



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AKUMULACE ENERGIE DO "TEPELNÝCH BATERIÍ"

ACCUMULATION OF ENERGY IN "HEAT BATTERIES"

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Janečka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Filip Janečka
Studijní program:	Základy strojního inženýrství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Akumulace energie do "tepelných baterií"

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V rámci práce bude zpracována rešerše v literatuře dohledatelných způsobů akumulace tepelné energie a popsány dohledané realizace tepelných baterií. Akumulace tepelné energie je obecně spojena s tepelnými ztrátami, které při dlouhodobém skladování významně snižují účinnost akumulace. Pro efektivní funkci je nutné volit vhodnou kombinaci akumulační látky, provedení akumulátoru a navrhnout vhodný provozní režim. Zpracovaná rešerše bude využita pro vzájemné porovnání jednotlivých způsobů akumulace a na základě získaného přehledu, bude proveden návrh vlastního řešení akumulace tepla pro rodinný dům.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat rešerši o možnostech akumulace tepla.
2. Představit příklady pilotních realizací tepelných baterií.
3. Vzájemné porovnání dohledaných způsobů akumulace.
4. Návrh využití vybraného způsobu akumulace pro dodávku tepla rodinnému domu.

Seznam doporučené literatury:

JÍCHA, Miroslav. Přenos tepla a látky. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s., ISBN 978-80-214-4300-6.

KALTSCHMITT, Martin, Nickolas J THEMELIS, Lucien Y BRONICKI, Lennart SÖDER a Luis A VEGA. Renewable energy systems. Volume 1. New York: Springer, 2013, xxvi, 664 stran : ilustrace (většinou barevné). ISBN 978-1-4614-5819-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Akumulátory tepelné energie jsou důležitou alternativou k jiným, běžnějším metodám skladování energie, jako jsou například elektrochemické baterie, jelikož je větší část energie spotřebovaná v domácnostech právě ve formě tepla. Využitím tepelných zásobníků tedy dochází k vynechání kroku, ve kterém se elektrická energie přeměňuje na teplo, čímž může dojít ke zvýšení účinnosti celého procesu a snížení nákladů na energii. V této práci je popsáno a zhodnoceno pět významných metod skladování tepelné energie s ohledem jak na jejich použití jedincem v rodinném domě, tak i na použití v aplikacích s velkým odběrem energie (centrální vytápění, elektrárenské odvětví aj.). Těmito pěti zásobníky tepla jsou: zemní zásobníky, pískové zásobníky, PCM (phase change material) zásobníky, termochemické zásobníky a zásobníky vodíku. Je kladen důraz na vyzdvihnutí výhod a nevýhod jednotlivých druhů tepelných zásobníků, ukázkou jejich pilotních realizací a jejich vzájemné porovnání. Dále je provedeno zhodnocení schopnosti sezónní akumulace jednotlivých tepelných zásobníků, ze kterého vyplývá, že jediným zásobníkem, zaručeně schopným téměř neomezené doby akumulace, je termochemický zásobník. V rámci této práce je také navržen vodní zásobník tepla pro rodinný dům, který byl vybrán z důvodu své dobré škálovatelnosti, ověřené funkčnosti a relativně jednoduché konstrukci.

Klíčová slova

Akumulace energie, tepelný zásobník, zemní zásobník tepla, pískový zásobník tepla, PCM zásobník tepla, termochemický zásobník tepla, skladování vodíku, vodní nádrž.

Abstract

Thermal energy storage is an important alternative to other, more common methods of energy storage, such as electrochemical batteries, as most of the energy used in homes is in the form of heat. The use of thermal energy storage therefore skips the step where electricity is converted into heat, which can increase the efficiency of the whole process and reduce energy costs. In this paper, five important thermal energy storage methods are described and evaluated with respect to their use by an individual in a single family home as well as for use in high energy demand applications (central heating, power generation, etc.). The five heat storage methods are: ground storage, sand storage, PCM (phase change material) storage, thermochemical storage and hydrogen storage. Emphasis is placed on highlighting the advantages and disadvantages of each type of thermal storage reservoir, showing pilot implementations and comparing them with each other. Furthermore, an evaluation of the seasonal storage capability of the different thermal storage systems is made, which shows that the only storage guaranteed to be capable of almost unlimited storage time is the thermochemical storage system. Also in this work, a water heat storage tank for a single-family house is proposed, which was chosen because of its good scalability, proven functionality and relatively simple design.

Key words

Energy storage, heat reservoir, ground heat storage, sand heat storage, PCM heat storage, thermochemical heat storage, hydrogen storage, water tank.

Bibliografická citace

JANEČKA, Filip. *Akumulace energie do "tepelných baterií"* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-02-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149605>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jirí Pospíšil, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 26. května 2023

Poděkování

Rád bych především poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za jeho trpělivost a rady, které mi byly sděleny a doc. Ing. Lubomíru Klimešovi, Ph.D., jehož seminář k bakalářské práci pomohl zvednout úroveň této práce. Dále považuji za nutné poděkovat také své rodině a přátelům za jejich neutuchající podporu při mém studiu. Zvláštní dík pak patří mému bratranci Pavlu Kremrovi, jelikož díky jeho pracovnímu vytížení při studiu medicíny mi to mé přišlo snesitelnější.

Obsah

Úvod	3
1 Analýza problému a cíl práce	4
1.1 Akumulace tepla do zemních zásobníků teplem ze solárních kolektorů a odpadním teplem	5
1.2 Akumulace tepla do izolované zeminy teplem z elektrických odporových ohřivačů	5
1.3 Akumulace skupenského tepla do PCM	6
1.4 Akumulace tepla do termochemické baterie.....	6
1.5 Akumulace energie vytvářením a skladováním vodíku.....	6
2 Zemní zásobníky tepla	7
2.1 Vodní nádrže.....	8
2.1.1 Vlastnosti a konstrukce vodní nádrže.....	8
2.1.2 Realizace vodních nádrží jako zásobníků tepla.....	9
2.2 Zásobníky aquifer	9
2.2.1 Realizace tepelných zásobníků aquifer:	10
2.3 Skalní zásobníky	10
2.3.1 Konstrukce skalních zásobníků	11
2.3.2 Realizace skalních zásobníků	12
2.4 Zemní zásobníky	12
2.4.1 Teploty dosahované v zemních zásobnících tepla.....	14
2.4.2 Realizace zemního zásobníku tepla.....	16
3 Pískový zásobník tepla	17
3.1 Konstrukce a vlastnosti pískového zásobníku tepla	17
3.1.1 Písek jako akumulační médium.....	18
3.1.2 Aplikace vysokoteplotních pískových zásobníků tepla.....	20
3.1.3 Výhody a nevýhody.....	21
3.2 Realizace pískového zásobníku tepla.....	22
3.2.1 Budoucí realizace pískových zásobníků tepla	22
4 PCM zásobníky tepla	23
4.1 Vlastnosti a formy PCM a zásobníků tepla	23
4.1.1 Druhy PCM materiálů	25
4.1.2 Využití PCM materiálů.....	27
4.1.3 Výhody a nevýhody.....	29
4.2 Realizace PCM zásobníků tepla.....	29
5 Termochemické zásobníky tepla	31

5.1	Procesy a reakce termochemických materiálů.....	31
5.1.1	Absorpce.....	31
5.1.2	Adsorpce.....	32
5.1.3	Chemisorpce.....	32
5.1.4	Chemické reakce.....	33
5.2	Konstrukce a vlastnosti termochemických zásobníků tepla.....	35
5.2.1	Využití.....	36
5.2.2	Výhody a nevýhody.....	37
5.3	Realizace termochemických zásobníků tepla.....	38
6	Akumulace energie vytvářením a skladováním vodíku.....	39
6.1	Způsoby skladování vodíku.....	39
6.1.1	Stlačený vodík.....	39
6.1.2	Kapalný vodík.....	40
6.1.3	Hydridy kovů.....	40
6.1.4	Adsorpční uhlíkové materiály.....	41
6.1.5	Chemicky vázaný vodík.....	41
6.1.6	Výhody a nevýhody.....	42
6.2	Realizace zásobníků vodíku.....	42
7	Vzájemné porovnání zpracovaných zásobníků tepla.....	43
8	Návrh zásobníku tepla.....	45
9	Závěr.....	49

Úvod

S ohledem na stále více svazující regulace v oblasti energetiky, útlum neekologických elektráren využívajících fosilní paliva a rozmach ve využívání obnovitelných zdrojů, jak celými elektrárnami, tak i samostatnými jednotlivci ve společnosti je myšlenka na skladování odpadního nebo „sezónního“ tepla a jiných forem energie čím dále aktuálnější. Při ukládání tepelné energie v časech, kdy tepelnou energii potřebujeme méně a jejím uvolňování při vyšší potřebě se zbavujeme mezikroku, jakým je například přeměna elektrické energie na tepelnou (např. odporové ohříváče) nebo chemické energie na tepelnou (hoření; např. kotle), čímž jsme schopni zvýšit účinnost celého procesu. Dalším argumentem pro zbavení se již zmíněného mezikroku je fakt, že větší část energie, kterou v domácnostech spotřebujeme je právě ve formě tepla využívaného pro ohřev vody a obytných prostor, na což lze využít skladované teplo (buď „napřímo“ nebo pomocí tepelného čerpadla). Tepelné baterie můžeme také zařadit mezi způsoby uchovávání energie z větších elektráren při přebytku elektrické energie, podobně jako přečerpávací vodní elektrárny, její přeměnou na tepelnou energii, která může být použita například pro ohřev obytných zón, popřípadě pomocí termočláunku převedena zpět na elektrickou energii.

Pro lepší představu toho, co je tepelná baterie, si můžeme představit sklep rodinného domu, který pokud je dostatečně hluboko si v průběhu roku udržuje relativně stálou teplotu, což je mimo jiné způsobeno akumulací tepla v horkých dnech a jeho uvolňování ve studených dnech. Jelikož odtud není přímo teplo využíváno a je pouze pomalu disipováno do okolí tak je teplota relativně stálá vzhledem k vnějšímu okolí. Zásadní problematika tepelných zásobníků tedy spočívá především v udržení „nabitého“ tepla do doby jeho využití. Tento problém je nejvýznamnější u tzv. sezónních zásobníků, tedy těch, které mají za úkol uchovávat teplo z léta po několik měsíců až do zimy. Dalšími významnými problémy jsou náklady a návratnost celého řešení, neboť některé typy akumulátorů vyžadují pro zhotovení rozsáhlé výkopové práce a drahé součásti.

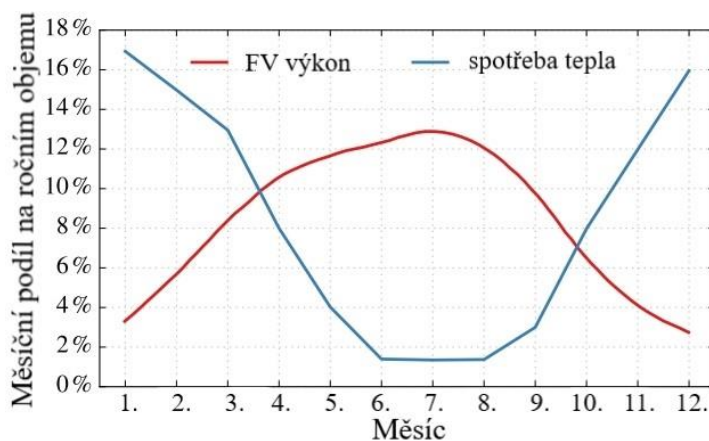
Cílem této práce je analyzovat vybrané způsoby uchovávání tepelné energie, tyto metody porovnat mezi sebou, uvést rozsah fungování a pilotní realizace jednotlivých metod. Dále bude nutné pojednat o využití uložené energie, tedy i zvážit další přeměnu uložené energie dle potřeby. Konkrétní metody, které budou analyzovány jsou:

- akumulace do zemních zásobníků teplem ze solárních kolektorů a odpadním teplem
- akumulace do izolované zeminy teplem z elektrických odporových ohříváčů
- akumulace skupenského tepla do PCM (phase change material) materiálů
- akumulace tepla do termochemické baterie
- akumulace energie vytvářením a skladováním vodíku

Dílčím cílem práce bude zhotovení návrhu významnějšího tepelného zásobníku z výčtu možností popsaných touto prací pro fungování v rodinném domě.

1 Analýza problému a cíl práce

Jedním z hlavních aspektů této práce je sezónní akumulace tepelné energie, čímž je myšleno její dlouhodobé skladování v časech přebytku a její uvolňování v časech nedostatku. Sezónní akumulace tepla je především významná v oblasti získávání energie ze slunečního záření, které je v letních měsících přebytek a v topné sezóně jí bývá nedostatek kvůli vysoké poptávce po energii na vytápění a krátké, málo intenzivní době slunečního záření (obrázek 1) [1]. Tyto rozdíly mezi nabídkou a poptávkou se samozřejmě netýkají jenom solární energie, ale také třeba větrných elektráren nebo i energie z neobnovitelných zdrojů při výpadku dodávek fosilních paliv. Sezónní zásobníky energie jsou tedy zařízení, které nám pomáhají tuto mezeru mezi nabídkou a poptávkou překonat.



Obrázek 1 Měsíční podíl solární energie a tepelná poptávka vzhledem k roční produkci/spotřebě pro město Freiburg v Německu roku 2011; upraveno dle [2]

Skladování tepelné energie je provázáno tepelnými ztrátami, které závisí na:

- Velikosti a tvaru zásobníku
- Poměru objemu ku povrchu zásobníku
- Teplotě dosažené v zásobníku
- Skladovacím médiu
- Typu a kvalitě izolační vrstvy

Velikost tepelného toku, čímž se dá kvantifikovat tepelná ztráta, závisí na ploše, kterou prostupuje teplo (viz rovnice 1). Při navrhování zásobníku musíme mít na paměti že objem a povrch tělesa neroste stejně při zvyšování jeho rozměrů, konkrétně roste rychleji objem, který sice na tepelný tok nemá žádný vliv, ale je velmi důležitý pro celkové množství tepla v zásobníku (viz rovnice 2). Pro ukázkou tohoto fenoménu si můžeme představit krychli s délkou strany 1 m o objemu 1 m³ a s povrchem 6 m² a krychli s délkou strany 10 m o objemu 1 000 m³ a s povrchem 600 m² [1]. Z tohoto tedy vyplývá, že je výhodnější navrhovat zásobníky co největší a takových tvarů, aby bylo dosaženo nejmenších možných povrchů (koule o stejném objemu jako krychle má menší povrch). Dále tepelný tok závisí na rozdílu teplot mezi zásobníkem a okolím. Tepelný tok s rostoucím rozdílem roste. Nakonec jsou podstatné tloušťka a typ izolační vrstvy a skladovací médium.

$$\dot{Q} = \frac{S \cdot \Delta T}{R} \quad (1)$$

$$Q = V \cdot c_V \cdot \Delta T \quad (2)$$

• Tepelný tok	\dot{Q} [W]
• Teplo	Q [J]
• Plocha	S [m ²]
• Rozdíl teplot	ΔT [K]
• Tepelný odpor	R [m ² K W ⁻¹]
• Objem	V [m ³]
• Objemová tepelná kapacita	c_V [J m ⁻³ K]

Energie se dá skladovat v různých formách (elektrická, kinetická, potenciální aj.). O tepelné energii se dá říct, že má dvě formy:

- Citelné teplo, způsobující změnu teploty objektu
- Latentní teplo, způsobující změnu skupenství objektu

Obě tyto formy jsou v různých zásobnících tepla využívány. Tato práce se ovšem nezabývá pouze skladováním tepelné energie, ale i skladováním jiných forem energie, které se na teplo následně přemění. Těmito jsou například termochemická energie nebo pomocí vodíku (vodík není myšlen jako forma energie ale spíše jako „energonosné“ médium). Principy jednotlivých metod akumulace tepla budou v následujícím segmentu krátce popsány.

1.1 Akumulace tepla do zemních zásobníků teplem ze solárních kolektorů a odpadním teplem

Nosičem tepla je voda s nemrznoucí příměsí, která je ohřívána pomocí solárních kolektorů. Solární kolektor je jednoduše řečeno zařízení z materiálu s vysokou tepelnou absorpcí, kterým protéká teplonosné médium, ohřívané slunečním zářením. Kolektory se nejčastěji pokládají na střechy. Z kolektoru může být teplo rovnou využíváno např. pro ohřev vody, nebo se může odvézt do zásobníku. Pro ukládání tepla se může buď použít voda při ukládání tepla na kratší dobu, nebo půdních akumulátorů [1] vhodnějších pro sezónní ukládání. Tyto půdní akumulátory nejsou nijak oddělené od okolní zeminy, tedy nejsou nijak izolované, ale protože dosažitelná teplota je relativně nízká jsou tepelné ztráty udržitelné. Nízká teplota ale způsobuje nutnost větších rozměrů akumulátoru, aby se vykompenzovalo množství tepla v půdě uložené. V závislosti na dosažené teplotě může, ale nemusí být použito tepelné čerpadlo. Akumulátor může být také nabíjen odpadním teplem, nebo sloužit jako zdroj chladu v letních měsících (do akumulátoru bude odváděno teplo např. z obytné místnosti) [3]. Dále v textu bude tato metoda označována jako zemní zásobníky tepla [1].

1.2 Akumulace tepla do izolované zeminy teplem z elektrických odporových ohřivačů

Tento způsob se bude dále v textu označovat jako písková baterie (sand battery) [4]. Na rozdíl od metody se slunečními kolektory je tento systém schopen ukládání vysokopotenciálního tepla, což znamená dosažení vysokých teplot akumulčního média. Tohoto je dosaženo pomocí odporových ohřivačů poháněných elektrickou energií, která může i nemusí být z obnovitelného zdroje. Ideální metodou napájení odporových ohřivačů jsou ovšem obnovitelné zdroje, které jsou levným zdrojem elektrické energie, a navíc umožňují fungování v ostrovním režimu, tedy v režimu odpojeném od hlavní elektrické sítě. Médium je v tomto případě obyčejný písek zahříván až na teplotu 500–1000 °C, a díky této vysoké teplotě odpadá nutnost použití tepelného čerpadla. Písek je od okolí oddělen izolační vrstvou, zabráňující úniku tepla a cirkulaci vlhkosti s okolím.

1.3 Akumulace skupenského tepla do PCM

Podstatou této metody je změna skupenství materiálů s vysokou hodnotou latentního tepla. Nejčastěji se jedná o změnu z pevného skupenství na kapalné a opačně. Při ohřevu PCM dojde k jeho zkapalnění (akumulátor přijímá latentní teplo) a při ochlazení okolí materiál ztuhne (akumulátor vydává latentní teplo). Tento způsob se dá například použít pro zvýšení celkové tepelné kapacity rodinného domu, což má za následek to, že v letních měsících zůstává dům déle chladnějším a v zimních déle teplejším.

1.4 Akumulace tepla do termochemické baterie

Princip této metody spočívá v opakovatelné fyzikální nebo chemické exotermické, respektive endotermické, reakci, která při svém průběhu uvolňuje, respektive pohlcuje, teplo. Nejčastější užívanou reakcí pro tento účel je sorpce, a to jak fyzikální (absorpce, adsorpce), tak i chemická (chemisorpce) [5]. Pro vyšší pracovní teploty přicházejí do úvahy termochemické baterie, využívající pouze chemických reakcí. Největší překážkou, bránící vhodnosti dané reakce pro tento účel, se zdá být omezená opakovatelnost chemické reakce, která často vyžaduje náročné procesy, aby proběhla [6].

1.5 Akumulace energie vytvářením a skladováním vodíku

Ačkoliv se nejedná o přímé ukládání tepelné energie (na rozdíl od ostatních metod uvedených v této práci), je výroba vodíku a jeho skladování zajímavou formou ukládání energie. Myšlenka ukládání energie spočívá ve faktu, že se čistý vodík na Zemi vyskytuje velmi vzácně a jeho nejčastější forma je ve sloučeninách jako H_2O , CH_4 aj. Abychom vodík z těchto sloučenin separovali musíme vynaložit jisté množství energie, která se následně uvolňuje při energetickém využívání vodíku. Energii z vodíku můžeme uvolnit buď palivovým článkem ve formě elektrické energie nebo spalováním ve formě tepelné energie, což je důvod zařazení vodíku mezi formy akumulace tepla. Jednou z překážek této metody je otázka skladování a přepravy vodíku, který sice má vysokou výhřevnost, ale jeho velmi malá molární hmotnost má za následek nutnost skladování při vysokých tlacích v plynném stavu, nebo dosažení velmi nízkých teplot -253 °C pro skladování v kapalném stavu [3]. Vodík lze skladovat i v „tuhém“ stavu, kdy je vodíkem sycen jiný pevný materiál (hydrid kovů, nanostruktury aj.), nebo ve formě reversibilních chemických reakcí, které vodík uvolňují či pohlcují [7].

