



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

GRAVITAČNÍ ULOŽIŠTĚ ENERGIE

GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Militký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Ondřej Militký
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Gravitační uložení energie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku akumulace elektrické energie s využitím mechanických uložení energie. Zpracován bude přehled možných principů funkce mechanické akumulace energie a uvedeny budou dohledatelné realizace mechanických uložení. Pro zadané parametry bude realizován vlastní návrh mechanického gravitačního uložení energie a provedeno související technicko–ekonomické zhodnocení jeho provozu.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat přehled možností akumulace elektrické energie z nestabilních zdrojů.
2. Porovnat dohledatelné přístupy k řešení gravitačních uložení energie.
3. V zmenšeném měřítku realizovat konstrukční návrh zařízení pro ověření funkce gravitačního uložení, včetně jeho výroby a ověření účinnosti akumulace.
4. Pro zadané parametry zpracovat vlastní návrh gravitačního uložení se zaměřením na zhodnocení energetických bilancí a očekávaných ekonomických parametrů.

Seznam doporučené literatury:

CHARVÁTOVÁ, Marie. Akumulace energie z obnovitelných zdrojů. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016, 55 stran.

HANUS, Vlastimil. Akumulace elektrické energie = Electricity accumulation. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2008,

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

V této práci jsou charakterizovány nejrozšířenější systémy pro ukládání elektrické energie včetně principů, fází vývoje a významných instalací. Práce je zaměřena především na problematiku gravitačních úložišť elektrické energie. Popsány jsou zde konstrukce jednotlivých typů úložišť, fáze, ve kterých se jednotlivé projekty v současné době nacházejí a jejich předpokládaný vývoj. Součástí práce je návrh modelu gravitačního úložiště znázorňující princip funkce a ověření možnosti výroby malého úložiště energie v domácích podmínkách. Dále jsou posouzeny energetické a ekonomické možnosti instalace domácího gravitačního úložiště energie a gravitačního úložiště v průmyslovém měřítku.

Klíčová slova

Úložiště energie, gravitační úložiště energie, návrh gravitačního úložiště, elektrochemická úložiště, elektrická a elektromagnetická úložiště, chemická úložiště, tepelná úložiště, mechanická úložiště

Abstract

This thesis characterizes the most common systems for storing electricity, including principles, stages of development and major installations. The thesis is mainly focused on the issue of gravity storage of electricity. The construction of individual types of storages, the phases in which individual projects are right now and their expected development are described here. Part of the thesis is the design of a gravity storage model showing the principle of operation and verification of the possibility of producing a small energy storage in home conditions. Furthermore, the energy and economic possibilities of installing a home gravity storage of energy and a gravity storage on an industrial scale are assessed.

Key words

Energy storage, gravity storage, gravity storage design, electrochemical storage, electrical and electromagnetic storage, chemical storage, thermal storage, mechanical storage

Bibliografická citace:

MILITKÝ, Ondřej. *Gravitační uložičte energie* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140386>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně.
Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem ve své práci neporušil autorská práva (ve smyslu Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

V Brně dne 20. května 2022

.....
podpis autora

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za odbornou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování mé práce.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Úložiště energie.....	2
2.1	Elektrochemická úložiště.....	2
2.1.1	Princip.....	2
2.1.2	Olověné baterie.....	3
2.1.3	Sodíkovo-sírový akumulátor	7
2.1.4	Průtokové baterie.....	9
2.2	Elektrická a elektromagnetická úložiště	11
2.2.1	Kondenzátorová úložiště	11
2.2.2	Supravodivá magnetická úložiště	13
2.3	Chemická úložiště.....	14
2.3.1	Vodík	14
2.3.2	Doprava a skladování vodíku	18
2.3.3	Metanizace.....	20
2.3.4	Zpětná výroba elektřiny.....	22
2.3.5	Systemy power to gas	24
2.4	Tepelná úložiště	25
2.4.1	Princip.....	25
2.4.2	Úložiště využívající citelné teplo	26
2.4.3	Úložiště využívající latentní teplo	29
2.4.4	Termochemická úložiště.....	29
2.4.5	Významná tepelná úložiště.....	30
2.5	Mechanická úložiště	31
2.5.1	Gravitační úložiště.....	31
2.5.2	Přečerpávací vodní elektrárny (PVE).....	32
2.5.3	Úložiště stlačeného vzduchu (CAES)	37
2.5.4	Setrvačníky (FES)	39
2.6	Srovnání	43
2.6.1	Malé úložné systémy	47
2.6.2	Průmyslové úložné systémy	48

3	Gravitační úložiště energie	50
3.1	Gravity Power Module.....	51
3.1.1	Koncept.....	51
3.1.2	Ekonomika.....	52
3.1.3	Demonstrační model.....	54
3.2	Gravity storage.....	54
3.2.1	Koncept.....	54
3.2.2	Konstrukce.....	56
3.2.3	Ekonomika.....	57
3.3	Ares.....	57
3.3.1	Gravityline.....	57
3.3.2	Demonstrační projekty	58
3.4	Gravitricity.....	60
3.4.1	Koncept.....	60
3.4.2	Demonstrační projekty	61
3.5	Energy vault.....	63
3.5.1	Koncept.....	63
3.5.2	Demonstrační projekt	65
3.5.3	Závaží	65
3.6	Srovnání	66
4	Model úložiště	68
4.1	Zadání	68
4.2	Závaží.....	68
4.3	Kladkostroj.....	69
4.4	Buben.....	71
4.5	Motor	72
4.6	Převodovka	73
4.6.1	Převodový poměr.....	74
4.6.2	Čelní soukolí.....	75
4.6.3	Řemen.....	76
4.6.4	Brzda.....	76
4.6.5	Výkonová bilance	78
4.7	Řízení.....	79

4.8	Měření a stanovení účinnosti	80
4.8.1	Účinnost kladkostroje	81
4.8.2	Účinnost převodovky.....	81
4.8.3	Účinnost motoru	81
4.8.4	Určení účinnosti pomocí wattmetru	83
5	Domácí úložná jednotka	86
5.1	Podzemní konstrukce	86
5.2	Nadzemní úložiště.....	87
5.3	Srovnání	88
6	Průmyslová úložiště	89
6.1	Úložiště obsahující jedno závaží.....	90
6.2	Úložiště obsahující více závaží.....	91
6.3	System využívající bočních chodeb.....	92
7	Závěr	95
	Seznam použitých zdrojů.....	97
	Seznam zkratk.....	106
	Seznam použitých symbolů	106
	Seznam příloh	108

1 Úvod

Elektrickou energii není v současnosti možné efektivně skladovat po delší období. Musí tak být vyráběna v čase, kdy se uskutečňuje její spotřeba. Rychlou reakci na nárůst spotřebitelské poptávky zajišťují především plynové a vodní elektrárny. S rozvojem obnovitelných zdrojů energie a vzhledem k negativním dopadům provozu fosilních zdrojů na životní prostředí se od nich pozvolna ustupuje. Obnovitelné zdroje jsou však zcela závislé na povětrnostních podmínkách a na denním cyklu. Proto je nutné vyvíjet způsoby, jak uchovávat elektrickou energii generovanou bezemisními zdroji pro využití v době její poptávky. Bez těchto systémů není v podstatě možné energetiku založenou na obnovitelných zdrojích vybudovat. Zároveň mohou sekundovat i jaderným elektrárnám, u kterých se jen obtížně reguluje jejich výkon.

V této práci jsou charakterizovány nejrozšířenější systémy pro ukládání elektrické energie včetně principů, fází vývoje a významných instalací. Dále jsou zde zmíněny systémy zabývající se gravitačním skladováním energie. Popsány jsou konstrukce jednotlivých úložišť, fáze, ve kterých se jednotlivé projekty v současné době nacházejí a jejich předpokládaný vývoj.

V další části práce je navržen model gravitačního úložiště znázorňující princip, na kterém zmíněná úložiště fungují a zároveň je ověřena možnost výroby malého úložiště energie v domácích podmínkách. Je zde detailně popsána výroba všech částí, provedena měření spotřeby a dodávky energie a vyhodnocena celková účinnost.

V posledních dvou kapitolách jsou posouzeny energetické a ekonomické možnosti instalace domácího gravitačního úložiště energie a gravitačního úložiště v průmyslovém měřítku. Následně jsou popsány jednotlivé typy konstrukcí, jejich výhody, omezení a možnosti případné realizace.

2 Úložiště energie

V této kapitole jsou popsány nejpoužívanější typy úložišť včetně jejich principu, fáze vývoje a významných instalací. Jednotlivé technologie ukládání energie se značně odlišují svou konstrukcí, principem funkce a vhodným použitím. Každé řešení má své přednosti a omezení. Srovnání všech uvedených typů úložišť je zařazeno na konci kapitoly.

2.1 Elektrochemická úložiště

Elektrochemická úložiště umožňují akumulaci poměrně velkého množství elektrické energie v malém objemu, díky čemuž nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích od napájení přenosné elektroniky až po velká energetická úložiště. Vzhledem k rychlému vývoji a klesajícím cenám jejich produkce jsou stále častěji využívány v oblastech dopravy a energetiky. Tyto typy úložišť představují možnost skladování energie v místech, kde jiné způsoby nejsou možné. Například přečerpávací vodní elektrárny vyžadují značný prostor, vodní zdroj a specifickou geografii, zatímco skladování energie prostřednictvím stlačeného vzduchu vyžaduje určitý typ geologických prvků, jako jsou solné jeskyně [1].

V energetice jsou chemická úložiště často využívána jako doplněk k fotovoltaickým elektrárnám pro ukládání nadbytečné energie. Úložiště je možné nabíjet i z distribuční sítě v době nejnižší poptávky a energii později využít nebo poslat zpět v době zvýšené poptávky [1].

Dále je možné využít bateriové úložiště jako zdroj o vysokém výkonu, kdy může krátkodobě poskytovat vyšší výkon, než jaký je možné z distribuční sítě odebírat [1].

2.1.1 Princip

Elektrochemická úložiště využívají k akumulaci energie vratných chemických reakcí. Základem je galvanický článek, jenž se skládá z kladné a záporné elektrody, které jsou obklopeny elektrolytem. Elektrolyt je tuhý nebo kapalný roztok dobře vedoucí elektrický proud. Elektrické napětí je určeno rozdílem potenciálů obou elektrod. Elektrický potenciál vzniká reakcí mezi elektrodou a elektrolytem. Po zapojení článku do obvodu probíhají chemické reakce, kterými se postupně snižuje elektrická energie v článku uložená. Znovu nabití článku je možné přiložením elektrod na zdroj s vyšším potenciálem. Elektrický proud poteče v obráceném směru a bude docházet k vratným chemickým reakcím [1], [2].

Pro elektrody a elektrolyty se volí takové kombinace materiálů, aby potenciál vznikající na elektrodách měl dostatečnou velikost a zároveň dostatečnou kapacitu či trvanlivost. Pro anodu se obvykle používá lithium, kadmium, zinek či olovo. Pro katodu se používají oxidy kovů, například manganu, olova či niklu. Jako elektrolyt se používají vodné roztoky alkalických hydroxidů, silných kyselin nebo jejich solí. Při vybití koncentrace elektrolytu klesá [1], [2].

Velikost napětí jednotlivých článků se pohybuje v rozmezí od 1,2 V do 3,7 V v závislosti na použitých materiálech. Zvýšení napětí lze docílit řazením článků do série. Řazením článků paralelně lze dosáhnout zvýšení kapacity uložené energie a vybíjecího proudu, tedy maximálního výkonu úložiště. Pro stavbu větších úložišť se nejvíce hodí olověné a lithiové články nebo průtočné baterie [1], [2].

Tab. 1 Srovnání elektrochemických úložišť [2]

Typ	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Počet cyklů [-]	Náklady [Kč/kWh]
Průtočná	35	15 - 25	> 10 000	6 000 - 9 000
Pb	40	70	500 - 700	1 500 - 2 500
Li-Ion	300	700	1 000	3 000
NaS	170	150	4 500	8 000

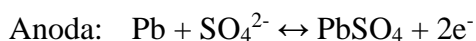
2.1.2 Olověné baterie

Olověnou baterii sestavil Francouzský fyzik Gaston Planté roku 1859. Jedná se o první typ baterie, kterou je možné znovu nabít. Díky možnosti dodávat velké proudy se ujala hlavně ve startérech spalovacích motorů. Později se díky nízkým výrobním nákladům a zvýšení kapacity začaly olověné akumulátory využívat jako záložní zdroje pro případ výpadku dodávky elektrické energie například pro telefonní vysílače, nemocnice nebo ostrovní systémy. Nyní se tyto akumulátory běžně využívají v menších ostrovních systémech v kombinaci se solárními panely pro provoz rekreačních objektů nebo odlehlých stanic a zařízení. [3]

Hlavními výhodami jsou nízké pořizovací náklady. V závislosti na typu konstrukce se pohybují od 1 500 do 2 500 korun na 1 kWh. Další přednosti jsou bezpečnost, odolnost a vysoká účinnost. Mezi nevýhody se řadí nízká hustota uložené energie, vyšší hmotnost a možné negativní dopady olova na životní prostředí [4].

Průběh reakce

Anoda je tvořena porézním olovem (Pb), katoda oxidem olova (PbO₂). Elektrolytem je vodou ředěná kyselina sírová (H₂SO₄) v koncentraci asi 35%. Vybíjením vzniká síran olovnatý (PbSO₄). Elektrolyt je ochuzován o kyselinu sírovou a obohacován o vodu. Svorkové napětí článku činí 2 V. V jednotlivých pouzdrech je obvykle řazeno více článků v sériovém zapojení. Vznikají tak moduly o napětí 6 V, 12 V, 24 V nebo 48 V. Průběhy reakcí jsou popsány v následujících rovnicích: [3], [5]

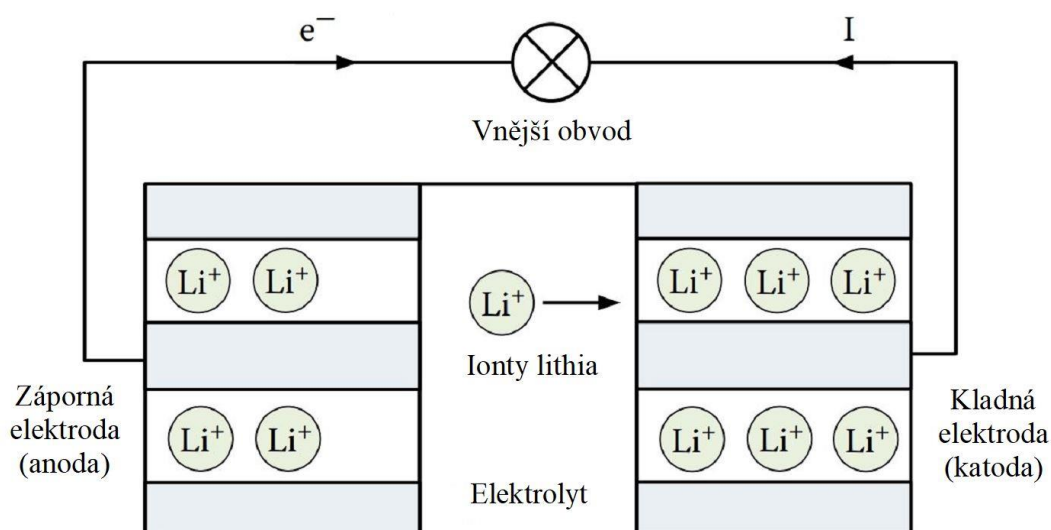
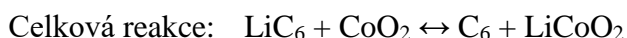
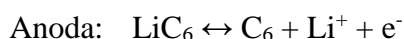


Lithiové akumulátory

Akumulátory obsahující lithium jsou komerčně využívány od počátku 90. let 20. století. Díky své nízké hmotnosti a relativně vysoké hustotě energie nacházejí uplatnění zejména v oblasti přenosné elektroniky, dopravy a v menších domácích úložiscích energie. Jednotlivé články je možné vyrábět v různých tvarech a velikostech tak, aby to umožňovalo maximálně využít prostor napájeného zařízení [6].

Lithium-iontový akumulátor (Li-ion)

V lithium-iontovém akumulátoru dochází během vybíjení k přesunu iontů lithia ze záporné elektrody skrze elektrolyt ke kladné elektrodě. Elektrony prochází elektrickým obvodem. Při nabíjení probíhá proces v obráceném pořadí. Záporná elektroda je ve většině případů tvořena tenkou vrstvou uhlíku, do které jsou vloženy atomy lithia LiC_6 . Kladnou elektrodu tvoří LiCoO_2 , lithium-železo-fosfát nebo oxid-lithium-mangan. Elektrolytem je lithiová sůl v organickém rozpouštědle většinou LiPF_6 . Elektrody jsou odděleny separátorem, který umožňuje přestup pouze iontům lithia. V současné době také probíhají výzkumy využití grafenu jakožto vhodného materiálu pro výrobu elektrod. Chemické reakce jsou popsány v následujících rovnicích: [2], [7]



Obr. 1 Princip lithium-iontového článku [1]

Napětí lithiového článku je asi 3,7 V. Během nabíjení a vybíjení může napětí kolísat v rozmezí 3 až 4,2 V. Při překročení doporučené hodnoty napětí, proudu či teploty může dojít k poškození článku nebo i jeho vznícení. Z těchto důvodů se jednotlivé články či baterie osazují řídicími obvody, které je v případě potřeby odpojí [7].

Lithium vysoce reaguje s vodou. Vzniká hydroxid lithia a plynný vodík. Elektrolyt proto nesmí obsahovat vodu. Jednotlivé články jsou utěsněny, aby se zamezilo vnikání vlhkosti. Materiály kladných elektrod obsahují chemicky vázaný kyslík a podporují hoření. Záporné elektrody jsou hořlavé a v přítomnosti kyslíku se mohou samovznítit. Samotný elektrolyt je také vysoce hořlavý. Při mechanickém poškození článku, přehřátí, zkratu či přebití může dojít ke vznícení a šíření ohně na další články. Lithiové baterie je proto velice těžké uhasit [2].

Lithium-polymerový akumulátor (Li-pol)

Tento typ konstrukčně vychází z Lithium-iontového akumulátoru. Místo tekutého elektrolytu je zde použit polymerový gel. Hlavní výhodou je vyšší hustota energie až 265 Wh/kg. Využívá se proto zejména v případech, kde je vyžadována co nejmenší hmotnost, jako jsou například mobilní telefony, rádiem řízená letadla, drony, přenosné startéry, ale i některá elektrická vozidla. Hlavní nevýhodou představují vyšší výrobní náklady. V případě přebití také dochází k odpařování elektrolytu a nafukování pouzdra akumulátoru [1], [7].

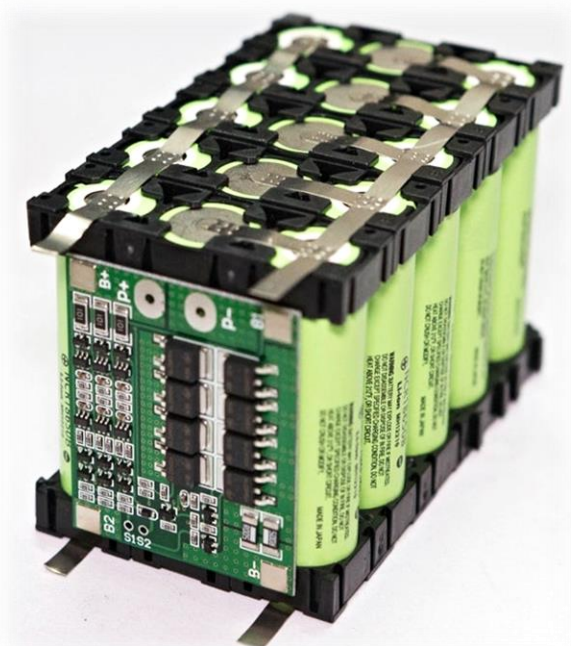
Lithium-železo-fosfátový akumulátor (LFP)

Jedná se o lithium-iontový akumulátor. Jako katodový materiál je použit lithium železo fosfát LiFePO_4 . Mezi zásadní výhody patří odolnost proti mechanickému a tepelnému poškození a dlouhá cyklická životnost. Fe-P-O vazba je silnější než Co-O. V případě zkratů či přehřátí je výrazně těžší odstranit kyslíkové atomy. Baterie neobsahují vzácný kobalt, tudíž jsou levnější. Nevýhodou může představovat nižší hustota uložené energie v porovnání s akumulátory obsahující elektrody z LiCoO_2 [1], [7].

Jmenovité napětí jednoho článku je 3,2 V. Při zapojení čtyř článků sériově dosáhne napětí 12,8 V. Spolu s dobrými bezpečnostními vlastnostmi mohou být výhledově náhradou za olověné akumulátory. V bateriích pro pohon elektrických vozidel stále převládají články obsahující kobalt. Jsou lehčí a mají vyšší hustotu energie, tudíž nabízejí i vyšší dojezd. Díky jejich bezpečnosti a vyšším nabíjecím i vybíjecím proudům probíhají snahy o implementaci těchto článků do nových typů elektromobilů [1], [7].

Úložiště energie

Lithiová úložiště představují v současné době nejvhodnější technologii pro ukládání energie z hlediska poměru cena/výkon. Jednotlivé moduly se skládají ze vzájemně propojených článků nejčastěji typu 18650. Moduly je možné vzájemně spojovat a dosáhnout tak požadovaných kapacit a výkonů. Díky jejich masové produkci došlo v posledních letech ke značnému snížení výrobních nákladů [8].



Obr. 2 Baterie lithiových článků s řídicí elektronikou [9]

Pro domácí použití jsou v prodeji jednotky o kapacitách do 100 kWh. Výhodou proti olověným bateriím představuje jejich kompaktnost, vycházející z větší hustoty uložené energie lithiových článků. Zástupcem v tomto segmentu je například Tesla Powerwall. Zmíněné úložiště je možné přidělat na stěnu či strop. Kapacita jednotky je 13,5 kWh a nominální výkon 5 kW. Pro zvýšení výkonu či kapacity je možné instalovat více úložišť. Zařízení se často používají v kombinaci se solárními panely nebo pro akumulaci levnější noční energie a její využití během dne [8].

Kapacity větších průmyslových úložišť mohou dosahovat až několika gigawatthodin a výkonu stovek megawatt. Jejich úlohou je stabilizovat energetické výkyvy v rozvodné síti způsobené proměnlivou dodávkou energie z obnovitelných zdrojů a špičkovými odběry během dne. Aktuálně je největším realizovaným úložištěm Moss Landing v Kalifornii. Disponuje kapacitou 1,6 GWh a maximálním výkonem 400 MW. V budoucnu má dojít k rozšíření úložiště na kapacitu 3 GWh [2].

Tab. 2 Významná úložiště využívající lithiových akumulátorů [10]

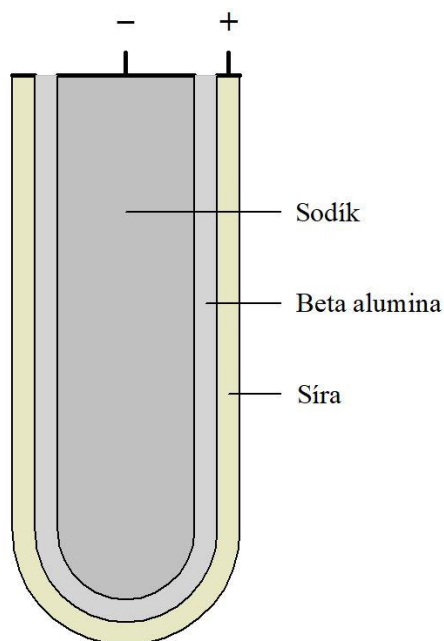
Název	Země	Spuštěno	Kapacita [MWh]	Výkon [MW]
Moss Landing	USA	2021	1 600	400
Manatee Storage	USA	2021	900	400
Victorian Battery	Australia	2021	450	300
Alamitos Center	USA	2021	400	100
Saticoy BESS	USA	2021	400	100

V České republice se nachází několik podstatně menších bateriových úložišť. Tím největším z nich je Siemens Energy Storage v areálu energetické skupiny C-Energy v Plané nad Lužnicí, jež má kapacitu 2,5 MWh a výkon 4 MW. Zařízení je umístěno ve třech kontejnerech a obsahuje samotné lithium iontové články, řídicí systémy, rozvaděče, střídače, transformátory a pomocné systémy. Společnost úložiště využívá především k zajištění spolehlivých dodávek elektřiny ve vlastním areálu v rámci dodávek do lokální distribuční soustavy. Součástí soustavy jsou také dva uhelné kotle, jeden plynový kotel, šest aeroderivátů a fotovoltaická elektrárna s výkonem 500 kW [11], [12].

2.1.3 Sodíkovo-sírový akumulátor

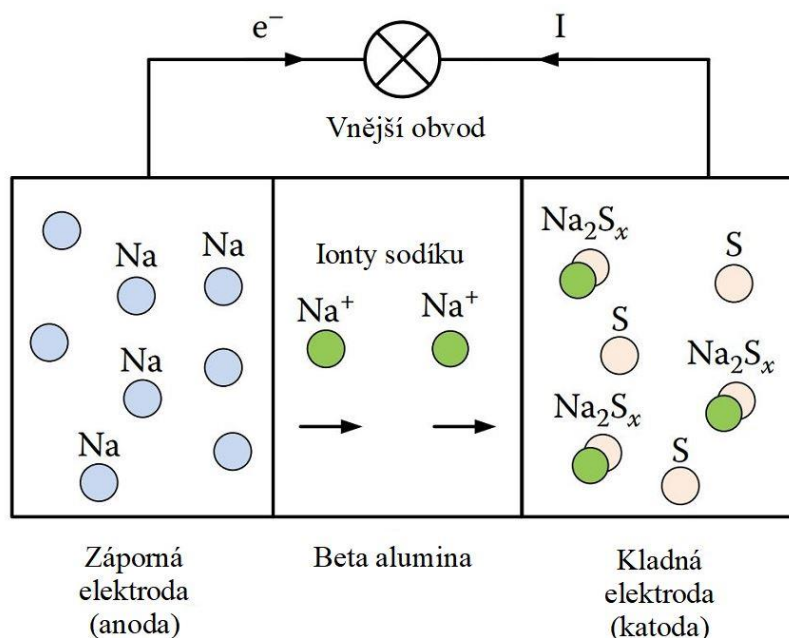
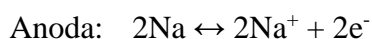
Sodíkovo-sírové akumulátory vynikají vysokou hustotou uložené energie, pohybující se okolo 170 Wh/kg, dále pak vysokou účinností, dlouhou cyklickou životností a nízkými výrobními náklady. Články jsou však provozovány za vysokých teplot přesahujících 300 °C, kvůli použití roztaveného sodíku a síry, což omezuje jejich využití pouze na stacionární aplikace. S rostoucí velikostí se buňka stává ekonomičtější. Články se ochlazují pomaleji, což umožňuje snáze udržovat provozní teploty. Po započetí reakce již není nutné teplo dodávat. Svou teplotu si díky probíhající reakci udrží. Samotný sodík je vysoce reaktivní s vodou, proto je třeba články chránit proti vniku vlhkosti [1], [2].

Elektrolyt je tvořen pevnou strukturou beta alumina. Tento materiál umožňuje velmi rychlý přechod iontů sodíku a zároveň je málo elektricky vodivý, což omezuje samovybíjení. Vnější plášť je tvořen sírou, která je absorbována v uhlíkové houbě. Během vybíjení se sodíkové ionty přesunují ze sodíku v záporné elektrodě, procházejí elektrolytem a spojují se se sírou v kladné elektrodě. Elektrony proudí přes vnější obvod. Nominální napětí činí 2 V. Článek má obvykle tvar válce a je uzavřen v ocelovém plášti s povrchovou úpravou proti korozi. Ten tvoří kladnou elektrodu. V komerčních aplikacích jsou články uspořádány do bloků a uzavřeny ve vakuově izolované skříni [1], [2].



Obr. 3 Sodíkovo-sírový článek [1]

Průběhy chemických reakcí jsou popsány v následujících rovnicích [2]



Obr. 4 Princip sodíkovo-sírového článku [1]

Úložiště energie

Sodíkovo-sírové akumulátory mají v oblasti energetických úložišť obdobné využití jako lithium-iontové akumulátory. Jsou vhodné pro stabilizaci výkyvů v rozvodné síti a akumulaci energie z obnovitelných zdrojů. Lithium iontové akumulátory jsou v současné době používanější. Díky pokročilejšímu stupni vývoje a výrobního procesu nabízejí lepší poměr cena/výkon. I když jsou materiály na výrobu sodíkovo-sírového úložiště levné a dostupné, výroba je náročná. Konstrukce musí být pevná a kvalitní především kvůli přítomnosti velmi reaktivního sodíku. Ceny lithia a kobaltu jsou ale v současné době na vzestupu a sodíkovo-sírové akumulátory by tak mohly představovat vhodnou alternativu. Hlavní výhodou představuje až pětinasobně delší životnost oproti lithium-iontovým akumulátorům a možnost vybíjet je pravidelně na minimální kapacitu bez poškození [13].

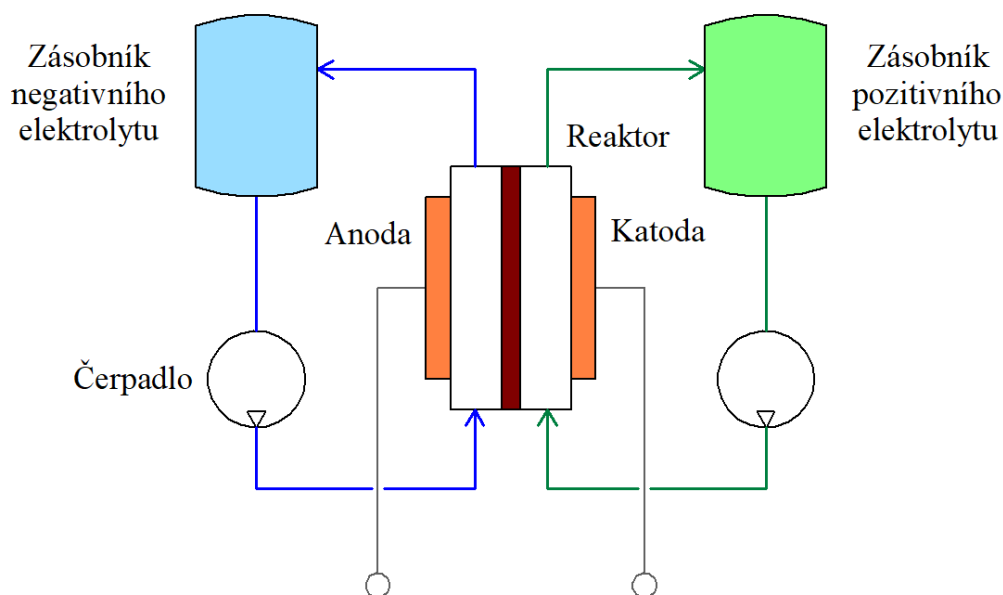
Největší úložiště se nachází ve Spojených arabských emirátech. Systém 15 vzájemně propojených kontejnerových úložišť zajišťuje výkonovou rovnováhu v hlavním městě Abú Dhabí. Celková kapacita činí 648 MWh a maximální výkon 100 MW. Kvůli vysokým teplotám v oblasti je použití lithiového úložiště nevhodné, avšak pro tato úložiště jsou vyšší teploty žádoucí. Systém umožňuje zajistit stabilitu elektrizační sítě a omezuje potřebu využití naftových generátorů, které výkonové špičky obvykle pokrývají [14].

Tab. 3 Významná úložiště využívající sodíkovo-sírové akumulátory [10]

Název	Země	Spuštěno	Kapacita [MWh]	Výkon [MW]
Abú Dhabí	UAE	2019	648	100
Buzen Substation	Japonsko	2016	300	50
Rokkasho Develop.	Japonsko	2008	245	34

2.1.4 Průtokové baterie

Průtoková baterie je konstrukcí velmi podobná konvenčním bateriím. Obsahuje kladnou a zápornou elektrodu. Rozdíl je u elektrolytu, který se dělí na negativní a pozitivní. Každý je umístěn v samostatné nádrži. Takové uspořádání přináší řadu výhod. Elektrolyt nedegraduje a baterii je možné provozovat po velký počet nabíjecích cyklů. Zároveň může zůstat po delší dobu ve zcela vybitém stavu. Odhadovaná životnost je 30 až 50 let s počtem cyklů v řádech desítek tisíc. Konstrukce úložiště je snadná stejně jako jeho případné modifikace či opravy. Elektrolyt je čerpán z nádrže do reaktoru, kde probíhá přes iontoměničovou membránu chemická reakce. Velikost reaktoru určuje maximální výkon úložiště a objem elektrolytu jeho kapacitu [15], [16].

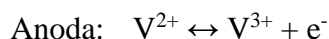


Obr. 5 Princip průtočné baterie [1]

Největší nevýhodou je nízká hustota uložené energie 15 až 25 kWh/m³. Problém představuje i skladování a čerpání elektrolytu. Uvedené provedení také znemožňuje použití v mobilních aplikacích, například v dopravě. Nejrozšířenějším typem jsou vanadium redoxní baterie [2].

Průběh reakce

Elektrody tvoří uhlík nebo uhlíková tkanina. Pozitivní elektrolyt obsahuje ionty VO_2^+ a VO^{2+} , zatímco negativní elektrolyt se skládá z iontů V^{2+} a V^{3+} . Při nabíjení se ionty VO^{2+} v kladné polovině článku přeměňují na ionty VO_2^+ a elektrony jsou odváděny. Obdobně jsou do záporné poloviny článku elektrony přiváděny a převádějí ionty V^{3+} na V^{2+} . Při vybíjení se chemická reakce odehrává v opačném směru. Protony prostupují membránou, zatímco elektrony procházejí elektrickým obvodem. Svorkové napětí článku je 1,4 V. Účinnost ukládání energie se pohybuje okolo 65 až 75% [2].



Realizovaná úložiště

Ve světě bylo vystavěno několik úložišť, jejichž hlavní úlohou je pokrytí spotřeby elektrické energie během špičkových odběrů. Tím největším se stane právě budované čínské Dalian Battery. Skládá se z deseti jednotek o celkovém výkonu 200 MW a kapacitě 800 MWh [17].

Tab. 4 Významná úložiště využívající průtokové baterie [17]

Název	Země	Spuštěno	Kapacita [MWh]	Výkon [MW]
Dalian Battery	Čína	ve výstavbě	800	200
Minami Hayakita	Japonsko	2015	60	15
Pfinztal	Německo	2019	20	2
Woniushi	Čína	---	10	5
SnoPUD MESA 2	USA	2017	8	2

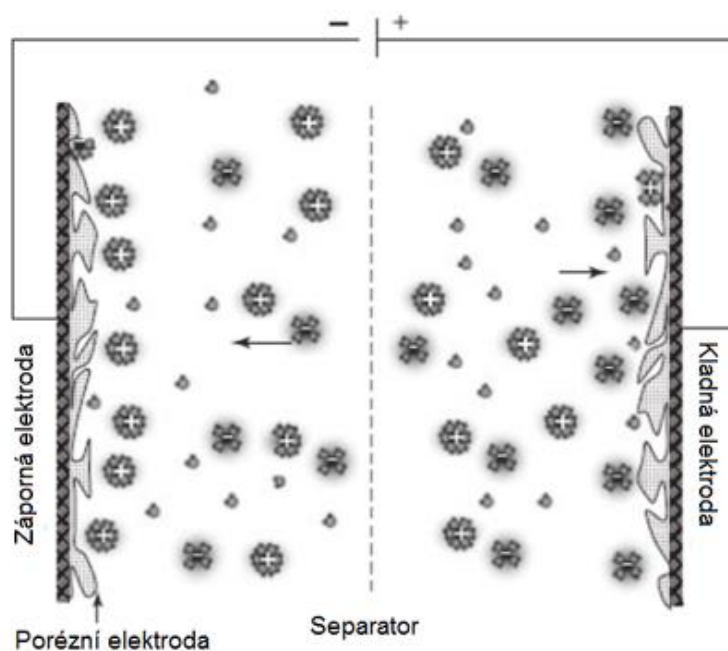
Kromě velkých úložišť jsou k dispozici i menší modulová úložiště velikosti přepravního kontejneru. Toto řešení je vhodné pro průmyslové objekty a areály, provozující solární či větrné elektrárny. V České republice se obdobné úložiště nachází například v Jihočeském technologickém parku a disponuje kapacitou 130 kWh [16].

2.2 Elektrická a elektromagnetická úložiště

Tyto systémy umožňují přímé ukládání elektrické energie bez nutnosti její transformace na jiný typ energie, například chemické nebo potenciální. Výhodou je vysoká účinnost ukládání energie a schopnost okamžitě dodávat vysoké výkony. Technologie potřebné pro realizaci úložišť ve větším měřítku jsou však stále předmětem vývoje.

2.2.1 Kondenzátorová úložiště

Existuje mnoho typů kondenzátorů, které se liší použitými materiály a svými vlastnostmi. Pro ukládání většího množství energie jsou nejvhodnější superkondenzátory. Ty obsahují dvě elektrody s velkou plošnou hustotou, která se pohybuje od 1 000 do 10 000 m² g⁻¹. Materiálem je uhlík nanesený na hliníkové fólii. Výhledově může být použit i grafén. Elektrody jsou odděleny polypropylenovou fólií. Zbývající prostor je vyplněn elektrolytem. Ionty obsažené v elektrolytu se během nabíjení přesouvají k elektrodám, kladné ionty se vážou na povrch záporné elektrody a záporné ionty na povrch kladné. Při vybíjení se navázané ionty přesouvají zpět do elektrolytu [1], [5].



Obr. 6 Princip superkondenzátoru [18]

Obecný vzorec pro výpočet kapacity kondenzátoru C je následující

$$C = \varepsilon \frac{S}{l}. \quad (1)$$

Kapacita je tedy výrazně závislá na ploše elektrod S a nepřímo úměrná šířce dielektrika l . Od jiných typů kondenzátorů se liší typem dielektrika a tedy dielektrickou permitivitou ε .

