

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÍZKOTEPLTNÍ AKUMULACE TEPLA

LOW-TEMPERATURE HEAT STORAGE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dmytro Kavunov

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

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

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

Nízkoteplotní akumulace tepla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku nízkoteplotní dlouhodobé akumulace tepla využitelné pro vytápění budov. V rámci řešení bude zpracován přehled možných způsobů nízkoteplotní akumulace (bazén, hliníkový zásobník, drcený kámen, beton, základy, stěny) a uvedeny vybrané pilotní realizace. Následně bude pro konkrétní zadání navržen vhodný nízkoteplotní zásobník a provedeny související bilanční výpočty jeho kapacity a teplotních průběhů. Nabíjení zásobníku bude spojeno se zajišťováním chladu v objektu v průběhu letního období.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat stručnou rešerši k problematice nízkoteplotní akumulace tepla.
2. Představit dohledatelné realizované projekty (studie) využívající nízkoteplotní akumulaci tepla.
3. Pro zadané parametry navrhnout nízkoteplotní akumulátor tepla pro dlouhodobou akumulaci, představit režimy nabíjení a vybíjení.
4. Vytvořit výpočtový model popisující nabíjení a vybíjení akumulátoru v čase a využít jeho výsledky pro test provozních parametrů a bilanční zhodnocení návrhu.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

REZAI, B. a ROSEN A., District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. Applied Energy. 93, 2-10. 2012. ISSN 03062619.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá nízkoteplotní akumulací tepla využitelnou pro vytápění budov. V teoretické části je zpracována stručná rešerše k problematice nízkoteplotní akumulace tepla. Dále práce představuje realizované projekty využívající nízkoteplotní akumulaci tepla. V praktické části je navržen vhodný nízkoteplotní zásobník a jsou provedeny související bilanční výpočty jeho kapacity a teplotních průběhu. Součástí je vytvoření modelu popisujícího nabíjení a vybíjení akumulátoru v čase a využití jeho výsledků pro test provozních parametrů.

Klíčová slova

Nízkoteplotní akumulace tepla, vytápění, zásobník, nabíjení, vybíjení

ABSTRACT

This diploma thesis deals with a low-temperature heat storage used for heating buildings. The theoretical part deals with a brief research on the issue of a low-temperature heat storage. Furthermore, the work presents implemented projects using a low-temperature heat storage. In the practical part, a suitable low-temperature storage is designed, related balance calculations of its capacity and temperature profiles are performed. This part includes the creation of a model which describes the charging and discharging of the storage over time and the use of its results to test operating parameters.

Key words

Low-temperature heat storage, heating, storage, charging, discharging

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KAVUNOV, Dmytro. *Nízkoteplotní akumulace tepla* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/137020>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Nízkoteplotní akumulace tepla** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

15.05.2022

.....
Datum

Dmytro Kavunov

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Děkuji členům moje rodiny, za podporu během studia.

Obsah

ÚVOD.....	11
1 Nízkoteplotní akumulace tepla	12
1.1 Rozdělení akumulace tepelné energie.....	12
2 Nízkoteplotní akumulace tepla pro systémy dálkového vytápění	14
2.1 Výhody využití nízkoteplotního dálkového vytápění	14
2.2 Akumulace tepelné energie latentním teplem.....	15
2.3 Termochemická akumulace	15
2.4 Tepelný akumulátor vodonosné vrstvy – ATES.....	16
2.5 Solární bazén.....	17
2.6 Akumulace tepla v stěnách	18
2.7 Akumulace tepla v horninovém materiálu – RBTS.....	19
2.8 Jamové zásobníky	20
2.9 Využití geotermální energie – energetické piloty.....	22
2.10 Horninový akumulátor tepla – Borehole thermal energy storage (BTES)	25
2.11 Využití horninových zásobníků v kombinaci s tepelnými čerpadly.....	27
3 Realizační návrh	34
3.1 Rodinný dům.....	34
4 Výpočty	35
4.1 Popis objektu.....	35
4.1.1 Výpočet tepelné ztráty prostupem tepla.....	36
4.1.2 Výpočet tepelné ztráty větráním	39
4.1.3 Výpočet potřeby tepla na vytápění a ohřev TUV.....	40
4.2 Výpočet potřebného výkonu tepelného čerpadla a délky zemního vrtu	41
4.3 Výpočet tepelných parametrů vrtu.....	44
4.3.1 Výpočtové parametry	44
4.3.2 Výpočet součinitele přestupu tepla	45
4.3.3 Výpočet tepelného odporu vrtu.....	46
4.3.4 Výpočet tepelných odporů zeminy.....	49
5 Výpočtový návrh akumulátoru tepelné energie.....	52
5.1 Tepelná bilance	52
5.2 Režim nabíjení	54
5.3 Režim vybíjení.....	59
6 Test provozních parametrů tepelného akumulátoru	63
6.1 Změna součinitele tepelné vodivosti.....	63
6.2 Změna teploty vody	64
6.3 Zvýšení délky vrtu	65
6.4 Snížení potřeby tepla o 50%.....	66
6.5 Zvýšení potřeby tepla o 50%.....	66
6.6 Odběr tepla bez předchozího nabíjení.....	67
ZÁVĚR.....	70
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	71
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74
SEZNAM OBRÁZKŮ	77

SEZNAM TABULEK..... 78

ÚVOD

V současnosti svět čelí problematice nahrazení tradičních zdrojů energie na obnovitelnými zdroji energie. Mezi obnovitelné zdroje energie patří: energie větru, vodních toků, slunce a geotermální energie. Využití potenciálu obnovitelných zdrojů pomůže snížit závislost na fosilních palivech. Jednou z možností je akumulace tepelné energie. V tomto případě materiál získává energii při zvyšování své teploty a ztrácí ji při snižování teploty. Využití této vlastnosti umožňuje používat různé materiály s různými vlastnostmi a dosahovat různých výsledků, které mohou vést k různým aplikacím, například vytápění a chlazení

Tato diplomová práce se zabývá využitím geotermální energie jako zdrojů energie pro systém nízkoteplotního vytápění. Získávání energie země je možné pomocí tepelného čerpadla typu země-voda. Zisk tepla ze země probíhá prostřednictvím vrtů nebo plošných kolektorů. Daná diplomová práce je zaměřena na problematiku dlouhodobé nízkoteplotní akumulace tepla využitelné pro vytápění budov.

V první kapitole teoretické části jsou zohledněny způsoby akumulace tepelné energie a informace ohledně využití skladování energie v systémech dálkového vytápění.

Ve druhé kapitole je zpracována stručná rešerše, ve které jsou popsány možné způsoby nízkoteplotní akumulace tepla. Další částí rešerše je přehled realizovaných projektů, které využívají nízkoteplotní energii pro účely vytápění a chlazení.

Praktická část diplomové práce je zaměřená na návrh nízkoteplotního zásobníku tepla a provedené bilanční výpočty jeho kapacity a teplotních průběhů. Následně představuje režimy nabíjení a vybíjení akumulátoru v čase. V poslední části diplomové práce je proveden test provozních parametrů zásobníku tepla.

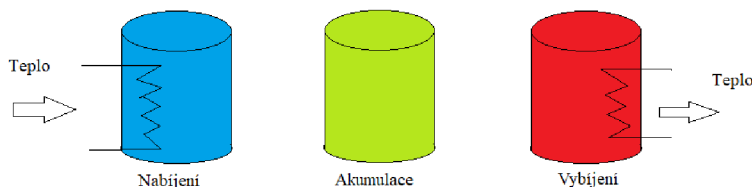
1 Nízkoteplotní akumulace tepla

Akumulace tepelné energie je zásadní pro používání konvenčních energetických systémů způsobem, který je udržitelný, efektivní, ekonomický a šetrný k životnímu prostředí. Akumulace tepelné energie je klíčovou technologií při snižování nesouladu mezi nabídkou energie a poptávkou po tepelných systémech. Metody skladování tepla se běžně používají pro obytné nebo komerční aplikace vytápění / chlazení, nebo pro zajištění nepřetržité výroby energie v elektrárnách založených na obnovitelných zdrojích. Systémy akumulace tepla poskytují nejen rovnováhu mezi nabídkou a poptávkou, ale také zvyšují výkon a spolehlivost energetických systémů [1].

Akumulátor se nabije, zatímco zdroj energie je široce dostupný nebo levný. Po krátkodobém nebo dlouhodobém skladování se akumulovaná energie vybije, když zdroj není k dispozici, nebo je drahý. Nabíjení a vybíjení jsou procesy, které se po sobě cyklicky opakují.

Akumulace tepla může zahrnovat sběr energie ze slunce, země, vzduchu nebo vody. Pro dopravu energie do a ze zásobníku se obvykle používá vzduch a voda (nebo směs vody). Cyklus nabíjení/vybíjení závisí na zatížení budovy a dostupnosti energie, která se má uložit pro pozdější použití. Většina systémů používá denní cyklus, ale používají se také týdenní a sezónní cykly [2].

Proces akumulace energie spočívá ve třech fázích, jako je na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Typický cyklus nabíjení, uschování a vybíjení tepelného akumulátoru [1].

1.1 Rozdělení akumulace tepelné energie

Mezi způsoby akumulace tepla lze zařadit aktivní a pasivní skladování.

Aktivní systémy akumulace tepla (kde jsou přidány další mechanické systémy jako součást systému akumulace tepla) obvykle nabízejí vysoký stupeň kontroly nad vnitřním prostředím. Některé aktivní systémy, jako například tepelné skladování ledu, ukládají energii, když je k dispozici za nižší cenu, připravenou k použití během vyšších tarifních období. Jiné aktivní systémy, jako je aktivní solární vytápění, ukládají energii, když je snadno dostupná pro pozdější použití, a snižují tak nároky na fosilní paliva, která tvoří primární zdroj energie (plyn, elektřina, ropa) v budově.

Pasivní systémy, jako je pasivní noční chlazení nebo pasivní solární ohřev vnitřního prostředí, jsou proto méně přesné v rozsahu poskytované regulace komfortu. Používají se také k útlumu zátěže, kde se využívají aktivní systémy. Pasivní systémy obecně mají velmi nízké provozní náklady. „Hybridní“ nebo „polopasivní“ systémy, jako jsou smyčky zemního chlazení, používají minimální množství zařízení (např. tepelné čerpadlo) ke zvýšení nebo snížení teploty „pasivního“ přívodu energie. Tímto způsobem je zajištěna zlepšena tepelná pohoda v obydlých prostorách [2].

Další kategorie rozdělení je: [1]

Citelným teplem: akumulace tepla je dosažena zvýšením (ohřevem) nebo snížením (chlazením) teploty akumulčního média. Typický cyklus systému uchovávání citelné tepelné energie zahrnuje procesy citelného ohřevu a chlazení. Proces ohřevu (nebo chlazení) zvyšuje (nebo snižuje) entalpii akumulčního média. U nestlačitelného paměťového média částka tepla akumulované (nebo odejmuté) energie v (nebo z) systému závisí na specifickém teple média, teplotním rozdílu a hmotnosti akumulčního média.

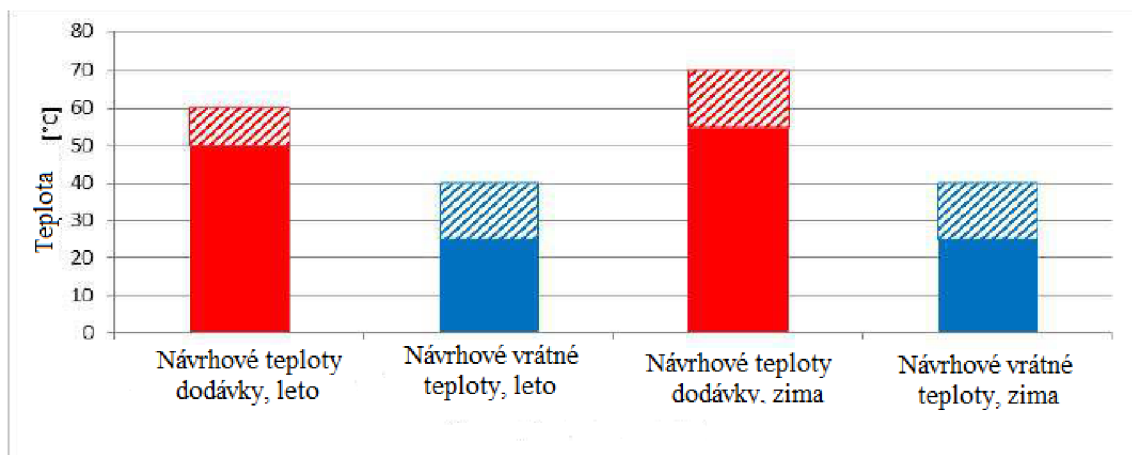
Latentním teplem: akumulace tepelné energie s využitím latentního tepla je založena na uvolňování (tuhnutí) nebo absorpci (tání) tepelné energie, když zásobní médium prochází fázovou změnou z pevné na kapalnou a kapalnou na plyn nebo naopak. Kvůli značné expanzi objemu během změny fáze kapalina-plyn vyžaduje taková aplikace vyztužené akumulční nádrže. Systémy s fázovou přeměnou kapalina-plyn se běžně nepoužívají, to znamená, že se většinou týkají fázových transformací z pevné látky na kapalnou nebo z kapaliny na pevnou látku.

