed and promising power source, primarily due to the global effort to reduce CO₂ emissions. This bachelor's thesis deals with a detailed comparison of fuel cells with an emphasis on their possible use in a small underwater probe. Possible solutions for hydrogen and oxygen storage in these probes were also described. A conceptual study was conducted on the integration of a suitable fuel cell into the Argo probe, including the selection of the fuel cell, a description of its components, and the calculation of the amount of reactants needed to achieve the mission objectives. The selection of reactant storage and the design of suitable tank sizes were made, with the greatest emphasis placed on maintaining the smallest possible dimensions of the underwater probe. Furthermore, a design of the appropriate arrangement of the key fuel cell systems in the probe was carried out so that the balance during the mission would not be compromised. This work contributes to the development of new technologies in the field of underwater exploration and offers prospects for future applications of hydrogen cells.

Keywords

unmanned underwater vehicle, fuel cells, PEMFC, hydrogen, Hranice Abbys

Bibliografická citace

RÖDER, Dominik. *Koncepční studie miniaturizace palivového článku pro podvodní sondu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157740>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Václav Miklas.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci „Koncepční studie miniaturizace palivového článku pro podvodní sondu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Václava Miklase a uvedl jsem v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne

.....
Dominik Röder

Poděkování

Děkuji Ing. Václavu Miklasovi za příkladné vedení mé bakalářské práce. Taktéž bych chtěl moc poděkovat Ing. Marii Dlabikové a Ing. Janu Literovi za spoustu cenných informací o palivových člancích. Děkuji i členům týmu strojLAB za spolupráci a také rodině a spolužákům za podporu tehdy, kdy jsem to nejvíc potřeboval.

Obsah

Úvod	11
2 Napájení podvodních sond	12
2.1 Baterie.....	12
2.2 Palivové články	13
2.3 Hybridní systémy	15
2.4 Kabelové napájení.....	16
2.5 Další zdroje energie.....	16
3 Vodík a aspekty jeho využití.....	17
3.1 Základní vlastnosti vodíku	17
3.2 Historie využití vodíku	19
3.3 Současnost a perspektivy využití vodíku.....	20
3.3.1 Vodíkové palivové články.....	21
3.3.2 Spalování vodíku.....	22
3.3.3 Skladování energie	23
4 Palivové články.....	25
4.1 Základní popis	25
4.2 Typy palivových článků.....	27
4.2.1 Palivový článek s polymerovou membránou (PEMFC).....	27
4.2.2 Alkalický palivový článek (AFC)	29
4.2.3 Palivový článek s přímým zpracováním metanolu (DMFC).....	30
4.2.4 Palivový článek s elektrolytem na bázi pevných oxidů (SOFC)	31
4.2.5 Palivový článek s elektrolytem na bázi tekutých uhličitánů (MCFC)	32
4.2.6 Palivový článek s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné (PAFC)	34
4.3 Skladování vodíku	38
4.3.1 Plynný vodík.....	38
4.3.2 Zkapalněný vodík	38
4.3.3 Uhlovodíkové zdroje	39
4.3.4 Materiály se zpětným uvolňováním vodíku	39
4.3.5 Anorganické zdroje vodíku.....	39
4.4 Skladování kyslíku.....	40
4.4.1 Plynný kyslík	40
4.4.2 Zkapalněný kyslík.....	40
4.4.3 Chemické zdroje kyslíku.....	41

5	Koncepční studie	42
5.1	Hranická propast	42
5.1.1	Popis propasti.....	43
5.1.2	Expedice.....	45
5.2	Průzkumná sonda Argo	47
5.3	Řešení koncepční studie	51
5.3.1	Výběr palivového článku pro Argo	51
5.3.2	Výběr skladování reaktantů	51
5.3.3	Komponenty palivového článku	52
5.3.4	Výpočet výkonu sondy.....	53
5.3.5	Výpočet požadovaného příkonu PČ.....	55
5.3.6	Výpočet potřebného množství reaktantů	56
5.3.7	Výpočet množství odpadní vody.....	57
5.3.8	Návrh nádrží pro reaktanty.....	58
5.3.9	Dispozice palivového článku a nádrží v sondě	64
5.3.10	Nové parametry sondy s PČ	68
	Závěr.....	70
	Seznam použitých zdrojů	72
	Seznam použitých obrázků	78
	Seznam použitých tabulek.....	79

Úvod

V posledních letech dochází k enormnímu rozvoji různých typů bezpilotních prostředků a podvodní drony toho nejsou výjimkou. Již dnes nachází využití v různých sektorech a odvětvích lidské činnosti od armády [1], přes záchranné operace [2], prohledávání vraků lodí [3], kontrolu podvodní infrastruktury [4] až po obyčejné volnočasové aktivity [5]. Největšího využití však tyto sondy nachází v oblasti vědy, a to k průzkumu těžko přístupných míst pod vodní hladinou, mapování, odběru vzorků, případně i objevu nových živočišných druhů [6].

Většina podvodních sond ke svému napájení využívá baterie [7], ale mohou být napájeny i kabelovým vedením přímo ze souše [8], nebo být poháněny speciálně upraveným spalovacím motorem [6]. Ovšem, pro některé speciální aplikace i tyto konvenční zdroje energie naráží na určitá úskalí. Nedostatečná kapacita energie pro časově náročný průzkum [9], omezený dosah nebo riziko zaseknutí kabelového napájení v podvodních prostorách [10] jsou příklady problémů, se kterými se podvodní sondy mohou potýkat. Jedním z možných řešení těchto problémů by ovšem mohlo být použití vodíkových palivových článků.

Vodíkové technologie jsou v současnosti mimořádně aktuálním tématem. S ohledem na globální oteplování a přechod na bezemisní zdroje energie by v budoucnu mohly hrát klíčovou roli nejen v pohonech dopravních prostředků, ale i v zajišťování zdrojů a úložišť energie v mnoha stacionárních aplikacích [11]. Pro vodík je typická vysoká hmotnostní energetická hustota, což může značně zvýšit dosah a dobu, po níž může sonda pod vodou nezávisle operovat [11]. V závislosti na použitém typu palivových článků může být produktem chemické reakce pouze obyčejná voda bez emisí skleníkových plynů aj. znečišťujících látek [12].

Vodíkové palivové články tak mají potenciál stát se čistým zdrojem energie podvodních sond, které jsou určeny pro časově náročnou a dlouhou misi. Přesně takovouto misi je i průzkum jednoho ze zatopených krasových jevů na Moravě – Hranické propasti. Jedná se o nejhlubší zatopenou propast na světě, jejíž dna se zatím nepodařilo dosáhnout žádným ze současných konvenčních prostředků [13]. Vzhledem k její možné hloubce, která by mohla dosahovat až 1 kilometru [14], a komplexnosti jeskyních systémů, může být použití podvodní sondy s vodíkovými články jediným možným řešením, jak tuto propast kompletně prozkoumat. Právě taková sonda, aktuálně vyvíjená pod pracovním názvem „ARGO“ na Fakultě strojního inženýrství VUT, je předmětem této bakalářské práce.

Nicméně, i přes všechny výhody vodíkových článků je jejich použití v podvodních aplikacích mnohem větší výzvou než u jiných typů bezpilotních prostředků. Největším problémem je zejména skladování vodíku [15], ale i dalších reaktantů a produktů tak, aby to neohrozilo výsledný vztlak a vyváženost sondy [16]. Mnoho z těchto problémů je předmětem aktivního výzkumu, o čemž svědčí existující podvodní sondy s palivovými články, vyvinuté inženýrskými týmy z Japonska, Francie, USA nebo Kanady [7]. Avšak častým rysem těchto dronů jsou příliš velké rozměrové nároky, nekompatibilita s úzkými, členitými prostory propasti [7, 17]. Na druhou stranu, existují i jiné, mnohem menší aplikace napájené palivovými články jako třeba létající drony [18] nebo hračky [19].

Cílem této bakalářské práce spojit oba tyto velikostní extrémy a vytvořit koncepční studii palivového článku vhodného pro napájení podvodní sondy ARGO, určené k průzkumu Hranické propasti. Koncepční studie bude zároveň zohledňovat specifika dalších zařízení, které bude zapotřebí do sondy integrovat.

2 Napájení podvodních sond

Dálkově řízené podvodní sondy (ROV¹) a bezosádkové podvodní drony (UUV² či AUV³) představují nejrozšířenější prostředky určené k plnění nejrůznějších, zejména výzkumných podvodních misí [20]. Jsou navrženy k detailnímu mapování mořského dna, sběru dat a odběru vzorků, zkoumání podvodní fauny a flory a průzkumu stěží dostupných míst [6], jakými jsou i zatopené krasové oblasti. Díky své vysoké manévrovatelnosti a vybavení zahrnující nejrůznější senzory okolních podmínek, kamery, sonary, případně i manipulátory, jsou tyto prostředky schopny efektivně operovat v náročných podmínkách podmořského prostředí [21].

Jednou z klíčových vlastností těchto zařízení je vlastní, na vzduchu nezávislý pohon (AIP⁴), který jim umožňuje dlouhodobé operace bez nutnosti návratu na povrch [20]. V poslední době se vývoj soustředí na nové zdroje napájení a pohonů, což umožňuje prodloužit operační dobu a splnit specifické cíle misí [23]. Každá mise klade na sondu specifické požadavky, jako je rychlost, operační hloubka, množství výzkumných zařízení a dosah sondy, které vzájemně ovlivňují efektivitu operací. Operační dosah je však přímo spojen s energetickou kapacitou pohonného systému, která je limitována současnými technologiemi [7].

Prodloužení dosahu sond je možné dosáhnout maximalizací dostupné energetické kapacity a minimalizací spotřeby energie [24]. Volba vhodného pohonu a zdroje energie hraje klíčovou roli v optimalizaci těchto parametrů. Inovace v oblasti pohonných systémů a energetických zdrojů tak mohou výrazně zvýšit efektivitu a dosah podvodních sond, což je nezbytné pro splnění komplexních výzkumných cílů a náročných podvodních operací [24]. V následujícím souhrnu jsou uvedeny současně dostupné zdroje energie používané v podvodních sondách, se zaměřením spíše na malá UUV.

2.1 Baterie

Bateriemi jsou myšleny buď primární galvanické články (tzn. nedají se dobíjet) nebo sekundární galvanické články (akumulátory; lze je dobít) [21]. Baterie generují elektrický proud na základě elektrochemické reakce, jejich účinnost je tak velmi vysoká (více než 90 %) [22]. Mezi galvanické články patří např. alkalické baterie nebo (nenabíjecí) lithium-iontové baterie. Tyto články mají ze všech baterií nejvyšší energetickou hustotu (nad 250 Wh/kg) [23], nicméně, ačkoli jsou jejich počáteční náklady nízké, provozní náklady pak výrazně rostou vzhledem k faktu, že je nelze opakovaně dobíjet [21]. Navíc zde existuje vyšší bezpečnostní riziko spojené s koncem životnosti těchto baterií [24]. Proto je jejich použití v UUV spíše výjimečné [21].

Oproti tomu, nabíjecí baterie jsou v současnosti nejpoužívanějším zdrojem energie podvodních sond [21]. Tyto baterie se vyznačují nízkými provozními náklady a relativně dlouhou životností [21]. Dříve běžně používané nikl-kadmiové (NiCd) a nikl-metal hydridové akumulátory (NiMH) jsou v současnosti nahrazovány nabíjecími lithium-iontovými (Li-ion), které jsou se svou energetickou hustotou již srovnatelné s galvanickými články [23].

Obecně jsou baterie jednoduché a bezúdržbové zdroje energie, jejich dobíjení však může trvat i několik hodin [22]. Navíc, se zvyšující se kapacitou signifikantně roste i jejich hmotnost [21], což v některých případech může jejich použití v UUV značně omezit. Nevýhodou baterií je taktéž

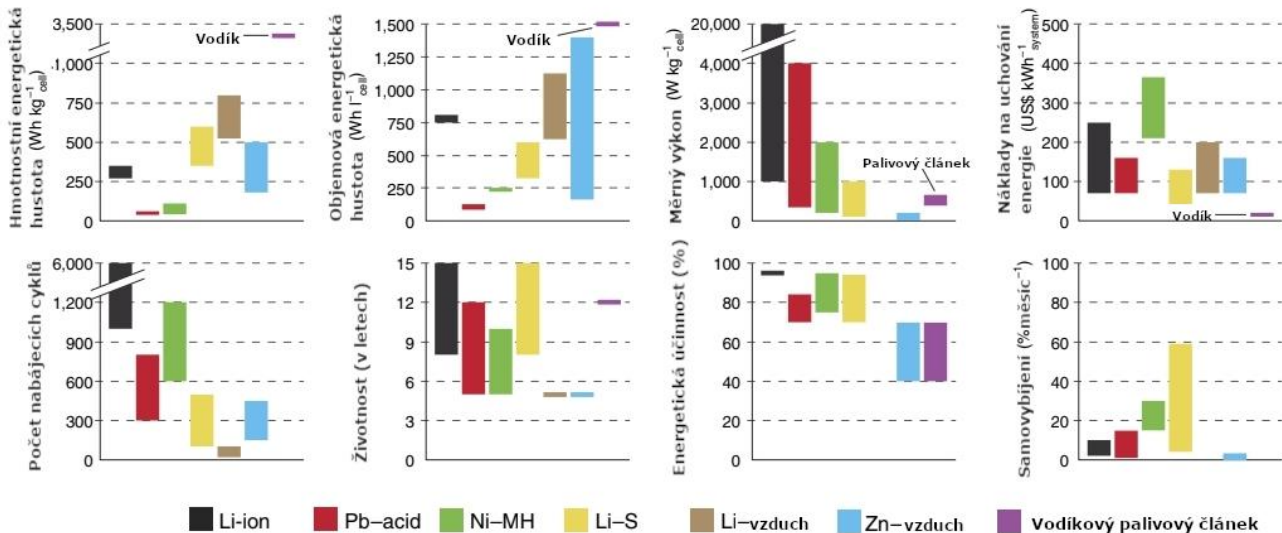
¹ Remotely operated vehicles

² Unmanned underwater vehicles

³ Autonomous underwater vehicles

⁴ Air independent propulsion

jejich malá tolerance vůči nízkým teplotám, kdy dochází k výraznému poklesu jejich kapacity [25]. Dosah některých sond by pak bylo možné zvýšit použitím podvodních dobíjecích stanic nebo využitím obnovitelných zdrojů energie jejich k samovolnému dobíjení, prozatím se však nejedná o dotažená řešení [26]. Srovnání různých typů baterií mezi sebou a dalšího zdroje – palivového článku typu s polymerní membránou (PEMFC) – je zobrazeno na obrázku 2-1.



Obr. 2-1 Srovnání různých druhů baterií a vodíkového palivového článku PEMFC [23] (upraveno)

2.2 Palivové články

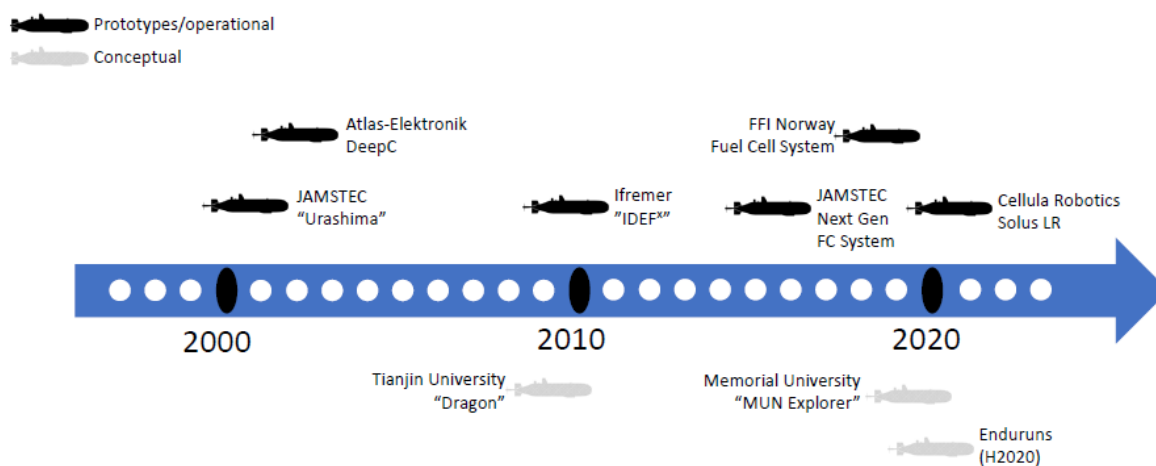
Palivové články (PČ), stejně jako baterie, přeměňují chemickou energii na energii elektrickou. Na rozdíl od baterií však generují elektrický proud pouze tehdy, je-li jim dodáváno palivo a oxidační činidlo, nejčastěji vodík a kyslík [21]. Produktem této reakce je pak často pouze voda, což je činí prakticky bezemisními [25]. Pro využití v podvodních sondách je nutné skladovat vodík spolu s kyslíkem buďto ve stlačené nebo zkapalněné formě, nebo jej získávat jinak, jak je dále vysvětleno v kapitole 4.3 [20]. V praxi se nejvíce osvědčily palivové články s polymerní membránou (PEMFC) [7] s účinností kolem 50 % [27]. Celková účinnost systému je ovšem závislá i na skladování reaktantů a zpravidla může být o 10-20 % nižší [28]. Energetická hustota celého systému závisí na množství uskladněného vodíku; při dostatečném množství však může dosahovat mnohem vyšších hodnot než u baterií. „Pouhé“ doplnění paliva je potom oproti dobíjení časově mnohem efektivnější [9]. Palivové články tak mají potenciál značně prodloužit dosah a efektivitu podvodních sond [7].

Nicméně, na rozdíl od baterií nemají tak rychlou odezvu na změny v odběru energie, což je způsobeno určitou setrvačností probíhající chemické reakce [21]. Složitost systému, zahrnující komponenty jako jsou zásobníky, kompresory, chladiče a regulátory s sebou nese vyšší rozměrové nároky a také vyšší nároky na údržbu [24]. Riziko úniku vodíku při provozu nebo manipulaci s tlakovými nádobami musí být bráno taktéž v potaz [29]. Skutečnou výzvou pro použití palivových článků v podvodních aplikacích je však skladování reaktantů v dostatečném množství a udržení neutrálního vztaku během mise [20]. Vodíkové zásobníky však mohou posloužit i jako jeho kompenzace [24].

Ačkoliv byla většina PČ implementována do rozměrnějších podvodních sond (jak je uvedeno v Tab. 2-1), technologický vývoj, vedený zejména automobilovým průmyslem, již nyní umožňuje jejich využití i v menších měřítcích [7]. Jejich vysoké pořizovací náklady a cena vodíku však zatím brání jejich širšímu rozšíření [30]. Více o palivových článcích je uvedeno v kapitole Palivové články4.

Tab. 2-1 Podvodní UUV s palivovými články (PEMFC) [21]

AUV	Výkon [kW]	Energie [kWh]	Baterie	Rozsah [km]	H ₂	O ₂	Hloubka [m]	Doba mise [hod]
Urashima	4	N/A	Li-ion	300	Chemická ⁵	Plyn	3500	56
DeepC	3,6	140	Li-ion	400	Plyn	Plyn	4000	60
IDEF^x	1,5	36	Li-ion	317	Plyn	Plyn	800	24
Solus LR	1,2	250	Li-ion	2000	Plyn	Plyn	N/A	N/A
LCAUV	10	N/A	N/A	3000	Plyn	Kapalný	N/A	600



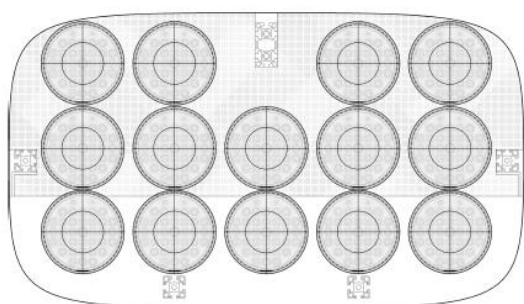
Obr. 2-2 Koncepty i zkonstruovaná řešení UUV s palivovými články v čase [21]

⁵ Hydridy kovů

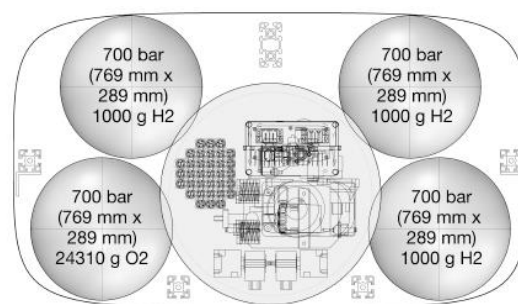
2.3 Hybridní systémy

Využití hybridních systémů u podvodních sond může představovat efektivnější řešení než využití jednotlivých zdrojů napájení samostatně. Typicky se jedná o kombinaci palivového článku s baterií, čímž je využito výhod obou těchto řešení [21]. Jednotlivé zdroje tak mohou být menších rozměrů a mohou pracovat s mnohem vyšší účinností [7]. Existují dvě možnosti použití hybridního systému PČ-baterie: V prvním scénáři je PČ primárním zdrojem energie a pracuje na bodu své maximální účinnosti, baterie pak pokrývá náhlé nárůsty spotřeby energie sondy. V případě, že je energie nadbytek, PČ dobíjí baterii [21]. V tom druhém je primárním zdrojem baterie a PČ slouží k jejímu konstantnímu dobíjení [7]. Na obrázku 2-3 je porovnáván čistě bateriový systém (vlevo) s hybridním systémem baterie-PČ (vpravo).

Další atraktivní možností by pak mohla být kombinace baterií nebo PČ se superkapacitorem⁶. Díky velkému množství uložené náboje a vysokým rychlostem vybití by tak malým sondám mohly krátkodobě poskytovat velké množství energie [31]. Nejedná se ovšem o příliš rozšířené řešení [21].



(a) bateriový systém s celkovou kapacitou 153 kWh a objemovou hustotou energie 153 kWh/m³. Zašedlé plochy představují 120 l pěny pro udržení vztlaku a vykompenzování hmotnosti baterií.



(b) systém PČ-baterie s nádržemi na vodík pod tlakem 700 MPa. Celková kapacita je 106 kWh a objemová energetická hustota 414 kWh/m³ (včetně nádrží).

Obr. 2-3 Srovnání bateriového napájení s napájením PČ-baterie u podvodní sondy [21]

⁶ Elektrotechnická součástka schopna pojmout velké množství náboje

2.4 Kabelové napájení

Kabel umožňuje ROV nepřetržitý provoz díky přímému spojení se zdrojem energie [22]. Tento systém nejenže eliminuje potřebu častého dobíjení, ale umožňuje taktéž ovládání sondy v reálném čase, neboť může sloužit i k přenosu dat [32]. Zdroj energie se pak nachází mimo podvodní prostředí, tedy na souši, nebo na palubě mateřské lodi [33].

Na druhou stranu, dlouhý kabel může omezovat manévrovatelnost a výkon sondy, neboť představuje hmotnost navíc, kterou za sebou sonda musí táhnout [32]. Dalším problémem je omezený operační dosah, limitovaný délkou kabelu, což omezuje pohyb sond ve vzdálených oblastech a velkých hloubkách [10]. Použití kabelu v členitých podvodních prostorách s sebou zároveň nese vysoké riziko jeho zamotání nebo zaseknutí [34]. Dlouhý kabel představuje i ohmický odpor, což vede k nutnosti použití silného zdroje napětí, jakým je např. dieslový agregát [35]. I přesto je však kabelové napájení levnou variantou pro dlouhodobé a energeticky náročné podvodní operace, především také proto, že je často jediným řešením pro spolehlivou komunikaci se sondou [35].

2.5 Další zdroje energie

Pro UUV bez posádky a ponorky s posádkou bylo vyvinuto i několik dalších zdrojů energie, nicméně žádná z těchto alternativ nebyla široce rozšířena pro napájení podvodních sond. Jedná se o následující systémy [21]:

- Na vzduchu nezávislé spalovací motory nebo turbíny (např. Stirlingovy motory)
- Jaderné reaktory
- Hybridní palivové články
- Slanou vodou aktivované baterie
- Radioizotopové termoelektrické generátory (RTG)

I když některé systémy byly úspěšně použity ve větších ponorkách (jaderné reaktory, spalovací motory), komplexita a rozměry těchto systémů jejich použití v malých podvodních sondách nedovolují [21]. Spalovací motory navíc vydávají vibrace a hluk, což může ovlivnit vyváženost sondy a vyplašit podvodní živočichy [20]. Stejně jako další zdroje energie, použité v několika málo prototypch, nejsou kvůli složitosti, bezpečnostním rizikům nebo nedostatečnému technologickému pokroku pro použití v malých podvodních sondách upřednostňovány [21].

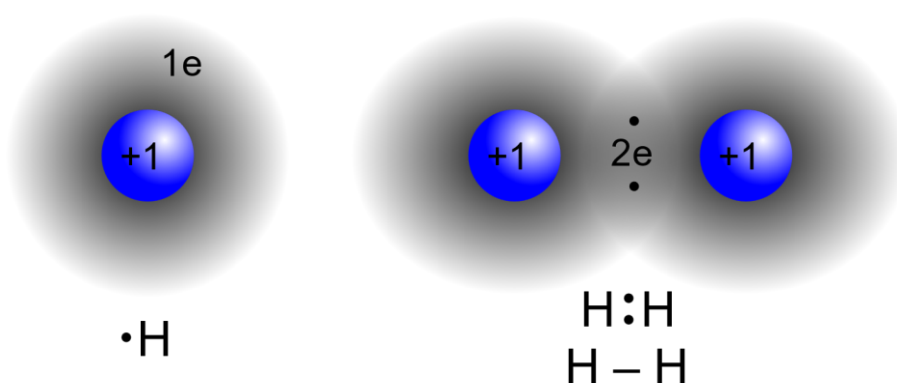
3 Vodík a aspekty jeho využití

Tato kapitola se věnuje vodíku jakožto nejdůležitějšímu palivu pro palivové články, které jsou podrobně rozvedeny v kap. 4. Podkapitoly se věnují jeho vlastnostem vodíku, jeho využití včetně historických aplikací a perspektivám do budoucna.

3.1 Základní vlastnosti vodíku

Vodík je nejmenší, nejlehčí a nejjednodušší prvek, který existuje. Zároveň je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru a 3. nejrozšířenějším na Zemi [36]. Atom vodíku je tvořen pouze jedním protonem a jedním elektronem, existují ale i izotopy převážně s jedním (deuterium) nebo dvěma neutrony (tritium) [37]. Atom vodíku je vysoce reaktivní – je schopen zreagovat s jakýmkoli jiným prvkem vyjma vzácných plynů – na Zemi se tedy nachází převážně ve formě sloučenin [36]. Vodík je součástí vody, zemního plynu, uhlí, ropy a všech živých organismů, neboť je zároveň i důležitým biogenním prvkem [36].