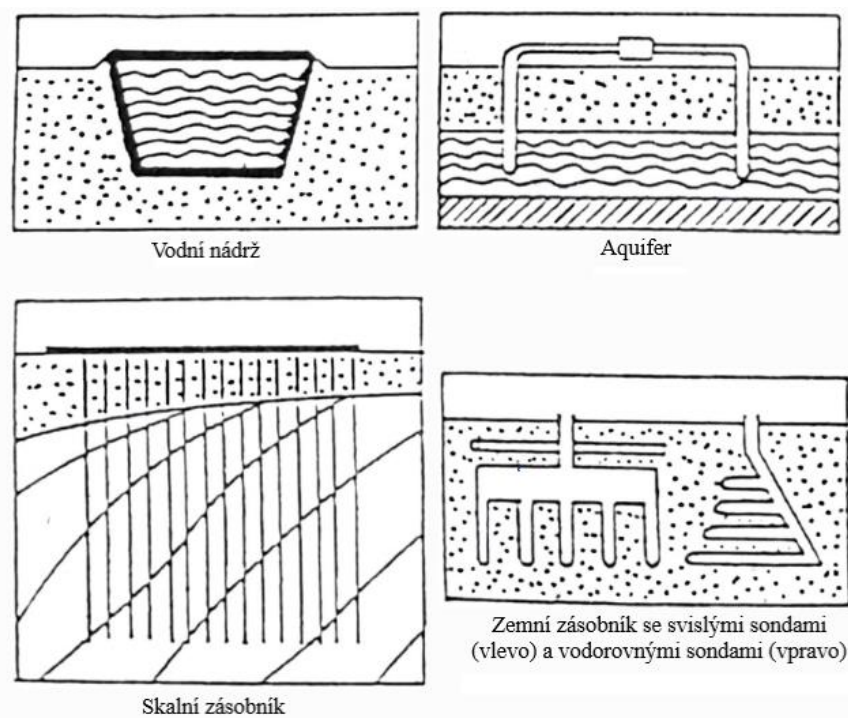
2 Zemní zásobníky tepla

Jak již bylo řečeno: využití slunečního záření jako zdroje energie nás dává napospas jeho výkyvům v průběhu denního a ročního cyklu. Tento problém mohou řešit zemní zásobníky tepla, do kterých je teplo přiváděno nejčastěji ze solárních kolektorů. Zemní zásobníky mají poměrně široké spektrum použití a forem a mohou najít své uplatnění jak ve vytápění a klimatizování obytných budov tak i při skladování odpadního tepla z výroby elektřiny nebo jenom při vytápění skleníků či stájí [1].

Do této kategorie zásobníku můžeme zařadit:

- Vodní nádrže
- Zásobníky aquifer
- Skalní zásobníky s hlubokými vrty
- Zemní zásobníky se svislými a vodorovnými sondami výměníku

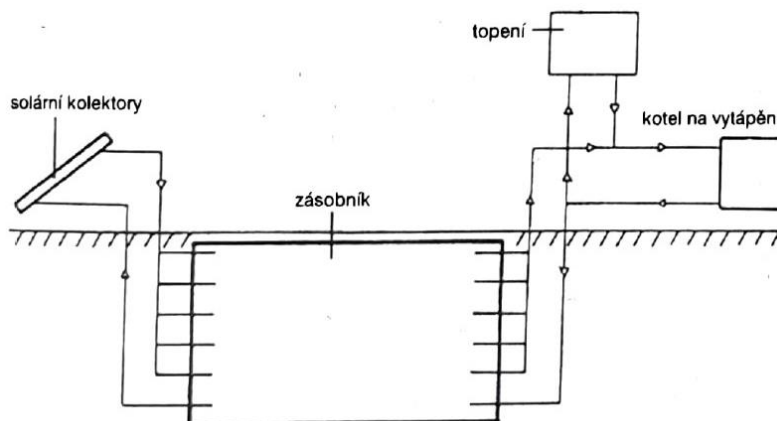
Největší důraz bude kladen na poslední z výše uvedených kategorií, neboť je z nich nejvíce aplikovatelná pro sezónní akumulaci tepla při použití v rodinném domě. Ostatní metody jsou buď vhodné pro akumulaci pouze v systému centrálního vytápění, nebo jsou navázány na specifické geologické podmínky.



Obrázek 2 Různé typy zemních zásobníků tepla; upraveno dle [1]

2.1 Vodní nádrže

Pojmem vodní nádrž je myšlena dobře tepelně izolovaná nádrž, uchovávající teplou vodu ohřátou slunečními kolektory, odpadním teplem a jinými metodami. Obecně můžeme říct, že se jedná spíše o způsob krátkodobého uchování tepla při realizaci pro rodinný dům. Při provedení v systému centrálního vytápění s velkým objemem vody se může i o této metodě uvažovat jako o sezónním zásobníku, protože množství tepla uložené v objemu vyrovná tepelný tok stěnou zásobníku. Roční ztráty se ovšem pohybují okolo 20–50 % z celkově dodané energie solárními systémy, v závislosti na velikosti, teplotě a izolaci [8]. Tyto ztráty jsou mimo jiné způsobeny přirozenou konvekcí kapaliny vyvolanou gradientem teplot v objemu zásobníku.



Obrázek 3 Schéma solárního systému s vodní nádrží [1]

2.1.1 Vlastnosti a konstrukce vodní nádrže

Vodní nádrž se pro větší zásobníky většinou zakopává pod zem (obrázek 3), neboť jim takto stačí mnohem slabší konstrukce nádrže, čímž se snižují náklady [1]. Větší zásobníky jsou, jak již bylo zmíněno, vhodné pro zařazení v centrálním vytápění nebo pro velké budovy a v závislosti na realizaci mohou sloužit jako sezónní zásobník tepla [8]. Menší nádrže se mohou stavět na povrchu země, čímž odpadá většina výkopových prací, ale v případě postavení v otevřených venkovních prostorech je nádrž vystavena poryvům větru, které zvyšují tepelné ztráty a zatěžují konstrukci. Proto je vhodné malé nádrže stavět v krytých místech, kde budou před větrem chráněny. Takovým místem je například místnost v rodinném domě (sklep, garáž, technická místnost aj.), čímž jsou ale omezeny rozměry nádrže velikostí místnosti. Je tedy dobré uvažovat o takové nádrži již při návrhu rodinného domu.

Jak je ukázáno na obrázku 3, zdrojem tepla nemusí být jenom solární kolektory, ale i pomyslný „kotel“, tedy zdroj tepla, kterým může být například odpadní teplo vycházející z motoru pohánějící tepelné čerpadlo nebo generátor elektrické energie [1], teplo regenerované ze vzduchu při jeho výměně a klimatizaci místnosti aj. Teplota v zásobníku přitom obvykle nedosahuje takových hodnot, aby došlo ke skupenské změně vody, což by způsobilo zvýšení nákladů na konstrukci, kvůli nutnosti lepšího utěsnění celé soustavy a práci s vyššími tlaky. Maximální teplota, které je dosaženo u velkých nádrží, je kolem 80 °C [8]. Malé nádrže mívají teplotu menší, protože často bývají méně izolované, tedy se musí menším tepelným ztrátám zamezit nižší teplotou vody.

2.1.2 Realizace vodních nádrží jako zásobníků tepla

Vodní nádrž v Mnichově (SRN) [8]

System zásobuje soubor bytových domů s celkovou podlahovou plochou 7 400 m² a byl zkonstruován v roce 2007.

- Objem zásobníku je 5 700 m³
- Plocha solárních kolektorů je 2 761 m²
- Solární pokrytí je 55 %
- Je vybaven absorpčním tepelným čerpadlem, které umožňuje odebírání tepla ze zásobníku až do teploty 12 °C



Obrázek 4 Vodní nádrž v Mnichově při výstavbě [8]

Vodní nádrž ve Friedrichshafen (SRN) [8]

System zásobuje soubor bytových domů s celkovou podlahovou plochou 23 000 m² a byl zkonstruován v roce 1997.

- Objem zásobníku je 12 000 m³
- Plocha solárních kolektorů je 2 700 m²
- Solární pokrytí je 43 % a hlavním zdrojem tepla je zde plynová kotelna

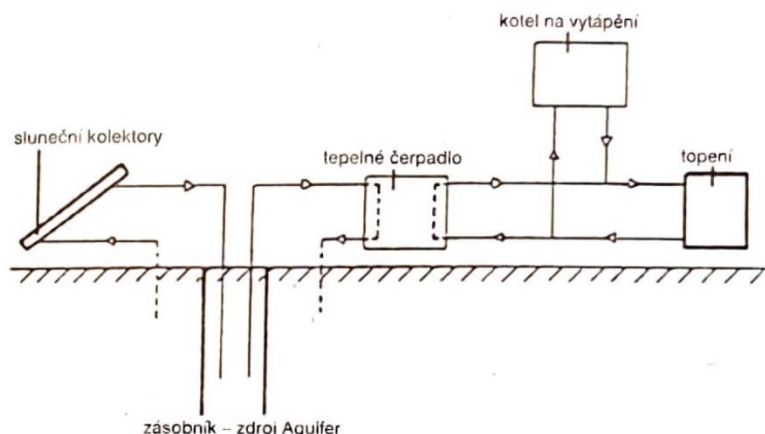


Obrázek 5 Vodní nádrž ve Friedrichshafen při výstavbě [8]

2.2 Zásobníky aquifer

Aquifer je podzemní vrstva porézní nebo sypké půdy, která je nasycena spodní vodou. Aquifery jsou přírodní útvary, které se spíše nevytváří uměle, a tedy je jejich použití omezeno na malý počet lokalit se specifickými hydrogeologickými parametry. Teplo je akumulováno zahřátím vody v aquiferu [1]. V závislosti na okolní vrstvě aquiferu je může rozdělit na:

- Ohraničené, ve kterých nedochází k proudění spodních vod
- Neohraničené, ve kterých dochází k proudění spodních vod



Obrázek 6 Schéma zapojení aquiferu v topném systému se solárním kolektorem a tepelným čerpadlem [1]

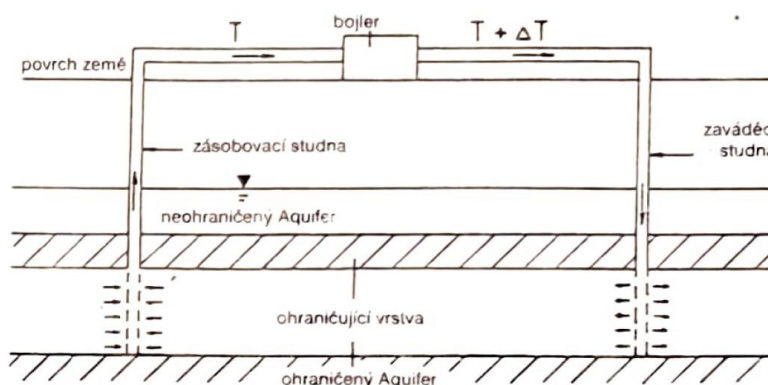
Ohraničené aquifery

Ohraničené aquifery jsou obklopeny materiálem s nízkou propustností vody, jako je například jíl nebo hlína. Jejich realizace je tímto tedy ještě více omezena.

Do aquiferu jsou vytvořeny dva vrty, jeden pro studnu na studenou vodu (zásobovací studna) a druhý pro studnu na teplou vodu (zaváděcí studna). Voda je ze zásobovací studny přivedena do solárního kolektoru nebo jiného zdroje tepla a následně je zaváděcí studnou teplá voda přivedena zpět do aquiferu. Při vybíjení aquiferu je teplá voda vedena zaváděcí studnou, v závislosti na teplotě, buď do odparníku tepelného čerpadla, nebo přímo do výměníku tepla rozvodu vody. Ochlazená voda teče zpět do aquiferu zásobovací studnou. [1]

Neohraničené aquifery

Těmito aquifery volně proudí spodní voda, a tedy nejsou vhodné pro akumulaci tepla. Na druhou stranu jsou dobrým zdrojem stálého nízkopotencionálního tepla, které může využívat tepelné čerpadlo jako svůj zdroj [1]. Jelikož jsou neohraničené aquifery častější než ohraničené, je jejich využívání jako zdroj nízkopotencionálního tepla je poměrně rozšířené.



Obrázek 7 Schéma aquiferu ohraničeného nepropustnou vrstvou (dole) a neohraničeného aquiferu (nahore) [1]

2.2.1 Realizace tepelných zásobníků aquifer:

Stockholm, Švédsko:

Velký uzavřený aquifer, který má čtyři teplé studny určené pro zavádění a zásobování tepla a dvě studené studny pro zavádění a zásobování chladu, pracující se dvěma tepelnými čerpadly. Aquiferem bylo v létě průměrně přijato 743 MWh tepelné energie z níž bylo získáno zpět 673 MWh tepelné energie. [9]

2.3 Skalní zásobníky

Principem tohoto zásobníku je soustava hlubokých vrtů sahajících až do podzemní vrstvy horniny (obrázek 2, vlevo dole). Hloubka těchto vrtů je závislá především na hydrogeologické charakteristice dané lokality, tedy na složení hornin a na vlastnostech spodní vody a běžně se pohybuje v rozmezí od 40 do 150 m [1]. V této hloubce má hornina přirozeně stálou teplotu kolem 10–12 °C, což může a je využíváno jako zdroj nízkopotencionálního tepla pro tepelná čerpadla i bez funkce zpětné akumulace tepla [10]. Bez využití možnosti akumulace ovšem tato metoda ztrácí svůj potenciál, neboť některé horniny mají dobrou tepelnou vodivost a kapacitu (viz tabulka 1), a pokud nehrozí tepelná ztráta vlivem proudění spodní vody, tak tato metoda nabízí dobré řešení pro akumulaci tepla. Jak je v ta-

bulce 1 patrné tak tepelné vlastnosti hornin mají široký rozsah hodnot, což je způsobeno vodou nasycenou v hornině a také heterogenitou jednotlivých materiálů. Nevýhodou této metody je vysoká cena hlubokých vrtů a omezení použití na místa s vhodnými hydrogeologickými podmínkami.

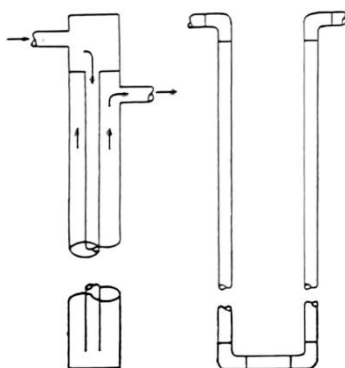
Tabulka 1 Objemové tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti vybraných hornin a referenční hodnoty vody.[11; 1].

	Čedič	Pískovec	Vápenec	Žula	Voda (20 °C)
Objemová tepelná kapacita c_V [MJ m ⁻³ K ⁻¹]	2,3–6,4	1,8–9	2,1–4,8	2,1–2,6	4,2
Součinitel tepelné vodivosti λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	2,25–3,55	1,7–1,97	0,92–4,4	2,85–4,16	0,6

2.3.1 Konstrukce skalních zásobníků

Do jednotlivých vrtů, které mají rozestup několik metrů a každý průměr několik centimetrů, se vloží výměník tepla. Aby se získal co největší objem akumulčního prostoru tak se vrty často vytváří pod mírným sklonem takovým, aby se od sebe vrty s rostoucí hloubkou vzdalovali, čímž se zároveň zajistí menší vzájemné tepelné ovlivnění jednotlivých vrtů. Jako výměník tepla nejčastěji slouží plastová nebo kovová trubka, a to buď rovná a sousá s vrtem nebo zatočená do tvaru U na dně vrtu [1]. Podle typu výměníku pak můžeme rozlišit skalní zásobníky na [1]:

- S otevřeným výměníkem (sousá trubice, obrázek 8 vlevo)
- S uzavřeným výměníkem (trubice tvaru U, obrázek 8 vpravo)



Obrázek 8 Otevřený výměník tepla (vlevo) a uzavřený výměník tepla (vpravo) [1]

Skalní zásobník s otevřeným výměníkem

Souosou trubkou, vloženou do vrtu, teče teplonosné médium (nejčastěji voda) ke dnu vrtu, kde opouští trubku a je následně vytlačována zpět k povrchu kolem trubky. Kapalina je takto v přímém kontaktu s okolní horninou, což umožňuje lepší přenos tepla. Tyto systémy mají ovšem omezenou oblast použití, jelikož pro efektivní provoz vyžadují vhodné hydrogeologické poměry [1]. U systémů s otevřenými výměníky dále hrozí zamrznutí vody, jelikož použití nemrzoucích příměsí je značně omezeno kvůli kontaminaci půdy a spodní vody.

Skalní zásobníky s uzavřeným výměníkem

Trubka, ohnutá do tvaru U, je vložena do vrtu a protéká jí voda. Aby se zlepšil přenos tepla mezi výměníkem a horninou je meziprostor vyplněn sypkým materiálem jako je například písek nebo zemina [1]. Poněvadž voda přichází s okolím do přímého kontaktu

pouze v havarijních případech tak použití nemrznoucích přísad není problém, a tedy nehrozí zamrznutí teplonosného média.

Jelikož nejsou skalní zásobníky z principu nijak izolované a často zabírají velký objem, tak se v nich nedosahuje příliš vysokých teplot, proto se nejčastěji využívají v kombinaci s tepelným čerpadlem, aby se nízkých teplot využilo. Samotné „nabíjení“ tedy především slouží pro rychlejší znohuřev přes zimu vychladlého zásobníku a pro zvýšení topného faktoru tepelného čerpadla, protože bude pracovat s vyšší vstupní teplotou než při použití bez akumulace tepla. Zdrojem tepla pro akumulaci může jako u ostatních metod v této kapitole sloužit solární tepelný kolektor, horký vzduch z obytných prostor (zemní zásobník slouží jako zdroj chladu) a jiné.

2.3.2 Realizace skalních zásobníků

Kampus univerzity Aalto, Finsko [12]

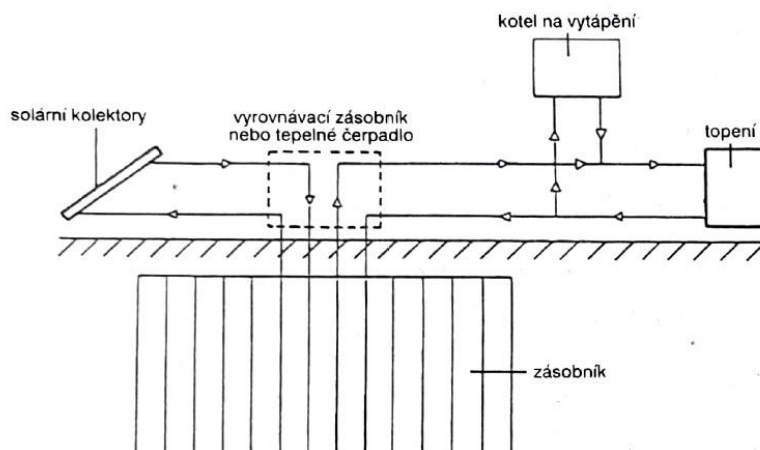
- Zdroj tepla a chladu pro budovy o rozloze 40 000 m²
- Pracuje s devíti tepelnými čerpadly s celkovým výkonem 790 kW
- Celkem 74 vrtů s průměrnou hloubkou 302,5 m
- Celkový objem zásobníku 4 000 km³

2.4 Zemní zásobníky

Tyto zásobníky fungují analogicky se zásobníky horninovými s tím rozdílem, že zemní zásobníky mají mnohem menší hloubku vrtů, která nezasahuje do vrstvy podzemních hornin. Mají tedy mnohem menší náklady na zhotovení za cenu menšího objemu zásobníku. Půda, sloužící jako zásobníkové médium, mívá na rozdíl od hornin menší tepelnou kapacitu a součinitel tepelné vodivosti (viz tabulka 2), což umožňuje těsnější rozložení jednotlivých výměňkových sond, aniž by došlo k jejich vzájemnému tepelnému ovlivnění [1]. U půdy, stejně jako u hornin, významně závisí její tepelné vlastnosti na obsahu vody.

Tabulka 2 Objemové tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti vybraných zemín a referenční hodnoty vody (uvedené hodnoty platí pro půdy nad hladinou spodní vody, tedy s malým nasycením vody) [1].