Na rozhraní elektrod vzniká elektrická vrstva, která je tvořena ionty a molekulami elektrolytu. Tato dielektrická vrstva se nazývá Helmholtzova. Má nízkou permitivitu, ale zároveň je široká pouze několik atomárních vrstev, což vede k vysokému poměru plochy S a šířce l [2].

Maximální napětí kondenzátoru je kvůli šířce Helmholtzovy vrstvy, a tudíž vysoké intenzitě elektrického pole zhruba 2,7 V [18]. Z tohoto důvodu jich bývá v pouzdře většinou několik zapojených sériově. Při sériovém zapojení se ovšem snižuje jejich celková kapacita

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (2)$$

Při paralelním zapojení je celková kapacita dána součtem dílčích kapacit

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (3)$$

Elektrická energie je zde uchovávána v podobě náboje. Pro energii elektrického pole W akumulovanou v nabitém kondenzátoru platí [1]

$$W = \frac{1}{2} C U^2. \quad (4)$$

Superkondenzátory jsou díky nízkému vnitřnímu odporu schopny poskytnout velké nabíjecí a vybíjecí proudy i v řádech desítek kiloampér a mají vysokou cyklickou životnost. Účinnost ukládání energie dosahuje až 95 %. Obdobně jako všechny kondenzátory však trpí rychlým samovybíjením, což znemožňuje dlouhodobější ukládání energie. Další velkou nevýhodou je nízká hustota uložené energie, která se i u těch nejlepších kondenzátorů pohybuje okolo 3,9 Wh/kg [18].

Skládování energie

Superkondenzátory je vhodné používat v aplikacích, kde je potřeba rychlého uskladnění a dodání velkého množství energie [1].

V dopravě se využívají jako doplněk k lithiovým bateriím v elektromobilech. Baterie mají omezený nabíjecí proud, což v případech vyšší rekuperace při intenzivnějším brzdění vede k maření přebytečné energie v teplo. Kondenzátory jsou tuto energii schopny pojmout a následně ji při rozjezdu uvolnit [19].

Pro účely menších lokálních úložišť energie se na trhu nově objevují produkty společnosti Kilowatt Labs. Ty mohou sloužit jako krátkodobá zásoba energie pro domácnost nebo jako zdroj pro připojení náradí či instalaci do vysokozdvizného vozíku. Největší z nabízených úložišť má kapacitu 7,1 kWh při napětí 48 V. Maximální vybíjecí proud je 500 A. Zařízení je možné skládat a vytvořit tak úložiště požadované kapacity [19].

2.2.2 Supravodivá magnetická úložiště

Supravodivostí se označuje stav materiálu, při němž neklade odpor procházejícímu proudu, což znamená, že nedochází ke ztrátám energie v podobě tepla. Využití mají supravodivé materiály zejména v oblasti rozvodů elektrické energie, ale také v dopravě nebo při výrobě silných elektromagnetů [20].

Supravodivost byla objevena nizozemským fyzikem Heikem Kamerlingh-Onnesem roku 1911, když zkoumal vlastnosti látek za velmi nízkých teplot. Při experimentech se rtuť zjistil, že poklesne-li teplota pod kritickou hodnotu, skokově klesne její odpor téměř na nulu. Podle BCS teorie z roku 1957 se při dosažení kritické teploty elektrony párují a obsahují pouze jeden kvantový stav. To umožňuje jejich pohyb látkou bez odporu a vypuzování vnějšího magnetického pole. Tento jev se nazývá konvenční supravodivost. Existuje i vysokoteplotní supravodivost, která probíhá při teplotách okolo 70 K. Této teploty je možné dosáhnout použitím kapalného dusíku. Její podstata však není dosud objasněna. Nyní probíhají snahy dosáhnout supravodivosti i za pokojové teploty [20], [21].

Supravodiče mohou být použity pro výrobu velice silných elektromagnetů. Velikost magnetického pole elektromagnetu je úměrná počtu závitů vinutí. Materiál neklade procházejícímu proudu žádný odpor a nevznikají tepelné ztráty. Z tohoto důvodu je možné vytvořit vinutí z vodiče menšího průměru a dosáhnout větší hustoty závitů než při použití měděného drátu. Takové magnety jsou využívány například v urychlovačích částic, v medicíně (magnetický rezonanční tomograf), v tokamacích nebo pro konstrukci úložišť. Systémy pro ukládání energie se anglicky nazývají Superconducting magnetic energy storage – SMES [1], [21].

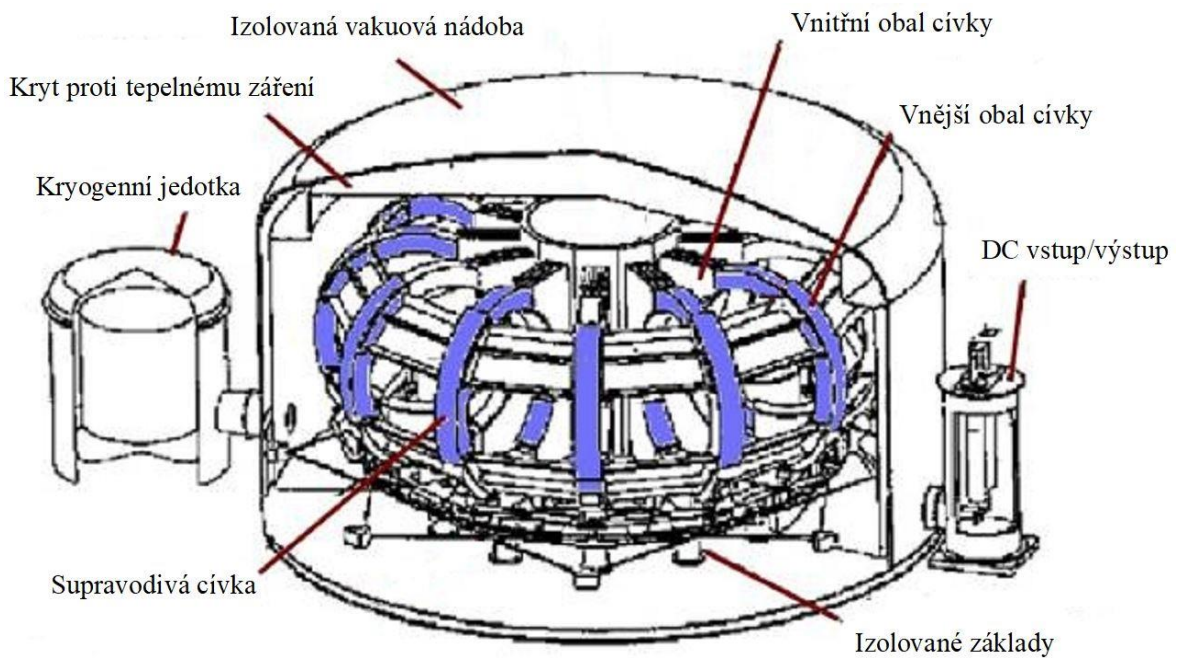
Princip

Energie se ukládá ve formě magnetického pole, které je vytvořeno průtokem stejnosměrného proudu supravodivou cívkou. Ke chlazení slouží kryogenní jednotka. Součástí systému je stabilizátor napětí a řídicí jednotka. Po nabití cívky se vytvoří magnetické pole, které je možné udržet po neomezeně dlouhou dobu. Následně je možné jej přeměnit zpět na elektrickou energii. Množství uložené energie E popisuje vztah (5)

$$E = \frac{1}{2} LI^2, \quad (5)$$

kde L je indukčnost cívky a I procházející proud. Indukčnost cívky je závislá na počtu závitů, rozměrech cívky a permeabilitě prostředí [22].

Hlavní výhodou systémů SMES je okamžitá dodávka velmi vysokého výkonu. Ztráty úložiště jsou způsobeny pouze řídicí elektronikou. Jedná se tak o jeden z neúčinnějších způsobů ukládání energie. Celková účinnost přesahuje 95 %. Cyklická životnost je téměř neomezená. Zásadní nevýhodou jsou značné náklady na udržování nízké teploty zařízení a samotná cena supravodivých materiálů. Díky těmto vlastnostem se nasazení úložišť omezuje jen na specifické aplikace související s potřebou dosažení vysoké kvality energie [20], [22].



Obr. 7 Nákres supravodivého magnetického úložiště [20]

Ve světě je provozováno několik jednotek o kapacitě 1 MWh, jejichž hlavním úkolem je zajistit kvalitní dodávku elektrické energie pro provoz, které to nezbytně vyžadují, například linky na výrobu mikročipů. Dále se úložné jednotky používají pro stabilizaci rozvodné sítě nebo v provozech s vysokými nárazovými odběry [22].

2.3 Chemická úložiště

Elektrická energie je přeměněna na energii chemicky vázanou v podobě plynného média, které je snáze skladovatelné, nejčastěji vodíku. Ten lze dále přeměňovat na metan nebo syngas. Tyto technologie se označují souhrnným názvem Power to gas. Hlavní výhodou je možnost využití stávající infrastruktury rozvodů zemního plynu, včetně podzemních zásobníků. energii lze tímto způsobem skladovat ve velkém množství po dlouhou dobu. Plyn může být dále využit pro vytápění, v technologických procesech, v dopravě nebo přeměněn zpět na elektrickou energii pomocí spalovacích turbín či palivových článků.

2.3.1 Vodík

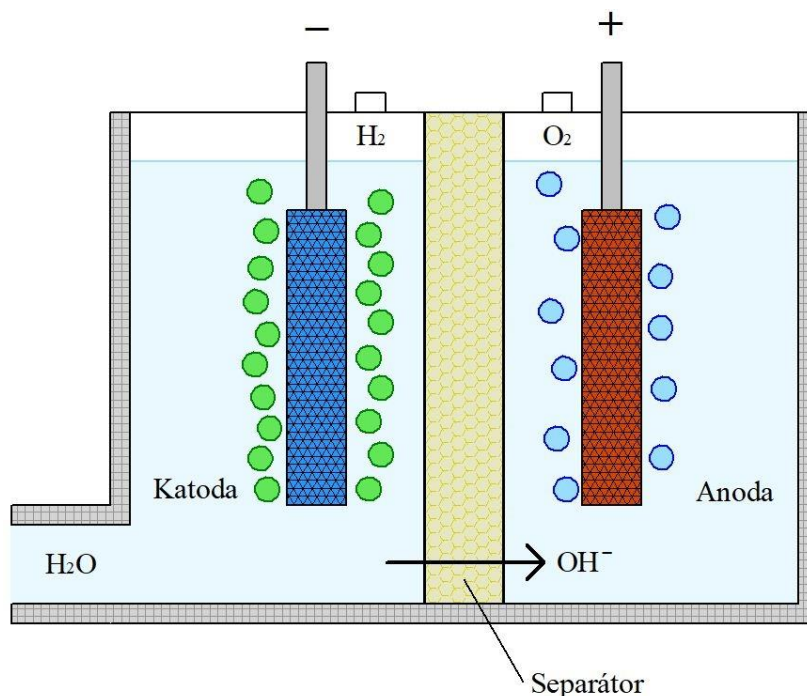
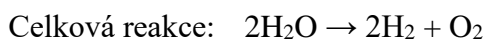
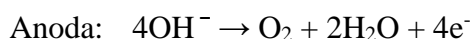
Vodík má velmi vysokou energetickou hustotu 33 000 Wh/kg. Díky tomu je vhodný především pro dlouhodobé skladování energie. Jako příklad lze uvést uchování elektřiny z fotovoltaických elektráren a její využití v zimním období [1].

Nyní se většina vodíku ve světě vyrábí pomocí parní reformace zemního plynu, což je neekonomičtější zdroj. Jedná se o chemický proces probíhající za vysoké teploty, při kterém reaguje směs metanu a vodní páry za vzniku vodíku a oxidu uhličitého. Účinnost procesu se pohybuje kolem 80 %. Nevýhodou ovšem představuje vznik velkého množství CO_2 . Na výrobu 1 kg vodíku je vyprodukováno 5,5 kg CO_2 [23].

Další možností získání vodíku je štěpení vody v elektrolyzérech. Elektrolyza umožňuje přeměnu elektrické energie na vodík, coby chemický nosič s vysokou energetickou hustotou, a kyslík. Při průchodu elektrického proudu roztokem se štěpí vazby mezi vodíkem a kyslíkem. Na výrobu 1 kg vodíku je zapotřebí asi 9 l vody a zhruba 60 kWh elektrické energie. Účinnost procesu se za použití současných technologií pohybuje mezi 60 a 80 %. Výsledný plyn má vysokou chemickou čistotu. Výhodou jsou téměř nulové emise znečišťujících látek. Elektrolyzu lze obecně rozdělit na nízkoteplotní a vysokoteplotní [24].

Alkalický elektrolyzér

Alkalická elektrolyza patří mezi nízkoteplotní procesy. Elektrolytem je vodný roztok hydroxidu sodného či hydroxidu draselného v koncentraci 25 - 30 %, který umožňuje dobrou iontovou vodivost. Elektrody jsou ve většině případů tvořeny perforovanou ocelí s katalyzátory na bázi niklu, kobaltu nebo železa. Pro zamezení mísení vznikajících plynů jsou oba elektrodové prostory odděleny separátorem, který zároveň umožňuje přechod iontů hydroxidu (OH^-) ke kladné elektrodě. Materiálem pro výrobu je nejčastěji keramika či kompozit na bázi zirkonia. Po průchodu elektrického proudu dojde k započetí reakce, jež je popsána níže: [1], [25]



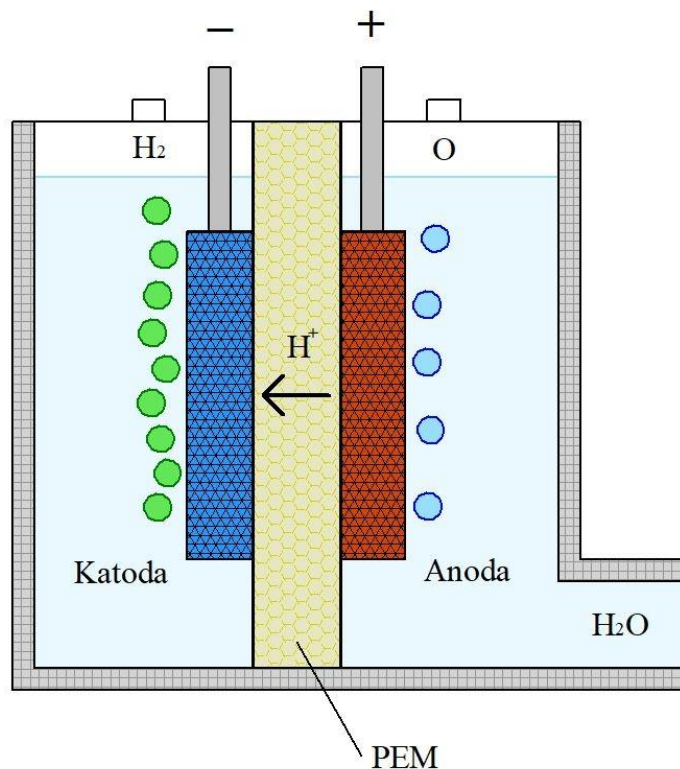
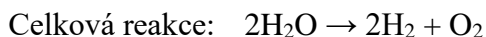
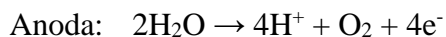
Obr. 8 Princip alkalického elektrolyzér [26]

Alkalická elektrolýza je v průmyslu využívána již mnoho desetiletí. Technologie výroby elektrolyzérů je pokročilá a v porovnání s jinými metodami méně nákladná. Zařízení mají dlouhou životnost. Účinnost procesu se pohybuje v rozmezí 65 - 70 %. Nevýhodou představuje nižší čistota generovaného vodíku, kvůli obsahu kyslíku a vodní páry a vyšší energetická náročnost procesu [25].

Elektrolyzér s polymerní elektrodovou membránou (PEM)

Membrána plní funkci separátoru a elektrolytu. Umožňuje průchod kladně nabitých iontů vodíku (H^+) mezi elektrodami. K reakci dochází v katalytické vrstvě plynově propustných elektrod, které jsou tvořeny porézními uhlíkovými materiály. Katalyzátor je tvořen nanočásticemi platiny na uhlíkovém nosiči [24].

Voda je přiváděna k anodě, kde se rozkládá na kyslík, kationy vodíku a elektrony. Kationy vodíku procházejí přes membránu na katodovou stranu. Elektrony putují z anody přes zdroj energie ke katodě, kde se znovu spojují s kationy za vzniku vodíku. Průběh reakce je popsán níže: [1], [24]



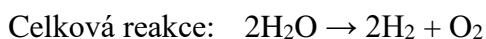
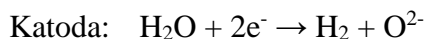
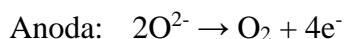
Obr. 9 Princip PEM elektrolyzérů [26]

PEM elektrolyzéry byly vyvinuty, aby překonaly nedostatky alkalických elektrolyzérů. Membrána velice dobře zamezuje mísení vodíku s kyslíkem a vodní parou. Na výstupu je téměř čistý vodík. Zároveň disponuje vysokou protonovou vodivostí, menší tloušťkou (25 - 350 μm) a odolá vysokým tlakům. Mezi hlavní výhody PEM elektrolyzérů patří kompaktnost, jednoduchost, vysoká proudová hustota a vysoká účinnost (70 - 80 %). Největší nevýhodu představuje krátká životnost a přítomnost vzácné platiny, která prodražuje konstrukci zařízení. Výzkum a vývoj je zaměřen především na snižování obsahu drahých kovů a zvyšování životnosti. Také probíhají snahy o vytvoření PEM elektrolyzérů, který by měl zároveň funkci palivového článku a umožňoval slučování vodíku a kyslíku za vzniku elektrického proudu [24], [25], [27].

Vysokoteplotní elektrolyzér

V anglické literatuře je označován jako solid oxide electrolyzer (SOE). Zařízení pracuje při teplotách v rozmezí 700 až 900 °C. Voda je přiváděna ve formě páry. Díky vyšší teplotě může být voda snadněji rozštěpena a není třeba využití katalyzátoru ze vzácných kovů. Anoda je tvořena materiálem LSM (manganitan lanthan dopovaný stronciem). Katoda je nejčastěji vyráběna z kompozitu keramiky a niklu. Nejběžnějším elektrolytem je YSZ (yttriem stabilizovaný oxid zirkoničitý), který slouží k transportu O²⁻ iontů mezi elektrodami [1], [24], [25].

Pára je přiváděna ke katodě a za působení tepla se rozkládá. Elektrony procházejí přes zdroj energie ke katodě. Aniony kyslíku přecházejí skrze elektrolyt k anodě, kde vzniká kyslík. Vodík je odváděn z prostoru katody. Průběh reakce je znázorněn na následujících rovnicích: [1]



Technologie vysokoteplotních elektrolyzérů je dosud ve fázi výzkumu a vývoje. Část energie je dodávána ve formě tepla (asi 30 %). Díky tomu může být energie uložená ve vodíku větší než energie dodaná ve formě elektřiny. Vhodné je využití odpadního tepla z technologických procesů. Do budoucna se jeví velmi zajímavě možnost spojení jaderných reaktorů nové generace s vysokoteplotními elektrolyzéry, které by mohly využívat odpadní teplo z jaderné reakce a ukládat přebytky vyrobené elektrické energie ve formě vodíku. K dalšímu uplatnění by mohlo dojít v oblasti tepelných slunečních elektráren. [1], [24], [25].

Elektrolyzér je schopen fungovat také jako palivový článek. Nevýhodou je ovšem technická nevypělost a s tím spojená krátká životnost článku [1].

Srovnání

Tab. 5 Srovnání elektrolyzérů [24], [25], [27]

Typ	Alkalický	PEM	SOE
Pracovní teplota [°C]	60 - 80	50 - 80	700 - 900
Pracovní tlak [kPa]	< 3 000	< 3 000	< 3 000
Proudová hustota [mA/cm ²]	200 - 400	0,6 - 2	300 - 1000
Výkonová hustota [W/cm ²]	1	4,4	-
Minimální výkon [%]	20 - 40	0 - 10	-
Spotřeba energie [kWh/Nm ³]	4,5 - 7	4,5 - 7,5	3,7
Doba náběhu [min]	20	5 - 15	> 600
Účinnost [%]	65 - 70	70 - 80	> 90
Životnost [h]	90 000	20 000	40 000

V současné době jsou ve většině projektů využívány alkalické elektrolyzéry. V porovnání s PEM elektrolyzéry mají nižší provozní rozsah (20 – 100 %) a nejsou příliš vhodné pro zdroje s proměnným výkonem. Jsou však jedinou technologií vhodnou pro větší výkony. Během provozu se vyskytují problémy s čistotou vodíku, s degradací elektrolyzérů a větší náročností na údržbu, ale také problémy s najížděním z nulového výkonu a bezpečnostní problémy spojené s KOH elektrolytem [24].

2.3.2 Doprava a skladování vodíku

Za atmosférických podmínek činí hustota vodíku pouze 0,09 kg/m³. Pro zvýšení energetické hustoty je nutné vodík stlačit na 35 až 70 MPa, zkapalnit nebo chemicky navázat. Energie potřebná ke stlačení vodíku na úroveň tohoto tlaku odpovídá asi 10 – 15 % jeho energetického obsahu, v závislosti na kvalitě kompresoru. Pro zkapalnění vodíku je třeba dodat ještě větší množství energie (25 - 45 %) k ochlazení na -253°C. Při skladování či přepravě je také nutné hlídat úniky či obsah kyslíku v systému. Vodík v koncentraci větší než 4% tvoří v přítomnosti kyslíku výbušnou směs [28].

Skladování v plynné fázi

Nejjednodušším způsobem skladování vodíku je jeho stlačení do robustních vysokotlakých nádrží. Výsledná hustota energie je ale poměrně nízká. Energetická hustota vodíku vzhledem k jeho objemu roste s tlakem. To však vede i ke zvýšení spotřeby energie nutné pro kompresi. Standardním materiálem pro stacionární zásobníky je ocel. V dopravě se využívají kompozitní materiály z uhlíkových nebo skleněných vláken. Vhodných materiálů není mnoho. Malé molekuly vodíku mají tendenci difundovat mnoha polymerními materiály. Pro stacionární aplikace se používají zásobníky s tlakem do 20 MPa. V dopravě se využívají nádrže s tlakem až 70 MPa [29].

Skladování v kapalně fázi

Zkapalněním vodíku lze dosáhnout značného zvýšení hustoty při zachování atmosférického tlaku. Vodík se stává kapalným při teplotě -253 °C . Pro dosažení takto nízkých teplot se využívá Lindeho cyklu nebo Joule-Thomsonovy expanze. Energie potřebná pro zkapalnění je $3,228\text{ kWh}$ na 1 kg vodíku. Zásobníky se musí dále chladit. V pasivně izolovaném zásobníku dochází k odpařování vodíku a k jeho únikům. Celý proces je tak poměrně nevhodný [29].

Skladování v hydridech kovů

Plynný vodík je možné navázat uvnitř mřížky daného kovu nebo slitiny. Vhodnými materiály jsou lithium, sodík nebo hořčík. Hustota takto vázaného vodíku je obdobná jako u zkapalněného vodíku. Během procesu ukládání je uvolňováno teplo, které musí být odváděno z důvodů zachování reakce. Při uvolňování vodíku musí být teplo naopak dodáváno. Hlavní výhodou je vysoká hustota uloženého vodíku a bezpečnost. Při poškození zásobníku je vodík dále vázán ve struktuře kovu a nevzniká riziko požáru či výbuchu [29].

Tab. 6 Srovnání způsobů skladování vodíku [1]

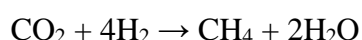
Skladování	Podmínky	Hustota [kg/m^3]
Stlačený vodík	70 MPa	42
Kapalný vodík	-253 °C	70
Hydrid hořečnatý MgH_2	Atmosférické podmínky	106

Doprava vodíku

Vodík je přepravován v plynném nebo kapalném stavu většinou pomocí silniční či železniční dopravy. Cisterny pro přepravu plynného vodíku jsou tvořeny souborem tlustostěnných trubek z oceli či kompozitu o objemu zhruba 20 m^3 , což při tlaku 35 MPa představuje asi 600 kg . Přeprava a tankování kapalného vodíku je obecně snazší a rychlejší. Izolovaná přepravní cisterna je schopna převážet až 5 tun kapalného vodíku. Velké objemy vodíku je také možné přepravovat potrubím. Potrubní rozvody vodíku jsou realizovány především v chemických provozech a rafinériích [29].

2.3.3 Metanizace

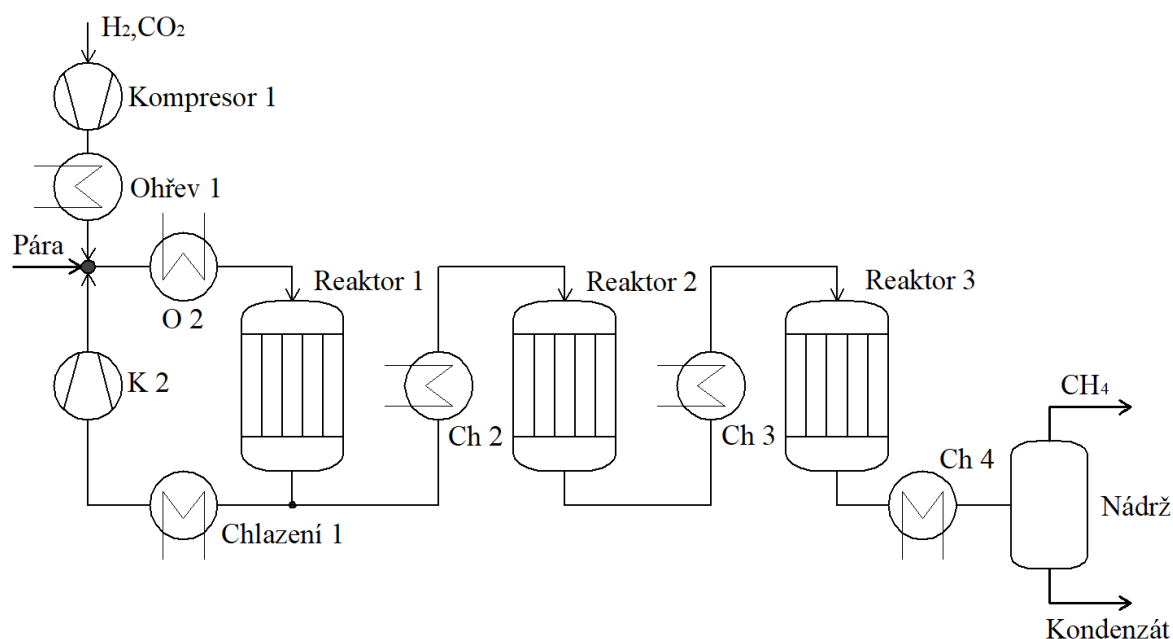
Metanizace je proces výroby syntetického zemního plynu sloučením vodíku a oxidu uhličitého prostřednictvím Sabatierovy reakce popsané v rovnici níže. Proces je založen na katalytické hydrogenaci oxidu uhličitého na metan. Jako katalyzátor slouží sloučeniny na bázi niklu či ruthenia. Reakce probíhá při teplotách 250 - 400 °C. Přibližně 20 % energie vodíku je během reakce uvolněno v podobě tepla, což limituje účinnost procesu na 80 %. Vedlejšími produkty reakce jsou vodní pára, oxid uhelnatý a nepřeměněné reaktanty. Oxid uhličitý může být získáván jako odpadní produkt z chemických procesů, elektráren nebo bioplynových stanic. Metanizace lze rozdělit na chemickou a biologickou [30].



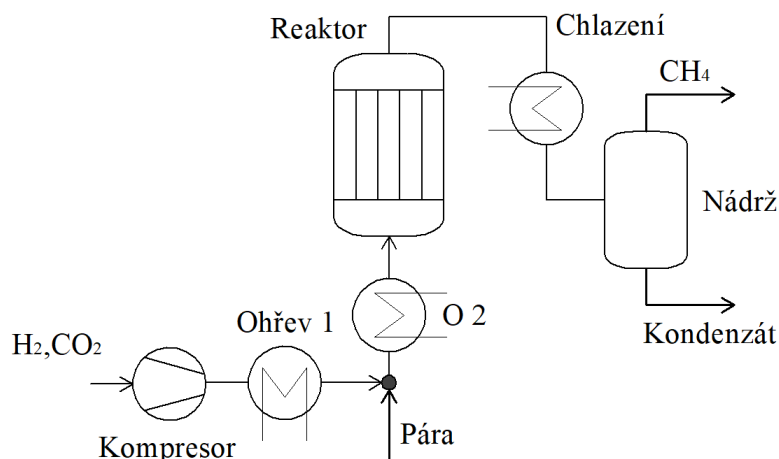
$$\Delta H = -165,0 \text{ kJ/mol}$$

Chemická metanizace

Metanizační reaktory jsou rozděleny na provedení s pevným a fluidním ložem. V reaktoru s pevným ložem jsou náhodně rozmístěny katalyzátory ve formě pelet. Reakce je silně exotermní a plyn je nutné průběžně ochlazovat. Přílišné teplotní výkyvy mohou vést k poškození katalyzátorů. V reaktoru s fluidním ložem jsou částice katalyzátoru udržovány ve vznosu proudícím médiem. Prostor je vyplněn téměř rovnoměrným teplotním profilem. Hlavní výhodou je dobrý odvod vznikajícího tepla a velký měrný povrch katalyzátoru [31].



Obr. 10 Schéma zapojení reaktoru s pevným ložem [31]



Obr. 11 Schéma zapojení reaktoru s fluidním ložem [31]

Biologická metanizace

Chemické katalyzátory jsou v těchto zařízeních nahrazeny enzymy, které produkuje metanogenní bakterie. Metanizace vodíku probíhá v uzavřeném prostředí bez přístupu kyslíku. Hlavní částí je reaktor s kapalným roztokem obsahujícím mikroorganismy jako biologický katalyzátor. Za teploty přibližně 40 °C bakterie přeměňují přiváděný vodík a oxid uhličitý na metan a vodní páru [32].

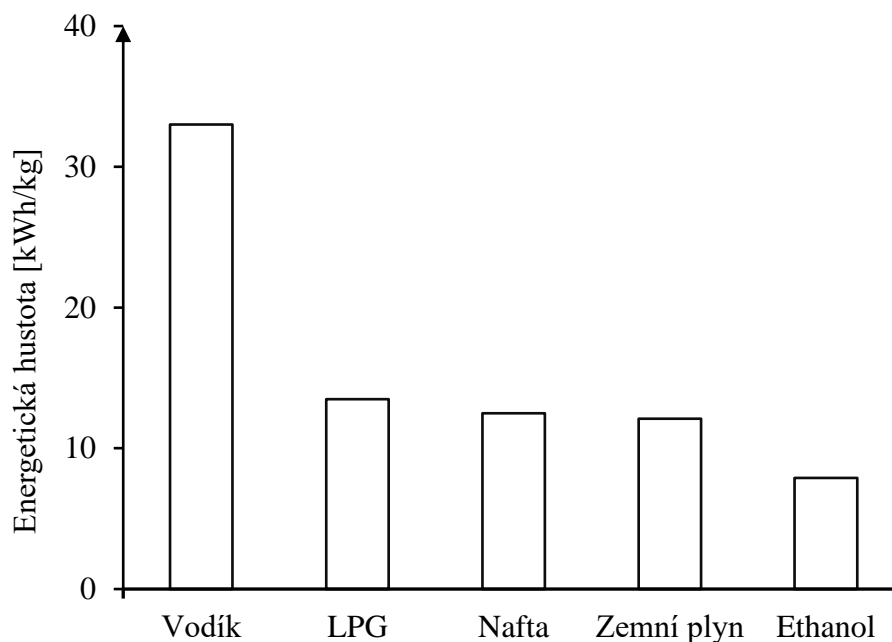
Doprava a skladování

Metan je hlavní součástí zemního plynu. Synteticky vytvořený metan lze po potřebných úpravách rozvádět v rámci distribuční sítě zemního plynu. Zároveň je možné využívat objemné zásobníky zemního plynu, jimiž jsou většinou podzemní kaverny, doly nebo porézní horniny, ze kterých byl plyn dříve vytěžen [32].

Na území České republiky je provozováno osm podzemních plynových zásobníků. Celková kapacita činí 2,94 miliard metrů krychlových, tedy asi 30 TWh. To odpovídá zhruba 40% roční spotřeby plynu. V posledních letech se spotřeba plynu v ČR pohybuje okolo 8 miliard metrů krychlových za rok [33].

Tab. 7 Podzemní plynové zásobníky v České republice [33]

Zásobník	Kapacita [mil. m ³]	Těžební výkon [mil. m ³ /den]	Vtlačovací výkon [mil. m ³ /den]
Háje	64	6,0	6,0
Dolní Dunajovice	900	17,0	12,0
Tvrdonice	535	8,0	8,0
Lobodice	177	5,0	2,5
Štramberk	500	7,0	7,0
Třanovice	530	8,0	6,0
Uhřice	235	6,0	2,6
Celkem	2 941	57,0	44,1



Obr. 12 Srovnání energetických hustot [1]

2.3.4 Zpětná výroba elektřiny

Elektrickou energii lze zpětně získat pomocí vodíkových palivových článků nebo spalováním v tepelných strojích jako jsou kogenerační jednotky či spalovací turbíny.

Palivový článek

V palivových článcích probíhá elektrochemická reakce mezi vodíkem a kyslíkem za vzniku vody a elektrické energie. Princip je v podstatě opakem elektrolýzy. Článek obsahuje anodu, katodu, elektrolyt a katalyzátor. K anodě je přiváděno palivo, většinou vodík nebo metan a je oxidováno. Ke katodě je přiváděno okysličovadlo, které se zde redukuje. Elektrody jsou vyrobeny z různých kovů nebo z uhlíku potaženým katalyzátorem. Elektrolytem bývají různé kyseliny a zásady, keramika nebo polymerové membrány. Svorkové napětí článku se pohybuje v rozmezí 0,5 - 0,95 V. Velikost proudu je závislá na ploše elektrod. Palivové články mohou produkovat výkon v širokém rozmezí od jednotek do desítek megawattů. Lze je využít téměř ve všech aplikacích, například v dopravě, menších domácích úložiscích i ve velkých průmyslových úložných systémech. Průběh reakce je závislý na typu palivového článku a na druhu použitého elektrolytu [34].

Mezi nejstarší patří články s alkalickým elektrolytem (AFC). Je zde použit vodný roztok hydroxidu (NaOH, KOH) zafixovaný do azbestové matice. Provozní teplota se pohybuje okolo 90 °C. Palivem je čistý vodík a okysličovadlem čistý kyslík, nebo vzduch zbavený oxidu uhličitého, který by mohl reagovat s elektrolytem. Vzniklý uhličitán draselný by zanesl a ucpal azbestovou matici. Katalyzátory jsou nejčastěji na bázi niklu. Uplatnění nalézají především ve vesmírném a vojenském průmyslu [34].

Palivové články s polymerní membránou (PEMFC) využívají jako elektrolyt iontově vodivou membránu, která umožňuje průchod anionům vodíku. Jako katalyzátor se nejčastěji používá platina nebo její slitiny. Pracovní teplota je zhruba 90 °C. Jako palivo slouží vodík nebo metanol a jako okysličovadlo kyslík nebo vzduch. Tento typ článku je vhodný pro použití v dopravě a jiných mobilních aplikacích [34].

Palivové články s tuhými oxidy (SOFC) jsou provozovány za vysokých teplot. S tím jsou spojeny konstrukční problémy zvláště kvůli tepelné dilataci a těsnění jednotlivých komponent. Pevný elektrolyt je na bázi yttria a zirkonia. Pracovní teplota se pohybuje mezi 800 a 1000 °C. Výstupní reakční produkty lze využít v expanzní turbíně. Jako palivo může sloužit vodík, zemní plyn i bioplyn. Články jsou nyní ve výzkumné fázi. Později mohou díky svým vlastnostem najít uplatnění v kogeneračních jednotkách, elektrárnách nebo velkých úložištích [34].

Tab. 8 Srovnání palivových článků [34]

Technologie	AFC	PEMFC	SOFC
Pracovní teplota	< 90 °C	< 90 °C	800 - 1 000 °C
Účinnost	60 - 70 %	40 - 50 %	60 - 65 %
Palivo	Čistý vodík	Vodík, metanol	Vodík, zemní plyn
Maximální výkon	20 kW	250 kW	10 MW
Využití	Vesmírný a vojenský průmysl	Mobilní aplikace, doprava	Elektrárny, úložiště

Kogenerační jednotky

Tato zařízení umožňují kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Skládají se nejčastěji z pístového spalovacího motoru, upraveného pro spalování plynu, a generátoru. Palivem je zemní plyn nebo bioplyn. Odpadní teplo je využito k vytápění. Výhodou je možnost instalace jednotky o výkonu, který je pro daný objekt a spotřebu tepla optimální. Tepelná i elektrická energie je vyráběna přímo na místě a nedochází ke ztrátám při přenosu na větší vzdálenost [35].

Spalovací turbína

Je to tepelný stroj, ve kterém se přeměňuje energie expandujících plynů na mechanickou práci. Soustrojí je složeno z kompresoru, spalovací komory, plynové turbíny a generátoru. Kompresor stlačí nasávaný vzduch, který je následně veden do spalovací komory. Zde se smíchá s palivem a dochází k hoření. Spaliny jsou vedeny do plynové turbíny, kde se část energie přemění na mechanickou. Zbylou část tepelné a kinetické energie je možné využít v navazujícím parním okruhu. Mechanická energie je využita pro pohon kompresoru a generátoru. Využívají se zejména v paroplynových elektrárnách [36].