V čisté formě se vodík nejčastěji vyskytuje jako dvouatomová molekula H_2 . Atomy vodíku mezi sebou tvoří vazbu kovalentní nepolární, molekula se tak vyznačuje větší stabilitou než samostatný atom [37] (viz Obr. 3-1). Za běžných podmínek se jedná o velmi lehký, bezbarvý, netoxický plyn bez zápachu [36]. Plynný vodík je $14,5\times$ lehčí než vzduch, ve větších koncentracích se tak nachází pouze ve vysokých vrstvách atmosféry, kde postupně přechází do vesmírného prostoru [38]. Při zemském povrchu se jej v suchém vzduchu nachází pouhých $5,5\times 10^{-5}$ % [39]. Vyznačuje se též velmi nízkou viskozitou [37]. Vzhledem ke své malé velikosti a nízké hmotnosti je molekula vodíku schopna procházet skrze krystalické mřížky různých materiálů, včetně kovů, což může být problém zejména při skladování a dopravě samotného plynu [37]. Kvůli difuzi vodíku jsou kovy také náchylné na tzv. vodíkové křehnutí, s čímž je třeba počítat např. při navrhování tlakových nádob [37]. Vodík se také vyznačuje velmi rychlým rozptylem do okolí [15]. Teplota varu z anormálních podmínek je pak -253 °C [25].



Obr. 3-1 Model atomu a molekuly vodíku

Za běžných podmínek je plynný vodík stabilní, za předpokladu inicializace (např. jiskrou) je ovšem hořlavý a se vzduchem může tvořit výbušnou směs [15]. Vodík hoří téměř neviditelným, bezbarvým až mírně namodralým plamenem [37], přičemž jediným produktem hoření je vodní pára (viz rovnice 1) [37]. Spalné teplo uložené v 1 kg hmoty dosahuje enormně vysoké hodnoty 141,9 MJ/kg, což je mnohem více než u konvenčních paliv [40]. Na druhou stranu, jeho energetická hustota je za normálního tlaku pouhých 11,9 MJ/m³ [40], což vede k nutnosti jej skladovat a dopravovat ve stlačené podobě. Za vyšších teplot ovšem vodík reaguje s některými, často alkalickými kovy, za vzniku hydridů, což jsou mj. sloučeniny mající potenciál pro jeho bezpečnější skladování v pevné formě (viz kap. 4.3.5) [36]. Shrnutí vybraných vlastností vodíku je uvedeno v Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Základní vlastnosti vodíku [41]

Vlastnosti vodíku	Hodnota	Jednotka
Molekulární hmotnost	2,016	g/mol
Elektronegativit (Pauliho stupnice) ⁷	2,2	-
Hustota plynu ⁸	0,0838	Kg/m ³
Výhřevnost	141,9	MJ/kg
	11,89	MJ/m ³
Spalné teplo	119,9	MJ/kg
	10,05	MJ/m ³
Skupenské teplo vypařování ⁹	445,6	kJ/kg
Teplota varu	20,3	K
Teplota tání	20,41	K
Hustota (kap.)	70,8	Kg/m ³
Teplota kritického bodu	32,94	K
Tlak kritického bodu	1284	kPa
Hustota v kritickém bodě	31,4	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita	14,89	kJ/kg.K
Difuzní koeficient ¹⁰	0,61*10 ⁻⁴	m ² /s
Rychlost difuze ¹¹	<0,02	m/s

⁷ Zdroj [36]

⁸ Za normálních podmínek (0 °C a tlaku 101 kPa)

⁹ Všechny hodnoty níže (včetně) jsou ze zdroje [40]

¹⁰ Za normálních podmínek (0 °C a tlaku 101 kPa)

¹¹ Za normálních podmínek (0 °C a tlaku 101 kPa)

3.2 Historie využití vodíku

Vodík jako chemický prvek objevil již v roce 1766 britský chemik Henry Cavendish [36]. Roku 1790 se pak vědcům W. Nicholsonovi a A. Carlislemu (a nezávisle i J. Ritterovi) povedlo elektrolýzou rozložit vodu na kyslík a vodík [42]. Německo-švýcarský chemik Christian Friedrich Schönbein pak objevil efekt vodíkového článku, když v roce 1839 experimentoval s platinou, vodíkem a kyslíkem. Jejich sloučením získal jednak vodu a jednak elektrický proud. A o pár let později, na základě tohoto objevu, vynalezl anglický vědec sir William R. Grove první kyslíko-vodíkovou baterii s platinovými elektrodami v kyselině sírové a je tak považován za „Otce vodíkových článků“ [42]. Nicméně, na rozdíl od spalování vodíku, měla doba vodíkových článků teprve přijít.

Roku 1808 se švýcarskému vynálezci jménem François Isaac de Rivaz povedlo zkonstruovat první spalovací motor na vodík, kterým rozpohyboval prototyp jednoho z prvních primitivních automobilů. Později, roku 1863, de Rivazův motor vylepšil Belgičan Etienne Lenoir a v roce 1865 již po celé Paříži jezdilo přes 350 jeho automobilů [42]. Tyto „Hippomobily“, jak se jim přezdívalo, používaly jako palivo svítiplyn, jehož je vodík základní složkou. Do automobilů se ovšem čím dál častěji začaly používat levné deriváty ropy, a tak se svítiplyn jako palivo využíval spíše v obdobích jejího nedostatku, např. po 1. světové válce [43].

Svítiplyn, vyráběný zplyňováním uhlí, se na přelomu 19. a 20. století používal především v teplárenství a k pouličnímu osvětlení, postupně se ale rozšířil i do mnoha domácností ke svícení, topení i k vaření. Pro takto masivní rozšíření po celém světě bylo potřeba vybudovat potřebnou infrastrukturu, a tak se rozvody svítiplynu staly prvním veřejným rozvodem energie. Nicméně kvůli své toxicitě (svítiplyn obsahoval kromě vodíku i velké množství oxidu uhelnatého) byl ve 20. st. postupně vytlačován elektřinou a levnějším i bezpečnějším zemním plynem. V Česku byl tento přechod zcela dokončen až v roce 1996 [44].

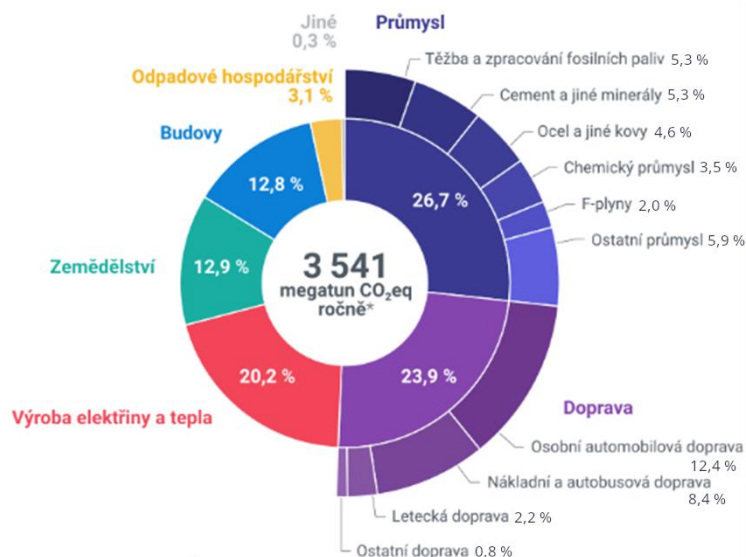
V 1. pol. 20. st. byl čistý vodík (stejně jako helium) díky své nízké hustotě používán jako náplň do vzducholodí. Tyto dopravní prostředky poskytovaly pravidelné dopravní spojení mezi městy v Evropě a USA. Nicméně po sérii nešťastných havárií, kdy docházelo ke vzplanutím a explozím vodíku, bylo od jeho používání postupně upouštěno. Katastrofa vzducholodi Hindenburg v roce 1937 pak znamenala jednak konec éry vzducholodí jako takových, ale také nedůvěru v jakékoli další aplikace vodíku. [25]

Na druhou stranu to, co bylo velkou nevýhodou u vzducholodí, bylo nesmírně užitečné v dobývání vesmíru, a sice enormní gravimetrická hustota energie vodíku. Právě díky tomu je již více než půl století využíván jako kapalné palivo pro vesmírné rakety. O rozmach využití vodíku se nejvíce zasloužily vesmírné výzkumné mise z 60. let, jako byly např. mise Apollo [25]. Během kosmických letů Apolla se navíc využívala technologie vodíkových palivových článků pro výrobu elektřiny, tepla a čisté pitné vody pro posádku [45].

Moderní vodíkový palivový článek v 50. letech zkonstruoval chemický inženýr Francis Bacon poté, co si přečetl 100 let starou práci sira Grova [46]. První dopravní prostředek na vodíkové články, zemědělský traktor, představil roku 1959 Harry Ihrig a jeho tým [30]. V roce 1966 se pak americká automobilka General Motors pustila do vývoje prvního osobního automobilu na palivový článek, pojmenovaného jednoduše „Electrovan“ [47]. Ropná krize v 70. letech a obavy o životní prostředí pak vedly k zintenzivnění studia vodíkových článků. V 90. letech se pak výzkumnému týmu společnosti Ballard Power Systems povedl průlom v této oblasti, neboť dokázali zvýšit energetickou hustotu vodíkového článku vynalezením technologie PEM (z angl. Proton-Exchange Membrane = protonově propustná membrána). Díky tomu mohou nyní automobily s vodíkovými články výkonnostně konkurovat těm se spalovacími motory [46]. Vodíkové články mají nicméně své místo i v mnoha stacionárních aplikacích jako zdroj elektřiny i tepla [30]. Za posledních 20 let

pak vznikla více než stovka patentů [46] a v současnosti se investuje nejen do inovování vodíkových článků, ale i do ekologické výroby vodíku a do infrastruktury pro jeho skladování a dopravu, neboť při přechodu na bezemisní zdroje energie bude hrát vodík důležitou roli [45].

3.3 Současnost a perspektivy využití vodíku



Obr. 3-2 Emise skleníkových plynů v EU podle sektorů za rok 2021 [96]

(Pozn. CO₂eq znamená množství uvolněných skleníkových plynů, které mají stejný dopad na globální oteplování jako ekvivalentní množství CO₂)

V současnosti se vodík využívá především v průmyslu chemickém a potravinářském, je totiž důležitý pro rafinaci ropy, výrobu amoniaku, hnojiv, výbušnin, polymerů, nebo taktéž k hydrogenaci tuků [25] či výrobě nejnovější generace bionafty – tzv. HVO dieselu¹² [48]. Najít jej můžeme i jako součást speciální atmosféry např. při výrobě nerezových ocelí, polovodičových součástek, anebo ve vysokorychlostních turbogenerátorech, kde je využit jako chladivo a mazivo [49]. Lze jej dokonce použít k redukci železa místo uhlíku a přispět tak ke snižování emisí skleníkových plynů v hutním průmyslu [50]. V budoucnu má vodík, jako dekarbonizační palivo, potenciál podpořit dekarbonizační snahy v řadě odvětví, které momentálně představují výraznou produkci skleníkových plynů (viz obrázek 3-2) zejména v dopravě, průmyslu či výrobě elektřiny a tepla. Výraznou roli pro dekarbonizaci mají mít především následující vodíkové technologie a oblasti jeho využití – (1) technologie palivových článků, (2) technologie spalování vodíku a (3) využití vodíku jako úložiště energie [45]. Obrázek 3-4 zjednodušeně zobrazuje možnosti výroby, distribuce a využití vodíku.

¹² Z angl. Hydrotreated Vegetable Oil = hydrogenovaný rostlinný olej

3.3.1 Vodíkové palivové články

Jak už bylo detailněji popsáno v kap. 2, palivové články (PČ) vyrábí elektřinu přímou chemickou reakcí vodíku a kyslíku, často za vzniku pouhé vodní páry [17]. Na principu vodíkových palivových článků funguje současně rozvíjející se vodíková mobilita. V dopravě je vodík hlavním konkurentem bateriových elektromobilů (BEV¹³). Vodíkové automobily (FCEV¹⁴) mají ve srovnání s elektromobily delší dojezd (600 km a více), krátkou dobu plnění (cca 5 minut) a fungují lépe za chladných podmínek, kdy dochází k výrazně menším ztrátám dojezdu. Vodíkové články jsou v současnosti využívány spíše u nákladní dopravy, autobusové dopravy a dalších typů přepravy na delší vzdálenosti, neboť pro velké dopravní prostředky je snazší implementovat větší vodíkovou nádrž, která je pro delší dojezd potřeba [23].

V současnosti dominuje vodíkové automobilitě společnost Toyota (v roce 2019 ovládala 48 % světového trhu s FCEV [30]), dále pak především Honda a Hyundai. Všechny tyto tři asijské automobilky už několik let vyrábí komerčně dostupné osobní i nákladní FCEV [30]. Z evropských automobilek vyvíjí vodíková auta např. společnosti Renault, Daimler Trucks, Volkswagen [30] nebo Audi [45]. Vodíkové autobusy již nyní jezdí ve velkých městech v Japonsku, Jižní Koreji, Číně, ale i v některých státech Evropy [30]. Dvacet dvoupodlažních autobusů s PČ dokonce provozuje londýnská metropole [51]. Většímu rozšíření FCEV ovšem brání zejména jejich vysoká pořizovací cena a také chybějící infrastruktura pro výrobu, přepravu a skladování vodíku [23].

Automobily ovšem nejsou jedinými dopravními prostředky, u kterých se dají palivové články využít. V železniční dopravě by vodíkové vlaky mohly nahradit ty dieslové na dosud neelektrifikovaných tratích. První takové vlaky byly do uvedeny do pravidelného provozu v Dolním Sasku relativně nedávno, v roce 2022 [52].

V rámci dekarbonizačních snah mají palivové články využití i v námořní a letecké dopravě. První letadlo poháněné pouze vodíkovými články „Antares-DLR-H2“ bylo demonstrováno Německým střediskem pro letectví a kosmonautiku (DLR) v roce 2009 [30]. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole 3.2, vodíkové články se využívaly i ve vesmírných modulech Apolla nebo v raketoplánech [42], kde byly nejen zdrojem elektrické energie, ale také tepla a pitné i užitkové vody pro astronauty [45]. Toho by se dalo využít i v komerčních letech a vývoj je v této oblasti veden hlavně americkou NASA a společností Boeing [30]. Do roku 2030 však v této oblasti nelze očekávat žádné větší komerční nasazení [52].

Pokud se týče lodní dopravy, zde již posledních 20 let probíhá intenzivní spolupráce na mnoha výzkumných projektech zejména mezi státy Evropské unie [17]. Jedním takovým je např. HYSEAS III, což je první, čistě vodíkovými články poháněný trajekt, který je od roku 2020 provozován u skotského souostroví Orkneye [45]. Za zmínku stojí ale i plavidlo „The Energy Observer“. Tento energeticky zcela soběstačný katamarán si totiž ke svému napájení dokáže vyrobit rovnou samotný vodík, a to za pomoci solární a větrné energie přímo na palubě. Tento katamarán byl již schopen obepnout celý svět [53] a jedná se tak o ukázkový příklad fungující synergie mezi vodíkovými palivovými články a obnovitelnými zdroji energie. Palivové články (především PEMFC) pak byly použity i v několika podvodních sondách, jak bylo uvedeno v Tab. 2-1 a Obr. 2-2.

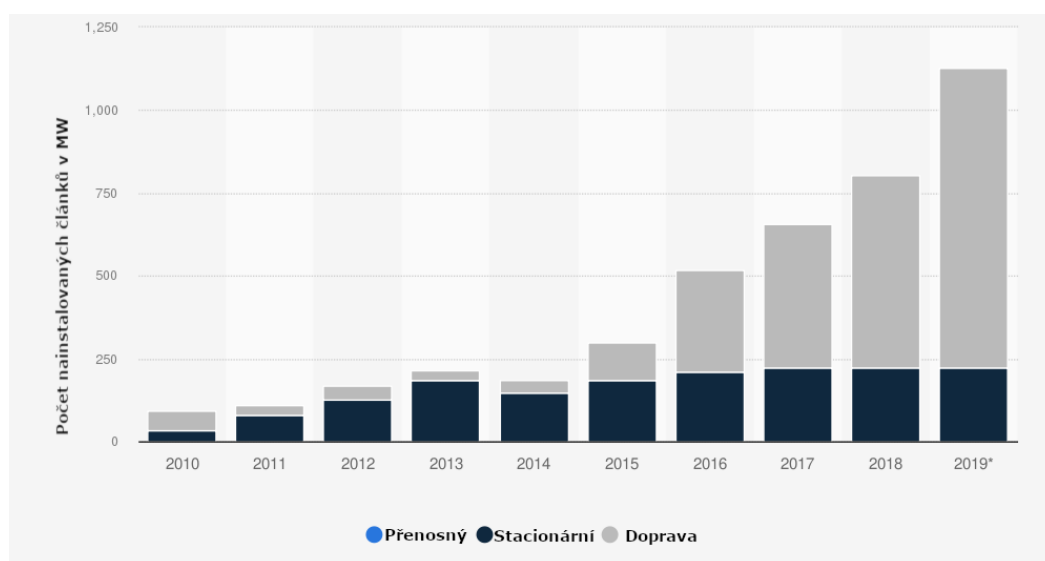
Kromě mobility mají PČ své místo i jako stacionární zdroje energie, kde mohou být využity k mnoha účelům, zejména jako záložní zdroje energie kritické infrastruktury, generátory elektřiny v odlehlostech, nabíjecí stanice pro veřejnost či jako kogenerační jednotky pro obytné domy [40]. Například v Tokiu, ale i v jiných japonských městech, jsou již po více než 30 let úspěšně

¹³ Z angl. Battery Electric Vehicles = bateriové elektromobily

¹⁴ z angl. Fuel Cell Electric Vehicles = automobily na palivové články

napájena nákupní centra, školy, nemocnice a mnoho dalších míst pomocí technologie vodíkových článků [45]. V současnosti jsou lídry v této oblasti Spojené státy, Japonsko, ale i Jižní Korea [40], kde se v současnosti například investuje do centralizovaného systému o výkonu až 50 MW energie [45]. Vodíkové články by se tak v budoucnu mohly stát – vedle konvenčních elektráren – součástí udržitelného energetického mixu [40].

Palivové články jsou opravdu variabilní technologie, pokud se výkonů a velikostí týče, o čemž svědčí i fakt, že je lze použít nejen jako zdroj energie dopravních prostředků a budov, ale i k napájení mnohonásobně menších přenosných zařízení. Jde zejména o spotřebitelskou elektroniku (laptopy, tablety), armádní zařízení (GPS systémy, vysílačky), přenosné generátory pro outdoorové a armádní aplikace nebo také hračky a vybavení pro vzdělávací účely [30]. Apple, Samsung, Toshiba ale i jiní velcí výrobci elektroniky experimentují s vodíkovými články s cílem prodloužit výdrž jejich produktů [30]. Obr. 3-3 zobrazuje množství palivových článků podle nainstalované kapacity závislosti na sektoru použití po celém světě.



Obr. 3-3 Množství nainstalovaných PČ celosvětově z hlediska kapacit podle sektorů využití (2019) [95]

3.3.2 Spalování vodíku

Další možností, jak využít velké množství energie uložené ve vodíku, je jeho spalování. Hodnota spalného tepla vodíku (142 MJ/kg) je zhruba 3× vyšší než u zemního plynu, a zhruba stejně tak i u benzínu nebo nafty (viz Tab. 3-2) [54]. Rychlost hoření plamene je až 7× větší než u zemního plynu [55]. Množství uvolněné energie za jednotku času je tak velmi vysoké, proto je vodík stále jedním z nejlepších raketových paliv pro lety do vesmíru [56]. Navíc, oproti fosilním palivům není produktem hoření oxid uhličitý, díky čemuž by v budoucnu za tyto paliva mohl poskytovat náhradu, a to např. v průmyslových procesech, které nejsou jednoduše elektrifikovatelné [57]. Na druhou stranu, vzhledem k tomu, že při spalování vzniká velmi vysoká teplota, může spalování produkovat i emise No_x a SO_x , které pak musí být odstraněny. Oproti některým palivovým článkům se tak zatím nejedná o zcela bezemisní využití energie [58].

Další možnost využití spalování vodíku se nabízí v energetickém sektoru, ať už v čisté formě, nebo ve formě směsi se zemním plynem [59]. Vodík by mohl být spalován např.

v paroplynových elektrárnách. Několik takových elektráren již existuje, a to v rámci projektu Long Ridge Energy Generation v Ohiu ve Spojených státech [59]. Stejně tak by mohl být spalován v kotlích pro centrální zásobování teplem, kde by zároveň v rámci tzv. hybridních systémů mohl být využit i ke generování elektřiny [57]. V rámci programu „HyDeploy hydrogen blending“ přijímalo od roku 2021 po dobu 10 měsíců přes 600 domů ve městě Gateshead ve Velké Británii 20% směs vodíku se zemním plynem [60]. Ve stejném městě pak byly pro výzkumné účely postaveny 2 dvojdomky, v nichž se vodík používá ve všech běžných plynových spotřebičích [61]. Nevýhodou je opět nízká hustota vodíku a jeho obtížné skladování [62]. Potřeba je taktéž optimalizace zařízení a spotřebičů navržených pro zemní plyn [59], další výzkum je potřeba i v rámci transportu a spalování směsi vodíku se zemním plynem [62].

Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.2, vodík lze taktéž použít i jako palivo ve spalovacích motorech automobilů (HICE, z angl. Hydrogen Internal Combustion Engine). V současnosti jsou na trhu dostupné osobní automobily nebo autobusy spalující vodík, žádné z nich však není vyráběné sériově. Vedoucí postavení mají v tomto případě automobilky BMW a Ford, jiné menší společnosti se spíše zaměřují na přestavbu současných automobilů [58]. Dalším zajímavým řešením je taktéž vstřikování vodíku k benzínu nebo naftě od české firmy HHO Technology, což zvyšuje efektivitu spalování a snižuje nežádoucí emise. Vodík je vyroben elektrolýzou vody přímo na palubě automobilu a je rovnou spalován ve spalovacím motoru, odpadají tak problémy s jeho skladováním [63].

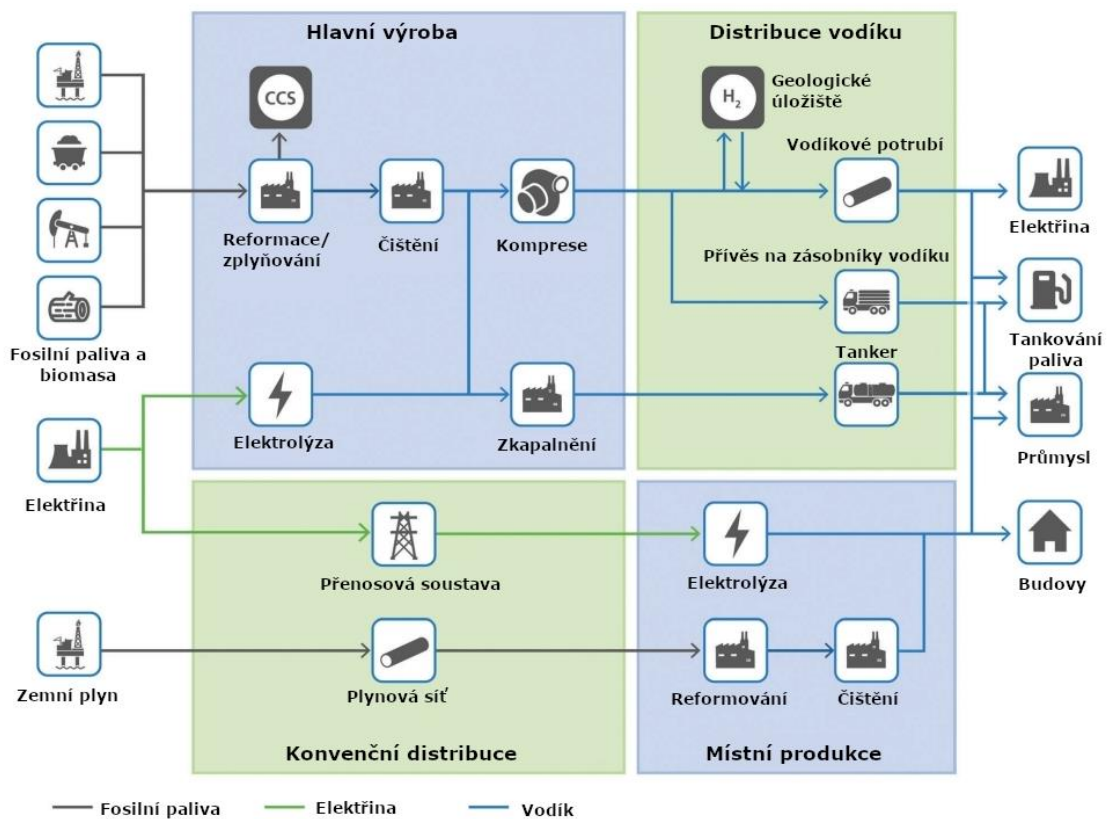
Tab. 3-2 Srovnání spalných tepel podle druhů paliv

Palivo	Spalné teplo [MJ/kg]
Vodík	119,9
Metan	50
Biometan	50
Metanol	18
Benzín	44,5
Nafta	42,5

3.3.3 Skladování energie

Jedna z těch největších výzev, se kterou se energetický sektor bude muset vypořádat poté, co z velké části přejde na obnovitelné zdroje energie, bude obtížná regulovatelnost výroby elektřiny ze solární a větrné energie a její přizpůsobivost poptávce, na rozdíl od elektřiny z konvenčních plynových nebo uhelných elektráren. V letních měsících je vyrobené elektřiny často mnohem více, než kolik je jí potřeba, a v zimě je to přesně naopak. Vodík by v tomto případě mohl být vyráběn z přebytků energie v létě pomocí elektrolýzy a následně uskladněn a využit o týdny či měsíce později. Elektřina vyrobená z vodíku by tak mohla vyrovnávat nejen sezónní nedostatky obnovitelné elektřiny, ale i občasně výkyvy během celého roku [57]. Zároveň, ne každý stát má kvůli své geografické poloze ideální podmínky pro využívání energie z obnovitelných zdrojů. Tento handicap by mohl dorovnat právě vodík, který by byl jednoduše transportován ze zemí, které na tom jsou (ať už po celý rok nebo jen jeho část) o poznání lépe. Vodík by se pak mohl skladovat ve stlačeném stavu v tlakových nádržích, nebo za běžného tlaku v geologických prostorech a přírodních dutinách jako jsou např. solné jeskyně, vyčerpaná ložiska ropy nebo zemního plynu [59].