	Hlinité zeminy	Prachovité jíly	Písčito–hlinitý jíl	Písek, štěrkopísek	Rašelina	Voda (20 °C)
Objemová tepelná kapacita c_V [MJ m ⁻³ K ⁻¹]	3–3,6	2,9–3,3	2,4–3,3	1,4	0,7–3,2	4,2
Součinitel tepelné vodivosti λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	0,85–1,1	1,1–1,5	1,2–1,5	0,7–0,9	0,7–3,2	0,6

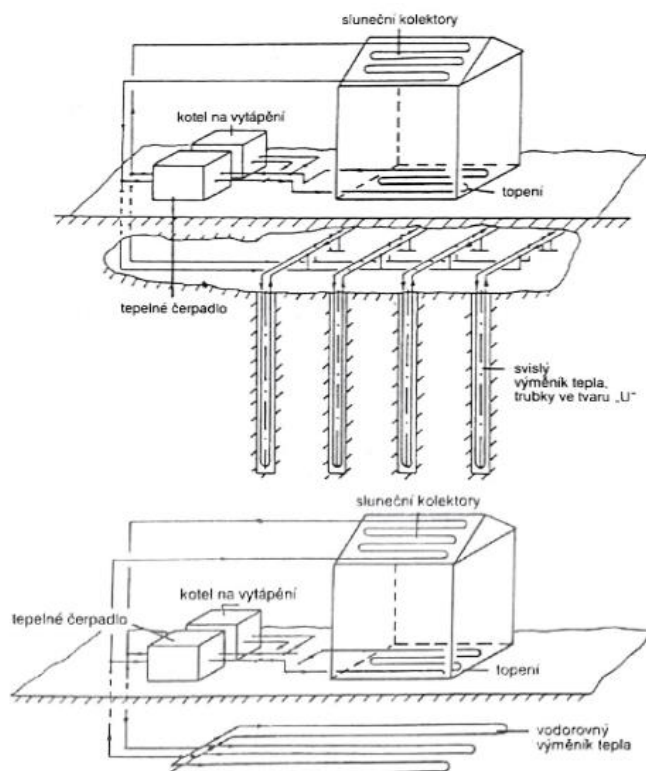


Obrázek 9 Schéma zemního zásobníku tepla, zásobovaného solárním kolektorem [1]

Jak již bylo v úvodním rozdělení uvedeno můžeme tyto zásobníky rozlišovat podle umístění a orientace výměňkových sond (viz obrázek 2, vpravo dole) na:

- Zásobníky se svislými sondami (svislé zásobníky, obrázek 10 nahore)
- Zásobníky s vodorovnými sondami (vodorovné zásobníky, obrázek 10 dole)

Obecně můžeme říct, že svislé zásobníky jsou výhodnější, jelikož pro jejich realizaci není zapotřebí tolik výkopových prací k zajištění stejného objemu, jako u vodorovných zásobníků. To je způsobeno nutností odebrání vrstvy půdy pro uložení výměníků, kdežto pro svislé zásobníky stačí vytvořit pouze vrty do země, do kterých se vloží výměníky podobné výměníkům u skalních zásobníků [1]. Další nevýhodou vodorovných zásobníků je koncentrace vlhkosti v blízkosti povrchu země, kde se nachází i sondy výměníků tepla. To sice umožňuje lepší přenos tepla, ale zároveň dochází k „putování“ vlhkosti a jejímu odpařování vlivem přivádění tepla do výměníků a přirozenými ohřevy (sluneční záření dopadající na povrch země), což způsobuje tepelné ztráty [1]. Tento jev se dá částečně eliminovat položením izolační vrstvy nad zásobník, čímž se zároveň zamezí dalším tepelným ztrátám. Jsou ovšem i situace, kdy je použití vodorovných zásobníků jediným možným řešením, jako například v místech s vysokou hladinou spodní vody, kde by při použití svislých zásobníků došlo ke kontaktu výměníku s okolní vodou a docházelo by ke ztrátám vlivem proudění vody. I tato situace ovšem může být žádoucí, a to v případě, kdy do zásobníku aktivně nepřivádíme teplo a pouze teplo odebíráme. V této situaci získáváme prakticky neomezený zdroj nízkopotenciálního tepla.



Obrázek 10 Zemní zásobník se svislými výměníky (nahore) a zemní zásobník s vodorovnými výměníky (dole) [1]

2.4.1 Teploty dosahované v zemních zásobnících tepla

Teplota, při které má být zásobník provozován je jedno z nejdůležitějších kritérií pro jejich rozřazení. Určují se podle ní například rozměry zásobníku, množství a velikost budov, čerpajících ze zásobníku, samotný typ zásobníku, nutnost použití tepelného čerpadla a jeho parametry. Zemní zásobníky tedy můžeme rozdělit na [1]:

- Hlubokoteplotní (HT) zásobníky <math><10\text{ }^\circ\text{C}</math>
- Nízkoteplotní (NT) zásobníky $10\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$
- Středněteplotní (ST) zásobníky $30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$
- Vysokoteplotní (VT) zásobníky $>50\text{ }^\circ\text{C}$

Hlubokoteplotní zásobníky

HT zásobníky se kvůli nízké teplotě, které je v nich dosaženo, dají využívat jedině s tepelným čerpadlem. U těchto zásobníků, jak jejich teplota napovídá, se teplo cíleně neakumuluje, ale pouze se využívá přirozené teplo půdy. Mohou tedy benefitovat z přímého kontaktu se spodní vodou, což jak již bylo řečeno nám dává přístup ke stálému zdroji tepla. Mají využití v místech, kde není spotřeba tepla příliš vysoká, jako například rodinné domky nebo malé zemědělské zařízení (stáje, skleníky aj.). Pokud nejsou sondy výměníku v kontaktu se spodní vodou tak se při navrhování tohoto systému musí pamatovat na regeneraci půdního tepla, tj. prohrátí půdy od okolí a slunečního záření v letním období, kdy teplo není čerpáno. [1]

Nízkoteplotní zásobníky

Na rozdíl od HT zásobníků, do NT zásobníků je již teplo přiváděno externím zdrojem (solární kolektor, klimatizování vnitřních prostor, odpadní teplo atd.) [1]. Díky vyšší teplotě narůstá i celková kapacita zásobníku při stejném rozměru jako zásobník HT. Zároveň je teplota v NT zásobnících ($10\text{--}30\text{ }^\circ\text{C}$) ne tak vysoká, aby docházelo výrazným

k tepelným ztrátám (viz rovnice 1), tedy si můžeme dovolit ponechat menší rozměry zásobníku a efektivně jej využívat i pro rodinné domy nebo jiné menší stavby. I zde ale platí to, že použití tepelného čerpadla je pro provoz takového systému nutné [1].

Aby se dosáhlo většího topného faktoru tepelného čerpadla je vhodné HT a NT systémy připojit k nízkoteplotnímu topnému zařízení, které prací s nižší teplotou vykompenzuje velkou topnou plochou. Tím se zajistí dostatečný přenos tepla do vytápěné místnosti. Jako takové se nabízí například podlahové vytápění. [1]

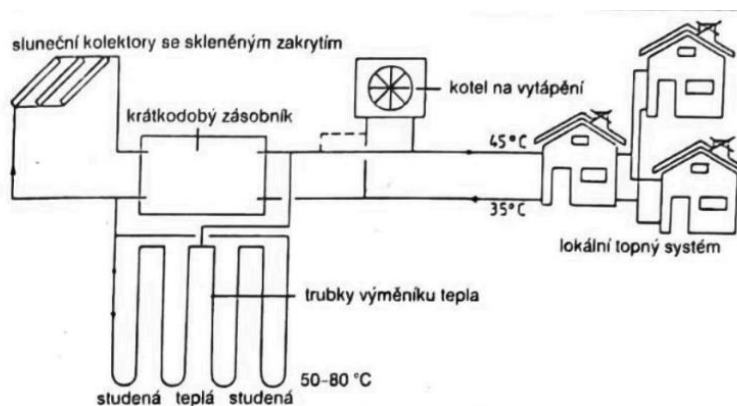
Středněteplotní zásobníky

V průběhu nabíjecích cyklů ST zásobníků je dosahováno již takových teplot (30–50 °C), kdy je možné do jisté míry využívat uložené teplo na přímo, tedy bez tepelného čerpadla. Při přílišném poklesu teploty v zásobníku, by ale přímý odběr tepla již nezajišťoval dostatečný tepelný komfort ve vytápěných místnostech. V takových případech je i zde nutné připojit tepelné čerpadlo do systému. Vyšší akumulční teplota sebou ale přináší i větší tepelné ztráty, které se dají vyrovnat budováním zásobníků s většími rozměry a kapacitou, určenými pro skupiny rodinných domů, kancelářské budovy, bytové domy apod. Tento typ tedy není vhodný pro použití v samostatném domě, jelikož by zde nebyl zajištěn příznivý poměr povrch-objem zásobníku a docházelo by ke značným tepelným ztrátám. [1]

Vysokoteplotní zásobníky

Podobně jako u ST zásobníků je, díky vysoké teplotě, možné teplo odebírat přímo do topných soustav. U VT zásobníků je přímý odběr mnohem stálejší, a to nejenom kvůli vyšší teplotě, ale hlavně kvůli rozměrům těchto zásobníků, které musí být dostatečně velké, aby se vykompenzovali ztráty. Proto se VT zásobníky používají výhradně pro velké objekty se spotřebou tepla odpovídající těmto velkokapacitním zásobníkům. Jsou vhodné například v místech s velkým množstvím odpadního tepla, které je pro nabíjení VT zásobníků vhodné, jelikož při solárním nabíjení, by bylo nutné široké pokrytí solárními kolektory, schopnými dosáhnout vysokých teplot (vakuové nebo ploché kolektory). To by ovšem navýšilo počáteční investici pro výstavbu takového systému. [1]

Zemní zásobníky mohou být konstruovány tak, že jsou rozděleny na část vysokoteplotní, nacházející se v centru zásobníku, a část nízkoteplotní, nacházející se na periferii zásobníku. Teplo z centra zásobníku je využíváno přímo pro vytápění, zatímco vnější část je určena pro práci s tepelným čerpadlem. Toto uspořádání má výhodu v tom, že tepelné ztráty vysokoteplotní části jsou částečně zachyceny nízkoteplotní částí zásobníku. [1]



Obrázek 11 Vysokoteplotní zemní zásobník s nízkoteplotní periferní částí, připojený na lokální topný systém s pomocným kotlem [1]

2.4.2 Realizace zemního zásobníku tepla

Belgie [1]

- Vodorovné sondy výměníku tepla v hloubce 0,6 m a 1,2 m
- Sondy zabírají plochu 600 m²
- Z každé sondy je odebíráno 19,6 kWh m⁻¹ tepla

Holandsko [1]

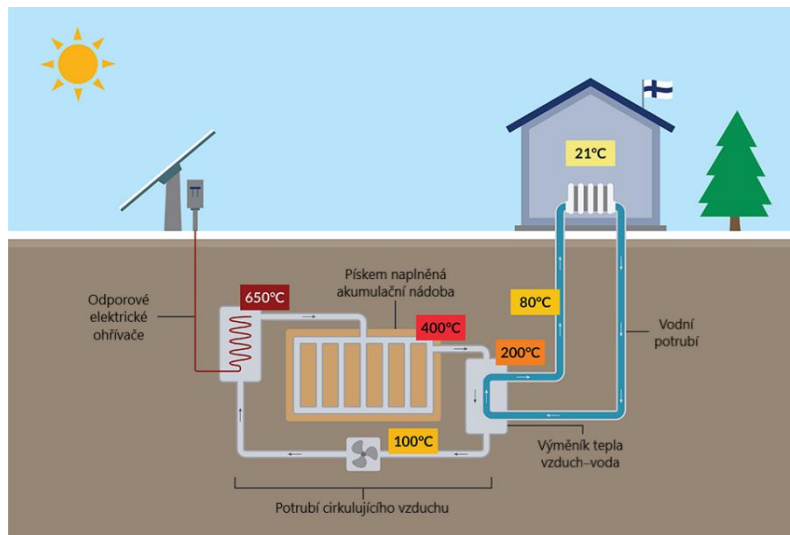
- 360 svislých sond výměníku tepla v hloubce 20 m
- Zemní zásobník pracuje bez tepelného čerpadla
- Napojený na soustavu s potřebou tepla 850 kW

3 Pískový zásobník tepla

Jedná se o relativně nový pohled na využití zeminy jako akumulčního média, vyvinutý finskou společností Polar night energy (PNE), který může nalézt analogii se zemními zásobníky z předchozí kapitoly. Oba využívají hlínu (respektive písek) k akumulaci tepelné energie jejím zahříváním (nejčastěji obnovitelnými zdroji), oba mohou být vhodným škálováním použity k centrálnímu vytápění a oba mohou, při vhodných podmínkách, sloužit k sezónnímu uchování tepla. Tímto, ale většina podobností končí. Pískový zásobník totiž ke svému zahřívání využívá převážně elektrickou energii, což mu umožňuje získávat teplo z více zdrojů než jenom ze slunce či odpadního tepla (na rozdíl od zemních zásobníků) [13]. Například se otevírá možnost využití větrných elektráren jako zdroje elektrické energie nebo připojení k levné elektrické energii ze sítě při energetických špičkách [14]. Při připojení do elektrické sítě tedy mohou tyto zásobníky sloužit k podobnému účelu jako přečerpávací vodní elektrárny (jak již bylo avizováno v úvodu této práce).

3.1 Konstrukce a vlastnosti pískového zásobníku tepla

Zdrojem tepla jsou elektrické odporové ohřivače, které ohřívají vzduch čerpaný do výměníků tepla v centru zásobníku, kde se písek ohřívá na teploty 500–1 000 °C [14]. Písek je uzavřen v tepelně izolovaném, uzavřeném, ocelovém válcovém silu (u aktuálně existujících aplikací) a tepelné výměníky jsou do něj zavedeny tak, aby se nejvyšší teploty dosáhlo v jeho centru [13]. Teplo je tedy přiváděno do středu zásobníku a odváděno z jeho okrajů do kotle pro ohřev vody nebo do jiných spotřebičů tepla [15]. V případě nízké teploty v zásobníku můžeme mezi zásobník a tepelný spotřebič zařadit tepelné čerpadlo [15]. Podle autorů je zásobník schopný teplo udržet až měsíce (v závislosti na rozměrech zásobníku), ale zároveň se dosahuje nejvyšší účinnosti při nabíjení a vybíjení 20–200krát ročně [14]. Nabíjení se nemusí provádět jenom pomocí odporových ohřivačů, ale díky použití vzduchových výměníků můžeme do různých částí zásobníku přivádět vzduch ohřátý například odpadním teplem s různými úrovněmi teplot [14]. Schéma tohoto systému je ukázáno na obrázku 12. Podobně jako u ostatních zásobníků citelného tepla je i zde snaha o dosažení příznivého poměru objem-povrch síla, aby se minimalizovali tepelné ztráty. Zde je důležitost tohoto parametru ještě znásobena vysokou teplotou akumulčního média, která přispívá k vyšším tepelným ztrátám. Tento problém je ovšem kontrován relativně nízkou tepelnou vodivostí písku, který v periferních částech zásobníku funguje jako izolační vrstva. Radiální tepelné ztráty, které zahřívají okraje zásobníku na teplotu 150–200 °C, jsou využity pro odběr tepla [16]. Samotné ocelové silo je dále izolováno konvenčními izolačními materiály [14]. V případě potřeby vysokopotenciálního tepla se může teplo odebírat ze středu zásobníku.



Obrázek 12 Schéma fungování pískového zásobníku tepla s připojením na vytápění rodinného domu; upraveno dle [13]

Pro přenos tepla do zásobníku je tedy používán vzduch, což přináší několik výhod, jako například možnost použití jednoduchého horkovzdušného potrubí v systému, namísto tlakového parního potrubí, jak by tomu bylo v případě použití vody jako teplotního média. Vzduch je tedy ekonomické řešení přenosu tepla. Navíc při použití vody (respektive páry), či jiných teplotních látek, může při porušení výměníku dojít v zásobníku ke zvlhčení písku, což je nežádoucí (viz další podkapitola). Další možnosti přenosu tepla mohou být různé exotické látky s vysokou teplotou varu, u kterých by, ale při jejich úniku hrozila kontaminace okolí a zvýšili by se náklady na zhotovení takového systému.

Nejlépejší přenos tepla při ohřívání zásobníku by ovšem zajistilo umístění odporových ohřivačů přímo do centra zásobníku. To by sebou ale přineslo několik nevýhod, jako například spékání písku v okolí ohřivačů. Na první pohled se může takovéto spékání písku zdát jako nepodstatný jev, ale v případě poruchy odporového ohřivače by to mohlo působit problémy při jeho opravě. Uložení ohřivače mimo zásobník nám tedy umožňuje jeho jednodušší údržbu a případnou výměnu. Další nevýhodou takového uspořádání je to, že nás může připravit o možnost zahřívání zásobníku vysokopotencionálním odpadním teplem, pokud je k dispozici, zabráním místa v centru zásobníku [14].

3.1.1 Písek jako akumulční médium

Vhodným pískem pro akumulaci tepelnou akumulaci je, podle finských autorů této metody, písek hrubý, který se ve stavebnictví používá jako přísada do betonu [15]. Dá se také označit jako štěrkopísek nebo štěrk, ale pro jednoduchost bude akumulční médium dále nazýváno jako písek. Použití takových materiálů má, z důvodu nižší kvality, příznivý vliv na cenu [14]. Kvůli vysoké teplotě dosažené v zásobníku nabývá na důležitosti chemické složení písku, jelikož u některých jeho složek může dojít k dekompozici vlivem vysoké teploty. Jeho chemické složení závisí především na místě těžby písku, ale hlavní složky jsou [17]:

- Oxid křemičitý SiO_2
- Uhličitan vápenatý (vápenec) CaCO_3
- Další těžké elementy

V písku z vnitrozemní těžby je větší část směsi složena z oxidu křemičitého a při přibližování těžby k pobřeží, nebo k místům, kde se dříve hladina moře nacházela, narůstá

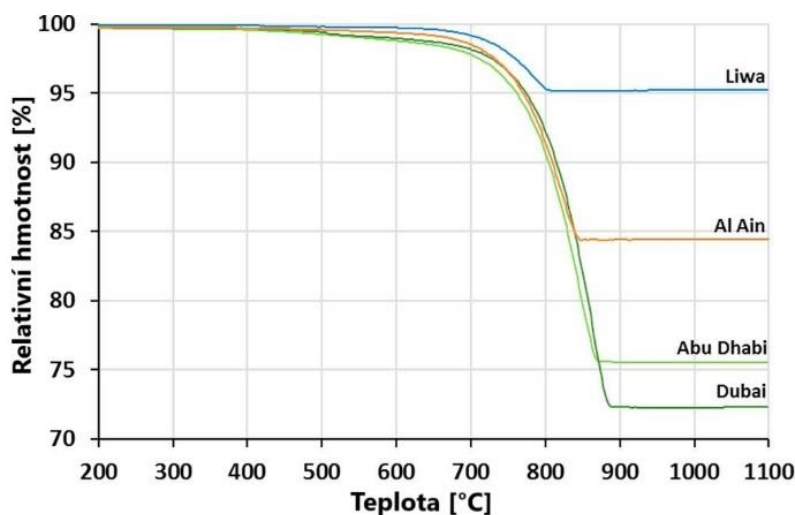
obsah uhličitanu vápenatého, jelikož vápenec vzniká sedimentací mořské fauny (korály, škeble aj.; viz tabulka 3). Těžké elementy se ve stavebním písku nachází spíše ve stopovém množství. Složka, u které hrozí vysokoteplotní dekompozice, je právě CaCO_3 a tento jev se projeví snížením hmotnosti směsi písku. Dekompozice se řídí následující chemickou rovnicí: [17; 18]



Za vysoké teploty (750–850 °C) se uhličitan vápenatý rozpadá na pevný oxid vápenatý (pálené vápno) a plynný oxid uhličitý, jehož unikem dochází ke změně hmotnosti. Průběh této reakce je zobrazen na obrázku 13.¹

Tabulka 3 Složení vzorků pouštního písku sebraných z různých vzdáleností od pobřeží (Abú Dhabí je k pobřeží nejbližší a Liwa nejdále) a jejich průměrná ztráta hmotnosti při vysoké teplotě. Obsah křemíku koresponduje s obsahem oxidu křemičitého a obsah vápníku koresponduje s obsahem uhličitanu vápenatého. Mezi ostatní prvky se řadí i prvky přímo obsažené oxidu křemičitém a uhličitanu vápenatém. [17]

Původ vzorku	Obsah křemíku (Si)	Obsah Vápníku (Ca)	Obsah ostatních prvků	Odhad původního obsahu CaCO_3	Průměrná relativní ztráta hmotnosti
Abú Dhabí	17,1 %	23,7 %	59,1 %	54,2 %	23,81 %
Dubaj	16,2 %	26,3 %	57,4 %	62,8 %	27,6 %
Al Ain	29,7 %	11 %	59,4 %	34,6 %	15,23 %
Liwa	42,9 %	2,3 %	54,8 %	9,7 %	4,28 %

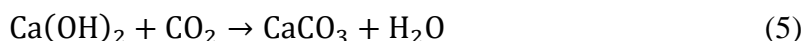


Obrázek 13 Graf průběhu úbytku hmotnosti vzorků za vysoké teploty; upraveno dle [17]

Pokud by oxid vápenatý přišel do kontaktu s vodou, ať už v podobě vlhkosti vzduchu nebo vnikem vody netěsnostmi ocelového síla, došlo by ke vzniku hydroxidu vápenatého (hašené vápno) podle následující rovnice [17]:



Následně by při poklesu teploty došlo k reakci hydroxidu vápenatého s atmosférickým oxidem uhličitým za opětovného vzniku uhličitanu vápenatého: [17]



¹V tabulce 3 a obrázku 13 se jedná o pouštní písek, který před prováděnými experimenty nebyl nijak upravován [17]. Písek těžný ve vnitrozemních lomech se ovšem od těchto dat nebude příliš lišit, jestli vůbec, jelikož hladina moří byla v průběhu historie velmi proměnná a písky stejného složení se jenom usadili pod zemi [18].