Termochemická akumulace tepla: je založena na reverzibilních termochemických reakcích. Energie se ukládá ve formě chemických sloučenin vytvořených endotermickou reakcí a znovu se získává rekombinací sloučenin v exotermické reakci. Uložené a uvolněné teplo je ekvivalentní reakčnímu teplu (entalpii).

2 Nízkoteplotní akumulace tepla pro systémy dálkového vytápění

Řada demonstračních projektů prokázala, že teplota dodávky dálkového vytápění při teplotě mírně nad 50 °C může splňovat požadavky koncového uživatele na vytápění prostoru a užitkovou teplou vodu (TUV) ve středo-severoevropském podnebí, ve správně navrženém a provozovaném obvodu topné sítě a vlastní instalace [3].

Proto je v těchto pokynech systém nízkoteplotního dálkového vytápění definován jako systém sítě dálkového zásobování teplem a její prvky, připojení spotřebičů a vlastní instalace, které mohou pracovat v rozmezí od 50-55 °C až 60-70 °C napájecí a 25-30 °C až 40 °C vratné teploty, splňují požadavky spotřebitelů na vnitřní tepelnou pohodu a teplou užitkovou vodu. Tato definice nízké teploty posouvá teploty na hranici limitu (viz obr. 2.1). Nové nízkoenergetické budovy i stávající budovy lze napájet nízkoteplotním dálkovým vytápěním [3].



Obr. 2.1 Rozsah návrhové přivedené a vratné teploty nízkoteplotního dálkového vytápění [3].

Nízkoteplotní dodávka dálkového vytápění při teplotách například 45 °C je také možná. Příprava teplé vody pro 40-45 °C však vyžaduje další zdroj energie. Takové „ultra“ nízkoteplotní dálkové vytápění nespadá do oblasti působnosti těchto pokynů [3].

Díky flexibilitě přidané technologií akumulace tepelné energie může systém nízkoteplotního dálkového vytápění koordinovat sektory tepla a elektřiny nákladově efektivním způsobem. Takové kombinace se proto staly důležitým krokem k dosažení 100 % systému obnovitelné energie [19].

2.1 Výhody využití nízkoteplotního dálkového vytápění

Nízkoteplotní systém dálkového vytápění splňuje dva hlavní požadavky na budoucí dálkové vytápění a celý energetický sektor – vysokou energetickou účinnost a vysoký podíl obnovitelné energie.

Nízkoteplotní dálkové vytápění má několik výhod. Zprv je zajišťuje účinnost dodávky energie:

1) Požadavky na energetickou náročnost nových a renovovaných budov stanoví postupně nižší limity spotřeby energie na vytápění. Energetická účinnost na straně spotřebitele se proto značně zvyšuje.

2) Relativní tepelné ztráty v tradiční síti zásobování teplem se však zvyšují, když klesá spotřeba tepla v budovách. Zároveň lepší energetická náročnost budov umožňuje dodávku dálkového vytápění s nízkou teplotou.

3) Ještě důležitější je, že ztráty dodávek dálkového vytápění lze podstatně snížit při snižování teplot v síti. To zvyšuje účinnost na straně nabídky a konkurenceschopnost systémů dálkového vytápění pro zásobování také nízkoenergetických budov v oblastech s nízkou hustotou energie.

4) Nižší teploty v síti dálkového vytápění snižují tepelné namáhání potrubí. Jak se teplota přívodu snižuje, nerovnoměrně rozložený teplotní gradient podél potrubí se snižuje. Riziko úniku potrubím v důsledku tepelného namáhání a souvisejících nákladů na údržbu je proto sníženo. Snížené tepelné namáhání dále prodlužuje životnost sítě dálkového vytápění.

2.2 Akumulace tepelné energie latentním teplem

Efektivní využití časově závislých energetických zdrojů vyžaduje vhodné metody TES, které zkrátí čas a míru nesouladu mezi nabídkou a poptávkou po energii. TES poskytuje vysoký stupeň flexibility, protože může být integrován s různými energetickými technologiemi, například solárními kolektory, spalovacími zařízeními na biopaliva, tepelnými čerpadly a generátory elektřiny mimo špičku. Přenos tepla, ke kterému dochází, když látka přechází z jedné fáze do druhé, se nazývá latentní teplo. Výměna tepla pomocí latentního tepla je obvykle mnohem vyšší než citelným teplem pro dané médium, což souvisí s jeho měrnou tepelnou kapacitou. Když se voda změní na páru, změna latentního tepla je řádově 2 MJ/kg. Většina praktických systémů využívajících ukládání energie s fázovou změnou zahrnuje roztoky solí ve vodě [4].

Některé systémy používají jako skladovací médium buď krystaly $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \cdot \text{H}_2\text{O}$, nebo $\text{CaCl}_2 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a využívají olej pro výměnu tepla. Olej je čerpán na dně zásobníku a stoupá v kapkách kapalinou bez míchání. Dalšími slibnými latentními akumulacími reakcemi jsou interkrystalické změny. Mnohé z nich se používají při relativně vysokých teplotách [4].

Aplikace solární energie vyžadují velké kapacity zásobníku, aby pokryly minimálně 1–2 dny tepelné potřeby. Této kapacity se běžně dosahuje rozumným akumulováním tepla ve velkých vodních nádržích. Alternativu nabízejí systémy akumulace pomocí latentního tepla, kde se tepelná energie ukládá jako latentní teplo v látkách procházejících fázovým přechodem, např. skupenské teplo tání při přechodu pevná látka-kapalina. Hlavními výhodami latentních TES systémů jsou vysoké kapacity akumulace na jednotku hmotnosti ve srovnání se systémy citelného tepla a malý teplotní rozsah provozu, protože k tepelné interakci dochází při konstantní teplotě. Nedochozí k postupnému poklesu teploty, protože je z PCM odebíráno teplo [4].

2.3 Termochemická akumulace

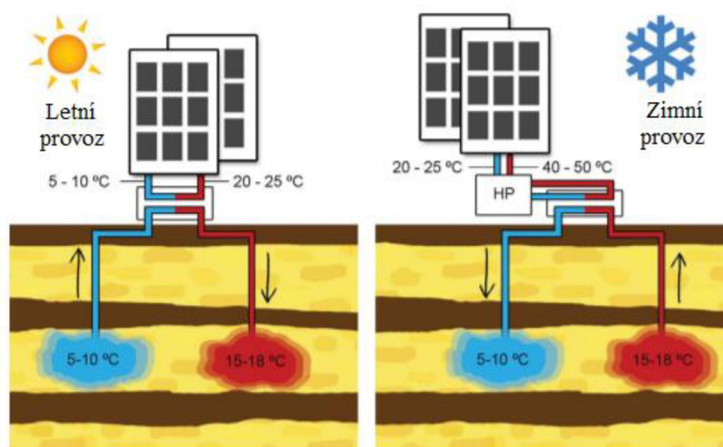
Termochemické uchovávání energie vzniká, když se chemická reakce s vysokou energií, účastníci se reakce, používá k ukládání energie. Produkty reakce by mělo být možné skladovat a teplo akumulované odděleně během reakce by mělo být možné získat zpět, když probíhá reverzní reakce. Proto lze tento proces akumulace použít pouze při reverzibilní reakci [13].

Termochemické skladování energie se dělí mezi chemické reakce a sorpční systémy. Při chemických reakcích je od materiálů vyžadována vysoká hustota akumulace energie a reverzibilita. Chemická přeměna energie má obvykle lepší účinnost při akumulaci energie než fyzikální metody (citelným a latentním teplem). Nejdůležitější výzvou je najít vhodnou reverzibilní chemickou reakci pro použitý zdroj energie [13].

Jako akumulační materiál (TCM) se používají termochemické reakce při vysokých teplotách (více než 400 °C) a entalpie reakce se nachází ve vysokém rozmezí (80–180 kJ/mol). Kromě toho, protože produkty reakce musí být skladovány odděleně, systémy, které používají TCM k ukládání energie, mohou být použity jako sezónní systémy skladování [13].

2.4 Tepelný akumulátor vodonosné vrstvy – ATES

ATES je systém, který používá podzemní vodu jako medium pro akumulaci tepla. ATES je koncept, který je znám již několik desetiletí. Systémy tohoto typu získaly celosvětovou pozornost kvůli jejich potenciálu pro rozsáhlou a dlouhodobou akumulaci tepla. Ve své nejběžnější formě zahrnuje skladování přebytečného tepla ve vodonosné vrstvě a jeho pozdější rekuperaci během období potřeby tepla. S rostoucími obavami z globálního oteplování se této koncepci dostává obnovené pozornosti jako životaschopného prostředku úspory energie a snížení spotřeby fosilních paliv. Tento rostoucí zájem se odráží ve zrychlených výzkumných aktivitách v zemích severní Evropy a v Kanadě. Při vývoji systémů ATES je nutné rozumět fyzikálním procesům, které řídí chování energie přenosu tepla v podzemních vodách. Numerické simulační modely hrají klíčovou roli při přispívání k tomuto porozumění, a jsou tedy nepostradatelné při navrhování efektivních zařízení ATES. Většina aplikací se zabývá skladováním zimního chladu, který se má použít k chlazení velkých kancelářských budov a průmyslových procesů v létě. Hlavním předpokladem pro tuto technologii je dostupnost vhodných geologických útvarů [4].



Obr. 2.2 Základní pracovní princip ATES [5].

ATES lze použít pro krátko a dlouhodobou akumulaci, včetně denních, týdenních, sezónních nebo smíšených cyklů. Aby nedocházelo k nežádoucím trvalým změnám teplotní hladiny ve vodonosné vrstvě, musí mít vstup a výstup tepla stejnou velikost alespoň pro počet cyklů. Systém by měl být navržen tak, aby byl nastavitelný v případě, že se dlouhodobé energetické toky nevyrovnají. Kapacita zásobníku by měla odpovídat zatížení vytápění/chlazení [4].

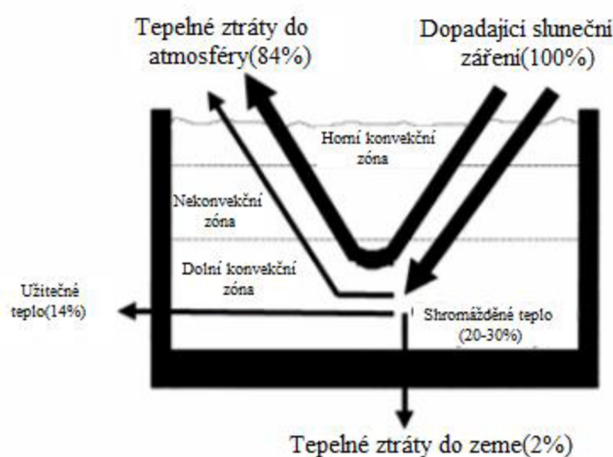
ATES se běžně používá v Číně a částech západní Evropy – zejména v Nizozemsku a Švédsku, kde jeho použití roste o 25 % ročně. Přestože kancelářské budovy zůstávají primárním trhem pro tuto technologii, prosazuje se v průmyslových a zemědělských aplikacích a vyvíjí se nový trh v odmrazování a chlazení silnic a mostů [4].

Výhody a nevýhody: [4]

- + malé konstrukční náklady
- + ekologicky čistá technologie
- je nutné tepelné čerpadlo
- záleží na geologických podmínkách
- vysoké tepelné ztráty do okolí, pokud není izolace

2.5 Solární bazén

Solární bazén je jednoduchý a levný systém solární energie, který sbírá sluneční záření a dlouhodobě jej ukládá jako tepelnou energii ve stejném médiu. Z tohoto důvodu přitahují solární bazény zájem výzkumníků o toto téma více než některé alternativní solární energetické systémy. Solární bazény se obvykle skládají ze tří oblastí, horní konvekční zóny, nekonvekční zóny a dolní konvekční zóny, jak je znázorněno na obr. 2.3. Horní konvekční zóna je nejvyšší vrstva solárního bazénu. Jedná se o relativně tenkou vrstvu, která se skládá téměř výhradně ze sladké vody nebo homogenní vody s malým obsahem soli. Nekonvekční zóna je těsně pod horní konvekční zónou a má rostoucí koncentraci vzhledem k horní zóně a také působí jako izolace na dolní konvekční zónu. Dolní konvekční zóna je vrstva, ve které je koncentrace soli nejvyšší a není v ní žádný koncentrační gradient obr. 2.3 [6].