V současnosti v USA probíhá projekt „Advanced Clean Energy Storage“ v Utahu, v rámci něž je plánováno uskladnit velké objemy plynného vodíku, vyprodukovaného z obnovitelných zdrojů, právě po dobu jedné sezóny [59].



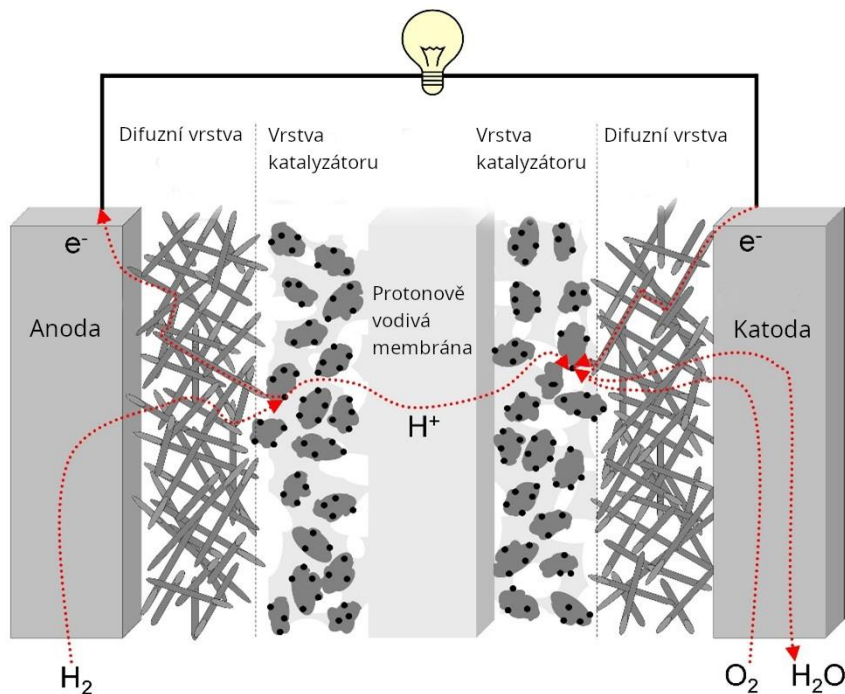
Obr. 3-4 Možnosti výroby, distribuce a využití vodíku [98] (upraveno)

4 Palivové články

V této kapitole je vysvětlena problematika palivových článků včetně skladování reaktantů, což jsou klíčové informace pro výběr vhodného systému PČ pro napájení podvodní sondy Argo v rámci koncepční studie v kap. 5.

4.1 Základní popis

Palivový článek je elektrochemický článek, který pro svou funkci musí být – na rozdíl bateriových článků – nepřetržitě plněn palivem. Na základě oxidačně-redukčních reakcí uvnitř článku je pak generován elektrický proud [40]. Existuje několik typů PČ, ale všechny jsou vždy složeny ze tří základních částí – anody, katody a elektrolytu [25]. Jednotlivé elektrody se pak obvykle skládají z několika vrstev. Pro lepší představu si je třeba nejdříve popsat jednotlivé komponenty PČ, ku příkladu na typu PČ s polymerní membránou (PEMFC):



Obr. 4-1 Palivový článek s polymerní membránou [99] (upraveno)

- 1) **Bipolární desky** (anoda a katoda) – nacházejí se po stranách PČ a slouží (1) k vedení jednotlivých reaktantů k elektrolytu a (2) k odvodu volných elektronů z anodové části do vnějšího elektrického obvodu a jejich přívodu zpět ke katodové části [40]. Materiály těchto desek musí být především elektricky vodivé a odolné vůči difuzi plyných reaktantů. Dále musí odolávat korozi a být chemicky nereaktivní s jakoukoli látkou v PČ. Nejčastěji se používají desky z nerezové oceli, hliníku nebo z kompozitních materiálů [64]. Povrch desek z vnitřní strany bývá obvykle tvořen kanálky pro rovnoměrnou distribuci plynů po celé ploše PČ. Geometrie těchto kanálků je důležitá, protože ovlivňuje průtok reaktantů schopných vstupovat do chemických reakcí, a tedy i výkon samotného PČ [40].

- 2) **Difuzní vrstva** (anoda a katoda, typické pro PEMFC) – jedná se o vodivou, vysoce porézní až vláknitou vrstvu, která má několik funkcí: (1) je určena především k usměrnění toku a rovnoměrnému rozptylu reaktantů v rámci PČ, (2) k odvodu volných elektronů do vnějšího elektrického obvodu, (3) odvodu přebytečné vody a tepla a (4) taktéž poskytuje mechanickou ochranu zejména membránovým elektrolytům před nečistotami a vnějšími tlaky. Běžně používaný je např. porézní uhlový papír nebo uhlíková tkanina o tloušťce 100-300 μm [65].
- 3) **Vrstva katalyzátoru** – je určena k rozložení reaktantů na jednotlivé ionty a urychluje výslednou reakci. Katalyzátor se nachází na povrchu porézního materiálu, aby byla účinnost reakce co nejvyšší (např. na částicích porézního uhlíku) [40]. Častým katalyzátorem je např. platina, ale záleží na typu PČ [66].
- 4) **Elektrolyt** – klíčová část PČ, která slouží k transportu iontů mezi elektrodami, elektrony ovšem nepropouští. Jedná se zejména o látku, která musí splňovat několik následujících podmínek – vyznačovat se vysokou chemickou stabilitou, aby nereagovala s použitými elektrodami, dále pak iontovou, avšak nikoli elektronovou vodivostí, a u vysokoteplotních PČ i vysokými body tání a varu [40]. Mezi hlavní typy používaných elektrolytů patří např. kapalné elektrolyty (kyselé nebo zásadité roztoky), pevné elektrolyty (iontoměničové membrány a krystalické materiály) nebo elektrolyty z roztavených solí [67].

Ačkoli se jednotlivé palivové články odlišují jak použitými materiály, ze kterých jsou vyrobeny jednotlivé komponenty, tak reaktanty, které do nich vstupují a následnými chemickými reakcemi, jejich obecný princip je vždy velmi podobný:

- Na anodu je přiváděn vodík (či na vodík bohatá sloučenina), pomocí katalyzátoru na anodě je pak rozložen na kationty a volné elektrony. Elektrony jsou pak přes difuzní vrstvu a anodovou (bipolární) desku odváděny do vnějšího elektrického obvodu [40].
- Na katodu je přiváděn kyslík (popř. vzduch), který přijímá volné elektrony z vnějšího elektrického obvodu za vzniku záporně nabitých iontů [40].
- Vodíkové kationty z anody jsou přitahovány záporně nabitými ionty ke katodě skrze elektrolyt. Ten zároveň funguje jako filtr, neboť volné elektrony, odseparované z vodíku, jím nemohou projít. Elektrony jsou tedy vedeny vnějším elektrickým obvodem ke katodě, čímž vzniká elektrický proud [67].

Palivové články tedy zjednodušeně převádí vodíkové (či na vodík bohaté) palivo přímo na elektrickou energii a teplo díky elektrochemické, exotermní reakci vodíku s kyslíkem za vzniku vody jako odpadního produktu. Jedná se tedy o opačnou reakci k elektrolyze vody, jak popisuje následující obecná rovnice [66], kde E_{el} je elektrická energie a Q teplo:



Jednotlivé články (buňky) jsou schopny pracovat samostatně, nicméně pro zvýšení elektrického napětí a výkonu je jich sériově zapojeno několik za sebou. Palivový článek o určitém výkonu, složený z několika jednotlivých buněk, se poté nazývá „stack“ (v překladu stoh). Jednotlivé stacky lze mezi sebou taktéž propojovat, a to především paralelně, aby bylo zajištěn rovnoměrný přívod reaktantů do jednotlivých stacků [68].

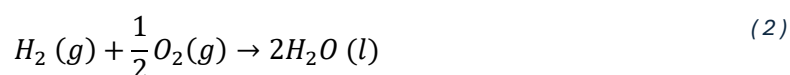
4.2 Typy palivových článků

Palivové články se liší rozpětím teplot, za kterých jsou schopny pracovat, účinností, uplatněním i cenou. Podle použitého elektrolytu a podle použitého paliva pak rozlišujeme 6 základních typů palivových článků:

4.2.1 Palivový článek s polymerovou membránou (PEMFC)

Hlavní komponentou tohoto vodíkového článku je polymerová iontoměničová membrána (PEM, z angl. Polymer/Proton-Exchange Membrane) známá též pod obchodními názvy jako Nafion nebo Flemion [66]. Tato speciální membrána, vyrobená z okyseleného teflonu, je schopna propouštět protony H^+ (a jiné reaktanty a plyny), elektrony skrze ni ovšem neprojdou [28]. Elektrolyt je zde tvořen tzv. MEA sestavou (z angl. Membrane Electrolyt Assembly) složenou z iontoměničové membrány, vrstvy katalyzátoru a difuzní vrstvy [17]. Pro správnou funkčnost PČ je taktéž důležitá vodní pára pro ideální iontovou výměnu [68]. Nejčastěji používaným katalyzátorem, který je důležitý pro vznik volných elektronů, je platina (Pt) [64]. PEMFC je plněn čistým vodíkem na jedné straně (u anody) a kyslíkem (nebo vzduchem) na straně druhé (u katody). Na katodě je vodík pomocí katalyzátoru rozložen na kationty (H^+) a volné elektrony (e^-). Kationty jsou poté přitahovány na anodu skrze PEM kyslíkovými anionty, zatímco volné elektrony jsou ke katodě transportovány vnějším elektrickým obvodem. Kyslíkové anionty tedy vznikají u katody, neboť jsou s elektrony spárovány. Jako odpadní produkt na katodě pak vzniká voda a teplo [66]. Kyslík však částečně reaguje i s vodíkovými protony či s všudypřítomnou vodou za vzniku hydroniových a hydroxidových iontů (H_3O^+ a OH^-) [40]. Reakce u tohoto typu palivového článku probíhá z 1/3 před membránou a ze 2/3 za ní [68]. Celý proces je jednoduše znázorněn následujícími chemickými rovnicemi [66]:

Celková probíhající reakce:

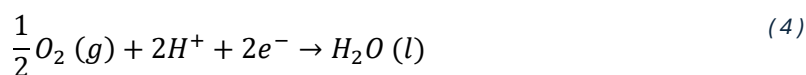


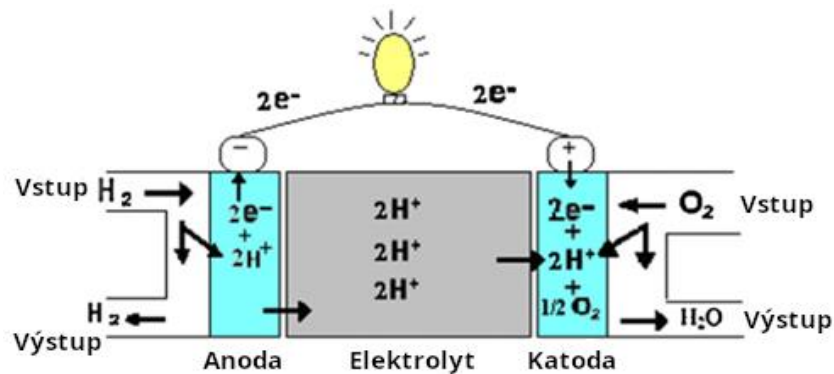
Poloviční reakce pro PEMFC:

Oxidační reakce (anoda):



Redukční reakce (katoda):





Obr. 4-2 Palivový článek s polymerní membránou [99] (upraveno)

PEMFC je vůbec nejslibnějším a nejpoužívanějším palivovým článkem v mnoha aplikacích, obzvláště pokud se bezemisních zdrojů energie týče, neboť produktem tohoto článku je pouze čistá voda [30]. Jedná se o nízkoteplotní PČ, jehož pracovní teplota je mezi 60-80 °C, ale existuje i „vysokoteplotní“ verze, která dosahuje teplot mezi 110 a 180 °C (složení elektrolytu je však trochu odlišné) [17]. PEMFC je zároveň nejúčinnějším nízkoteplotním palivovým článkem, jehož elektrická účinnost se pohybuje kolem 40 a 50 % [17], napětí jedné buňky pak dosahuje cca 1,1 V [66]. PEMFC jsou jednoduché, kompaktní PČ, které se vyznačují vysokou energetickou hustotou [66]. Jeho velkou výhodou oproti jiným PČ je taktéž potřeba krátkého času k nastartování nebo vypnutí PČ. Právě díky tomu se PEMFC používá především v dopravních prostředcích jako jsou osobní a nákladní automobily, autobusy, vlaky [17], ale i malá letadla [69] nebo ponorky [70]. Jako první byly použity na společnost NASA jako součást vesmírného programu Gemini roku 1960 [28].

Na druhou stranu, polymerová membrána je velice náchylná na teplotu, jež nesmí dlouhodobě přesáhnout 100 °C, jinak dojde k vysušení membrány [68]. Vodní pára je pro fungování membrány prospěšná, voda v kapalném skupenství už ovšem nikoliv. Odvod stále vznikající vody je proto velice důležitý, jinak dojde k rozkladu membrány [68]. Nečistoty a cizorodé částice vlivem víření, způsobeným elektrickým napětím v PČ, taktéž způsobují její degradaci. Membrána je zároveň velmi tenká a citlivá na tlak způsobený reaktanty, proto je potřeba neustále sledovat a ovládat jejich průtok na obou stranách PČ [68]. Plyny přiváděné na katodu (kyslík, příp. vzduch) jsou schopny procházet přes membránu i na stranu anody. Aby k tomu však příliš nedocházelo, je třeba u anody udržovat tlak o něco vyšší než u katody [68]. Problémem pro materiály může být nejen vysoká difuzivita vodíku [37], ale i samotná voda – (1) její pH stupeň výrazně kolísá kvůli dynamické přítomnosti iontů H^+ i OH^- a (2) musí být zcela demineralizovaná [68]. Proto je nutné v PEMFC používat vhodné materiály jako je např. hliník (Al) nebo kompozitní PPS (polyfenylsulfid) [68]. Voda může představovat problém také v případě záporných teplot okolního prostředí, neboť může dojít k jejímu zamrznání [68]. Je-li pracovní látkou vzduch, je po určité době PČ „profouknout“ čistým vodíkem kvůli vyšší koncentraci inertního dusíku (N_2), který snižuje výkon PČ [68]. Kvůli použitému katalyzátoru na bázi platiny je nutné dbát i na vysokou čistotu vodíku. Síra, oxid uhelnatý i oxid uhličitý mohou negativně ovlivnit funkci katalyzátoru a způsobit tak nevratný pokles výkonu [17]. V případě použití čistých reaktantů však tyto problémy odpadají.

4.2.2 Alkalický palivový článek (AFC)

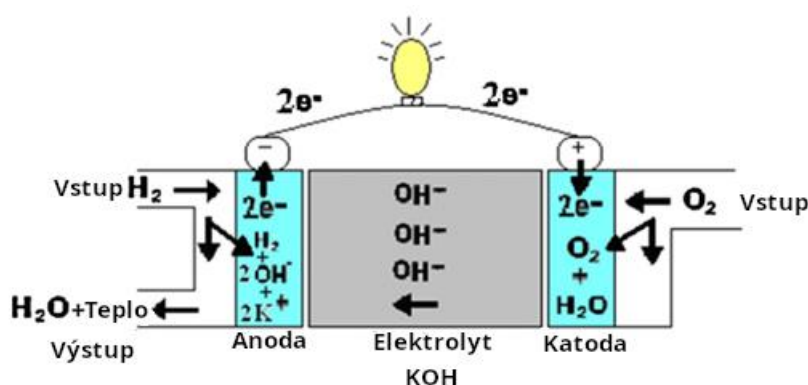
Jako elektrolyt je v AFC využíván vodný roztok hydroxidu draselného (KOH). Protože je elektrolyt zásaditý, mechanismus vedení iontů se od PEMFC liší. Iontem propouštěným skrze elektrolyt je hydroxidový anion (OH^-) [67]. Na anodě spolu reagují molekuly vodíku se záporně nabitými hydroxidovými ionty za vzniku vody a volných elektronů. U katody jsou volné elektrony přijímány zase molekulami kyslíku a vody za vzniku hydroxidových iontů [66]. Katalyzátorem, který zde urychluje reakci, bývá obvykle nikl (Ni) [66].

Poloviční reakce pro AFC [66]:

Oxidační reakce (anoda):



Redukční reakce (katoda):



Obr. 4-3 Alkalický palivový článek [67] (upraveno)

AFC se běžně řadí mezi nízkoteplotní PČ, běžný rozsah pracovních teplot se zde pohybuje mezi 60 a 90 °C, nicméně některé konstrukce jsou schopny pracovat i mezi 23 a 70 °C [66]. Alkalický elektrolyt je poté pohyblivý, obíhá mezi elektrodami a je spolu s vodou odváděn z článku [28]. Existují ale i AFC, které pracují za vysokých teplot (až 230 °C) [67]. V takovém případě se však z vodného roztoku KOH elektrolytem stává spíše tuhá hmota, která je držena pohromadě pomocí kapilárních sil v porézní matici (např. azbestu), elektrolyt je tedy statický [28]. Elektrická účinnost AFC je kolem 60 % [66]. Jediná buňka PČ je pak schopna generovat elektřinu o napětí okolo 1 voltu [66].

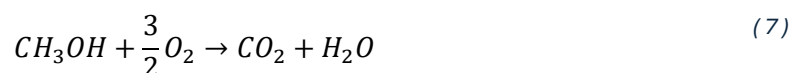
AFC byl taktéž použit NASA, a to na palubách raketoplánů pro výrobu elektřiny a pitné vody pro astronauty. Následně byl využit jako zdroj energie na palubách ponorek a lodí, nebo specializovaných dopravních prostředků (vozíky v logistických centrech aj.) [66]. Jedná se o jeden z nejlepších PČ, neboť jako elektrolyt je využíván hydroxid draselný, což je běžná sloučenina, a jako katalyzátor nikl, který je oproti platině, používané u PEMFC, mnohem levnější [66]. U AFC nevznikají žádné nežádoucí emise, jako palivo je zde používá – tak jako u PEMFC – kyslík a vodík [66]. Na druhou stranu, práce s vodou (příp. s elektrolytem) je v tomto typu PČ o něco komplikovanější, neboť voda vzniká jednak jako produkt u anody, odkud je potřeba odebírat, a jednak vstupuje do reakce u katody, kde je nutné ji naopak dodávat, a to vždy v ideálním množství a ve vhodném

skupenství. Kvůli všudypřítomné vodě je taktéž nezbytné používat korozivzdorné materiály [67]. Velkou nevýhodou AFC je také reakce zásaditého elektrolytu (KOH) s oxidem uhličitým (CO₂) ze vzduchu za vzniku uhličitanu draselného (K₂CO₃), což snižuje funkčnost celého PČ (angl. CO₂ poisoning) [66]. V případě použití čistého kyslíku u podvodních aplikací by toto však žádný problém nebyl.

4.2.3 Palivový článek s přímým zpracováním metanolu (DMFC)

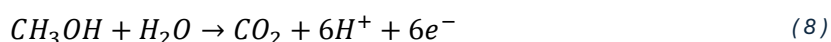
Jako palivo je v tomto typu článku používán běžná alkoholová sloučenina metanol (CH₃OH). Elektrolytem je zde polymerní iontoměničová membrána (PEM) tak, jako je tomu u typu PEMFC [67]. Mechanismus výměny iontů mezi elektrodami je tedy založen na kationtech H⁺. Katalyzátor, který se u DMFC používá, je opět platina (Pt) nebo platina-ruthenium (Pt-Ru) [71]. Na anodě se metanol spolu s vodou rozkládá na oxid uhličitý (CO₂), vodíkové kationty a volné elektrony. Na anodě molekuly kyslíku tyto kationty a volné elektrony přijímají a vzniká voda. Odpadními produkty jsou zde poté CO₂, voda a samozřejmě teplo [66].

Celková probíhající reakce je následující [71]:

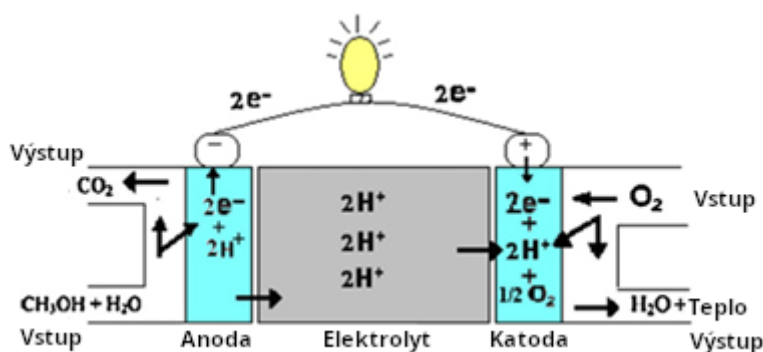
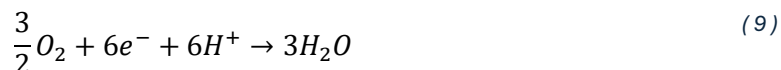


Poloviční reakce pro DMFC [71]:

Oxidační reakce (anoda):



Redukční reakce (katoda):



Obr. 4-4 Palivový článek s přímým zpracováním metanolu [67]
(upraveno)

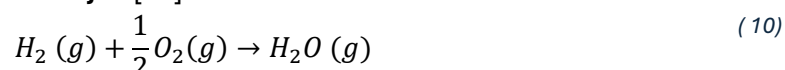
Metanol lze v DMFC použít ve dvou formách – buď v kapalném skupenství, nebo ve formě plyných par. V případě kapalného metanolu jsou dosahované výkony a elektrická napětí u DMFC nižší, neboť chemická výměna mezi anodou a katodou probíhá pomaleji. Na druhou stranu, v případě plyných par je potřeba výparník, což snižuje kompatibilitu PČ a zároveň je PEM vystavena snazší dehydrataci a může mít tak nižší životnost [66].

DMFC patří mezi nízkoteplotní palivové články, pracující v rozmezí teplot od 60 do 200 °C. Účinnost je však oproti jiným PČ nižší, a to kolem 40 % [66]. Stejně tak napětí vygenerované jednou buňkou PČ je pouhých 0,2-0,4 V [66]. DMFC se dále dělí na 2 druhy systémů: aktivní a pasivní. Aktivní DMFC jsou spolehlivější a účinnější, složené navíc z čerpadel metanolu a vody, kompresoru vzduchu, separátoru CO₂ a ze spousty dalších řídicích systémů a čidel, které ovládají průtok jednotlivých reaktantů, jejich koncentraci a teplotu PČ [66]. Pasivní DMFC žádné z těchto pump a kompresorů nemá, průtok metanolu je tak řízen samovolně kapilárními jevy a difuzním procesem a na základě gradientu koncentrací mezi anodou a zásobníkem paliva [71]. Takovéto systémy jsou potom kompaktnější, levnější a jednodušší [66] a lze je tak implementovat např. do malých přenositelných elektrických zařízení jako jsou laptopy nebo mobilní telefony [67].

4.2.4 Palivový článek s elektrolytem na bázi pevných oxidů (SOFC)

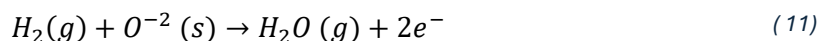
SOFC je nejčastěji používaným palivovým článkem ve stacionárních aplikacích [30]. Jedná se o vysokoteplotní PČ pracující v rozmezí teplot mezi 500-1000 °C [17]. Elektrolytem je v tomto případě nejčastěji suchá keramická membrána z yttriem stabilizovaného oxidu zirkoničitého (YSZ) [67]. Tato membrána se vyznačuje vysokou teplotní i chemickou stabilitou a za vysokých teplot i vysokou iontovou vodivostí [66]. Ionty, vedené skrze membránu, jsou v tomto případě kyslíkové anionty (O⁻). Palivem se v tomto typu PČ dá použít nejen čistý vodík, ale i díky vysokým pracovním teplotám i uhlovodíková paliva (např. metan, CH₄) [66]. Běžným katalyzátorem je v tomto případě nikl (Ni) [72]. Na katodu je přiváděn kyslík, který je ionizován a vznikají záporné kyslíkové ionty. Ty jsou zachycovány a transportovány skrze elektrolyt k anodě. Na anodě následně reagují s plyným vodíkem za tvorby vodní páry a volných elektronů. Volné elektrony jsou opět odváděny vnějším elektrickým obvodem zpět na katodu, kde vytvářejí již zmíněné kyslíkové ionty [73].

Celková probíhající reakce je následující [73]:

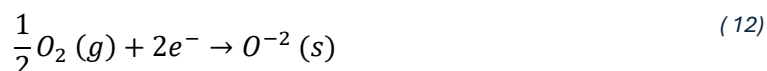


Poloviční reakce pro SOFC [73]:

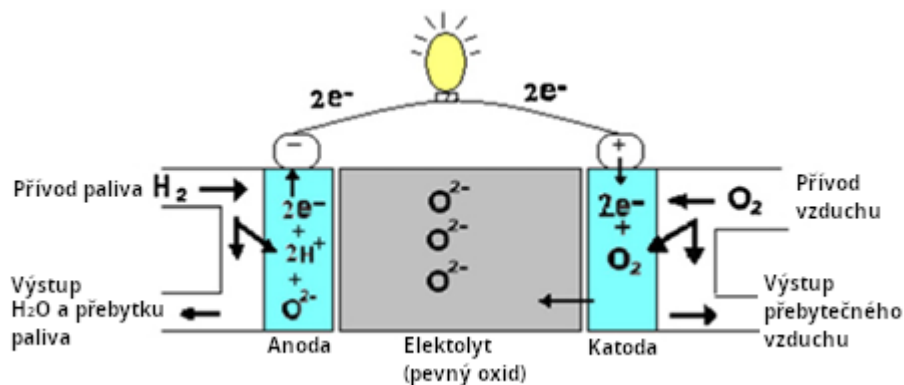
Oxidační reakce (anoda):



Redukční reakce (katoda):



Vodík je možné získávat přímo v PČ z uhlovodíkových paliv pomocí parního a suchého reformingu [73]:



Obr. 4-5 Palivový článek s elektrolytem na bázi pevných oxidů [67] (upraveno)

Účinnost SOFC se pohybuje mezi 50-60 % [17], ovšem s kombinovaným využitím tepla až 90% [66]. Napětí vygenerované jednou buňkou tohoto PČ se pohybuje kolem 0,8 až 1 V [66]. Kvůli vysokým provozním teplotám je možné v SOFC jednoduše použít i konvenční uhlovodíková paliva (např. zemní plyn) namísto čistého vodíku [67]. Díky tomu se SOFC hodí nejlépe pro výrobu elektrické energie ve stacionárních aplikacích až do výkonů 1 MW, nejlépe v kombinaci s plynovou turbínou nebo v hybridních kogeneračních jednotkách pro budovy a domácnosti [17]. SOFC jsou zároveň relativně odolné vůči síře, která se může nacházet v použitém palivu. Tento PČ nevyžaduje použití vzácných kovů jako katalyzátorů, neboť kinetika reaktantů je díky vysoké teplotě dostačující. Díky tomu je PČ odolnější vůči nečistotám a malému množství síry, které se může přirozeně vyskytovat v uhlovodíkovém palivu [17]. Na druhou stranu, nevýhodami SOFC je především dlouhý čas potřebný k prvotnímu zahřátí PČ a jeho rozjezdu právě kvůli vysoké teplotě a horší tepelné roztažnosti některých materiálů (zejména keramické YSZ membrány) [17]. Studují se nicméně možnosti, jak provozní teplotu SOFC snížit [66]. Vzhledem k vysokým teplotám a možnosti zpracování uhlovodíkových paliv se nejedná o bezemisní PČ, ačkoli množství emisí, které vzniká je v porovnání se spalováním mnohem nižší [74]. SO_x a NO_x, vznikající za vysokých teplot, pak musí být z odpadních plynů odstraněno [74].