2.3.5 Systémy power to gas

Systém power to gas je soubor zařízení pro výrobu a skladování plyných paliv nejčastěji vodíku z elektrické energie a vody. Power to gas jednotky jsou provozovány především v Německu. Zatím se jedná spíše o zkušební provozy, které mají prozkoumat možnosti instalací ve větším měřítku. Využívá se zde přebytečné energie z větrných a solárních elektráren. Velkou část tvoří samostatné systémy bez připojení k elektrické síti a distribuční síti zemního plynu. Uplatnění nacházejí také v odlehlých oblastech a ostrovních systémech s vysokým potenciálem pro využití obnovitelných zdrojů. Umožňují tuto energii akumulovat po dobu několika měsíců [37].

Prvním projektem v průmyslovém měřítku byl AUDI E-Gas uvedený do provozu v roce 2013. Jako zdroj energie slouží větrné elektrárny, které pohánějí tři elektrolyzéry o celkovém výkonu 6 MW. Produkovaný vodík je dále přiváděn do metanizační jednotky. Odpadní teplo je využito v bioplynové stanici, která je zároveň zdrojem CO₂. Vzniklý metan slouží k pohonu automobilů a autobusů na CNG [38].

Experimentální zařízení se nachází i v Řeži u Prahy. Probíhá zde výzkum různých katalyzátorů pro výrobu metanu, zkoumají se provozní parametry a výkony v závislosti na nestabilních zdrojích energie [39].

2.4 Tepelná úložiště

Termální úložiště jsou také označovány jako Carnotovy baterie. Akumulovaná energie je zde ukládána ve formě tepla. Během nabíjení se elektrická energie přeměňuje na tepelnou a ukládá se v tepelném akumulátoru. Při vybíjení se teplo přeměňuje zpět na elektrinu [40].

První patent pochází z roku 1924. K jejich většímu rozvoji a využití však došlo až s příchodem obnovitelných zdrojů energie na přelomu tisíciletí. Prostřednictvím Carnotových baterií je možné ukládat velké množství energie po dobu až několika týdnů. Proto se vývojem zmíněných úložišť začala zabývat řada společností i univerzitních a výzkumných pracovišť. Aktuálně je uváděno do provozu několik pilotních projektů, které mají za cíl optimalizovat technologie a uvést tepelná úložiště do komerčního provozu [40].

Carnotovy baterie mají výhodu oproti elektrochemickým úložištím z pohledu regulace napětí a frekvence. Elektrická energie je vyráběna pomocí parních oběhů s točivými stroji, které mají značnou setrvačnost obdobně jako generátory elektrárenských bloků. Podobnými vlastnostmi disponují pouze přečerpávací vodní elektrárny, jejichž výstavba je vzhledem ke geografické náročnosti problematická. Účinnost systémů se pohybuje v rozmezí 35 - 75 %, v závislosti na použité technologii [40], [41].

2.4.1 Princip

Výroba tepla

Elektrina může být přeměněna v teplo odporovým či indukčním ohřevem, nebo pomocí tepelného čerpadla. Systémy s tepelnými čerpadly se dále dělí na samostatné, které pracují pouze s vnější elektrickou energií a tepelně integrované, využívající odpadního tepla většinou z průmyslových provozů. Podle způsobu využití odpadního tepla jsou dále rozděleny na teplé, které odpadní teplo přečerpávají na vyšší teplotní úroveň, nebo studené, kde je skladován chlad vytvořený chladícím oběhem, který zvyšuje teplotní rozdíl a tím účinnost pro oběh produkující elektrinu. Zdrojem tepla mohou také být solární tepelné elektrárny, které soustavou zrcadel soustředí sluneční záření do středu věže s výměníkem obsahujícím roztavenou sůl [2], [42].

Skladování tepla

Tepelné akumulátory lze rozdělit dle způsobu ukládání tepla na akumulaci citelného tepla či latentního tepla, nebo dle využití chemických či fyzikálních vazeb. Akumulační média jsou uchovávána v nádržích nebo jimi mohou být zeminy či skalní podloží přístupné pomocí vrtů [2].

Systémy uchovávající citelné teplo využívají pevné látky (šterková či keramická lože, ocelové či betonové monolity) nebo kapaliny (oleje, soli, kovy, voda). V porovnání s ostatními způsoby jsou tyto systémy levné a méně komplikované. Jsou proto již v hojně míře průmyslově využívány [2].

V systémech využívajících latentní teplo dochází za dané teploty k fázové změně, nejčastěji mezi pevným a kapalným skupenstvím. Fázová změna odebere či uvolní značné množství energie. Eventuálně je možné i skladování zkapalněného plynu při nízkých teplotách, čili s přechodem mezi plynem a kapalinou [2].

Termochemické systémy využívají k ukládání energie vratných chemických reakcí. Během nabíjení dochází k separaci jednotlivých složek, které jsou dále skladovány. Při vybíjení dochází ke slučování a obnově atomárních vazeb. Výsledkem slučovací reakce je teplo, které může být dále využito [2].

Výroba elektřiny

Technologie pro přeměnu tepla zpět na elektřinu se odvíjí od kapacity skladovacích zařízení a vlastností pracovních médií. Vhodné jsou klasické tepelné cykly využívané v elektrárnách, jako je Rankinův pro oběhy se změnou fáze či Braytonův pro plynové oběhy. Méně častým řešením může být i Stirlingův oběh nebo kombinace Braytonova a Rankinova cyklu. Ve fázi výzkumu jsou i technologie umožňující přímou transformaci tepelného záření na elektřinu za pomoci termofotovoltaického, termionického nebo termoelektrického děje [40], [41].

2.4.2 Úložiště využívající citelné teplo

Je to nejjednodušší a nejpoužívanější způsob ukládání tepla. Princip spočívá ve změně teploty média. Materiály pro výrobu jsou obecně levné a bezpečné. Akumulačním médiem je často voda. Při použití roztavených solí nebo kovů lze dosáhnout vyšší teploty a tím i kapacity. Média mohou být skladována v podzemních nádržích, nebo trubkových systémech umístěných do vrtů. Další možností je uchování tepla ve štěrkových či oblázkových ložích, přes které proudí teplotnosné médium (voda, vzduch). Změna vnitřní energie q je závislá na hmotnosti m , měrné tepelné kapacitě látky c a rozdílu počáteční teploty t_1 a konečné teploty t_2 [2]

$$\Delta q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1). \quad (6)$$

Akumulační média musí být tepelně stabilní a nemohou během provozu podléhat žádným fázovým přeměnám. Látka by také měla mít vysokou tepelnou kapacitu, hustotu a přijatelnou cenu. Několik vhodných materiálů je uvedeno v tabulce níže.

Tab. 9 Média vhodná pro ukládání citelného tepla [2]

Médium	Teplota minimální [°C]	Teplota maximální [°C]	Tepelná vodivost [W/m K]	Tepelná kapacita [kJ/kg K]	Průměrné náklady [Kč/kWh]
NaCl (pevné)	200	500	7,0	0,85	33
Beton	200	400	1,5	0,85	22
Šamotové cihly	200	700	1,5	1,00	150
Ocel	200	700	40,0	0,60	1 300
Minerální olej	200	300	0,1	2,60	95
Silikonový olej	300	400	0,1	2,10	1 800
Uhličitany	450	850	2,0	1,80	250
Na (kapalné)	270	530	71,0	1,30	470

Roztavená sůl

Akumulátory obsahující roztavené soli se ve velké míře využívají ve slunečních tepelných elektrárnách. Soustava zrcadel soustředí tepelnou energii do jednoho bodu. V případě věžových elektráren jsou paprsky směřovány na vrchol věže, kde se nachází kolektor s roztavenou solí. V případě žlabových elektráren jsou paprsky soustředěny parabolickými zrcadly do ohniska, kde se nachází potrubí, kterým proudí teplotonosná látka. Ta poté ohřívá sůl. Teplo je následně přeměněno na elektrinu pomocí konvenčního tepelného oběhu s parní turbínou. Množství naakumulované tepelné energie je dostatečné i pro noční provoz.

Sůl je skladována v tekutém stavu při teplotě asi 270 °C. Přes den je čerpána do solárního kolektoru, kde je ohřáta zhruba na 530 °C. Poté je čerpána do izolovaného zásobníku s horkou solí, kde může být skladována až týden. Následně je dle potřeby vedena do parogenerátoru, kde je teplo předáno páře. Nevýhodou je vysoká teplota tuhnutí soli 120 - 220 °C. Může dojít ke ztuhnutí soli uvnitř soustavy [2].

Skladování tepla v betonu a horninách

Beton či kamenné horniny mají nižší tepelnou kapacitu nežli voda nebo roztavené soli, lze je však zahřívat i na velmi vysoké teploty, teoreticky až 1 200 °C. Principem je ohřátí horniny či betonu pomocí teplotonosného média a následné využití uskladněného tepla pro vytápění či výrobu elektrické energie [42].

V roce 2019 byl zahájen provoz pilotního úložiště tohoto typu nedaleko Hamburku. Skládá se ze zásobníku obsahujícího asi 1 000 tun čediče jako akumulčního média. Skrze horninu prochází horký vzduch ohřátý odporovým topným tělesem na teplotu 750 °C. Při potřebě výroby energie skrze horninu prochází studený vzduch, který je zde ohříván. Následně předá teplo vodě, která se přemění v páru a roztáčí turbínu. Zařízení dokáže uchovat až 130 MWh tepelné energie [43].



Obr. 13 Tepelné úložiště společnosti Siemens v Hamburku [43]

Dalším z možných konceptů pro akumulaci tepla v betonu je rozmístění betonových bloků v blízkosti tepelné elektrárny. Když není potřeba dodávat elektrickou energii, je pára přeměrována z turbín do potrubí uloženého v blocích. Teplo z páry následně přechází do betonu. Když je potřeba opět zvýšit výrobu elektrické energie, ohřátá napájecí voda z elektrárny se čerpá skrze betonové bloky a přeměňuje se na přehřátou páru pro výrobu energie v samostatné parní turbíně. Demonstrační úložiště v Alabamě o kapacitě 10 MWh tepelné energie by mělo být dokončeno v roce 2022 [44].

Křemík

Pevný či roztavený křemík nabízí vysoké pracovní teploty a tím i skladovací kapacity. Křemík je schopen uložit více než 1 MWh energie na metr krychlový při 1 400 °C. Tato technologie je však v rané fázi výzkumu [45].

Dle konceptu MIT by mohla být elektrická energie z obnovitelných zdrojů transformována na tepelnou pomocí topných těles, které by ohřívaly roztavený křemík z teploty 1 930 °C na 2 370 °C. Ten by byl následně skladován v izolované nádrži z grafitu. Při potřebě výroby elektřiny by docházelo k čerpání intenzivně zářícího tekutého křemíku skrze svazek trubek vedených kolem vysoce účinných solárních článků [45].

2.4.3 Úložiště využívající latentní teplo

Latentní teplo je množství tepelné energie uvolněné nebo absorbované látkou během změny skupenství. Energie fázové změny materiálu určuje jeho tepelnou akumulaci kapacitu. Během dodávání tepelné energie jsou narušovány molekulární vazby. Proces probíhá za konstantní teploty. Právě vazebná energie dává látkám výjimečnou tepelnou kapacitu. Vhodné materiály musí vykazovat vysoké přechodové teplo, vysokou hustotu, vhodnou teplotu přechodu a nízkou toxicitu. V praxi se využívají například parafínové vosky nebo hydráty solí, které mají vysokou objemovou hustotu a malé teplotní výkyvy. Tyto materiály jsou však často hořlavé a vyžadují přidání bezpečnostních prvků do konstrukce nádob [2].

Tab. 10 Média vhodná pro ukládání latentního tepla [2]

Médium	Teplota přeměny [°C]	Hustota [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/m K]	Tepelná kapacita [kJ/kg K]	Průměrné náklady [Kč/kWh]
NaNO ₃	308	2 257	0,5	200	80
KNO ₃	333	2 110	0,5	267	90
KOH	380	2 044	0,5	150	530
NaCl	802	2 160	5,0	520	30
Na ₂ CO ₃	854	2 533	2,0	276	60
K ₂ CO ₃	897	2 290	2,0	236	200

Systémy využívající latentního tepla jsou mnohem složitější, dražší a náročnější na údržbu. Většinou se využívají ve spojení se solárními tepelnými elektrárnami menších výkonů, které jsou umístěny v jednotlivých budovách či objektech [2].

2.4.4 Termochemická úložiště

Energie je ukládána prostřednictvím chemických vazeb sloučenin. Během termochemické reakce jsou přerušeny atomární vazby. Poté dojde k termochemické separaci a jednotlivé složky jsou odděleny a dále skladovány. Sloučením složek a rekombinací vazeb mezi atomy dojde k uvolnění uložené termochemické energie. Hlavní výhodou těchto úložišť je vysoká energetická hustota a schopnost skladování při nízkých teplotách. Termochemický proces je však složitý, použité materiály drahé a často nebezpečné [2].

V praxi se využívají sloučeniny, jejichž reakce produkuje dvě odlišné fáze, jako je pevná látka a plyn. To usnadní oddělení výsledných produktů a zabrání zpětné reakci. Teplota T' v Tab. 11 definuje stav, při kterém se mění směr průběhu reakce. Pokud je aktuální teplota T vyšší než teplota T' , je reakce endotermní a teplo je absorbováno. V opačném případě je reakce exotermní a teplo je uvolňováno [2].

Tab. 11 Sloučeniny využívané v termochemických úložištích [2]

Reakce	ΔE (kJ)	T' (K)
$\text{NH}_4\text{F} \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{HF}$	149,3	499
$\text{MgCO}_3 \leftrightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$	100,6	670
$\text{NH}_4\text{HSO}_4 \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$	337,0	740
$\text{Ca}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	109,3	752
$\text{CaCO}_3 \leftrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$	178,1	1 110
$\text{MgSO}_4 \leftrightarrow \text{MgO} + \text{SO}_3$	287,6	1 470

Jedno z největších termochemických úložišť je provozováno v německém Berlíně. Zdrojem tepla je místní teplárna. Při nadbytku tepelné energie se provádí zahřátí soli na teplotu 550 °C. Dochází k vypařování vody, která je v soli navázána a vznikne suchá sůl. V takovém stavu vydrží sůl několik týdnů až měsíců. Během vybíjení je do soli opět přidávána voda. Chemickou reakcí se začne uvolňovat vysokoteplotní pára, kterou lze použít na pohon turbíny nebo na vytápění [42].

2.4.5 Významná tepelná úložiště

Největší tepelná úložiště jsou zpravidla součástí solárních tepelných elektráren. Úložiště s největší kapacitou skladované energie se nachází v Maroku. Komplex je tvořen několika systémy obsahujícími parabolická zrcadla, věžový kolektor a fotovoltaickou elektrárnu. Souhrnný výkon činí 510 MW. Každý systém obsahuje vlastní úložiště, jež je schopno akumulovat energii po dobu 3, 6 a 7,5 hodin. Celková kapacita činí 3 GWh [42].

Tab. 12 Významná tepelná úložiště [46]

Název	Kapacita [MWh]	Výkon [MW]	Země	Spuštěno
Ouarzazate Solar Station	3 005	510	Maroko	2018
Cerro Dominador	1 925	110	Chile	2021
Solana Generating Station	1 680	280	USA	2013
Extresol Solar Power Station	1 125	150	Španělsko	2009
Crescent Dunes	1 100	110	USA	2016

Zejména v severských zemích se také využívají objemné zásobníky pro skladování teplé vody. Nedaleko Finských Helsinek je uváděno do provozu světově největší teplovodné úložiště o objemu 260 000 m³. Prostor úložiště tvoří solné jeskyně dříve používané pro skladování topných olejů. Nyní zde bude skladována horká voda o teplotě 50 až 90 °C ohřátá odpadním teplem z technologických procesů. V zimních měsících bude voda sloužit k dálkovému vytápění. Teplo se samo nerozptýlí, protože podloží hluboké desítky metrů funguje jako výborný izolant. Tímto způsobem je možné uložit až 11,5 GWh tepelné energie [47].

2.5 Mechanická úložiště

Mechanická úložiště na rozdíl od elektrochemických nepodléhají v takové míře degradačním jevům. Fyzikální systémy založené na reverzibilních mechanismech různé povahy lze provozovat s mnohem delšími životními cykly. Energie je zde ukládána prostřednictvím potenciální či kinetické energie. Komerčně zdaleka nepoužívanějším typem úložišť jsou přečerpávací vodní elektrárny, kde je elektrická energie transformována do potenciální energie vody. Tyto systémy mohou být realizovány pro velmi vysoké výkony v řádech stovek megawattů. Další méně časté principy jsou založeny na kompresi a expanzi vzduchu či na ukládání energie do rotujících hmot. Mechanická úložiště obecně disponují nízkými měrnými náklady na výstavbu, avšak hustota uložené energie je také poměrně nízká [1].

2.5.1 Gravitační úložiště

Gravitační úložiště využívají k akumulaci změnu potenciální energie tělesa v tíhovém poli Země. Přebytečná energie ze sítě je využita ke zvedání závaží. Elektrická energie se tak transformuje na potenciální. Následně je v případě zvýšení poptávky spouštěním závaží přeměněna zpět na elektrickou. Nejběžnějším příkladem gravitačního úložiště jsou přečerpávací vodní elektrárny popsané zvláště v následující podkapitole. Jiné typy úložišť využívají coby závaží betonové bloky či kolejová vozidla [48].

Nejstarším mechanismem, který pro svůj pohon využíval uloženou potenciální energii, byly kyvadlové hodiny sestavené roku 1656. Vyosením kyvadla z klidové polohy došlo k jeho zvednutí. Prvním úložným systémem pro akumulaci elektrické energie byla přečerpávací vodní elektrárna vybudovaná ve Švýcarsku roku 1907. PVE se následně rozšířily po celém světě a staly se významným regulačním prvkem elektrizační soustavy. V současné době probíhá realizace a zkušební provoz několika experimentálních úložišť, které používají k ukládání energie pevné závaží. Jednotlivé projekty budou detailněji popsány v následující kapitole [2].

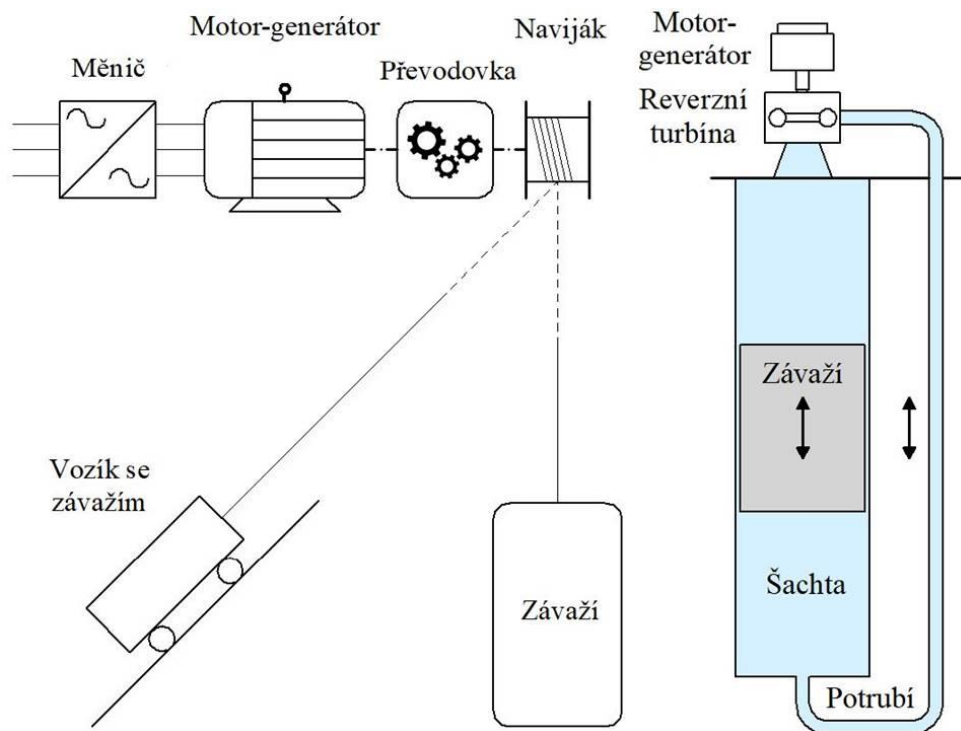
Princip

Úložné systémy se mohou výrazně lišit svou konstrukcí. Jejich fyzikální podstata je však vždy stejná. Zvedáním hmoty v tíhovém poli země zvyšovat její potenciální energii E_p . Tu lze vyjádřit pomocí následující rovnice

$$E_p = m \cdot g \cdot h, \quad (7)$$

kde m je hmotnost tělesa, g tíhové zrychlení ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$ pro Českou republiku) a h výška vůči zemi. Hustota uložené energie je obecně velice nízká ($0,2 - 3 \text{ kWh/m}^3$), proto nemá smysl budovat tato úložiště v malém měřítku [48].

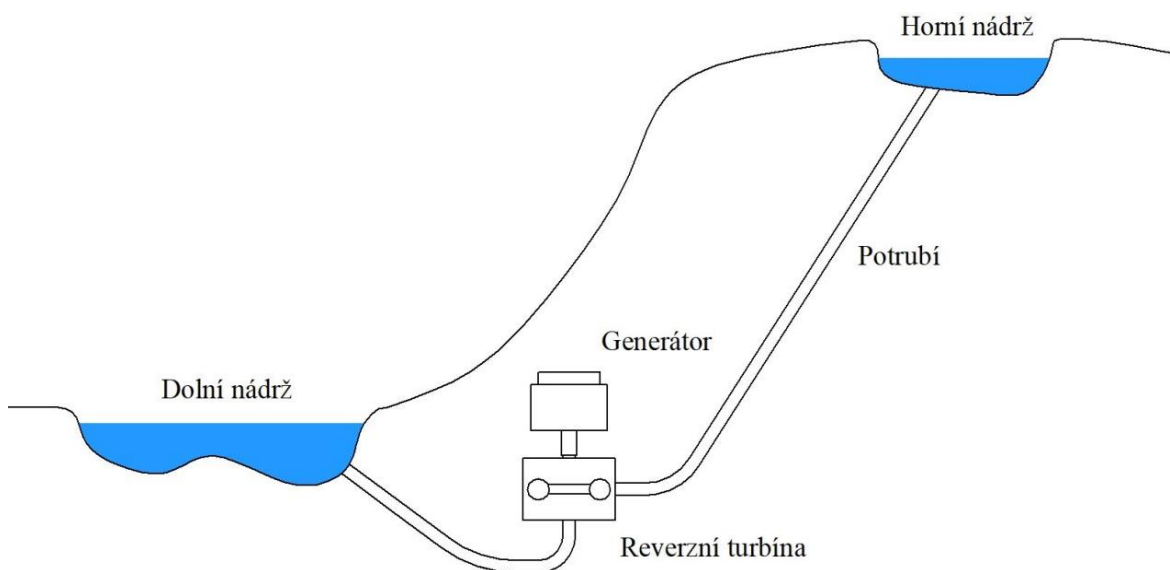
Pro zvedání závaží se ve většině případů používá lanový systém s navijákem, který je nejjednodušší a nejlevnější. Lze však využít například i systém obsahující reverzní turbínu, která vytlačuje vodu a tím zvedá závaží či píst se závažím.



Obr. 14 Principy gravitačních úložišť [49]

2.5.2 Přečerpávací vodní elektrárny (PVE)

Principem patří přečerpávací vodní elektrárny do kategorie gravitačních úložišť. Svou konstrukcí se však značně odlišují. Elektrická energie je transformována do potenciální energie vody, která je při přebytku energie v elektrizační soustavě čerpána turbínou do výše položené nádrže. V případě potřeby výroby elektrické energie se nechá voda proudit přes turbínu dolů.



Obr. 15 Princip přečerpávací vodní elektrárny

Přečerpávací vodní elektrárny představují v současné době nejvýhodnější způsob uchování většího množství přebytečné energie po delší dobu. Často jsou budovány jako doplněk k jaderným a velkým uhelným elektrárnám, jejichž výkon lze měnit jen omezeně. Přebytečná energie je proto akumulována a využita v době zvýšené poptávky. Tímto způsobem je zajištěna rovnováha mezi výkonem a spotřebou. Zároveň jsou schopny dodat těmto elektrárnám energii nutnou k jejich spuštění v případě odstávky [2].

Energie a účinnost

Během provozu dochází k energetickým ztrátám, které jsou způsobeny především valivým odporem a turbulencí vody v přivaděči. Na celkové ztráty má také vliv účinnost turbíny a generátoru. Souhrnná účinnost procesu dosahuje 70 - 80 % [2].

Tab. 13 Rozdělení účinnosti přečerpávacího systému [2]

	Minimální η [%]	Maximální η [%]
<i>Generování</i>		
Vodní přivaděč	97,4	98,5
Turbína	91,5	92,0
Generátor	98,5	99,0
Transformátor	99,5	99,7
Mezisosoučet	87,4	89,4
<i>Čerpání</i>		
Vodní přivaděč	97,6	98,5
Turbína	91,6	92,5
Motor	98,7	99,0
Transformátor	99,5	99,8
Mezisosoučet	87,8	90,0
Celková účinnost	72,2	80,1

Uloženou potenciální energii E_p lze vypočítat podle vztahu (7). Výkon P , který je schopna elektrárna generovat je dán rovnicí

$$P = Q \cdot \Delta h \cdot \rho \cdot g \cdot \eta , \quad (8)$$

kde Q je průtok v metrech krychlových za vteřinu, ρ hustota pracovní látky (vody) a η značí účinnost. Rozdíl hladin h a účinnost zařízení η vychází z konstrukce zařízení. Proměnnou, podle které se řídí výkon elektrárny, je tedy průtok Q . Z rovnice (8) je také patrné, že čím větší je spád h , tím menší může být průtok Q , při zachování výkonu a naopak. Konstrukci přečerpávací elektrárny je tedy možné do jisté míry přizpůsobit okolním podmínkám. V méně členitém terénu bude vhodné vybudovat elektrárnu s velkým průtokem. Naopak v horských podmínkách bude výhodné ve větší výšce umístit menší nádrž a nižší průtok kompenzovat převýšením [2].

Čas t' , po který je možné dodávat elektrickou energii je úměrný průtoku Q a objemové kapacitě horní nádrže V

$$t' = \frac{V}{Q}. \quad (9)$$

Konstrukce

PVE je nutné stavět v blízkosti vodních toků. Kvůli odpařování vody z obou nádrží a možným průsakům se musí voda průběžně doplňovat. Výhodná je také přestavba již existující vodní elektrárny, která může sloužit jako dolní či horní nádrž. Podle rozpoložení nádrží se PVE dělí na systémy s umělou nebo smíšenou akumulací vody [2].

Horní nádrž elektrárny s umělou akumulací vody je vytvořena bez přirozeného přítoku (např. PVE Dlouhé Stráně). Voda se do horní nádrže čerpá pouze z nádrže spodní. Obvykle má nepravidelný tvar kopírující terén. K vytvoření nádrže se většinou používají sypané hráze s asfaltovým či betonovým povrchem nebo plastovou fólií. Materiál pro tvorbu hrází je zpravidla získán přímo na místě během výkopu nádrže. Důležitým prvkem je bezpečnostní přeliv, který brání přečerpání. To by mohlo narušit strukturu sypané hráze.

Horní nádrž PVE se smíšenou akumulací je tvořena přehradní hrází v korytě řeky. Nádrž tedy disponuje umělým i přirozeným vodním přítokem. Celý systém se může nacházet na jednom toku (např. PVE Dalešice) nebo na dvou různých tocích (např. PVE Dobšiná na Slovensku) [50].

Strojovna je umístěna pod dolní nádrží či ve vyhloubené skalní kaverně. Provozní zařízení může mít čtyřstrojové uspořádání, které je tvořeno turbínou, generátorem, čerpadlem a motorem. Toto je vhodné zejména pro čerpání vody do velké výšky. Další možností je třístrojové uspořádání, kde je turbína spojena s čerpadlem a motorgenerátorem pomocí pevné či výsuvné spojky. Při použití pevné spojky je nutné zavzdušnění oběžného kola čerpadla, což způsobuje ztráty energie a časovou prodlevu. Posuvná spojka umožňuje provoz turbíny s odpojeným čerpadlem. Odpadají tak ztráty a je minimalizován čas přechodu mezi jednotlivými provozmi. Nejmodernějším řešením jsou však dvoustrojová uspořádání, které tvoří motorgenerátor a reverzní turbína. Nejběžnějším typem je dvousměrná turbína, která pracuje v jednom směru jako turbína a v druhém jako čerpadlo. Změna směru otáčení však prodlužuje dobu přechodu mezi provozními stavy. Některé turbíny jsou schopny při vhodném natočení lopatek pracovat i jako čerpadlo [2].

Alternativní možností je využití podzemních prostor jako dolní nádrže. Horní nádrž je umístěna na povrchu. K tomuto účelu mohou být využity například vysloužilé hlubinné doly či jeskynní systémy. Strojovna však musí být umístěna v podzemí a voda zbavena případných nečistot [51].

PVE v České republice

První PVE Černé jezero byla uvedena do provozu roku 1930. Disponovala výkonem 1,5 MW. Provoz je od roku 1960 omezen. Čerpání způsobuje kolísání hladiny jezera zhruba o 8 cm. Povolené rozmezí je +30 a -50 cm od ustálené hladiny. Přívodní a tlačné potrubí je vedeno zvlášť. Soustrojí se skládá z motorgenerátoru o výkonu 1 500 kW (příkon v motorovém režimu 1 750 kW), Peltonovy turbíny a odstředivého čerpadla na společné hřídeli [52].

Následně byla v roce 1938 spuštěna elektrárna Pastviny. V roce 1964 však byla přestavěna na průtočnou [53].

Třetí vybudovaná elektrárna Štěchovice byla zprovozněna roku 1947. Na přilehlém kopci Homole byla vybudována umělá nádrž o objemu 500 000 m³, která byla spojena s přílehlou přehradní nádrží pomocí ocelových přivaděčů o délce 590 m a průměru 1,7 - 2 m. V roce 1992 prošla rekonstrukcí, při které byla instalována reverzní Francisova turbína o výkonu 45 MW [54].

V roce 1978 byla jako součást komplexu jaderné elektrárny v Dukovanech vystavěna PVE Dalešice. Skládá se z horní přehradní Nádrže v Dalešicích s objemem 127 mil. m³ a vyrovnávací nádrže Mohelno. Vodu do strojovny přivádí 4 ocelová potrubí o průměru 6,2 m. Nacházejí se zde čtyři soustrojí s reverzními Francisovými turbínami o celkovém výkonu 480 MW [54].

Nejnovější českou PVE elektrárnou jsou Dlouhé Stráně. Nachází se v chráněné krajinné oblasti Hrubého Jeseníku. Z tohoto důvodu je veškerá infrastruktura včetně vodních přivaděčů a strojovny skryta v podzemí. Do provozu byla elektrárna uvedena roku 1996. Ve strojovně se nacházejí dvě reverzní Francisovy turbíny o výkonu 2 x 325 MW, které jsou největší v Evropě. Horní nádrž o objemu 2,72 mil. m³ se nachází ve výšce 1350 m a je spojena přivaděči o průměru 3,6 m se dvěma reverzními turbosoustrojími. Náklady na stavbu činily 6 miliard korun [54].

V budoucnu by mohlo dojít k úpravě vodní elektrárny Orlík na elektrárnu přečerpávací. Čtyři stávající Kaplanovi turbíny budou vyměněny za Francisovy turbíny, z nichž dvě budou reverzní. Současně je vytipováno šest vhodných lokalit pro stavbu zcela nových elektráren. Ta nejvhodnější je u Frýdku-Místku. V lokalitě se nachází přehradní nádrž Morávka a přilehlý kopec Slavíč, na kterém by bylo možné zbudovat objemnou horní nádrž. Spád elektrárny by mohl činit zhruba 500 m a výkon 1 124 MW. Odhadované náklady na stavbu jsou však 30 mld. Kč, což představuje pětinasobek ceny výstavby PVE Dlouhé Stráně [54], [55].

Tab. 14 Významné české přečerpávací elektrárny [54], [56], [57]

	Štěchovice II	Dalešice	Dlouhé Stráně
Spuštěno	1947	1978	1996
Výkon [MW]	45	480	650
Počet soustrojí	1	4	2
Spád [m]	210	90	530
Průtok [m ³ /s]	24 (výroba) 21 (čerpání)	150 (výroba) 137,5 (čerpání)	68,6 (výroba) 54,5 (čerpání)
Doba náběhu [s]	100	60	400
Horní nádrž [mil. m ³]	0,467	127	2,72
Kapacita [MWh]	200	2 300	3 700

PVE ve světě

Ve světě jsou provozovány stovky přečerpávacích elektráren a jejich počet dále narůstá. Elektráren s výkonem větším než 1 GW je 61. Celkový instalovaný výkon přesahuje 150 GW. Největším zařízením je elektrárna Bath County v USA s výkonem 3,0 GW. V přímořských oblastech jsou také stavěny elektrárny využívající mořskou vodu. Tyto elektrárny tak obsahují pouze horní nádrž. Příkladem je elektrárna Okinawa Yanabaru s výkonem 1,9 GW v Japonsku. Ve výstavbě se nachází řada nových zařízení zejména v Číně, včetně elektrárny Fengning s výkonem 3,6 GW. V Austrálii probíhá příprava projektu Snowy 2.0, jež má za cíl propojit dvě stávající vodní elektrárny a nabídnout tak skladovací kapacitu až 350 GWh [58].

Tab. 15 Světově významné přečerpávací elektrárny [58]

Název	Země	Výkon [MW]	Kapacita [MWh]
Fenging	Čína	3 600	40 000
Bath County	USA	3 000	24 000
Hizhou	Čína	2 450	-
Guangdong	Čína	2 400	-
Okutataragi	Japonsko	1 930	15 546
Ludington	USA	1 870	19 548
Grand'Maison Dam	Francie	1 800	34 800

2.5.3 Úložiště stlačeného vzduchu (CAES)

Skladování energie prostřednictvím stlačeného vzduchu umožňuje při nízkých investičních nákladech ukládat stovky megawatthodin až jednotky gigawatthodin elektrické energie. Hlavní výhodou představuje schopnost dodávat několik hodin vysoký výstupní výkon obdobně jako přečerpávací vodní elektrárny. Systémy také vynikají vysokou životností a zanedbatelným samovybíjením. Zásadní nevýhodou však představuje nízká celková účinnost a hustota energie 3 - 6 kWh/m³ [2].

Stlačený vzduch je možné skladovat nejrůznějšími způsoby od nadzemních vysokotlakých nádrží až po podzemní prostory, doly, jeskyně či kaverny. To představuje výhodu oproti PVE, jež potřebují ke svému provozu specifickou geografii a mohou mít rozsáhlý dopad na životní prostředí. Nalezení vhodné lokality a vybudování podzemního zásobníku stlačeného vzduchu je snazší. Je však nutné počítat i s přívodem paliva do dané lokality, což využití v některých místech komplikuje [2].

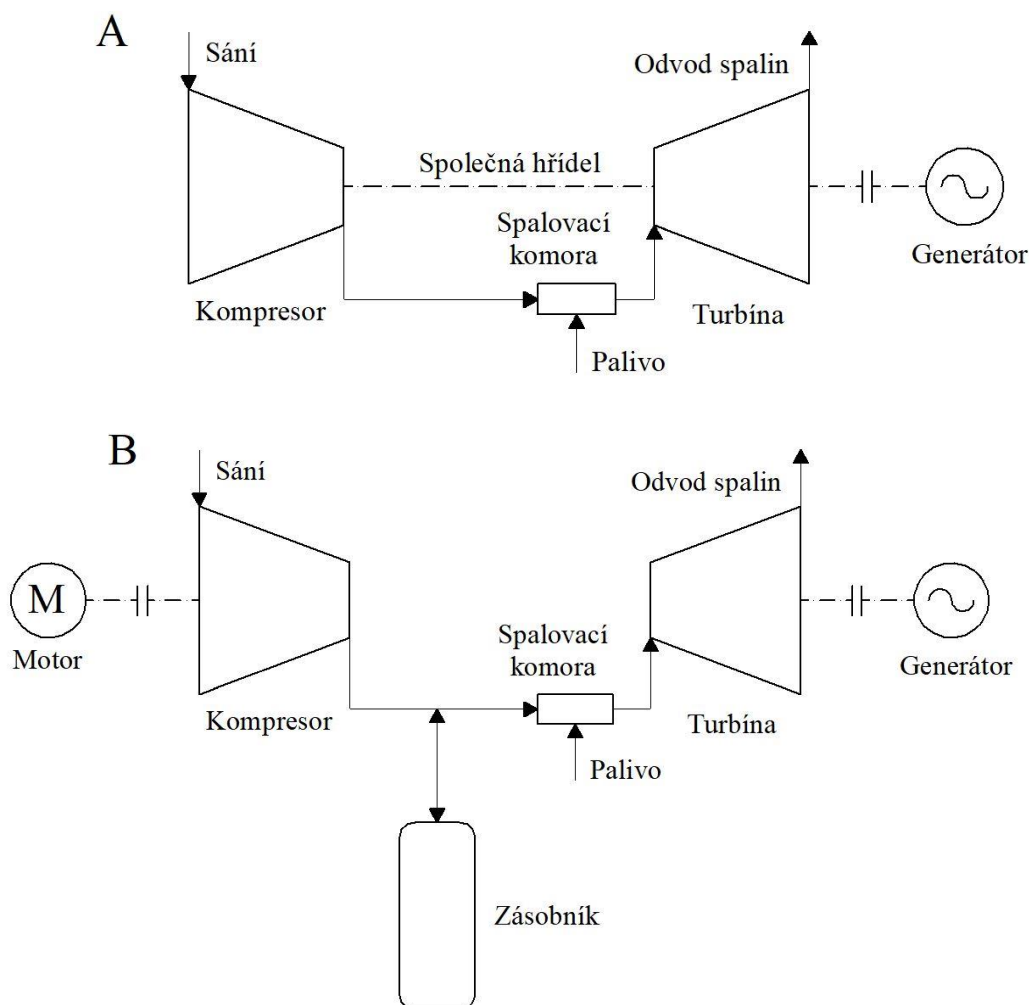
Princip

Systémy s úložištěm stlačeného vzduchu pracují stejným způsobem jako konvekční plynové turbíny s tím rozdílem, že komprese a expanze probíhá v různém čase. Kompresní energie není dodávána samotnou plynovou turbínou, ale odděleným kompresorem poháněným elektromotorem. Stlačený vzduch z kompresoru je dále veden do úložiště. Během expanze tak lze využít celý výkon turbíny pro výrobu elektrické energie. U konvenční spalovací turbíny jsou zhruba 2/3 výkonu využity pro pohon kompresorů. V kompresním řetězci jsou zařazeny mezichladiče a dochlazovač pro zvýšení účinnosti a snížení objemu skladovaného vzduchu. Celková spotřeba paliva je při stejném výstupním výkonu třikrát nižší než u konvenční spalovací turbíny. Účinnost spalovacího tepelného cyklu spalovací turbíny přesahuje 60% [2].