Rovnice 4 a 5 popisují stejný jev jako při výrobě a tvrdnutí vápenné malty. Z toho můžeme usuzovat to, že pokud by k takovým reakcím došlo uvnitř zásobníku, tak by v původním objemu sypkého písku došlo k vytvoření shluků uhličitanu vápenatého. Pokud by se k písku nedostala voda, tak by došlo pouze ke ztrátě hmoty písku, kvůli úniku oxidu uhličitého při chemické reakci v rovnici 3 (viz obrázek 13).

Aby se zabránilo jevům v rovnicích 4 a 5 je vhodné používat písek zbavený vlhkosti nebo písek s malým obsahem uhličitanu vápenatého, což zároveň vyřeší i problém s úbytkem hmoty. K vysušení písku je možno použít i zásobník jako takový, jeho zahřátím na nižší teploty, dokud by se všechna přebytečná vlhkost neodvedla. Zásobník by poté musel zůstat co nejlépe od okolí uzavřen, aby se do něj další vlhkost nedostávala, což by sebou mimo jiné přineslo i další tepelné ztráty, v podobě tepla spotřebovaného na odpaření vlhkosti.

Na vhodné volbě písku závisí i množství tepla, které jsme schopni do písku uložit. Toto je charakterizováno tepelnou kapacitou. Pro určení tepelných ztrát je zase důležité znát součinitel tepelné vodivosti směsi písku. Z důvodu vysoké variability různých směsí písku bude v této práci předpokládána konstantní hodnota objemové tepelné kapacity a součinitele tepelné vodivosti λ pro suchý písek:

Tabulka 4 Fyzikální parametry suchého písku [19].

	Objemová tepelná kapacita c_V [$\text{MJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$]	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	Hustota ρ [kg m^{-3}]
Suchý písek	1,19	0,326	1 500

3.1.2 Aplikace vysokoteplotních pískových zásobníků tepla

Uchované vysokopotenciální teplo má více využití než jenom pro vytápění obytných prostor, ačkoliv se jedná o primární využití. Díky vysoké teplotě písku může být uchované teplo použito i pro technologické procesy vyžadující vysokou teplotu nebo pro generování páry [15]. Páru potom můžeme využít pro další technologické procesy, které ji žádají, nebo pro energetické účely (generování elektrické energie parní turbínou) [14]. V takovém případě můžeme o pískovém zásobníku mluvit jako o tzv. Carnotově baterii.

Kvůli vysokým teplotám v zásobníku, a s tím jdoucími i vysokými tepelnými ztrátami, je primární využití pískového zásobníku coby zdroje tepla vhodné především pro centrální vytápění skupin rodinných domů, bytových domů a městských částí [14]. Toto určení je dáno tím, že větší obytné prostory potřebují pro svůj komfortní provoz více tepla, což znamená, že i zásobník bude muset mít větší rozměry, aby tyto potřeby pokryl. Díky větším rozměrům získáme příznivý poměr objem-povrch a tepelné ztráty tím budou vyrovnány dostatečnou tepelnou kapacitou zásobníku. Jako nádoby velkoobjemových zásobníků, určené pro rozsáhlé centrální vytápění, mohou sloužit například již vytěžené lomy a jiné uměle vytvořené jámy, které by po sérii modifikací (uzavření okrajů jámy izolační vrstvou aj.) byli zasypány pískem [15]. U takových variant by ovšem bylo náročné jejich udržení ve stavu zbaveném vlhkosti. U aplikace pro rodinný dům narážíme na problém s rozměry zásobníku, které jsou podstatně menší než u zásobníků pro centrální vytápění z důvodu výrazně nižší spotřeby tepla. Jak již bylo řečeno, tak toto má za následek nevhodný poměr objem-povrch zásobníku a zvyšuje se vliv tepelných ztrát. Dalším problémem je to, že rodinný dům má méně zdrojů energie pro zásobník (například máme menší plochu pro fotovoltaické panely), tedy nabití zásobníku může trvat déle. Oba tyto problémy lze částečně vyřešit tím, že se bude písek ohřívat na nižší teplotu, čímž dojde ke snížení tepelných ztrát a nabití na „maximum“ bude vyžadovat méně energie,

a tedy dojde k rychlejšímu nabití. S použitím nižší teploty nám dále odpadá problém s úbytkem hmotnosti písku vlivem chemických reakcí popsaných v předchozí kapitole. Použití v rodinném domě může, kvůli nižší teplotě zásobníku, benefitovat z připojení tepelného čerpadla do systému vytápění.

Jak již bylo naznačeno teplo z tohoto zásobníku je využitelné i pro jiné účely než pouze pro vytápění budov. V průmyslovém odvětví existuje nespočet technologických procesů, které pro své fungování potřebují vysoké teploty podobné teplotám dosažitelných v pískovém zásobníku. Při vhodných podmínkách může takový proces dosáhnout nižší energetické náročnosti [14]. Zároveň existuje mnoho průmyslových odvětví, ve kterých při provozu dochází ke generování značného množství tepla. Pokud po jeho primárním využití (například právě pro jiné technologické procesy potřebující teplo nebo pro přímé vytápění budov) bude stále tepla nadbytek, tak jeho ukládání do pískového zásobníku může být vhodnou možností pro pozdější využití [15].

Další způsob využití pískového zásobníku je v energetickém sektoru ve smyslu generování a spotřebování elektrické energie do veřejné sítě [14]. Elektrická energie by pomocí tohoto zásobníku šla generovat vytvářením páry v kotli, poháněném teplem ze zásobníku. Pára se následně pustí do parní turbíny, generující s pomocí generátoru elektrickou energii. Ačkoliv je tento způsob využití možný dosáhlo by se účinnosti kolem 25 % [15]. Mnohem zajímavější je využití spotřebováváním elektrické energie, kdy by se odporové ohřívače napájeli přebytečnou elektrickou energií ze sítě a tím by zajišťovali její stabilitu v časech malé spotřeby a velké výroby [20]. Funkce by to byla podobná jako u přečerpávacích vodních elektráren s tím rozdílem že zpětné vytváření elektrické energie by bylo zatíženo mnohem menší účinností. Větší ekonomičností se tedy dosáhne ponechání energie ve formě tepla, které by pohánělo centrální vytápění.

3.1.3 Výhody a nevýhody

Výhody:

- Pro ohřev zásobníku je využita elektrická energie
- Mimo elektrickou energii, lze využít odpadní teplo
- Díky vysoké teplotě v zásobníku zmenšují rozměry zásobníku při stejné tepelné kapacitě
- Může zajišťovat stabilitu veřejné elektrické sítě
- Může fungovat jako zdroj tepla pro technologické procesy
- Nízká cena akumulčního média

Nevýhody:

- Horší aplikovatelnost pro rodinný dům kvůli vysoké teplotě a s ní jdoucími tepelnými ztrátami
- Hrozí dekompozice akumulčního média při vysokých teplotách
- Nutná opatření proti vnikání vlhkosti do zásobníku
- Nová, nepříliš odzkoušená metoda akumulace tepla

3.2 Realizace pískového zásobníku tepla

Nyní existují dvě fungující realizace pískových zásobníků zkonstruované společností PNE. Tyto realizace jsou:

Zásobník v městské části Hiedanranta

První funkční prototyp, sloužící pro ověření konceptu pískového zásobníku tepla, jehož odporové ohřívače jsou částečně napájeny elektrickou energií z fotovoltaických panelů o rozloze 100 m² a částečně z elektrické sítě [14]. Tento prototyp je připojen k centrálnímu vytápění městské oblasti Hiedanranta ve finském městě Tampere. Zásobník je umístěn uvnitř budovy [21].

- Tepelná kapacita zásobníku jsou 3 MWh
- Teplota dosažená v zásobníku je 500–600 °C
- Hmotnost písku v zásobníku je 40 t

Zásobník ve městě Kankaanpää

První komerční řešení pískového zásobníku tepla bylo vytvořeno pro energetickou společnost Vatajankoski v roce 2022, ve finském městě Kankaanpää. Zásobník je připojen do soustavy centrálního vytápění spravovaného zmíněnou energetickou společností. Zdrojem tepla je odpadní teplo z nedaleké teplárny provozující centrální vytápění v dané oblasti a odporové elektrické ohřívače napájeny elektrickou energií ze sítě [14; 16].

- Tepelná kapacita zásobníku je 8 MWh
- Tepelný výkon zásobníku je 100 kW
- Teplota v zásobníku je 500–600 °C
- Hmotnost písku v zásobníku je 120 t
- Písek je uzavřen v ocelovém válcovém silu s průměrem 4 m a výškou 7 m



Obrázek 14 Pískový zásobník tepla ve městě Kankaanpää [20]

3.2.1 Budoucí realizace pískových zásobníků tepla

Společnost PNE plánuje komerční produkci dvou typů pískových zásobníků o větších kapacitách než ty, které nyní existují. Menší z nich bude mít tepelnou kapacitu 200 MWh s tepelným výkonem 2 MW a větší bude mít tepelnou kapacitu 730 MWh s tepelným výkonem 10 MW. U většího ze dvou zásobníků je tvrzena účinnost uchování tepla 95 %, při držení tepla 1–2 týdny. [14]

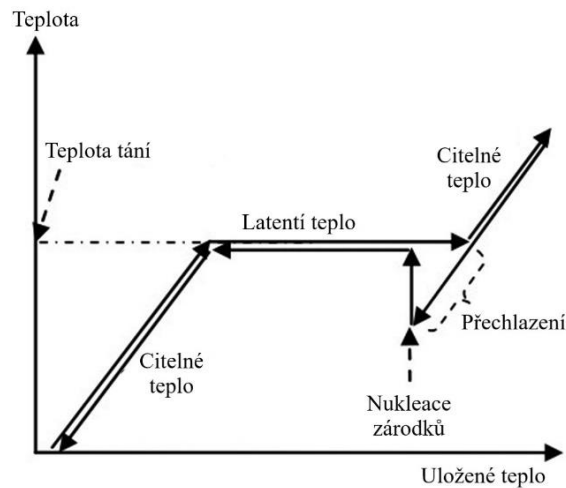
4 PCM zásobníky tepla

PCM (phase change material) k akumulaci tepla využívají své latentní neboli skupenské teplo. Latentní teplo je teplo, které látka potřebuje pro přechod z jedné fáze (například tuhá fáze) do jiné (například tekutá fáze). U materiálů, užívaných pro tento účel, je žádoucí, aby změna skupenství probíhala za co nejvíce stálé teploty, za které můžeme z materiálu odebírat, respektive přivádět, teplo [22]. Ve srovnání s citelným teplem nám latentní teplo nabízí větší energetickou hustotu, což znamená, že pokud bychom ohřáli o jeden kelvin PCM na hranici změny fáze bylo by dodané teplo mnohem větší než při ohřevu stejné látky o jeden kelvin mimo hranici přechodu fáze. Jednoduchým příkladem tohoto fenoménu je voda (uvažujeme její jeden kilogram), která pro svůj ohřev o jeden kelvin potřebuje 4,18 kJ tepla a pro svou fázovou přeměnu do tuhého stavu potřebuje 334 kJ tepla [23]. Nejčastějším fázovým přechodem PCM je z tuhé do tekuté a naopak. Ostatní přechody jako například z tekuté do plynné fáze sice obecně poskytují větší latentní teplo, ale přinášejí sebou mimo jiné problém s únikem plynů do okolí. Dalším možným fázovým přechodem je překrytalizace tuhých látek, které při svém ochlazení prochází eutektoidní reakcí, čímž se dosáhne překrytalizace za konstantní teploty [22].

Obecně se dá říci, že tepelné zásobníky využívající PCM jsou určeny spíše pro krátkodobé udržení tepla, nejčastěji akumulovaného pomocí solárních kolektorů [22]. Jsou tedy jedním z řešení pro překlenutí období mezi dostatkem slunečního záření (den) a jeho nedostatkem, kdy je teplo nejvíce potřeba (noc).

4.1 Vlastnosti a formy PCM a zásobníků tepla

Materiálů, vhodných pro použití jako PCM je poměrně široká řada, ale ty nejvíce používané jsou anorganické PCM (hydráty solí), organické PCM (parafiny, vosky, mastné kyseliny aj.) a eutektické PCM (směs vody a solí v ní rozpuštěných s provozní teplotou danou eutektickým bodem) [22; 24]. Tyto materiály sebou, spolu s vysokým latentním teplem, přinášejí i některé nežádoucí fyzikální, tepelné, kinetické a chemické vlastnosti. Některými z těchto nežádoucích vlastností jsou obecná nízká tepelná vodivost PCM, změna objemu při změně fáze nebo přechlazení kapalné fáze (viz obrázek 15). Přechlazení je jev, při kterém ani po ochlazení pod teplotu tání nedojde ke vzniku pevné fáze. V takové situaci je kapalina v metastabilním stavu a pro zahájení nukleace zárodků tuhé fáze vyžaduje vnější energetický impulz, nebo přítomnost nečistot ve svém objemu, na kterém bude moci nukleace začít. Latentní teplo bude z PCM uvolňováno až poté, co začne tuhnutí a bude se uvolňovat při teplotě nukleace (tedy ne při teplotě tání, ale nižší teplotě přechlazení). Tedy to znamená, že se bude teplo uvolňovat při nižší teplotě, než při které se do PCM dodávalo. Při příliš nízké teplotě přechlazení by, v jistých případech, hrozilo to, že by vůbec k tuhnutí nedošlo. Například pokud by teplota okolí nebyla dostatečně nízká, aby se teploty nukleace dosáhlo [24].



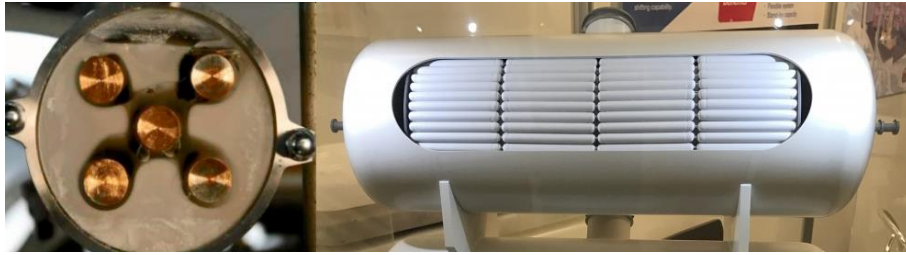
Obrázek 15 Vizualizace latentního a cítného tepla, spolu s ukázkou přechlazení a nukleace zárodků; upraveno dle [24]

Aby se tyto nežádoucí vlastnosti omezili, tak se do PCM přidávají nanočástice materiálů s vysokou tepelnou vodivostí. Toto aditivum, mimo zvýšení tepelné vodivosti, také může fungovat jako „nečistota“, na které se vytvoří nukleační zárodky (v okolí nanočástic začne docházet k tuhnutí PCM) a tím se omezí přechlazení kapalné fáze [24]. Jako nanočástice se používají [24]:

- Kovové nanočástice
- Nanočástice oxidů kovů
- Uhlíkové nanočástice

Kovové nanočástice se vyznačují vysokou tepelnou vodivostí, ale také vysokou cenou. Nanočástice oxidů kovů mají menší tepelnou vodivost než kovové, ale nižší cenu. Uhlíkové nanočástice se ukazují, jako nejvhodnější z uvedených, jelikož z nich mají nejvyšší tepelnou vodivost a také největší pórovitost, díky čemuž vytvářejí koherentnější směsi s PCM. S vyšším obsahem nanočástic se zvyšuje i intenzita benefitů, které přináší, ale zároveň se zvyšuje i viskozita tekuté fáze PCM, což zhoršuje přenos tepla konvekci. Dalším faktorem, který omezuje množství použitých částic, je riziko vzniku sedimentace nanočástic. [24]

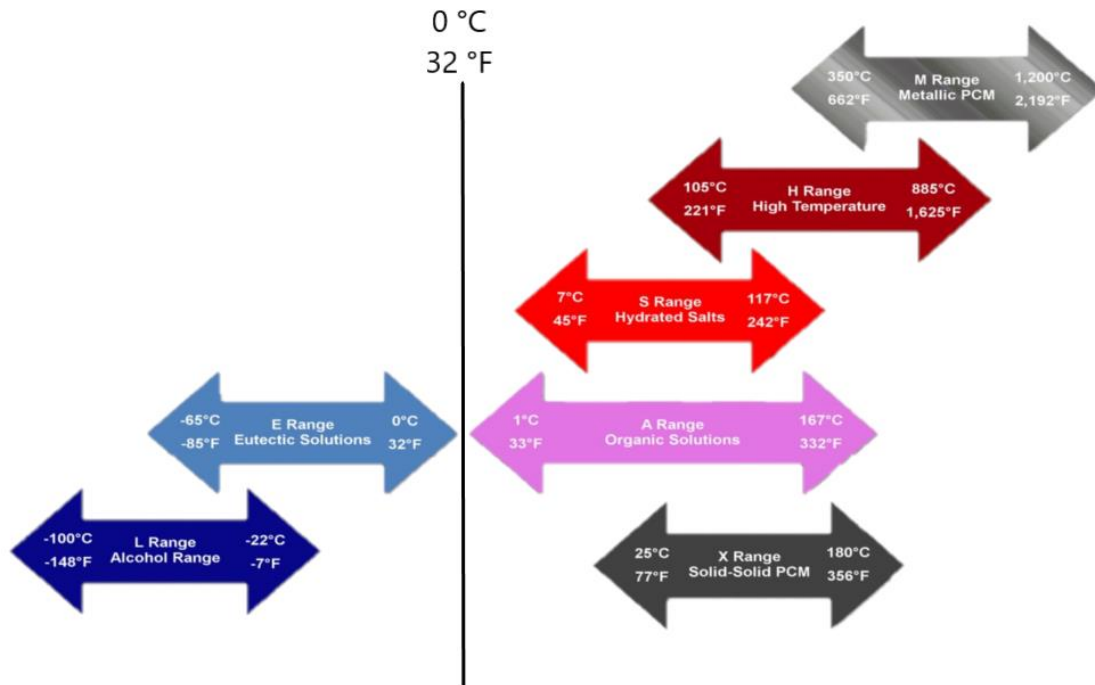
Coby zásobníky tepla pro obytné prostory fungují PCM nejčastěji jako způsob navýšení tepelné kapacity budovy, která teplo posléze uvolňuje a udržuje si stabilní teplotu. PCM jsou do budovy zabudovány například jako izolační vrstva, aditivum do zdící malty či omítky nebo se PCM v uzavřených nádobách (desky, válce, polštáře aj.) vyloží pod podlahu, jako doplněk k podlahovému vytápění. Materiál je v průběhu dne ohříván a taven sluncem, následně v noci tuhne a uvolňuje teplo [22; 24]. Dalším způsobem využití je uložení PCM v uzavřených nádobkách do zásobníku na horkou vodu, která je ohřívána solárními kolektory (obrázek 16 vpravo) nebo rovnou můžeme zaplnit celý objem zásobníku volně loženým PCM, do kterého budou zavedeny výměníky tepla (obrázek 16 vlevo). Tepelná kapacita zásobníku se tak může zvýšit a výstupní teplota vody bude mít stabilnější teplotu (dokud nedojde k úplné solidifikaci PCM) [24; 25]. Velké využití nachází PCM zásobníky také v chlazení obytných a průmyslových prostor, kdy je princip využití prakticky stejný jako při akumulaci tepla jenom místo něj akumulujeme chlad [24].



Obrázek 16 Experimentální prototyp zásobníku tepla s volně lože loženým PCM (vlevo) a zásobník tepla s PCM uzavřeným ve válečcích, kolem kterých proudí voda (vpravo) [22; 25]

4.1.1 Druhy PCM materiálů

Jedním z nejdůležitějších parametrů jednotlivých PCM je teplota, při které dochází ke změně skupenství, respektive fáze. Tato teplota určuje účel jednotlivých PCM, například materiály s nízkou teplotou tání jsou vhodné pro chladírenský průmysl, s pokojovou teplotou tání pro stabilizování teploty obytného prostoru a s teplotou vyšší, než je pokojová jsou vhodné pro ohřev vody. Dalšími materiály, které mohou najít uplatnění v průmyslovém odvětví nebo energetice jsou materiály s vysokou teplotou změny fáze. Vizualizace pracovních teplot je na obrázku 17 a výběr PCM materiálů v tabulce 5.