4.2.5 Palivový článek s elektrolytem na bázi tekutých uhličitánů (MCFC)

Jedná se o vysokoteplotní palivový článek využívající jako elektrolyt roztavenou směs uhličitnanových solí, rozptýlenou v porézní, chemicky stálé keramické membráně hlinitanu sodného (Na₃AlO₃), též známé pod zkratkou BASE (z angl. Beta-alumina solid electrolyte) [66]. Ionty, které jsou mezi elektrodami přemísťovány, jsou pak uhličitnanové anionty (CO₃⁻). Použité katalyzátory

mohou být u tohoto typu různé, často však jedná např. oxidy hliníku, hořčíku nebo niklu [75]. Tento PČ bývá obvykle plněn uhlovodíkovými palivy (např. metanem, CH₄), které jsou pomocí parního reformingu (chemický proces, při němž se vodní pára za velmi vysoké teploty přivádí k metanu nebo oxidu uhelnatému) rozloženy na čistý vodík a oxidy uhlíku [66]:

Parní reforming 1:

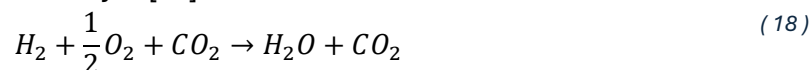


Parní reforming 2:



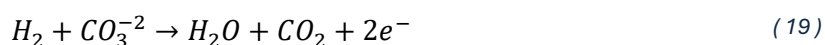
Zároveň s těmito reakcemi jsou vodík a oxid uhelnatý slučovány s hydroxidovými anionty v elektrolytu, čímž jsou generovány volné elektrony a vzniká voda a oxid uhličitý. Na katodě se pak slučuje kyslík ze vzduchu (O₂), oxid uhličitý (CO₂), přiváděný sekundárním okruhem z anody na katodu, a volné elektrony z vnějšího elektrického obvodu, čímž zpětně vznikají nové hydroxidové anionty, doplňující elektrolyt [66].

Celková probíhající reakce je následující [75]:



Poloviční reakce pro MCFC [66]:

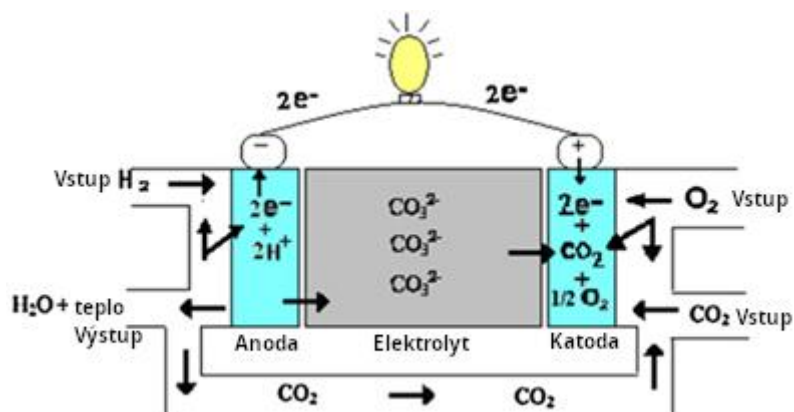
Oxidační reakce 1 (anoda):



Oxidační reakce 2 (anoda):



Redukční reakce (katoda):



Obr. 4-6 Palivový článek s elektrolytem na bázi tekutých uhličitánů [67] (upraveno)

Tento PČ pro svůj chod potřebuje opravdu vysoké teploty v rozmezí mezi 650-800 °C [17], s čímž se pojí jeho výhody i nevýhody. Jeho účinnost se pak pohybuje kolem 45-47 %, s využitím odpadního tepla je však schopen dosáhnout kombinované účinnosti více než 80 % [66]. Jedna buňka PČ je pak schopna poskytnout napětí okolo 0,7-1 V [66]. Katalyzátor, použitý v MCFC, může být oproti jiným PČ poměrně levný, neboť zde nejsou potřeba žádné vzácné kovy. Největší výhodou je, že do MCFC lze jako palivo použít jak čistý vodík, tak oxid uhelnatý, zemní plyn, a nebo propan [66], hodí se proto ve stacionárních aplikacích pro výrobu elektřiny např. spolu s konvenčními elektrárnami na uhlí nebo zemní plyn, příp. jako zdroj energie v armádních aplikacích [66].

4.2.6 Palivový článek s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné (PAFC)

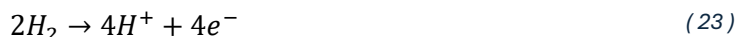
Elektrolytem u PAFC je kyselina fosforečná (H_3PO_4) obsažená v matrici z porézního karbidu křemíku (SiC). Kyselina fosforečná je – stejně jako hydroxid draselný u AFC – běžně používanou sloučeninou. Elektrolyt je však u tohoto typu kyselý, tzn. propouští pouze vodíkové kationty H^+ [67]. Elektrody jsou v tomto případě z uhlového papíru a jako katalyzátor je použita platina (Pt) [66]. Palivo, se kterým PAFC pracuje je buď čistý vodík nebo vodík z uhlovodíkových paliv [74]. Reakce na anodě i katodě jsou pak stejné jako u PEMFC. Vodík je na anodě rozštěpen na protony a volné elektrony. Protony jsou transportovány ke katodě skrze elektrolyt, zatímco volné elektrony vnějším elektrickým obvodem. Na katodě pak reagují společně s kyslíkem za vzniku vody [67].

Celková probíhající reakce je následující [66]:

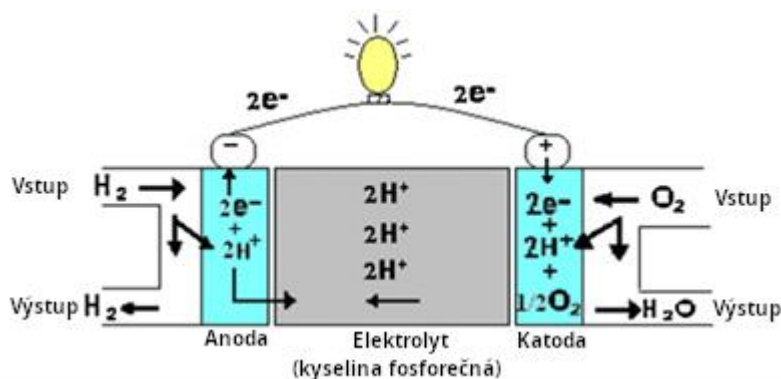


Poloviční reakce pro PAFC:

Oxidační reakce (anoda):



Redukční reakce (katoda):

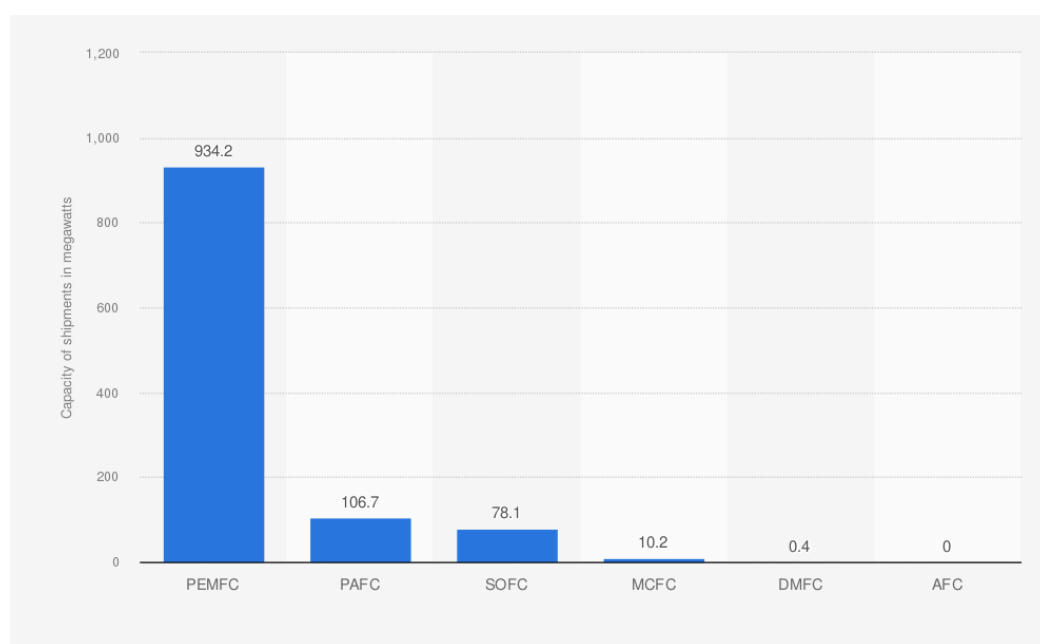


Obr. 4-7 Palivový článek na bázi kyseliny fosforečné [67] (upraveno)

Jedná se o vysokoteplotní palivový článek, který pracuje mezi teplotami 150-220 °C. Jeho elektrická účinnost se pak pohybuje mezi 40-50 % a napětí jedné buňky PČ dosahuje hodnoty 1,1 V [66].

PAFC jsou schopny pracovat i se vzduchem nebo se svítíplynem (směs H_2 a CO), aby však nedošlo k „zadušení“ PAFC oxidem uhelnatým, musí pracovat za vyšších teplot. Zároveň kyselina fosforečná se vyznačuje nižší stálostí oproti jiným elektrolytům. Kvůli nižší účinnosti a práci s nečistými plyny, má PAFC celkově větší rozměry. Větší výrobní náklady a použitá platina jako katalyzátor pak zvyšují celkovou cenu PAFC [66]. Na druhou stranu, při využití tepla z odpadní vody může účinnost PAFC dosáhnout až 85 % [66]. PAFC jsou proto využívány spíše ve stacionárních aplikacích, byly ale použity i u větších dopravních prostředků jako jsou např. autobusy [67]. Na trhu jsou dostupné systémy o výkonech od 200 kW až do 11 MW [66]. V závislosti na použitém palivu, i zde může vznikat určité množství CO_2 , stejně jako NO_x a SO_x , oproti spalovacím procesům se však jedná o výrazně nižší množství [74].

Kromě těchto šesti základních typů PČ existují i jiné, více či méně podobné, které budou možná použity v blízké budoucnosti: ZAFC (z angl. zinc-air fuel cell), využívající zinkovou anodu podobnou jako u baterií, PCFC (z angl. proton ceramic fuel cell), relativně nový typ PČ, a nebo RFC (z angl. regenerative fuel cell), u něhož je možné obrátit směr chemické reakce a elektrolýzou odpadní vody zpětně vyrábět samotný vodík a kyslík [66]. Shrnutí základních vlastností PČ je uvedeno v tabulce 4-1 a tabulce 4-2. Množství jednotlivých typů nainstalovaných PČ na celém světě podle kapacity je zobrazeno na následujícím obrázku 4-8.



Obr. 4-8 Množství nainstalovaných PČ celosvětově podle typu v MW (2019) [64]

Tab. 4-1 Srovnání jednotlivých typů palivových článků podle parametrů [17]

Typ PČ	Teplota (°C)	Elektrolyt	Typické palivo	Typická velikost modulu [27]	El. účinnost ¹⁵	Životnost (h*1000)
PEMFC	60-80 (LT) 110-180 (HT)	PEM na vodní bázi	Vodík	<1 kW-100 kW	45-55 %	60-80 (stacionární) <25 (dopravní)
AFC	60-200	Hydroxid draselný	Vodík	1-100 kW	40-50 %	5-8
SOFC	500-1000	Porézní keramika	H ₂ , metanol a uhlovodíky	1 kW-2 MW	50-60 %	20-80
MCFC	650-800	Roztavené uhličitany	H ₂ , metanol a uhlovodíky	300 kW-3 MW	43-55 %	15-30
PAFC	140-200	Kyselina fosforečná	H ₂ , LNG a metanol	5-400 kW	30-42 %	40-60
DMFC [66]	60-200 °C	PEM	Metanol	1 W-100 kW	40 %	-

¹⁵ Pouze elektrická účinnost samotného PČ

Tab. 4-2 Srovnání jednotlivých typů palivových článků podle použití [26]

Typ PČ	Oblast použití	Výhody	Nevýhody a výzvy
PEMFC	Záložní zdroj, přenosný zdroj, komunitní energetika, doprava	Pevný elektrolyt (větší odolnost vůči korozi, odpadá práce s elektrolytem) Nízká teplota Rychlý start, okamžitá dodávka energie	Drahý katalyzátor Citlivý na nečistoty v palivu
AFC	Armádní a vesmírné aplikace, záložní zdroje, doprava	Nízká cena Nízká teplota Rychlý start	Citlivý na CO ₂ v palivu Práce s elektrolytem a vodou Vodivost elektrolytu
SOFC	Podpůrné zdroje, centrální i komunitní energetika	Vysoká účinnost Variabilita paliv Pevný elektrolyt Možnost použití s kogenerační jednotkou a parní turbínou	Vysokoteplotní koroze, teplotní namáhání komponent Dlouhý start Omezené počet odstavení
MCFC	Centrální i komunitní energetika	Vysoká účinnost Variabilita paliv Možnost použití s kogenerační jednotkou a parní turbínou	Vysokoteplotní koroze, teplotní namáhání komponent Dlouhý start Nízká energetická hustota
PAFC	Komunitní energetika	Vyšší tolerance k nečistotám v palivu Možnost použití s kogenerační jednotkou	Drahý katalyzátor Dlouhý start Citlivost na síru
DMFC [66]	Nositelná elektronika, PC	Levné palivo Nízké teploty Malé rozměry	Drahý katalyzátor Nízká účinnost

4.3 Skladování vodíku

Skladování vodíku je jedna z největších výzev spojená s použitím palivových článků. Existuje několik možností skladování vodíku, z nichž některé jsou stále předmětem výzkumu a vývoje [67]. Největší výzvou při skladování tohoto plynu je jeho extrémně nízká hustota [15], ale také vyšší pravděpodobnost jeho úniku, s čímž je nutné počítat při navrhování takovýchto systémů [7]. Pro skladování vodíku přímo na palubě dopravních prostředků by pak tyto systémy měly být ideálně kompaktní, lehké, bezpečné a cenově dostupné [15]. Důležitým parametrem je především vysoká gravimetrická i volumetrická hustota uskladněné energie a dobrý poměr mezi energií vloženou a získanou [16]. Pro podvodní aplikace je ovšem důležitý ještě jeden parametr, a to vztlak a jeho změna během postupného spotřebovávání paliva [16]. Výběr perspektivních možností pro skladování vodíku na palubě podvodních sond je představen na následujících podkapitolách, jejich porovnání je pak znázorněno v tabulce 4-3.

4.3.1 Plynný vodík

Jedná se o nejjednodušší a nejlevnější řešení pro uskladnění vodíku [7]. Velkou výhodou tohoto řešení je také to, že před použitím do palivových článků nemusí být vodík nijak předpřipravován [7]. Aby jej bylo skladněno dostatečné množství, je ovšem potřeba plyn dostatečně natlačit (někdy i nad 700 barů), což zvyšuje nároky na celkovou pevnost a robustnost nádob [64]. Zároveň musí být z materiálů, které jsou odolné vůči vodíkovému zkrhnutí [64]. Nádoby bývají většinou vyrobeny z vysoce pevné oceli, hliníku nebo z kompozitních vláken [7]. Plast vyztužený uhlíkovými vlákny (CFRP, z angl. carbon-fibre reinforced plastic) bývá běžným materiálem vodíkových nádob určených pro použití v dopravních prostředcích [64]. Gravimetrické hustoty energie se u stlačeného vodíku pohybují mezi 1,1 kWh/kg a 1,7 kWh/kg a volumetrické hustoty mezi 0,5 kWh/l a 0,7 kWh/l [7]. Neopatrná a nebezpečná manipulace s tlakovými nádobami s sebou však nese zvýšené riziko výbuchu vodíku [7].

4.3.2 Zkapalněný vodík

Vodík ve zkapalněném stavu má vyšší energetickou hustotu než plynný, ale stále poměrně nízkou [7]. Vodík bývá skladován ve speciálních nádobách za kryogenních teplot, menších než $-259,2\text{ °C}$ [67]. Takovéto nádoby jsou složeny z několika vrstev, mezi nimiž bývá vakuum a mnohvrstevná izolace (tzv. Mylar) [7]. Při plnění vodíkového článku pak dochází k přirozenému vypařování kapaliny díky tepelné výměně mezi vodíkem a okolním prostředím. Je však potřeba zabezpečit, aby rychlost vypařování nebyla vyšší než okamžitá potřeba vodíku v palivovém článku [7]. Skladování vodíku ve zkapalněném stavu je nicméně vhodné pouze pro rychlou spotřebu, neboť po čase dochází právě kvůli samovolnému vypařování, kterému nelze zcela zabránit [64]. Denně se takto mohou vypařit až 3 % z celého objemu [76], k dalším ztrátám pak dochází i během samotného plnění [64]. Tato možnost skladování vodíku je navíc dražší, komplexnější a vyžaduje dodržování vyšších bezpečnostních standardů [7]. Zkapalněný vodík při vypaření totiž mnohonásobně zvětšuje svůj objem, což při úniku může vést k nebezpečné změně ve složení okolní atmosféry a vytvoření explozivní směsi [37]. Zároveň vyžaduje potřebnou logistiku, specifická zařízení a proškolený personál [7]. Energetické hustoty pak dosahují hodnot 1,6 kWh/kg a 1,2 kWh/l [7]. Tento druh skladování se hodí spíše pro větší typy ponorek [16].

4.3.3 Uhlovodíkové zdroje

Uhlovodíky jsou běžné organické sloučeniny s vysokým obsahem vodíku. Jedná se zejména o metan, metanol a naftu [66]. Takovéto zdroje jsou velice levné, na druhou stranu oproti vodíku mají vyšší hmotnost a zvětšují objem a komplexitu palivových článků [7]. Před vstupem do palivového článku vyžadují úpravu pomocí parního reformingu za vysokých teplot za vzniku vodíku, CO_x a vodní páry (více v kapitole 4.2.4) [7]. Nevýhodou tohoto typu skladování (resp. generování) vodíku je nutnost zachycení přítomných nečistot (zejména síry) a CO , tyto látky totiž negativně ovlivňují funkčnost palivových článků [7]. Jak bylo uvedeno v kap. 4, existují i typy PČ, které uhlovodíková paliva dokáží zpracovat bez přípravy, všechny z nich jsou však určeny především pro stacionární aplikace [66].

4.3.4 Materiály se zpětným uvolňováním vodíku

Obecně se jedná o materiály v pevné fázi, které jsou schopny do sebe vodík v určitém množství absorbovat a v případě potřeby opětovně uvolnit [7]. Takovéto materiály pak mají velké porézní povrchy, např. kovově-organické struktury, zeolity nebo uhlíkové nanomateriály [15]. Vodík je uvězněn v malých, složitých strukturách, kde je následně držen pomocí slabých van der Waalsových sil, často je však nutné dosáhnout kryogenních teplot [76]. Skladování vodíku v pevné fázi se považuje nejbezpečnější způsob, neboť jeho uvolňování lze jednoduše řídit [7]. Má ale i řadu nevýhod jako je vysoká hmotnost a vysoká gravimetrická hustota energie, vysoká cena nebo taktéž citlivost některých materiálů na oxid uhelnatý, kyslík a vodu [7]. Aby byly tyto materiály použitelné v dopravním sektoru, je nutné, aby do sebe byly schopny pojmout alespoň 6-9 hm.% vodíku. Nové možnosti v tomto směru otevřely nanomateriály, které umožňují vznik nových, hybridních struktur o velkém povrchu, které by absorpci vodíku usnadnily. Zatím jsou ovšem předmětem aktivního výzkumu [15].

4.3.5 Anorganické zdroje vodíku

Podobně jako uhlovodíky, anorganické zdroje vodíku jsou chemické sloučeniny, které lze taktéž využít pro generování vodíku pomocí určité chemické reakce [16]. Nejefektivnějšími sloučeninami jsou opět hydridy kovů, které lze rozložit buďto hydrolyzou (tedy reakcí s vodou) nebo pyrolyzou (pomocí tepla) [7]. Mezi hydridy reagující s vodou patří např. NaBH_4 , NaAlH_4 , LiBH_4 nebo LiH , zatímco NH_3BH_3 a NH_4BH_4 se rozkládají teplem [7]. Tyto sloučeniny v sobě obsahují vysoké množství vodíku a nevyžadují složitý a objemný systém pro jeho uvolňování [7]. Jednou ze sloučenin, které by byly možné využít je i obyčejná voda. Ta uvolňuje vodík jednoduchou alkalickou reakcí s některými kovy, jako je např. lithium (Li), hořčík (Mg), sodík (Na), anebo zinek (Zn) [15]. Zatím se však zdá, že největší potenciál mají již výše zmíněné hydridy, jejichž hustota uskladněné energie může někdy dosahovat dokonce vyšší hodnoty, než je u čistého, zkapalněného vodíku [15].

Tab. 4-3 Množství energie uložené v jednotlivých formách skladování vodíku [7]

Energie v jednotlivých formách skladování H ₂		
Forma skladování	Obj. hustota energie [Wh/L]	Hm. hustota energie [Wh/kg]
Stlačený plyn	560-700	1100-1710
Zkapalněný H ₂	1220	1620
Hydridy kovů	770-1670	280-520

4.4 Skladování kyslíku

Na rozdíl od suchozemských aplikací, palivovým článkům pracujících v podvodním prostředí musí být zajištěn přístup ke kyslíku jiným způsobem než ze vzduchu. Kyslík pak – stejně jako vodík – musí být v nějaké formě skladován přímo na palubě UUV [16]. Výkon PČ pak díky použití čistého kyslíku namísto vzduchu může vzrůst až na trojnásobek [7]. Je nutné si ovšem uvědomit, že samotný kyslík, potřebný pro reakci s vodíkem, představuje až 8× větší nárůst hmotnosti, což snižuje energetickou hustotu celého systému [16]. Výběr vhodné a efektivní formy skladování kyslíku je proto velmi důležitá. Množství využitelné energie na jednotku objemu či hmotnosti, stejně jako riziko ovlivnění vztlaku a rovnováhy sondy jsou, tak jako v případě vodíku, důležitými parametry [16]. Shrnutí různých typů skladování je uvedeno v tabulce 4-4.

4.4.1 Plynný kyslík

Skladování stlačeného kyslíku v plynových nádobách je – jako v případě vodíku – ten nejjednodušší a nejlevnější způsob skladování [7]. Výhodou oproti vodíku je nižší hustota plynu za stejné teploty, kyslík tudíž nemusí být stlačen na tak vysoké tlaky [77]. Nicméně vývoj tlakových nádob pro kyslík není tak napřed jako v případě těch vodíkových, neboť většině instalovaným palivových článků stačí brát kyslík ze vzduchu [7]. Objemové hustoty energie se u stlačeného kyslíku pohybují mezi 0,5 kW/l a 1 kW/l a hmotnostní hustoty dosahují kolem 2 kWh/l [7].

4.4.2 Zkapalněný kyslík

Zkapalněný kyslík je ideální volbou v případě omezených prostor. Jedná se o nicméně o komplexnější řešení, které navíc vyžaduje speciální zařízení, vyškolený personál a dodržování bezpečnostních standardů při manipulaci a doplňování [7]. Teplota zkapalnění se u kyslíku totiž pohybuje kolem -183 °C [78]. Stejně jako v případě zkapalněného vodíku musí být zohledněny ztráty vypařováním jak při plnění, tak během samotného skladování [7]. Energetické hustoty uskladněné energie jsou pak největší ze všech tří uvedených typů skladování [7].

4.4.3 Chemické zdroje kyslíku

V tomto případě bývá kyslík uvolňován v rámci exotermické reakce, a to buď pomocí tepla, anebo katalytickými procesy [7]. Toto řešení s sebou nicméně přináší hmotnost navíc, protože používané chemické sloučeniny obsahují i jiné atomy, nejen kyslík, což vede k nižší účinnosti celého systému [7]. Častými sloučeninami, které lze použít jsou např. chlorečnan sodný, chloristan lithný, další oxochloridy nebo peroxidy a superoxidy [7]. Vysoce oxidační chemické sloučeniny mohou taktéž představovat problém při jejich skladování a manipulaci [7]. Na druhou stranu, kapalný peroxid vodíku může být pro malá AUV vhodným řešením, neboť je ze všech uvedených možností nejméně ovlivněn hloubkou ponoru [16]. Lze jej totiž skladovat v pružných plastových vacích, které mohou být stlačovány hydrostatickým tlakem okolní vody, není tak zapotřebí přidavného čerpadla [16].

Tab. 4-4 Množství energie v jednotlivých formách skladování kyslíku [7]

Energie v jednotlivých formách skladování O ₂		
Forma skladování	Obj. hustota energie [Wh/l]	Hm. hustota energie [Wh/kg]
Stlačený kyslík	600-1090	770-1680
Zkapalněný O ₂	2780-2980	2900-3300
Součást chem. sloučenin	1340-2090	1170-1300

5 Koncepční studie

Cílem této práce je integrace palivových článků do podvodní sondy Argo. Tato sonda je určena k průzkumu Hranické propasti, potažmo k objevení jejího dna. V následujících kapitolách jsou rozebrány informace, které jsou potřeba k pochopení problematiky ponorů do propasti, její detailní charakteristika a následně i samotný popis Arga. V podkapitole 5.3 je poté postup a výsledek řešení koncepční studie.