Množství energie E uložené v zásobníku o objemu V , tlaku p a teplotě okolí lze vypočítat pomocí následujícího vztahu

$$E = p \cdot V \left[\ln \left(\frac{p}{p_a} \right) - 1 + \frac{p_a}{p} \right]. \quad (10)$$

p_a představuje atmosférický tlak. Hodnota energie odpovídá úplné expanzi za izotermických podmínek [1].



Obr. 16 A - spalovací turbína bez úložiště, B - spalovací turbína v kombinaci s úložištěm [2]

Realizovaná úložiště

Energetické systémy výroby, skladování a rozvodu stlačeného vzduchu se budují od roku 1870. V té době představovaly hlavní prostředek přenosu energie dodávané do domů a průmyslových celků, kde poháněly strojní zařízení pekáren, tiskáren, textilek či zubních lékařů. Roku 1896 disponoval pařížský systém rozvodu vzduchu výkonem 2,2 MW. V současné době jsou v chodu dvě plynové elektrárny kombinované s úložištěm vzduchu, které vznikly za účelem pokrytí špičkových odběrů elektrické energie. Souběžně probíhá zkušební provoz dalších úložišť. Nutno podotknout, že řada připravovaných projektů skončila neúspěchem z důvodů nerentability [59].

První elektrárna s úložištěm vzduchu byla vybudována roku 1978 v německém městě Huntorf poblíž Brém. Elektrárna o výkonu 320 MW poskytovala služby pro start ze tmy a dodávání levné energie v době špičkových odběrů. V oblasti poblíž vybudované elektrárny se nachází několik jaderných bloků, které v případě potřeby obnovení provozu vyžadují dodávku energie, které jim zařízení může poskytnout [60].

Podzemní část závodu se skládá ze dvou solných jeskyní o kapacitě 310 000 m³ provozovaných při tlaku mezi 4,8 a 6,6 MPa. Jako palivo je použit zemní plyn, který může být v budoucnu nahrazen vodíkem. Soustrojí se skládá z nízkotlakých a vysokotlakých kompresorů v sériovém zapojení o výkonu 60 MW a dvoustupňové plynové turbíny. Během stlačování je přebytečné teplo uvolňováno do okolí, což vede ke ztrátám a snížení účinnosti. Kapacita uložené energie odpovídá 1 200 MWh [2], [60].

Další větší úložiště bylo uvedeno do provozu roku 1991 v americké Alabamě. Elektrárna McIntosh o výkonu 110 MW využívá k akumulaci vzduchu solnou kavernu o objemu 560 000 m³. Celková kapacita činí 2 800 MWh. Zařízení disponuje rekuperátorem tepla, což vede ke snížení ztrát energie a spotřeby paliva přibližně o 20 %. Palivem je zemní plyn nebo topný olej [2].

Tab. 16 Provozovaná úložiště stlačeného vzduchu [61]

Název	Země	Spuštěno	Výkon [MW]	Kapacita [MWh]	Účinnost [%]	Pracovní tlak [MPa]
Huntorf	Německo	1978	320	640	29	4,8 - 6,6
McIntosh	USA	1991	110	2 800	36	< 7,6

Tab. 17 Uvažovaná úložiště stlačeného vzduchu [61]

Název	Země	Zahájeno	Status	Výkon [MW]	Kapacita [MWh]
Apex	USA	2019	Výstavba	≈ 350	16 000
Feicheng	Čína	2019	Zkoušky	1 250	7 500
Zhongyan	Čína	2017	Zkoušky	50	200
Norton	USA	2001	Zrušeno	2 700	-
Seneca	USA	2010	Zrušeno	200	2 000

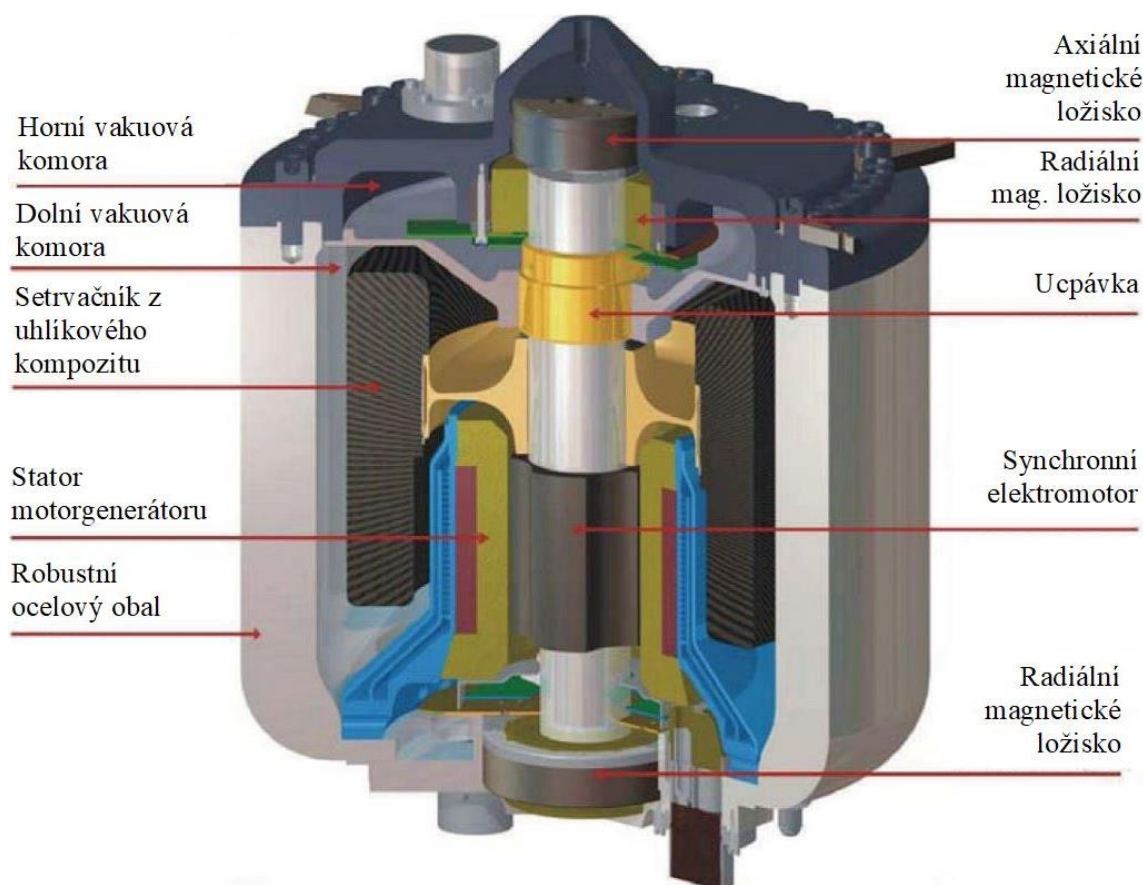
2.5.4 Setrvačníky (FES)

Setrvačnicková úložiště, anglicky flywheel energy storage (FES), patří k nejstarším formám ukládání energie. Našly široké uplatnění zejména ve stabilizaci nerovnoměrného točivého momentu v motorech a jiných strojích. V energetice jsou využívány zejména v oblasti regulace frekvence a napětí díky své schopnosti krátkodobě poskytovat vysoký výkon. Nyní je stabilita elektrizační soustavy zajištěna velkými točivými stroji s vysokými momenty setrvačnosti, které jsou schopny pokrýt krátkodobé výkonové výkyvy ve spotřebě. V budoucnu by jejich roli mohly převzít právě setrvačníky [1].

Setrvačníky mají velmi vysokou životnost přesahující 200 tisíc nabíjecích cyklů a účinnost až 90 %. Nevýhodou jsou vysoké náklady na konstrukci zařízení související se zvýšenými požadavky na bezpečnost a odolnost zařízení. V minulosti došlo k několika vážným nehodám, které vedly k velkým škodám na zařízení a těžkým i smrtelným zraněním. Během provozu dochází také k rychlému samovybíjení (3 - 20 %/hod). Z tohoto důvodu musí být kontinuálně přiváděna elektrická energie pro udržování nominálních otáček [1].

Princip

Setrvačnickový systém se obecně skládá z elektrického měniče a synchronního motoru spojeného s rotující hmotou. Během akumulace energie roztáčí synchronní motor setrvačnick a transformuje tím elektrickou energii na kinetickou. Při vybíjení přechází synchronní motor do generátorického režimu a převádí kinetickou energii setrvačnicku zpět na elektrickou. Pomocí měniče je na výstupu dosaženo požadované frekvence a napětí navzdory klesajícím otáčkám [62].



Obr. 17 Průřez setrvačnickovým úložištěm [62]

Pokročilé systémy využívají rotory a setrvačné hmoty vyrobené z vysoce pevných kompozitních materiálů uložené v magnetických ložiscích ve vakuové skříni pro snížení tření a energetických ztrát. Hybridní magnetická ložiska obsahují permanentní magnety, které poskytují zvedací sílu a vysokoteplotní supravodivá ložiska sloužící ke stabilizaci rotoru. Tyto setrvačníky mohou rotovat rychlostí přesahující 50 000 otáček za minutu [63].

Množství kinetické energie E_k , uložené v setrvačnicku je možné spočítat dle následujícího vztahu

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2, \quad (11)$$

kde J je moment setrvačnosti tělesa a ω úhlová rychlost. Moment setrvačnosti závisí na rozložení hmoty vzhledem k ose otáčení. V případě homogenního tělesa lze vyjádřit dle následujícího vztahu

$$J = \rho \int_V r^2 dV, \quad (12)$$

kde ρ je hustota tělesa, r vzdálenost od osy rotace a V objem. Setrvačníky mají obecně tvar válce. Moment setrvačnosti plného homogenního válce lze vypočítat dle vztahu

$$J = \frac{1}{2}mr^2, \quad (13)$$

kde m je hmotnost a r vzdálenost od osy rotace. Případně mohou mít tvar tlustostěnného pláště s momentem setrvačnosti [1]

$$J = \frac{1}{2}m(r_2^2 + r_1^2). \quad (14)$$

Měrná energie je obvykle 100 až 130 Wh/kg. Maximální měrná energie rotoru setrvačnicku je závislá především na dvou faktorech: na geometrii rotoru a na vlastnostech použitého materiálu. Pro homogenní izotropní rotory lze tento vztah vyjádřit jako

$$\frac{E_k}{m} = K \left(\frac{\sigma}{\rho} \right), \quad (15)$$

kde K je koeficient geometrického tvaru rotoru a σ mez pevnosti v tahu. Nejvyšší teoretická hodnota tvarového koeficientu pro disk s konstantně rozloženým napětím je 1. U většiny setrvačnicku s hřídelí je hodnota rovna zhruba 0,3. Pro bezhřídelové setrvačníky se hodnota blíží 0,6 [64].

Tab. 18 Materiály vhodné pro výrobu setrvačnicku [65]

Materiál	Hustota ρ [kg/m ³]	Mez pevnosti σ [MPa]	Měrná energie [kJ/kg]	Náklady [Kč/kg]
Ocel (AISI 4340)	7 800	1 800	231	50
Hliník	2 700	600	220	150
Titan	4 500	1 200	270	450
Uhlíkový kompozit (S2)	1 920	1 470	766	1 200
Uhlíkový kompozit (T1000G)	1 664	3 620	2 175	5 000

Realizovaná úložiště

Setrvačnickové úložné jednotky jsou efektivní pouze pro krátkodobé ukládání energie. Často se používají v nepřerušitelných zdrojích energie, kdy jsou schopny překlenout dobu mezi výpadkem napájení a aktivací záložního zdroje nebo k regulaci kolísání proudu v rozvodné síti. V budoucnu by mohly nahradit roli velkých generátorů v oblasti stabilizace elektrizační sítě. Typické kapacity úložné jednotky se pohybují od 3 kWh do 130 kWh. Maximální kapacita je omezena konstrukčními možnostmi [66].

V roce 2011 byl v americkém Stephentown spuštěn komplex společnosti Beacon Power, který poskytuje služby regulace frekvence pro oblast New York. Zařízení obsahuje 200 setrvačníků z uhlíkových vláken o souhrnném výkonu 20 MW a kapacitě 5 MWh. Jednotky pracují při maximální rychlosti $15\,000\text{ min}^{-1}$. Systém s obdobnými parametry byl následně spuštěn v americké Pensylvánii [67].

V kanadském Ontariu provozuje společnost Temporal Power Ltd. od roku 2014 setrvačnickovou akumulární elektrárnu o výkonu 2 MW. Skládá se z 10 setrvačníků vyrobených z oceli. Každý setrvačník má hmotnost 4 tuny. Maximální rychlost otáčení je $11\,500\text{ min}^{-1}$. Systém se používá pro regulaci frekvence. Po úspěšném zkušebním období by měl být systém rozšířen na výkon 100 MW [68].

Izraelská společnost Chakratec nabízí mobilní úložné jednotky na principu setrvačnicku. Ty jsou využívány v kombinaci s nabíjecími stanicemi pro elektrická vozidla. Jednotky umožňují dodávat vyšší nabíjecí výkon, než jaký je schopna distribuční síť v daném místě poskytnout. Pokud není k nabíjecí stanici připojeno žádné vozidlo, setrvačnický akumulují elektrickou energii. Po připojení vozidla dochází k nabíjení ze sítě i ze setrvačníků současně. Jedna ze zkušebních nabíjecích stanic je instalována v pražských Letňanech. Jednotka obsahuje deset setrvačníků o souhrnném výkonu 40 kW a kapacitě 30 kWh. Každý setrvačník má hmotnost 150 kg. Otáčky se pohybují v rozmezí od $7\,000\text{ min}^{-1}$ do $18\,000\text{ min}^{-1}$. Maximální dostupný výkon v dané lokalitě je 40 kW. V kombinaci se setrvačnickovým úložištěm je možné nabíjet vozidla výkonem 75 kW. Výhodou tohoto systému je dlouhá životnost oproti chemickým úložištím až 200 000 nabíjecích cyklů. Značnou nevýhodu představují vysoké investiční náklady, které se pohybují okolo 90 000 Kč/kWh a vysoká vlastní spotřeba energie [69], [70], [71].

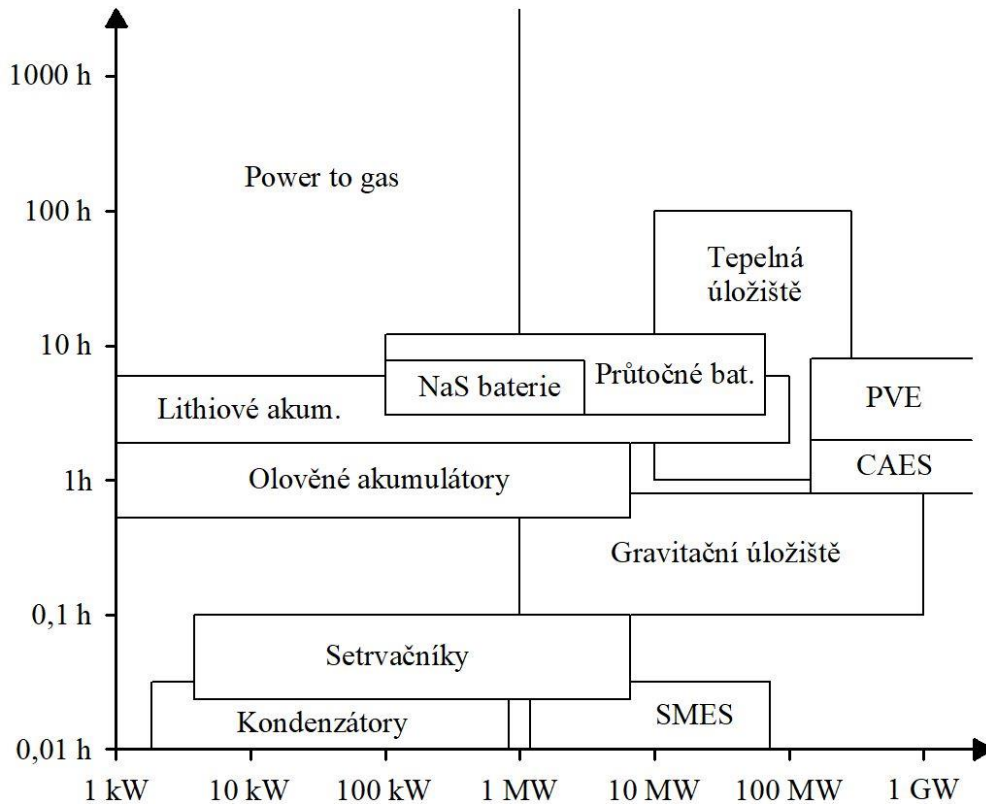
2.6 Srovnání

Následující tabulka shrnuje důležité parametry všech uvedených úložných systémů. Uváděné náklady vycházejí převážně z již realizovaných úložišť, přičemž platí, že se zvětšující se kapacitou měrné náklady klesají. Vzhledem k probíhajícímu vývoji systému power to gas jsou náklady na výstavbu těžko odhadnutelné. S přihlédnutím ke způsobu jejich provozu je spíše než cyklická životnost důležitá doba jejich provozu v hodinách. Ta závisí na životnosti palivových článků či elektrolyzérů jakožto nejcitlivějších komponent.

Tab. 19 Srovnání technologií pro ukládání energie

Typ	Měrná energie [Wh/kg]	Hustota energie [kWh/m ³]	Cyklická životnost [-]	Účinnost [%]	Přibližné náklady [Kč/kWh]
Průtočná baterie	35	15 - 25	> 10 000	75	8 000
Olověný akumulátor	40	70	500 - 700	90	1 500
Li-Ion akumulátor	200	530	1 000	80 - 90	3 000
LFP akumulátor	150	325	5 000	80 - 90	2 000
NaS baterie	170	150	4 500	85	8 000
Superkondenzátory	3,9	2,9	1 000 000	95	180 000
SMES	10	0,1	∞	> 95	40 000
Vodíková úložiště	33 000	-	-	40	-
Syntetický metan	12 100	-	-	35	-
Tepelná úložiště	40 - 110	75 - 200	15 000	35 - 75	600
Gravitační úložiště	-	0,2 - 3	10 000 - 100 000	90	3 500 - 25 000
PVE	-	1 - 2	35 000	70	1 500
CAES	0,4 - 20	3 - 6	30 000	30 - 60	1 000
Setrvačníky	100 - 130	20 - 80	200 000 - 1 000 000	90	20 000 - 100 000

Obr. 18 znázorňuje uváděné typy úložných systémů v závislosti na výstupním výkonu, pro který se obvykle navrhují, a na době, po kterou jsou schopny tuto energii poskytovat. Součin výkonu a času odpovídá kapacitě energie, kterou úložiště umožňuje akumulovat. To odpovídá jednotlivým plochám vyznačeným v grafu.



Obr. 18 Znázornění závislosti dodávaného výkonu v čase

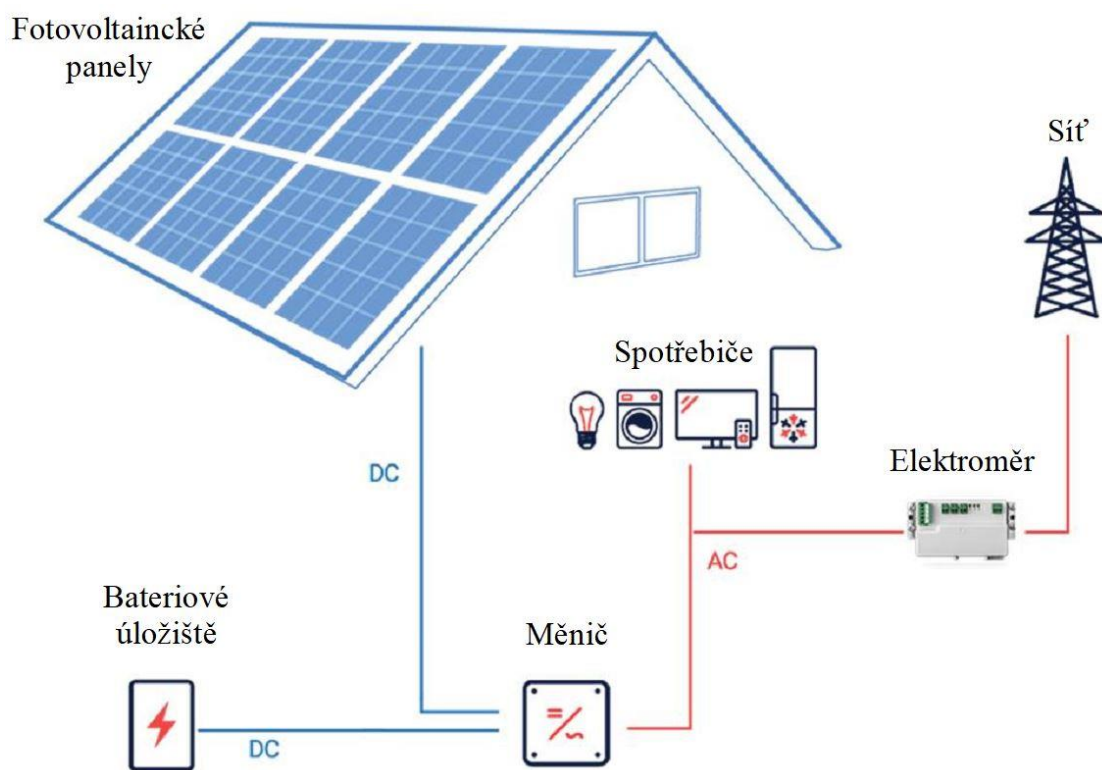
Tab. 20 jsou uvedeny všechny typy v této práci analyzovaných technologií společně s jejich hlavními výhodami, omezeními a možnostmi využití.

Tab. 20 Výhody, omezení a vhodné oblasti použití

Technologie	Výhody	Omezení	Použití
Průtočná baterie	Dlouhá životnost Jednoduchá konstrukce	Nízká hustota energie Nízká účinnost Nízký stupeň vývoje	Záložní zdroje Hromadné skladování Pokrytí špiček
Olověné baterie	Nízké náklady Bezpečnost Odolnost	Nízká hustota energie Hmotnost Toxicita	Malá úložiště Ostrovní systémy Záložní systémy
Lithiové baterie	Vysoká hustota energie Nízká hmotnost Vysoká účinnost	Nízká životnost Bezpečnost	Domácí úložiště Průmyslová úložiště Hromadné sklad. Pokrytí špiček
Sodíkové baterie	Vysoká hustota energie Vysoká účinnost Dlouhá životnost	Vysoké provozní teploty Náročná výroba Nízký stupeň vývoje	Hromadné skladování Pokrytí špiček
Kondenzátory	Vysoké výkony Dlouhá životnost Vysoká účinnost	Samovybíjení Nízká hustota energie Vysoké náklady	Zdroje vysokého výkonu Stabilizace sítě
SMES	Vysoké výkony Vysoká účinnost Téměř neomezená životnost	Investiční a provozní náklady	Provozy citlivé na kvalitu energie Stabilizace sítě
Power to gas	Akumulace velkého množství energie Vysoká hustota energie	Nízká celková účinnost Nízký stupeň vývoje Vysoké náklady	Sezónní ukládání energie
Tepelná úložiště	Vysoká hustota energie	Nízká účinnost	Hromadné skladování Pokrytí špiček Přímé dodávky tepla
PVE	Vysoký objem uskladněné energie Dlouhá životnost	Málo vhodných lokalit Obtížná výstavba	Hromadné skladování
CAES	Nízké náklady	Nízká účinnost Nízká hustota energie Dodávky paliva	Hromadné skladování
Setrvačníky	Vysoký výkon Dlouhá životnost	Vysoké náklady Samovybíjení	Stabilizace sítě Záložní zdroje

2.6.1 Malé úložné systémy

Do této kategorie patří domácí úložiště či úložiště pro jednotlivé průmyslové objekty. V naprosté většině je tvoří bateriové systémy obsahující olověné či lithiové akumulátory. Ty se začínají prosazovat zejména v kombinaci s fotovoltaickými panely. Domácí úložiště umožňují akumulovat přebytečnou energii vyrobenou během dne a její následné využití ve večerních hodinách pro pohon spotřebičů, tepelných čerpadel a výhledově i nabíjení vozidel. Zároveň představují zálohu pro případ výpadku dodávek z distribuční sítě. S postupujícím omezováním používání kotlů na tuhá paliva či zemní plyn se jejich význam ještě zvýší a v kombinaci s tepelným čerpadlem umožní některým objektům dosáhnout energetické soběstačnosti.



Obr. 19 Domácí úložný systém [72]

S rozvojem elektromobility a využitím elektrického vytápění vzrůstají také nároky na distribuční síť. V mnohých oblastech nemusí její výkon stačit budovaným dobíjecím stanicím. Řešením však může být posílení distribuční soustavy o menší kontejnerová úložiště instalovaná jako součást trafostanic či samotných nabíjecích stanic. To by zejména pro odlehle oblasti, kde často dochází k výpadkům energie, představovalo možnost, jak zachovat její dodávku po dobu odstranění závady.



Obr. 20 Kontejnerové úložiště [73]

2.6.2 Průmyslové úložné systémy

Pod průmyslové úložné systémy spadají velká úložiště, která mají za úkol akumulovat energii z obnovitelných zdrojů, nadbytečnou energii z jaderných elektráren a stabilizovat rozvodnou soustavu. S odklonem od fosilních paliv a zvyšujícím se zastoupením obnovitelných zdrojů energie budou hrát velká úložiště významnou roli. Na území České republiky zřejmě bude muset vzniknout řada nových úložišť, s největší pravděpodobností na bázi lithiových baterií. Ty je možné umístit prakticky kdekoliv. Nejvhodnějšími místy jsou objekty zrušených uhelných elektráren, které disponují potřebnou plochou a připojením k rozvodné soustavě. V současné době však omezuje jejich výstavbu legislativa, která na takovéto úložné systémy nepamatuje.

Největším zatím uvažovaným projektem je již zmiňovaná přečerpávací elektrárna Slavíč. Maximální udávaný výkon činí 1 124 MW. Z dalších dat je možné odhadnout úložnou kapacitu. Vodní nádrž Morávka (dolní nádrž) disponuje celkovým objemem 12 mil. m³. Z tohoto množství představuje 6,5 mil. m³ ochranný prostor pro zadržování vody z přívalových dešťů. Další 0,5 mil. m³ tvoří stálá minimální zásoba. Pro účely přečerpávací elektrárny by tak mohlo být využito nejvýše 5 mil. m³ vody [55], [74].

Za předpokladu, že by na přilehlém kopci Slavíč byla umístěna horní nádrž o ploše 0,3 km² a hloubce 25 m, což je hloubka horní nádrže PVE Dlouhé Stráně, a s přihlédnutím ke zkosenému tvaru hráze by kapacita činila právě 5 mil. m³. Výškový rozdíl obou nádrží by dosahoval asi 500 metrů. Celková úložná kapacita se započtením účinnosti přečerpávacího soustrojí 75 % by dosahovala přibližně 5 GWh.



Obr. 21 Nákres uvažované přečerpávací elektrárny Slavíč (mapové podklady Mapy.cz)

3 Gravitační úložiště energie

V následující kapitole bude popsáno několik projektů gravitačních úložišť energie. Společným znakem všech gravitačních úložišť je především jejich jednoduchost a využití známých a ověřených technologií. Většinou se skládají z velkých točivých strojů a mohou poskytovat podpůrné služby, jako jsou udržování frekvence a výkonové rovnováhy přenosové soustavy či start ze tmy. Jsou také šetrné k životnímu prostředí a mohou fungovat až několik desetiletí.

Vzhledem k nízké energetické hustotě však nejsou vhodné ke skladování velkého množství energie s výjimkou PVE. To lze demonstrovat na následujícím příkladu. Pro uložení 1 kWh elektrické energie by bylo třeba spouštět závaží o hmotnosti 10 tun po dráze zhruba 40 metrů. Komerční úložiště tak z ekonomického hlediska nemá smysl stavět v malém měřítku. Pro stavbu většího úložiště jsou však potřeba i značné investiční náklady.

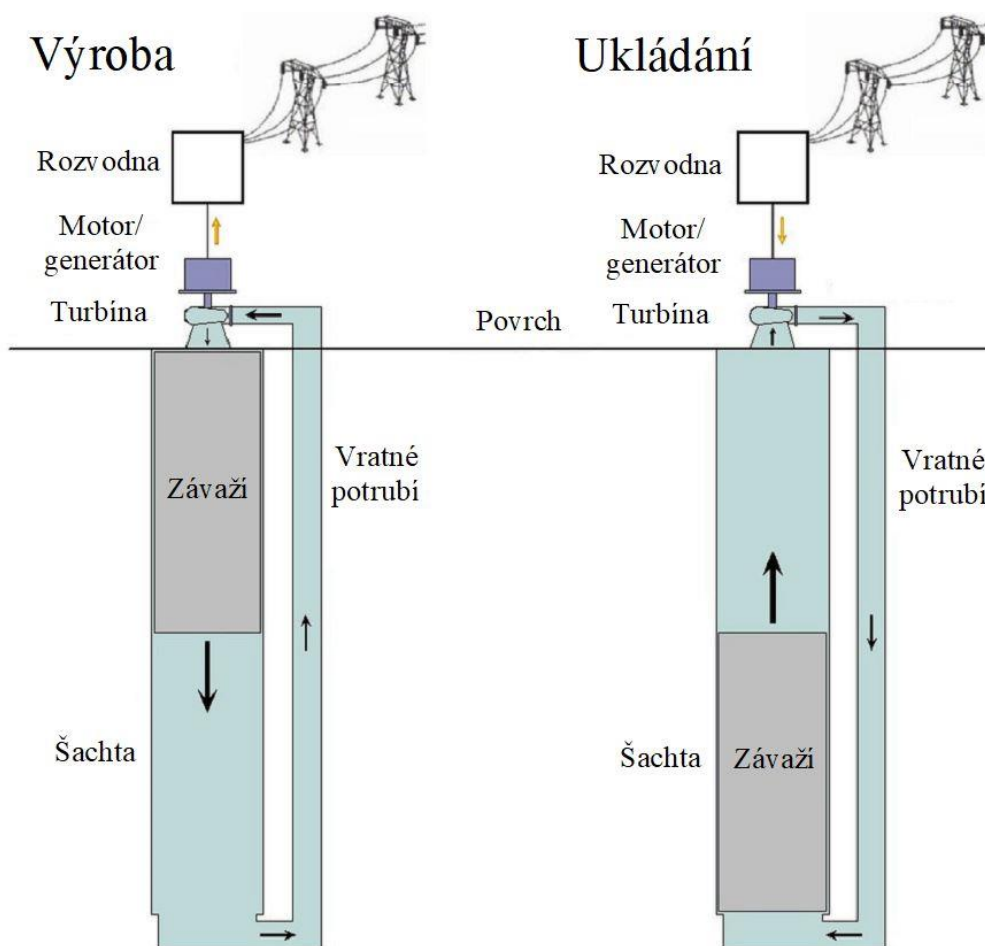
Služby výkonové rovnováhy a pokrytí výkonových špiček aktuálně poskytují především plynové elektrárny, které jsou relativně levné a výkonné. Rozvoj úložných systémů se tak neobejde bez podpory ze strany vlád a investorů. Vývojem těchto úložišť se zabývá několik startupových společností popsaných níže.

3.1 Gravity Power Module

Úložiště je produktem společnosti Gravity Power se sídlem v Kalifornii. Firma se zabývá vývojem úložných jednotek v průmyslovém měřítku [49].

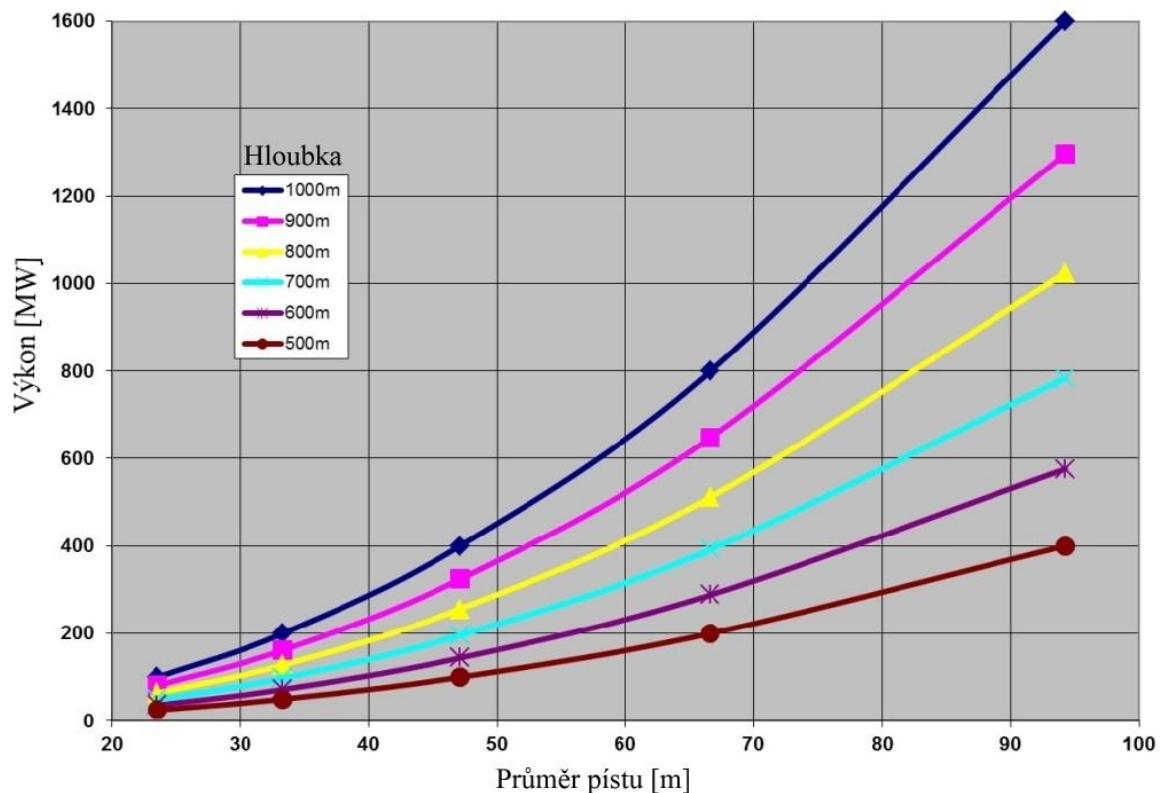
3.1.1 Koncept

Celý úložný systém je umístěn pod zemí. Skládá se z šachty zaplněné vodou. V ní se nachází píst se závažím. Těsnění upevněné okolo pístu brání průsakům vody. Samotný píst je tvořen železobetonovými disky, které mají vysokou hmotnost a zároveň přijatelnou cenu. Šachta je v horní a dolní části spojena potrubím s reverzní Francisovou turbínou. Během procesu ukládání energie pracuje turbína v čerpadlovém režimu. Vtlačuje vodu pod píst a tím jej zvedne do horní části šachty. Při výrobě elektrické energie píst naopak klesá a vhání vodu vratným potrubím do turbíny. Princip je znázorněn níže [49].



Obr. 22 Princip Gravity Power Module [49]

Kapacita úložiště závisí především na dráze, po které se závaží pohybuje a na jeho hmotnosti. Dráha pohybu závaží je přibližně rovna rozdílu hloubky šachty a výšky závaží. Výkon úložiště je úměrný především průměru pístu a hloubce hlavní šachty. Následující graf popisuje závislost výkonu úložiště na průměru pístu pro různé hloubky šachet. Uváděný výkon je možné dodávat po čtyři hodiny provozu.

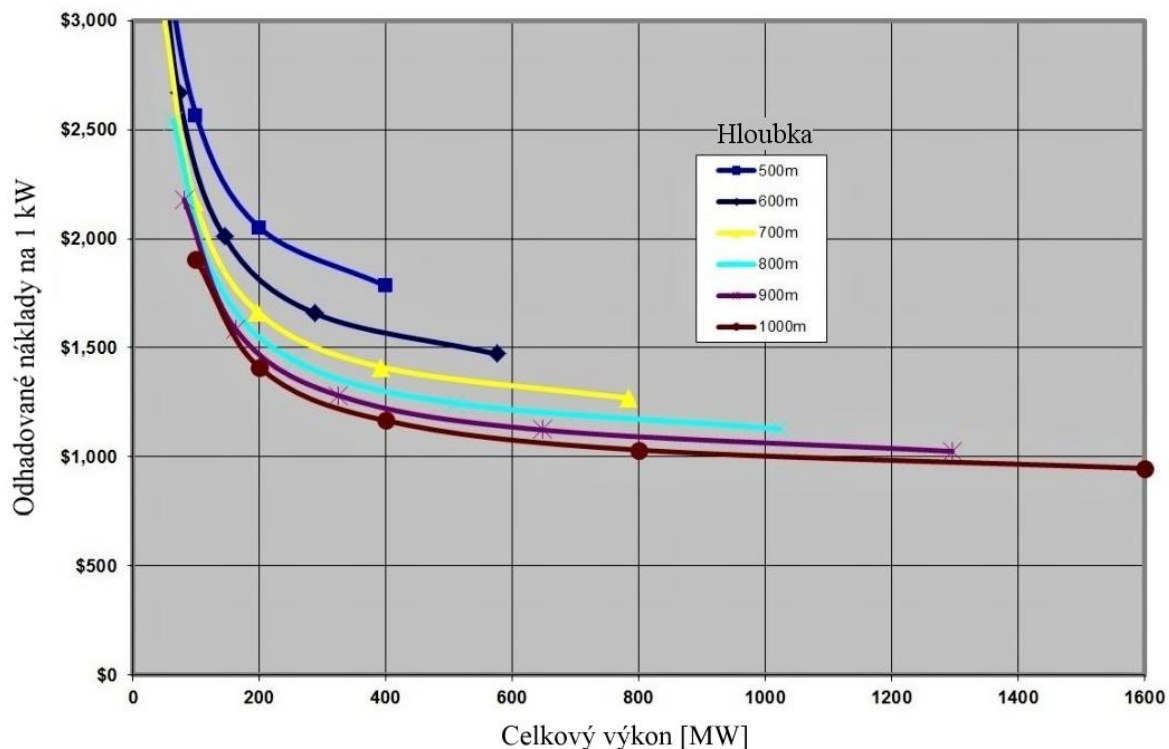


Obr. 23 Závislost výkonu na průměru pístu [49]

Hlavní výhodou představuje umístění úložiště kompletně pod zemí. Tím se značně redukuje potřebná plocha pro stavbu, což umožňuje instalaci i do zastavěných oblastí. Mezi další výhody patří modularita a dlouhá životnost. Výkon úložiště je škálovatelný od 50 MW do 1 600 MW, přičemž náklady na kW klesají a účinnost se zvyšuje s rostoucí velikostí. Podle výrobce se účinnost systému pohybuje v rozmezí 75 – 80 %. Závisí především na účinnosti turbíny, ale také na možných průsacích kolem závaží [49].