Obr. 2.3 Schematické zobrazení solárního bazénu [6].

Pokud je koncentrační gradient nekonvekční zóny dostatečně velký, nedojde v této oblasti k žádnému konvekčnímu pohybu a energie absorbovaná ve spodní části bazénu bude uložena v dolní konvekční zónu. Voda je tekutina, která nepřenáší infračervené záření, takže pouze viditelná část spektra sluneční energie dosáhne dna bazénu a je tam absorbována. Kvůli špatné vodivé schopnosti vody, povaze infračerveného záření a izolačním vlastnostem nekonvekční zóny akumulovaná energie v dolní konvekční zóně uniká z bazénu pouze vedením. Tato akce tedy poskytuje solární bazén jako kolektor současně s akumulací tepla [6].

Vzhledem k značnému množství akumulovaného tepla v dolní konvekční zóně solárního bazénu lze naakumulovanou tepelnou energii ideálně využít po dlouhé době. Solární bazén by mohl být poháněn v kombinaci s tepelným čerpadlem. Tepelné čerpadlo může fungovat jako klimatizace, která se používá v horkém období, vrstva čerstvé vody nad horní konvekční zónou může být vyrobena tak, aby fungovala jako chladič, což zvyšuje koeficient provozu klimatizace [17].

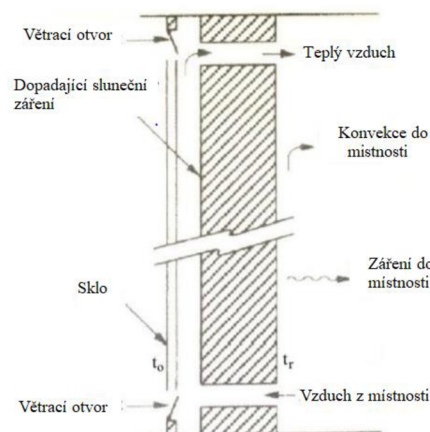
Výhody a nevýhody [4]:

- + nízké náklady na instalaci
- + hromadící se krystaly soli musí být odstraněny a mohou být cenným vedlejším produktem a nákladem na údržbu
- + možnost výstavby kdekoli
- relativně nízkoteplotní provoz znamená, že přeměna solární energie je obvykle nižší než 2 %
- kvůli odpařování je pro udržení gradientů slanosti neustále nutná slaná voda
- riziko kontaminace půdy kvůli vysokému obsahu soli ve vodě v bazénech.

2.6 Akumulace tepla v stěnách

Použití TES jako pasivní technologie má za cíl poskytnout tepelný komfort s minimálním využitím HVAC energie. Pokud se v budovách používají materiály s vysokou tepelnou hmotou, pasivní akumulace pomocí citelného tepla je technologie, která umožňuje skladování velkého množství energie a zajišťuje tepelnou stabilitu uvnitř budovy. Typicky se používají materiály jako pěchovaná zemina, alveolární cihly, beton nebo kámen [7].

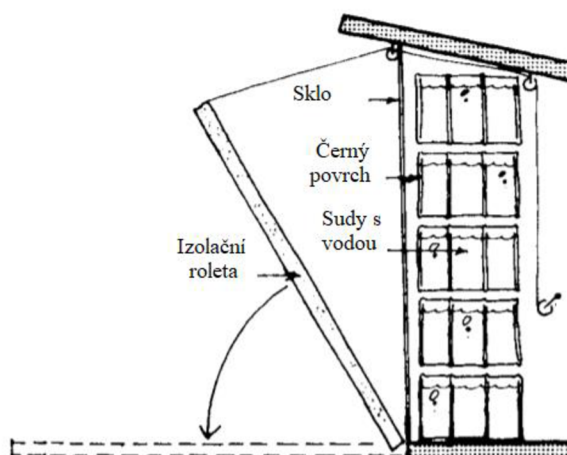
Standardní solární stěny, známé také jako Trombeho stěny, a solární vodní stěny také využívají rozumné skladování k dosažení úspor energie v budovách. Trombeho stěna obr. 2.4 (z názvu francouzského výzkumníka, který ji poprvé navrhl v roce 1979) je zeď s vysokou tepelnou kapacitou stíněná skleněnou tabulí [7].



Obr. 2.4 Trombého stěna [7].

Vytvoří se skleníkový efekt, který snižuje tepelné ztráty ze stěny, ohřívá vzduch mezi stěnou a sklem, který může být přiváděný do místnosti přirozeným tahem díky komínovému efektu ohřátého vzduchu. Teplota stěny se zvyšuje s absorpcí energie a ve zdi se vytvářejí teplotní gradienty závislé na čase. Energie se ztrácí zasklením a je přenášena ze strany stěny do místnosti zářením a konvekcí. Tuto akumuláční zeď lze považovat za velké množství uzlů spojených dohromady tepelnou sítí, každý s teplotou a kapacitou. Teplo se přenáší zářením přes mezeru a konvekcí mezi vzduchem, proudícím v mezeře, a absorpčním povrchem a vnitřním zasklením [7].

Jiný typ akumuláční stěny – „drum wall“ obr. 2.5, používá místo konstrukčních stěn sudy, bečky nebo jiné nádoby s vodou. Sluneční záření vstupující skrz sklo dopadá na nádoby, které jsou černě natřeny, aby se zvýšila absorpce tepla, čímž se ohřívá voda uvnitř kontejnerů. Teplo je tedy uloženo pro noční použití. Pro snížení tepelných ztrát v noci lze znovu použít izolační clonu [8].



Obr. 2.5 Drum Wall (Steve Baer) [8].

Výhody a nevýhody [7], [18]:

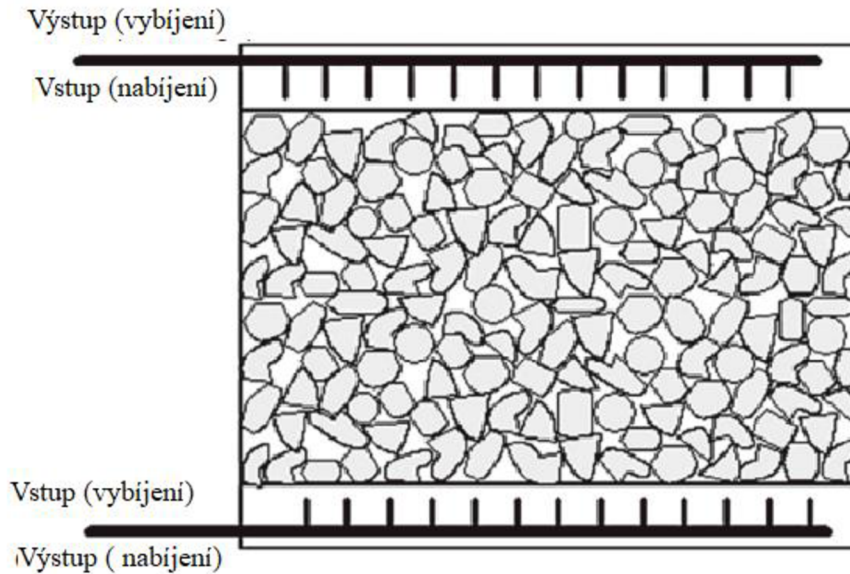
- + nízké tepelné ztráty
- + jednoduchá konstrukce i technické řešení
- + vysoká tepelná kapacita
- obtížná regulace vyhřívání
- mírná nerovnoměrnost vytápění.

2.7 Akumulace tepla v horninovém materiálu – RBTS

Akumulace tepelné energie v horninovém materiálu (např. kamen) je považována za velmi vhodnou pro aplikace v obytných budovách, pokud se kombinuje se solární tepelnou energií jako zdrojem dodávky tepla. V tomto způsobu skladování je horninový materiál volně balen do struktury podobné loži, jak je znázorněno na obr. 2.6. Systém je rovněž vybaven vstupním a výstupním potrubím, nebo uspořádáním vzduchových kanálů pro teplonosné médium sloužícím pro přenos tepla do a ze skladovacího systému [9].

V typickém cyklu nabíjení probíhá pomocí teplonosného média (většinou vzduch), které přenáší teplo ze solárního kolektoru a vstupuje do akumulčního zásobníku prostřednictvím uspořádání horních vzduchových kanálů. V důsledku efektů gradientu hustoty při skladování tepla v horninových materiálech horký vzduch ztrácí teplo, potom už teplý vzduch proudí zpět do kolektoru pro další nabíjecí cyklus [9].

Během vybíjecího období (v noci) proudí studený vzduch uspořádáním spodního vzduchového kanálu a odebírá teplo ze zásobníku. Prostřednictvím gradientu hustoty a konvekčních efektů se studený vzduch ohřívá a dosahuje požadované teploty, která je dostatečná pro splnění požadavku na vytápění prostoru. Poté, co bylo odstraněno teplo obsažené v akumulčním zásobníku, je nyní systém připraven na další nabíjecí cyklus, který proběhne během denních hodin [9].



Obr. 2.6 Schematické zobrazení akumulací tepla v horninovém materiálu [9].

Protože se jako teplonosné médium používá vzduch, lze očekávat, že tepelný akumulací výkon systému RBTS bude při stejné tepelné zátěži nižší ve srovnání se systémem akumulace v kapalině (voda).

Je to proto, že vzduch i kámen mají nižší měrnou tepelnou kapacitu. Navíc pro stejnou potřebu tepla by mohl být prostor obsazený systémem horninového lože třikrát větší (zejména u velkých sezónních akumulacích systémů), což by nebylo u systému akumulujícího teplo v kapalině.

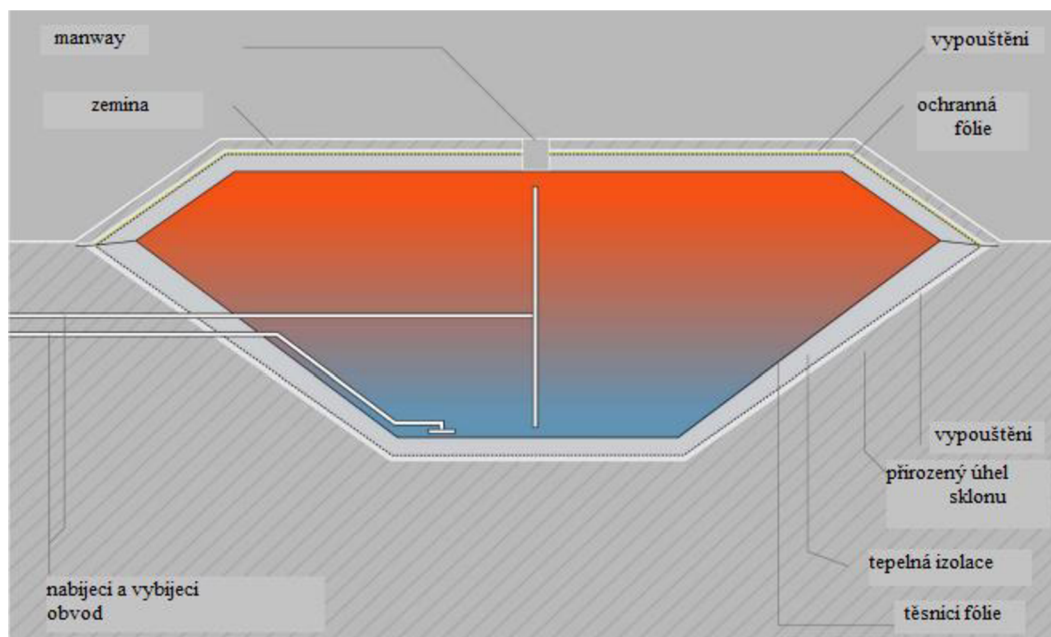
Náklady spojené s konstrukcí a provozem RBTS systému jsou však nižší než náklady na kapalný akumulací systém. Systémy horninového lože lze také použít při zvýšených teplotních gradientech, zatímco systémy pro akumulaci tepla v kapalině mají omezení. Výhodou tohoto jednoduchého systému je, že snižuje a v některých případech může téměř eliminovat vaši potřebu klimatizačních systémů, jejichž provoz vyžaduje mnohem více energie a údržbu. Obvykle jej lze postavit z místních stavebních materiálů a nejsložitější položkou nezbytnou pro základní provoz je ventilátor. Závisí to však na klimatických podmínkách – pokud žijete v oblasti s minimální denní změnou teploty, není to dobrá volba [9].

Výhody a nevýhody [9]:

- + náklady jsou nižší než na kapalný akumulací systém
- + lze použít i při zvýšených teplotních gradientech
- + lze využít pro chlazení
- je potřeba ventilátoru
- systém je závislý na klimatických podmínkách

2.8 Jamové zásobníky

Jamové systémy akumulace tepelné energie se skládají z velké, uzavřené a (částečně) izolované jámy v zemi, kterou lze naplnit různými akumulujícími médii [10].