5.1 Hranická propast

Hranická propast (HP) je krasový útvar, který je unikátní nejen v evropském, ale i globálním měřítku. S celkovou naměřenou hloubkou 473,5 se totiž jedná o nejhlubší zatopenou propast světa [79]. Jejího dna se však nikomu ještě dosáhnout nepodařilo, a tak konečná hloubka propasti stále zůstává předmětem dohadů. Předpokládá se, že by mohla dosahovat až 1 km [13], podle jiných odhadů by ale mohla být i větší [80]. Tento přírodní fenomén tak stále přitahuje pozornost vědců, speleologů a mnohých dobrodruhů.

Tab. 5-1 Základní parametry Hranické propasti [82]

Parametry Hranické propasti	Hodnoty
Nadmořská výška hrany HP	315 m n. m.
Celková hloubka ¹⁶	>173,5 m
Rozměry suchého jícnu (d×š×h)	104×34×69,5 m
Přibližné rozměry Jezírka	10 m
Předpokládaná hloubka	1000 m
Hloubka dosažená potápěčem	265 m (2015)
Hloubka dosažená podvodní sondou	450 m (2022)
Minimální příčné rozměry ¹⁷	3 m
Teplota (typická) ¹⁸	14,5-18.8 °C
pH (typické)	6,1-7
Hustota ¹⁹	1000 kg/m ³
Viditelnost ²⁰	0,2-12 m

¹⁶ Včetně suché části

¹⁷ Pouze při sestupu [82]

¹⁸ Zdroj [84]

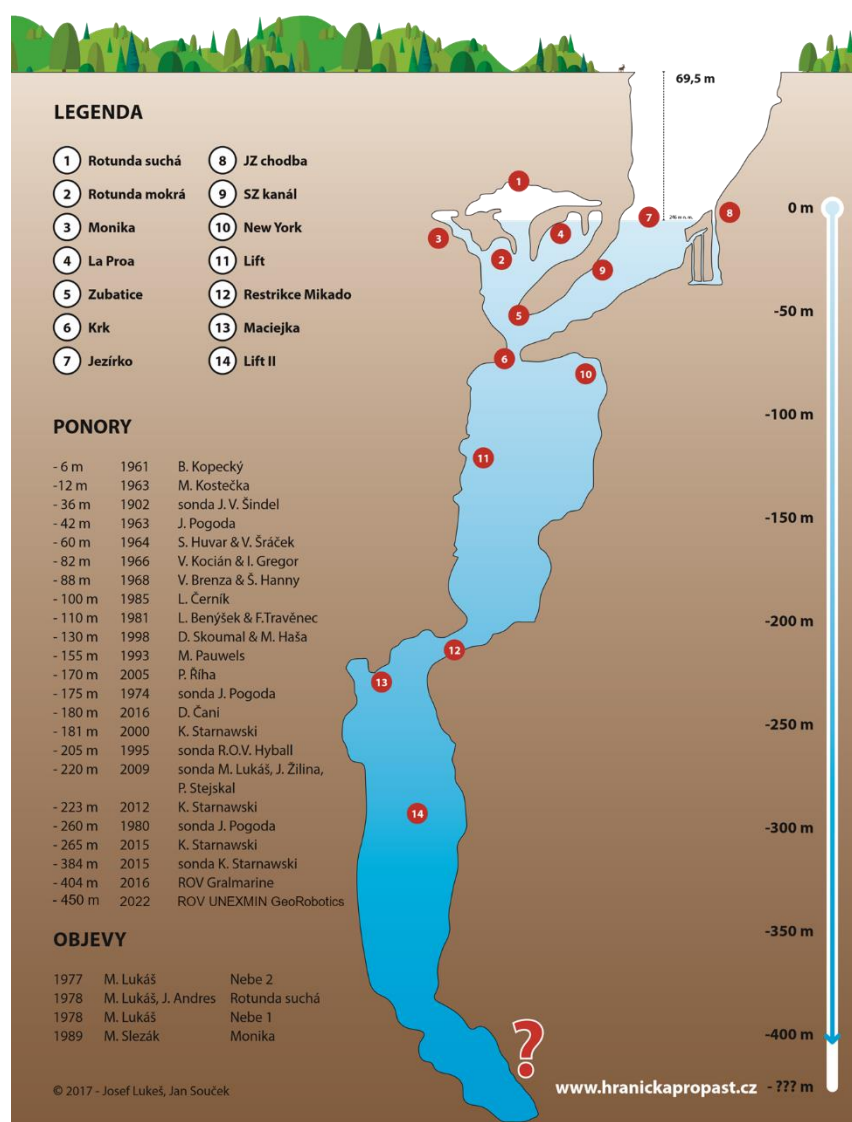
¹⁹ Zdroj [82]

²⁰ V závislosti na hloubce a ročním období [82]

5.1.1 Popis propasti

Propast se nachází v Hranickém krasu v Národní přírodní rezervaci Hůrka v Olomouckém kraji. Toto nevelké krasové území má rozlohu 5,5×4 km a rozkládá se na obou březích řeky Bečvy mezi obcemi Hranice, Teplice nad Bečvou a Černotín. Propast pak leží na pravém břehu řeky, na protějším břehu se pak nachází největší známý jeskynní systém Hranického krasu – Zbrašovské aragonitové jeskyně [79].

Hluboký jeskynní systém propasti pravděpodobně vznikl hydrotermálním krasovým procesem. Jedná se o netypický způsob krasovění, při němž prostory vznikají směrem zezdola nahoru. Krasovým činitelem není voda, ale vlašná uhličitá minerálka silně proplyněná oxidem uhličitým. Tato agresivní kyselka vystupující z hlubokých puklin rozpouští zespodu vápencový masiv. V případě Hranické propasti vyleptala dutinu ve vápenci natolik, že došlo ke zřícení tenkého stropu a otevření dutiny na povrch [79]. Podle jiných teorií však vznikla častěji erozním



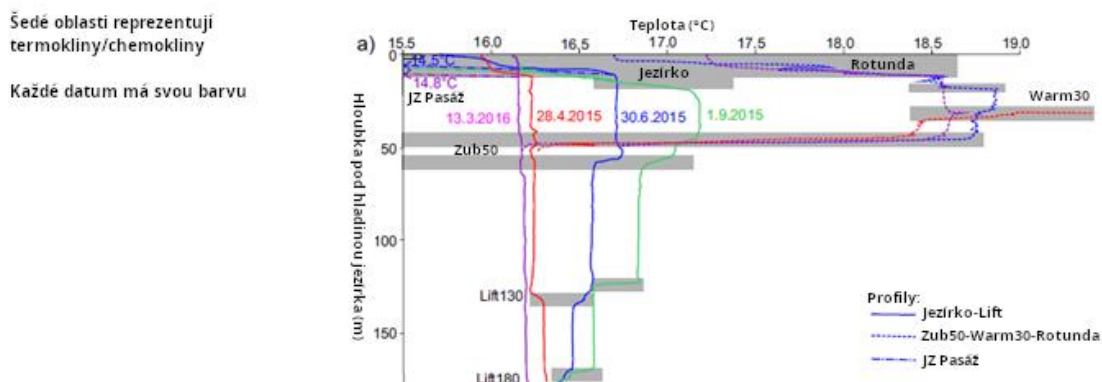
Obr. 5-1 Řez Hranickou propastí a seznam všech hloubkových rekordů [80] (upraveno)

působením povrchových vod, vnikajících do zlomů a puklin ve vápencové hornině a až poté byla dotvořena výstupem termálních vod [81].

Propast se skládá ze suché části a zatopené části. Jícen Hranické propasti má rozměry 104×34 m a hloubku 69,5 m [13]. Jeho zdánlivé dno pak tvoří nazelenalé Jezírko o ploše 450 m², pod kterým propast pokračuje rozsáhlými zatopenými prostory (viz Obr. 5-1) [82].

Přímo pod Jezírkem se nachází Severozápadní kanál (SZ kanál) o šířce 10-12 m [81], který pozvolně sestupuje do hloubky 60 m k zúžení jménem Krk [83]. Toto zúžení má v průměru 10 m a propojuje SZ kanál s rozsáhlejší šachtou, tzv. Liftem. Půdorys Liftu má kolem 25 × 12 m a rozkládá se mezi hloubkami 65-180 m pod hladinou Jezírka. Lift I je pak propojen s Liftem II úzkou, téměř horizontální chodbou o průměru 3 m (tzv. Restrikce Mikado) [84]. v Liftu II pak bylo roku 2022 dosaženo rekordní hloubky 450 m, a to pomocí podvodního, dálkově řízeného robota [80]. Odsud pak byla zpozorována svažující se chodba o průměru 15-20 m, která vede do hlubších, dosud neprobádaných prostor [80]. Součástí Hranické propasti je taktéž řada postranních jeskyní (suchá Rotunda nebo Monika) nacházející se mezi hloubkami 0-100 m pod hladinou [82].

Teplota vody se v průběhu roku v propasti příliš nemění. V závislosti na ročním období a na hloubce se pohybuje od 14,5 °C do 18,8 °C [84]. V oblasti rotundy pak teplota dosahuje až 22 °C [81]. Z dlouhodobého měření z let 2015 a 2016 v hloubkách do 180 m vychází, že je teplota vody v těchto místech průměrně vyšší v létě nežli v zimě. Pokud se týče teploty v závislosti na hloubce, ta je v létě konstantní po dlouhých úsecích hloubkového profilu, s náhlými změnami v určitých hloubkových intervalech (kromě mělké oblasti 0-10 m) (viz Obr. 5-2). V hloubce 30 m se však jedná o rozdíl pouhého 1 °C a ve 150 m už jen 0,4 °C. Naopak v zimě se teplota v závislosti na hloubce téměř nemění [82]. To je způsobeno zejména vznikem vodních proudů a jejich vzájemným promícháváním v zimním období. Voda z Jezírka ochlazená vnějším studeným vzduchem klesá a je nahrazována teplejší vodou ze spodních částí propasti [82]. Teplota Jezírka však nikdy nebyla nižší než 9 °C, a to ani během těch nejmrazivějších dnů [82].



Obr. 5-2 Grafické zobrazení průběhů teplot v propasti v závislosti na hloubce a měsíci (do 180 m) [100] (upraveno)

Na základě již zmíněného měření z let 2015 a 2016 bylo do 180m hloubky stanoveno detailní složení minerální vody. Množství rozpuštěných iontů HCO₃⁻ a SO₄⁻ se zde pohybuje kolem 72-76 % a iontů Ca^{+II}, Mg^{+II} nebo Na⁺ kolem 60-80 % vyjma Jihozápadní chodby a Rotundy, kde byly koncentrace iontů o 20-30 % nižší [82]. Hodnota pH pak kolísá v rozmezí 6,1-7,0 [81]. Množství rozpuštěného CO₂ se mění v závislosti na dynamice promíchávání vody, v průměru však 1,6 g/l. Oxid uhličitý poté uniká z vodní hladiny jak v postranních jeskyních, tak nad Jezírkem, kde vytváří

nedýchatelnou vrstvu v koncentraci několika procent [82]. Při speleopotápěčském průzkumu byla v propasti objevena řada stalagmitů, shodných s útvary ve Zbrašovských aragonitových jeskyních [81].

Pro detailní průzkum HP je též velmi důležité vědět, jaká je ve vodě viditelnost. Od hloubky 130 m, tedy v Liftu I a II, je viditelnost ve vodě vždy velmi dobrá (10-15 m). Od povrchu Jezírka do 20m hloubky je pak během roku proměnlivá – větší je v zimě (5-15 m) a nižší v létě (0,2-2 m) v závislosti na dynamice promíchávání vody. V zimě je totiž zkalená voda s vyšším obsahem jílových částic nahrazována čistou vodou z větších hloubek. Nejnižší viditelnost je pak v místech zvaných Zubatice a Rotunda mokrá, kde je voda turbulentní a kvůli vyšší koncentraci oxidů má načervenalou barvu [82]. Velký problém pro pohyb podvodních sond v prostorách propasti pak představují i napadané a uvíznuté kmeny stromů, které se nachází v hloubce 78-80 m (Krk a Lift) a v hloubce 180-200 m (Restrikce Mikado) [82]. Dno SZ kanálu je poté pokryto 70 cm tlustou vrstvou spadlého listí [82].

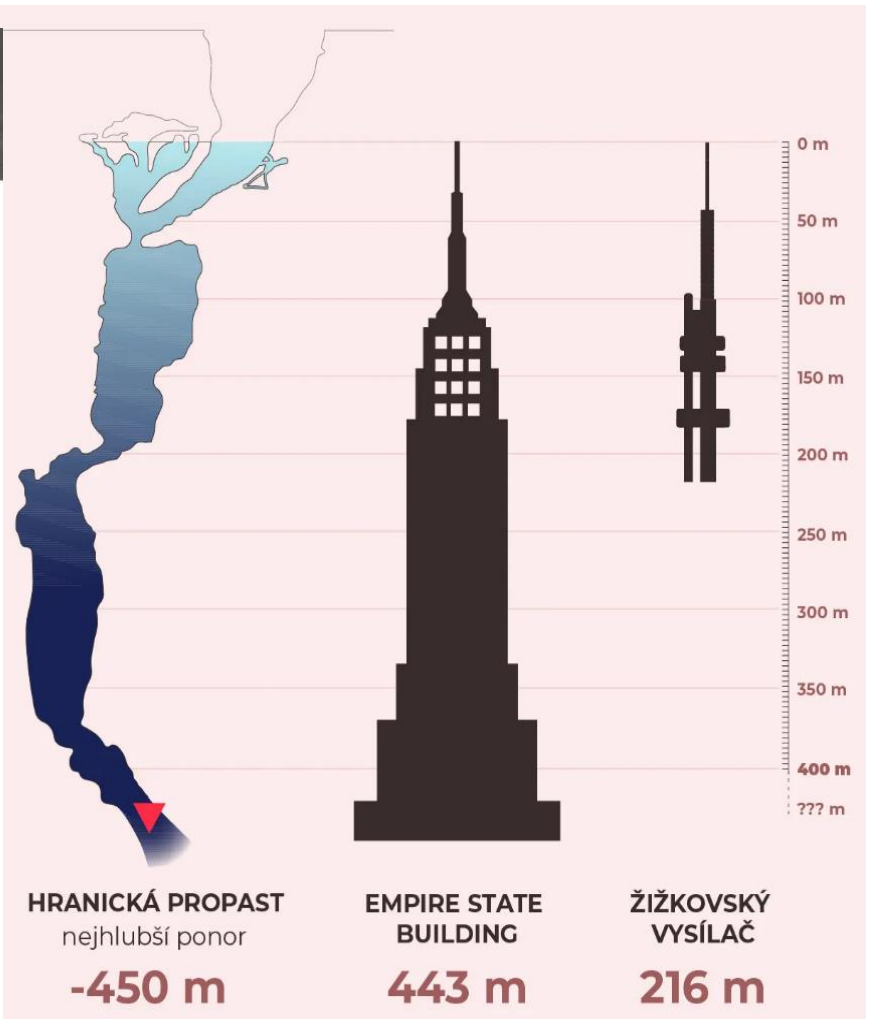
5.1.2 Expedice

Snahy o změření hloubky Hranické propasti probíhaly již před stoletím. V roce 1902 se o to pokoušel jistý Josef Šindel, který pomocí olovnice naměřil hloubku 36 m [13]. Detailnější průzkumy však byly prováděny potápěči až od roku 1963, kdy prvním, kdo se do propasti ponořil a dosáhl hloubky 42 m byl speleolog Jiří Pogoda spolu se svými kolegy [13]. Nejhlouběji se pak ponořil polský potápěč Krzysztof Starnawski, který roku 2015 dosáhl rekordní hloubky 265 m [81]. Od 90. let je pak průzkum prováděn i pomocí dálkově řízených podvodních sond (ROV, z angl. Remotely Operated Vehicles). První taková sonda jménem Hyball byla použita v roce 1995 a dosáhla hloubky 205 m. V této hloubce se však její napájecí a komunikační kabel zamotal do kmene spadlého stromu a sonda musela být vyproštěna potápěči [10]. Od tohoto pokusu byly do HP dálkově řízené sondy vypuštěny ještě třikrát. V roce 2003 bylo použito ROV Colombo pro detailní průzkum Liftu I [10]. V roce 2016 pak bylo v rámci testovacího provozu ROV Galmarine dosaženo hloubky 404 m a Hranická propast se tak oficiálně stala nejhlubší propastí na světě. Z důvodu omezené délky napájecího a komunikačního kabelu se ovšem hlouběji ponořit nemohla [10]. Navíc se při cestě zpět tyto kabely zamotaly do větví v zúžení Restrikce mikádo, a tak musela sonda 10 měsíců čekat na vyproštění pomocí výkonného policejního ROV [34]. V roce 2022 byl pak stanoven nový hloubkový rekord, a to 450 m. Do této hloubky se ponořilo ROV UNEXMIN GeoRobotics maďarsko-portugalsko-srbského týmu a díky třem zabudovaným sonarům se poprvé podařilo exaktně zobrazit rozměry, tvary i prostorovou orientaci zatopených prostor a z naměřených dat posléze sestavit trojrozměrný model (viz Obr. 5-4) [13]. V současnosti společnost pracuje na úpravě ROV do 1,5km hloubky [13]. Chronologický přehled všech pokořených hloubkových rekordů je zachycen na Obr. 5-1.

Kromě hloubkového průzkumu, měřících a mapovacích akcí jsou v rámci potápění sledovány také fyzikální údaje, probíhá monitoring teploty vody a viditelnosti v různých hloubkách, odběry vzorků hornin, biologického materiálu apod. Fauna a flóra je v Hranické propasti mj. také pozoruhodným biotopem [81]. Průzkum HP je tedy stále aktuálním tématem, a to nejen pro výzkumníky a speleology, ale i pro inženýry. Jejich podvodní sondy totiž musejí překonat mnoho výzev spojených jak s hydrostatickým tlakem ve velkých hloubkách, tak s manévrováním, a především s komunikací a napájením podvodních sond.



Obr. 5-4 3D model Hranické propasti [86]



Obr. 5-3 Srovnání Hranické propasti se známými výškovými budovami [101]

5.2 Průzkumná sonda Argo

Jedná se o podvodní sondu, která je od roku 2022 vyvíjena studentským týmem strojLAB na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Sonda byla pojmenována Argo podle lodi ze starých řeckých bájí, na níž se plavili Argonauti hledajíc zlaté rouno. Motivace tohoto projektu je zkonstruování malého UUV, které by bylo použitelné pro průzkum zatopených propastí a jeskyň. Nejambicióznějším cílem je ovšem objevení dna Hranické propasti a dosažení předpokládané hloubky 1 km. Tato sonda je stále ve fázi vývoje, nicméně některé základní parametry jsou již navrženy a dále budou iteračně upravovány. Současný koncept počítá s akumulátorovým napájením. Cílem této bakalářské práce je nahradit akumulátor vhodným palivovým článkem a modifikovat aktuálně navrženou sondu tak, aby byla s článkem kompatibilní a neohrozilo to její funkčnost v podvodním prostředí.



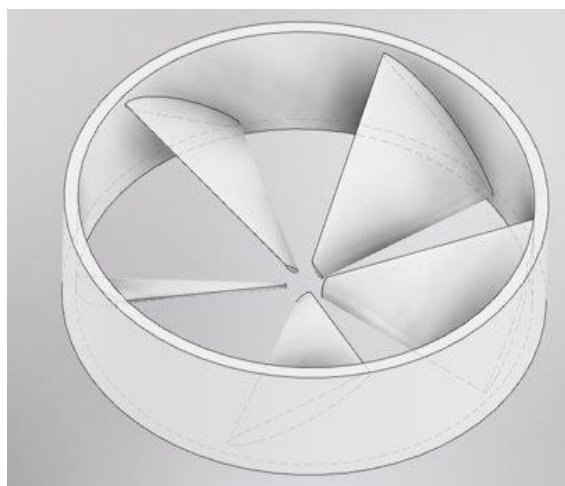
Obr. 5-5 Prvotní koncept průzkumné sondy Argo [86]

Tab. 5-2 Navržené parametry sondy [86]

Navržené parametry sondy: ²¹	
Délka	1500 mm
Průměr	320 mm
Výkon	76 W
Max. rychlost	0,7 m/s
Kapacita baterie (Li-ion)	min. 6000 Wh
Operační doba	6,5 h
Max. hloubka	1000 m
Max. hydrostatický tlak	10 MPa

V současnosti je diskutován buď uzavřený koncept sondy, tzn. s vnějším pláštěm, který by musel odolávat okolnímu hydrostatickému tlaku, nebo otevřený koncept, u kterého by musela být zabezpečena každá vnitřní komponenta zvláště v odolných kontejnerech. Ve této koncepční studii bude uvažováno Argo s utěsněným vnějším pláštěm. Ponorka pak bude navržena na neutrální vztlak, tzn. její gravitační síla a vztlaková síla působící na sondu musí být v rovnováze [85]. Výpočet neutrálního vztlaku do této práce ovšem není zahrnut, neboť ještě nejsou známy hmotnosti všech jednotlivých komponent.

Na Argo je vyvíjena unikátní konstrukce lopatek – „Rim-Thruster“. Jedná se o lopatky rotující nikoli pomocí náboje na hřídeli, ale po obvodu, jsou tak odolnější vůči nečistotám ve vodě, které by se mohly namotat na hřídel, k čemuž by např. v SZ kanále Hranické propasti mohlo dojít. V případě Arga pak k pohonu lopatek bude použit ozubený řemen, nebo budou součástí rotoru elektromotoru. Unikátní geometrie bude také umožňovat pohyb sondy v obou směrech, resp. při změně smyslu otáčení elektromotoru [85].



Obr. 5-6 Prvotní koncept lopatek "Rim-Thrusteru" [86]

²¹ Parametry dimenzovány na sondu napájenou baterií

Pro pohyb sondy ve vodorovném směru a otáčení ve vodorovné rovině budou použity 2, speciálně zahnuté trysky, vyvedené zprostřed trupu sondy. Lopatky umístěné uprostřed trysek pak budou pohánět dva 100W elektromotory. Další 4 trysky se pak budou nacházet na koncích sondy (tzn. v párech) a budou zajišťovat pohyb ve vertikálním směru a natáčení sondy v této rovině. Lopatky budou umístěny opět uprostřed trysek, pro pohon elektromotorů pak budou použity čtyři 50W motory. Při pohybu pouze ve vodorovném směru, nebo pouze ve svislém směru tak budou motory celkem potřebovat příkon vždy 200 W. Účinnost trysek pro pohyb ve vodorovném směru a účinnost lopatek byla vypočtena pomocí softwaru Ansys Fluent na 70, resp. 60 % [85].

Sonda bude řízena optickým kabelem, protože koaxiální kabel má při délce 1 km příliš velký šum. Navíc, zatím na trhu neexistuje běžně dostupná bezdrátová technologie, pomocí níž by bylo možné sondu do 1km hloubky bezpečně ovládat. Problém pro bezdrátový přenos představují i okolní skály. Nicméně pokud by se v budoucnu takováto technologie naskytla, určitě by stálo za to ji do Arga integrovat, protože, jak již bylo zmíněno v kapitole 5.1.2, průzkumné sondy se v Hranické propasti opakovaně potýkaly s problémem zamotávání kabelového vedení, které pak vedlo k uvíznutí sondy. Za předpokladu detailní znalosti prostor HP by další možností mohlo být taktéž autonomní řízení sondy [85].

Sonda bude dále vybavena silnými LED světly o celkovém výkonu 320 W, kamerami, sonarem, příp. dalšími senzory, které by usnadňovaly orientaci sondy v prostoru. Sonda bude taktéž vybavena schránkou na odběr vzorků vody, její funkčnost, rozměry i umístění budou však ještě předmětem řešení [85].

Vnější plášť pak bude lehké kovové konstrukce navržené tak, aby odolala vnějšímu hydrostatickému tlaku v hloubce 1 km, tzn. 10 MPa. Přídavná vnitřní konstrukce, zajišťující polohu jednotlivých komponent, bude z větší části vyrobena pomocí 3D tisku. Uvnitř sondy se dále bude v malých kontejnerech nacházet baterie a řídicí deska aj. elektronika. Zbytek vnitřního objemu bude vyplněn tak, aby byl zajištěn neutrální vztlak sondy. Balanc sondy bude pravděpodobně udržován pohyblivým balastem, který se bude v sondě automaticky přesouvat na kolejničkách. Vnější plášť, stejně jako udržení neutrálního vztlaku a rovnováhy jsou tedy zatím stále v procesu řešení [85].

Celá konstrukce pak bude navržena tak, aby sonda byla modulární, tzn. aby se jednotlivé komponenty sondy byly jednoduše zaměnitelné a aby bylo sondu možné v případě potřeby prodloužit nebo naopak zkrátit [85]. Popis základních komponent je možné vidět na Obr. 5-7.