3.1.2 Ekonomika

Náklady na výstavbu jsou z větší části tvořeny cenou vybudování šachty. Předpokladem je, že výrobou razicího zařízení a následnou stavbou unifikovaných úložišť by mělo dojít k jejich značnému snížení. Závislost odhadovaných stavebních nákladů za 1 kW na celkovém výkonu znázorňuje následující graf [49], [75].



Obr. 24 Závislost odhadovaných nákladů na celkovém výkonu [49]

Odhadované náklady se pohybují okolo 25 000 Kč/kWh. Předpokládaná doba výstavby úložiště s výkonem 400 MW se pohybuje okolo 36 měsíců. Turbína s generátorem je schopna plného náběhu za zhruba 20 sekund a může mít široký rozsah výkonů. Díky tomu mohou úložiště poskytovat doplňkové služby jako regulace frekvence a výkonu, čímž mohou přímo nahradit menší elektrárny s plynovou turbínou [76].

Tab. 21 Parametry úložišť Gravity Pover Module [49]

Průměr šachty	20 - 100 m
Hloubka šachty	500 - 1000 m
Výška pístu	250 - 500 m
Hmotnost závaží	0,5 - 9 miliónu tun
Výkon	50 - 1 600 MW
Kapacita	200 - 6 400 MWh
Přibližná cena	25 000 Kč/kWh

3.1.3 Demonstrační model

V současné době probíhá příprava několika demonstračních modelů. Navzdory relativně nízkým nákladům na uloženou kilowatthodinu jsou celkové náklady na výstavbu velmi vysoké. Společnost nyní shání finanční prostředky pro stavbu.

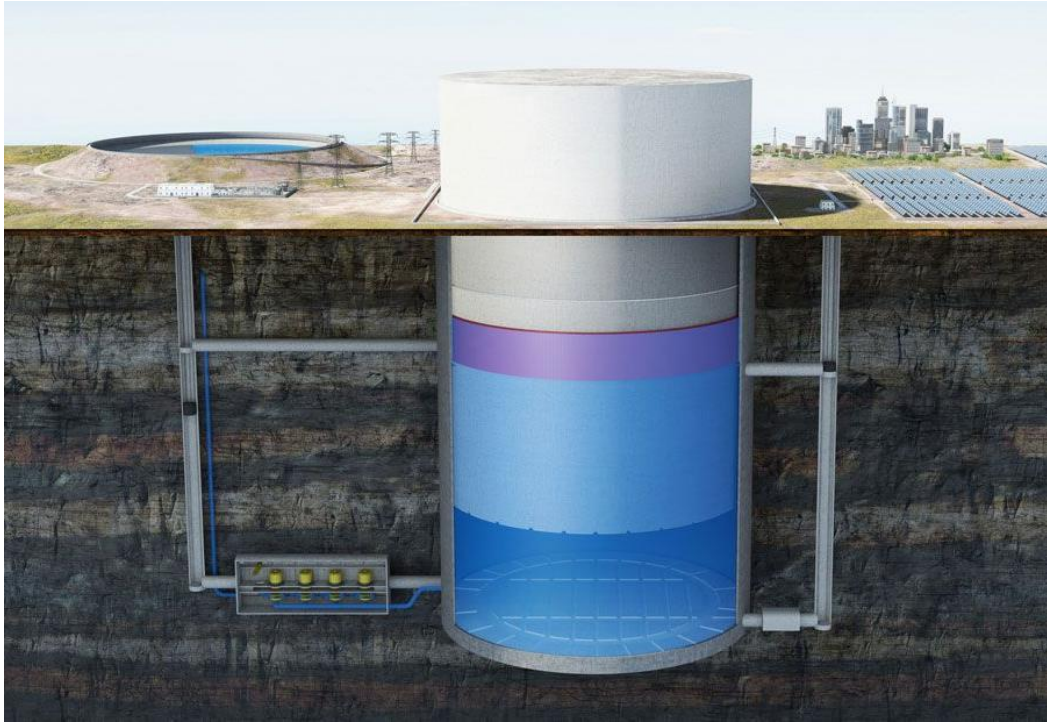
Demonstrační model úložiště o výkonu 1 MW a kapacitě 0,5 MWh má vzniknout v americkém Kansasu. Šachta vznikne přebudováním vysloužilého raketového sila Atlas F. Společnost také podepsala licenční smlouvu s německou firmou Gravity Energy AG, která plánuje stavbu demonstračního modelu v Německu. Odhadované náklady se pohybují okolo 250 milionů korun. Asi polovinou částky by mělo přispět Bavorské ministerstvo hospodářství. Zbytek sumy pak poskytnou soukromí investoři. O stavbu úložiště projevilo zájem několik společností po celém světě. Podmínkou je však dokončení testovacího modelu [75], [77].

3.2 Gravity storage

Gravity Storage je koncept německé společnosti Heindl Energy GmbH založené roku 2014 Eduardem Heindlem. Firma byla v roce 2021 prodána New Energy se sídlem v Hamburgu. Jejím cílem je návrh a vývoj hydraulických úložišť obdobně jako společnost Gravity Power, avšak ve větším měřítku [78].

3.2.1 Koncept

Základním rozdílem oproti konceptu úložiště Gravity Power Module je využití vytěženého skalního masivu coby závaží. Pod oddělený masiv je čerpána voda, která jej zvedne a tím získá potenciální energii. Tu může následně uvolnit průchodem vody zpět přes turbínu. Přečerpávací soustrojí se skládá z reverzní Francisovy turbíny spojené s motorgenerátorem a je umístěno v podzemí [78].



Obr. 25 Princip Gravity Storage [78]

Akumulační kapacita energie E vychází ze vzorce pro výpočet potenciální energie (7). Pokud je vybrán píst s poloměrem r a délkou $l_p = 2r$, pak lze píst zvednout do výšky $h = r$. Délka pístu vyplývá z umístění těsnění válce lehce nad těžištěm, tedy ve vzdálenosti r nad dnem válce, aby byl plovoucí válec stabilní. Upravený vztah vypadá následovně

$$E = \left(2\rho_p - \frac{3}{2}\rho_v\right)\pi gr^4, \quad (16)$$

kde ρ_p je hustota skalního masivu a ρ_v hustota vody [78].

Z rovnice vyplývá, že kapacita uložené energie roste se čtvrtou mocninou poloměru. Náklady na vybudování šachty se závažím rostou se druhou mocninou průměru. Účinnost úložiště se pohybuje v rozmezí 75 - 80 % v závislosti na účinnosti turbíny a na ztrátách v příváděcím potrubí. Následující tabulka popisuje parametry úložiště v závislosti na průměru závaží pro hustotu 2 600 kg/m³ [78].

Tab. 22 Parametry úložiště v závislosti na průměru válce [78]

Průměr [m]	150	200	250
Kapacita [GWh]	1,0	3,0	8,0
Objem vody [mil. m ³]	1,34	2,38	5,99
Tlak vody [MPa]	4,1	6,7	7,1

3.2.2 Konstrukce

Vhodnými místy pro stavbu jsou lokality s pevným nepropustným podložím. Dále musí být k dispozici vodní nádrž, která pojme vodu pro vytlačení pístu. Pro průměr pístu 250 m je potřeba nádrž o objemu 6 mil. m³ (ekvivalent rybníku Rožmberk).

Konstrukce šachty a pístu spočívá ve vyhloubení prstence požadovaného průměru a následném zpevnění povrchu pístu i šachty železobetonem. Mezi pístem a šachtou je upevněno valivé membránové těsnění pro zamezení úniku vody. Stavba by měla být uskutečnitelná s pomocí konvenčních metod pro budování tunelů. Největší rizika jsou spjata s možným rozpadem masivu a jeho chováním v případě zemětřesení [78], [79].

Prvním krokem je ražba tunelů a šachet pro přístup ke stěnám a dnu pístu. Následně je shora vyhlouben prstenc. Vzdálenost mezi pístem a šachtou je 2 - 3 m. Povrch je průběžně zpevňován pomocí geomembrán či železobetonu. Pod dnem pístu je vyhloubeno několik paralelních tunelů, v nichž je vybudováno mnoho železobetonových pilířů, které jsou v půlce rozděleny. Následně dojde k odtěžení zbývající horniny. Posledním důležitým krokem je instalace valivé membrány, která je spojena s pístem i šachtou. Ta je složena z mnoha článků z vulkanizované pryže vyztužené ocelovými lanky nebo aramidovými vlákny. Přetlak působící na membránu může dosáhnout až 6 MPa [78], [79].



Obr. 26 Průřez uložením pístu [78]

Vizualizace znázorňuje řez prstencem. V levé části se nachází píst vybavený obslužným ochozem pro revizi těsnění, které je vyznačeno červeně. V pravé části je šachta obsahující vodící prvky, které zajišťují vystředění pístu. Ve spodní části je vyobrazen prostor vyplněný vodou [78], [79].

3.2.3 Ekonomika

Náklady na výstavbu odhaduje Heindl Energy na 2 500 - 8 000 Kč/kWh v závislosti na kapacitě. Ta se má pohybovat v rozmezí od 1 do 10 GWh. Pro úložiště menších kapacit by příliš rychle narůstaly náklady na výstavbu vzhledem k uložené energii, takže nedávají ekonomicky smysl. V případě úložiště s kapacitou 1 GWh by se tak náklady měly pohybovat okolo 8 miliard korun [78], [80].

Společnost získala podporu od investora rizikového kapitálu a jedná o vybudování pilotního projektu o průměru 20 metrů a hloubce 30 metrů v Saúdské Arábii [80].

Tab. 23 Parametry úložišť Gravity Storage [78]

Průměr pístu	150 - 250 m
Výška pístu	150 - 250 m
Hmotnost závaží	10 - 60 miliónu tun
Výkon	100 - 1 600 MW
Kapacita	1 - 10 GWh
Přibližná cena	8 000 Kč/kWh

3.3 Ares

Společnost Advanced Rail Energy Storage (ARES) byla založena roku 2010. Jejím cílem je vyvinout úložiště energie na principu železničních vagonů, které budou vytahovány a spouštěny z prudkého svahu. Společnost si nechala patentovat dvě technologie, které lze využít pro ukládání energie. Jedna využívá upravené elektrické lokomotivy se závažím či taženými vozy, které mohou operovat na trati s maximálním sklonem 6°. Druhá spočívá v tažení vozů se závažím pomocí řetězového pohonu a může být provozována na svazích se sklonem až 25° [81], [82], [83].

3.3.1 Gravityline

Úložný systém Gravityline se skládá z několika paralelně umístěných tratí, které jsou umístěny v prudkém svahu. Trati jsou vybaveny řetězovým systémem, který je spojen s motorgenerátorem. Během procesu ukládání energie jsou vozíky se závažím vyváženy pomocí řetězu z dolní části tratě do horní. Tím dojde k transformaci elektrické energie na potenciální. Při potřebě generování energie jsou vozíky naopak spouštěny dolů a jejich brzděním se generuje elektrický proud. Výkon jedné tratě dosahuje 5 MW. Kapacita je závislá na hmotnosti závaží, počtu vagonů, sklonu a délce trati [81], [83].

Mezi hlavní výhody patří možnost jejich snadného umístění prakticky kdekoliv, kde je nějaký svah. Minimální převýšení pro efektivní funkci činí 60 metrů. Na rozdíl od PVE není potřeba stálá dodávka vody, což představuje výhodu zejména pro suché oblasti. Dalšími výhodami jsou spolehlivost, rychlý náběh, vysoké nabíjecí a vybíjecí výkony, životnost a dostupnost materiálů. Nevýhodou představuje nízká hustota uložené energie, rozsáhlá zastavěná plocha a hluk během provozu [81], [83].

Tab. 24 Parametry úložišť Gravityline [81], [83]

Výkon	5 - 1 000 MW
Kapacita	10 - 5 000 MWh
Doba náběhu	3 s
Odhadovaná účinnost	> 90 %
Životnost	40 let
Odhadované náklady	3 500 Kč/kWh

3.3.2 Demonstrační projekty

Tehachapi

V roce 2013 byl v horách východně od Bakersfieldu v Kalifornii uveden do provozu zkušební model projektu ARES Nevada. Testovací trať měřila 270 metrů. Elektromotory byly umístěny v kolech hnacích vozů, na kterých se zároveň nacházela betonová závaží. Bylo zde prokázáno, že podobná koncepce může fungovat s maximálním sklonem pouze 6°. Při vyšších sklonech dochází k prokluzu kol. Pro budování úložných systémů proto bude vhodné použití řetězových či lanových systémů, které budou vozy vytahovat a spouštět [82], [84].



Obr. 27 Demonstrační jednotka v Tehachapi [81]

Gamebird Pit

Ve městě Pahrump, které leží v americké Nevadě je budován demonstrační projekt Gamebird Pit o výkonu 50 MW. Úložiště se nachází ve štěrkovém dole a skládá se z deseti paralelních tratí, po kterých se bude pohybovat 210 vozů se závažím o celkové hmotnosti 75 000 tun. Převýšení svahu činí 70 m a sklon 26,8°. Celková kapacita úložiště pak dosahuje 12,5 MWh. Systém bude schopen poskytovat doplňkové služby jako regulace a stabilizace elektrizační soustavy při plném výkonu zhruba 15 minut. Projekt je právě ve fázi výstavby. Celkové odhadované náklady činí 55 miliónů dolarů. V částce jsou zahrnuty i náklady na vývoj potřebných systémů a zařízení (elektronika, telekomunikační zařízení, specifické železniční vagóny) [81], [82], [83].

Tab. 25 Parametry demonstračního úložiště Gamebird Pit [81]

Výkon	50 MW
Kapacita	12,5 MWh
Doba náběhu	5 s
Odhadovaná účinnost	75 - 80 %
Převýšení	70 m
Sklon	26,8°
Celková hmotnost závaží	75 000 tun
Životnost	30 - 40 let



Obr. 28 Vizualizace plánovaného úložiště Gamebird Pit [81]

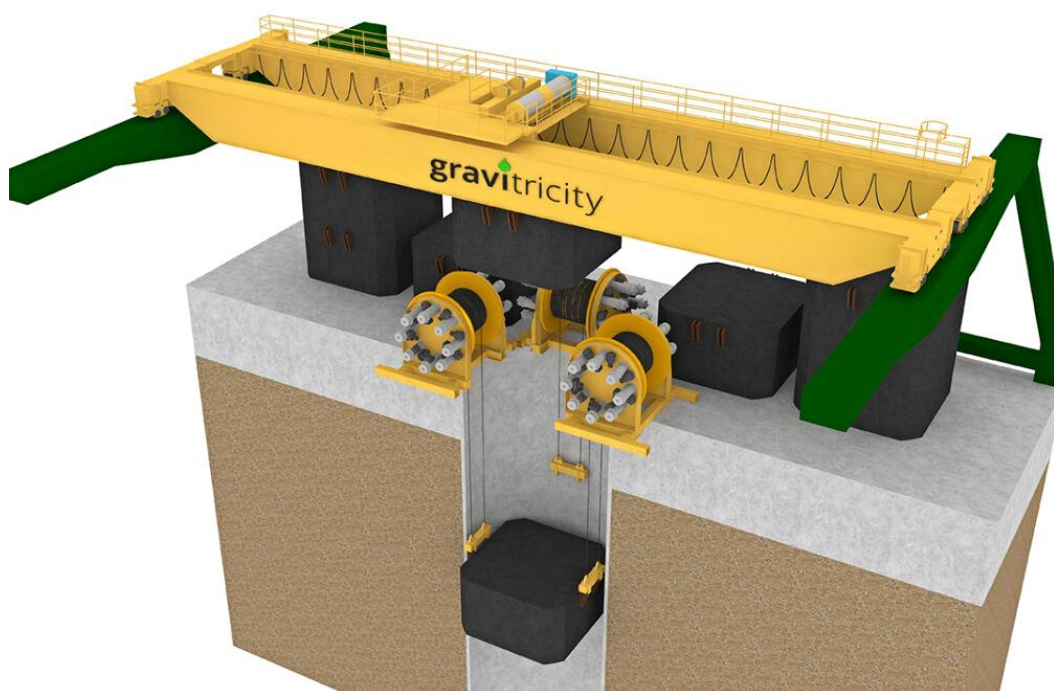
3.4 Gravitricity

Gravitricity je britská společnost založená Peterem Fraenkelem. V roce 2011 byl podán první patent na technologii úložiště v hlubinném dole. Roku 2016 získala společnost grant ve výši 650 000 liber od Innovate UK na výstavbu demonstračního modelu o výkonu 250 kW [85].

3.4.1 Koncept

Systém Gravitricity využívá konfigurace závaží o celkové hmotnosti až 12 000 tun v hluboké šachtě, zavěšené na soustavě lan, z nichž každé je spojeno s navijákem schopným zvednout část hmotnosti. Naviják je poháněn synchronním motorgenerátorem. Systém je schopen velmi rychle reagovat. Plného výkonu dosáhne za jednu sekundu. Z procesu ukládání energie je tak schopen rychle přejít k procesu generování energie. Může poskytnout služby potřebné k vyrovnání výkonu v síti a pokrytí výkonových špiček. Vzhledem k limitům a velikosti konstrukce nejsou vhodné pro dlouhodobé skladování energie ve větším měřítku [85].

Analýza provedená Imperial College London počítá, že systém může fungovat až 50 let a ukládat energii s polovičními náklady, než je současná cena provozu bateriových úložišť. Společnost počítá s využitím vyřazených důlních šachet s hloubkou nad 300 metrů a později také s hloubením účelových šachet, což umožní nasazení úložišť všude tam, kde je potřeba. Závaží je poskládáno ze segmentů (1 - 24) o hmotnosti 500 tun. Každá jednotka může být nakonfigurována tak, aby poskytovala výkon mezi 1 a 20 MW s kapacitami v rozmezí 0,25 - 25 MWh. Účinnost systému činí 80 - 90 % [85].



Obr. 29 Princip úložiště Gravitricity [85]

Tab. 26 Parametry úložišť Gravitricity [85]

Výkon	1 - 20 MW
Kapacita	0,25 - 25 MWh
Hloubka šachty	250 - 1 000 m
Hmotnost závaží	(1 - 24) 500 tun
Životnost	50 let
Doba náběhu	1 s
Účinnost	80 - 90 %
Přibližné náklady	5 000 - 8 000 Kč/kWh

3.4.2 Demonstrační projekty

Edinburgh

Během roku 2021 byl v přístavu Leith v Edinburghu vystavěn a úspěšně provozován demonstrační model o výkonu 250 kW. Systém se skládal z 15 metrů vysoké věže a dvou 25 tunových závaží. Stojní vybavení poskytla firma Huisman s výrobním provozem v České republice. Úložná kapacita uvedena nebyla, avšak plný výkon může úložiště poskytovat zhruba 11 vteřin, z čehož vyplývá, že kapacita je zhruba 0,7 kWh. V sérii testů byla ověřena schopnost náběhu na plný výkon v určitém čase a plynulý chod zařízení při minimálním výkonu. Tříměsíční testovací program potvrdil modelové předpoklady a poskytl důležitá data pro realizaci prvního projektu v plném rozsahu [85], [86].



Obr. 30 Demonstrační jednotka v Edimburghu [85]

První projekt skutečné velikosti

V současné době probíhá výběr vhodné lokality pro stavbu prvního zkušebního úložiště v plném rozsahu o výkonu 4 - 8 MW a kapacitě až 2 MWh. Budoucí systémy by měly disponovat kapacitami až 25 MWh. Společnosti se pro stavbu tohoto úložiště podařilo od investorů získat zhruba 90 miliónů korun. Jedna z vhodných lokalit se nachází i v České republice [85], [87].

V roce 2017 došlo k uzavření černouhelného hlubinného dolu Staříč II nedaleko Ostravy. Důl s šachtou hlubokou přes 1 km byl následně posuzován firemními inženýry. Ti se také sešli se zástupci vlastníka státního podniku Diamo, zastupiteli kraje a místními zainteresovanými stranami včetně VŠB - Technické univerzity Ostrava [85], [86].

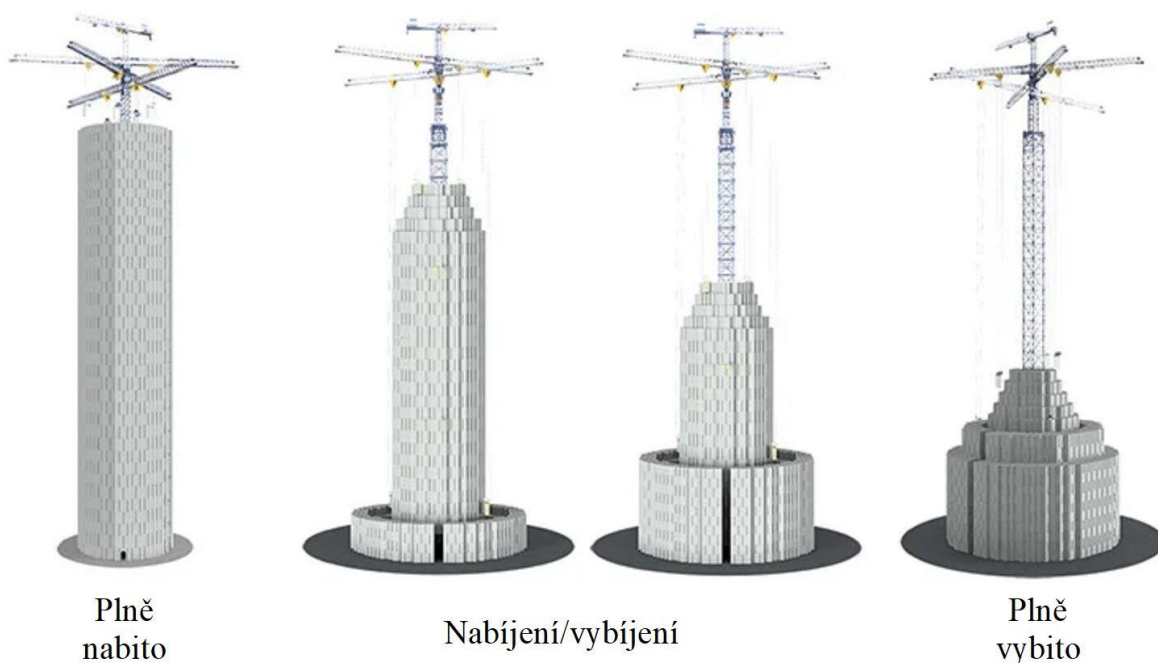
Dalšími uvažovanými místy jsou hlubinné doly v Polsku, kde se představitelé firmy setkali s vlastníky dolů. V Polsku se nachází více než 30 nedávno vyřazených dolů. V úvahu připadají i vyřazené doly v Jižní Africe. K rozhodnutí o výběru lokality by mělo dojít v průběhu roku 2022 a ke zprovoznění úložiště během roku 2023 nebo 2024. Na celém světě se pak nachází přes 14 000 vhodných lokalit, které by bylo možné přestavět na takováto úložiště [85], [87].

3.5 Energy vault

Společnost byla pod původním názvem Idealab založena ve Švýcarsku v roce 2018. V téže roce začala výstavba demonstrační jednotky v měřítku 1:3. Roku 2020 byla dokončena výstavba 35 MWh komerční demonstrační jednotky, která byla připojena ke švýcarské rozvodné síti [88].

3.5.1 Koncept

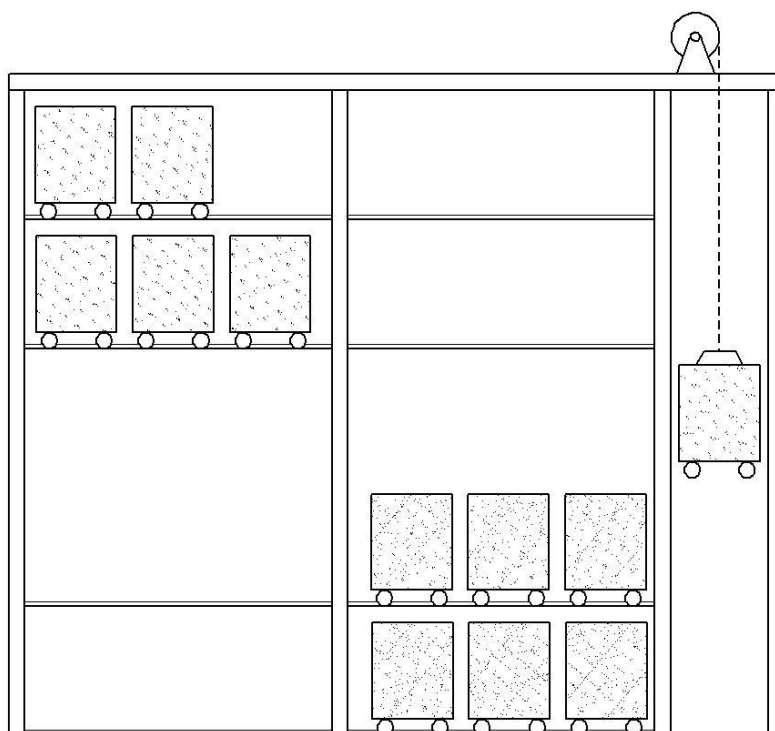
Technologické řešení spočívá ve vybudování nosné konstrukce, na jejíž vrchol jsou pomocí navijáků vytahována jednotlivá závaží. Původní návrh počítal se stavbou jeřábu, který obsahoval 6 ramen. Pomocí navijáku byla závaží zvedána do výšky a rozmístěována okolo konstrukce jeřábu tak, aby vytvořila věž. Při vybíjení byla závaží spouštěna a rozmístěována v prstenci okolo věže, jak ukazuje následující obrázek [88].



Obr. 31 Princip věžového úložiště Energy Vault [88]

Při testech na demonstračním modelu však bylo zjištěno, že je za nepříznivých povětrnostních podmínek přesné rozmístěování bloků závaží obtížné a energeticky náročné, což má velice negativní dopad na účinnost zařízení [89].

Na základě těchto poznatků bylo navrženo nové uspořádání Energy Vault Resilenci Center (EVRC), kde se bloky pohybují po vertikálních kolejnicích. To umožní provoz úložiště i za zhoršených povětrnostních podmínek. Změna se ovšem projeví ve zvýšených nákladech na výstavbu a sníženou energetickou hustotou. Princip je popsán na následujícím schématu [88], [90].



Obr. 32 Schéma úložiště Energy Vault Resilenci Center [88]

Konstrukce může být opatřena střechou a bočními stěnami kvůli omezení vlivu povětrnostních podmínek. Celé zařízení je skládáno z modulů po 10 MWh. Každý takový modul s výškou 100 m se rozkládá na ploše zhruba 7 500 m². Závaží je možné vyrobit z materiálů dostupných v místě stavby, jako jsou skalní horniny či odpadní produkty, jako je škvára z uhlých elektráren [88], [90].

Hlavními přednostmi těchto zařízení je možnost instalace prakticky kdekoli. Úložiště je odolné vůči nepříznivým provozním podmínkám, jako jsou například vysoké a nízké teploty, které by představovaly problém zejména pro bateriová úložiště. Zároveň nevyžaduje dodávky vody jako přečerpávací elektrárny nebo plynu, které vyžadují úložiště stlačeného vzduchu. Nevýhodou představuje nízká energetická hustota a s ní spojené vysoké náklady na stavbu [88], [90].

Tab. 27 Parametry úložišť Energy vault [88]

Výkon	15 - 1 500 MW
Kapacita	10 - 1 000 kWh
Účinnost	80 - 85 %
Doba náběhu	3 s
Plošná hustota energie	750 m ² /MWh
Přibližné náklady	6 800 Kč/kWh

3.5.2 Demonstrační projekt

V červenci 2020 byla ve Švýcarsku dokončena věžová testovací jednotka. Zařízení se skládá z šestiramenného jeřábu o výšce 110 metrů a soustavy závaží. V případě přebytku energie jsou závaží o hmotnosti 35 tun vytahována a pomocí vyvinutého ovládacího softwaru přesně skládána do podoby věže. Spouštěním naopak dochází ke generování energie. Nyní je úložiště připojeno ke švýcarské národní síti a probíhá jeho zkušební provoz [91], [92].

Celková kapacita je 35 MWh, přičemž maximální plánovaná kapacita je až 100 MWh. Energie jednoho závaží spuštěného z výšky 100 metrů odpovídá zhruba 10 kWh energie. Dodávaný výkon se pohybuje v rozmezí 4 - 8 MW. Výstupní výkon se odvíjí od rychlosti spouštění a počtu paralelně spouštěných závaží. Obvyklá rychlost spouštění závaží jsou 2 m/s. Stavba obdobného zařízení trvá 9 až 12 měsíců. Omezujícím faktorem je rychlost výroby kompozitních závaží [91], [92].

Díky zprovoznění demonstračního modelu ve Švýcarsku si společnost zajistila financování nového prototypu úložiště EVRC ve výši 2 miliard korun. V současné době probíhají přípravy na stavbu včetně hledání vhodné lokality [91], [92].

Tab. 28 Parametry demonstrační jednotky [88]

Výkon	4 - 8 MW
Kapacita	35 MWh
Účinnost	85 %
Životnost	> 30 let
Doba náběhu	3 s
Výška	100 m
Hmotnost závaží	x 35 tun

3.5.3 Závaží

Materiály pro výroby závaží by se měly vyznačovat vysokou hustotou a zároveň nízkou cenou. V úvahu připadají například železné kovy s hustotou přesahující 7 500 kg/m³. Pro účely skladování energie by však bylo zapotřebí několik miliónů tun hmoty, což by konstrukci neúměrně prodražilo. Lepší možnost představuje použití betonu, jež se dá produkovat poměrně levně ve velkém množství. Hustota betonu se pohybuje v rozmezí 2 000 - 2 500 kg/m³ a disponuje dobrými mechanickými vlastnostmi, takže by je bylo možné skládat na sebe. Beton je využíván ke stavbě prototypů či malých úložných jednotek. Nevýhodou obou materiálů je vysoká cena a produkce CO₂ při jejich výrobě [93].

Nejvhodnější řešení podle společnosti představuje využití odpadních materiálů, které jsou levné nebo je dokonce nutné za jejich skládkování či likvidaci platit, například škvára z uhelných elektráren, stavební suť či lopatky větrných elektráren obsahující skelná vlákna. Uhelné elektrárny ročně vyprodukují miliony tun tuhých zbytků. Část z tohoto množství je využita ve stavebnictví. Většina je však bez užitku skládkována. Obdobně se postupuje s lopatkami vysloužilých větrných elektráren, které jsou rozřezány a zakopány. Podle zprávy agentury Bloomberg by tímto způsobem mělo do roku 2050 vzniknout 1,2 milionu tun odpadního kompozitu. Oba materiály je možné využít pro výrobu závaží. Navržená výrobní linka zpracuje směs kameniva (škvára, suť, zemina) pojiva a skelných vláken, která zlepšují mechanické vlastnosti. Následně směs slisuje do tvaru kvádrů o hmotnosti zhruba 35 tun. Závaží jsou unifikovaná a lze je použít ve všech typech úložišť společnosti [88].



Obr. 33 Výroba kompozitních závaží [88]

3.6 Srovnání

V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry úložišť uvedených výrobců. Náklady na výstavbu jsou vzhledem k neexistenci jednotek v plném měřítku pouze orientační a během realizace se mohou měnit. Důležitým parametrem je také minimální kapacita, pro kterou se úložiště vyplatí stavět. Například společnost Gravity Storage uvádí stavební náklady ve výši 8 000 Kč/kWh. Minimální kapacita však činí 1 GWh. To znamená, že náklady na stavbu úložiště nejmenší nabízené kapacity činí 8 miliard korun.

Nejblíže k uvedení skutečného úložiště do provozu mají společnosti Gravitricity a Energy Vault. Obě firmy provedly zkušební provozy na demonstračních modelech a nyní se snaží získat finanční prostředky a vybírají vhodné lokality pro realizaci.

Tab. 29 Srovnání uvedených typů úložišť

	Gravity Power	Gravity Storage	Ares	Gravitricity	Energy Vault
Výkon [MW]	50 - 1 600	100 - 1 600	5 - 1 000	1 - 20	15 - 1 500
Kapacita [MWh]	200 - 6 400	1 000 - 10 000	10 - 5 000	0,25 - 25	10 - 1 000
Přibližné náklady [Kč/kWh]	25 000	8 000	3 500	5 000 - 8 000	6 800
Stádium vývoje	Výstavba demonstrační jednotky	Příprava demonstrační jednotky	Výstavba demonstrační jednotky	Zkoušky demonstrační jednotky Příprava komerční jednotky	
Umístění	Pevné podloží Zástavba	Rovina Pevné podloží	Hornatý terén	Pevné podloží Zástavba	Téměř kdekoliv
Určení	Hromadné skladování Pokrytí špiček		Regulace Pokrytí špiček	Porytí špiček Regulace Ostrovní systémy	
Výhody	Skladování velkého množství energie		Variabilita	Malá zastavěná plocha	Možné umístit kdekoliv
	Společnými výhodami jsou jednoduchost, dlouhá životnost, využití ověřených výrobních postupů a dostupnost stavebních materiálů.				
Nevýhody	Vhodné podloží Zdroj vody		Hornatá území Hluk	Hloubení šachty	Rozměrná konstrukce
	Společnou nevýhodu představuje nízká energetická hustota a s ní spojené vysoké stavební náklady, které tkví v nutné velikosti zařízení.				

4 Model úložiště

V rámci této diplomové práce byl sestrojen model, který demonstruje princip gravitačního ukládání energie a možnosti výroby vlastního úložiště v domácích podmínkách. Z naměřených hodnot byla vyhodnocena účinnost systému a jeho úložná kapacita.

4.1 Zadání

Ve zmenšeném měřítku realizujte konstrukční návrh zařízení pro ověření funkce gravitačního úložiště, včetně jeho výroby a ověření účinnosti akumulace.

4.2 Závaží

Pro sestavení závaží o požadované hmotnosti 20 kilogramů byly vybrány litinové disky o váze 5 kilogramů, které jsou určeny k použití v posilovacích činkách. Počet disků závaží lze pro účely měření měnit. Alternativně by bylo možné odlít závaží z betonu. Takové závaží by však bylo rozměrné a křehké.

Všechny disky jsou ve svém středu spojeny šroubem M24 délky 150 mm, který je zároveň součástí dolní volné části kladkostroje. Tato dolní část je vyrobena pomocí 3D tisku. Nad šroubem se nachází ocelová osa, na které jsou navlečeny 3 kladky s ložisky. Hmotnost dolní části kladkostroje (800 g) je také zahrnuta do celkové hmotnosti závaží. Výsledná tíhová síla F_t , která působí na kladkostroj, činí 204 N.



Obr. 34 Závaží a dolní část kladkostroje

4.3 Kladkostroj

Kladkostroj je zařízení, které slouží ke zdvihání a spouštění zavěšených břemen v předem určených vzdálenostech. Jedná se o systém kladek, který obsahuje aspoň jednu kladku pevnou a jednu kladku volnou propojené lanem [94].

Převodový poměr i_k byl s ohledem na délku tažného lana zvolen na hodnotu 6. Maximální zdvih kladkostroje jsou 2 metry. Na navíjecí buben je tedy navinuto 12 metrů lana. Vzhledem k rozměrům modelu byly vybrány nejmenší dostupné plastové kladky o průměru 29 mm s drážkou pro lano o průměru 4 mm. Použito bylo polypropylenové lano o průměru 3 mm a únosnosti 1 200 N.

Kladkostroj s převodovým poměrem 6 obsahuje tři páry pevných a volných kladek. Každá kladka klade při otáčení odpor, který je působen tuhostí lana při jeho ohýbání a třecími silami v ložisku. Výsledná síla tak musí být povýšena o síly třecí, které mechanismus překonává. Účinnost přenosu síly kladkou η se pohybuje v rozmezí 0,95 až 0,98. Pro účely návrhového výpočtu bude použita hodnota účinnosti 0,95 pro všechny kladky [95].