Obrázek 17 Rozmezí pracovních teplot jednotlivých druhů PCM; upraveno dle [22]

Tabulka 5 Vlastnosti a označení PCM. Výběr z katalogu. [22]

Označení PCM	Typ PCM	Teplota změny fáze [°C]	Latentní teplo [kJ kg ⁻¹]	Objemová tepelná kapacita [MJ m ⁻³]	Součinitel tepelné vodivosti [W m ⁻¹ K ⁻¹]
S25	Hydráty solí	25	175	268	0,54
S70	Hydráty solí	70	100	168	0,57
A25	Organická sloučenina	25	220	118	0,18
A70	Organická sloučenina	70	225	200	0,23
E-11	Eutektická sloučenina	-12	310	338	0,57
E-32	Eutektická sloučenina	-32	225	290	0,56
X90	Překrystalizační PCM	90	170	204	0,36
X165	Překrystalizační PCM	165	225	293	0,36
H160	Tekuté soli	162	105	201	0,51
H650	Tekuté soli	652	300	735	0,56

Hydráty solí

Tyto PCM mají menší latentní teplo než ostatní, ale vyšší součinitel tepelné vodivosti než například organické PCM. Obecně tyto sloučeniny mají potíže s přechlazováním, které se musí pokrýt použitím nukleační přísady [24]. Některé soli užívané v tomto typu PCM mohou být, ve správné koncentraci s vodou (nebo jiným rozpouštědlem) použity a označeny jako eutektické sloučeniny, a tedy použity při nižších teplotách [22]. Některé hydráty solí mohou být člověku nebezpečné, což výrazně omezuje jejich použití. Dále mají některé hydráty solí problémy se stabilitou při větším počtu cyklů změny fáze, což se projevuje separací jednotlivých komponent PCM, proto se musí modifikovat přísadami, bránícími tomuto jevu [22; 24].

Organické sloučeniny

Organické PCM mají ze všech možností nejmenší součinitel tepelné vodivosti, ale na druhou stranu mají vyšší latentní teplo [24]. Další výhodou je jejich organická povaha, díky čemuž nejsou člověku obecně škodlivé. Některé z organických PCM jsou, ale hořlavé při vyšších teplotách, zejména pak ty s nižší teplotou tání [22]. Teplota změny fáze se pohybuje v rozmezí 2–164 °C. Organické sloučeniny použitelné jako PCM jsou například vosky, parafíny, mastné kyseliny nebo polyglycoly [22]. Z organických materiálů je před provozem odstraněna většina cizích sloučenin, z nichž má každá jinou teplotu tání. Tímto se zajistí přesněji daná a konstantnější teplota změny fáze [24].

Eutektické sloučeniny

Tento typ sloučenin má obecně nízkou teplotu tání začínající na 0 °C a sahající až do -70 °C. Těchto nízkých teplot je dosaženo vytvořením směsi s koncentrací složek odpovídající eutektickému bodu. Jedná se nejčastěji o směs solí a rozpouštědla (voda) a hlavní podmínkou pro realizaci takové směsi je existence eutektického bodu. Podobně jako PCM z hydrátů solí mají eutektické PCM problém s přechlazováním. Eutektické PCM se hojně využívají v chladírenském průmyslu například jako záloha při výpadku energie, kdy bude PCM uvolňovat chlad, aby teplota v chladírně zůstala nízká. Další využití je při transportu zboží, které vyžaduje nízkou teplotu (potravinu, léky aj.). [22]

Překrystalizační PCM

Změna fáze těchto PCM je překrystalizace z jedné krystalické mřížky do druhé. Jedná se tedy o změnu fáze v tuhém stavu, což má tu výhodu, že odpadá nutnost práce s kapalinou, u které hrozí její únik do okolí. PCM v tuhém stavu mají nevýhodu v tom, že při překrystalizaci dojde k mírné změně objemu, což sice nastává i u PCM, které mění skupenství, ale u těch se změna objemu projeví pouze nárustem hladiny, kdežto překrystalizační PCM mohou vyvolat napětí na okolí při expanzi. Teplota změny fáze u používaných překrystalizačních PCM se pohybuje v rozmezí 25–180 °C, což je dělá dobrými kandidáty pro ohřev vody nebo průmyslové potřeby. [22]

Tekuté soli

Tekuté soli, díky svým vysokým teplotám tání, které se pohybují v rozmezí 105–885 °C, jsou vhodným kandidátem pro použití v energetickém či průmyslovém sektoru [22]. Mají využití například v koncentračních solárních elektrárnách, kde mohou sloužit jako médium absorbující teplo ze solárních zrcadel (v koncentračních solárních elektrárnách se již využívá materiálů, které vlivem vysoké teploty změny skupenství, ale tyto využívají pro svou akumulaci primárně citelné teplo). Při použití PCM se může snížit objem stávajících zásobníků až o 35 %, při stejné tepelné kapacitě [26].

4.1.2 Využití PCM materiálů

PCM mají dvě hlavní oblasti energetického využití, jsou to:

- Stabilizace teploty v místnosti
- Tepelný zásobník obsahující PCM

Stabilizace teploty v místnosti

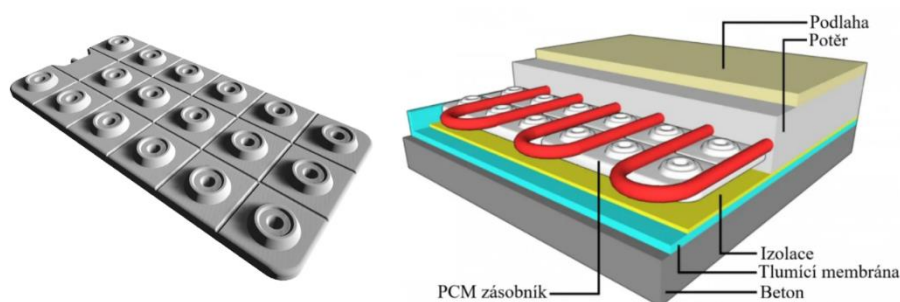
Principem této aplikace je obložení místnosti uzavřenými nádobkami s PCM, které přes den projdou změnou fáze, buď pomocí přímého slunečního ohřevu (prostup tepla okny či nahříváním zdi domu) nebo pomocí rozvodů horké vody ohřáté slunečními kolektory. První uvedený způsob zároveň funguje, jako způsob chlazení místnosti, jelikož je teplo pohlceno PCM. Nádobky s PCM existují v mnoha formách, jako například sáčky, desky, válce aj [22].

Sáčky se využívají jako doplněk k izolaci a jsou nejčastěji na vnitřních stěnách nebo na podlaze půdy [22]. Nevýhodou tohoto použití je to, že aby PCM dosáhlo změny fáze musí být vystaveno venkovnímu zvýšení teploty (PCM začne tát), čemuž brání zbytek konvenční izolace. Tento problém lze vyřešit využitím dynamické izolace, která je schopna měnit svůj tepelný odpor [27].



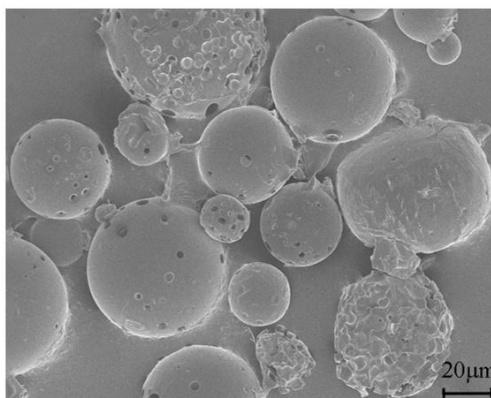
Obrázek 18 Sáčky s PCM [22]

PCM v ostatních formách (desky, válce aj.) se nejvíce využívají s podlahovým vytápěním, které je plně nebo částečně zásobováno solárními kolektory, kdy je mezi jednotlivými PCM elementy vedeno potrubí s teplotonosnou látkou (voda). Teplo je tak přes den přivedeno a v noci je uvolňováno. [22]



Obrázek 19 Desky s PCM a jejich využití v podlahovém vytápění; upraveno dle [22]

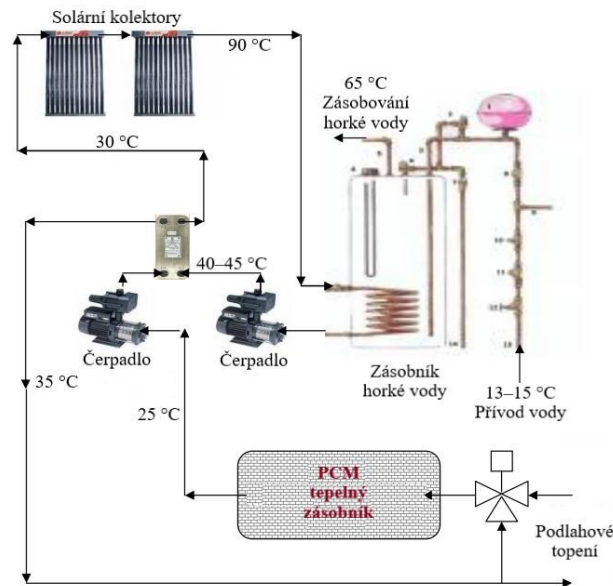
PCM je možné uzavřít i do tzv. mikrokapslí, které se rozptýlí do základního materiálu, čímž se zvýší tepelná kapacita materiálu o latentní teplo PCM. Mikrokapsle se mohou například zamíchat do malty nebo omítky, kterou se pokryje vnitřní stěna místnosti. Taková stěna bude následně lépe pohlcovat denní záření procházející okny a postupně ho uvolňovat. [28]



Obrázek 20 Mikrokapsle s PCM pod mikroskopem [46]

Tepelný zásobník obsahující PCM

Jak již bylo naznačeno tepelné zásobníky, které využívají PCM, mohou být buď s volně loženým PCM (materiál není uzavřen v žádných nádobkách, ale zaplňuje celý objem) nebo s PCM v uzavřených nádobkách (válečky, desky, kuličky aj.), které se na sebe poskládají tak, že kolem nich bude moci protékat voda [22; 25]. V závislosti na druhu použitého PCM je voda čerpána buď do podlahového vytápění nebo do odběru horké vody. Aby použití těchto zásobníků dávalo ekonomický smysl, musí být jako zdroj tepla použit některý z obnovitelných zdrojů (nejčastěji slunce) nebo odpadní teplo. Významným využitím takových zásobníků je, kromě akumulace tepla, i akumulace chladu. Při použití zásobníku jako zdroj chladu jím místo vody proudí vzduch, který se následně vede do ventilace budovy [22].



Obrázek 21 Schéma solárního vytápění horké vody s PCM tepelným zásobníkem napojeným na podlahové vytápění; upraveno dle [22]

4.1.3 Výhody a nevýhody

Výhody:

- Široké spektrum využití dané rozsahem teplot různých PCM
- Lze použít ve formách, které se dají snadno aplikovat pro rodinný dům
- Účinný způsob navýšení tepelné kapacity budou i tepelných zásobníků

Nevýhody:

- Nežádoucí vlastnosti některých PCM
 - Hořlavost
 - Přechlazování
 - Omezený počet cyklů změny skupenství
 - Toxicita
 - Nízká tepelná vodivost PCM
- Nutnost vyrovnání nežádoucích vlastností PCM přísadami, které mohou přinášet další nežádoucí vlastnosti (zvýšení viskozity, ztráta změny skupenství za konstantní teploty aj)

4.2 Realizace PCM zásobníků tepla

Zásobník na norské univerzitě humanitních věd NMBU [22]:

- Provoz jako zdroj chladu
- PCM s teplotou tání 10 °C
- 40 000 desek obsahujících PCM, uzavřených ve třech tlakových nádobách
- Celková tepelná kapacita zásobníku je 9 MWh



Obrázek 22 NMBU PCM zásobník chladu, vnitřní pohled na naskládané desky s PCM (vlevo) a vnější pohled na nádrže, obsahující desky (vpravo) [22]

Zásobník v Grenoble, Francie [29]:

- Provoz jako zdroj tepla
- organické PCM s teplotou tání 70 °C
- 2,2 m³ volně loženého PCM v tekutém stavu
- Celková tepelná kapacita zásobníku je 180 kWh



Obrázek 23 PCM zásobník tepla v Grenoble, Francie. Vnější pohled na nádrž s PCM (vpravo) a vnitřní pohled na volně ložené PCM s trubkami výměníku tepla [29]

5 Termochemické zásobníky tepla

Termochemické zásobníky tepla využívají řadu endotermických, respektive exotermických, reakcí a procesů pro krátkodobé i dlouhodobé uchovávání tepelné energie [6]. Nejedná se vždy o chemické reakce, jelikož se v nich, především pro nižší teploty (do 150 °C), využívá i fyzikálního jevu zvaného sorpce (absorpce a adsorpce) [30]. Pro vysoké teploty (v řádu stovek °C) se již výhradně využívají chemické reakce různých typů. Nejdůležitější podmínkou vhodnosti dané reakce, respektive procesu, pro využití v zásobníku tepelné energie je opakovatelnost a reversibilita daného jevu [31].

Sorpční zásobníky pracují na principu opakovaném spojování a rozdělování dvou (i více) látek, při uvolňování nebo spotřebování tepla. Při tomto jevu nedochází k chemické reakci mezi látkami a proces probíhá nejčastěji vysoušením (nabíjení) a vlhčením (vybíjením) sorbentu [6]. Chemické zásobníky pro akumulaci využívají své molární reakční teplo, které se uvolní nebo spotřebuje pro uskutečnění chemické reakce, která ve své nejjednodušší formě může vypadat takto [31]:



Kde A je vstupní, respektive výstupní, chemická sloučenina, B a C jsou výstupní, respektive vstupní, chemické sloučeniny a ΔH_r je molární reakční teplo dané reakce. Teoreticky dokud od sebe zůstanou složky B a C odděleny je doba uchovávání tepla neomezená. Teplo uložené chemickou reakcí lze určit jako [31]:

$$Q = X \cdot n_B \cdot \Delta H_r \quad (7)$$

Kde ΔH_r je molární reakční entalpie, n_B je počet molů produktu a X je dosažená přeměna v reakci.

Velkou předností termochemických zásobníků tepla je jejich vysoká energetická hustota, ve srovnání se zásobníky citelného tepla a latentního tepla, která je značná především u vysokoteplotních chemických reakcí [31]. Termochemické zásobníky mohou zároveň fungovat jako zásobníky citelného tepla [6].

Hlavní požadavky na vlastnosti materiálů určených pro termochemické zásobníky tepla jsou [6; 31]:

- Vysoká energetická hustota
- Vhodná reakční teplota (záleží na určení použití daného materiálu a zásobníku)
- Dobrá kinetika chemické a reakce a sorpčního procesu
- Nesmí být toxické, hořlavé ani způsobovat korozi příslušenství zásobníku
- Stabilní i po větším počtu nabíjecích cyklů
- Nízká časová degradace materiálů
- Nízká cena

5.1 Procesy a reakce termochemických materiálů

5.1.1 Absorpce

Absorpce je proces, při kterém je plynná, kapalná nebo pevná látka (absorbát) vstřebávána do celého objemu jiné kapalně nebo pevně látky (absorbent), čímž se vytvoří směs obou složek (viz obrázek 24) [6]. Vstřebáváním (rozpuštěním) absorbátu do absorbentu se uvolňuje teplo a zásobník se tak „vybíjí“. Při opětovném zahřátí směsi obou látek dojde k jejich separaci, a tedy „nabití“ zásobníku. Nejčastěji využívaným absorbentem je voda, ve které se, coby absorbát, rozpouští například hydroxid sodný [32].

Tabulka 6 Vybrané adsorpční dvojice, jejich teplota nabíjení a vybíjení a energetická hustota. [6; 32]

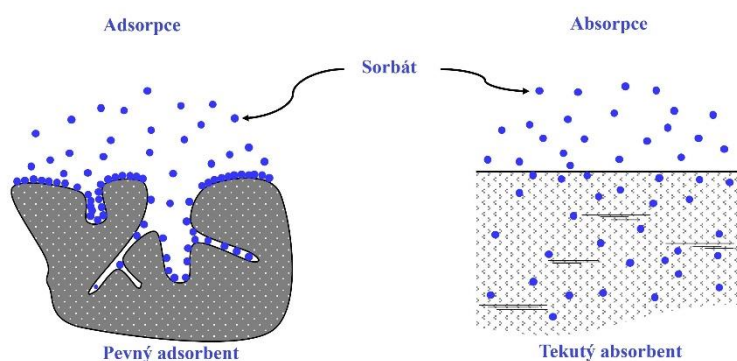
Absorbát/absorbent	Teplota nabíjení [°C]	Teplota vybíjení [°C]	Energetická hustota [kWh m ⁻³]
NaOH/H ₂ O	100–150	40–65	5
LiCl/H ₂ O	46–87	30	85
NH ₃ /H ₂ O	93	43	119
CaCl ₂ /H ₂ O	70–80	21	381

5.1.2 Adsorpce

Adsorpce, na rozdíl od absorpce, je proces, při kterém je plynná nebo kapalná látka (adsorbát) vstřebávána povrchem pevné látky (adsorbentu) (viz obrázek 24) [6]. Částice adsorbátu jsou k povrchu adsorbentu přitahovány slabými van der Waalovými silami, které mezi nimi vytvoří vazbu. Přívodem tepla adsorpční dvojici dojde k porušení těchto vazeb a zásobník se tak dostává do stavu nabitého. Opětovným vytvořením těchto vazeb (navlhčením adsorbentu) dojde k uvolnění uloženého tepla. Vhodným adsorbátem pro tento proces je materiál s co největším povrchem k vytvoření vazeb mezi částicemi, tedy materiály porézní [32]. Takovým materiálem je například přírodní nebo syntetický zeolit do jehož pórů se zachycuje vodní pára, coby adsorbát [30].

Tabulka 7 Vybrané adsorpční dvojice, jejich teplota nabíjení a vybíjení a energetická hustota. Označení 13X a 4A u zeolitů je označení od výrobce a značí velikost molekul, které je materiál schopen pojmout. [6; 32; 33]

Absorbát/adsorbent	Teplota nabíjení [°C]	Teplota vybíjení [°C]	Energetická hustota [kWh m ⁻³]
H ₂ O/zeolit 13X	130	65	124
H ₂ O/zeolit 4A	180	35	120
H ₂ O/silikagel	88	32	120

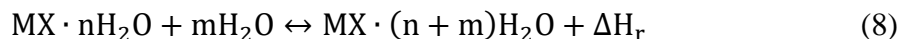


Obrázek 24 Schéma principu absorpce a adsorpce; upraveno dle [47]

5.1.3 Chemisorpce

Proces chemisorpce je podobný sorpčním jevům, s tím rozdílem, že na rozhraní sorbátu a sorbentu vzniknou silnější chemické vazby a nové sloučeniny. Mezi chemické reakce využívané při chemisorpci patří například hydratace a dehydratace hydrátů solí, kde, podobně jako u adsorpce či absorpce, se dehydrovaná sloučenina nachází ve stavu nabitém a po opětovné hydrataci dojde k uvolnění uloženého tepla. [6]

Nejčastěji využívaná reakce, hydratace/dehydratace, má následující obecnou rovnici [6]:



Tabulka 8 Vybrané chemisorpční materiály, jejich teplota nabíjení a vybíjení a energetická hustota vztažená na metr krychlový produktu nabíjecí chemické reakce. [32]

Sorpční materiál [začátek/konec dehydratace]	Teplota nabíjení [°C]	Teplota vybíjení [°C]	Energetická hustota [kWhm ⁻³]
CaCl ₂ ·2H ₂ O/CaCl ₂ ·H ₂ O	95	35	200
MgSO ₄ ·7 H ₂ O/MgSO ₄	122–150	122	420
MgCl ₂ ·6H ₂ O/MgCl ₂ ·2H ₂ O	115–130	35	603

Jelikož většina sorpčních procesů a reakcí probíhá za relativně nízké teploty (viz tabulka 6–8), kterou jsou schopny dodávat ploché a vakuové solární kolektory (do 150 °C), tak jsou výše popsané termochemické principy vhodné pro použití, mimo jiné, ve vytápění rodinných domů a jiných obytných prostor. [6]

5.1.4 Chemické reakce

Chemické reakce použitelné v termochemických zásobnících jsou takové, které při svém průběhu uvolňují nebo spotřebovávají teplo a zároveň jde produkty této reakce bez větších potíží a ideálně v jednom kroku opět přeměnit na vstupní sloučeninu. Reakce splňující tyto kritéria nejčastěji probíhají za vysoké teploty (stovky °C), což sice omezuje jejich použití ve vytápění samostatných rodinných domů, ale také je to dělá dobrou alternativou akumulace tepla v různých odvětvích elektrárenské energetiky.