Obr. 2.7 Schéma jámového zásobníku [10].

Zásobníky tepelné energie se umísťují do země do hloubky 5 m až 15 m. Boční stěny jsou podepřeny stříkaným betonem nebo podobným materiálem a jsou přirozeně šikmé. Úhel sklonu závisí na půdních podmínkách. Zásobník tepelné energie je obvykle celoplošně izolován proti zemině pomocí expandovaného skleněného granulátu v látkových pytlích nebo membránovým bedněním – v Dánsku byly realizovány velmi velké akumulací nádrží bez tepelné izolace stěn a dna. Nahoře je zásobník utěsněn plovoucím, konzolovým nebo pevným víkem, které je rovněž izolováno [10].

Zásobník tepelné energie se nabíjí a vybíjí pomocí trubek naplněných vodou. Pro odvod tepla se voda během topné sezóny odebírá z nejteplejší části zásobníku. Rozlišuje se přímé a nepřímé nabíjení.

Jamové zásobníky tepelné energie mohou být naplněny vodou, směsí voda-šterk nebo směsí voda-země. Protože voda má ze všech těchto akumulacích médií největší tepelnou akumulací kapacitu, musí mít zásobník větší objem při stejné velikosti požadované tepelné akumulací kapacity, pokud je naplněn šterkem nebo zeminou. Akumulací výkon závisí na podílu šterku ve výplňovém materiálu. Při aplikaci voda-šterk mohou zásobníky dosáhnout kapacity 30-50 kWh/m³, což odpovídá vodnímu ekvivalentu 1,3 m³ až 2 m³. To znamená, že jamový zásobník naplněný směsí šterku a vody musí být 1,3krát až dvakrát větší než jamový zásobník naplněný vodou, aby bylo dosaženo stejné akumulací kapacity. Čím vyšší je podíl šterkové výplně v zásobníku, tím více funguje jamový zásobník tepelné energie jako zásobník tepla s relativně nízkou tepelnou kapacitou [10].

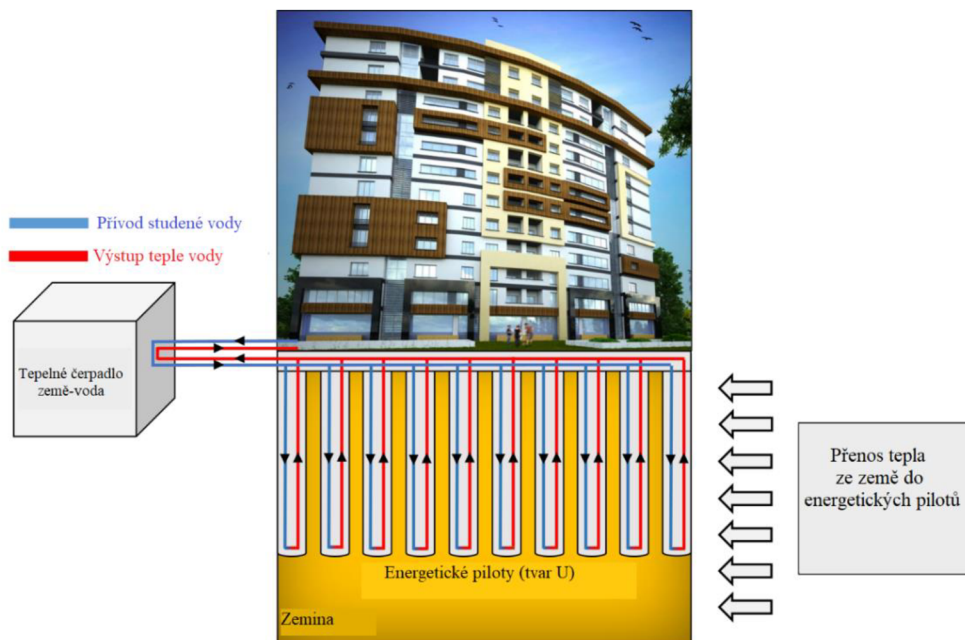
Výhody a nevýhody [10]:

- + relativně nízké konstrukční náklady
- + vysoká tepelná kapacita
- není možnost údržby a úpravy
- geometrie zásobníku.

2.9 Využití geotermální energie – energetické piloty.

Alternativním obnovitelným zdrojem energie je geotermální energie. Tradiční geotermální energetické systémy vyžadují interakci s kilometry hlubokými vrstvami horniny, kde je tepelná energie mnohem větší a může produkovat horké tekutiny pro pohon turbín vyrábějících elektřinu. Její použití je však zatíženo cenou a praktičností. V poslední době dochází k vývoji v oblasti malých geotermálních energetických systémů. Tyto systémy vykazují, ve srovnání s tradičními systémy, velký potenciál z hlediska dlouhodobé udržitelnosti, přístupu, flexibility a ekonomiky. Geotermální energie je založena na principu, že podloží lze využít jako zdroj tepelné energie s využitím jeho přírodního potenciálu a schopností akumulace tepla [11].

Pro výměnu tepla se zemí lze využít základy budov, např.: piloty pro hlubinné základy, opěrné zdi, segmenty tunelového ostění atd. Energetické piloty jsou moderní aplikací geotermálních systémů s nízkou entalpií (tj. s nízkými teplotními rozdíly), s hlavní výhodou snížení počátečních instalačních nákladů oproti standardním systémům. Princip spočívá ve zřízení sítě trubek uvnitř betonových konstrukcí. Teplonosná kapalina, která cirkuluje v potrubní síti, si vyměňuje teplo se zemí přes beton. Tepelné čerpadlo přizpůsobuje teplotu země teplotě potřebné k vytápění nebo chlazení budov. Účinnost systému musí splňovat jak energetická (výroba tepla nebo chladu), tak geotechnicko-strukturální (omezená dodatečná napětí a posuny) kritéria, která jsou vysoce závislá na místních podmínkách, kde se staví stavba. V době, kdy energetické potřeby neustále rostou a kde nabývá významu výzkum lokálních a obnovitelných zdrojů energie, se energetické piloty hodí. Energetické piloty představují inovativní a nadějnou alternativu pro vytápění nebo chlazení budov a infrastruktury. Využití geotermální energie integrované do základů budov je energeticky účinným řešením v projektech udržitelného inženýrského stavitelství [11].

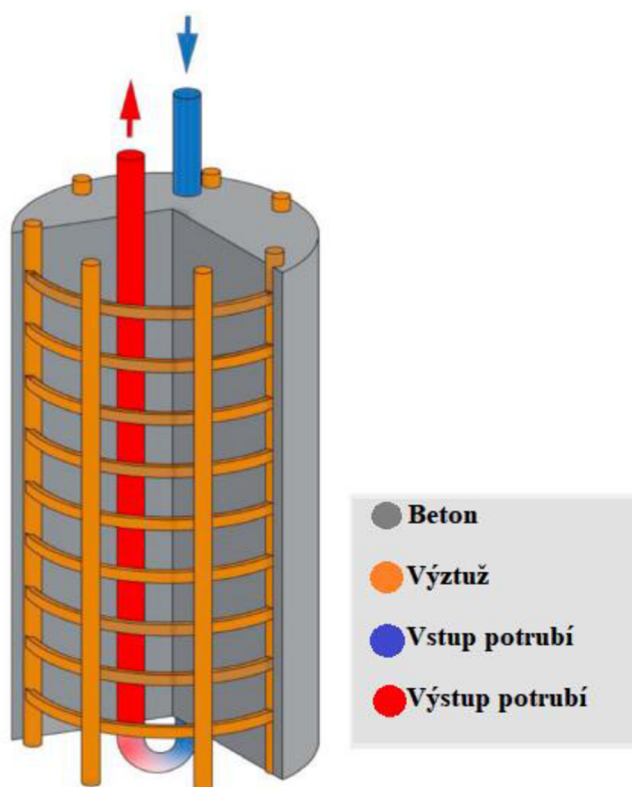


Obr. 2.8 Základní pracovní princip energetických pilotů [11].

Díky tomu, že teplota podloží zůstává konstantní po celý rok (kromě prvních 5 až 8 m), bude tato teplota v zimě vyšší než teplota venkovního vzduchu a v létě naopak – nižší. Tento teplotní rozdíl umožňuje v zimě odebírat teplo ze země do vnitřního prostředí budovy (pro účely vytápění) a odebírat je z budovy do země v létě (pro účely chlazení).

Je to tzv. „nízko entalpický“ geotermální systém, tedy systém, který zahrnuje prvních 100 m půdy a pracuje s teplotami kolem 10 °C až 20 °C. Aby se teplota vycházející z výměníků tepla přizpůsobila teplotě potřebné k vytápění nebo chlazení budov, jsou tyto systémy připojeny k tepelnému čerpadlu [11].

Strukturální piloty jsou přeměněny na tepelné výměníky přidáním jedné nebo více smyček plastových trubek podél jejich délky. Při konstrukci energetických pilot by průměr a délka piloty měly být navrženy tak, aby odolávaly aplikovanému strukturálnímu zatížení, neměly by se zvětšovat, aby vyhovovaly geotermálním požadavkům. Při stavbě pilot se nejprve zemina vyvrtá ze země a vloží se tuhá, svařovaná armovací klec. Několik uzavřených smyček plastových absorbujících trubek z polyetylénu a s vysokou hustotou (obecně o průměru 25 mm a tloušťce stěny 2-3 mm). Jsou rovnoměrně upevněny kolem vnitřku výztužné klece v celé hloubce [11].



Obr. 2.9 Schematické zobrazení instalaci energetických pilot [11].

Trubky se dodávají přeplněny teplonosnou kapalinou (voda s nemrznoucí směsí nebo solným roztokem) a jsou opatřeny uzavíracím ventilem a manometrem v horní části klece. Před betonáží jsou trubky absorbéru natlakované pro zkoušku integrity, a aby se zabránilo zhroucení kvůli tekutému betonu. Tento tlak se udržuje, dokud beton neztvrdne a znovu se aplikuje před konečným uzavřením trubek absorbéru. Při betonování se vršky trubek přidrží, aby nedošlo k poškození, a k základně piloty se umístí tremie. Beton se nalévá skrz tremie a zvedá se, zatímco zaplňuje pilotu. Po zaplnění jsou trubky absorbéru připojeny k výměníku tepla, který je následně připojen k sekundárnímu okruhu potrubí v podlahách a stěnách budovy [11].



Obr. 2.10 Využití energetických pilot pro odmrazování mostní desky [11].



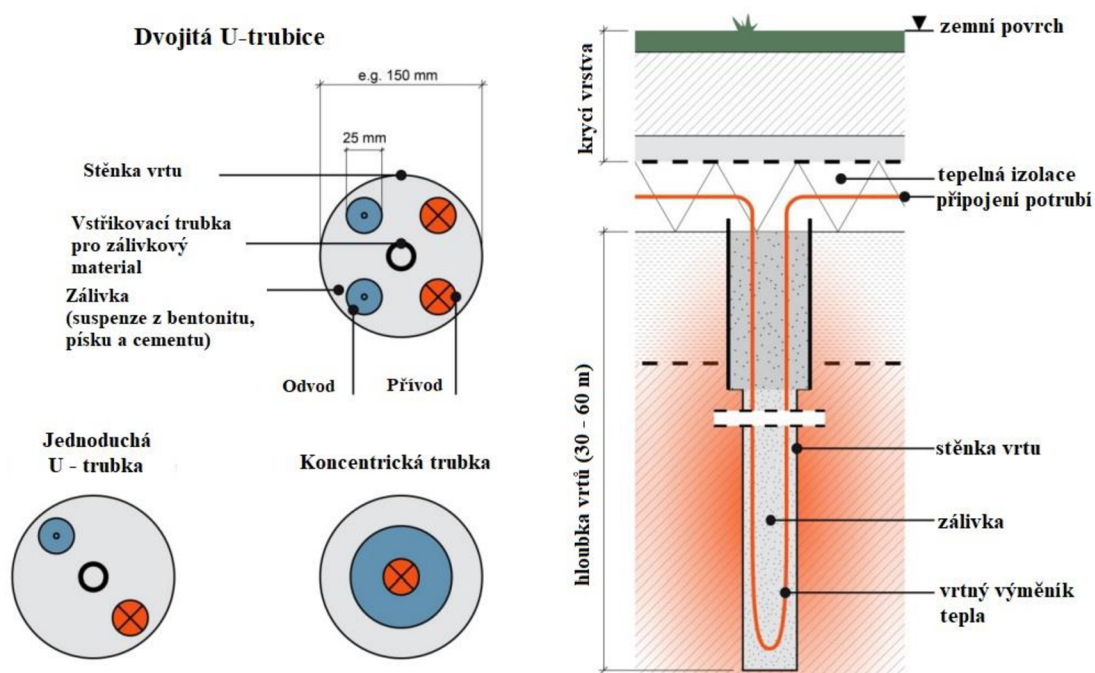
Obr. 2.11 Využití energetických pilot pro tání sněhů na chodniku ve městě Klamath Falls (Spojené státy) [11].