Tab. 5-3 Seznam základních spotřebičů a jejich příkon [86]

Spotřebiče	Počet	Výkon celkem [W]
Elektromotory (pohyb vpřed/vzad)	2	200
Elektromotory²²	4	200
Světla	8	320
Kamery	2	20
Ostatní sensorika	-	50
Řídicí deska	1	15
Celkem²³		605

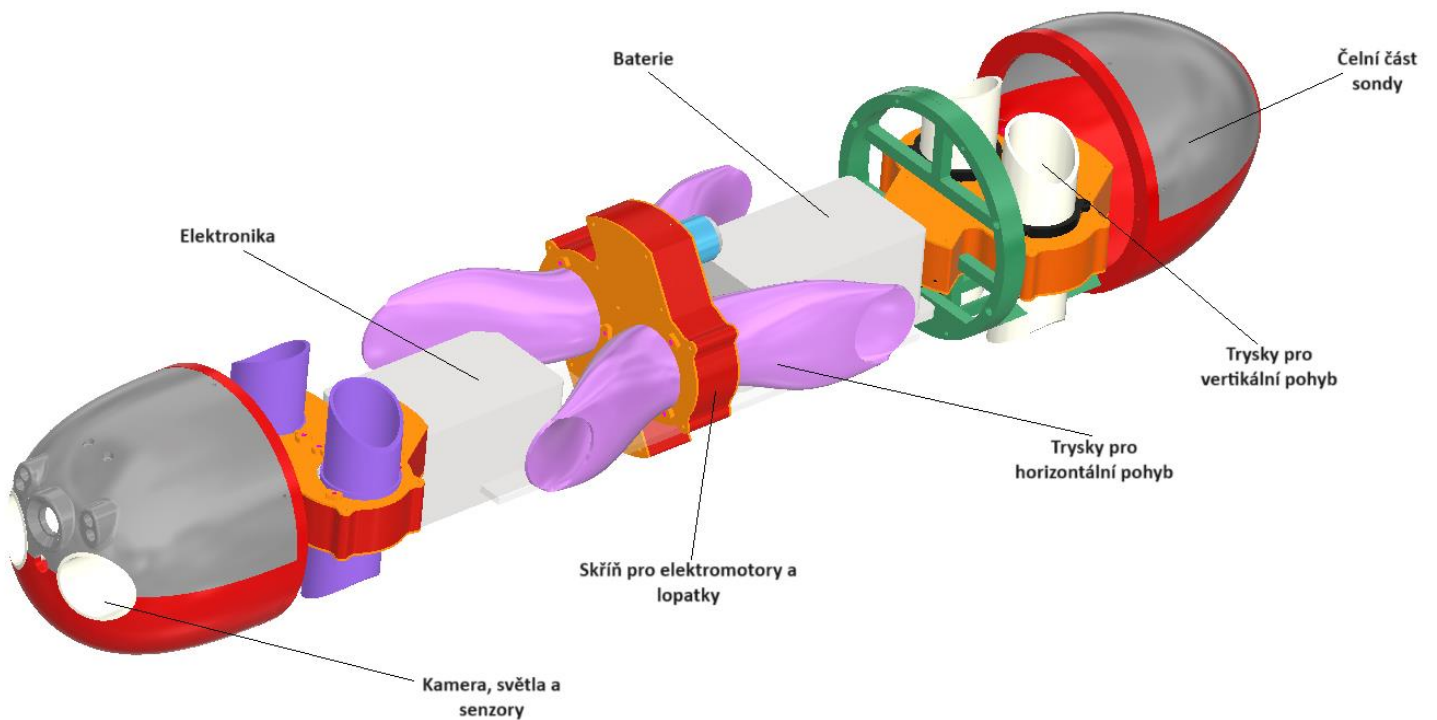
²² 24 V

²³ Elektromotory do součtu zahrnují buď pro horizontální pohyb, nebo pro vertikální pohyb

Další komponenty:

- Baterie – 7000 W
- DC-DC měnič
- Optický kabel
- Trysky pro vodorovný pohyb – 2x
- Trysky pro svislý pohyb – 4x
- Lopatky typu „Rim-Thruster“ – 6x
- Pohyblivý balast na kolejničkách
- Gyroskop [85]

V této práci bude věnována pozornost především komponentám, které jsou důležité z hlediska koncepční studie jako jsou spotřebiče, trysky nebo lopatky.



Obr. 5-7 Dekomponovaný model Arga (III. koncept) [86]

5.3 Řešení koncepční studie

V této kapitole je detailně popsáno řešení koncepční studie zahrnující výběr palivového článku, výpočet množství reaktantů, návrh vhodné metody skladování vč. navržení rozměrů zásobníků na reaktanty a neposlední řadě taktéž návrh rozložení jednotlivých klíčových komponent PČ v podvodní sondě a úprava jejich rozměrů.

5.3.1 Výběr palivového článku pro Argo

Jako náhradu za Lithium-iontový akumulátor byl zvolen palivový článek s polymerní membránou (PEMFC). Tento PČ je charakterizován vysokou účinností, jednoduchostí a snadnou regulovatelností (viz Tab. 4-1). Pracuje v rozmezí nižších teplot, nebude tedy tolik ovlivněn teplotou okolní vody. Z nízkoteplotních PČ taktéž dosahuje vysoké hmotnostní i objemové energetické hustoty [20], což je pro Argo klíčový parametr, neboť potřebuj malý zdroj o velké kapacitě. Zvýšená citlivost na nečistoty u něj nebude problém, neboť bude pracovat s čistým vodíkem i kyslíkem. Zároveň se jedná se o nejpoužívanější a na trhu nejrozšířenější PČ (viz Obr. 4-8), lze jej tedy pořídit v širokém rozpětí výkonů i velikostí. PEMFC byl úspěšně použit v mnoha typech dopravních prostředků od nákladních a osobních automobilů až po malé drony, taktéž byl shledán jako spolehlivý zdroj napájení několika podvodních UUV, jak bylo uvedeno v Tab. 2-1.

Uvažovány byly i další 2 nízkoteplotní PČ – AFC a DMFC. Pokud se týče alkalických PČ, některé prototypy dokonce pracují i v nižších rozmezích teplot kolem 20 °C, což je téměř teplota okolní vody v Hranické propasti (15 °C). Některé byly dokonce použity v podvodních sondách nebo vesmírných modulech, ovšem v mnohem menší míře než konkurenční PEMFC. Oproti PEMFC se navíc jedná PČ s kapalným elektrolytem, jeho konstrukce a práce s produkty je tedy složitější. Navíc už se kvůli úspěchu spolehlivých PEMFC téměř nepoužívá (viz Obr. 4-8). Pokud se týče DMFC, jeho hlavní výhodou by mohla být jednoduchost (byl použit v malé elektronice) a práce s kapalným methanolem namísto vodíku. Na druhou stranu, jeho velice nízká účinnost, a tedy i slabá hustota energie jej oproti PEMFC velmi znevýhodňuje, sondě by tak nebyl schopen dodat dostatek energie. Pro Argo je tedy nejlepším a nejdostupnějším zdrojem energie PEMFC.

5.3.2 Výběr skladování reaktantů

Vzhledem k množství reaktantů, které bude spočítáno v kap. 5.3.6, a na základě informací z kap. 4.3 a 4.4 jsem jak pro vodík, tak i kyslík zvolil skladování v plynné, stlačené formě v tlakových nádobách. Jedná se o levné a jednoduché řešení, pro které jsou potřeba pouze nádoby k redukci tlaku a regulátory. Hmotnostní i objemové hustoty energie jsou v případě měřítka jakým je Argo zcela postačující. Tlakové nádoby budou navrženy v kap. 5.3.8, tak aby splňovaly požadované rozměry, odolaly vnitřnímu tlaku reaktantů a splňovaly vhodnou bezpečnost.

5.3.3 Komponenty palivového článku

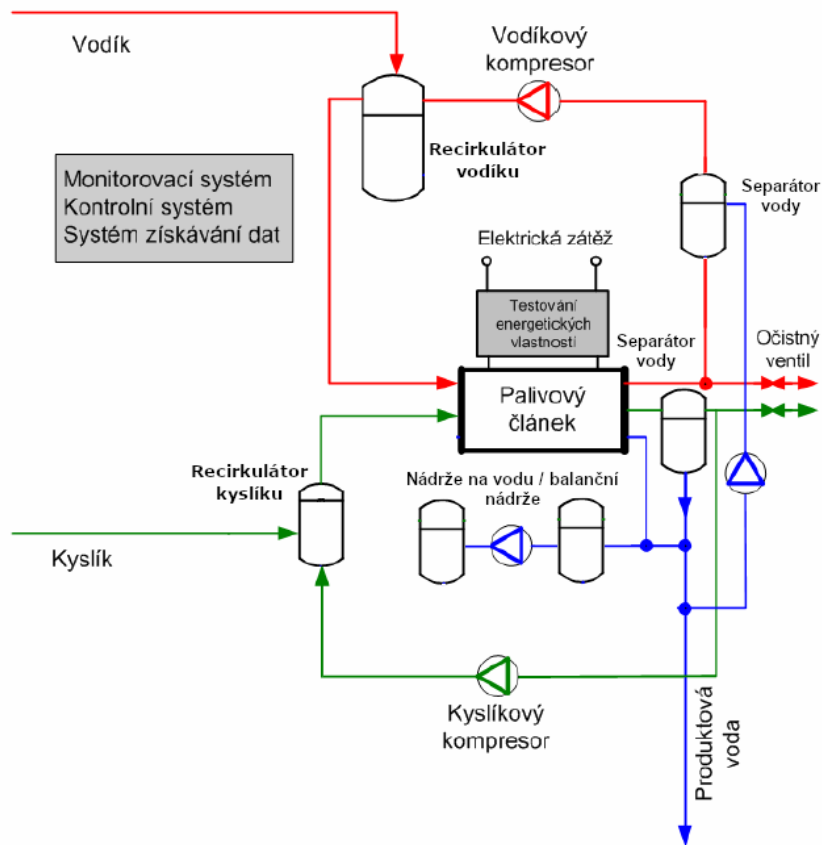
Jak již bylo nastíněno v kapitolách 0 a 4, palivové články jsou oproti bateriím mnohem složitější zařízení, neboť pracuje s reaktanty, které mu musí být plynule dodávány. V palivovém článku pak dochází k exotermické reakci, tzn. že se při běžném provozu zahřeje na 60-90 °C. Voda jako odpadní produkt pak z PČ musí být v pravidelných intervalech odebírána. Celý systém PČ tedy bude zahrnovat tyto komponenty:

- Stack – 800 W
- Baterie – pouze pro nastartování stacku [68]

- Zásobníky vodíku a zásobník kyslíku
- Nádrže pro redukci tlaku (mezistupně) a regulátory (pro vodík i kyslík)
- Separátory vody – 2x
- Recirkulátory – 2x
- Zásobníky na odpadní vodu
- Čerpadlo na odpadní vodu
- Kompresory – 2x50 W (vyrovnání tlakových ztrát)
- Filtry nečistot (na vstupu do stacku)
- Senzory teploty a tlaku – 4x

Vzhledem ke specifickému použití PČ v podvodním prostředí, kde je do článku přiváděn čistý kyslík a nikoli vzduch, byly vypuštěny některé z komponent, které by běžný palivový článek musel mít. Jedná se o vzduchový kompresor, přídatné vzduchové filtry a také chladicí systém, neboť je předpokládáno, že odpadní voda a okolní voda v propasti bude pro chlazení PČ dostačující. Tento předpoklad by ovšem bylo potřeba ještě ověřit výpočtem tepelné výměny. Většina komerčně dostupných PEMFC o výkonu do 1kW je schopna pracovat v rozmezí okolních teplot 5-30 °C [86], což teplota vody v Hranické propasti splňuje. Pokud by ovšem nebyl zajištěn dostatečný odvod tepla, pak by nějaký chladicí systém musel být zaveden.

Popis klíčových komponent PEMFC pro Argo je zobrazen v jednoduchém procesním schématu na Obr. 5-8. Do článku je přiváděn vždy z každé strany vodík a kyslík se zredukovaným tlakem z několika mezistupňů, nezreagované plyny jsou zbaveny kapiček vody v tzv. separátorech, následně dotlakovány kompresorem na provozní tlak a smíchány s čistým plynem v tzv. recirkulátoru. Odpadní voda je ventilem vypouštěna do nádrží na odpadní vodu. Tyto nádrže zároveň fungují jako balanční a čerpadlem je voda přepouštěna podle potřeby z jedné nádrže do druhé. Očistný ventil je otevřen v případě nárůstu tlaků v PČ nebo při jeho vypínání. Palivový článek je spojen s malou baterií, která jej musí vždy aktivovat, jakmile začnou reaktanty proudit, během pár minut začne PČ dodávat napětí. Před vstupem do PČ je taktéž vhodné použít základní filtry s póry o stejném průměru nebo menším, jako je průměr kanálků pro rozvod reaktantů ve stacku. Tyto reaktanty zachycují nečistoty vzniklé z výroby a montáže a mohly by snižovat výkon nebo způsobit rychlejší degradaci vnitřní části PČ (viz kap. 4.2.1). V této koncepční studii bude kladen důraz zejména na tlakové nádoby a zásobníky odpadní vody, které jsou klíčové pro uskladnění dostatečného množství energie na palubě Arga a určují jeho výsledné rozměry. Díky tomu může být následně vyhodnocena proveditelnost integrace systému PČ do sondy. Všechny výpočty, které k tomuto vyhodnocení byly potřeba, jsou uvedeny v následujících kapitolách a byly provedeny pomocí programu MS Excel, jež je součástí přílohy této bakalářské práce.



Obr. 5-8 Zjednodušené schéma celého systému napájení PEMFC navrženého pro Argo [28] (upraveno dle [69])

5.3.4 Výpočet výkonu sondy

Pro výpočet potřebné doby, za které je sonda schopna dosáhnout hloubky 1 km a dostat se zpět bylo potřeba spočítat její rychlost na základě výkonu. Předpoklad byl nasazení všech motorů, a to buď pro pohyb ve vertikálním směru, nebo v horizontálním směru. Maximální příkon všech zapojených motorů P_A' je tedy vždy 200 W. Následně byly uvažovány následující účinnosti, zjištěné ve výpočetním softwaru Ansys Fluent studentským týmem strojLAB [85]:

η_M – účinnost elektromotoru = 90 %

η_L – účinnost lopatek = 60 %

η_T – účinnost trysek = 70 %

Reálný výkon Arga je tedy:

$$P_A = P_A' \cdot \eta_m \cdot \eta_L \cdot \eta_T \quad (25)$$

$$P_A = 75,6 \text{ W} \quad (26)$$

Dále bylo uvažována rovnováha mezi tahem motorů a odporovou silou, z čehož byla dopočítána **maximální rychlost sondy**:

$$F_M = \frac{P_A}{v} \quad (27)$$

$$F_O = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (28)$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_A}{C \cdot \rho \cdot S}} \quad (29)$$

$$v = 0,54 \text{ m/s} \quad (30)$$

F_M – tah motorů

F_O – odporová síla

C – odporová konstanta = 0,5²⁴

S – max. odporová plocha sondy = 0,96 m²²⁵

Pokud se týče odporové plochy, ta byla zvolena pro případ, kdy se sonda nachází v horizontální poloze a vertikálně klesá, tzn. odporu vody ve směru pohybu bude vystavena větší plocha o obsahu obdélníku (resp. průmětu válcové plochy). Jedná se tedy o konzervativnější přístup pro výpočet, protože tato plocha je mnohem větší než čelní plocha ponorky v případě, že by klesala tzv. střemhlav. Bylo počítáno s dvojnásobnou plochou oproti návrhu Arga s akumulátorem, jelikož bylo předpokládáno, že rozměry sondy budou muset být kvůli nádržím na vodík a kyslík zvětšeny.

Tíhová síla do výpočtu nebyla zahrnuta, neboť její účinek se při ponoru a zpětném vynoření eliminuje (tíha sondu při ponoru urychluje a naopak).

Pro ponor do 1 km a zpět (tedy celkovou dráhu 2 km) byl následně zjištěn minimální **čas pro pobyt sondy v Hranické propasti**:

$$t' = \frac{S}{v} \quad (31)$$

$$t' = 1,03 \text{ h} \quad (32)$$

²⁴ Uvažováno pro válec

²⁵ Uvažována dvojnásobná plocha obdélníka o aktuálních rozměrech sondy 1500×320 mm (délka×průměr); předpokládám zvětšení rozměrů

t' – minimální čas pro ponoření do 1 km hloubky a vynoření
 s – celková dráha = 2000 m
 v – rychlost sondy

Vzhledem k tomu, že je HP členitou zatopenou jeskyní, v níž se občas nachází překážky v podobě uvíznutých kmenů stromů apod. (viz kap. 5.1), je určení reálného času poměrně obtížné. Argo bude tedy hledat cestu, zejména v dosud nezmapované části propasti a bude provádět její průzkum. Z toho důvodu byl určen odhad pobytu sondy v propasti na desetinásobek minimálního předpokládaného času pro dosažení dna, realističnost tohoto odhadu by bylo ovšem lepší zkontrolovat s odborníky na Hranickou propast.

$$t = 10,3 \text{ h} \quad (33)$$

5.3.5 Výpočet požadovaného příkonu PČ

Příkon PČ byl určen z požadovaného výkonu sondy na základě součtu jednotlivých komponent, které odebírají výkon současně, a ztrátám v měničích stejnosměrného napětí (DC-DC). Byl uvažován pohyb sondy na maximální výkon, a to pouze ve vertikálním směru, nebo v horizontálním směru, tzn. maximální zátěž od motorů bude vždy 200 W. Součet požadovaného výkonu všech komponent u baterií napájené sondy je 605 W. Při nahrazení baterie PČ pak ke všem spotřebičům budou muset být navíc implementovány ještě 2 malé kompresory pro vyrovnávání tlakových ztrát a čerpadlo na vodu na přečerpávání odpadní vody mezi nádržemi. Tlakové ztráty se u PEMF do 1 kW pohybují max. v jednotkách barů [87] a průtoky reaktantů za PČ do 850 W kolem 10 l /min [88]. Z toho plyne, že pro 50% polytropickou kompresi musí být zvoleny kompresory o výkonu max. 40 W, malé čerpadlo pak bude stačit 20 W [89]. Ve skutečnosti sice nebudou všechny spotřebiče využívány na maximální výkon, pro jistotu je ovšem lepší počítat s horší variantou.

Součet veškerého **požadovaného výkonu** je:

$$W = 605 + 2 * 40 + 20 = 705 \text{ W} \quad (34)$$

Účinnost DC-DC měniče se potom pohybuje kolem 90 % [90]. **Požadovaný výkon PČ** je tedy:

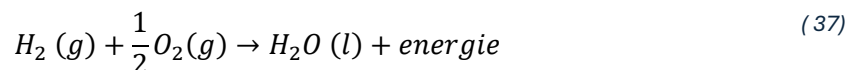
$$P_0' = 705 * 0,9 = 783 \text{ W} \quad (35)$$

Vzhledem k tomu, že nejsou dopředu známy detailní charakteristiky jednotlivých spotřebičů, a tudíž se jejich požadovaný výkon může od předpokládaného lišit, byl **požadovaný výkon PČ** zaokrouhlen na 800 W. V další fázi vývoje Arga může být tento odhad upřesněn.

$$P_0 = 800 \text{ W} \quad (36)$$

5.3.6 Výpočet potřebného množství reaktantů

Na základě chemické reakce, která probíhá v PČ, a na základě potřebného času pro dosažení hloubky 1 km a průzkumu HP pak bylo dopočítáno potřebné množství reaktantů. Pro připomenutí, **chemická rovnice** je následující [65],



Celková elektrická energie PČ, potřebná ke splnění cílů mise pak byla dopočítána ze zvoleného příkonu PČ a potřebného času:

$$E_{el} = 29,63 MJ \quad (38)$$

$$E_{el} = P_0 * t \quad (39)$$

Tato energie je energie se pak musí rovnat energii elektrické PČ. Celková energie článku je však složena jednak z elektrické energie a jednak z tepla. Zároveň v PČ dochází k určitým ztrátám v PČ. Výsledná elektrická účinnost je také daná mj. konstrukcí PČ, provozními tlaky, použitým katalyzátorem atd. Pro účinnost PEMFC byla konzervativně zvolena nejnižší možná hodnota, tedy 40 % [17], ačkoli je pravděpodobné že v případě použití čistého vodíku místo vzduchu jeho účinnost vzroste [28] a taktéž vzroste i jeho výkon [7], a to klidně až o 30 % [20].

Celkové množství uvolněné energie chemickou reakcí vodíku s kyslíkem je tedy [65]:

$$E_r = \frac{E_{el}}{\eta_{PČ}} \quad (40)$$

$$E_r = 74,07 MJ \quad (41)$$

E_r ... celková energie reakce
 $\eta_{PČ}$... elektrická účinnost PČ

Ze znalosti změny reakční entalpie vodíku lze následně vypočítat **látkové množství vodíku** [65]:

$$n_{H_2} = \frac{E_r}{\Delta H^0} \quad (42)$$

$$n_{H_2} = 306,32 mol \quad (43)$$

ΔH^0 ... změna reakční entalpie vodíku (výhřevnost) = 241,8 kJ [65]

Hmotnost vodíku pak je:

$$m_{H_2} = M_H * 2 * n_{H_2} \quad (44)$$

$$m_{H_2} = 0,62 \text{ kg} \quad (45)$$

M_H ... molární hmotnost atomu vodíku = 1,008 g/mol

Potřebné **látkové množství kyslíku** lze získat opět z výše zmíněné chemické rovnice, z níž vyplývá, že na 1 mol vodíku připadá ½ molu kyslíku:

$$n_{O_2} = \frac{n_{H_2}}{2} = 153,16 \text{ mol} \quad (46)$$

Hmotnost kyslíku tedy bude:

$$m_{O_2} = M_O * 2 * n_{O_2} \quad (47)$$

$$m_{O_2} = 4,90 \text{ kg} \quad (48)$$

5.3.7 Výpočet množství odpadní vody

Ze zákona o zachování plyne, že celková **hmotnost a přibližný objem odpadní vody** (pro hustotu 1000 kg/m³) na konci mise bude:

$$m_{H_2O} = 5,52 \text{ kg} \quad (49)$$

$$V_{H_2O} = 5,52 \text{ l} \quad (50)$$

Vzhledem k malému objemu odpadní vody a vzhledem k tomu. Zbavovat se tak malého množství vody by bylo zároveň nepraktické jednak proto, že by se z důvodu vysokého hydrostatického tlaku (na dně propasti až 100 bar) musela přetlakovat a zároveň by došlo ke ztrátě hmotnosti a tím i ztrátě neutrálního vztlaku.

5.3.8 Návrh nádrží pro reaktanty

Materiál pro nádrže jak na vodík, tak na kyslík, byla zvolena ocel ČSN 15 423 Cr-Mo-V [91]. Jedná se o nízkolegovanou žárovečnou ocel odolávající vodíkovému křehnutí, určenou pro součásti tlakových zařízení. Ocel je levný materiál s dostačující mezí kluzu 590 MPa. Vzhledem k rozmístění trysek v sondě, vzhledem k většímu množství vodíku oproti kyslíku a také k rovnoměrnému rozložení hmotnosti v sondě bylo rozhodnuto rozdělit vodík do 3 samostatných nádrží. Kyslík bude skladován pouze v 1 nádrži. Všechny nádrže budou poté stejně velké včetně nádrží na skladování odpadní vody.

Látkové množství vodíku v 1 nádrži tedy bude:

$$n_{H_2}^* = \frac{n_{H_2}}{3} = 102,1 \text{ mol} \quad (51)$$

Následně byly odhadnuty rozměry tlakových nádob, které vstupovaly do výpočtů. Tloušťka stěn všech částí nádoby byla zvolena fixně 5 mm. Dno pak bylo zvoleno konzervativněji a pro zjednodušení výpočtů jako polovina koule o průměru stejném jako průměr válcové části nádoby. Z tzv. kotlového vzorce pro výpočet pevnosti nádob na mez kluzu byl následně dopočítán maximální dovolený tlak a z množství reaktantu v jedné nádrži. Z objemu nádrže byl zjištěn následně tlak, na který musí být plyny stlačeny. Tyto dvě hodnoty byly porovnány mezi sebou a byl vypočten součinitel bezpečnosti. Cílem pak bylo stanovit co nejmenší rozměry nádrží, které by zároveň splňovaly požadovanou bezpečnost. K tomuto účelu byla využita tzv. citlivostní studie provedená v Excelu. Tyto výpočty mohou být taktéž využity i pro budoucí iterační upřesňování rozměrů nádrží i celé sondy poté, co budou známy všechny komponenty sondy a jejich rozmístění. Výpočet probíhal následovně:

Vnitřní objem tlakové nádoby:

$$V_{in} = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L_v + D_{in} \quad (52)$$

Přetlak vodíku uvnitř nádoby byl spočítán podle termodynamické stavové rovnice pro ideální plyn a pro teplotu 20 °C:

$$p_{H_2} = \frac{n_{H_2}^* \cdot R \cdot T}{V_{in}} \quad (53)$$

$$p_{H_2} = 124,84 \text{ bar} \quad (54)$$

R = 8,31 J/K·mol ... univerzální plynová konstanta

T = 293,15 K... termodynamická teplota (20 °C)

Maximální dovolený přetlak byl vyjádřen z tzv. kotlového vzorce pro válcové tlak. nádoby [89]:

$$p \cdot D_{in} \cdot L_v = \sigma_k \cdot s \cdot L_v \cdot 2 \quad (55)$$

$$p_{DOV} = \frac{2 \cdot \sigma_k \cdot s}{D_{in}} \quad (56)$$

$\sigma_k = 590 \text{ MPa}$... mez kluzu zvolené oceli [91]

s ... tloušťka stěny

D_{in} ... vnitřní průměr

L_v ... délka válcové části nádoby

Pro **součinitel bezpečnosti** tedy platí:

$$k_{H2} = \frac{p_{H2}}{p_{DOV}} \quad (57)$$

Podle evropské normy ČSN EN 13445 pro tlakové nádoby [92] je součinitel bezpečnosti pro kyslík a přetlaky kolem 200 bar obvykle volen v rozmezí 2-2,5. Pokud se týče nádob pro vodík, tam je součinitel volen o půl stupně vyšší kvůli než u kyslíku, a sice 2,5-3 pro stejné hodnoty přetlaků. Taktéž byly uvažovány provozní součinitele pro statické namáhání svarů tlakových nádob, pro naše provozní podmínky však všechny vyšly 1.