Teoretická síla působící v laně F_0 je dána podílem tíhové síly F_t a převodového poměru i_k

$$F_0 = \frac{F_t}{i_k} \quad (17)$$

$$F_0 = \frac{204}{6} = 34,0 \text{ N.}$$

Silová rovnováha soustavy je určena tíhovou silou F_t a součtem sil v jednotlivých nosných průřezech

$$F_t = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6, \quad (18)$$

kde

$$F_1 = F \cdot \eta, F_2 = F \cdot \eta^2, \dots, F_6 = F \cdot \eta^6$$

$$\begin{aligned} F_t &= F \cdot \eta + F \cdot \eta^2 + F \cdot \eta^3 + F \cdot \eta^4 + F \cdot \eta^5 + F \cdot \eta^6 \\ &= F \cdot \eta \cdot (1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \eta^4 + \eta^5). \end{aligned}$$

Skutečná ovládací síla v laně F , kterou je nutné působit pro zdvih závaží je tak dána vztahem

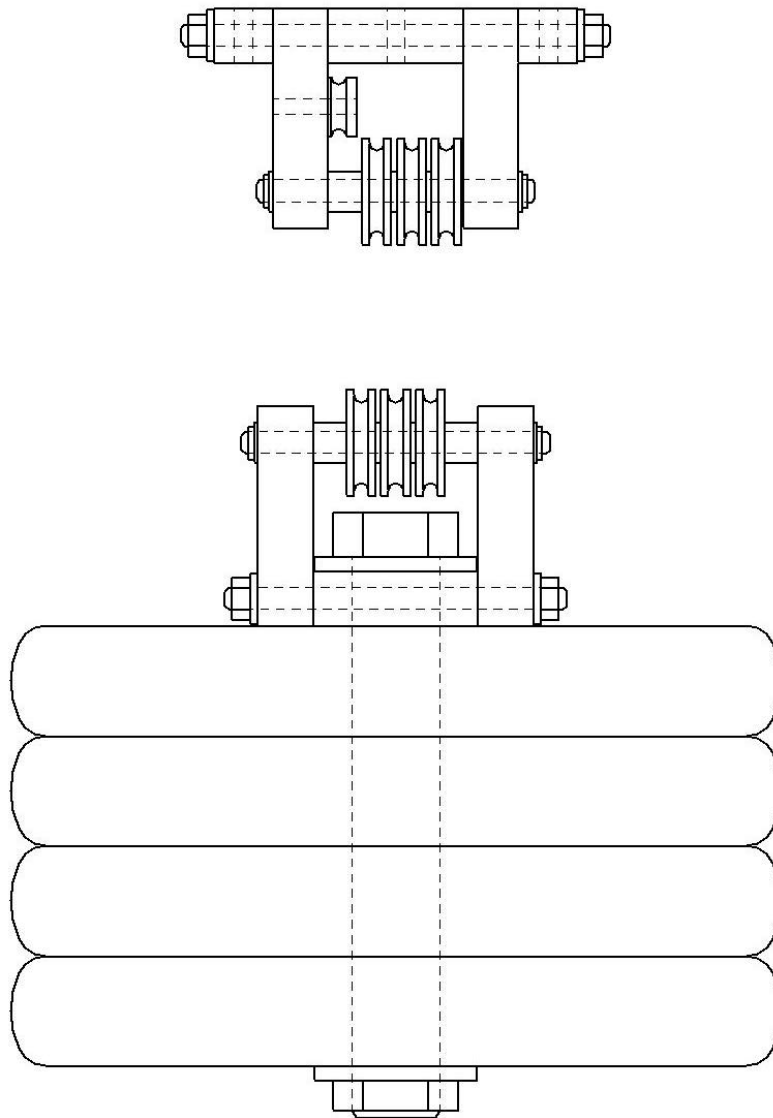
$$F = \frac{F_t}{\eta \cdot (1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \eta^4 + \eta^5)} \quad (19)$$

$$F = \frac{204}{0,95 \cdot (1 + 0,95 + 0,95^2 + 0,95^3 + 0,95^4 + 0,95^5)} \approx 40,5 \text{ N.}$$

Celkovou účinnost kladkostroje η_c je možné určit následovně [95]

$$\eta_c = \frac{F_t \cdot \eta \cdot (1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \eta^4 + \eta^5)}{6 \cdot F_t} = \frac{\eta \cdot (1 + \eta + \eta^2 + \eta^3 + \eta^4 + \eta^5)}{6} \quad (20)$$

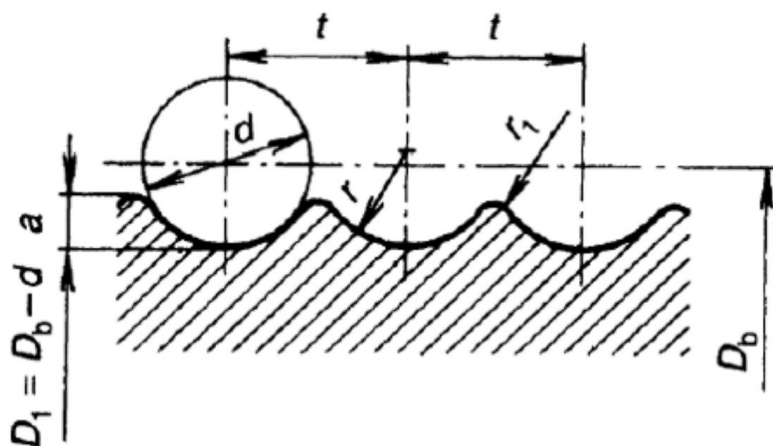
$$\eta_c = \frac{0,95 \cdot (1 + 0,95 + 0,95^2 + 0,95^3 + 0,95^4 + 0,95^5)}{6} = 0,839.$$



Obr. 35 Nákres kladkostroje a závaží

4.4 Buben

Buben byl vyroben pomocí 3D tisku z materiálu PLA. Na povrchu bubnu je vytvořena spirálová drážka, která vede lano při navíjení první vrstvy tak, aby nedocházelo k jeho křížení.



Obr. 36 Geometrie drážky bubnu [96]

Navrhovaný průměr byl určen na základě vztahu

$$D_b = \alpha \cdot d \quad (21)$$

$$D_b = 18 \cdot 3 = 54 \text{ mm} ,$$

kde α je součinitel závislý na druhu provozu [97] a bubnu a a d je průměr lana. Výsledný průměr D byl zvolen na hodnotu 50 mm. Průměr vodící drážky D_1 je určen následně

$$D_1 = D - d \quad (22)$$

$$D_1 = 50 - 3 = 47 \text{ mm} .$$

Šířka bubnu l_b se odvíjí od délky lana, která v tomto případě činí 12 m. Vypočítá se pomocí počtu závitů potřebných pro navinutí z_c . Počet závitů je závislý na délce lana L a zvoleném průměru bubnu D . V případě větších navijáků jsou přidány 2 či 3 závity navíc, které třením snižují tažnou sílu působící na ukotvení lana k bubnu. V případě tohoto modelu je však možné tyto závity pominout.

$$z_c = \frac{L}{\pi \cdot D} \quad (23)$$

$$z_c = \frac{12\,000}{\pi \cdot 50} \approx 76 \text{ závitů}$$

Závity budou navinuty ve čtyřech vrstvách. V jedné vrstvě bude umístěno 20 závitů. Celková šířka bubnu l_b je dána

$$l_b = z \cdot d \quad (24)$$

$$l_b = 20 \cdot 3 = 60 \text{ mm}.$$

Stoupání drážky t je nutné zvolit tak, aby se o sebe jednotlivé závity lana netřely. Vzhledem k použití polypropylenového lana, které pod napětím mírně smrští svůj průměr, je možné zvolit stoupání drážky $t = d$ [95].

Pevnostní výpočty vzhledem k použité metodě výroby nebylo možné provést. Mechanické vlastnosti tištěných dílů jsou ovlivněny řadou faktorů, například použitým materiálem, vlhkostí materiálu, teplotou tisku, výškou vrstvy, směrem vrstev, tloušťkou obvodových perimetrů, hustotou a tvarem výplně. Buben byl proto při výrobě předimenzován a předeprnut pěti šrouby, aby se zabránilo oddělení jednotlivých vrstev. Následně byla šrouby připevněna čela bubnu, jejichž průměr byl zvolen tak, aby zabránil skluzu všech vrstev lana

$$D_{\zeta} = D + 8 \cdot d \quad (25)$$

$$D_{\zeta} = 50 + 8 \cdot 3 = 74 \text{ mm}.$$

Výsledný průměr byl zvolen na 80 mm. Pod čelem bylo ukotveno tažné lano.

Do středu bubnu byla následně nalisována hřídel z kalené oceli o průměru 8 mm. Ta je uložena ve dvou kuličkových ložiscích, která jsou součástí převodovky. V posledním kroku bylo k bubnu šrouby připevněno ozubené řetězové kolo.

4.5 Motor

Jako motor a generátor byl použit stejnosměrný elektromotor buzený permanentními magnety, pro který platí následující vztahy

$$M_i = C\Phi \cdot I \quad (26)$$

$$U_i = C\Phi \cdot \omega \quad (27)$$

$$U = U_i + R_k \cdot I + L_k \cdot \frac{di}{dt} \quad (28)$$

$$U = U_i - R_k \cdot I - L_k \cdot \frac{di}{dt}. \quad (29)$$

Význam jednotlivých veličin je popsán v Tab. 30. Vztah (28) platí pro případ motoru a (29) pro případ dynama [98].

Tab. 30 Tabulka veličin

M_i	Vnitřní moment stroje bez mechanických ztrát [Nm]
U_i	Indukované napětí kotvy [V]
I	Elektrický proud [A]
ω	Úhlová rychlost [rad/s]
U	Napětí na svorkách motoru [V]
R_k	Odpor kotvy [Ω]
L_k	Indukčnost vinutí [H]
di/dt	Změna proudu v čase
$C\Phi$	Konstanta stroje, vlastnost motoru, závisí na počtu pólových dvojic, počtu závitů vinutí a počtu paralelních vinutí [Wb]

Ze vztahu (26) je patrné, že vnitřní moment stroje M_i je závislý na velikosti proudu I . Z toho vyplývá, že během zvedání a spouštění bude hodnota momentu i proudu konstantní. Změny nastanou pouze při přechodu lana mezi vrstvami v bubnu navijáku. Napětí indukované na kotvě U_i je úměrné úhlové rychlosti ω . Napětí na svorkách motoru U je dáno součtem napětí indukovaného a úbytků napětí na odporu vinutí kotvy, na kartáčích a úbytku způsobeného reakcí kotvy (28). Pokud během provozu motoru dojde ke zvýšení zatěžovacího momentu, dojde i ke zvýšení proudu. To posléze vede ke zvýšení úbytku napětí na kotvě. Jestliže je motor napájen konstantním napětím, sníží se hodnota indukovaného napětí a tím se sníží i otáčky motoru. Pro zachování otáček motoru tedy musí regulátor navýšit hodnotu napájecího napětí o velikost úbytku napětí na kotvě.

V případě provozu motoru jako dynam je zdrojem indukované napětí. Napětí na svorkách je poníženo právě o úbytek na kotvě.

Pro účely experimentu byl zvolen motor RS-445PD-15205. Provozní rozsah motoru se pohybuje mezi 12 - 42 V [99]. Provoz při nižším napětí bude mít za následek výrazné snížení účinnosti. Předpokládaná účinnost se pohybuje okolo 50 %. Pro stavbu a zkoušky modelu však postačuje.

4.6 Převodovka

Pro známý vstupní a výstupní točivý moment byla navržena převodovka. Během navíjení lana do vrstev (na sebe) dochází ke změně točivého momentu, kterým působí buben na zátěž. Maximální hodnotu momentu lze vypočítat následovně

$$M_b = \left(\frac{D}{2} + j \cdot d \right) \cdot F \quad (30)$$

$$M_{b,max} = \left(\frac{50}{2} + 3 \cdot 3 \right) \cdot 40,5 = 1\,377 \text{ mNm} .$$

j představuje pořadí vrstvy od 0 do 3. Výška vrstvy je měřena ke středu lana. Dle údajů výrobce dosahuje elektromotor maximální účinnosti při zatížení $M_m = 14,5 \text{ mNm}$ [99].

4.6.1 Převodový poměr

Převodový poměr i_p se vypočítá jako podíl maximálního momentu bubnu $M_{b,max}$ a navrhovanému momentu motoru M_m .

$$i_p = \frac{M_{b,max}}{M_m} \quad (31)$$

$$i_p = \frac{1\,377}{14,5} \approx 95.$$

Výsledný převodový poměr i_{pv} byl zvolen 100. Tento převod bude realizován pomocí čtyřstupňové převodovky. Převodovku je kvůli jejím rozměrům nutné umístit dále od bubnu. Přenos výkonu je zajištěn válečkovým řetězem 04B-1 (6 x 2,8 mm), který zároveň slouží jako čtvrtý stupeň převodovky s poměrem

$$i_{87} = \frac{Z_8}{Z_7} \quad (32)$$

$$i_{87} = \frac{32}{16} = 2.$$

Celkový převodový poměr je roven součinu dílčích převodových poměrů

$$i_{pv} = i_{21} \cdot i_{43} \cdot i_{65} \cdot i_{87}. \quad (33)$$

Zbývající tři převodové stupně budou vyrobeny pomocí 3D tisku. Z tohoto důvodu je výhodné, aby měly jednotlivé stupně stejné rozměry a tudíž stejné převodové poměry. Dva stupně budou zahrnovat kola s čelním ozubením a první stupeň spojený s elektromotorem bude realizován pomocí řemenu, který je vhodnější pro vyšší obvodové rychlosti. Velikost tohoto převodového poměru lze vyjádřit úpravou předchozího vztahu

$$\frac{i_{pv}}{i_{87}} = i_{21} \cdot i_{43} \cdot i_{65} \quad (34)$$

$$\frac{i_{pv}}{i_{87}} = \frac{100}{2} = 50$$

$$i_{21} = i_{43} = i_{65} = \sqrt[3]{50} \approx 3,7.$$

4.6.2 Čelní soukolí

Pro výpočet geometrie čelního soukolí druhého a třetího stupně převodovky byla využita knihovna programu Solid Edge. Vstupní parametry zahrnují požadovaný převodový poměr a modul, což je poměr průměru roztečné kružnice a počtu zubů. Určuje hrubost ozubení a tím i velikost ozubeného kola a výkon, který lze přenést. Hodnota modulu musela být přizpůsobena možnostem 3D tisku. Pro výrobu bylo nutné zvolit hrubší ozubení, které bylo možné s dostatečnou přesností vytisknout. Experimentálně byla hodnota modulu určena na 1,5 mm. Výstupem programu byly rozměry ozubených kol, skutečný převodový poměr a virtuální model ozubeného kola, který bylo možné dále upravovat.

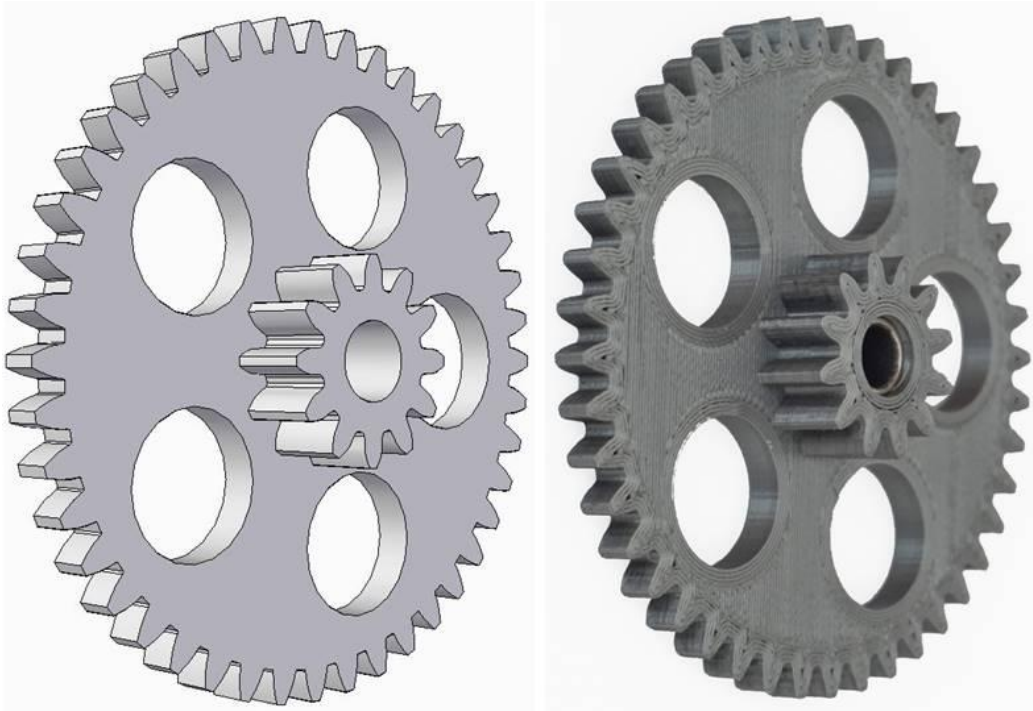
Tab. 31 Parametry soukolí

Modul	1,5 mm
Skutečný převodový poměr	3,67
Osová vzdálenost	42 mm

Tab. 32 Geometrie soukolí

	Pastorek	Kolo
Počet zubů	12	44
Průměr základní kružnice [mm]	16,91	62,02
Průměr hlavové kružnice [mm]	21,00	69,00
Průměr roztečné kružnice [mm]	18,00	66,00
Průměr pracovní kružnice [mm]	14,25	62,25
Tloušťka zubu [mm]	3,14	3,14

Ozubená kola byla vytištěna z materiálu PLA, který vyniká pevností a otěruvzdorností. Výška vrstvy byla nastavena na 0,1 mm, pro dosažení nejhladšího možného povrchu, což vedlo ke snížení třecích ztrát. Do středu kola bylo vlisováno kluzné ložisko, které rovněž napomohlo ke snížení ztrát.



Obr. 37 Virtuální model a tištěná podoba ozubeného kola

4.6.3 Řemen

První stupeň je tvořen řemenovým převodem. Řemen je čtvercový s tloušťkou 2,4 mm. Minimální doporučený průměr řemenice pro řemen této tloušťky činí 20 mm. Průměr velké řemenice se vypočte pomocí převodového poměru

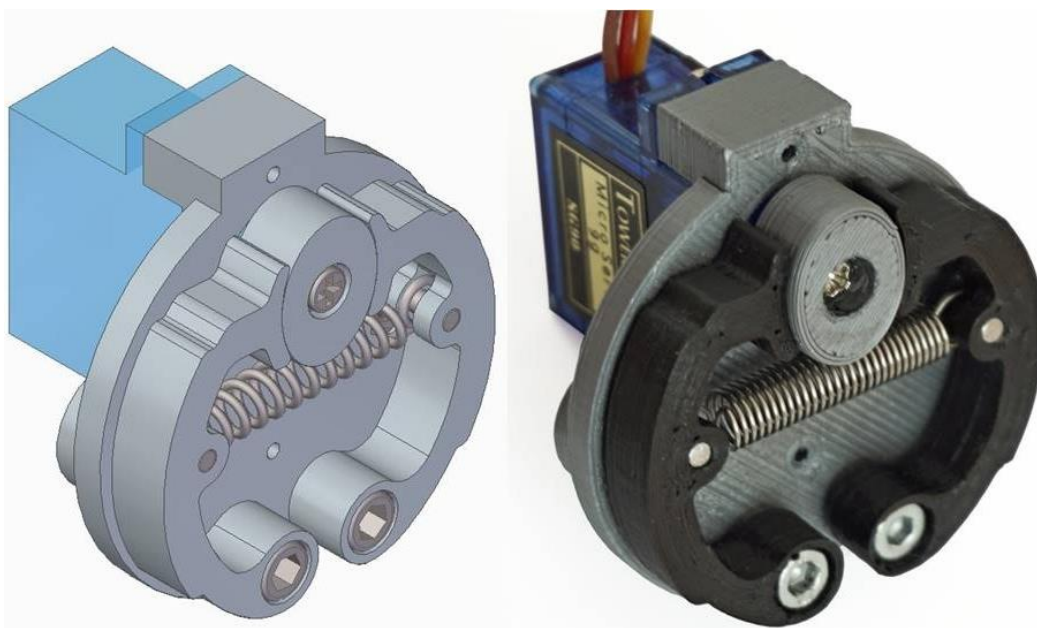
$$D_2 = d_1 \cdot i_{21} \quad (35)$$

$$D_2 = 20 \cdot 3,7 = 74 \text{ mm} .$$

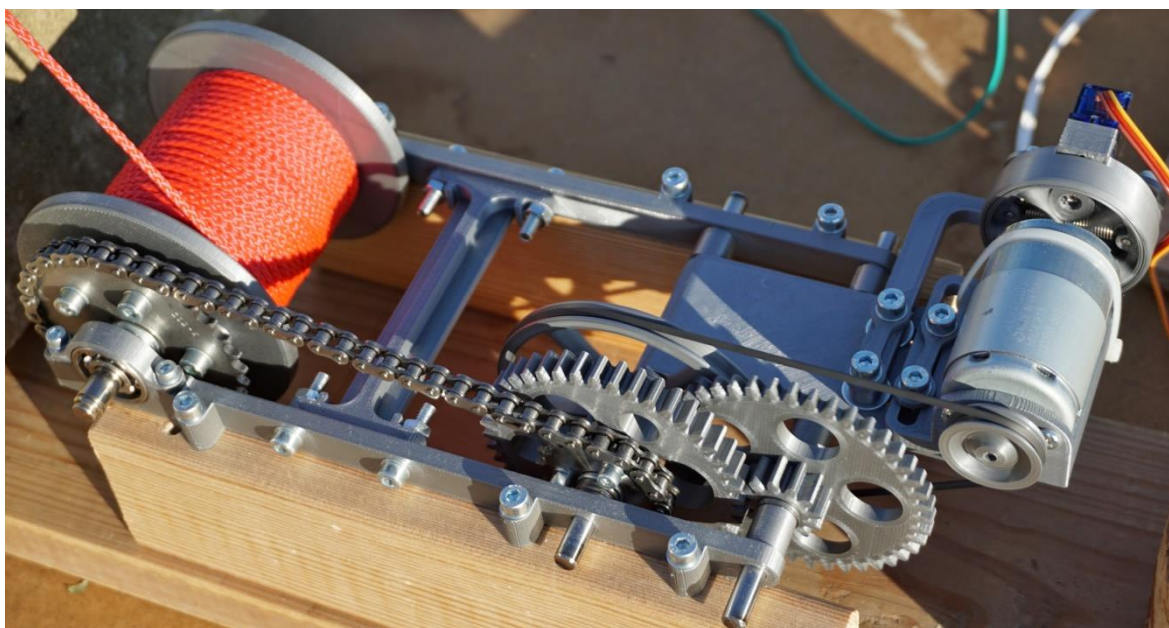
4.6.4 Brzda

Brzda je důležitou součástí celého systému. Pokud by došlo k přerušení spojení mezi motorem a zátěží, zvednuté závaží by brzdily pouze pasivní odpory v převodovce. Brzy po odpojení zátěže by narostly otáčky natolik, že by došlo k její destrukci. Řídicí systém umí vyhodnotit výpadek zátěže či příliš vysoké otáčky, které jsou způsobeny nedostatečnou velikostí zátěže, a celý systém zastaví. Brzda také umožní udržet závaží v horní poloze. Udržení polohy by jinak muselo být řešeno pomocí motoru. Ten by svým momentem působil proti závaží, což by však vedlo ke zvýšení spotřeby energie a ke snížení účinnosti úložiště.

Pro výrobu modelu byla zvolena bubnová brzda, jejíž konstrukce je jednoduchá a snadná na výrobu. Její hlavní výhodou je samosvornost. Pokud je brzda aktivována, zůstane tak i po odpojení napájení. Skládá se z bubnu, který je spojen s hřídelí motoru, dále z brzdových čelistí, vratné pružiny a rozpěrného elementu, poháněného servomotorem. Po aktivaci brzdy dojde k otočení rozpěrného elementu servomotorem o 90°. Následně se rozevrou brzdové čelisti a přitlačí se k otáčejícímu se bubnu. Po odbrzdění se element otočí zpět a vratná pružina stáhne čelisti do výchozí polohy. V prvotním návrhu byly použity brzdové čelisti a buben z materiálu PLA. Ten však špatně odolává vyšším teplotám, které vznikají během tření. Docházelo tak k připečení čelistí k bubnu. Nové čelisti jsou z materiálu PETg, který provozním podmínkám lépe vyhovuje.

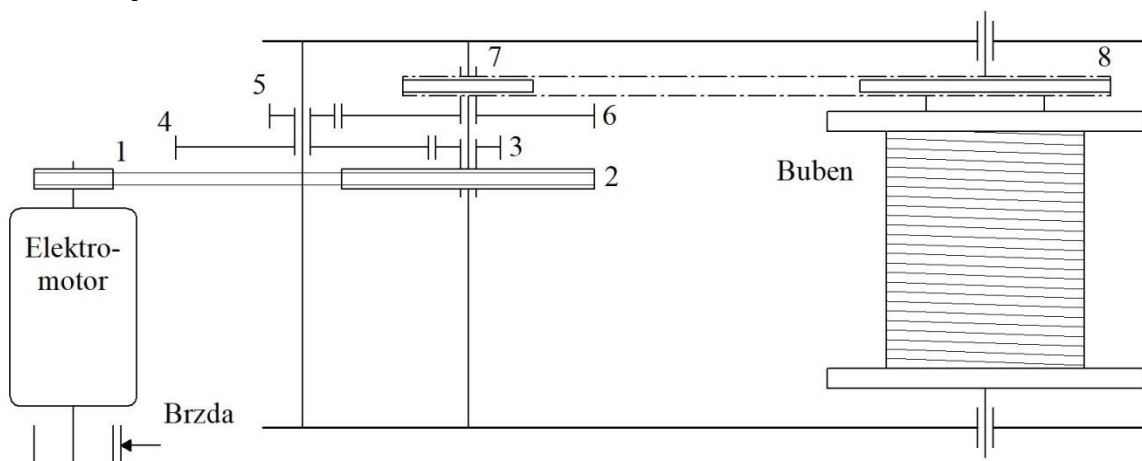


Obr. 38 Virtuální model a skutečná podoba brzdy



Obr. 39 Převodovka

4.6.5 Výkonová bilance



Obr. 40 Schéma převodovky

Každý převodový stupeň funguje s jistou účinností. Z tohoto důvodu bude výsledný moment, který musí motor vyvinout pro zdvih závaží, vyšší než navrhovaný. Přenesený moment se zahrnutím účinnosti je určen následovně

$$M_2 = M_1 \cdot i_{21} \cdot \eta_{12} \cdot \quad (36)$$

Otáčky motoru a tím i rychlost zvedání závaží jsou úměrné indukovanému napětí. Pro zvolené provozní otáčky motoru 1500 min^{-1} lze vypočítat otáčky bubny dle vztahu [98]

$$n_2 = n_1 \cdot \frac{1}{i_{21}} \cdot \quad (37)$$

U vícestupňových převodů vznikne výsledná účinnost vynásobením účinností jednotlivých stupňů

$$\eta_{18} = \eta_{12} \cdot \eta_{34} \cdot \eta_{56} \cdot \eta_{78} \cdot \quad (38)$$

Tab. 33 Použité účinnosti a převodové poměry

Účinnost řetězového převodu	η_{78}	0,95
Účinnost čelního soukolí	η_{56}, η_{34}	0,92
Účinnost řemenového převodu	η_{12}	0,94
Celková účinnost	η_{18}	0,76
Převodový poměr řetězu	i_{87}	2,00
Převodový poměr soukolí	i_{65}, i_{43}	3,67
Převodový poměr řemene	i_{21}	3,70

Tab. 34 Rozdělení momentů a otáček

Moment [mNm]		Otáčky [min^{-1}]	
M_8	1 337	n_8	15
M_{67}	725	n_{67}	30
M_{45}	220	n_{45}	111
M_{23}	66,5	n_{23}	405
M_1	19,1	n_1	1 500

Rychlost navíjení lana v_l lze získat z otáček bubnu ω a jeho poloměru, respektive ze vzdálenosti dané vrstvy lana od osy rotace

$$v_l = \left(\frac{D}{2} + j \cdot d\right) \cdot \omega = \left(\frac{D}{2} + j \cdot d\right) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad (39)$$

$$v_{l,max} = \left(\frac{50}{2} + 3 \cdot 3\right) \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 15}{60} = 53,4 \text{ mm/s}.$$

Rychlost zvedání závaží v_z se pak odvíjí od převodového poměru kladkostroje i_k

$$v_{z,max} = v_{l,max} \cdot \frac{1}{i_k} \quad (40)$$

$$v_{z,max} = 53,4 \cdot \frac{1}{6} = 8,9 \text{ mm/s}.$$

Tato rychlost je vztažena k otáčkám motoru $1\,500 \text{ min}^{-1}$. Pokud ovšem nebude motor vybaven regulátorem otáček, dojde s rostoucím zatížením k jejich klesání, jak plyne z rovnic (26) - (29).

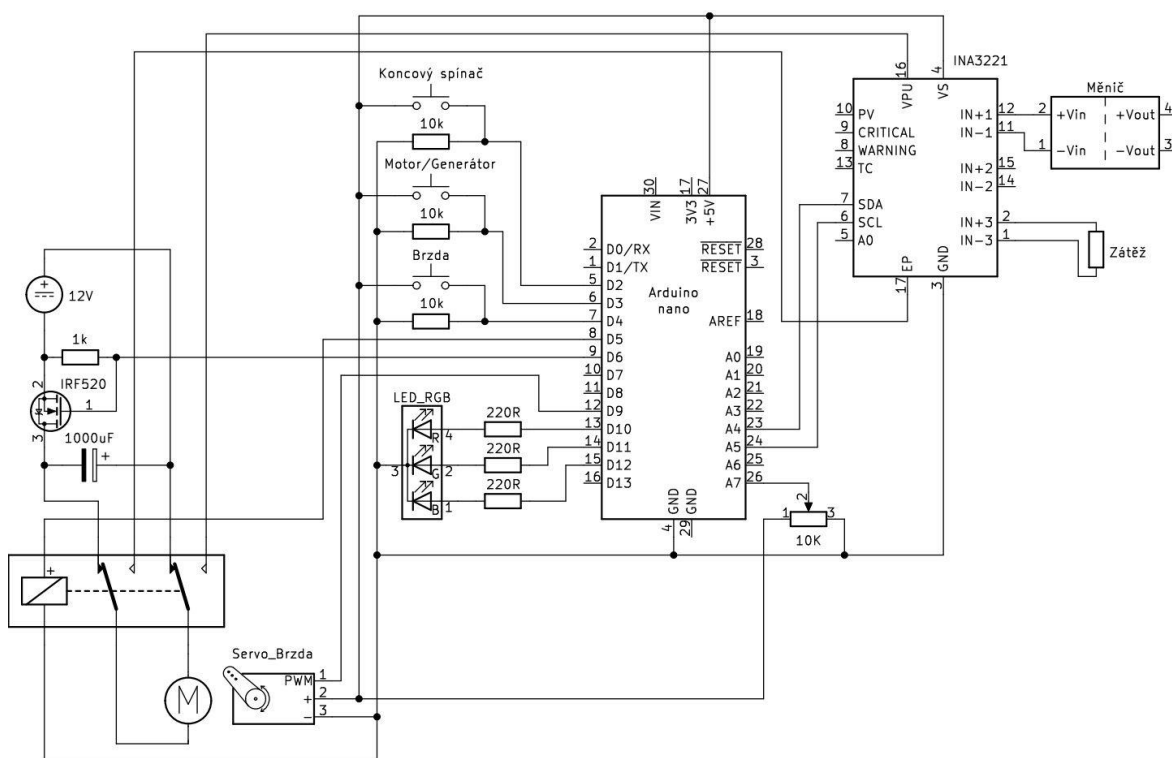
4.7 Řízení

Elektrická část je řízena pomocí vývojové desky Arduino nano s mikrokontrolérem AVR ATmega328. Motor je připojen ke dvoupólovému přepínacímu relé, které jej spojuje se zdrojem nebo zátěží. Vstupní napětí motoru je řízeno MOSFET tranzistorem pomocí PWM regulace. Elektrolytický kondenzátor vyrovnává průběh napětí. Otáčky motoru tak lze nastavit pomocí potenciometru. Po doplnění o senzor otáček mohou být otáčky udržovány na předem nastavené hodnotě. Testování regulaci otáček však nevyžaduje.

Dále je systém vybaven dvěma tlačítky pro přepínání mezi režimy motoru a generátoru a spínání brzdy. V horní části kladkostroje je umístěn koncový spínač, který po vytažení závaží přepne relé do režimu generátoru a aktivuje brzdu. Ta je ovládána pomocí servomotoru. Pro indikaci nastaveného režimu slouží RGB LED dioda, která při aktivované brzdě svítí červeně, v režimu motoru zeleně a v režimu generátoru modře.

Pro měření napětí a proudu je využit snímač INA3221. S pomocí tohoto senzoru je možné vyhodnotit výstupní výkon a zastavit spouštění závaží, pokud by došlo k výpadku zátěže. Zároveň může plnit funkci wattmetru a zaznamenat množství spotřebované či vygenerované energie.

Výstupní výkon z úložiště by měl být v ideálním případě řízen měničem, který by udržoval požadovanou hodnotu. Výstupní proud je konstantní, což znamená, že velikost výstupního výkonu je úměrná napětí. To je úměrné otáčkám motoru, tedy rychlosti spouštění závaží. Při zvýšení odebíraného výkonu však dojde i ke zvýšení odběru proudu, což povede ke zpomalení pohybu závaží. Rychlost spouštění proto musí být regulována měničem, který bude na výstupu udržovat konstantní hodnotu proudu a zrychlí pohyb závaží tak, aby se na svorkách motoru indukovalo vyšší napětí. Návrh takového měniče je však dosti složitý. Pro účely testování zařízení bude použito několik různých odporových zátěží.



Obr. 41 Schéma elektrického zapojení

4.8 Měření a stanovení účinnosti

Pomocí tenzometru byly změřeny síly na laně kladkostroje při zvedání a spouštění závaží, dále byly změřeny síly, působící na výstupu z převodovky na straně motoru. Porovnáním vypočítaných sil se skutečnými lze určit účinnost převodovky a kladkostroje. Účinnost motoru byla určena ze zkoušky naprázdno a se zátěží. Následně byla změřena energie, nutná ke zvednutí závaží a energie vygenerovaná jeho spouštěním. Porovnáním s potenciální energií bylo možné určit účinnost zvedání a generování a také celkovou účinnost ukládání energie.

4.8.1 Účinnost kladkostroje

S použitím hmotnostního snímače o rozsahu 0 - 50 N vybaveného tenzometrickým můstkem byla změřena síla na laně kladkostroje. Se snímačem bylo pohybováno konstantní rychlostí oběma směry pro určení síly nutné ke zvednutí a síly, kterou působí spouštěné závaží. Pro zvednutí závaží bylo třeba vyvinout sílu $39,5 \pm 0,5$ N. Spouštěné závaží pak působilo silou $28,2 \pm 0,5$ N. Zpětným dosazením do vzorce (20) byla určena účinnost kladky na 95,7%. Předpokládaná účinnosti činila 95%. Celková předpokládaná účinnost kladkostroje byla 83,9%. Porovnáním teoretické síly v laně F_0 a změřených sil bylo možné stanovit skutečnou celkovou účinnost při zvedání 86,1 % a celkovou účinnost při spouštění 82,9 %.

4.8.2 Účinnost převodovky

Pro měření účinnosti převodovky bylo použito závaží, které působilo silou 24,6 N na straně bubnu. Síla byla následně přepočtena na moment bubnu. Na straně motoru byl instalován menší bubínek s lankem připevněným k hmotnostnímu senzoru s rozsahem 0 - 1 000 mN. Se snímačem bylo opět pohybováno oběma směry. Moment na straně motoru při zvedání činil $11,0 \pm 0,25$ mNm a při spouštění $6,5 \pm 0,25$ mNm. Teoretický moment, vypočítaný z převodového poměru, činí 8,4 mNm. Předpokládaná účinnost převodovky byla vypočítána na 76 %. Změřená účinnost při zvedání je 75,9 % a při spouštění 77,8 %.

4.8.3 Účinnost motoru

Účinnost motoru je dána jako poměr mezi výkonem a příkonem, tedy mezi mechanickým a elektrickým výkonem

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{M \cdot \omega}{U \cdot I} \quad (41)$$

Měření momentu na hřídeli motoru však vyžaduje specifické snímače momentu. Pro určení účinnosti tak bude použita metoda spočívající ve změření a výpočtu ztrát motoru

$$\eta = \frac{P_{el} - \Delta P_Z}{P_{el}} \quad (42)$$

Ztrátový výkon ΔP_Z je roven součtu ztrát mechanických ΔP_{mech} , ztrát v magnetickém obvodu ΔP_{Fe} , tepelných ztrát ve vinutí ΔP_j a ztrát dodatečných ΔP_d , mezi které patří ztráty vířivými proudy a ztráty na komutátoru

$$\Delta P_Z = \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_j + \Delta P_d \quad (43)$$

Ztráty ve vinutí závisí na odporu vinutí R a druhé mocnině protékajícího proudu I [98]

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 \quad (44)$$

Ostatní typy ztrát jsou závislé na otáčkách a na zatížení motoru, avšak jejich velikost se během provozu příliš nemění. Pro účely experimentu budou proto tyto ztráty uvažovány jako konstantní ΔP_k

$$\Delta P_k = \Delta P_{mech} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_d . \quad (45)$$

V prvním kroku byl změřen odpor vinutí $R = 22 \Omega$. Dále byl motor bez zátěže roztočen a změřen příkon. Při provozu na prázdko je příkon roven právě součtu ztrát. Z naměřených dat bylo možné určit ztráty ve vinutí a následně i ztráty ΔP_k

$$\Delta P_k = P_{el} - \Delta P_j = U \cdot I - R \cdot I^2 \quad (46)$$

$$\Delta P_k = 12,48 \cdot 0,015 - 22 \cdot 0,015^2 = 0,182 \text{ W} .$$

Následně byl motor provozován se zátěží, změřen příkon a znovu vypočítány ztráty ve vinutí. K těmto ztrátám pak byly přičteny ztráty ΔP_k a určeny celkové ztráty ΔP_Z

$$\Delta P_Z = \Delta P_j + \Delta P_k \quad (47)$$

$$\Delta P_Z = 22 \cdot 0,33^2 + 0,182 = 2,578 \text{ W} .$$

Pomocí vzorce (42) pak bylo možné určit celkovou účinnost motoru η

$$\eta = \frac{12,26 \cdot 0,33 - 2,578}{12,26 \cdot 0,33} = 0,363 .$$

Dále byla provedena zkouška, při které byl měřen výstupní výkon motoru v režimu dynamu. Příkon byl v tomto případě mechanický výkon na hřídeli motoru, tedy součet elektrického výkonu a ztrát. Měřeno bylo napětí U a procházející proud I . Opět byly vypočítány celkové ztráty ΔP_Z

$$\Delta P_Z = 22 \cdot 0,104^2 + 0,182 = 0,420 \text{ W} .$$

Vzorec pro výpočet účinnosti má následující podobu

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{el} + \Delta P_Z} \quad (48)$$

$$\eta = \frac{12,2 \cdot 0,104}{12,2 \cdot 0,104 + 0,42} = 0,751 .$$

4.8.4 Určení účinnosti pomocí wattmetru

V následujícím testu bylo zvedáno a spouštěno závaží po dráze 1,8 m. Pomocí snímače bylo měřeno napětí a proud v závislosti na čase. Teoretické množství uložené potenciální energie je určeno vztahem (7)

$$E_p = 20,8 \cdot 9,81 \cdot 1,8 = 367 \text{ J} = 102,0 \text{ mWh}.$$

V tabulce jsou uvedena data z měření spotřeby energie při zvedání a generované pro pět různých velikostí zátěže 36, 52,5, 72, 88,5 a 124,5 Ω . Čas znázorňuje dobu trvání zvedání či spouštění závaží mezi krajními polohami. Celková energie je určena součtem přírůstků energie daných součinem aktuálního výkonu a časovým intervalem měření. Účinnost je pak určena porovnáním vypočítané potenciální energie závaží a energií spotřebovanou či vygenerovanou.