Výhody a nevýhody:

- + je to udržitelný a obnovitelný zdroj energie
- + poskytuje úsporu nákladů na palivo
- + žádné místní emise nebo znečištění
- + lze použít k zajištění požadavku na chlazení a vytápění pasivních staveb, obytných budov, také pro tání sněhu a odmrazování mostních desek
- + energetické piloty lze využít ve většině částí světa a jsou vhodné pro různé klimatické podmínky
- vyšší počáteční náklady
- při realizaci a dimenzování nutná kooperace specialistů z různých oborů.

2.10 Horninový akumulátor tepla – Borehole thermal energy storage (BTES)

V BTES se hornina používá jako skladovací materiál. Neexistuje žádný přesně oddělený úložný objem. Vhodné geologické útvary jsou horniny nebo vodou nasycené půdy bez přirozeného proudění podzemní vody. Teplu je přiváděno nebo odváděno pomocí vertikálních vrtných výměníků tepla (VVT), které jsou instalovány do vrtů s hloubkou typicky 30 až 60 m pod povrchem terénu. VVT mohou být jednoduché nebo dvojité U-trubky nebo koncentrické trubky většinou vyrobené ze syntetických materiálů (viz. obr.2.12) [12]



Obr. 2.12 Běžné typy a vertikální řezy vrtných výměníků [12].

Horninové zásobníky mají vertikální a horizontální teplotní stratifikaci od středu k hranicím. Je to proto, že přenos tepla je řízen vedením tepla a nikoli konvekcí. Na hranicích dochází k poklesu teploty v důsledku tepelných ztrát do okolní země. Horizontální vrstvení v zemi je podporováno spojením zátěžových trubek ve středu zásobníku a vratných trubek na hranicích. Určitý počet VVT je hydraulicky zapojen do řady a některé řady jsou zapojeny paralelně. Během nabíjení je směr proudění od středu k hranicím úložiště, aby se dosáhlo vysokých teplot ve středu a nižších na hranicích zásobníku. Během vybíjení je směr proudění obrácen [12].

Vzhledem ke svému konstrukčnímu principu není nutné horninové zásobníky izolovat ze spodu, ani ze stran. Izoluje se pouze vrchní část, aby se zabránilo ztrátám do okolí [13].

Jednou z výhod tohoto typu úložiště je možnost rozšíření. Přidáním dalších VVT vedle stávajících lze snadno zvýšit objem podzemního zásobníku. Připojení nových vrtných výměníků ke stávajícím by však mělo brát v úvahu horizontální stratifikaci, jak je popsáno výše [12].

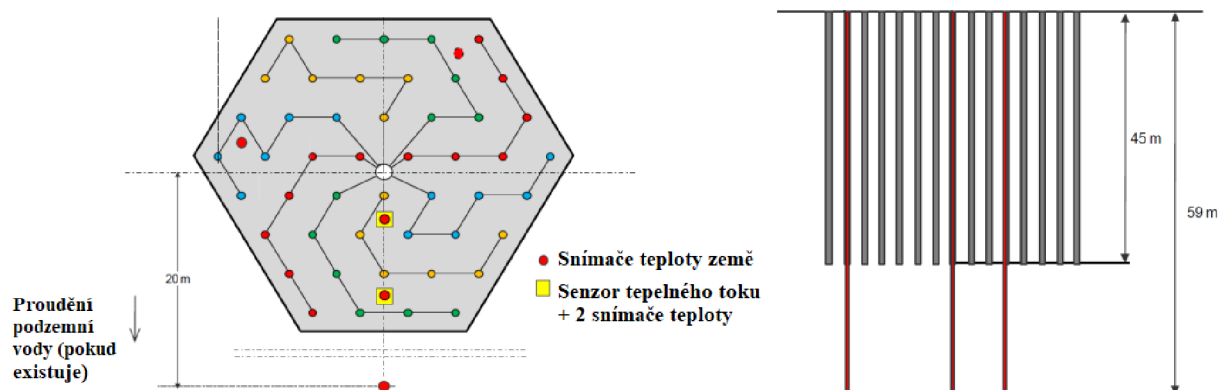
Konkrétním případem je město Braedstrup v Dánsku. Teplárna se skládá z níže uvedených komponentů: [12]

- 18 600 m² solárních kolektorů (10 600 m² nových);
- 19 000 m³ BTES (ekvivalent 5 000 m³ vody) (nový);
- 5 500 m³ (nová) + 2 000 m³ ocelová nádrž;

- elektrické tepelné čerpadlo 1,2 MW_t (nové);
- 10 MW elektrický kotel (nový);
- kogenerační jednotka na zemní plyn;

Horninový zásobník, ocelová nádrž o objemu 5 500 m³, elektrokotel, tepelné čerpadlo a 10 600 m² solárních kolektorů byly uvedeny do provozu v květnu 2012 v rámci projektu „BTES v Braedstrup“. BTES je zamýšlen jako pilotní úložiště, které poskytuje zkušenosti pro případné rozšíření BTES a oblasti kolektorů s cílem dosáhnout vyšší solární frakce v systému dálkového vytápění [12].

Horninový zásobník se skládá ze 48 vrtů se vzdáleností 3 m a uspořádáním podle obr. 2.13. Vzdálenost 3 m byla určena jako minimální bezpečná vzdálenost pro vrtání. Optimální vzdálenost mezi vrtů pro trojúhelníkový model byla kvůli ekonomické optimalizaci stanovena na 2,99 m. Z ekonomického a tepelného hlediska by měly být vrtů co možná nejhlubší, aniž by se dostaly do hladiny potenciální proudící podzemní vody. Hladina podzemní vody v místě úložiště je více než 50 m pod povrchem a hloubka vrtů pro dodržení bezpečné vzdálenosti od předpokládané hladiny je 45 m [12].



Obr. 2.13 Rozložení BTES ve městě Braedstrup, pohled shora a řez [12].

Každý vrt je vybaven dvojitou U-trubkou, 6 vrtů je zapojeno sériově do řady od středu úložiště směrem k periférii, čímž vzniká celkem 16 paralelních průtokových větví. U-trubky se skládají z plastových trubek DN32 se zabudovanou kyslíkovou bariérou. Pokles tlaku v zásobníku je vypočítán na cca 2,0 baru při určeném průtoku 25 m³/h. Při nabíjení akumulární nádrže horká voda cirkuluje přes řetězce ze středu směrem k periférii, aby byla zajištěna určitá úroveň teplotní stratifikace zásobníku s nejteplejší částí ve středu. Při vybití studená voda cirkuluje v opačném směru přes řetězce od okraje směrem ke středu. Pro snížení tepelných ztrát ze zásobníku je vršek zásobníku řešen jako izolovaný kryt. Kryt bude vystaven vysoké teplotě (80 °C) a vlhkosti, což je třeba vzít v úvahu při návrhu konstrukce krytu [12].

BTES v Braedstrup fungoval v prvním období provozu od května 2012 do března 2013 vcelku uspokojivě. Na konci tohoto období došlo k rekuperaci cca 44 % akumulovaného tepla, což je podstatně více, než bylo realizováno v první sezóně jiných srovnatelných vrtných zásobníků. Tepelná ztráta se odhaduje na cca 24 %, což je také uspokojivé [12].

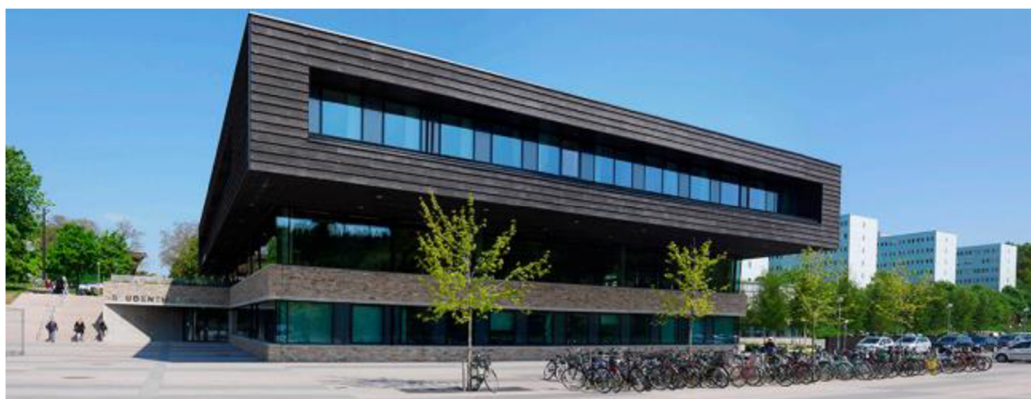
Výhody a nevýhody:

- + nízké konstrukční náklady
- + je možnost rozšíření
- nutnost použití tepelného čerpadla
- složitě najít místo výstavby.

2.11 Využití horninových zásobníků v kombinaci s tepelnými čerpadly

Příkladem využití takového systému je studentské centrum Stockholmské univerzity.

Stockholmská univerzita se nachází ve velkém kampusovém areálu Frescati v centru Stockholmu. V roce 2011 státní společnost Akademiska Hus, která je zodpovědná za správu a rozvoj budov pro výzkum a vysokoškolské vzdělávání ve Švédsku, postavila v areálu kampusu nové studentské centrum (obr. 2.14). Stavba nové budovy byla dokončena na podzim roku 2013. Požadovalo se, aby budova studentského centra byla vzorovou z hlediska udržitelnosti, ekologické stopy a využití energie. Čtyřpatrová budova o rozloze 6300 m² obsahuje kancelářské prostory pro 130 zaměstnanců, malé zasedací místnosti, 200 studijních kabin pro studenty a kavárnu. Objekt byl navržen jako vysoce energeticky účinný s plánovaným celkovým využitím 25 kWh/ m² /rok (<160 MWh/rok) nakupované energii (elektrina) [14].

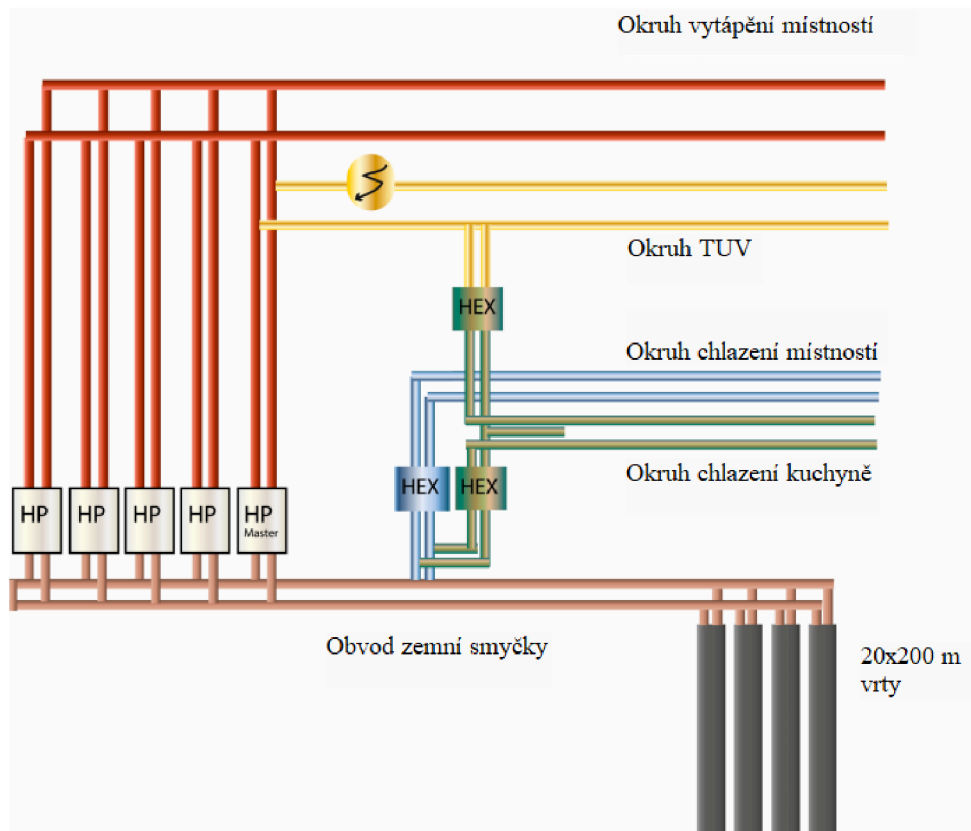


Obr. 2.14 Pohled na Studenthuset [14].