Stejným způsobem pak byla spočítána bezpečnost pro kyslík. Rozměry nádoby a materiál jsou stejné jako pro nádoby na vodík (vnitřní objem i dovolený přetlak bude tedy taktéž stejný). Výsledky součinitelů bezpečnosti pro různé rozměry nádob jsou zobrazeny v tabulkách 5-4 a 5-5:

Tab. 5-4 Výsledky citlivostní studie pro součinitel bezpečnosti pro tlakové nádoby s H₂

Součinitele bezpečnosti H ₂	k _{H₂} 2,36	Délky L _{in} [m]									
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Průměry D _{in} [m]	0,50	12,4	11,5	10,6	9,6	8,7	7,8	6,8	5,9	5,0	4,0
	0,45	10,9	10,1	9,2	8,4	7,6	6,7	5,9	5,0	4,2	3,4
	0,40	9,5	8,7	8,0	7,2	6,5	5,7	5,0	4,2	3,5	2,7
	0,35	8,1	7,4	6,7	6,1	5,4	4,8	4,1	3,5	2,8	2,2
	0,30	6,7	6,2	5,6	5,0	4,5	3,9	3,4	2,8	2,2	1,7
	0,25	5,4	5,0	4,5	4,0	3,6	3,1	2,6	2,2	1,7	1,2
	0,20	4,2	3,9	3,5	3,1	2,7	2,4	2,0	1,6	1,2	0,9
	0,15	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	1,7	1,4	1,1	0,8	0,6
	0,10	2,0	1,8	1,6	1,4	1,2	1,1	0,9	0,7	0,5	0,3
	0,05	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1

Tab. 5-5 Výsledky citlivostní studie pro součinitel bezpečnosti pro tlakovou nádobu s O₂

Součinitele bezpečnosti O ₂	k _{O₂} 1,6	Délky L _{in} [m]									
		1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
Průměry D _{in} [m]	0,50	8,3	7,7	7,0	6,4	5,8	5,2	4,6	3,9	3,3	2,7
	0,45	7,3	6,7	6,1	5,6	5,0	4,5	3,9	3,4	2,8	2,2
	0,40	6,3	5,8	5,3	4,8	4,3	3,8	3,3	2,8	2,3	1,8
	0,35	5,4	4,9	4,5	4,1	3,6	3,2	2,8	2,3	1,9	1,4
	0,30	4,5	4,1	3,7	3,4	3,0	2,6	2,2	1,9	1,5	1,1
	0,25	3,6	3,3	3,0	2,7	2,4	2,1	1,8	1,4	1,1	0,8
	0,20	2,8	2,6	2,3	2,1	1,8	1,6	1,3	1,1	0,8	0,6
	0,15	2,0	1,9	1,7	1,5	1,3	1,1	0,9	0,7	0,6	0,4
	0,10	1,3	1,2	1,1	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	0,2
	0,05	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1

Z tabulky citlivostní studie byly následně zvoleny vhodné rozměry tlakové nádoby, blíží se doporučenému součiniteli bezpečnosti. Vzhledem k tomu, že byly rozměry tlakové nádoby navrženy konzervativnějším způsobem, tj. tloušťka stěny dna byla ponechána na stejné hodnotě jako tloušťka stěny válcové skořepiny (5 mm) lze dovolit vybrat nižší z možných hodnot přípustné bezpečnosti. Rozměry nádob byly tedy zvoleny 0,4×0,25 m (d×š).

Absolutní tlaky, pod kterými bude muset být vodík a kyslík v nádobách natlakovány budou:

$$p_{H_2} = 89,3 \text{ bar} \quad (58)$$

$$p_{O_2} = 187,63 \text{ bar} \quad (59)$$

Pro jistotu byl ještě spočítán kompresibilitní faktor pro případ, že by se vodík nebo kyslík odchýlil od ideálního plynu, neboť při kompresi některých plynů (zejména vodíku) může docházet k výrazným odchýlkám. V takovém případě by se nedala použít stavová rovnice pro ideální plyn a reaktanty by musely být počítány jako plyn reálný.

Kompresibilitní faktor vodíku a kyslíku v navržených tlakových nádobách:

$$Z_{H_2} = \frac{\left(p_{H_2} + a_{H_2} \cdot \frac{n_{H_2}^{*2}}{V_{in}^2} \right) \cdot (V_{in} - n_{H_2}^* \cdot b_{H_2})}{n_{H_2}^* \cdot R \cdot T} \quad (60)$$

$$Z_{H_2} = 0,93 \quad (61)$$

$$Z_{O_2} = \frac{\left(p_{O_2} + a_{O_2} \cdot \frac{n_{O_2}^2}{V_{in}^2} \right) \cdot (V_{in} - n_{O_2} \cdot b_{O_2})}{n_{O_2} \cdot R \cdot T} \quad (62)$$

$$Z_{O_2} = 1,08 \quad (63)$$

Z_{H_2} ... kompresibilitní faktor vodíku

Z_{O_2} ... kompresibilitní faktor kyslíku

p_{H_2} ... tlak vodíku

p_{O_2} ... tlak kyslíku

$n_{H_2}^*$... látkové množství vodíku na 1 nádrž

n_{O_2} ... látkové množství kyslíku na 1 nádrž (= celkovému)

V_{in} ... vnitřní objem nádrže

$T = 293,15 \text{ K}$... termodynamická teplota (20 °C)

$R = 8,31 \text{ J/K}\cdot\text{mol}$... univerzální plynová konstanta

$a_{H_2} = 0,024785 \text{ Pa}\cdot\text{m}^6/\text{mol}^2$... korekční tlaková konstanta vodíku [93]

$b_{H_2} = 2,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$... korekční objemová konstanta vodíku [93]

$a_{O_2} = 0,138188 \text{ Pa}\cdot\text{m}^6/\text{mol}^2$... korekční tlaková konstanta kyslíku [93]

$b_{O_2} = 3,19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{mol}$... korekční objemová konstanta kyslíku [93]

Kompresibilitní faktory obou plynů jsou blízké 1, tzn. že oba plyny lze považovat za ideální. Všechny výpočty, které pro ně byly provedeny, tedy platí.

Pro úplnost byly poté ještě dopočítány **vnější rozměry tlakových nádob**:

$$D_{out} = D_{in} + 2 \cdot s \quad (64)$$

$$D_{out} = 260 \text{ mm} \quad (65)$$

D_{out} ... vnější průměr

D_{in} ... vnitřní průměr

s ... tloušťka stěny

$$L_{out} = L_v + D_{out} \quad (66)$$

$$L_{out} = 660 \text{ mm} \quad (67)$$

L_{out} ... celková (vnější) délka

L_v ... délka válcové části

D_{out} ... vnější průměr

Zároveň byly určeny hmotnosti nádob **bez reaktantů**:

$$m_{empt} = (V_{out} - V_{in}) \cdot \rho_{Fe} \quad (68)$$

$$m_{empt} = \left\{ \left[\pi \cdot \frac{D_{out}^2}{4} \cdot l_v + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{D_{out}}{2} \right)^3 \right] - \left(V_{in} + \frac{4}{3} \pi \cdot \left(\frac{D_{in}}{2} \right)^3 \right) \right\} \cdot \rho_{Fe} \quad (69)$$

$$m_{empt} = 20,6 \text{ kg} \quad (70)$$

m_{empt} ... hmotnost prázdné nádoby
 V_{out} ... vnější objem nádoby
 V_{in} ... vnitřní objem nádoby
 $\rho_{Fe} = 7850 \text{ kg/m}^3$... hustota oceli [94]
 D_{out} ... vnější průměr nádoby
 l_v ... délka válcové části nádoby
 V_{in} ... vnitřní objem nádoby
 D_{in} ... vnitřní průměr nádoby

A taktéž byly spočítány **hmotnosti jednotlivých nádrží i s reaktanty:**

$$m_{full,H_2} = m_{empt} + \frac{m_{H_2}}{3} \quad (71)$$

$$m_{full,H_2} = 20,8 \text{ kg} \quad (72)$$

$$m_{full,H_2} = m_{empt} + m_{O_2} \quad (73)$$

$$m_{full,O_2} = 25,5 \text{ kg} \quad (74)$$

m_{full,H_2} ... celková hmotnost nádoby s vodíkem
 m_{full,O_2} ... celková hmotnost nádoby s kyslíkem
 m_{H_2} ... hmotnost celkového potřebného množství vodíku
 m_{O_2} ... hmotnost celkového potřebného množství kyslíku

Veškeré parametry jednotlivých nádob na vodík a kyslík jsou přehledně shrnuty v následujících tabulkách 5-6 a 5-7:

Tab. 5-6 Parametry tlakových nádob s H_2

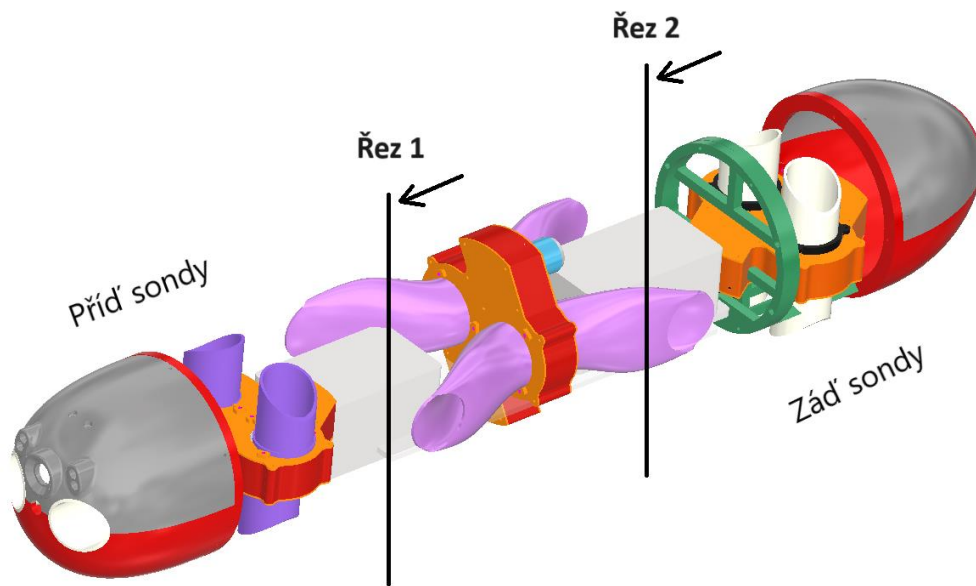
Parametr nádoby na H_2	Hodnota
Celková délka – L_{out}	660 mm
Průměr – D_{out}	260 mm
Tlak – p_{H_2}	89,3 bar
Max. dovolený tlak – p_{Dov}	236 bar
Součinitel bezpečnosti – k_{H_2}	2,6
Hmotnost prázdné nádrže – m_{empt}	20,6 kg
Hmotnost plné nádrže – m_{full,H_2}	20,8 kg

Tab. 5-7 Parametry tlakové nádoby s O_2

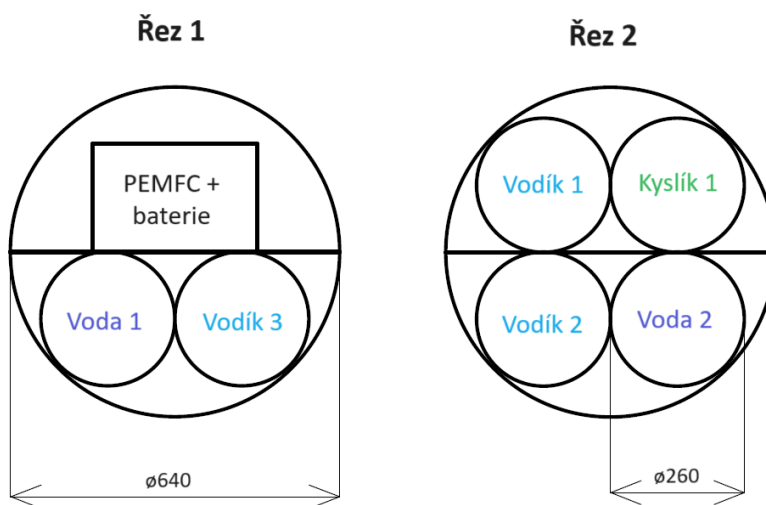
Parametr nádoby na O_2	Hodnota
Celková délka – L_{out}	660 mm
Průměr – D_{out}	260 mm
Tlak – p_{H_2}	134,2 bar
Max. dovolený tlak – p_{Dov}	236 bar
Součinitel bezpečnosti – k_{H_2}	1,8
Hmotnost prázdné nádrže – m_{empt}	20,6 kg
Hmotnost plné nádrže – m_{full,O_2}	25,5 kg

5.3.9 Dispozice palivového článku a nádrží v sondě

Nádrže budou umístěny mezi tryskami pro horizontální pohyb a tryskami pro vertikální pohyb sondy. Velká baterie bude nahrazena malou baterií pro nastartování PČ (může být i integrovaná) a společně se samotným palivovým článkem a s další elektronikou budou tyto komponenty umístěny na přední sondy (viz Obr. 5-9). Pod PČ se budou nacházet 2 nádrže, další 4 nádrže budou umístěny na zádi sondy. Jak již bylo nastíněno na začátku kap. 5.3, dispozice jednotlivých nádrží v sondě bude řešena s ohledem na jejich hmotnost, tzn. vyváženost sondy, a to nejen na počátku mise, ale i po dobu jejího trvání. Během ní totiž dojde ke spotřebovávání jednotlivých reaktantů a určité změně v rozložení hmotnosti. Výsledný návrh umístění nádrží v Argu je schematicky zobrazen v řezu na obrázku 5-10 (oblast řezů pak na obrázku 5-9).



Obr. 5-9 Zobrazení polohy vertikálních řezů na modelu Arga pro zobrazení rozmístění nádrží



Obr. 5-10 Zobrazení rozmístění nádrží v Argu v řezech

Jelikož je rychlost úbytku hmotnosti kyslíku v nádrži Kyslík 1 podobná hmotnosti vznikající vody (většinu hmotnosti molekuly vody tvoří kyslík), bylo rozhodnuto o umístění nádrže Voda 2 pod Kyslík 1. Hmotnost na pravé straně zádi sondy tak bude víceméně konstantní. Zároveň, nádrže na vodu byly umístěny pod úroveň palivového článku z toho důvodu, aby do nich voda stékala samovolně. Rozložení hmotnosti v sondě pak bylo přibližně určeno výpočty v Excelu. Pro začátek mise jsou ve výpočtech zahrnuty plné nádrže reaktantů a 1 prázdná nádoba na vodu (Voda 2), a to zvláště pro jednotlivé poloviny sondy (příd, záď a levou a pravou stranu sondy). Následně bylo totéž spočítáno i pro konečnou fázi mise, tedy s prázdnými nádržemi reaktantů a s 1 naplněnou nádrží Voda 2 na zádi. Nádrž Voda 1 zatím zpočátku nebyla ve výpočtu uvažována, a to z důvodu, aby bylo zjištěno, zda bude vůbec potřeba. Hmotnosti PČ a pomocné baterie byly předběžně stanoveny podle konkrétního 800W PEM článku od firmy Intelligent Energy [86].

Hmotnost na **zádi** na začátku mise:

$$m_{ZZ} = 2 \cdot m_{full,H2} + m_{full,O2} + m_{empt} \quad (75)$$

Hmotnost na **přídi** na začátku mise:

$$m_{Př,z} = m_{full,H2} + m_{PČ} + m_{El} \quad (76)$$

Hmotnost na **pravé straně** sondy na začátku mise:

$$m_{Pz} = m_{full,H2} + m_{full,O2} + m_{empt} + \frac{1}{2} \cdot (m_{PČ} + m_{El}) \quad (77)$$

Hmotnost na **levé straně** sondy na začátku mise:

$$m_{Lz} = 2 \cdot m_{full,H2} + \frac{1}{2} \cdot (m_{PČ} + m_{El}) \quad (78)$$

Hmotnost na **zádi** na konci mise:

$$m_{Zk} = 4 \cdot m_{empt} \quad (79)$$

Hmotnost na **přídi** na konci mise:

$$m_{Př,k} = m_{empt} + m_{PČ} + m_{El} \quad (80)$$

Hmotnost na **pravé straně** sondy na konci mise:

$$m_{Pk} = 3 \cdot m_{empt} + \frac{1}{2} \cdot (m_{P\check{c}} + m_{El}) \quad (81)$$

Hmotnost na **levé straně** sondy na konci mise:

$$m_{Lk} = 2 \cdot m_{empt} + \frac{1}{2} \cdot (m_{P\check{c}} + m_{El}) \quad (82)$$

Výsledky byly shrnuty v následující Tab. 5-8. V ní je patrné, ve které části sondy dochází k úbytku (modrá barva), a nebo naopak k nárůstu hmotnosti (červená barva):

Tab. 5-8 Rozložení hmotnosti v jednotlivých polovinách Arga na začátku a konci mise (bez nádrže Voda 1)

Rozložení hmotností v sondě na začátku [kg]		Rozložení hmotností v sondě na konci [kg]	
Zád'	87,69869108	Zád'	87,90453882
Příd'	22,302	Příd'	22,096
P strana	67,64637864	P strana	68,05807413
L strana	42,35462488	L strana	41,44292939

Je evidentní, že během během mise dochází k mírnému nárůstu hmotnosti na pravé straně zádi Arga, a naopak k poklesu hmotnosti na levé straně přídí. Tato výsledná nerovnováha je způsobena postupným spotřebováváním vodíku, který je skladován v několika částech sondy a jeho následného navázání do formy vody, která je skladována pouze v jedné uvažované nádobě. Zároveň je v levé části přídí výrazně méně hmoty, proto bylo rozhodnuto o použití i druhé nádrže na vodu (Voda 1). Nádrž bude prozatím uvažována o stejných rozměrech, jaké mají i všechny ostatní nádrže. Tato nádrž bude z poloviny naplněná vodou již na začátku mise, hmotnost v této části tedy naroste o nějakých 35 kg (hmotnost nádoby a hmotnost vody). Zbytek pak bude muset být dorovnán přídatným balastem. Dvě nádrže na odpadní vodu (Voda 1 a Voda 2), nainstalované po úhlopříčce proti sobě, tak budou mít zároveň funkci balančních nádrží. Případná nerovnováha sondy pak bude regulována čerpadlem. Čerpadlo tak bude v případě potřeby přečerpávat vodu mezi nádržemi navzájem. Opět platí, že se nádrže nacházejí pod úrovní palivového článku, aby do nich odpadní voda mohla samovolně stékat. Tyto nádrže by zároveň měly být uvnitř rozděleny do několika komor, které by bránily náhlému přesunu hmotnosti vody v případě náhlé změny rychlosti nebo směru sondy. Udržení vhodné polohy Arga při ponoru pomocí balančních nádrží je taktéž velice důležité i z toho důvodu, že musí být v každém případě zajištěn odvod přebytečné vody ze stacku. Výsledné rozložení hmotnosti se z poloviny zaplněnou nádrží Voda 1 a s přidaným balastem je znázorněno v Tab. 5-9 (bez regulace čerpadlem). Balanční nádrže mohou být navíc využity i jako zásoba vody pro případné chlazení PČ.

Tab. 5-9 Rozložení hmotnosti v jednotlivých polovinách Arga na začátku a konci mise (s nádrží Voda 1 a vyrovnávacím balastem)

Rozložení hmotností v sondě na začátku [kg]		Rozložení hmotností v sondě na konci [kg]	
Zád'	87,7	Zád'	87,9
Příd'	87,7	Příd'	87,5
P strana	67,6	P strana	68,1
L strana	67,6	L strana	67,2

Vzhledem k povaze mise, pro kterou je určeno Argo, je počítáno s tím, že bude docházet k rovnoměrné spotřebě reaktantů ze všech nádrží současně a zároveň na konci mise dojde k úplnému vyprázdnění nádrží s reaktanty. Pro jiné typy misí by ovšem mohlo být výhodnější použít jiné strategie spotřeby reaktantů. Ku příkladu spotřebovat reaktanty nejdříve z jedné nádrže a až poté z druhé, aby mohla být v případě potřeby prázdná nádrž vyměněna za jinou.

V tomto základním návrhu byly použity nádrže na odpadní vodu o objemu 2×28 l, přestože objem odpadní vody bude pouze 5,5 l. A ačkoli budou nádrže zároveň sloužit i jako balanční, v pozdějším přesnějším návrhu, kdy budou známy konkrétní hmotnosti a rozměry všech použitých komponent, by bylo vhodné jejich rozměr zmenšit. Do uvolněného prostoru pak mohou být umístěny další zařízení a nebo přídatný vyrovnávací balast.

5.3.10 Nové parametry sondy s PČ

Rozměry sondy musely být kvůli PČ a všem nádržím zvětšena o 526 mm do délky a o 314 mm do šířky (průměru). Celková odporová plocha při svislém ponoru vzroste o polovinu (předpoklad byl dvojnásobek), výsledná rychlost sondy může být tedy o něco vyšší. V Tab. 5-10 jsou shrnuty parametry navrženého Arga s napájením palivovým článkem PEMFC:

Tab. 5-10 Výběr navržených parametrů pro Argo s PEMFC

Navržené parametry sondy s PČ: ²⁶	
Délka	2260 mm
Průměr	640 mm
Výkon sondy	76 W
Rychlost (ve svislém směru)	0,6 m/s
Výkon PČ (PEMFC)	800 W
Operační doba	10 h
Max. hloubka	1000 m
Max. hydrostatický tlak	10 MPa
Počet nádrží na vodík	3
Počet nádrží na kyslík	1
Počet nádrží na odpadní vodu	2

Je však potřeba znovu zdůraznit, že finální rozměry Arga budou muset v být v budoucnu ještě iteračně upraveny podle rozměrových, hmotnostních aj. specifík jednotlivých konkrétních komponent. Zároveň bude potřeba spočítat bezpečnost vnějšího pláště vůči hydrostatickému tlaku, aby nedošlo k implozi. Nicméně zajímavou myšlenkou by mohlo být využití tlakových nádob pro oporu pláště. Budou-li navíc přetlakovány na vyšší tlak, než bude hydrostatický tlak v Hranické propasti (v hloubce 1 km až 100 bar), pak by tlak okolní vody nepředstavoval pro vnější válcovou skořepinu sondy takový problém.

Porovnáme-li pak navržený systém PČ s komerčně dostupnou baterií o ekvivalentní kapacitě (500 Ah [85]), tak zjistíme, že jsou rozměry baterie mnohem kompaktnější (350 x 84 x 65 mm) a se svou hmotností necelé 3 kg také až o 30× lehčí. Pro použití v Argu by byla tedy vhodnější. Nicméně je potřeba dodat, že řešení navrženého systému palivového článku v této koncepční studii není jediným řešením a použitím jiných typů materiálů (např. nádrží z uhlíkových vláken pro vodík), jiným typem skladování vodíku a kyslíku, příp. vhodnější optimalizací rozměrů může být dosaženo příznivějších výsledků.

Je taktéž nutné zmínit, že hlavní věc, kterou se tato práce nezabývala a bez jejíhož vyřešení ztrácí použití PČ v sondě výhodu proti kabelovému napájení, je ovládání sondy. To totiž zatím bude realizováno pomocí optického kabelu, který se – stejně jako napájecí kabel – může v Hranické sondě zaseknout a způsobit tak značné problémy. Najde-li se ovšem technologie bezdrátového ovládání, která by byla v Argu použitelná, nebo bude-li Argo zcela autonomní se schopností orientace v prostoru na základě dat ze senzorů a již vytvořených 3D modelů propasti, pak se výhody napájení sondy palivovým článkem jistě najdou.

Závěr

Cílem bakalářské práce byla rešerše různých typů palivových článků s důrazem na jejich použití v malých podvodních sondách, výběr vhodného palivového článku a následně vypracování koncepční studie pro jeho integraci do podvodní sondy Argo, jejíž cílem je průzkum Hranické propasti. Popis sondy a popis Hranické propasti byly taktéž důležitými součástmi pro vypracování koncepční studie.

Ze všech používaných typů palivových článků byl vybrán článek s polymerní membránou (PEMFC). Jedná se o nejpoužívanější a na trhu nejdostupnější palivový článek, vyráběný v celé škále rozměrů i výkonů. Tento článek byl již několikrát úspěšně použit v podvodních sondách. Oproti jiným palivovým článkům je jednoduchý, skladný a má vysokou elektrickou účinnost. PEMFC pracuje s vodíkem a kyslíkem, proto bylo nutné spočítat potřebné množství těchto reaktantů pro dosažení dna Hranické propasti, které se pravděpodobně nachází v hloubce jednoho kilometru.

Výpočet vycházel ze současného prototypu sondy, podle příkonu elektromotorů a dalších potřebných komponent byl stanoven výkon palivového článku na 800 W. Dále byla stanovena potřebná doba pro ponoření sondy do 1 km a její opětovné vynoření. Vzhledem k členitosti Hranické propasti, možným překážkám a neprozkoumaným částem byla tato doba hrubě odhadnuta na 10 hodin. Tento odhad je ovšem nutné více upřesnit a konzultovat s odborníky, kteří s ponory do Hranické propasti již mají nějaké zkušenosti. Podle chemické reakce, která v článku probíhá, bylo následně dopočítáno množství potřebného vodíku (306 mol) a potřebného kyslíku (153 mol) pro splnění cílů mise. Vzhledem k překvapivě malému množství, bylo rozhodnuto o jejich skladování ve formě stlačeného plynu v tlakových nádobách, přičemž vodík byl rozdělen do třech samostatných nádob a kyslík do jedné. Pomocí citlivostní studie provedené v Excelu byly navrženy vhodné rozměry tlakových nádob tak, aby byly co nejmenší a zároveň aby splňovaly bezpečnost na výsledný přetlak plynů. Pro zvolenou bezpečnost 2,6 pro vodík a 1,8 pro kyslík byly rozměry stanoveny na 400 mm do délky a 250 mm v průměru. Kyslík pak bude přepravován pod počátečním tlakem 134 bar a vodík 89 bar. Odpadní voda o konečné objemu 5,5 l bude vzhledem k vnějším tlakům a udržení neutrálního vztlaku skladována na palubě ve 2 zásobnících. Tyto nádrže byly zároveň navrženy i jako balanční, což je důležité také pro zajištění spolehlivého odtoku odpadní vody z palivového článku. Rozměry balančních nádrží byly pro zjednodušení navrženy stejné jako u tlakových nádob, v budoucích návrzích by ovšem mohly být zmenšeny. Taktéž bylo navrženo rozmístění tlakových nádob v sondě tak, aby byla její rovnováha při spotřebovávání reaktantů ovlivněna co nejméně. Celkové rozměry Arga pak byly navrženy na 2260 mm do délky a 640 mm do průměru, rozměry tak oproti původnímu prototypu vzrostly o 700 a 30 mm.

Ve veškerých výpočtech bylo počítáno vždy s horšími vstupními hodnotami jako jsou např. vyšší příkony spotřebičů nebo horší účinnost palivového článku. Budou-li známy konkrétní požadavky a parametry všech komponent použitých v Argu, výpočet může být upřesněn. Taktéž bude nutné provést přepočet pro vybraný palivový článek od konkrétního výrobce, a to jak pro množství reaktantů, tak pro provozní tlaky na vstupu a tlakové ztráty na výstupu. Podle dostupné literatury však může být účinnost palivového článku při práci s čistým kyslíkem vyšší, než udává výrobce (většina dostupných PČ je navrhována pro vzduch). Zároveň je třeba si uvědomit, že zvolené řešení prezentované v této práci není jediným možným. Rozměry sondy by mohly být ještě optimalizovány v případě, že bude zvolen pokročilejší materiál tlakových nádob (např. CFRP) nebo bude-li pro ně provedena citlivostní studie s jinými vstupními parametry (např. tloušťka stěny nádob). Taktéž by mohla být zvolena jiná forma skladování jednotlivých reaktantů (v úvahu by připadalo

skladování kyslíku ve formě peroxidu) nebo zvolení jiné strategie pro ponor/vynořování a příp. zba-
vování se odpadní vody.