Amoniakové termochemické zásobníky [31]

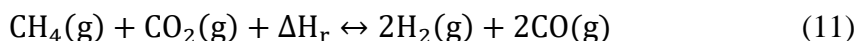
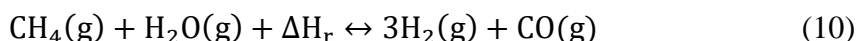
Je využito rozpadu molekuly amoniaku na vodík a dusík za vysoké teploty a tlaku:



Nevýhodou této metody jsou vysoké tlaky, za kterých reakce probíhá (10–30 MPa) a problémy se skladováním hořlavého vodíku. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

Uhlovodíkové termochemické zásobníky [31]

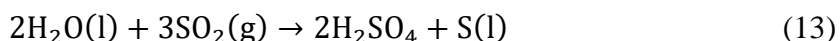
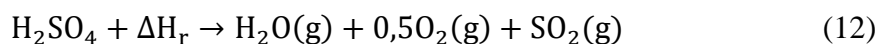
Je využito chemické reakce metanu s vodní párou nebo oxidem uhličitým, kdy je v obou případech produktem reakce vodík a oxid uhelnatý:



Tato reakce je hojně využívána v průmyslové produkci vodíku. Nevýhodou této reakce je existence vedlejších reakcí a problémy se skladováním hořlavého vodíku a oxidu uhelnatého. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

Sírové termochemické zásobníky [31]

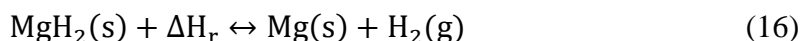
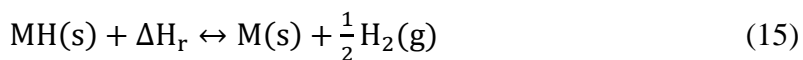
Proces skladování tepla využívá tři chemických reakcí vycházejících z rozpadu kyseliny sírové za vysoké teploty. Chemické rovnice popisující tyto reakce jsou:



Teplu, spotřebované na rozpad kyseliny sírové, je zpět získáno spalováním čisté síry. Produkty spalování jsou následně využity při vytváření kyseliny sírové, což je nízkoteplotní reakce, která probíhá při teplotě 150 °C. Nevýhodou těchto reakcí je, nutnost využití efektivních katalyzátorů, pro dosažení stabilní přeměny. Dalším omezením této metody je korozivita síry a jejích sloučenin. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

Hydridové termochemické zásobníky [31]

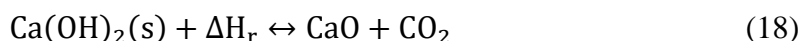
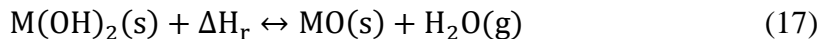
Tento zásobník využívá chemické reakce, kterou je dehydrogenace/hydrogenace hydridů kovů, kdy je výsledkem reakce plynný vodík a čistý kov. Obecná chemická rovnice této reakce (viz rovnice 15) a konkrétní příklad (viz rovnice 16):



Hlavní výhodou zásobníků tepla využívající tuto reakci je vysoká energetická hustota a široká škála reakčních teplot (250–1000 °C). Nevýhodou je opět nutnost práce s plynným vodíkem a relativně nízká tepelná vodivost hydridů kovů, kterou lze navýšit inertními přísadami s vysokou tepelnou vodivostí (například částičky uhlíku). Tato reakce byla, mimo jiné, také zkoumána jako jeden z možných způsobů skladování vodíku. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

Hydroxidové termochemické zásobníky [31]

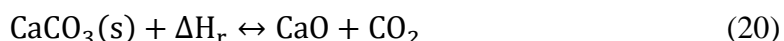
Reakcí zde využívanou je dehydratace/hydratace hydroxidů kovů, kdy dehydratací dojde k rozdělení hydroxidu na oxid daného kovu a vodní páru. Po opětovné hydrataci dojde k uvolnění tepelné energie. Obecná rovnice této reakce (viz rovnice 17) a konkrétní příklad této reakce (viz rovnice 18):



Jednou z hlavních nevýhod zásobníků, využívajících tuto chemickou reakci je nízká mechanická pevnost pelet hydroxidů a oxidů kovů, které jsou zatěžovány změnou objemu pelet při jejich hydrataci/dehydrataci. Toto má za následek rozpad pelet na jemnější částice, u kterých hrozí spékání ve větší shluky vlivem vysoké teploty, což ve výsledku omezuje přísun vody k těmto novým útvarům. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

Uhličitánové termochemické zásobníky [31]

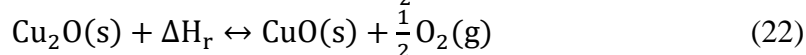
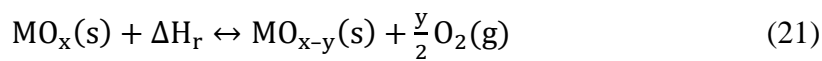
Chemickou reakcí zde využívanou je karbonizace/dekarbonizace různých uhličitánů, které se vlivem vysoké teploty endotermicky rozpadnou na oxid uhličitý a oxid kovu. Opětovným sloučením dojde k uvolnění tepla. Obecná chemická rovnice popisující karbonizaci/dekarbonizaci (viz rovnice 19) a konkrétní příklad (viz rovnice 20):



Tato chemické reakce má tu výhodu, že může využívat organické netoxické sloučeniny (viz rovnice 20) jako například vápenec. Rovnice 20 zároveň popisuje i výrobu páleného vápna, což může naznačovat to, že se do těchto termochemických zásobníků nesmí dostat žádná, neboť by mohlo dojít ke ztvrdnutí celé směsi. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

Redukční termochemické zásobníky [31]

Je využíváno chemické reakce redukce/oxidace oxidů kovů, v nichž dojde působením tepla k redukci, tedy snížení oxidačního čísla, a uvolnění kyslíku. Po opětovné oxidaci se teplo uvolní. Obecná rovnice popisující redukci/oxidaci (viz rovnice 21) a konkrétní příklad (viz rovnice 22):



Jelikož je plynným produktem této reakce kyslík, tak tlakové nádoby u tohoto typu zásobníku tepla nejsou potřeba, jelikož jej můžeme vypouštět do okolí. Zpětná reakce (oxidace) pak může být provedena s kyslíkem obsaženým ve vzduchu. Parametry této reakce jsou uvedeny v tabulce 9.

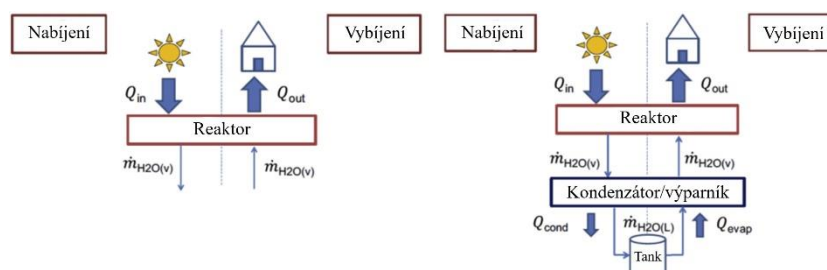
Tabulka 9 Možné chemické reakce využitelné v termochemických zásobnících tepla, jejich teploty nabíjení a vybíjení a energetická hustota. Údaje zde uvedené mají spíše orientační charakter, jelikož závisí na mnoha proměnných (tlak, dosažená přeměna aj.) [31; 34]

Termochemický zásobník	Chemická rovnice	Teplota nabíjení [°C]	Teplota vybíjení [°C]	Energetická hustota [kWh kg ⁻¹]
Amoniakový	(9)	~700	350–550	1,1
Uhlovodíkový	(10)	600–1 000	600–1 000	4,3
Sírový	(12–14)	~500	~1 200	2,5
Hydridový	(16)	300–400	300–400	0,8
Hydroxidový	(18)	400–600	400–600	0,4
Uhličitanový	(20)	~850	~850	0,5
Redukční	(22)	~1 120	~1 120	0,2

5.2 Konstrukce a vlastnosti termochemických zásobníků tepla

Termochemické zásobníky tepla, které se v literatuře často označují jako reaktory, kvůli chemickým reakcím a fyzikálním jevům v nich probíhajících, se dají rozdělit podle toho, zda dochází k vypouštění materiálů působících v reakcích do okolí nebo ne. Podle tohoto kritéria můžeme reaktory rozdělit na [6]:

- Otevřené reaktory
- Uzavřené reaktory



Obrázek 25 Otevřený reaktor (vlevo) a uzavřený reaktor (vpravo); upraveno dle [6]

Otevřené reaktory

Otevřené reaktory, jak jejich název napovídá, jsou takové, ve kterých je produkt reakce/procesu volně vypouštěn do okolí. Produkty jsou nejčastěji voda, ve formě vodní páry, nebo kyslík, jejichž vypouštění nepůsobí ekologické škody, a které se dají snadno získat zpět z okolí. Výhodou těchto reaktorů je to, že není třeba uchovávat žádné natlakované plyny pro opětovné uvolnění tepla. Nevýhodou je však závislost na stavu okolního prostředí (vlhkost vzduchu, nežádoucí látky z okolí aj.). V těchto reaktorech se nejvíce využívá sorpce, kde je většina reakcí spjata s dehydratací sorbentu. [6]

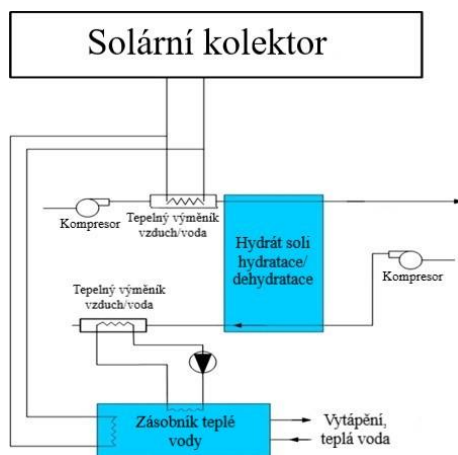
Uzavřené reaktory

Uzavřené reaktory nepracují s žádnou výměnou látky s okolím a celý nabíjecí a vybíjecí cyklus je tak uzavřený. Kvůli uzavřenému systému se však často musí do oběhu zapojit přídatné zařízení jako odparník a kondenzátor, abychom byli schopni skladovat kapaliny podílející se na reakcích v období mezi nabíjením a vybíjením zásobníku. Díky svému konceptu je uzavřený reaktor využitelnější pro většinu reakcí, které, jak již bylo uvedeno, často pracují s toxickými a nebezpečnými chemikáliemi. [6]

5.2.1 Využití

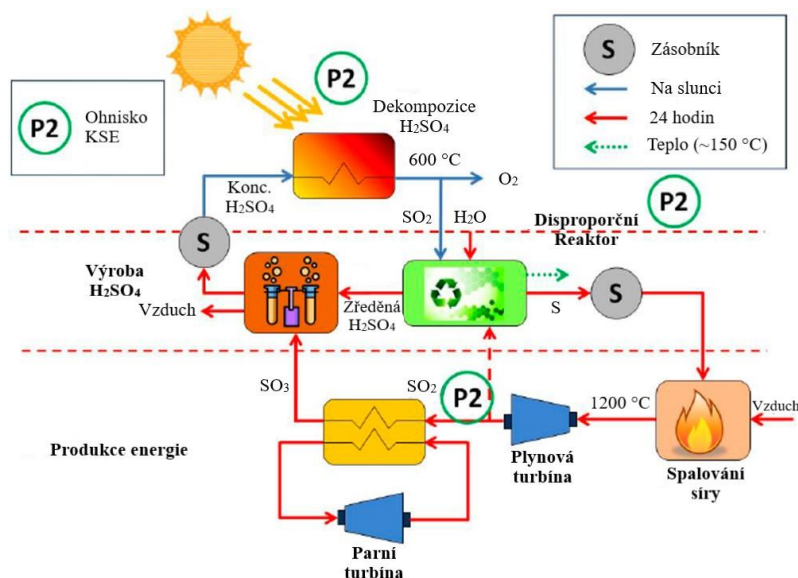
Jak již bylo výše řečeno termochemické zásobníky tepla mohou najít využití jak v oblasti uchovávání energie a vytápění rodinných domů, tak i v oblasti elektrárenské a teplárenské energetiky. V obou případech mohou sloužit jako zásobník tepla na teoreticky neomezenou dobu [31].

V rodinných domech může, podobně jako u ostatních zásobníků tepla, být zdrojem tepla solární kolektor nebo fotovoltaický panel, který termochemický zásobník nabije (například dojde k vysušení zeolitu v otevřeném reaktoru). Následně, když je nedostatek slunečního záření a poptávka po energii roste, se zásobník vybije a ohřeje teplonosnou látku, která podle teploty může být použita k vytápění nebo pro ohřev užitkové vody [30]. Pro aplikace v rodinných domech je nejvhodnější využívat spíše nízkoteplotní reakce, jako například adsorpce nebo chemisorpce, jelikož vysokoteplotní chemická reakce by byla téměř neproveditelná, kvůli nízkým teplotám dosažitelných solárními kolektory. Navíc by, při použití těchto reakcí, hrozil kontakt s toxickými a žíravými látkami, které jsou součástí těchto reakcí. Použití absorpčních reakcí je ze stejného důvodu také omezeno, jelikož je zde často přítomná jiná toxická a žíravá látka (například NaOH).



Obrázek 26 Schéma termochemického zásobníku tepla s otevřeným reaktorem a hydrátem soli coby sorpčním materiálem; upraveno dle [30]

Vysokoteplotní chemické reakce nacházejí využití v energetice, kde se pro jejich uskutečnění může využívat například vysokopotenciálního odpadního tepla. V dostupné literatuře se ovšem nejvíce popisuje jejich využití v koncentračních solárních elektrárnách (KSE), které jsou schopny dosáhnout vysokých teplot, potřebných pro uskutečnění těchto chemických reakcí. Účel těchto zásobníků v KSE je coby krátkodobé uložení tepelné energie, která je následně přeměněna na elektrickou energii v době jejího nedostatku. KSE by tedy sloužilo jako stabilizátor elektrické sítě (podobně jako přečerpávací vodní elektrárny). Pro tento účel se již KSE využívají, ale jako zásobník tepla je použito citelné nebo latentní teplo. Termochemický zásobník nabízí, díky své vysoké energetické hustotě, výrazné snížení velikosti těchto zásobníků, popřípadě výrazné navýšení tepelné kapacity KSE. [31]



Obrázek 27 Schéma termochemického zásobníku tepla s uzavřeným reaktorem, pracujícím s dekompozicí síry (rovnice 12–14), který je zapojený do oběhu KSE; upraveno dle [31]

5.2.2 Výhody a nevýhody

Výhody:

- Vysoká energetická hustota
- Teoreticky neomezená doba uchování tepla
- Vzhledem k mnoha možným reakcím s různými teplotami průběhu mají široké spektrum využití

Nevýhody

- Některé sloučeniny termochemických zásobníků jsou toxické a korozivní
- Většina termochemických zásobníků byla, zatím zhotovena pouze v laboratorním měřítku
- Vysoká cena některých sloučenin
- Některým zásobníkům klesá tepelná kapacita s rostoucím počtem cyklů

5.3 Realizace termochemických zásobníků tepla

Zásobník firmy ZAE Bayern [35]

- Adsorpční termochemický zásobník s otevřeným reaktorem
- Adsorbentem je 14 tun zeolitu 13X
- Nabíjecí teplota je 130 °C
- Teplota vybíjení je 60 °C
- Naměřená energetická hustota 103 kWh m⁻³ nebo 0,167 kWh kg⁻¹
- Celková tepelná kapacita je 2 338 kWh
- Zdrojem tepla je odpadní teplo ze spalovny, které je nákladním autem přepraveno na místo spotřeby



Obrázek 28 Část zásobníku o kapacitě 3 kWh [35]

Projekt SOLAR-STORE [35]

- Chemisorpční termochemický zásobník s uzavřeným reaktorem
- Sorbentem je SrBr₂, který byl dehydrován
- Objem materiálu je 1 m³
- Teplota nabíjení je 66 °C
- Teplota vybíjení je 43 °C
- Naměřena energetická hustota 61,1 kWh m⁻³
- Laboratorní experiment

6 Akumulace energie vytvářením a skladováním vodíku

Využití vodíku jako zásobníku energie se jeví, kvůli jeho vysoké gravimetrické energetické hustotě², jako slibné řešení využitelné v mnoha odvětvích energetiky a automobilismu. Jeden kilogram vodíku má gravimetrickou energetickou hustotu 120 MJ kg⁻¹, což je přibližně třikrát více než je gravimetrická energetická hustota benzínu a jiných uhlovodíkových paliv (40–50 MJ kg⁻¹) [36]. Kromě této vysoké výhřevnosti je třeba dodat to, že při spalování vodíku se do okolí uvolňuje pouze vodní pára. Největším problémem vodíku, bránícím v jeho široké adopci, je velmi nízká molární hmotnost, díky které je jeho objemová energetická hustota také velmi nízká. Konkrétně je tato hustota přibližně 0,01 MJ l⁻¹, při atmosférickém tlaku a teplotě 20 °C, ve srovnání například s litrem benzínu, jehož objemová energetická hustota je 31,7 MJ l⁻¹ [37]. Z tohoto porovnání je ihned vidět jaký problém nízká molární hmotnost vodíku představuje. Aby se nízká objemová energetická hustota vyrovnala je nutné skladovat vodík při velmi vysokých tlacích nebo při velmi nízkých teplotách, kdy dojde ke změně skupenství vodíku, blízcích se absolutní nule [38]. Jako alternativa ke skladování stlačeného a kapalného vodíku se jeví skladování vodíku v „tuhém stavu“ nebo ve formě chemických sloučenin obsahujících vodík. Tato kapitola se bude nejvíce zaměřovat právě na poslední dvě z výše zmíněných metod skladování, protože tyto technologie nabízí často větší objemové energetické hustoty. Navíc je technologie skladování stlačeného a tekutého vodíku již poměrně probádána a v rámci této práce, která se spíše zaměřuje problematiku skladování tepla pro rodinný dům, jsou tyto metody nezajímavé.

Princip skladování energie ve vodíku spočívá v tom, že se čistý elementární vodík v zemské atmosféře vyskytuje pouze v minimálním množství a je většinou vázán v ostatních molekulách a sloučeninách (H₂O, CH₄, NH₃ aj.) [39]. Abychom vodík z těchto sloučenin získali musíme vyložit určité množství energie. Vybrané metody produkce vodíku jsou [40]:

- Termický rozklad metanu (viz rovnice 10)
- Elektrolýza vody
- Vysokoteplotní štěpení páry
- Fermentace

Energii z vodíku můžeme získat zpět buď pomocí jednoduchého spalování, kdy dostáváme energii ve formě tepla, nebo pomocí palivového článku, který využívá vodík pro přímé generování elektrické energie.

6.1 Způsoby skladování vodíku

6.1.1 Stlačený vodík

Skladovací tlaky, využívané u skladování vodíku v plynném stavu, se pohybují v oblasti 70 MPa a výše. Ani při těchto vysokých tlacích, které již vyžadují speciálně vyztužené tlakové nádoby, není však objemová energetická hustota příliš vysoká. Vodík stlačený na tento tlak obsahuje přibližně 4,7 MJ l⁻¹, což ani zdaleka nedosahuje hodnot uhlovodíkových tekutých paliv (31,7 MJ l⁻¹) [36]. Navíc, kvůli malým rozměrům atomu vodíku, je pro něj snadné difundovat do okolí přes stěny tlakové nádoby, což ve výsledku způsobuje úbytek vodíku v nádobě.

²Gravimetrická energetická hustota je míněna energie vztažená na jednotku hmotnosti [J kg⁻¹].