Tab. 35 Změřené a vypočtené hodnoty pro zvedání a spouštění závaží

	Čas [s]	Průměrné napětí [V]	Průměrný proud [mA]	Průměrný výkon [mW]	Energie [mWh]	Účinnost [%]
Zvedání	320,7	12,26	333	4 078	363,0	28,1
36,0 Ω	310,4	3,59	101	373	32,1	31,5
52,5 Ω	233,7	5,27	103	550	35,6	34,9
72,0 Ω	181,8	7,24	103	758	38,2	37,5
88,5 Ω	152,9	8,92	104	941	39,9	39,1
124,5 Ω	116,7	12,28	104	1 285	41,6	40,7

Z naměřených dat je patrné, že výstupní proud je při generování elektrické energie ve všech pěti případech téměř shodný, což odpovídá konstantní velikosti momentu, kterým závaží na motor působí. Napětí na zátěži a tím i výstupní výkon jsou tak dle Ohmova zákona (49) úměrné velikosti odporu zátěže R

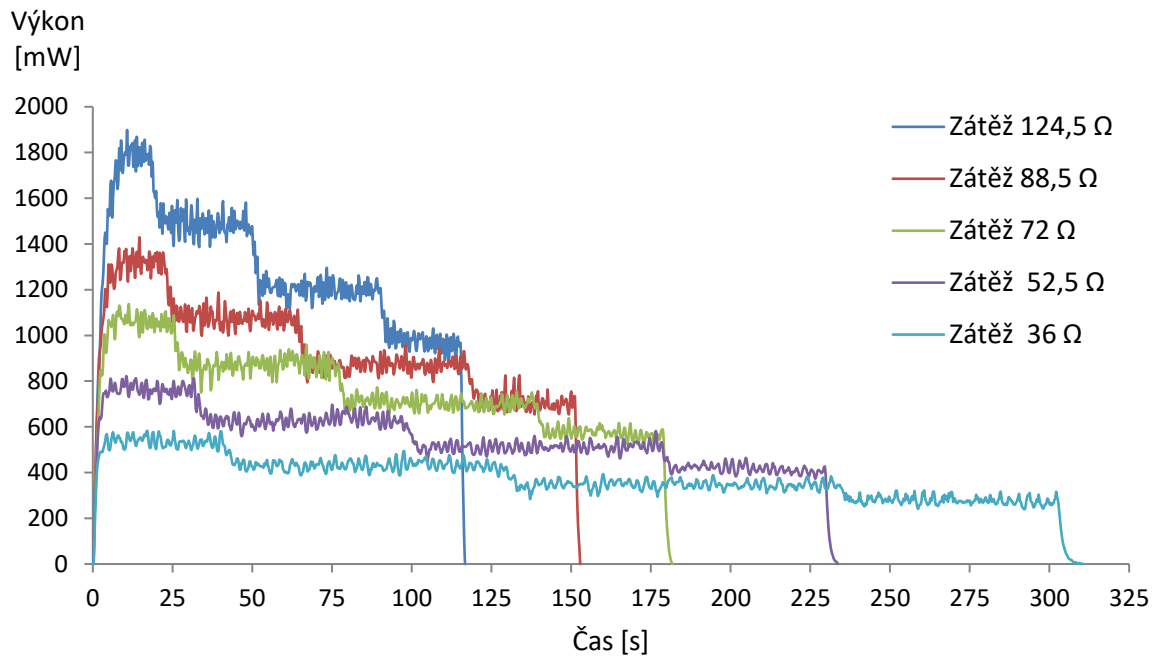
$$R = \frac{U}{I}. \quad (49)$$

Dále platí, že při zvyšování odebíraného výkonu P se snižuje doba t' , po kterou je závaží spouštěno. To vyplývá z vztahu pro výpočet energie E

$$E = P \cdot t'. \quad (50)$$

Velikost uložené potenciální energie je ve všech pěti případech shodná, avšak liší se účinnost, s jakou dokáže motor generovat elektrickou energii, která je závislá na jeho otáčkách, respektive na výstupním napětí. Z tohoto důvodu je velikost vygenerované energie motorem nejvyšší pro zátěž 124,5 Ω .

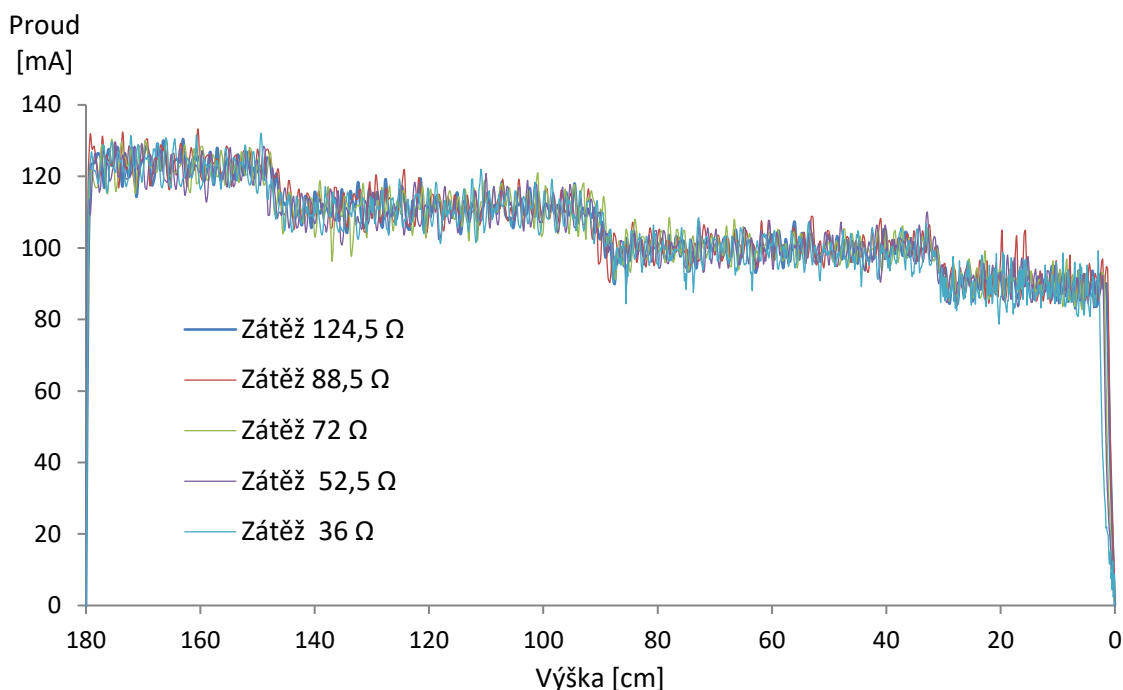
Na Obr. 42 je znázorněna závislost okamžitého generovaného výkonu v čase. Je zde patrné, že se zvyšujícím se výkonem klesá čas, po který je tento výkon možné dodávat. Plocha pod jednotlivými křivkami je pak úměrná celkové vygenerované energii. Zanedbáme-li rozdílnou účinnost generování energie, obsah ploch pod všemi pěti křivkami je totožný.



Obr. 42 Graf znázorňující průběh generovaného výkonu v čase

Šum, který je patrný na všech křivkách, je způsoben výrobními nedokonalostmi převodovky, v níž dochází k nerovnoměrnému chodu ozubených kol. Větší změny výkonu jsou způsobeny přechodem lana navijáku mezi vrstvami. Tím dojde ke změně převodového poměru a ke snížení generovaného výkonu.

Na Obr. 43 je znázorněn průběh elektrického proudu v závislosti na poloze závaží. Jak již bylo zmíněno, proud je přímo úměrný momentu na hřídeli motoru, jehož průběh je ve všech pěti případech totožný. Velikost momentu se mění pouze v případě přechodu lana do jiné vrstvy navijáku, čímž dochází ke změně převodového poměru.



Obr. 43 Graf znázorňující průběh elektrického proudu v závislosti na poloze závaží

V Tab. 36 je uvedeno srovnání celkové účinnosti získané z dílčích účinností pro kladkostroj, převodovku a motor s účinností získanou pomocí wattmetru. Obě metody jsou zatíženy chybami měření, které spočívají v nepřesném měření sil a v určení účinnosti motoru, kde došlo k zanedbání některých ztrát. Metoda určení účinnosti pomocí wattmetru je však ovlivněna pouze rozlišovací schopností použitého senzoru a jeho možné odchylky. Ve výsledku je tak přesnější. Je však možné spolehlivě určit, že úložiště v režimu generátoru funguje s vyšší účinností než v režimu motoru.

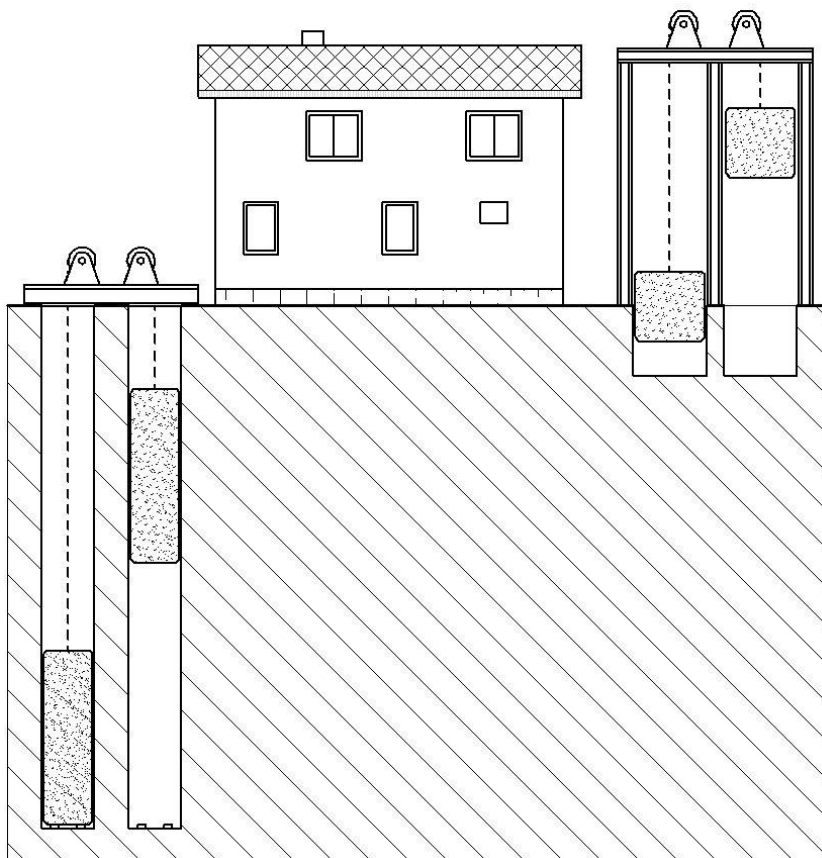
Tab. 36 Srovnání metod určení účinnosti

Účinnost	Zvedání [%]	Spouštění [%]	Zpětná [%]
Kladkostroj	86,1	82,9	-
Převodovka	75,9	77,8	-
Motor	36,3	75,1	-
Celková	23,7	48,5	11,49
Wattmetr	28,1	40,7	11,44

Součinem účinnosti zvedání a spouštění je možné určit účinnost, s jakou lze uloženou elektrickou energii získat zpět. Ta je pro metodu využívající wattmetru rovna 11,44 %. Celková úložná kapacita činí zhruba 40 mWh. S použitím vhodnějšího elektromotoru a převodovky by bylo možné dosáhnout vyšší účinnosti a tím i vyšší úložné kapacity, avšak v porovnání například s chemickými úložišti (bateriemi) je toto řešení mnohonásobně dražší, rozměrnější a disponuje řádově nižší úložnou kapacitou.

5 Domáci úložná jednotka

V rámci této kapitoly byly prozkoumány možnosti provedení domácí úložné jednotky. Z hlediska konstrukce připadají v úvahu dvě uspořádání. První spočívá ve vykopání hluboké kruhové šachty, druhé pak ve stavbě nadzemní příhradové konstrukce.



Obr. 44 Schématické znázornění podoby domácího úložiště

5.1 Podzemní konstrukce

Konstrukce šachty podzemního úložiště je velmi podobná stavbě studny či jímky. Kopané studny se skládají ze skruží o průměru 0,8 - 2,5 m. Strojově je možné provést výkop do hloubky kolem 12 m. Ten je možné následně ještě ručně prohloubit. Orientační ceny takových výkopů se pohybují okolo 10 000 Kč/m [100]. Pokud bychom uvažovali o konstrukci 15 metrů hluboké šachty s vnitřním průměrem 2 m, složené z betonových skruží a dna, vycházely by celkové náklady na výstavbu kolem 250 000 Kč. Z uvedené sumy by zhruba 100 000 Kč tvořila cena betonových skruží a dna [101]. Použitím šachty z PVC by bylo možné náklady na výstavbu snížit. Takovéto šachty jsou však dělány pouze na zakázku. Odhadované snížení nákladů se může pohybovat okolo 30 - 50 %.

Pro výrobu závaží je nejvhodnějším materiálem beton. Teoreticky by bylo možné použít i kamenný blok přizpůsobený velikosti šachty. Podstava závaží by byla kruhová, aby se přizpůsobila tvaru šachty. Výšku závaží pak určuje jeho celkovou hmotnost a ovlivňuje i dráhu, po které je závaží zvedáno. Pro výpočet bylo vybráno válcové závaží o průměru 1,95 m, výšce 2,5 m a hmotnosti 18,7 tun. Při uvažované ceně betonu 1 Kč/kg činí náklady na výrobu 20 000 Kč.

Strojní vybavení se skládá z kladkostroje, navijáku, převodovky, synchronního elektromotoru, měniče a nosné konstrukce. Ceny těchto zařízení se určují velmi obtížně a většinou je nutné kontaktovat přímo výrobce. Pro cenový odhad proto budou použity údaje výrobce Nantong Allman Industry, který nabízí elektrické lanové kladkostroje pro portálové jeřáby. Průzkumem trhu byla přibližná cena určena na 60 000 Kč.

Zařízení by bylo nutné dovybavit měničem, který by umožňoval generovanou energii vracet zpět do sítě, popřípadě jiným typem elektromotoru. Odhadovaná cena proto činí 75 000 - 100 000 Kč.



Obr. 45 Elektrický lanový kladkostroj s nosností 20 tun [102]

Kapacita takového úložiště, odvozená ze vztahu pro potenciální energii (7) a se zahrnutím účinnosti 80 %, by činila zhruba 0,54 kWh. Celkové náklady na výstavbu by se pohybovaly mezi 300 000 a 370 000 Kč.

5.2 Nadzemní úložiště

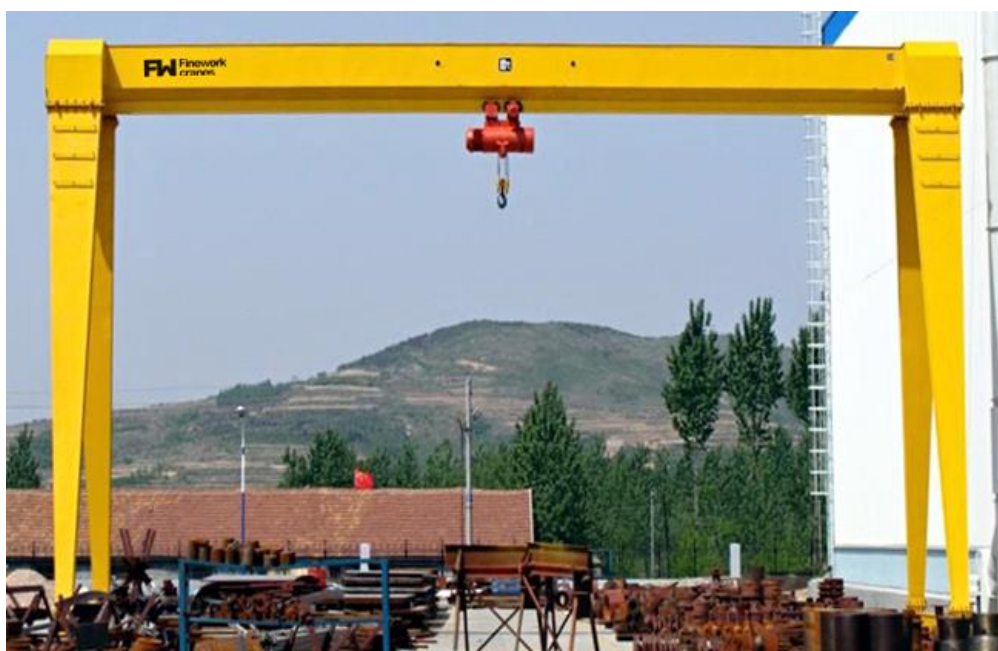
Použitím nadzemního úložiště odpadnou náklady na hloubení šachty, avšak projeví se zvýšené náklady na stavbu vnější konstrukce. Taková konstrukce musí být značně rozměrná. Zařízení je velmi podobné portálovému jeřábu, proto bude cenový odhad vycházet z něj.

Pro návrh byl vybrán jeřáb výrobce Henan Finework Cranes. Maximální nosnost dosahuje 20 tun. Přibližná cena určená průzkumem trhu činí 200 000 Kč.

Výšku a rozpětí konstrukce je možné upravit na míru. Při započítání nákladů nutných na úpravu pro možnost generování energie se cena konstrukce a navijáku pohybuje mezi 250 000 a 300 000 Kč.

Závaží bude tvořeno krychlí o straně 2 metry. Při použití betonu bude jeho celková hmotnost 20 tun. Možné by bylo i použít pojezdu jeřábu a krychle odkládat na vyvýšené místo vedle konstrukce. To by však kladlo zvýšené nároky na řízení. V úvahu připadá i umístění více navijáků na jedno rameno jeřábu. Bylo by ale nutné dále posílit jeho konstrukci.

Pro základní výpočet bude použit jeřáb s jedním navijákem a s jedním trvale připojeným závažím, které bude zvedáno do výšky 8 m. Podle vztahu pro výpočet potenciální energie (7) zde bude uloženo 0,37 kWh. Celkové náklady pak činí asi 270 000 až 320 000 Kč.



Obr. 46 Portálový jeřáb s nosností 20 tun [103]

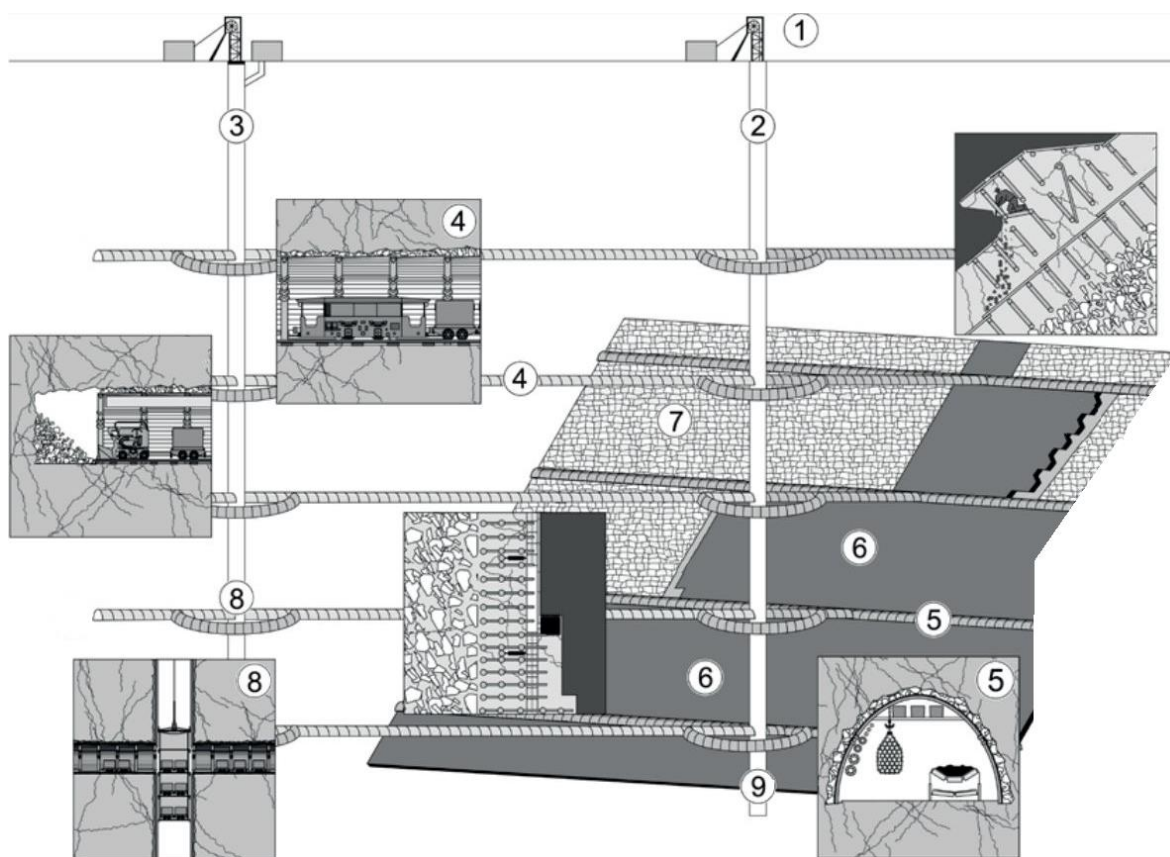
5.3 Srovnání

Náklady u obou metod jsou pouze orientační. Při výrobě většího množství úložišť by se je pravděpodobně podařilo snížit o několik desítek procent. Vzhledem k odhadovaným nákladům na výstavbu, které činí 700 000 Kč/kWh pro podzemní úložiště a 800 000 Kč/kWh pro nadzemní konstrukci, a vzhledem k jejich značným rozměrům je však zřejmé, že se jejich aplikace ve formě domácích úložišť energie v žádném případě nevyplatí.

6 Průmyslová úložiště

Z předchozích kapitol vyplývá, že výstavba gravitačního úložiště v malém měřítku nedává ekonomicky smysl, ovšem podle mínění společností, které se vývojem těchto úložišť zabývají, dochází v návaznosti na zvětšování měřítka k výraznému poklesu v poměru nákladů a předpokládané úložné kapacity. V následující kapitole proto budou popsány možnosti větších průmyslových úložišť.

Ze všech uváděných typů konstrukcí jsou pro podmínky České republiky nejvhodnější úložiště využívající hlubinných dolů, kterých se zde nachází několik desítek. Umístěním úložiště pod zemí odpadají problémy související s masivní nosnou konstrukcí a působením povětrnostních vlivů na spouštěná závaží.

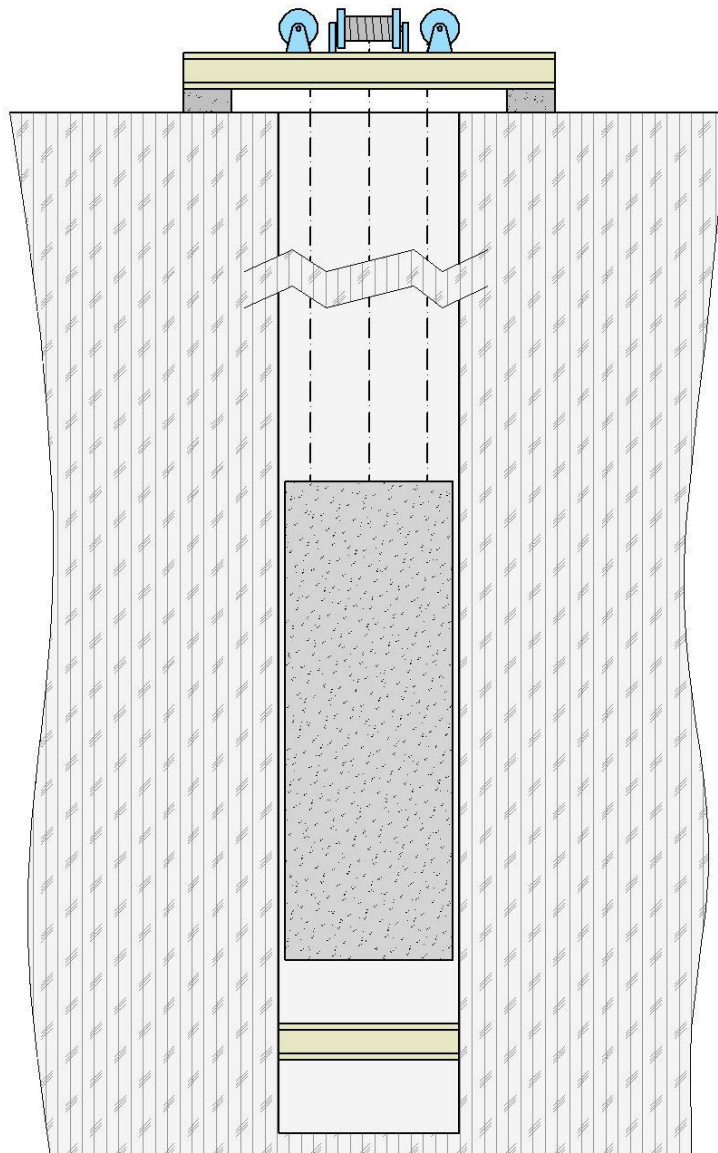


Obr. 47 Schéma hlubinného dolu: 1 - Těžní věž, 2 - Vtažná jáma, 3 - Výdušná jáma, 4 - Překop, 5 - Chodba, 6 - Uhelná sloj, 7 - Zával, 8 - Náraží, 9 - Vodní jámka [104]

Hlubinný důl se skládá ze dvou šachet (vtažné a výdušné jámy), které jsou spojeny překopy. Dále se zde nachází chodby, které vedou k uhelným slojím. Šachty mohou dosahovat hloubek přes 1 000 metrů. Jejich průměr se pohybuje od 5 do 20 metrů. Právě tyto šachty mohou být přestavěny na úložiště energie. V úvahu připadají tři typy konstrukce. Úložiště může obsahovat jedno velké závaží, několik menších skládaných na sebe, nebo mohou být tato závaží přemístována do postranních chodeb či překopů.

6.1 Úložiště obsahující jedno závaží

Pro návrh byl vybrán uzavřený hlubinný důl Staříč, který je v této souvislosti posuzován společností Gravitricity. Hloubka šachty činí 1 155 m a průměr 7,5 m [105]. Maximální nosnost mostových či portálových jeřábů se pohybuje od 500 do 1 000 tun. Pokud by bylo uvažováno betonové závaží o hmotnosti 2 000 tun a o průměru 7 m, jeho výška by činila 20 m. Závaží by bylo zvedáno pomocí čtyř navijáků.

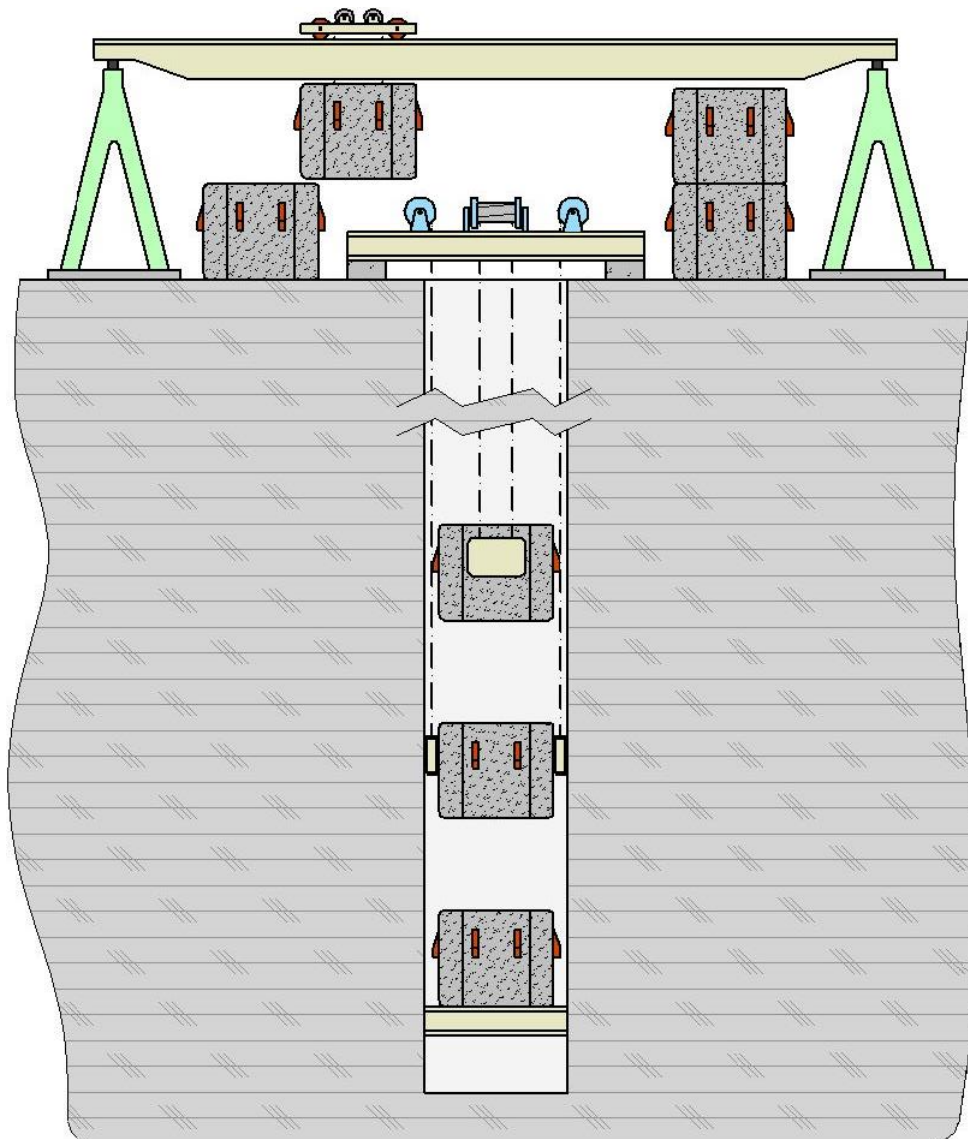


Obr. 48 Znárodnění hlubinného úložiště s jedním závažím

Pokud bude závaží spouštěno do hloubky 1 100 m a uvažována účinnost činí 80 %, celková úložná kapacita pak dosáhne 4,5 MWh. To představuje průměrnou denní spotřebu 450 domácností. Konstrukce je velmi jednoduchá a vyžaduje minimální úpravy stávající šachty. Největší problém představuje výroba a umístění závaží. Nejsnazší způsobem je složení závaží z menších segmentů těsně pod povrchem a jeho následné připojení k systému navijáků.

6.2 Úložiště obsahující více závaží

Tento typ koncepce úložiště vyvíjí právě společnost Gravitricity. Místo jednoho masivního závaží je na povrchu rozmístěno několik menších. Ta jsou postupně přemísťována k šachtě. Každé závaží je spouštěno pomocí páru protilehlých navijáků. Najednou je tedy možné spouštět dvě závaží. To umožňuje kontinuální dodávku elektrické energie i v případě, kdy je jeden pár zvedacích zařízení přemísťován zpět do horní pozice.



Obr. 49 Znárodnění hlubinného úložiště s několika závažími

Společnost uvažuje o umístění 24 pětiset tunových závaží. V uvedeném nákresu má každé závaží válcový tvar o průměru 7 m a výšce 5 m. Jsou zde 4 plochy s ocelovými háky, které slouží pro ukotvení zvedacího zařízení. Závaží budou na dně šachty skládána na sebe, proto musí vykazovat vysokou mechanickou odolnost. S každým uloženým závažím se také zkrátí dráha, po které je spouštěno.

Manipulace se závažími na povrchu povede také ke snížení celkové účinnosti. S uvažovaným množstvím závaží a jejich dráhou činí souhrnná kapacita úložiště přibližně 25 MWh. To odpovídá denní spotřebě 2 500 domácností. Celková účinnost se pohybuje okolo 75 %.

Realizace tohoto řešení bude náročná hlavně z hlediska přesného umístění závaží na dně šachty a jejich automatického připojování ke zvedacím zařízením. V takové délce se bude projevovat deformace lan vlivem kroucení a smršťování. S uvažováním uváděné ceny 8 000 Kč/kWh, by náklady na stavbu úložiště dosáhly 200 milionů korun.

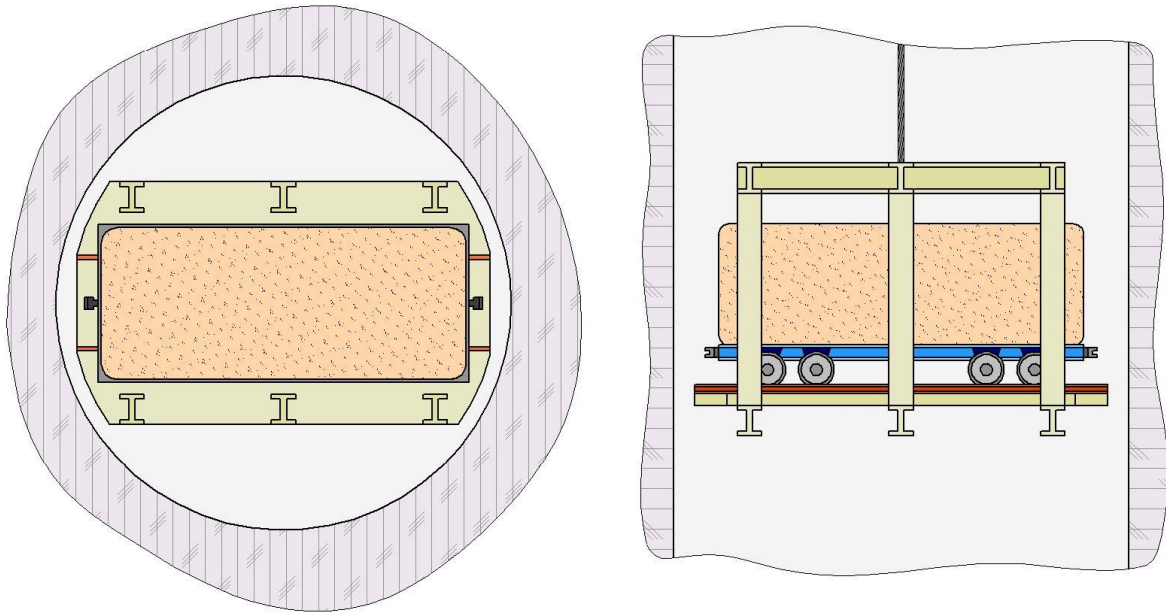
6.3 Systém využívající bočních chodeb

Pro ukládání závaží je teoreticky možné využít i bočních chodeb a překopů. Velikost a tvar závaží se musí přizpůsobit rozměrům chodeb, aby je do nich bylo možné umístit. Vhodné je také jejich usazení na podvozek železničního vagónu. Tím se velice usnadní manipulace nad i pod povrchem. Zároveň není samotné závaží nijak mechanicky namáháno, což umožňuje použití například pískovcových bloků, které jsou levné, snadno se dělí a opracovávají. Uvažovaná hustota pískovce je $2\,500\text{ kg/m}^3$.

Přesné plány hlubinných dolů se nepodařilo dohledat. V dostupných zdrojích je však popsána stavba 3 000 m dlouhého překopu, který spojuje hlubinné doly ČSA a Darkov. Překop se nachází v hloubce 900 m pod povrchem. Minimální výška profilu činí 4,5 m a šířka 6,7 m. Tento překop původně sloužil k přepravě černého uhlí z lokality ČSA do moderní úpravny uhlí v dole Darkov. Navrhované úložiště bude přizpůsobeno rozložení těchto dolů [106], [107].

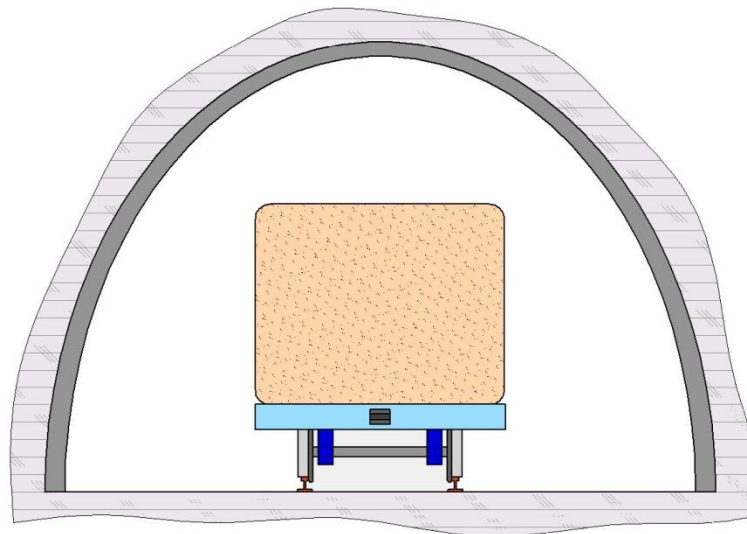
Těžební jámy obou dolů mají průměry 7,5 m. Velikost vagónu se závažím se těmito rozměry musí podřídít. Maximální délka vozu je navržena na 6 m a šířka na 2,5 m. Vagóny těchto rozměrů by musely být vyrobeny na míru. Konstrukčně by však byly velmi jednoduché. Nemusí obsahovat brzdy ani odpružení. Nosnost obdobných železničních vagónů se pohybuje v rozmezí 60 až 70 tun. Celková uvažovaná hmotnost vozu včetně závaží bude 80 tun. Manipulaci s vagóny může zajišťovat lokomotiva či řetězový systém, který bude umístěn v kolejišti. Do chodby dolu budou instalovány koleje o běžném rozchodu 1 435 mm. Díky tomu mohou být vagóny se závažími přepravovány po železnici.