V rámci této koncepční studie nebyla řešena tepelná bilance mezi palivovým článkem a
okolím, neboť byl stanoven předpoklad dostatečného odvodu tepla odpadní vodou, vytékající
z palivového článku, a vodou v Hranické propasti. Tento předpoklad by bylo vhodné v pozdější fázi
návrhu taktéž ověřit. K chlazení by ovšem mohla posloužit voda v balančních nádržích. Také bude
nutné stanovit počet mezistupňů pro redukci tlaku z tlakové nádoby na provozní tlak v palivovém
článku a do sondy jej zakomponovat.

Pokud se týče srovnání palivového článku pro Argo s baterií o ekvivalentní kapacitě, tak
bylo dospěno k závěru, že je systém palivového článku složitější, rozměrnější a má mnohem vyšší
hmotnost. Pro napájení Arga je tedy baterie vhodnější. Zároveň, nebude-li vyřešen problém s bez-
drátovým ovládáním sondy v takových hloubkách, pak palivový článek ztratí výhodu i vůči kabe-
lovému napájení. Ovládání sondy bude muset být totiž stejně zajištěno optickým kabelem. Tento
problém by se dal nicméně vyřešit vyvinutím autonomního řízení sondy. Další možnost, která se
pak nabízí prostudovat, je využití hybridního systému palivového článku s baterií, který by mohl
přinést lepší výsledky.

I přes určité nevýhody jsou však palivové články zajímavým řešením a rozhodně mají po-
tenciál stát se bezemisními zdroji energie v mnoha aplikacích. Tato koncepční studie zároveň
dokázala, že je lze využít i pro napájení malé podvodní sondy jakou je Argo. A ačkoli není jejich
použití k průzkumu Hranické propasti tím nejlepším řešením, pro jiné typy misí nebo větší rozměry
sondy by palivové články mohly být mnohem přínosnější.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *Ukraine's new underwater drone Marichka breaks cover - Naval News* [online]. [vid. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://www.navalnews.com/naval-news/2023/08/ukraines-new-underwater-drone-marichka-breaks-cover/>
- [2] MIZOKAMI, Kyle. *Could This Undersea Drone Have Saved the Titan Crew?* [online]. 28. červen 2023 [vid. 2024-05-26]. Dostupné z: <https://www.popularmechanics.com/technology/robots/a44305894/argus-worker-xl-rov-titan-rescue-mission/>
- [3] SVALBARD. Utilizing underwater drones for mapping of marine archaeology. *blueye* [online]. 10. červenec 2019 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.blueyerobotics.com/blog/utilizing-underwater-drones-for-mapping-of-marine-archaeology>
- [4] *Underwater inspections with underwater drones | Blueye Robotics* [online]. [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.blueyerobotics.com/industries/inspection-services>
- [5] MIF. CES 2019: K podvodním radovánkám poslouží dron i skútr - Novinky. *Novinky.cz* [online]. 7. leden 2019 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/clanek/internet-a-pc-hardware-ces-2019-k-podvodnim-radovankam-poslouzi-dron-i-skutr-40266873>
- [6] SHIH, Nai Chien, Biing Jyh WENG, Jiunn Yih LEE a Yung Chia HSIAO. Development of a small fuel cell underwater vehicle. In: *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2013, s. 11138–11143. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.095
- [7] MENDEZ, Alejandro, Teresa J. LEO a Miguel A. HERREROS. Current state of technology of fuel cell power systems for autonomous underwater vehicles. *Energies* [online]. 2014, 7(7), 4676–4693. ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en7074676
- [8] *Power delivery networks for Tethered, aerial and underwater vehicles (UAV/UUV/ROV) | Vicor* [online]. 2024 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.vicorpower.com/industries-and-innovations/aerospace-and-defense-solutions/aerospace-defense-tethered-vehicles>
- [9] CANO, Zachary P., Dustin BANHAM, Siyu YE, Andreas HINTENNACH, Jun LU, Michael FOWLER a Zhongwei CHEN. *Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets* [online]. B.m.: Nature Publishing Group. 1. duben 2018. ISSN 20587546. Dostupné z: doi:10.1038/s41560-018-0108-1
- [10] *Hranice Abyss: The Deepest Flooded Freshwater Abyss in the World* [online]. [vid. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://indepthmag.com/deepest-flooded-freshwater-abyss-in-the-world/>
- [11] RATH, Rosalin, Piyush KUMAR, Smita MOHANTY a Sanjay Kumar NAYAK. *Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors* [online]. B.m.: John Wiley and Sons Ltd. 1. prosinec 2019. ISSN 1099114X. Dostupné z: doi:10.1002/er.4795
- [12] ELKAFAS, Ahmed G., Massimo RIVAROLO, Eleonora GADDUCCI, Loredana MAGISTRI a Aristide F. MASSARDO. *Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives* [online]. B.m.: MDPI. 1. leden 2023. ISSN 22279717. Dostupné z: doi:10.3390/pr11010097
- [13] ŠIMEČKOVÁ, Barbora. Hranická propast a hloubkové rekordy. *Ochrana přírody* [online]. 24. srpen 2023 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/z-nasi-prirody/hranicka-propast-a-hloubkove-rekordy/>

- [14] KLANICA, R., J. KADLEC, P. TÁBOŘÍK, J. MRLINA, J. VALENTA, S. KOVÁČIKOVÁ a G.J. HILL. Hypogenic Versus Epigenic Origin of Deep Underwater Caves Illustrated by the Hranice Abyss (Czech Republic)—The World’s Deepest Freshwater Cave. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* [online]. 2020, **125**(9). Dostupné z: doi:10.1029/2020JF005663
- [15] SINGH, Sonal, Shikha JAIN, Venkateswaran PS, Avanish K. TIWARI, Mansa R. NOUNI, Jitendra K. PANDEY a Sanket GOEL. *Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 18. červenec 2015. ISSN 18790690. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.06.040
- [16] WEYDAHL, Helge, Martin GILLJAM, Torleif LIAN, Tom Cato JOHANNESSEN, Sven Ivar HOLM a Jon Øistein HASVOLD. Fuel cell systems for long-endurance autonomous underwater vehicles – challenges and benefits. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2020, **45**(8), 5543–5553. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2019.05.035
- [17] ELKAFAS, Ahmed G., Massimo RIVAROLO, Eleonora GADDUCCI, Loredana MAGISTRI a Aristide F. MASSARDO. *Fuel Cell Systems for Maritime: A Review of Research Development, Commercial Products, Applications, and Perspectives* [online]. B.m.: MDPI. 1. leden 2023. ISSN 22279717. Dostupné z: doi:10.3390/pr11010097
- [18] *Hydrogen Fuel Cells | PEM Fuel Cells for Drones, UAV | Intelligent Energy* [online]. [vid. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/intelligent-energy/>
- [19] QUEIRÓS, Hugo, António LAFUENTE, João SEPÚLVEDA a João Sena ESTEVES. *Microcontroller-Driven Hydrogen Fuel Cell Car*. 2010.
- [20] SHIH, Nai Chien, Biing Jyh WENG, Jiunn Yih LEE a Yung Chia HSIAO. Development of a small fuel cell underwater vehicle. In: *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, 2013, s. 11138–11143. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2013.01.095
- [21] DEUTSCH, Clemens. *On the Performance of Long-Range Autonomous Underwater Vehicles : Enhancing the Endurance of AUVs*. nedatováno. ISBN 9789180402651.
- [22] SARAVANAKUMAR, Yavinaash Naidu, Mohamed Thariq Hameed SULTAN, Farah Syazwani SHAHAR, Wojciech GIERNACKI, Andrzej ŁUKASZEWICZ, Marek NOWAKOWSKI, Andriy HOLOVATYY a Sławomir STĘPIEŃ. Power Sources for Unmanned Aerial Vehicles: A State-of-the Art. *Applied Sciences* [online]. 2023, **13**(21), 11932. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/app132111932
- [23] CANO, Zachary P., Dustin BANHAM, Siyu YE, Andreas HINTENNACH, Jun LU, Michael FOWLER a Zhongwei CHEN. *Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets* [online]. B.m.: Nature Publishing Group. 1. duben 2018. ISSN 20587546. Dostupné z: doi:10.1038/s41560-018-0108-1
- [24] HASVOLD, Øistein, Nils J. STØRKERSEN, Sissel FORSETH a Torleif LIAN. Power sources for autonomous underwater vehicles. *Journal of Power Sources* [online]. 2006, **162**(2 SPEC. ISS.), 935–942. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2005.07.021
- [25] *Ve zkratce - Česká vodíková technologická platforma* [online]. 2024 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/o-vodiku/ve-zkratce>
- [26] LIU, Jixin, Fei YU, Bo HE a C. Guedes SOARES. *A review of underwater docking and charging technology for autonomous vehicles* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 1. duben 2024. ISSN 00298018. Dostupné z: doi:10.1016/j.oceaneng.2024.117154

- [27] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Comparison of Fuel Cell Technologies* | Department of Energy [online]. [vid. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuel-cells/comparison-fuel-cell-technologies>
- [28] VŠB-TUO. *Studie pohonu mobilního prostředku s palivovým článkem*. 2005.
- [29] XIU, Xinyan, Songsong MA, Jianchi YU, Sibó WANG, Jiang QIN a Hongyan HUANG. Performance analysis and demonstration of fuel cell/battery hybrid system for unmanned undersea vehicles. *Journal of Power Sources* [online]. 2023, **575**. ISSN 03787753. Dostupné z: doi:10.1016/j.jpowsour.2023.233151
- [30] RATH, Rosalin, Piyush KUMAR, Smita MOHANTY a Sanjay Kumar NAYAK. *Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors* [online]. B.m.: John Wiley and Sons Ltd. 1. prosinec 2019. ISSN 1099114X. Dostupné z: doi:10.1002/er.4795
- [31] SHARKH', S M Abu a G GRIFFITHS. *Energy Storage Systems for Unmanned Underwater Vehicles*. 2003.
- [32] *Can ROVs Go Wireless? | Featured Stories* [online]. [vid. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.oceannews.com/featured-stories/can-rovs-go-wireless>
- [33] *Unmanned Underwater Vehicles: An Ocean of Possibilities - Inside Unmanned Systems* [online]. [vid. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://insideunmannedsystems.com/unmanned-underwater-vehicles-an-ocean-of-possibilities/>
- [34] *SPELEOAQUANAUT ČSS ZO 1-10, JESKYNNÍ POTÁPĚČI, CAVE DIVING* [online]. 2017 [vid. 2024-05-14]. Dostupné z: <https://www.speleoaquanaut.cz/clanek-hranicka-propast-zachrana-roboty-10-11-7-2017-1-367>
- [35] AUDIBERT, Jean M. a Jun HUANG. Geophysical and Geotechnical Design. *Handbook of Offshore Engineering* [online]. 2005, 1145–1268 [vid. 2024-05-19]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-044381-2.50023-0
- [36] GREENWOOD, N. Norman a Alan EARNSHAW. *Chemistry of the Elements*. 2. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- [37] VERFONDERN, Karl. Hydrogen Fundamentals. *Biennial Report on Hydrogen Safety* [online]. 5. srpen 2011 [vid. 2024-04-06]. Dostupné z: <http://www.hysafe.net/wiki/BRHS/OFD-Chapter1>
- [38] ROYAL SOCIETY OF CHEMISTRY. *Hydrogen - Element information, properties and uses | Periodic Table* [online]. 2024 [vid. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>
- [39] WILLIAMS, David R. Earth Fact Sheet. *NASA Official* [online]. 11. leden 2024 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- [40] FELSEGHI, Raluca Andreea, Elena CARCADEA, Maria Simona RABOACA, Catalin Nicolae TRUFIN a Constantin FILOTE. *Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications* [online]. B.m.: MDPI AG. 3. prosinec 2019. ISSN 19961073. Dostupné z: doi:10.3390/en12234593
- [41] BAYKARA, Sema Z. Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2018, **43**(23), 10605–10614. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2018.02.022
- [42] N.V. NEDERLANDSE GASUNIE. *History - Longread Hydrogen* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://www.theworldofhydrogen.com/gasunie/history>

- [43] RESEARCHWRITER.CZ. *Využívání svítiplynu pro pohon motorových vozidel* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://lpg-cng.ochranamotoru.cz/auta-na-plyn-pohon-svitipln-koks-cechy-morava-slezsko.htm>
- [44] PRAŽSKÁ PLYNÁRENSKÁ. V českých zemích se svítí již 170 let - Odborné časopisy. *FCC Public* [online]. 15. září 2017 [vid. 2024-03-02]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/clanek/v-ceskych-zemich-se-sviti-jiz-170-let--2485>
- [45] THOMAS, John Meurig, Peter P. EDWARDS, Peter J. DOBSON a Gari P. OWEN. *Decarbonising energy: The developing international activity in hydrogen technologies and fuel cells* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 1. prosinec 2020. ISSN 20954956. Dostupné z: doi:10.1016/j.jechem.2020.03.087
- [46] CASTONGUAY, Sylvie. Green Technologies: Electric Cars with Hydrogen Fuel Cells. *WIPO Magazine* [online]. březen 2009 [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: https://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2009/02/article_0009.html
- [47] EUROPEAN HYDROGEN OBSERVATORY. *Introduction to hydrogen* [online]. [vid. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/learn-about-hydrogen/hydrogen-basics/introduction-hydrogen>
- [48] *Alternativní bionafta umožňuje podstatné snížení emisí skleníkových plynů | Technický týdeník* [online]. 16. prosinec 2022 [vid. 2024-03-23]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/alternativni-bionafta-umoznuje-podstatne-snizeni-emisi-sklenikovych-plynu_57229.html
- [49] *Hydrogen | SIAD* [online]. [vid. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://www.siad.com/cs/vodik>
- [50] BÍLEK ADAM, Příbyla Ondráš. Jak dekarbonizovat výrobu oceli? *Fakta o klimatu* [online]. 11. září 2023 [vid. 2024-03-23]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/dekarbonizace-oceli>
- [51] *Improving buses - Transport for London* [online]. [vid. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://tfl.gov.uk/modes/buses/improving-buses?intcmp=42923#cleaner>
- [52] *Hydrogen value chains | European Hydrogen Observatory* [online]. [vid. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/learn-about-hydrogen/hydrogen-basics/hydrogen-value-chains>
- [53] Energy Observer. 2024 [online]. [vid. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.energy-observer.org/>
- [54] *Heat values of various fuels - World Nuclear Association* [online]. 2023 [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>
- [55] HYSAFE. *HYDROGEN FUNDAMENTALS*. nedatováno.
- [56] *Engines | Blue Origin* [online]. [vid. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://www.blueorigin.com/engines>
- [57] *Why hydrogen? - Longread Hydrogen* [online]. [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.theworldofhydrogen.com/gasunie/why-hydrogen>
- [58] *TransPower - Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles* [online]. [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: https://transpowerusa.com/zero_emission_solutions/hhice_vehicles/
- [59] *Hydrogen - Energy Kids: U.S. Energy Information Administration (EIA)* [online]. [vid. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/kids/energy-sources/hydrogen/>
- [60] *Hydrogen blending begins on the public gas network in Winlaton - HyDeploy* [online]. 13. srpen 2021 [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://hydeploy.co.uk/about/news/green-light-for-first-hydrogen-blending-on-a-public-gas-network/>

- [61] AMYC. *First Hydrogen Homes open to the public | Northern Gas Networks* [online]. 15. červenec 2021 [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.northern-gasnetworks.co.uk/2021/07/15/first-hydrogen-homes-open-to-the-public/>
- [62] GRUBER, Andrea, Mirko R. BOTHERN, Andrea CIANI, Konduri ADITYA, Jacqueline H. CHEN a Forman A. WILLIAMS. Direct Numerical Simulation of hydrogen combustion at auto-ignitive conditions: Ignition, stability and turbulent reaction-front velocity. *Combustion and Flame* [online]. 2021, **229**, 111385 [vid. 2024-04-01]. ISSN 0010-2180. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMBUSTFLAME.2021.02.031
- [63] *Informace o výrobě vodíku za jízdy - Jezdí úsporně a ekologicky H2i* [online]. [vid. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://h2i.cz/informace-o-vyrobe-vodik-za-jizdy/>
- [64] WANG, Yun, Daniela Fernanda RUIZ DIAZ, Ken S. CHEN, Zhe WANG a Xavier Cordobes ADROHER. *Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells – A review* [online]. B.m.: Elsevier B.V. 1. leden 2020. ISSN 18734103. Dostupné z: doi:10.1016/j.mat-tod.2019.06.005
- [65] PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. 2002.
- [66] MEKHILEF, S., R. SAIDUR a A. SAFARI. *Comparative study of different fuel cell technologies* [online]. B.m.: Elsevier Ltd. 2012. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.09.020
- [67] MANOHARAN, Yogesh, Seyed Ehsan HOSSEINI, Brayden BUTLER, Hisham ALZHAHRANI, Bhi Thi Fou SENIOR, Turaj ASHURI a John KROHN. *Hydrogen fuel cell vehicles; Current status and future prospect* [online]. B.m.: MDPI AG. 1. červen 2019. ISSN 20763417. Dostupné z: doi:10.3390/app9112296
- [68] LITERA, Jan, Marie DLABIKOVA a Vlastimil ŠRAM. Konzultace s inženýry z R&D. In: . České Budějovice. 5. duben 2024.
- [69] RATHKE, P, O THALAU, J KALLO, J SCHIRMER a T STEPHAN. *Long Distance Flight Testing with the Fuel Cell Powered Aircraft ANTARES DLR-H2*. 2013.
- [70] *Fuel Cell AUV „URASHIMA“*. nedatováno.
- [71] SHRIVASTAVA, N. K. a T. A.L. HARRIS. Direct Methanol Fuel Cells. *Encyclopedia of Sustainable Technologies* [online]. 2017, 343–357 [vid. 2024-04-30]. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-409548-9.10121-6
- [72] SINGH, Mandeep, Dario ZAPPA a Elisabetta COMINI. Solid oxide fuel cell: Decade of progress, future perspectives and challenges. *Volume 46, Issue 54, Pages 27643 - 27674* [online]. 2021, **46**(54), 27643–27674 [vid. 2024-05-01]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2021.06.020
- [73] CORIGLIANO, Orlando, Leonardo PAGNOTTA a Petronilla FRAGIACOMO. On the Technology of Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Energy Systems for Stationary Power Generation: A Review. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 15276* [online]. 2022, **14**(22), 15276 [vid. 2024-04-03]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/SU142215276
- [74] ABDELKAREEM, Mohammad Ali, Khaled ELSAID, Tabbi WILBERFORCE, Mohammed KAMIL, Enas Taha SAYED a A. OLABI. Environmental aspects of fuel cells: A review. *Science of the Total Environment* [online]. 2021, **752**. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141803
- [75] KULKARNI, A. a S. GIDDEY. Materials issues and recent developments in molten carbonate fuel cells. *Volume 16, Issue 10, Pages 3123 - 3146* [online]. 2012, **16**(10), 3123–3146 [vid. 2024-05-01]. ISSN 14328488. Dostupné z: doi:10.1007/s10008-012-1771-y

- [76] KALIANKO, František. *Návrh slitiny vhodné pro skladování vodíku v pevné fázi a optimalizace parametrů výroby*. B.m., 2024. b.n.
- [77] *density of oxygen - Wolfram|Alpha* [online]. [vid. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.wolframalpha.com/input?i=density+of+oxygen>
- [78] KRÁLOVÁ, Magda. *Kapalnění plynů | Eduportál Techmania* [online]. 2007 [vid. 2024-05-13]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/skupenstvi/kapalneni-plynu>
- [79] *Popis lokality – hranickapropast.cz* [online]. [vid. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://hranicapropast.cz/popis-lokality/>
- [80] *Hranická propast odkryla další tajemství. Podle vědců může mít hloubku i 40 km - Seznam Zprávy* [online]. [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/fakta-vyjimecna-hranicka-propast-uhadnete-jeji-hloubku-210785>
- [81] *JESO AOPK ČR* [online]. [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://jeso.nature.cz/?jeso=17374>
- [82] VYSOKÁ, H., J. BRUTHANS, L. FALTEISEK, K. ŽÁK, L. RUKAVIČKOVÁ, J. HOLEČEK, J. SCHWEIGSTILLOVÁ a H. OSTER. Hydrogeology of the deepest underwater cave in the world: Hranice Abyss, Czechia. *Hydrogeology Journal* [online]. 2019, **27**(7), 2325–2345. ISSN 14350157. Dostupné z: doi:10.1007/s10040-019-01999-w
- [83] *Strany potápěčské - Hranická propast, -170 m* [online]. [vid. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.stranypotapecske.cz/potapeni/hp170.asp>
- [84] KLANICA, Radek, Jaroslav KADLEC, Petr TÁBORÍK, Jan MRLINA, Jan VALENTA, Světlana KOVÁČIKOVÁ a Graham J. HILL. Hypogenic Versus Epigenic Origin of Deep Underwater Caves Illustrated by the Hranice Abyss (Czech Republic)—The World’s Deepest Freshwater Cave. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* [online]. 2020, **125**(9). ISSN 21699011. Dostupné z: doi:10.1029/2020JF005663
- [85] ROMANOWSKI, Daniel, Tomáš JAKUŠ, Jan GAVRLÍK, Jiří ŠEDA a Viktor CEJNEK. *Konzultace se studentským týmem strojLAB*. 30. duben 2024
- [86] *800W Fuel Cell Power Module* [online]. 2018. Dostupné z: www.intelligent-energy.com
- [87] *Horizon 1000W PEM Fuel Cell* | [online]. [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.fuelcellearth.com/fuel-cell-products/horizon-1000w-pem-fuel-cell/>
- [88] *850W Water Cooled PEM Fuel Cell System* [online]. [vid. 2024-05-23]. Dostupné z: <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/850w-water-cooled-pem-fuel-cell-system-6035000>
- [89] Konzultace s Ing. Václavem Miklasem. In: . B.m. 15. květen 2024.
- [90] *DC-DC konvertor 48/24 V DC a 12/24 V DC - OEM Automatic, spol. s r. o.* [online]. [vid. 2024-05-25]. Dostupné z: https://www.oemautomatic.cz/produkty/elektricke-rozvadecce/napajeci-zdroje-a-redundantni-moduly/dc-dc-konvertory-_607728/dc-dc-konvertor-48-24-v-dc-a-12-24-v-dc-_62180
- [91] Materiál tlakových nádob ČSN 15 423. 1978.
- [92] Netopené tlakové nádoby - norma ČSN EN 13 445-3. 2021.
- [93] *Konstanty van der Waalsovy rovnice* [online]. [vid. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/tab/waals.html>
- [94] *Hustota materiálů a látek - Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [vid. 2024-05-25]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hustota-materialu-a-latek>
- [95] *Statista - The Statistics Portal for Market Data, Market Research and Market Studies* [online]. [vid. 2024-05-21]. Dostupné z: <https://www.statista.com/>

Seznam použitých obrázků

Obr. 2-1 Koncepty i zkonstruovaná řešení UUV s palivovými články v čase [21]	14
Obr. 3-1 Model atomu a molekuly vodíku.....	17
Obr. 3-2 Emise skleníkových plynů v EU podle sektorů za rok 2021 [96]	20
Obr. 3-3 Množství nainstalovaných PČ celosvětově z hlediska kapacit podle sektorů využití (2019) [95]	22
Obr. 3-4 Možnosti výroby, distribuce a využití vodíku [98] (upraveno)	24
Obr. 4-1 Palivový článek s polymerní membránou [99] (upraveno)	28
Obr. 4-2 Alkalický palivový článek [67] (upraveno).....	29
Obr. 4-3 Palivový článek s přímým zpracováním metanolu [67] (upraveno)	30
Obr. 4-4 Palivový článek s elektrolytem na bázi pevných oxidů [67] (upraveno)	32
Obr. 4-5 Palivový článek s elektrolytem na bázi tekutých uhličitánů [67] (upraveno)	33
Obr. 4-6 Palivový článek na bázi kyseliny fosforečné [67] (upraveno)	34
Obr. 4-7 Množství nainstalovaných PČ celosvětově podle typu v MW (2019) [64].....	35
Obr. 5-1 Řez Hranickou propastí a seznam všech hloubkových rekordů [80] (upraveno)	43
Obr. 5-2 Grafické zobrazení průběhů teplot v propasti v závislosti na hloubce a měsíci (do 180 m) [100] (upraveno)	44
Obr. 5-3 Srovnání Hranické propasti se známými výškovými budovami [101]	46
Obr. 5-4 3D model Hranické propasti [86].....	46
Obr. 5-5 Prvotní koncept průzkumné sondy Argo [86]	47
Obr. 5-6 Prvotní koncept lopatek "Rim-Thrusteru" [86]	48
Obr. 5-7 Dekomponovaný model Arga (III. koncept) [86].....	50
Obr. 5-8 Zjednodušené schéma celého systému napájení PEMFC navrženého pro Argo [28] (upraveno dle [69])	53
Obr. 5-9 Zobrazení polohy vertikálních řezů na modelu Arga pro zobrazení rozmístění nádrží ...	65
Obr. 5-10 Zobrazení rozmístění nádrží v Argu v řezech	65

Seznam použitých tabulek

Tab. 2-1 Podvodní UUV s palivovými články (PEMFC) [21].....	14
Tab. 3-1 Základní vlastnosti vodíku [41]	18
Tab. 3-2 Srovnání spalných tepel podle druhů paliv.....	23
Tab. 4-1 Srovnání jednotlivých typů palivových článků podle parametrů [17]	36
Tab. 4-2 Srovnání jednotlivých typů palivových článků podle použití [26]	37
Tab. 4-3 Množství energie uložené v jednotlivých formách skladování vodíku [7]	40
Tab. 4-4 Množství energie v jednotlivých formách skladování kyslíku [7]	41
Tab. 5-1 Základní parametry Hranické propasti [82]	42
Tab. 5-2 Navržené parametry sondy [86].....	48
Tab. 5-3 Seznam základních spotřebičů a jejich příkon [86].....	49
Tab. 5-4 Výsledky citlivostní studie pro součinitel bezpečnosti pro tlakové nádoby s H ₂	60
Tab. 5-5 Výsledky citlivostní studie pro součinitel bezpečnosti pro tlakovou nádobu s O ₂	60
Tab. 5-6 Parametry tlakových nádob s H ₂	64
Tab. 5-7 Parametry tlakové nádoby s O ₂	64
Tab. 5-8 Rozložení hmotnosti v jednotlivých polovinách Arga na začátku a konci mise (bez nádrže Voda 1)	67
Tab. 5-9 Rozložení hmotnosti v jednotlivých polovinách Arga na začátku a konci mise (s nádrží Voda 1 a vyrovnávacím balastem)	68
Tab. 5-10 Výběr navržených parametrů pro Argo s PEMFC	68