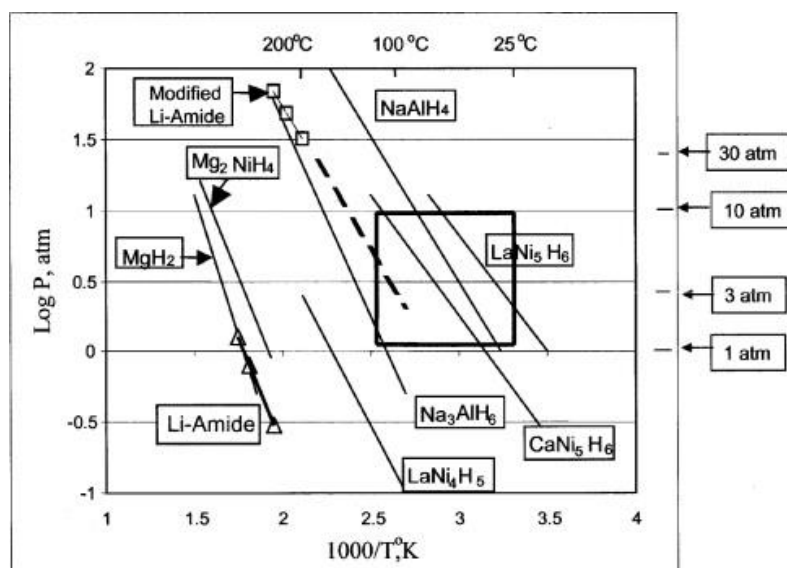
6.1.2 Kapalný vodík

Zkapalnění vodíku probíhá při teplotě -253 °C za normálního tlaku. Toto nám umožňuje dosáhnout vyšší objemové energetické hustoty přibližně $6,4\text{ MJ l}^{-1}$, za cenu vysoké energetické náročnosti zkapalňování vodíku, zaviněnou především nízkou teplotou změny stavu vodíku. Při následném skladování tekutého vodíku se jako velký problém jeví tepelné ztráty nádoby, která se okolní teplotou ohřívá, což způsobuje opětovnou změnu stavu vodíku na plynný. Plynný vodík v nádrži se následně vytrácí vlivem difuze do okolí. Proti tomuto jevu se můžeme bránit podobným způsobem jako u zásobníků citelného tepla, u kterých je, z hlediska tepelných ztrát, nejdůležitější poměr objemu zásobníku k jeho povrchu. [37]

6.1.3 Hydridy kovů

Ačkoliv se dají všechny hydridy kovů považovat za zásobníky vodíku, tak pouze některé z nich nabízí dobrou kombinaci kinetických vlastností (rychlost absorpce/desorpce vodíku), termodynamických vlastností (tepelná vodivost hydridu), chemických vlastností (teplota, při které se vodík absorbuje/desorbuje; množství vodíku v hydridu absorbované), fyzikálních vlastností (hustota hydridu), životnost (počet nabíjecích cyklů) aj [36]. Pro praktické skladování vodíku touto metodou je žádoucí, aby nabíjení a vybíjení vodíku do kovů probíhalo při teplotě blízké pokojové a tlaku atmosférickém. Tento základní parametr omezuje použití většiny hydrátů kovů, jak je vidět na obrázku 29.

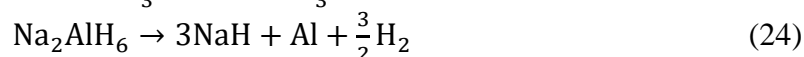
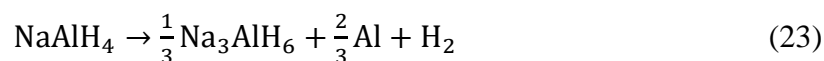
Jelikož je uvolňování vodíků z hydridů kovů exotermický proces (viz kapitola 5) je nutné při nabíjení tohoto typu zásobníků odvádět přebytečné teplo.



Obrázek 29 Rovnovázný graf teploty a tlaku vybraných hydrátů kovů s vyznačenou oblastí materiálů vhodných pro skladování vodíku [36]

NaAlH₄ [7]

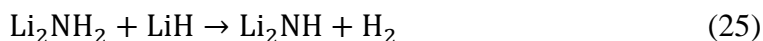
Jeden z materiálů zvaných komplexní hydráty, který dosahuje teoretické gravimetrické kapacity vodíku 5,5 hm.%, která se uvolňuje postupně ve dvou chemických reakcích:



První reakce probíhá za teploty 33 °C a je při ní uvolněno 3,7 hm.% vodíku a druhá probíhá za teploty 110 °C a uvolňuje 1,8 hm.% vodíku.

Li₂NH [7]

Tento hydrid, který sice nespadá do oblasti materiálů s vhodnými parametry uvolňování vodíku (viz obrázek 29), ale dosahuje vyšší gravimetrické kapacity vodíku 6,5 hm.%. Chemická reakce uvolňování vodíku probíhá při teplotě 285 °C a tlaku 1 atm a má chemickou reakci:



6.1.4 Adsorpční uhlíkové materiály

Jak již bylo vysvětleno, adsorpce je proces, při kterém je plyn nebo kapalina vstřebána povrchem pevného adsorbentu. Vazby mezi adsorbátem a adsorbentem zprostředkovávají relativně slabé van der Waalsovy síly nebo vodíkové můstky [32]. Tyto slabé vazby je poté snadné porušit, což má za následek dobrou kinetiku uvolňování vodíku a menší tepelné toky při adsorpci a desorpci vodíku z těchto materiálů [7].

Z uhlíku jsou vytvořeny nanostruktury, jako například nanotrubičky, nebo struktury, kopírující jiné adsorpční materiály (například zeolit). V této oblasti se využívá konceptu zvaného „Chahine rule“ (chahineho pravidlo), podle kterého získáme 1 hm.% adsorbovaného vodíku, za každých 500 m² g⁻¹ plochy adsorbátu. [37]

Simulace ukázaly, že teoretická maximální vodíková kapacita uhlíkových nanotrubiček je téměř 10 hm.% při pokojové teplotě a tlaku 10 MPa. Experiment ukázal kapacitu pouze 2 hm.% při stejných podmínkách, která byla opakovatelná. [37]

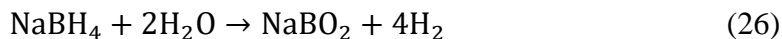
Uhlíkové nanostruktury, kopírující strukturu zeolitu, dosahují vodíkové kapacity 7,3 hm.% při teplotě -193 °C a tlaku 2 MPa. Ačkoliv je dosažená kapacita vodíku zajímavá, tak kvůli příliš nízké teplotě je navýšena energetická náročnost této metody. [37]

6.1.5 Chemicky vázaný vodík

Podobně jako chemické zásobníky tepelné energie probrané v předchozí kapitole, využívá i tato metoda skladování vodíku chemické reakce sloučenin obsahující vodík, při kterých dochází k uvolnění vodíku. Uvolněná energie tedy není tepelná, ale ve formě vodíku. Podmínkou, která určuje vhodnost dané chemické reakce je její reversibilita, čímž je míněno zpětné vytvoření původní chemické sloučeniny s co nejmenší energetickou náročností.

Hydrolyza [7]

Hydrolyza je chemická reakce, při které se využívá vody k rozkladu jiných sloučenin. Jedna ze sloučenin, která podléhá hydrolyznímu rozkladu je tetrahydroboritan sodný, který s vodou reaguje podle následující chemické rovnice:



U hydrolyzy této sloučeniny byla zjištěna gravimetrická kapacita vodíku přibližně 4 hm.% a rychlá kinetika chemické reakce. U této chemické reakce nastává problém při zpětné reakci na tetrahydroboritan sodný (tedy při nabíjení), která má několik stupňů a je zdlouhavá.

Hydrogenace/dehydrogenace uhlovodíků [7]

Dehydrogenace většiny jednoduchých uhlovodíků je endotermická, tedy abychom z uhlovodíku vodík získali musíme teplo reakci dodávat. Jedna z možných dehydrogenačních reakcí, kterou jsme schopni uvolnit 7,3 hm.% při teplotě 210 °C je:



Rozpad amoniaku [37; 7]

Amoniak se endotermickou reakcí při vysoké teplotě rozpadá na vodík a dusík. U amoniaku dochází ke zkapalnění při teplotě $-33,5\text{ °C}$ a v kapalném stavu se dosahuje objemové energetické hustoty vodíku $11,5\text{ MJ l}^{-1}$ s kapacitou vodíku okolo 17,6 hm%. Tato reakce byla již uvedena v předchozí kapitole, jako jedna z možných reakcí vhodných pro termochemické zásobníky tepla (viz rovnice 9).

6.1.6 Výhody a nevýhody

Výhody:

- Vysoká gravimetrická energetická hustota vodíku
- Možnost přímé produkce tepelné i elektrické energie
- Při spalování vodíku se uvolňuje pouze vodní pára
- Mnoho metod výroby a skladování vodíku

Nevýhody:

- Nízká molární hmotnost vodíku a z ní vyplývající nízká objemová energetická hustota vodíku
- Klasické metody skladování plynů (stlačování a zkapalňování) jsou kvůli vysokému tlaku nebo nízké teplotě nepraktické a energeticky náročné
- Malé rozměry atomu vodíku způsobují snadnou difuzi přes stěnu tlakové nádoby
- Jiné, než klasické metody skladování plynu nejsou příliš dobře odzkoušené v praktickém provozu

6.2 Realizace zásobníků vodíku

Horská „off grid“ chata [41]

- Využívá hydridů kovů jako zásobníku
- V zásobníku je uloženo 8 kg vodíku
- Celková energetická kapacita zásobníku je 287 kWh
- V provozu od roku 2018

7 Vzájemné porovnání zpracovaných zásobníků tepla

Toto porovnání bude provedeno s myšlenkou použití a realizace daného zásobníku tepla v rodinném domě (RD), jelikož se další kapitola bude zabývat návrhem právě takového zásobníku. Aplikace v RD nám z porovnání již přímo vyřazuje některé z metod popsanych v této práci, jako například vodíkové zásobníky energie, popsané v předchozí kapitole. Jejich použití v RD není principiálně nemožné, jak je vidět v podkapitole s realizací vodíkového zásobníku, ale technologie výroby, skladování a spotřeby vodíku není tak vyspělá, a tedy je i ekonomicky náročná pro využití v RD, v porovnání s ostatními popsány metodami. Ačkoliv je třeba uvést velký benefit vodíkových zásobníků, kterým je možnost generování jak tepelné, tak i elektrické energie.

Podobným problémem jako vodíkové zásobníky jsou zatíženy i termochemické zásobníky tepla, čímž je myšleno to, že praktických realizací pro RD je pomálu a většina jsou pouze na laboratorní úrovni. Jejich použití je ovšem relativně rozšířené v elektrárenském sektoru, konkrétně v koncentračních solárních elektrárnách, kde slouží jako krátkodobí zásobník tepelné energie. Budoucí rozvoj termochemických zásobníků tepla v oblasti použití RD jim umožní, díky své velmi vysoké energetické hustotě a charakteru skladování tepla, dosáhnout i sezónní akumulace tepla při zachování nízkých rozměrů zásobníku. Tímto se výrazně odlišují od zásobníků citelného tepla, potřebujících pro dosažení sezónní akumulace velkých rozměrů, aby překonali tepelné ztráty, které termochemické zásobníky nijak nezatažují.

O PCM zásobnících tepla se dá říct, že svojí funkcionalitou spadají mezi termochemické zásobníky tepla a zásobníky citelného tepla. Tím je myšleno to, že se hodnota jejich měrné tepelné kapacity obecně nachází mezi hodnotami zásobníků citelného tepla a termochemických zásobníků. Navíc, na rozdíl od termochemických zásobníků, odpadá starost o správný průběh chemické reakce, což je nutné pro účinnou akumulaci a uvolňování tepla. Na druhou stranu jsou zatíženy stejnými tepelnými ztrátami jako zásobníky citelného tepla, i když provozní teplota PCM zásobníku může být mnohem menší než u zásobníku citelného tepla, což má příznivý vliv na snížení tepelných ztrát. Využití PCM v RD a jiných obytných prostorách je již relativně rozšířené a nejčastěji se využívají jako doplněk k podlahovému vytápění nebo izolaci, tedy zde slouží především pro stabilizaci teploty v místnosti. PCM zásobníky, složené z velké masy materiálu (viz obrázek 22 a 23), které jsou určeny pro skladování tepla nejsou příliš rozšířené. Hojně využívané jsou však PCM zásobníky navržené pro změnu skupenství za nízké teploty, využívané jako doplněk ke klimatizaci v oblastech s vysokou roční teplotou.

Pískový zásobník, který díky své vysoké dosažitelné teplotě disponuje velkou tepelnou kapacitou i při relativně malých rozměrech, bude muset být také vyřazen z možných kandidátů na tepelný zásobník RD, jelikož právě kvůli vysoké teplotě by docházelo k velkým tepelným ztrátám. Menší rozměry zásobníku, které by byli teoreticky dostačující pro potřeby rodinného domu, sice tepelné ztráty omezují (menší plocha zásobníku), ale také snižují poměr objem-povrch zásobníku, což má negativní vliv na tepelnou ekonomiku zásobníku. Pískové zásobníky jsou tedy určeny především pro aplikace vyžadující velké tepelné výkony, z čehož plynou i velké rozměry zásobníku. Jako aplikace splňující toto kritérium se nabízí zapojení zásobníku do centrálního vytápění, zdroj tepla velkých průmyslových budov nebo použití zásobníku jako tzv. Carnotovu baterii, kde se uložená tepelná energie přeměňuje na elektrickou energii. Použití v RD by bylo realizovatelné pouze při nižších provozních teplotách, aby vyrovnali tepelné ztráty. Konstrukce pískového zásobníku má však výhodu v tom, že jeho zdrojem tepla jsou odporové ohřívače poháněné elektřinou z fotovoltaických panelů, tedy

je celá akumulací část systému propojena pouze elektrickými kabely namísto rozvodů vody, které jsou potřebné u solárních kolektorů.

Jako posledním možným typem zásobníku pro RD tedy zůstávají zemní zásobníky tepla, které jsou, na rozdíl od ostatních zásobníků tepla zde popsaných, již dlouhodobě odzkoušené a principiálně jednoduché. Navíc není nutné dovážet dodatečný akumulací materiál při konstrukci zásobníku, jako je tomu například u pískového zásobníku nebo PCM zásobníku. Podle konkrétního typu zemního zásobníku, pak ani realizační náklady nebo výkopové práce nemusí být příliš zatěžující. Společnými rysy většiny těchto zemních zásobníků je jejich zdroj tepla, kterým je nejčastěji solární kolektor a jejich kooperace s tepelným čerpadlem, čímž se dosahuje jeho lepšího topného faktoru. Nevýhodou zemních zásobníků je však jejich závislost na hydrogeologických podmínkách lokality daného RD. Jedná se především o zásobníky aquifer, které bez vhodné struktury půdy nelze zhotovit, ale v podstatě všechny typy zemních zásobníků jsou omezeny hloubkou a prouděním spodní vody. Jediný zemní zásobník, který tímto není omezen je vodní nádrž, která je od okolí oddělena a izolována. Vodní nádrž škálována na RD sice není schopna sezónní akumulace tepla, ale je efektivní a praktická pro krátkodobé skladování tepla. Kvůli těmto důvodům bude v rámci této práce navržena právě takováto vodní nádrž.

8 Návrh zásobníku tepla

Předpoklad pro návrh vodního zásobníku je ten, že musí zásobovat teplem RD po dobu 14 dnů, maximální teplota v zásobníku bude 75 °C, venkovní teplota bude brána jako konstantní a to 13 °C (začátek otopného období, 1. září) [42], tepelná spotřeba domu je 50 W m⁻² (což odpovídá zateplené novostavbě) [43] a vytápěná plocha RD je 130 m². Vodní nádrž bude zakopána pod zemí, kvůli předpokládaným velkým rozměrům a zamezení vnějších tepelných ztrát konvekcí prouděním vzduchu. Zároveň budou zavedeny následující zjednodušení: fyzikální charakteristiky vody (hustota, dynamická viskozita, tepelná roztažnost aj.) jsou brány jako konstantní, voda bude brána jako čistá a bez nemrznoucích příměsí, odběr tepla ze zásobníku je každý den stejný, do zásobníku nebude aktivně přiváděno teplo v průběhu odběru, teplota vody v zásobníku bude v daném okamžiku všude stejná, tepelný tok stěnou nádrže bude určen jako tepelný tok nekonečně velkou rovinnou a při přílišném poklesu teploty v zásobníku bude automaticky do systému připojeno čerpadlo, zajišťující stálý přívod tepla do RD. Poslední velké zjednodušení, které bude zavedeno je při výpočtu součinitele přestupu tepla přirozenou konvekcí v nádrži. Zde bude předpokládáno, že je jeho hodnota konstantní a dána parametry ukázanými dále ve výpočtu.

Vstupní parametry

- Tepelná spotřeba domu: $q_D = 50 \text{ W m}^{-2}$
- Maximální teplota vody v zásobníku: $t_{\max} = 75 \text{ °C}$
- Teplota okolí zásobníku: $t_{\text{out}} = 13 \text{ °C}$
- Vytápěná plocha RD: $S_D = 130 \text{ m}^2$
- Doba vytápění domu: $\tau = 14 \text{ d} = 336 \text{ h}$
- Objemová tepelná kapacita vody: $c_V = 1167 \text{ Wh m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
- Hustota vody: $\rho_v = 1000 \text{ kg m}^{-3}$
- Objemová roztažnost vody: $\beta_v = 0,19 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
- Součinitel tepelné vodivosti vody: $\lambda_v = 0,6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Dynamická viskozita vody: $\eta_v = 0,00102 \text{ Pa s}$

Parametry zásobníku

Celkový tepelný tok RD:

$$\dot{Q}_D = q_D \cdot S_D \quad (28)$$

$$\dot{Q}_D = 6,5 \text{ kW}$$

Tepelná kapacita zásobníku:

$$Q_z = \dot{Q}_D \cdot \tau \quad (29)$$

$$Q_z = 2184 \text{ kWh}$$

Objem zásobníku:

$$V_z = \frac{Q_z}{c_v \cdot (t_{\max} - t_{\text{out}})} \quad (30)$$

$$V_z = 30,2 \text{ m}^3$$

Je zvolen zásobník tvaru kvádrů s rozměry v poměru 1,5:2:3.

- Délka $d = 4,5 \text{ m}$
- Šířka $s = 3 \text{ m}$
- Hloubka $h = 2,25 \text{ m}$

Povrch zásobníku:

$$S_z = 2 \cdot (d \cdot s + d \cdot h + s \cdot h) \quad (31)$$

$$S_z = 60,5 \text{ m}^2$$

Tepelný odpor stěny nádrže

Grashofovo číslo:

$$Gr = \frac{g \cdot h^3 \cdot \rho_v^2 \cdot \beta_v \cdot \Delta t_s}{\eta_v^2} \quad (32)$$

$$Gr = 2,028 \cdot 10^{11}$$

Rozdíl teplot mezi stěnou nádrže a teplotou vody v nádrži je brán jako konstantních 10 °C.

Prandtlovo číslo bude bráno jako konstanta pro teplotu vody 50 °C [42].

$$Pr(50 \text{ °C}) = 4,125$$

Nussaltovo číslo:

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (33)$$

$$Nu = 1\,272,0$$

Konstanty C a n jsou určeny velikostí součinu Grashofova a Prandtlova čísla a nabývají hodnot:

$$C = 0,135$$

$$n = 0,33$$

Součinitel přestupu tepla:

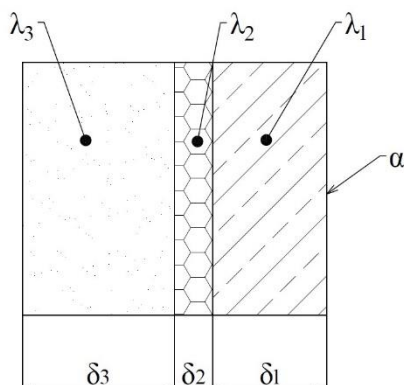
$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{h} \quad (34)$$

$$\alpha = 339,9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Stěna zásobníku se bude skládat z několika vrstev počínaje vnitřní betonovou částí o dostatečné tloušťce, aby nedošlo k průsaku vody. Tato vrstva musí mít podle normy alespoň 50 mm [44]. Následuje vrstva extrudovaného polystyrenu, použitého pro zachování svých vlastností i ve vlhkém prostředí. Okolí se následně zasype vrstvou písku, který bude považován za mokrý. Stejná stěna bude uvažována na všech 6 stranách zásobníku. Parametry stěny jsou vypsány v tabulce 10 a schéma stěny je zobrazeno na obrázku 30.