Důlní vozíky s uhlím jsou na povrch vytahovány pomocí klecí, které jsou připojeny ke zvedacímu zařízení. Tohoto principu je možné využít i při konstrukci úložiště. Vůz se závažím najede do klece a je následně spouštěn dolů. V dolní pozici je přesunut do boční šachty a klec se vrací nahoru pro další vůz. Využitím vtažné i výdušné jámy je možné docílit kontinuální dodávky energie, kdy je v jedné jámě spouštěno závaží a ve druhé je zvedána prázdná klec. Nákres klece s vagónem je znázorněn na Obr. 50.

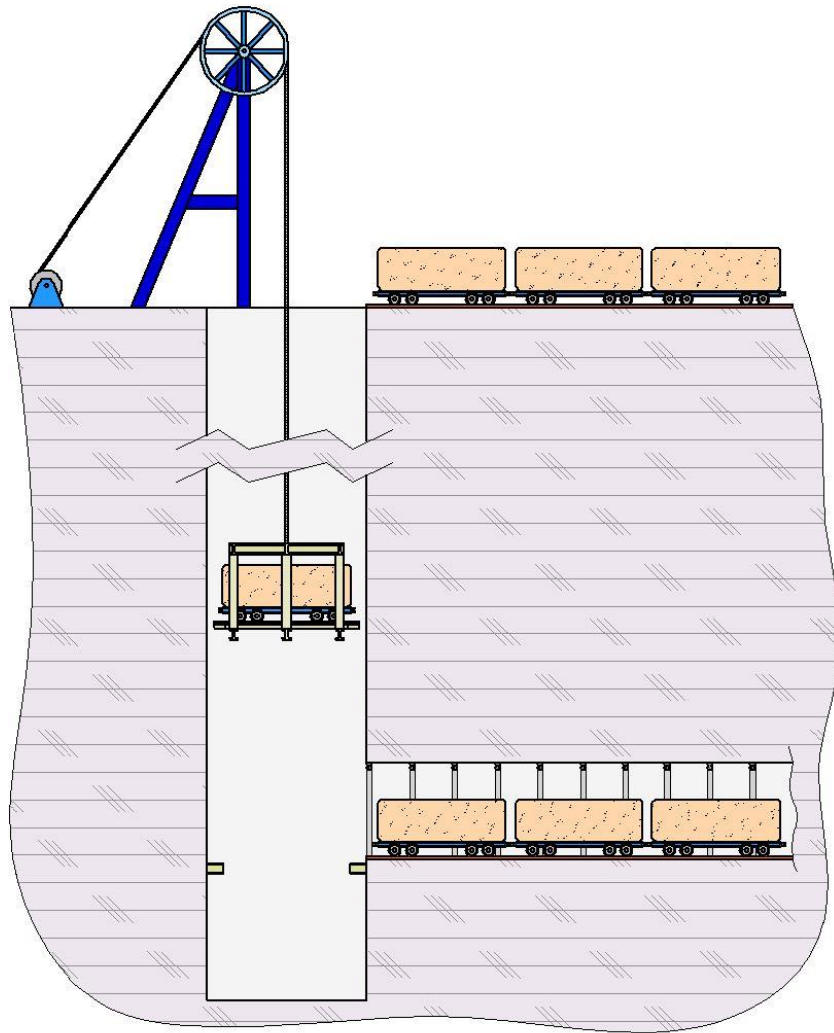


Obr. 50 Znáornění spouštěné klece s vozem

Za předpokladu, že překop spojuje jámy obou dolů, může být po celé jeho délce umístěno přes 450 vozů se závažím. Průřez překopu je znázorněn na Obr. 51. Celá podoba úložiště je pak popsána na Obr. 52.



Obr. 51 Znáornění umístění vozu se závažím v překopu



Obr. 52 Znáornění principu ukládání vozů do chodeb a překopů

Potenciální energie jednoho vozu se závažím odpovídá 160 kWh. S uvažováním potenciální energie všech vagónů a předpokládanou účinností při generování 85 % by úložná kapacita činila přibližně 60 MWh. Na celkovou účinnost by měly značný vliv ztráty energie, spočívají především v nutnosti manipulace s velkým množstvím závaží. Ta je proto odhadována na 70 až 75 %. Hlavní výhodou tohoto řešení je využití známých a ověřených principů a zařízení. Doprava vozíků s uhlím probíhá obdobným způsobem. Důlní zařízení by tak mohlo být pouze modifikováno pro přepravu těžších vozů se závažím a jiným rozchodem kolejí.

7 Závěr

V úvodní části práce byly popsány nejběžněji používané typy úložišť energie, jejich fyzikální princip, provedení a konstrukce. Dále zde byly uvedeny oblasti vhodného použití pro daný typ úložiště, jeho přednosti, nedostatky a odhadované náklady. Z hlediska energetiky jsou stále nejrozšířenějším typem přečerpávací vodní elektrárny, které umožňují skladování velkého množství energie s příznivými náklady na výstavbu v poměru k jejich kapacitě. V současné době také dochází k rychlému rozvoji v oblasti lithiových baterií, jejichž výrobní náklady průběžně klesají. Významný potenciál v sobě skrývají i technologie průtočných baterií a technologie power to gas, které výhledově umožní ukládat řádově stovky gigawatthodin elektrické energie.

V následující kapitole bylo uvedeno pět společností, které se zabývají vývojem gravitačních úložišť energie. Byla zde detailně popsána technická řešení a fáze, v jaké se projekty nacházejí. Koncepce úložišť Gravity Power Module a Gravity Storage jsou velice rozsáhlé, nákladné a konstrukčně poměrně náročné. V současné době probíhá příprava demonstračních modelů, avšak vzhledem k výši nákladů na výzkum a na výstavbu, respektive na využití v této velikosti nevyzkoušených principů, je jejich větší nasazení nepravděpodobné.

Úložiště společnosti Ares vstoupilo do fáze výstavby v roce 2019. Termín jeho dokončení se však stále oddaluje. Vzhledem k rozsáhlé zastavěné ploše, hluku během provozu a očekávané náročnosti na údržbu řady pohyblivých částí je i větší nasazení těchto úložišť nepravděpodobné.

Společnost Energy vault úspěšně otestovala své věžové úložiště. Během zkoušek však vyvstaly problémy s manipulací se závažími během špatných povětrnostních podmínek. Společnost reagovala návrhem nového typu zapouzdřeného úložiště. Nový typ úložiště je ale neodzkoušený. Vzhledem k masivní konstrukci a většímu počtu zvedacích zařízení je možné očekávat zvýšené náklady na výstavbu i provoz. Větší nasazení těchto úložišť je také málo pravděpodobné.

Hlubinné úložiště společnosti Gravitricity má oproti předchozím řešením řadu výhod. Využitím vysloužilých hlubinných dolů dojde ke značnému snížení nákladů na výstavbu. Zařízení je v principu velmi jednoduché a může být konkurenceschopné. Za pozornost stojí i uvažovaná výstavba plnohodnotného úložiště v České republice.

V následující kapitole byl popsán návrh a výroba modelu gravitačního úložiště energie. Cílem bylo znázornit princip gravitačního ukládání energie a ověřit možnosti výroby úložiště svépomocí. Zařízení splnilo svůj účel a bylo schopné ukládat elektrickou energii. Z provedených měření však byla zjištěna velice nízká celková účinnost. Pro účely skladování energie v malém měřítku takové zařízení není vhodné.

V navazující kapitole byly prověřeny možnosti výstavby skladovací jednotky pro domácnost. Byla zde navržena možná technická řešení a posouzena jejich ekonomičnost. Předpokládané náklady vztažené na jednu kilowatthodinu byly však příliš vysoké. Stavba gravitačního úložiště pro rodinný dům se tak rozhodně ekonomicky nevyplatí.

V poslední kapitole byly posouzeny možnosti tří hlubinných úložišť, které se lišily rozvržením závaží a jejich rozmístováním. V prvním případě bylo uvažováno jedno masivní závaží. Toto řešení je jednoduché na řízení a údržbu. Omezujícím faktorem byla maximální nosnost navijáků a díky nízké celkové hmotnosti závaží i nízká úložná kapacita. Ve druhém případě bylo uvažováno technické řešení společnosti Gravitricity. Několik menších závaží bylo postupně spouštěno do důlní šachty pomocí dvou párů navijáků. Hlavní výhoda tkví ve vysoké celkové hmotnosti závaží a tudíž i v relativně vysoké úložné kapacitě. Vzhledem k poměrně nízkým nákladům na výstavbu a velmi dlouhé životnosti zařízení by náklady na výstavbu a provoz v horizontu několika desetiletí měly být nižší, než například u úložišť na bázi lithia. V posledním případě bylo uvažováno řešení spočívající ve využití postranních chodeb a překopů pro ukládání závaží. Tímto způsobem by bylo možné v podzemí ukládat ještě větší množství hmoty a tím dosáhnout i vyšší úložné kapacity. Takové řešení by však obnášelo i snížení účinnosti z důvodů nutnosti manipulace s velkým množstvím závaží. Všechna uvažovaná řešení by vzhledem k nízkým předpokládaným nákladům na výstavbu měla být konkurence schopná a mohla by poskytovat důležité podpůrné služby v oblasti regulace a zálohy výkonu energetické soustavy. Prosazení gravitačních úložišť na trhu závisí ve velké míře na výsledcích provozu prvních jednotek v plném měřítku, které lze očekávat v horizontu několika následujících let, a na stavu vývoje ostatních typů úložných systémů, především pak lithiových.

Seznam použitých zdrojů

- [1] RUFER, Alfred. *Energy storage: systems and components*. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-1-138-08262-5.
- [2] S. BARNES, Frank a Jonah G. LEVINE. *Large energy storage systems handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4200-8600-3.
- [3] MAY, Geoffrey, Alistair DAVIDSON a Boris MONAHOV. Lead batteries for utility energy storage. *Journal of Energy Storage* [online]. 2018, 15, 145-157 [cit. 2022-05-19]. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2017.11.008
- [4] VACULÍK, Sebastian, Petr BAČA a Josef MÁCA. Náklady na akumulaci elektrické energie v komerčních sekundárních člancích. In: *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20319-naklady-na-akumulaci-elektricke-energie-v-komercnich-sekundarnich-clancich>
- [5] MAREŠ, Jan, Martin LIBRA a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. *Elektro* [online]. 2011, 10 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>
- [6] HOUSER, Pavel. Historie, výhody a nevýhody Li-on baterií. *SCIENCE mag* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://sciencemag.cz/historie-vyhody-a-nevyhody-li-on-baterii/>
- [7] ŠPINA, Martin. Li-ion baterie: Porovnání nejpoužívanějších typů. *O ENERGETICE* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/li-ion-baterie-porovnani-nejpouzivanejsich-typu>
- [8] ZILVAR, Jiří. Jak uložit elektrinu? Nabízí se lithium, olovo, Tesla i slaná voda. *Tzvinfo* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/17736-jak-ulozit-elektrinu-nabizi-se-lithium-olovo-tesla-i-slana-voda>
- [9] The packaging form of lithium-ion battery: which is better?. In: *SmartPropel* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.smartpropel.com/the-packaging-form-of-lithium-ion-battery-which-is-better-cylinder-cell-square-cell-or-a-pouch-cell/>
- [10] Battery storage power station. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_storage_power_station#Lithium-ion
- [11] Bateriová úložiště: klíčové technologie dneška. In: *SIEMENS: Energetika* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.visionmag.cz/bateriova-uloziste-klicove-technologie-dneska>
- [12] V Plané nad Lužnicí spustili největší bateriové úložiště v Česku. *O ENERGETICE* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/v-plane-nad-luznici-spustili-nejvetsi-bateriove-uloziste-v-cesku>

- [13] FRIEDMAN, Douglas, Tina MASCIANGIOLI a Steve OLSON. *The role of the chemical sciences in finding alternatives to critical resources: a workshop summary*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2012. ISBN 978-0-309-25429-8.
- [14] V Perském zálivu spustili největší baterii světa. *IDNES* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/technika/v-perskem-zalivu-spustili-nejvetsi-baterii-sveta-virtualni-a-bez-lithia.A190214_150610_tec_technika_mla
- [15] REICHL, Tomáš. Průtoková baterie. *O ENERGETICE* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/prutokova-baterie>
- [16] DIOPAN, Václav. Průtokové baterie před prahem singularity: část 2. *HYDRID* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/prutokove-baterie-pred-prahem-singularity-cast-2/>
- [17] Vanadium redox battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Vanadium_redox_battery
- [18] LIBICH, Jiří. Superkondenzátor vs. baterie: parametry a použití. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21462-superkondenzator-vs-baterie-parametry-a-pouziti>
- [19] *KILOWATTLABS* [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://kilowattlabs.com/>
- [20] MOLEK, Tomáš. Supravodivost: princip a využití. *O ENERGETICE* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/supravodivost-princip-a-vyuziti>
- [21] JIRSA, M. *Supravodivost: naděje pro 21. století* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/aktuality/supravodivost-nadeje-pro-21-stoleti>
- [22] TIXADOR, Pascal. *Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective* [online]. In: . s. 14 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/CR5_Final3_012008.pdf
- [23] Výroba vodíku. *DEVINN* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/blog/vyroba-vodiku/>
- [24] TOCHÁČKOVÁ, Anna a Martin ŠILHAN. Využití vodíkových technologií v energetice. *Allofpower* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://allofpower.cz/technologie-a-materialy/vyuziti-vodikovych-technologie-v-energetice-228>
- [25] SUCHÝ, Miroslav. *Ukládání elektrické energie do vodíku ve společnosti C-ENERGY Planá S.R.O.* Praha, 2021. Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Vát Klein.
- [26] GANDIA, Luis, Gurutze ARZAMENDI a Pedro DIÉGUEZ. *Renewable Hydrogen Technologies: Production, Purification, Storage, Applications and Safety*.

Amsterdam: ELSEVIER, 2013. ISBN 978-0-444-56352-1.

- [27] SHIVA KUMAR, S. a V. HIMABINDU. Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* [online]. 2019, 2(3), 442-454 [cit. 2022-05-19]. ISSN 25892991. Dostupné z: doi:10.1016/j.mset.2019.03.002
- [28] ABDIN, Z., C.J. WEBB a E. GRAY. *Solar hydrogen hybrid energy systems for off-grid electricity supply: Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015.
- [29] SHERIF, S. *Handbook of hydrogen energy*. Boca Raton: CRC Press, 2015. ISBN 9781420054477.
- [30] LEHNER, Markus, Robert TICHLER, Horst STEINMÜLLER a Markus KOPPE. *Power-to-gas: technology and business models*. Cham: Springer, 2014. Springer briefs in energy. ISBN 9783319039947.
- [31] HEYNE, Stefan, Martin SEEMANN a Simon HARVEY. Integration Study for Alternative Methanation Technologies for the Production of Synthetic Natural Gas from Gasified Biomass. *ResearchGate* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: doi:10.3303/CET1021069
- [32] BIČÁKOVÁ, Olga. Možnosti výroby vodíku biologickými procesy. *Paliva* [online]. 103-112 [cit. 2022-05-19]. ISSN 1804-2058. Dostupné z: doi:10.35933/paliva.2010.04.01
- [33] HROZEK, Dian. *Zásobníky plynu v České republice* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zasobniky-plynu-v-cr>
- [34] MEKHILEF, S., R. SAIDUR a A. SAFARI. Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2012, 16(1), 981-989 [cit. 2022-05-19]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2011.09.020
- [35] Jak funguje kogenerační jednotka. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/jak-funguje-kogeneracni-jednotka>
- [36] KADRNOŽKA, Jaroslav. *Plynové turbíny a turbokompresory*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1986.
- [37] GAHLEITNER, Gerda. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2013, 38(5), 2039-2061 [cit. 2022-05-19]. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2012.12.010
- [38] OTTEN, Reinhard. *The first industrial PtG plant: Audi e-gas as driver for the energy turnaround* [online]. In: . [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.cedec.com/files/default/8-2014-05-27-cedec-gas-day-reinhard-otten-audi-ag.pdf>
- [39] Technologie Power-to-Gas (P2G). In: *ÚJV Řež, a. s.* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/akordeonovy-seznam/technologie-power-to-gas->

- [40] BAŠTA, Vít, Jan ŠPALE a Miroslav RATHAN. Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie: 1. díl – principy a přehled. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21610-skladovani-elektriny-prostrednictvim-tepla-aneb-carnotovy-baterie-1-dil-principy-a-prehled>
- [41] BAŠTA, Vít, Jan ŠPALE a Miroslav RATHAN. Skladování elektřiny prostřednictvím tepla aneb Carnotovy baterie: 2. díl – projekty a technologie ve světě a v ČR. *Tzbinfo* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/21727-skladovani-elektriny-prostrednictvim-tepla-aneb-carnotovy-baterie-2-dil-projekty-a-technologie-ve-svete-a-v-cr>
- [42] ZEMAN, Michal a Radek ŠKODA. Průmyslové ukládání tepelné energie: do tekutých solí. *Allofpower* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/zajimavosti/prumyslove-ukladani-tepelne-energie-do-tekutych-soli-36>
- [43] World first: Siemens Gamesa begins operation of its innovative electrothermal energy storage system. In: *SIEMENS: Gamesa* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.siemensgamesa.com/en-int>
- [44] MATZ, Michael. A new use for a 3,000-year-old technology: Concrete thermal energy storage. *EPRI Journal* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://eprijournal.com/a-new-use-for-a-3000-year-old-technology-concrete-thermal-energy-storage/>
- [45] WILLUHN, Marian. Molten silicon storage enough to power city, says MIT. *Pv magazine* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2018/12/07/molten-silicon-storage-enough-to-power-city-says-mit/>
- [46] List of energy storage power plants. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_energy_storage_power_plants
- [47] Climate deed under our feet: filling of Mustikkamaa heat caverns is started. In: *Helen* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.helen.fi/en/news/2020/mustikkamaa>
- [48] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, Petr DUB, ed. *Fyzika. 2., přeprac.* vyd. Přeložil Miroslav ČERNÝ. Brno: VUTIUM, 2013. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [49] *Gravity Power* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.gravitypower.net/>
- [50] Přecherňavací vodní elektrárny v Česku: potenciál mají Lipno i Kyjice. *HYBRID* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-cesku-skryty-potencial-maji-lipno-i-kyjice/>

- [51] BOTHA, C.D. a M.J. KAMPER. Capability study of dry gravity energy storage. In: *Journal of Energy Storage* [online]. ELSEVIER, s. 159-174 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://research.ee.sun.ac.za/emr/emr/files/u1/2019-ELSEVIER-Botha.pdf>
- [52] Malá vodní elektrárna Černé jezero. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/cerne-jezero-58157>
- [53] Malá vodní elektrárna Pastviny. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/pastviny-58146>
- [54] VOBOŘIL, David. Přecherčpávací vodní elektrárny v České republice. *O ENERGETICE* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice>
- [55] Výstavba nových vodních elektráren v ČR: Jaké jsou plány?. *Nazeleno* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/vystavba-novych-vodnich-elektraren-v-cr-jake-jsou-plany.aspx>
- [56] Přecherčpávací elektrárna dlouhé stráně. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dlouhe-strane-58155>
- [57] Přecherčpávací vodní elektrárna Dalešice. In: *ČEZ* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/voda/vodni-elektrarny/ceska-republika/dalesice-58156>
- [58] List of pumped-storage hydroelectric power stations. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pumped-storage_hydroelectric_power_stations
- [59] LUND, Henrik a Georges SALGI. The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy Conversion and Management* [online]. 2009, 50(5), 1172-1179 [cit. 2022-05-19]. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2009.01.032
- [60] HOFFEINS, Hans, Norbert ROMEYKE a Dieter HEBEL. *The commissioning of the first air storage gas turbine group*. 8. Mannheim: BBC Brown & Boveri CIE, 1980, s. 465-473.
- [61] KING, Marcus, Anjali JAIN, Rohit BHAKAR, Jyotirmay MATHUR a Jihong WANG. Overview of current compressed air energy storage projects and analysis of the potential underground storage capacity in India and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, 139 [cit. 2022-05-19]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.110705
- [62] *POWERTHRU: Carbon Fiber Flywheel Technology for Government Applications* [online]. Mayfield USA, 2016 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.power->

thru.com/carbon_fiber_flywheel_technology.html

- [63] KHODAPARASTAN, Mahdiyeh a Ahmed MOHAMED. Flywheel vs. Supercapacitor as Wayside Energy Storage for Electric Rail Transit Systems. *Inventions* [online]. 2019, 4(4) [cit. 2022-05-20]. ISSN 2411-5134. Dostupné z: doi:10.3390/inventions4040062
- [64] AMIRYAR, Mustafa a Keith PULLEN. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences* [online]. 2017, 7(3) [cit. 2022-05-20]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app7030286
- [65] OLABI, Abdul, Tabbi WILBERFORCE, Mohammad ABDELKAREEM a Mohamad RAMADAN. Critical Review of Flywheel Energy Storage System. *Energies* [online]. 2021, 14(8) [cit. 2022-05-20]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14082159
- [66] ARTECONI, Alessia a Kenneth BRUNINX. 5.4 Energy Reliability and Management. *Comprehensive Energy Systems* [online]. Elsevier, 2018, s. 134-165 [cit. 2022-05-20]. ISBN 9780128149256. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-809597-3.00513-7
- [67] SCHMIDT, Miriam. Teil 5 der Wochenserie Stromspeicher: Schwungradspeicher von Beacon Power, Temporal Power und Rotokinetik UG. *Cleanthinking* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.cleanthinking.de/teil-5-der-wochenserie-stromspeicher-schwungradspeicher-von-beacon-power-temporal-power-und-rotokinetik-ug/>
- [68] SPEARS, John. Ontario electricity gets taken for a spin. *Toronto Star* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.thestar.com/business/2014/11/07/ontario_electricity_gets_taken_for_a_spin.html#
- [69] Škoda Auto, PRE a Chakratec přiváží do Prahy jedinečnou technologii pro nabíjení elektromobilů. *HYBRID* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/skoda-auto-pre-chakratec-privazi-do-prahy-jedinecnou-technologie-pro-nabijeni-elektromobilu/>
- [70] Chakratec: Jak fungují jeho setrvačníky?. *ŠKODA AUTO: DigiLab* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://skodaautodigilab.com/cs/news/chakratec-jak-funguji-jeho-setrvacniky>
- [71] *Chakratec* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://chakratec.com/>
- [72] *GBC Solino* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://gbc-solino.cz/headpage/stridace-hybridni/solaredge/>
- [73] KUBÁTOVÁ, Zuzana. Obří baterie v Česku dostanou šanci. Chystá se změna zákona. *Seznam* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.seznamzpravy.cz/clanek/obri-baterie-v-cesku-dostanou-sanci-chysta-se-zmena-zakona-116985>

- [74] FRIDRICH, Michal a Michal ŠTĚRBA. Vodní dílo Morávka. In: *Obec Morávka* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.moravka.info/obec/obci/vodni-dilo-moravka/>
- [75] VOBOŘIL, David. Gravity Power Module: Budoucnost akumulace energie?. *O ENERGETICE* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektroenergetika/gravity-power-module>
- [76] GALANT, S., E. PEIRANO a L. DEBARBERIS. Electricity Storage: A New Flexibility Option for Future Power Systems. MIGLIAVACCA, Gianluigi, ed., Gianluigi MIGLIAVACCA. *Advanced Technologies for Future Transmission Grids* [online]. London: Springer London, 2013, s. 247-284 [cit. 2022-05-20]. Power Systems. ISBN 978-1-4471-4548-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-4549-3_7
- [77] Gravity Power. *Netcapital* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://netcapital.com/companies/gravity>
- [78] *Heindl Energy: Gravity Storage* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://heindl-energy.com/>
- [79] OZIN, Geoffrey. Gigawatt Electricity Storage Using Water and Rocks. *Advanced Science News* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.advancedsciencenews.com/gigawatt-electricity-storage-using-water-and-rocks/>
- [80] German company plans large-scale power storage using massive rock block. *Clean Energy Wire* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.cleanenergywire.org/news/offshore-expansion-track-pumped-storage-flat-country/german-company-plans-large-scale-power-storage-using-massive-rock-block>
- [81] *Ares* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://aresnorthamerica.com/>
- [82] *ARES Gravity Trains May Solve the Energy Storage Problem* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.railway.supply/en/ares-gravity-trains-may-solve-the-energy-storage-problem/>
- [83] Advanced Rail Energy Storage. In: *Ares* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://s3.amazonaws.com/siteninja/multitenant/assets/21125/files/original/All_About_ARES_-_070616.pdf
- [84] FLYNN, Mike. KIRKLAND COMPANY'S PLAN FOR RAIL-CAR ENERGY-STORAGE CONCEPT FUELS RENEWABLE-ENERGY INTEREST. *MIKE FLYNN AND ASSOCIATES* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://www.emikeflynn.com/index.php/blog/flynn-s-harp/kirkland-company-s-plan-for-rail-car-energy-storage-concept-fuels-renewable-energy-interest>
- [85] *Gravitricity: Gravity energy storage* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://gravitricity.com/>

- [86] Na Ostravsku se rodí unikátní úložiště elektřiny na bázi gravitace. *Solární Novinky* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.solarninovinky.cz/na-ostravsku-se-rodí-unikatni-uloziste-elektriny-na-bazi-gravitace/>
- [87] O'GRADY, Cathleen. Gravity-based batteries try to beat their chemical cousins with winches, weights, and mine shafts. *Science* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.science.org/content/article/gravity-based-batteries-try-beat-their-chemical-cousins-winches-weights-and-mine-shafts>
- [88] *ENERGY VAULT* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.energyvault.com/>
- [89] BARNARD, Michael. Energy Vault Loses \$1.2 Billion/40% Market Cap, CO2e/KWh Worse Than Natural Gas. *CleanTechnica* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2022/04/20/energy-vault-loses-1-2-billion-40-market-cap-co2e-kwh-worse-than-natural-gas/>
- [90] CONCA, James. Lifting and lowering tons of bricks: the best storage solution for Wind and Solar intermittency?. *Energypost.eu* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://energypost.eu/lifting-and-lowering-tons-of-bricks-the-best-storage-solution-for-wind-and-solar-intermittency/>
- [91] Švýcaři staví bizarní gravitační baterie. Jeřábové věže slouží jako úložiště energie. *Aktuálně.cz* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/svycarsky-startup-stavi-bizarni-gravitacni-baterie-slouzi-ja/r~6b0caef6597411ebaabd0cc47ab5f122/>
- [92] CONCA, James. We Can Store Our Excess Renewable Energy In An Energy Vault. *Forbes* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2022/01/27/we-can-store-our-excess-renewable-energy-in-an-energy-vault/?sh=ad3bfa833348>
- [93] *EBETON* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/>
- [94] ČSN EN 14492-2+A1: Jeřáby - Vrátky, kladkostroje a zdvihové jednotky se strojním pohonem. Část 2, Kladkostroje a zdvihové jednotky se strojním pohonem = Cranes - Power driven winches and hoists. Part 2, Power driven hoists. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [95] BIGOŠ, Peter. *Teória a stavba zdvíhacích a dopravných zariadení*. Vyd. 1. Košice: TU v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2012. Edícia vedeckej a odbornej literatúry (Technická univerzita v Košiciach). ISBN 978-80-553-1187-6.
- [96] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [97] MYNÁŘ, Břetislav a Jaroslav KAŠPÁREK. *Dopravní a manipulační zařízení*. Skriptum pro bakalářské studium. Brno, 2002.
- [98] STEMME, O. a P. WOLF. *Principles and Properties of Highly Dynamic DC*

Miniature Motor. Interelektrik AG, CH-6072 Sachseln /Switzerland, 1994.

- [99] *MABUCHI MOTOR: RS-445PA/PD* [online]. 430 Matsuhidai, Matsudo City, Chiba, 270-2280 Japan [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/813147/MabuchiMotor/RS-445PA/1>
- [100] *GRAVA STAVBY: Kopané studny* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://gravastavby.cz/>
- [101] Betonové šachty. *Maba.cz* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.mabacz.cz/maba/sites/default/files/imce/dn2000-2500.pdf>
- [102] *ALLMAN INDUSTRY: Elektrické lanové kladkostroje* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://cz.allmancrane.com/electric-hoist/wire-rope-hoist/20-ton-electric-wire-rope-hoist.html>
- [103] *Henan Finework cranes* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.fineworkcranes.com/>
- [104] *Svinovský hlasatel: Jak se těžilo černé zlato* [online]. Ostrava, 2021, [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://svinov.ostrava.cz/cs/o-svinove/zpravodaj/rok-2021/copy_of_Svinovskhlasatel_03_2021_web.pdf
- [105] ZÁVOD ÚTLUM - JIH. In: *OKD.cz* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/o-nas/kde-pusobi-okd/dul-paskov>
- [106] *HORNÍK: Doly Karviná a Darkovpropojilo unikátní důlní dílo* [online]. 2013, [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://adoc.pub/doly-karvina-a-darkov-propojilo-unikatni-dlni-dilo.html>
- [107] SOLAŘOVÁ, Hana. Současný nejdelší tunel v České republice. In: *Stavební technika* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/soucasny-nejdelsi-tunel-v-ceske-republice>

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
AFC	Článek s alkalickým elektrolytem
BCS	Teorie supravodivosti podle J. Bardeen, L. Cooper, J.R.Schrieffer
CAES	Úložiště stlačeného vzduchu
CNG	Stlačený zemní plyn
EVRC	Energy Vault Resilenci Center
FES	Setrvačnickové úložiště
Kč	Česká koruna
LFP	Lithium-železo-fosfátový akumulátor
Li-ion	Lithium-iontový akumulátor
Li-pol	Lithium-polymerový akumulátor
LSM	Manganitan lanthan dopovaný stronciem
MIT	Massachusettský technologický institut
MOSFET	Polem řízený tranzistor
NaS	Sodíkovo-sírový článek
P2G	Power to gas
PEM	Elektrolyzér s polymerní elektrodovou membránou
PEMFC	Palivový článek s polymerní membránou
PETg	Polyethylentereftalát glykol
PLA	Kyselina polymléčná
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna
PWM	Pulzně šířková modulace
RGB LED	Červeno-zeleno-modrá světloemitující dioda
SMES	Supravodivá magnetická úložiště
SOE	Vysokoteplotní elektrolyzér
SOFC	Palivový článek s tuhými oxidy
YSZ	Yttriem stabilizovaný oxid zirkoničitý

Seznam použitých veličin

Značka	Jednotka	Název
C	[F]	Kapacita
c	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita
CΦ	[Wb]	Konstanta elektromotoru
d	[m]	Vnitřní průměr
D	[m]	Vnější průměr
E	[J, Wh]	Energie
F	[N]	Síla
g	[m s ⁻²]	Tíhové zrychlení
h	[m]	Výška

i	[-]	Převodový poměr
I	[A]	Elektrický proud
J	[kg m ²]	Moment setrvačnosti
j	[-]	Pořadí vrstev lana na bubnu
K	[-]	Koeficient geometrického tvaru rotoru
l	[m]	Délka, vzdálenost
L	[H]	Indukčnost
m	[kg]	Hmotnost
M	[N m]	Moment
n	[min ⁻¹]	Otáčky
p	[Pa]	Tlak
P	[W]	Výkon
q	[J]	Vnitřní energie
Q	[m ³ s ⁻¹]	Průtok
r	[m]	Poloměr
R	[m]	Průměr
S	[m ²]	Plocha
t'	[s]	Čas
T	[K]	Absolutní teplota
t	[°C]	Teplota
U	[V]	Elektrické napětí
V	[m ³]	Objem
v	[m s ⁻¹]	Rychlost
W	[J]	Energie elektrického pole
Z	[-]	Počet zubů
z	[-]	Počet závitů lana
ε	[H m ⁻¹]	Permeabilita
η	[-, %]	Účinnost
ρ	[kg m ⁻³]	Hustota
σ	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
ω	[rad s ⁻¹]	Úhlová rychlost

Seznam příloh

Příloha A: Fotodokumentace

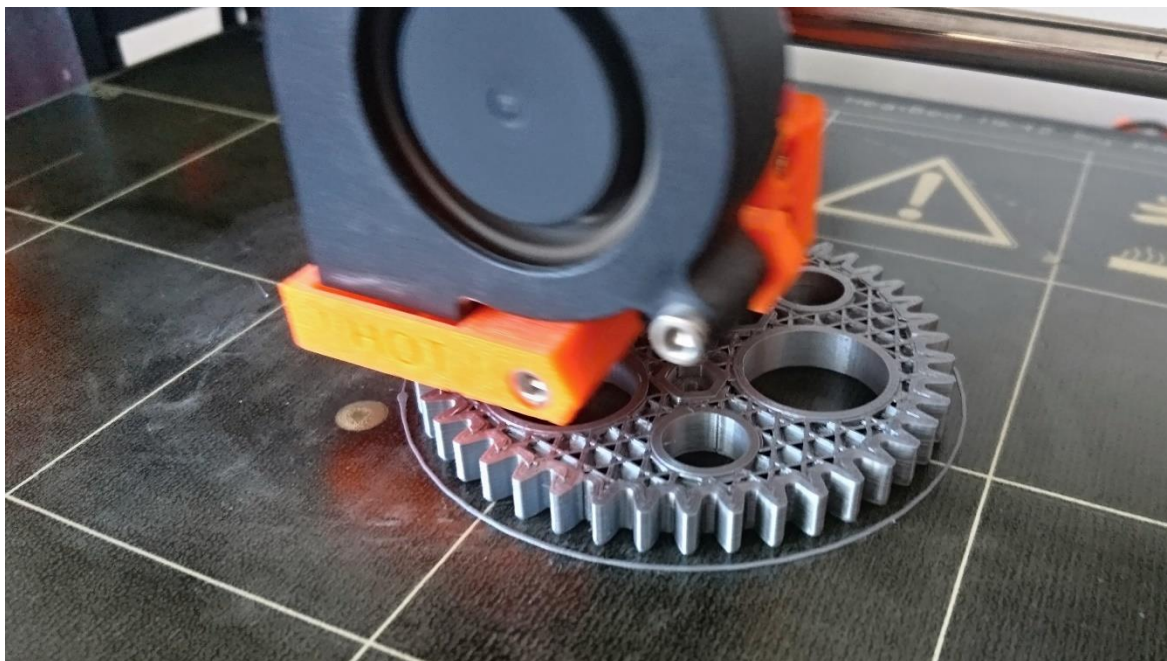
A. 1 Výroba ozubených kol.....	I
A. 2 Kompletní převodovka	I
A. 3 Průběh měření.....	II

Příloha B: Naměřená data

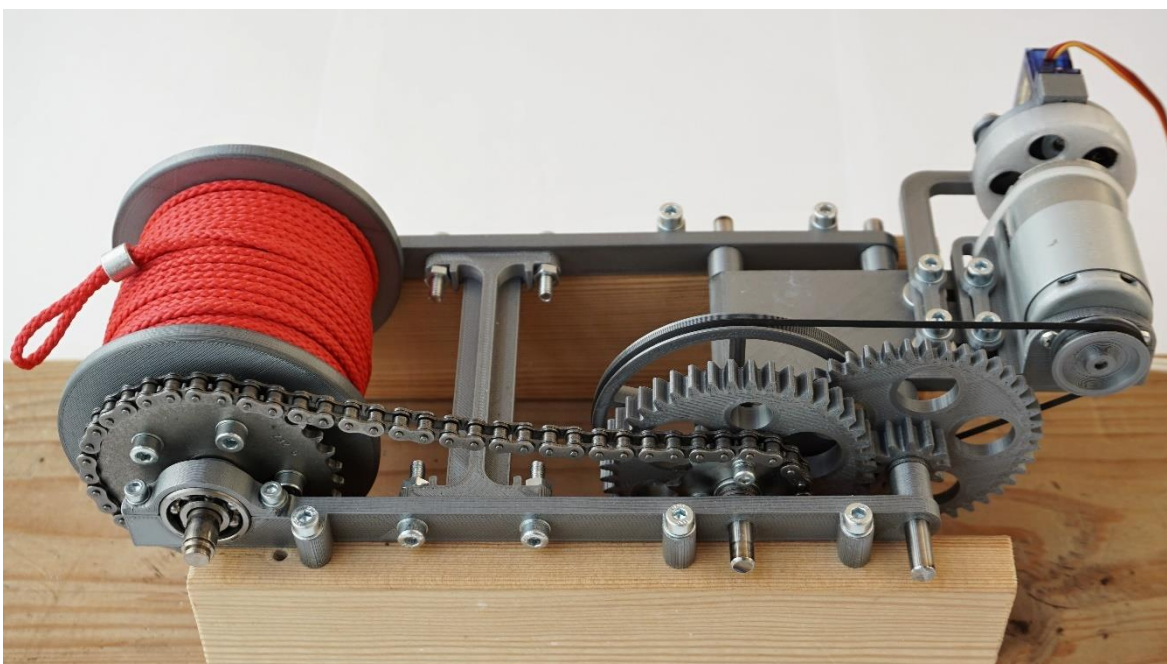
Příloha C: Schéma zapojení

Příloha A: Fotodokumentace

A. 1 Výroba ozubených kol



A. 2 Kompletní převodovka



A. 3 Průběh měření