Stavební služby jsou důkladně vybaveny. Vytápění prostor a ohřev teplé užitkové vody (TUV) zajišťuje systém tepelného čerpadla země-voda, který se skládá z pěti 40 kW hotových tepelných čerpadel typu voda-voda napojených na pole vrtu. Teplotu TUV dále zvyšuje systém ochrany proti „legionele“ sestávající z elektrického odporového ohřivače, který zvyšuje teplotu teplé vody z 55 °C na 60 °C, a čerpadla, které nepřetržitě recirkuluje teplou vodu po budově. Chlazení prostoru je zajištěno přímým chlazením z vrtů; přičemž maximální teplota kapaliny opouštějící vrty nesmí překročit 16 °C. Obsazenost budov v nejteplejších letních měsících (červenec–srpen) je nízká, neboť studenti mají letní prázdniny. Naměřené teploty z vrtů nepřesáhly za dobu měření 13,4 °C a zátěže odvlhčováním nejsou vysoké. Vrtvé pole se skládá z 20 vrtů zaplněných podzemní vodou v tvrdé hornině, vrtaných do hloubky 200 m a vybavených jednotlivými U-trubkami naplněnými směsí etanolu a vody. Pole vrtů se nachází pod upraveným dvorem, vrty jsou vrtány šikmo tak, aby zasahovaly pod okolní budovu [14].

Distribuci tepla uvnitř budovy zajišťují otopná tělesa s větším povrchem, než je obvyklé, takže teplota rozvodu je 40 °C namísto 55 °C, která je běžnější ve Švédsku. Rozvod chlazení je řešen ventilačním systémem a chladicími trámy. Součástí systému je i rekuperace tepla

z chladicího okruhu kuchyně. Schéma systému vytápění a chlazení Studenthuset je vidět na obr.2.15 [14].



Obr. 2.15 Schématické zobrazení systému vytápění a chlazení budovy Studenthuset [14].

Před zahájením provozu budovy se předpokládalo celkové roční energetické zatížení 200 MWh vytápění a 34 MWh chlazení. Instalovaný výkon je 200 kW vytápění a 120 kW chlazení z vrtů. Není instalováno žádné přídavné topení ani chlazení, s výjimkou elektrického odporového ohřívače, který zvyšuje teplotu teplé vody pro ochranu před „legionelou“ [14].

Distribuční ztráty v topném systému byly odhadnuty na 2 kWh/m²/rok. Sezonní výkonnostní faktor (SVF) tepelného čerpadla měl být podle projektové dokumentace 4,5, ačkoli hranice SVF nebyly definovány. Klima ve Stockholmu se vyznačuje vlhkým kontinentálním klimatem s průměrnými teplotami kolem -3 °C v zimě a +20 °C v létě [14].

Budova SWECO Bergen, Norsko [15]

Dalším příkladem využití je kancelářská budova SWECO ve městě Bergen, které se nachází v Norsku. Budova byla postavená v roce 2016. Vytápěcí a chladicí plocha je kolem 18000 m². SWECO se skládá ze čtyř nadzemních podlaží a tří podzemních vč. garáže. V 1. NP se nachází obchod s potravinami a nějaké kanceláře, v dalších třech podlažích má kanceláře poradenská společnost SWECO. Budova byla postavena podle Norského standardu „Kritéria pro pasivní domy a nízkoenergetické budovy“ (NS 3701:2012) a má třídu energetické náročnosti A. Budova má zvláště nízkou roční měrnou spotřebu energie díky, například, rekuperaci tepla z chladicího systému v obchodě a dodávce tepelné energie z vysoce účinného systému tepelného čerpadla země–voda. Elektřinu zajišťují fotovoltaické panely, které jsou umístěny na střeše [15].



Obr. 2.16 Budova SWECO [15].



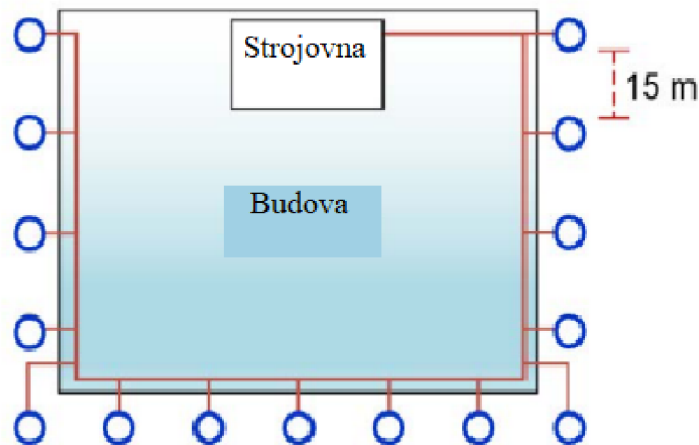
Obr. 2.17 Umístění solárních panelů na budově SWECO (pohled shora) [15].

System se skládá z jednotky tepelného čerpadla s chladivem NH_3 , vyrobeného na zakázku. Řešení je navrženo s topným výkonem 190 kW při teplotním spadu $5/48\text{ }^\circ\text{C}$ („režim vytápění“) a 195 kW chladicím výkonem při teplotním spadu $10/38\text{ }^\circ\text{C}$ („režim chlazení“). Chladivem je čpavek (NH_3 , R717) a maximální výstupní teplota z tepelného čerpadla je $48\text{ }^\circ\text{C}$. Tepelné čerpadlo je vybaveno jedním pístovým kompresorem s variabilním pohonem (VSD – 29-100 %) a vykládacím válcem (unloading cylinder) (10-28 %), což poskytuje vysokou účinnost při částečném zatížení. Vzhledem k tomu, že čpavek je toxická kapalina (B2L) se štiplavým zápachem, jednotka tepelného čerpadla a strojovna jsou navrženy v souladu s přísnými předpisy EN 378:2016 „Chladicí systémy a tepelná čerpadla – požadavky na bezpečnost a životní prostředí“. Tepelné čerpadlo je umístěné v plynotěsné odvětrávané skříni s detektorem netěsností napojeným na bezpečnostní systém a je vybavena dvojitými vysoko/nízkotlakými pojistnými ventily s odtahem na střeše [15].

Tepelné čerpadlo je napojeno na 15 vrtů (BTES) o celkové hloubce 3300 m. System dodává teplo do radiátorů, topných spirál ve vzduchotechnických jednotkách ve ventilačním

systému a systémů podlahového vytápění, předehřívá teplou užitkovou vodu (TUV) a pokrývá celý proces a potřebu prostorového chlazení budovy. Dálkové vytápění se používá při špičkovém zatížení a jako záloha [15].

Horninový zásobník zahrnuje 15 vertikálních vrtů ve skalním podloží, každý o hloubce 220 m, což dává celkovou hloubku 3300 m. Vrty jsou vrtány kolem budovy, jsou od sebe vzdáleny průměrně 15 m a zaujímají tvar písmene U (viz. obr.2.18) [15].

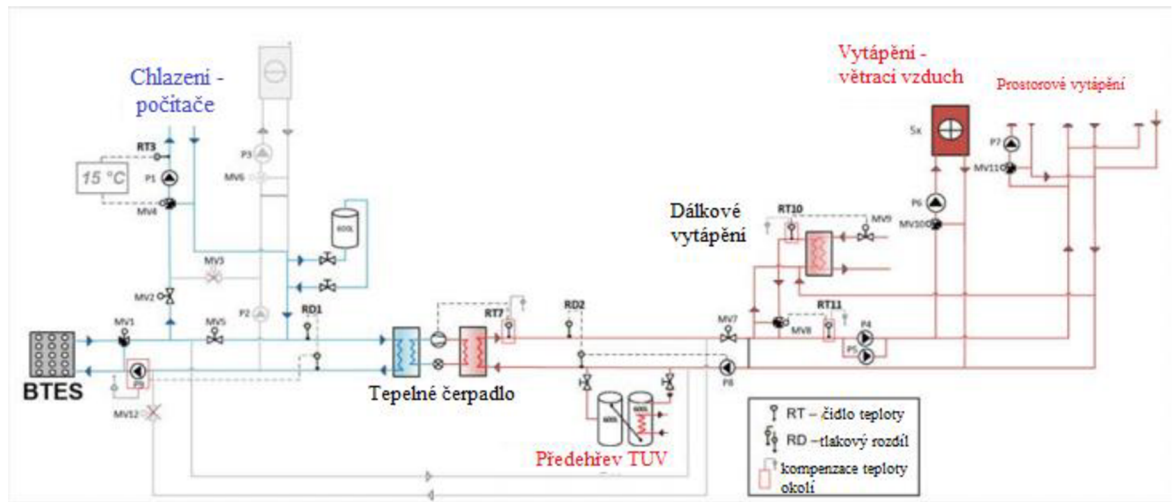


Obr. 2.18 Schematické zobrazení umístění vrtů [15].

Vzhledem k relativně velkému počtu vrtů nebyla provedena zkouška tepelné odezvy. Výpočet tepelné kapacity/výkonu BTES byl proto založen na průměrných hodnotách tepelné vodivosti podloží $W/m \cdot K$ a hodnotách tepelného odporu pro vrtný výměník tepla ($m \cdot K / W$) z jiných projektů [15].

System je provozován buď v „režimu vytápění“, nebo „režimu chlazení“ [15].

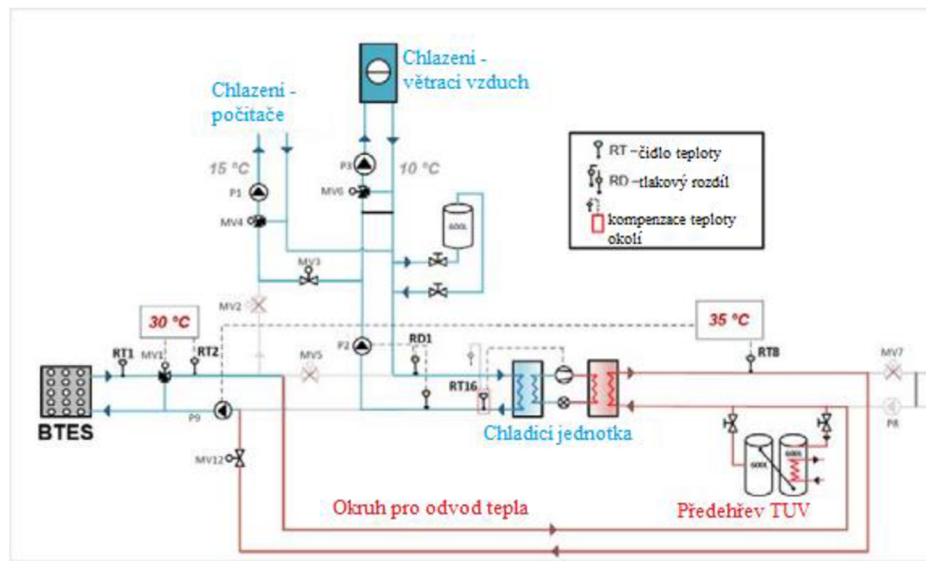
Režim vytápění (převládající požadavek na vytápění). Cirkulující voda z BTES pokrývá požadavek na procesní chlazení ("volné chlazení") předtím, než vstoupí do výparníku tepelného čerpadla. Většinu času není v budově požadavek na chlazení prostoru. Když však okolní teplota překročí $15 \text{ }^\circ\text{C}$, ventil MV3 se otevře a ventil MV5 se uzavře a požadavek na chlazení malého prostoru je pokryt relativně studenou vodou z vrtů („volné chlazení“). Voda z BTES slouží jako zdroj tepla pro tepelné čerpadlo v „režimu vytápění“. Zatížení kompresoru a tím i topný (kondenzační) výkon jednotky čpavkového tepelného čerpadla se řídí podle nastavené teploty v topném systému (kompenzace okolní teploty). Pokud čerpadlo při maximální kapacitě nemůže pokrýt potřebu tepla, teplo je dodáváno z výměníku tepla dálkového vytápění (špičkové zatížení). TUV se nejprve předehřeje kondenzačním teplem z chladicího systému obchodu s potravinami, dohřeje se vratnou vodou v otopném systému v akumulární nádrži teplé užitkové vody s integrovaným výměníkem tepla, a nakonec se dohřeje na nastavenou teplotu ($70 \text{ }^\circ\text{C}$) prostřednictvím dálkového vytápění [15].



Obr. 2.19 Výkresová schéma systému v „režimu vytápění“ – požadavek na vytápění [15].

Režim chlazení (převládající požadavek na chlazení). Pokud teplota vody z BTES (RT1) překročí $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, nelze požadavek prostorového chlazení pokrýt „volným chlazením“ z horninového zásobníku a výparníku tepelného čerpadla. TČ musí být provozováno jako kapalinový chladič. Ventil MV12 mezi topným systémem a BTES se otevře a ventil MV5 mezi výparníkem a horninovým zásobníkem se uzavře. Jelikož v tomto ročním období není požadavek na prostorové vytápění, je ventil MV7 mezi kondenzátorem a topným systémem uzavřen [15].