Tabulka 10 Složení a parametry stěny vodní nádrže. [19; 45]

	Součinitel tepelné vodivosti λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Tloušťka vrstvy δ [m]
Beton	1,3	0,15
Extrudovaný polystyren	0,033	0,05
Mokrý písek	0,7	0,2



Obrázek 30 Schéma stěny zásobníku (zleva: mokrý písek, extrudovaný polystyren a beton)

Tepelný odpor stěny zásobníku:

$$R_z = \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \quad (35)$$

$$R_z = 1,92 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$$

Spotřeba tepla zásobníku

Tepelný tok stěnou zásobníku:

$$\dot{Q}_z = \frac{S_z \cdot (t_i - t_{\text{out}})}{R_z} \quad (36)$$

Teplo zásobníku ztracené za den:

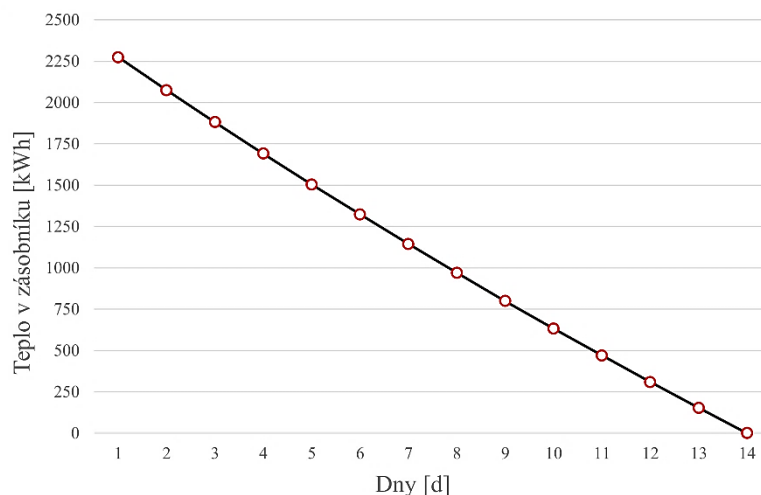
$$Q_z = \dot{Q}_z \cdot 24 \quad (37)$$

Teplota v zásobníku po odběru tepla RD a ztrátami stěnou:

$$t_i = \frac{-(Q_z + \frac{Q}{14})}{V_z \cdot c_V} + t_{i-1} \quad (38)$$

Tabulka 11 Tepelné ztráty, teploty, zbývající energie a ztracené teplo zásobníku v průběhu čtrnácti dnů.

Den	Tepelná ztráta v daný den [W]	Teplota v zásobníku daný den [°C]	Zbývající tepelná energie v zásobníku [kWh]	Teplo ztracené daný den [kWh]
1	1 954,35	75,0	2 273,3	46,9
2	1 772,78	69,2	2 074,8	42,5
3	1 595,11	63,6	1 880,5	38,3
4	1 421,26	58,1	1 690,4	34,1
5	1 251,14	52,7	1 504,4	30,0
6	1 084,67	47,4	1 322,3	26,0
7	921,78	42,2	1 144,2	22,1
8	762,39	37,2	969,9	18,3
9	606,42	32,2	799,4	14,6
10	453,80	27,4	632,5	10,9
11	304,46	22,7	469,2	7,3
12	158,32	18,0	309,4	3,8
13	15,32	13,5	153,0	0,4
14	-124,60	9,0	0,0	-3,0
			Celkové ztracené teplo Q_{zc} [kWh]	292,3



Obrázek 31 Graf množství tepla v zásobníku v průběhu čtrnácti dnů

Jak je vidět v tabulce 11, tak v průběhu čtrnácti dnů klesne teplota v zásobníku až pod teplotu okolí, a tedy mají tepelné ztráty zásobníku poslední den záporné hodnoty. Aby se tepelné ztráty zásobníku pokryly je třeba navýšit tepelnou kapacitu zásobníku o celkové množství tepla ze zásobníku ztracené, čímž dojde i k navýšení rozměrů zásobníku.

Celková kapacita tepelného zásobníku:

$$Q_c = Q_D + Q_{zc} \quad (39)$$

$$Q_c = 2\,476,3 \text{ kWh}$$

Navýšené rozměry zásobníku

Navýšený objem zásobníku:

$$V_z' = \frac{Q_c}{c_v \cdot (t_{\max} - t_{\text{out}})} \quad (40)$$

$$V_z' = 34,2 \text{ m}^3$$

Poměr stran zásobníku zůstává stejný.

- Délka $d' = 4,7 \text{ m}$
- Šířka $s' = 3,1 \text{ m}$
- Hloubka $h' = 2,3 \text{ m}$

Navýšený povrch zásobníku:

$$S_z' = 2 \cdot (d' \cdot s' + d' \cdot h' + s' \cdot h') \quad (41)$$

$$S_z' = 65,8 \text{ m}^2$$

Jelikož se spolu s objemem zásobníku navýšil i jeho povrch budou i tepelné ztráty vyšší, jelikož je ale nárůst plochy relativně malý bude předpokládán zanedbatelný nárůst tepelného toku stěnami zásobníku.

9 Závěr

Zásobníky tepelné energie, které byly v této práci popsány, nabízí zajímavý, účinný a často inovativní způsob uchovávání energie, a to ne pouze té tepelné. S jejich pomocí je schopen jak jedinec (RD), tak i větší obytný nebo průmyslový komplex snížit své náklady na vytápění a také na klimatizování vnitřních prostor. Zaměření této práce bylo od těch principiálně nejjednodušších, skladující nízkopotenciální i vysokopotenciální teplo, až po zásobníky, jejichž skladovací schopnosti přesahují rámec skladování pouhé tepelné energie (skladování vodíku).

Jako nejvhodnější tepelný zásobník pro univerzální použití v RD byl určen zemní zásobník typu vodní nádrž, jelikož pro jeho realizaci není nutné splnění svazujících hydrogeologických podmínek, jako u ostatních zemních zásobníků tepla. Navíc se, na rozdíl od jiných typů zásobníků tepla, jedná o odzkoušenou metodu akumulace tepla. Pro tento důvod byl právě vodní zásobník tepla vybrán ke zjednodušenému návrhu tepelného zásobníku RD.

Ačkoliv má vodní zásobník řadu výhod tak je u něj značně omezena dlouhodobá nebo sezónní akumulace tepla. Tímto problémem je zatížena většina tepelných zásobníků, které úplné sezónní akumulace (z léta do zimy) často nejsou vůbec schopny dosáhnout. Jediný tepelný zásobník, schopný teoreticky neomezené doby skladování tepla, je termochemický zásobník, u kterého je doba skladování podmíněna pouze kvalitou skladování jednotlivých složek chemických reakcí. Technologie termochemických zásobníků je však poměrně nevyspělá a většina jich je pouze na laboratorní úrovni.

Při návrhu vodní nádrže bylo zjištěno, že pro vytápění dobře zatepleného RD po dobu čtrnácti dnů je, při uvažování tepelných ztrát, zapotřebí kvádřová nádrž s objemem 34,2 m³. Po této době dojde k poklesu teploty vody z původních 75 °C až na 9 °C, což je v našem případě teplota nižší než teplota v okolí.

Seznam použitých zdrojů

- [1] SCHULZ, Heinz a Dorota CHWIEDUK. *Teplo ze slunce a země: energeticky úsporné topné systémy s podzemními zásobníky tepla, slunečními absorbéry a tepelnými čerpadly*. 1. české vyd. Ostrava: HEL, 1999, 132 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-86167-09-7.
- [2] LEHMANN, Christoph, Steffen BECKERT, Thomas NONNEN, Roger GLÄSER, Olaf KOLDITZ a Thomas NAGEL. Water loading lift and heat storage density prediction of adsorption heat storage systems using Dubinin-Polanyi theory—Comparison with experimental results. *Applied energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2017, **207**, 274-282 [cit. 2023-02-28]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2017.07.008
- [3] QUASCHNING, Volker a Václav BARTOŠ. *Obnovitelné zdroje energií*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 296 s. : il., mapy. ISBN 978-80-247-3250-3.
- [4] 'Sand battery' keeps Finnish town warm during the dark, cold winters. *American Ceramic Society. American Ceramic Society Bulletin* [online]. Columbus: American Ceramic Society, 2022, **101**(6), 4 [cit. 2023-02-28]. ISSN 0002-7812. Dostupné z: <https://search-ebSCOhost-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=158174223&lang=cs&site=ehost-live>
- [5] RAMMELBERG, Holger, Thomas OSTERLAND, Boris PRIEHS, Oliver OPEL a Wolfgang RUCK. Thermochemical heat storage materials – Performance of mixed salt hydrates. *Solar energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2016, **136**(136), 571-589 [cit. 2023-02-28]. ISSN 0038-092X. Dostupné z: doi:10.1016/j.solener.2016.07.016
- [6] CABEZA, Luisa, Aran SOLÉ a Camila BARRENECHE. Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage. *Renewable energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2017, **110**, 3-39 [cit. 2023-04-30]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2016.09.059
- [7] SATYAPAL, Sunita, John PETROVIC, Carole READ, George THOMAS a Grace ORDAZ. The U.S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements. *Catalysis today* [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2007, **120**(3), 246-256 [cit. 2023-05-05]. ISSN 0920-5861. Dostupné z: doi:10.1016/j.cattod.2006.09.022
- [8] KNY, Martin a Miroslav URBAN. *Vodní zásobníky pro dlouhodobou akumulaci tepla*. 2014. Dostupné také z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11358-vodni-zasobniky-pro-dlouhodobou-akumulaci-tepla>
- [9] ABUASBEH, Mohammad, José ACUÑA, Alberto LAZZAROTTO a Björn PALM. Long term performance monitoring and KPIs' evaluation of Aquifer Thermal Energy Storage system in Esker formation: Case study in Stockholm. *Geothermics* [online]. Oxford: Elsevier Ltd, 2021, **96**, 102166 [cit. 2023-04-28]. ISSN 0375-6505. Dostupné z: doi:10.1016/j.geothermics.2021.102166

- [10] Horninové zásobníky tepelné energie. In: *Enviweb* [online]. 2011 [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://www.enviweb.cz/85531>
- [11] *Fbiweb.vsb* [online]. [cit. 2023-04-06]. Dostupné z: <https://fbiweb.vsb.cz/safeteach/images/pdf/Lekce2NerostneSuroviny.pdf>
- [12] TODOROV, Oleg, Kari ALANNE, Markku VIRTANEN a Risto KOSONEN. A novel data management methodology and case study for monitoring and performance analysis of large-scale ground source heat pump (Gshp) and borehole thermal energy storage (btes) system. *Energies (Basel)* [online]. MDPI AG, 2021, **14**(6), 1523 [cit. 2023-05-18]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14061523
- [13] PETRILLO, Alan. HEATING BUILDINGS WITH SOLAR ENERGY STORED IN SAND. *NASA tech briefs (Washington, D.C. 1976)* [online]. New York: Associated Business Publications, 2022, **46**(10), 18-21 [cit. 2023-02-14]. ISSN 0145-319X. Dostupné z: <https://www.proquest.com/trade-journals/heating-buildings-with-solar-energy-stored-sand/docview/2731223440/se-2?accountid=17115>
- [14] *Polar night energy* [online]. Finsko, 2022 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://polarnightenergy.fi/>
- [15] CATALDO, Zac a Jesse CATALDO. *Dirt Simple Energy Storage | In Depth: Z kanálu: Now You Know* [online]. In: . [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=tm7spMG0ch8&t=2s>
- [16] *Vatajankoski: Hiekka-akku* [online]. Finsko, 2023 [cit. 2023-04-19]. Dostupné z: <https://www.vatajankoski.fi/innovaatiot/hiekka-akku/>
- [17] DIAGO, Miguel, Alberto INIESTA, Audrey SOUM-GLAUDE a Nicolas CALVET. Characterization of desert sand to be used as a high-temperature thermal energy storage medium in particle solar receiver technology. *Applied energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2018, **216**(206), 402-413 [cit. 2023-04-12]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.106
- [18] Sand. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sand>
- [19] JÍCHA, Miroslav. *Přenos tepla a látky*. 1. vyd. Brno: CERM, 2001, 160 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [20] PURTILL, James. World's first 'sand battery' can store heat at 500C for months at a time. Could it work in Australia?. *ABC science*. 2022.
- [21] KETONEN, Petra. Uusiutuvan energian varastointiin kehitetään uusia konsteja – tamperelaisyrittys tähtää maailmalle menetelmällä, jossa ylijäämäsiähkön energia säilötään hiekkaan. *Uusiutuvat energialähteet*. 2021.
- [22] *PCM Products* [online]. Unit 32 Mere View Industrial Estate, Yaxley, Peterborough, Cambridgeshire, PE7 3HS [cit. 2023-04-26]. Dostupné z: <https://www.pcmproducts.net/>
- [23] Phase-change material. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase-change_material

- [24] EANEST JEBASINGH, B. a A. VALAN ARASU. A detailed review on heat transfer rate, supercooling, thermal stability and reliability of nanoparticle dispersed organic phase change material for low-temperature applications. *Materials today energy* [online]. Elsevier Ltd, 2020, **16**, 100408 [cit. 2023-04-26]. ISSN 2468-6069. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtener.2020.100408
- [25] ZONDAG, H.A., R. DE BOER, S.F. SMEDING a J. VAN DER KAMP. Development of industrial PCM heat storage lab prototype. *Energy Procedia* [online]. 2017, **135**, 115-125 [cit. 2023-04-26]. ISSN 1876-6102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2017.09.495
- [26] BELLAN, Selvan, Tanvir ALAM, José GONZÁLEZ-AGUILAR, Manuel ROMERO, Muhammad RAHMAN, D.Yogi GOSWAMI a Elias STEFANAKOS. Numerical and experimental studies on heat transfer characteristics of thermal energy storage system packed with molten salt PCM capsules. *Applied thermal engineering* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2015, **90**, 970-979 [cit. 2023-04-27]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.07.056
- [27] KISHORE, Ravi, Marcus BIANCHI, Chuck BOOTEN, Judith VIDAL a Roderick JACKSON. Enhancing building energy performance by effectively using phase change material and dynamic insulation in walls. *Applied energy* [online]. Elsevier Ltd, 2021, **283**, 116306 [cit. 2023-04-27]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.116306
- [28] KUSAMA, Yuka a Yuji ISHIDOYA. Thermal effects of a novel phase change material (PCM) plaster under different insulation and heating scenarios. *Energy and buildings* [online]. LAUSANNE: Elsevier B.V, 2017, **141**, 226-237 [cit. 2023-04-27]. ISSN 0378-7788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2017.02.033
- [29] BENTIVOGLIO, Fabrice, Sylvie ROUGE, Olivier SORIANO a Ana TEMPASS DE SOUSA. Design and operation of a 180 kWh PCM heat storage at the Flaubert substation of the Grenoble urban heating network. *Applied thermal engineering* [online]. Oxford: Elsevier Ltd, 2021, **185**, 116402 [cit. 2023-02-28]. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116402
- [30] ZONDAG, Herbert, Benjamin KIKKERT, Simon SMEDING, Robert BOER a Marco BAKKER. Prototype thermochemical heat storage with open reactor system. *Applied energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2013, **109**, 360-365 [cit. 2023-04-28]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2013.01.082
- [31] CARRILLO, Alfonso, José GONZÁLEZ-AGUILAR, Manuel ROMERO a Juan CORONADO. Solar Energy on Demand: A Review on High Temperature Thermochemical Heat Storage Systems and Materials. *Chemical reviews* [online]. WASHINGTON: American Chemical Society, 2019, **119**(7), 4777-4816 [cit. 2023-04-30]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.8b00315
- [32] TATSIDJODOUNG, Parfait, Nolwenn LE PIERRÈS a Lingai LUO. A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2013, **18**, 327-349 [cit. 2023-04-30]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2012.10.025

- [33] *Snowpeak* [online]. Shangjie, Zhengzhou, Henan, c2010-2023 [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.cnsnowmountain.com/>
- [34] PARDO, P., A. DEYDIER, Z. ANXIONNAZ-MINVIELLE, S. ROUGÉ, M. CABASSUD a P. COGNET. A review on high temperature thermochemical heat energy storage. *Renewable & sustainable energy reviews* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2014, **32**, 591-610 [cit. 2023-05-01]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.12.014
- [35] SCAPINO, Luca, Herbert ZONDAG, Johan VAN BAEL, Jan DIRIKEN a Camilo RINDT. Sorption heat storage for long-term low-temperature applications: A review on the advancements at material and prototype scale. *Applied energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2017, **190**, 920-948 [cit. 2023-05-01]. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.148
- [36] MCWHORTER, Scott, Carole READ, Grace ORDAZ a Ned STETSON. Materials-based hydrogen storage: Attributes for near-term, early market PEM fuel cells. *Current opinion in solid state & materials science* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2011, **15**(2), 29-38 [cit. 2023-05-04]. ISSN 1359-0286. Dostupné z: doi:10.1016/j.cossms.2011.02.001
- [37] RIVARD, Etienne, Michel TRUDEAU a Karim ZAGHIB. Hydrogen storage for mobility: A review. *Materials* [online]. BASEL: Mdpi, 2019, **12**(12), 1973 [cit. 2023-05-03]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12121973
- [38] RUSMAN, N.A.A. a M. DAHARI. A review on the current progress of metal hydrides material for solid-state hydrogen storage applications. *International journal of hydrogen energy* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2016, **41**(28), 12108-12126 [cit. 2023-03-07]. ISSN 0360-3199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2016.05.244
- [39] Vodík. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vod%C3%ADk#V%C3%BDskyt_v_p%C5%99%C3%ADrod%C4%9B
- [40] *ENERGY* [online]. 1000 Independence Ave. SW Washington DC 20585 [cit. 2023-05-03]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/>
- [41] *GKN hydrogen* [online]. GKN Hydrogen GmbH Pennefeldsweg 11-15 53177 Bonn, 2022 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://www.gknhydrogen.com/>
- [42] *Tzbinfo* [online]. Praha: Copyright Topinfo, c2001-2023 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/>
- [43] *TopíteLevně* [online]. Česká Skalice: ATM PROFI, 2023 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.topitelevne.cz/>
- [44] HLAVSA, Zdeněk. *Beton pro vodonepropustné betonové konstrukce*. Praha, 2020. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Jan L. Vítek CSc., FEMg.
- [45] *IZOMAT stavebniny* [online]. Praha: IZOMAT stavebniny, 2023 [cit. 2023-05-17]. Dostupné z: <https://www.izomat.cz/>

- [46] PENG, Guangjian, Guijing DOU, Yahao HU, Yiheng SUN a Zhitong CHEN. Phase Change Material (PCM) Microcapsules for Thermal Energy Storage. *Advances in polymer technology* [online]. London: Hindawi, 2020, **2020**, 1-20 [cit. 2023-04-27]. ISSN 0730-6679. Dostupné z: doi:10.1155/2020/9490873
- [47] ZBAIR, Mohamed a Simona BENNICI. Survey summary on salts hydrates and composites used in thermochemical sorption heat storage: A review. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI AG, 2021, **14**(11), 3105 [cit. 2023-04-30]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14113105

Seznam použitých zkratk a symbolů

PCM	phase change material
RD	rodinný dům
HT	hlubokoteplotní
NT	nízkoteplotní
ST	středněteplotní
VT	vysokoteplotní
PNE	polar night energy
M	metal (kov)
\dot{Q}	tepelný tok [W]
Q	tepelná energie [J]
S	plocha [m ²]
ΔT	rozdíl teplot [K]
R	tepelný odpor [m ² K W ⁻¹]
V	objem [m ³]
c_V	objemová tepelná kapacita [J m ⁻³ K ⁻¹]
λ	součinitel tepelné vodivosti [W m ⁻¹ K ⁻¹]
ρ	hustota [kg m ⁻³]
X	dosažená přeměna v reakci [%]
n_B	počet molů produktu [mol]
ΔH_r	molární reakční entalpie [J]
q_D	tepelná spotřeba domu [W m ⁻²]
t_{\max}	maximální teplota v zásobníku [°C]
t_{out}	teplota okolí [°C]
S_D	půdorysná plocha domu [m ²]
τ	doba uchovávání tepla [hod]
ρ_v	hustota vody [kg m ⁻³]
β_v	objemová roztažnost vody [K ⁻¹]
λ_v	součinitel tepelné vodivosti vody [W m ⁻¹ K ⁻¹]
η_v	dynamická viskozita vody [Pa s]
\dot{Q}_D	celkový tepelný tok RD [W]
Q_z	tepelná kapacita zásobníku [J]
V_z	objem zásobníku [m ³]
d	délka stěny zásobníku [m]
s	šířka stěny zásobníku [m]
h	hloubka stěny zásobníku [m]
S_z	plocha stěny zásobníku [m ²]
Gr	Grashofovo číslo [-]
g	gravitační zrychlení [m s ⁻²]
Δt_s	rozdíl teplot mezi stěnou zásobníku a teplotou vody v něm
Pr	Prandtlůva číslo
Nu	Nussaltovo číslo
C	konstanta
n	konstanta
α	součinitel přestupu tepla [W m ⁻² K ⁻¹]
δ	tloušťka vrstvy stěny [m]
R_z	tepelný odpor stěny zásobníku [m ² K W ⁻¹]
\dot{Q}_z	tepelný tok stěnou zásobníku [W]
t_i	mění se teplota v zásobníku [°C]

Q_{zc}	celková ztracená tepelná energie ze zásobníku [J]
Q_c	celková tepelná energie zásobníku [J]
V_z'	navýšený objem zásobníku [m ³]
d'	navýšená délka zásobníku [m]
s'	navýšená šířka zásobníku [m]
h'	navýšená hloubka zásobníku [m]
S_z'	navýšená plocha zásobníku [m]