Zatížení kompresoru a tím i výkon chlazení (výparníku) se nyní řídí podle nastavené hodnoty teploty v chladicím systému ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$). Teplo kondenzátoru je předáváno do BTES prostřednictvím okruhu pro odvod tepla. Výkon čerpadla P9 v okruhu je řízen tak, aby udržoval výstupní teplotu z kondenzátoru $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Třicestný regulační ventil MV1 směrem k horninovému zásobníku udržuje konstantní teplotu vody (RT2) z ventilu $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, tj. konstantní teplotu zpátečky do kondenzátoru. Vzhledem k tomu, že se voda používá jako sekundární kapalina, není potřeba výměník tepla mezi kondenzátorem/topným systémem a BTES [15].



Obr. 2.20 Výkresová schéma systému v „režimu chlazení“ – požadavek na chlazení [15].

System nikdy nebyl provozován v „režimu chlazení“, protože zásobník má dostatečnou kapacitu k pokrytí potřeby chlazení i ve velmi teplých létech (např. léto 2018). To znamená, že teplota vody z BTES nikdy nepřekročila 10 °C, což je nastavená teplota pro systém chlazení prostoru [15].

Vícegenerační rodinný dům s vrtnými výměníky tepla [16]

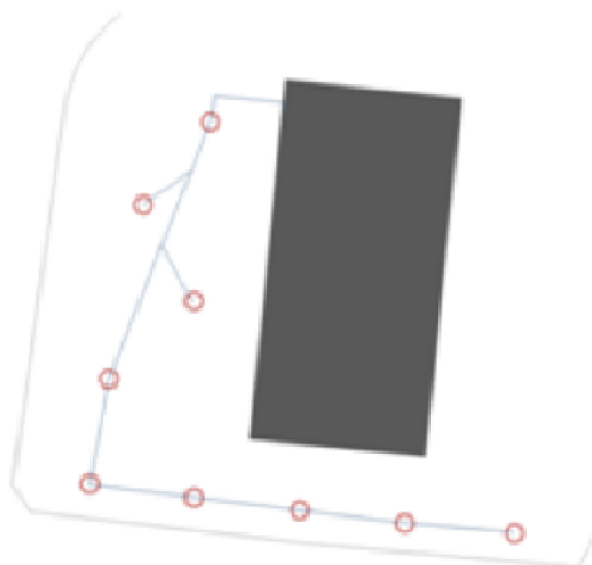
Jedná se o dva vícegenerační domy KON o celkové rozloze 1100 m², které se nachází ve městě Kostnice v Německu. Budovy byly postaveny v roce 2016 s devíti geotermálními vrty, každým o délce 100 m. Dvě tepelná čerpadla solanka-voda jsou navržena pro zásobování podlahového vytápění a pro ohřev teplé užitkové vody [16].

Dvě stavby v pevné konstrukci, každá má tři nadzemní podlaží a šest bytových jednotek. Vstup do každého domu je zajištěn vnitřním schodištěm. Oba bytové domy jsou propojeny podzemním parkovištěm, které je podsklepené. Dále jsou zde umístěny sklady a technické místnosti. Pro zásobování domů teplem jsou plánována dvě zemní tepelná čerpadla. První obsluhuje topný okruh v rozsahu nízkých teplot a druhý jako vysokoteplotní tepelné čerpadlo zajišťuje teplou vodu pro koupelnu a kuchyň. Každé ze dvou tepelných čerpadel je připojeno ke dvěma samostatným vyrovnávacím nádržím. Decentrální systém odvodu vzduchu zvyšuje komfort bydlení. Přirozené větrání okny je možné kdykoliv. Fotovoltaické moduly na střeše doplňují energetický koncept [16].



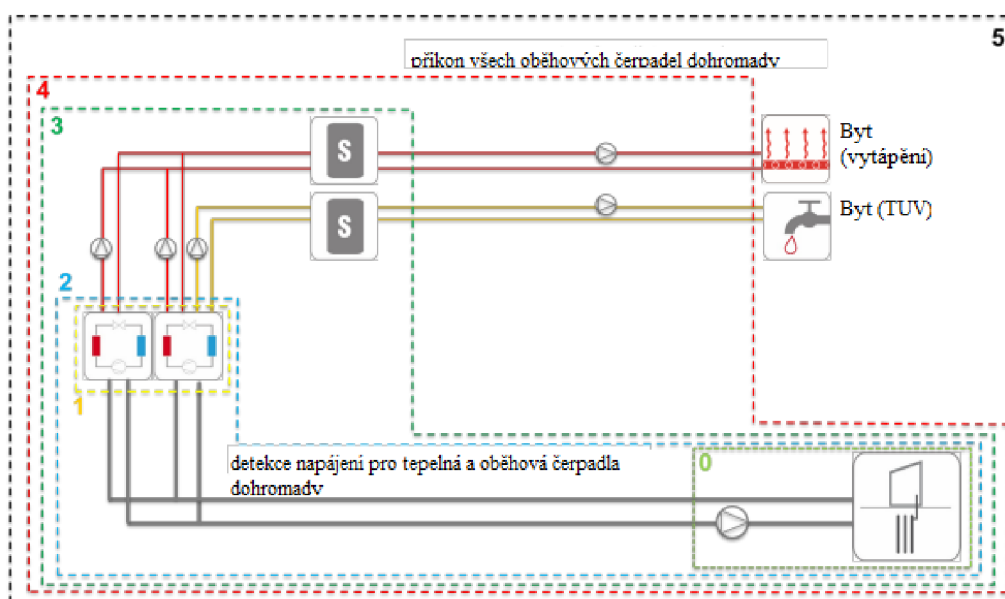
Obr. 2.21 Pohled na dvě budovy z východní strany [16].

Pole výměníku tepla geotermálního vrtu se skládá z devíti vrtů, každý o délce 100 m. Vrtné výměníky jsou rozmístěny na zeleném pásu kolem prvního domu.



Obr. 2.22 Půdorys umístění vrtů [16].

Užitečné teplo pro vytápění a ohřev užitkové vody prostřednictvím tepelných čerpadel dosahuje ročního průměru 106,5 MWh (102,1 až 111,1 MWh/a), což odpovídá specifické hodnotě 96,8 kWh/m²a. Roční průměr pro vytápění je 71,5 MWh (65,0 kWh/m²a) a pro přípravu teplé užitkové vody 35,0 MWh (31,8 kWh/m²a). Měsíční spotřeba se pohybuje mezi 1,3 až 15,7 MWh pro vytápění a 1,8 až 4,2 MWh pro TUV. Sezonní výkonnostní faktor tepleného čerpadla je 3,8 až 4,1 v režimu vytápění [16].



Obr. 2.23 Zjednodušené schéma systému pro vytápění a ohřev TUV [16].

Tato energetická koncepce je dobře realizována v budově a jejím využití. Technologie systému běží v účinném rozsahu a oproti plynovému kondenzačnímu kotli je koncept mnohem ekologičtější.

3 Realizační návrh

Pro účely výpočtu této diplomové práce byl zvolen model rodinného domu s čerpadlem země-voda. Výpočet uvažuje jeden U-smyčkový vrt o délce 140 m. Zvoleným akumulátorem je v tomto případě hornina – hlína. Ve výpočtu rovněž předpokládám, že je dům opatřen fototermitickými kolektory. V nejteplejších měsících léta se bude do vrtu pouštět teplá voda, která bude v průběhu tohoto období ohřívat zeminu.

3.1 Rodinný dům

Pro výpočet byl v diplomové práci zvolen modelový rodinný dům s umístěním v Brně. Zvolený dům se nachází ve stádiu projektu, který reálně uvažuje dané umístění.



Obr. 3.1 Model rodinného domu [20].

Tab. 3.1 Parametry rodinného domu [20].

Zastavěná plocha	89,63 m ²
Užitná plocha	72,59 m ²
Obytná plocha	48,24 m ²
Obestavěný objem	291,23 m ³
Maximální výška střechy	3,0 m
Světlá výška místnosti	2,525 m
Sklon střechy	0°
Počet obytných místností	3
Vnější rozměry domu (š x d)	9,014 m x 9,944 m

4 Výpočty

V kapitole výpočty budou popsány teoretické výpočtové vztahy, které byly použity pro určení hodnot.

4.1 Popis objektu

Pro určení tepelných ztrát byly navrženy skladby obvodových konstrukcí, typ oken a dveří, které jsou uvedeny v níže uvedených tabulkách.

Tab. 4.1 Použité materiály obvodových stěn [22], [23].

Obvodové stěny	Tloušťka δ [m]	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]
Sádrová omítka	0,02	0,47
Broušená cihla <i>Porotherm 30 Profi</i>	0,3	0,18
Tepelná izolace 200 mm <i>Isover EPS 200</i>	0,2	0,03
Perlitová omítka	0,02	0,15

Tab. 4.2 Použité materiály pro střechu [23], [24].

Střecha	Tloušťka δ [m]	Součinitel tepelné vodivosti λ [$\frac{W}{m \cdot K}$]
Hydroizolační souvrství	0,02	0,16
Skládaný systémový strop (tvoří nosnou konstrukci)	0,25	0,137
Tepelná izolace 300 mm <i>Isover LAM 30</i>	0,3	0,03
Hydroizolační souvrství	0,02	0,15

Tab. 4.3 Okna [26].

Okna	Součinitel prostupu tepla U [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]	Celková plocha oken [m ²]
Kvalitní šestikomorová Česká plastová okna VEKRA	0,78	14,19

Tab. 4.4 Dveře [26].

Okna	Součinitel prostupu tepla $U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	Celková plocha oken [m ²]
VEKRA Komfort EVO – kvalitní České plastové	0,93	4,27

Tab. 4.5 Použité materiály pro podlahu [25].

Podlaha	Tloušťka δ [m]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Hydroizolace GLASTEK	0,004	0,16
Tepelná izolace z polystyrenu tloušťky 150 mm TEPELNÁ IZOLACE KVK PARABIT EPS 150	0,15	0,035
Betonová mazanina	0,06	1,23
Kvalitní Vinylová podlaha VIVO CLICK	0,0042	0,25

Součinitele prostupu tepla pro okna a dveře jsou dány výrobcem – není tedy nutné je počítat.

4.1.1 Výpočet tepelné ztráty prostupem tepla

Výpočet tepelných ztrát je proveden zjednodušeně. Ve výpočtech jsou zohledněny tepelné ztráty přes obvodové konstrukce a tepelná ztráta větráním. Pro zjednodušení výpočtu není uvažováno se světovými stranami, nevytápěnými prostory atd. Pro výpočet tepelných ztrát je nutné zjistit hodnotu součinitele prostupu tepla.

Prvním bodem, který musíme spočítat, jsou tepelné odpory obvodových stěn, střechy a podlahy [27]:

$$R = \sum R_i = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (4.1)$$

R_i – tepelný odpor jednotlivých vrstev ve [m²·K/W];

δ_i – tloušťka vrstvy v [m];

λ_i – součinitel tepelné vodivosti ve [W/ m·K].

Jednotlivé odpory zapíšeme jako:

$$R_{stěny} = \frac{\delta_{omítky}}{\lambda_{omítky}} + \frac{\delta_{cihly}}{\lambda_{cihly}} + \frac{\delta_{iz}}{\lambda_{iz}} + \frac{\delta_{omítky}}{\lambda_{omítky}}$$

$$R_{\text{střecha}} = \frac{\delta_{\text{hydr.iz.}}}{\lambda_{\text{hydr.iz.}}} + \frac{\delta_{\text{strop}}}{\lambda_{\text{strop}}} + \frac{\delta_{\text{iz}}}{\lambda_{\text{iz}}} + \frac{\delta_{\text{hydr.iz.}}}{\lambda_{\text{hydr.iz.}}}$$

$$R_{\text{podlaha}} = \frac{\delta_{\text{hydr.iz.}}}{\lambda_{\text{hydr.iz.}}} + \frac{\delta_{\text{iz}}}{\lambda_{\text{iz}}} + \frac{\delta_{\text{bet.maz.}}}{\lambda_{\text{bet.maz.}}} + \frac{\delta_{\text{vin.podl.}}}{\lambda_{\text{vin.podl.}}}$$

Níže uvedená tabulka zobrazuje hodnoty jednotlivých tepelných odporů:

Tab. 4.6 Vypočtené hodnoty tepelných odporů.

	[m ² ·K/W]
R _{stěny}	7,73
R _{střecha}	9,57
R _{podlaha}	4,38

V dalším kroku spočítáme součinitel prostupu tepla. Součinitel prostupu tepla U vyjadřuje, kolik tepla unikne konstrukci o ploše 1 m² při rozdílu teplot jejich povrchu 1 K [27].

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_i + R_{se}}, \quad (4.2)$$

U – součinitel prostupu tepla [W/m²·K]

R_{si} – tepelný odpor mezní vzduchové vrstvy přiléhající bezprostředně k vnitřní straně konstrukce [m²·K/W] (lze dosadit konstanty 0,13 pro stěnu, 0,10 pro střechu nebo 0,17 pro podlahu);

R_{se} – tepelný odpor mezní vzduchové vrstvy přiléhající bezprostředně k venkovní straně konstrukce [m²·K/W] (lze dosadit konstantu 0,04).

Součinitele prostupu tepla pro jednotlivé konstrukce zapíšeme jako:

$$U_{\text{stěny}} = \frac{1}{R_{si} + R_{\text{stěny}} + R_{se}} = \frac{1}{0,13 + 7,73 + 0,04} = 0,127 \frac{W}{m^2 \cdot K};$$

$$U_{\text{střecha}} = \frac{1}{R_{si} + R_{\text{střecha}} + R_{se}} = \frac{1}{0,10 + 9,57 + 0,04} = 0,103 \frac{W}{m^2 \cdot K};$$

$$U_{\text{podlaha}} = \frac{1}{R_{si} + R_{\text{podlaha}} + R_{se}} = \frac{1}{0,17 + 4,38 + 0,04} = 0,214 \frac{W}{m^2 \cdot K};$$

Po dosazení správných hodnot jednotlivé součinitele prostupu tepla vypadají následovně:

Tab. 4.7 Vypočtené hodnoty součinitele prostupu tepla.

	[W/m ² ·K]
U _{stěny}	0,127
U _{střecha}	0,103
U _{podlaha}	0,214
U _{okna}	0,93
U _{dveře}	0,78

Dalším krokem je určení tzv. měrné tepelné ztráty H_t :

$$H_t = A_i \cdot (U_i + \Psi) \cdot b, \quad (4.3)$$

A – plocha konstrukce budovy [m^2];

b – korekční součinitel;

Ψ – lineární činitel prostupu tepla [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$].

Vzhledem k tomu, že ve výpočtech tepelných ztrát není uvažováno s tepelnými mosty, je zaveden lineární činitel prostupu tepla, který se rovná $0,02 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$.

Korekční součinitel vyjadřuje odlišnost návrhových teplot v exteriéru a ve vytápěných prostorech. Pro běžné vnitřní prostory oproti běžným venkovním prostorům je korekční součinitel vždy 1, protože počítáme stále se stejnou vnitřní i venkovní teplotou. Pro podlahu se korekční součinitel bude lišit, jelikož od země jde teplo oproti běžné venkovní výpočtové teplotě. Pomocí níže uvedeného vzorce spočítáme korekční součinitel pro podlahu [27]:

$$b = \frac{t_i - t_{e1}}{t_i - t_{e2}}, \quad (4.4)$$

t_i – vnitřní teplota v [$^{\circ}\text{C}$];

t_{e1} – skutečná teplota na straně exteriéru [$^{\circ}\text{C}$];

t_{e2} – výpočtová venkovní teplota [$^{\circ}\text{C}$].

Ve výpočtech uvažuji s teplotami:

$t_i = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

$t_{e1} = -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

$t_{e2} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – výpočtová teplota zeminy pod podlahou.

Korekční součinitel pro podlahu se tedy rovná:

$$b = \frac{t_i - t_{e1}}{t_i - t_{e2}} = \frac{20 - (-12)}{20 - 5} = 0,47$$

Dále spočítáme měrné tepelné ztráty přes jednotlivé konstrukce:

$$H_{t, \text{stěny}} = A_{\text{stěny}} \cdot U_{\text{stěny}} \cdot b_{\text{stěny}} = 95,29 \cdot (0,127 + 0,02) \cdot 1 = 13,97 \frac{\text{W}}{\text{K}};$$

$$H_{t, \text{střecha}} = A_{\text{střecha}} \cdot U_{\text{střecha}} \cdot b_{\text{střecha}} = 89,64 \cdot (0,103 + 0,02) \cdot 1 = 11,02 \frac{\text{W}}{\text{K}};$$

$$H_{t, \text{podlaha}} = A_{\text{podlaha}} \cdot U_{\text{podlaha}} \cdot b_{\text{podlaha}} = 89,64 \cdot (0,214 + 0,02) \cdot 0,47 = 9,83 \frac{\text{W}}{\text{K}};$$

$$H_{t, \text{okna}} = A_{\text{okna}} \cdot U_{\text{okna}} \cdot b_{\text{okna}} = 14,19 \cdot (0,78 + 0,02) \cdot 1 = 13,48 \frac{\text{W}}{\text{K}};$$

$$H_{t, \text{dveře}} = A_{\text{dveře}} \cdot U_{\text{dveře}} \cdot b_{\text{dveře}} = 4,27 \cdot (0,93 + 0,02) \cdot 1 = 3,41 \frac{\text{W}}{\text{K}}.$$

Spočítáme celkovou měrnou tepelnou ztrátu budovy:

$$H_{t,celkem} = \sum H_t, \quad (4.5)$$

$$H_{t,celkem} = H_{stěny} + H_{střecha} + H_{podlaha} + H_{okna} + H_{dveře} = 51,70 \frac{W}{K}$$

Když známe celkovou měrnou tepelnou ztrátu rodinného domu, můžeme vypočítat celkovou tepelnou ztrátu prostupem:

$$Q_t = H_{t,celkem} \cdot (t_i - t_{e1}), \quad (4.6)$$

Q_{RD} – celková tepelná ztráta rodinného domu prostupem tepla ve W.

$$Q_t = 51,70 \cdot (20 - (-12)) = 1654,54 W$$

4.1.2 Výpočet tepelné ztráty větráním

Tepelná ztráta větráním je závislá na výši objemového toku vzduchu, to znamená množství vzduchu v m³/h proudícího mezi interiérem a exteriérem [27].

$$Q_v = \frac{V \cdot n}{3600} \cdot \rho \cdot c \cdot (t_i - t_{e2}), \quad (4.7)$$

Q_v – tepelná ztráta větráním [W];
 V – objem vzduchu v domě [m³];
 n – množství vzduchu vyměněné za jednu hodinu;
 ρ – hustota vzduchu [kg/m³];
 c – měrná tepelná kapacita vzduchu [J/kg·K].

$$Q_v = \frac{268,91 \cdot 0,5}{3600} \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot (20 - (-12)) = 1448,51 W$$

Celkovou tepelnou ztrátu rodinného domu spočítáme sečtením tepelné ztráty prostupem a tepelné ztráty větráním:

$$Q_{RD} = Q_t + Q_v, \quad (4.8)$$

$$Q_{RD} = 1654,54 + 1448,51 = 3103,05 W = 3,10 kW$$

4.1.3 Výpočet potřeby tepla na vytápění a ohřev TUV

Tento výpočet slouží ke zjištění celkového orientačního množství energie, které potřebujeme pro vytápění i energii na pokrytí teplených ztrát větráním a na přípravu teplé užitkové vody (TUV). Ve výpočtu je zohledněna lokalita, délka otopného období a další podmínky [28].

Roční potřebu tepla na vytápění spočítáme podle vzorce [28]:

$$Q_{vyt,r} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_{RD} \cdot D}{(t_i - t_{e1})} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3}, \quad (4.9)$$

$Q_{vyt,r}$ – roční potřeba tepla na vytápění [MWh/rok];

ε – opravný součinitel;

η_o – účinnost obsluhy, respektive možnosti regulace soustavy, volí se v rozmezí 0,9 až 1,0;

η_r – účinnost rozvodu vytápění, volí se v rozmezí 0,95 až 0,98;

D – vytápěcí denostupně [K.dny];

t_{e1} – teplota během otopného období [°C].

Opravný součinitel se určí dle vzorce [28]:

$$\varepsilon = e_i \cdot e_t \cdot e_d, \quad (4.10)$$

e_i – nesoučasnost tepelné ztráty větráním a tepelné ztráty prostupem. Součinitel se počítá jako podíl tepelné ztráty prostupem k celkové tepelné ztrátě a pohybuje běžně v rozmezí 0,6 až 0,9 [28];

e_t – snížení teploty v místnosti během dne, respektive noci. V některých objektech je možné vlivem vhodné regulace snížit teplotu po určitou část dne, volí se v rozmezí 0,8 až 1,0 [28].

e_d – zkrácení doby vytápění u objektu s přestávkami v provozu. Volí se v rozmezí 0,8 až 1,0. Pro budovy se sedmidenním provozem 1,0; pro budovy se šestidenním provozem přes 0,9 a pro budovy s pětidenním provozem 0,8 [28]:

$$\varepsilon = 0,75 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,675$$

Spočítáme vytápěcí denostupně:

$$D = d \cdot (t_i - t_{es}), \quad (4.11)$$

d – délka otopného období, pro Brno je tato hodnota 232 dní;

t_{es} – průměrná teplota během otopného období.

$$D = 232 \cdot (20 - 4,4) = 3619,2 \text{ K.dny}$$

Roční potřebu tepla na vytápění spočítáme podle vzorce [28]:

$$Q_{vyt,r} = \frac{0,675}{0,9 \cdot 0,98} \cdot \frac{24 \cdot 3,27 \cdot 3103,05}{(20 - (-12))} \cdot 3,6 \cdot 10^{-3} = 23,21 \frac{\text{GJ}}{\text{rok}} = 6,45 \frac{\text{MWh}}{\text{rok}}$$

Denní potřebu tepla na ohřev teplé užitkové vody vypočítáme jako [28]:

$$Q_{TUV,d} = (1 + z) \cdot \frac{\rho_v \cdot c_v \cdot V_{2p} \cdot (t_2 - t_1)}{3600}, \quad (4.12)$$

$Q_{TUV,d}$ – denní potřeba tepla na ohřev TUV [kWh];

ρ_v – hustota vody [kg/m^3];

c_v – měrná tepelná kapacita vody [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$];

V_{2p} – celková potřeba teplé vody za 1 den [m^3/den]. U staveb pro bydlení 0,082 [$\text{m}^3/\text{osobu den}$];

z – koeficient energetických ztrát systému pro přípravu teplé vody, běžně pro rozvody v nových stavbách $z = 0,5$ [-];

t_1 – teplota studené vody [$10 \text{ }^\circ\text{C}$];

t_2 – teplota ohřáté vody [$55 \text{ }^\circ\text{C}$].

$$Q_{TUV,d} = (1 + 0,5) \cdot \frac{1000 \cdot 4,186 \cdot 0,082 \cdot 4 \cdot (55 - 10)}{3600} = 25,74 \text{ kWh}$$

Roční potřeba tepla na ohřev TUV se rovná [28]:

$$Q_{TUV,r} = Q_{TUV,d} \cdot d + 0,8 \cdot Q_{TUV,d} \cdot \frac{(t_2 - t_{svl})}{(t_2 - t_{svz})} \cdot (N - d), \quad (4.13)$$

t_{svl} – teplota studené vody v letě [$15 \text{ }^\circ\text{C}$];

t_{svz} – teplota studené vody v zimě [$5 \text{ }^\circ\text{C}$];

N – počet pracovních dní soustavy v roce.

$$Q_{TUV,r} = 25,74 \cdot 232 + 0,8 \cdot 25,74 \cdot \frac{(55 - 15)}{(55 - 5)} \cdot (365 - 232) = 29,4 \frac{\text{GJ}}{\text{rok}} = 8,16 \frac{\text{MWh}}{\text{rok}}$$

Výsledné hodnoty z výpočtu jsou pro přehlednost uvedené v Tab.4.8:

Tab. 4.8 Výsledné hodnoty

Celková tepelná ztráta objektu Q_{RD} [kW]	Roční potřeba tepla na vytápění $Q_{vyt,r}$ [MWh/rok]	Roční potřeba tepla na ohřev TUV [MWh/rok]
3,27	6,79	8,16

4.2 Výpočet potřebného výkonu tepelného čerpadla a délky zemního vrtu

Následně vypočítáme potřebný výkon tepelného čerpadla země-voda a nutnou hloubku vrtu. Konstrukce vrtu je tvořena odvrтанým otvorem o průměru 125 až 165 mm. Do otvoru realizovaného do konečné hloubky (60 až 200 m) se instaluje plastový výměník, který je tvořený uzavřeným okruhem potrubí. V našem případě tento výměník tvoří jednoduchá plastová trubka U-tvaru. Návrh vrtu provedeme na základě výkonu TČ [29].

Potřebný topný výkon tepelného čerpadla vypočítáme pomocí hodnot potřeb tepla na vytápění a ohřev TUV:

$$\phi = \frac{Q_{vyt,r} + Q_{TUV,r}}{\tau_{rok}} = \frac{6,45 \cdot 1000 + 8,16 \cdot 1000}{2400} = 6,09 \text{ kW} , \quad (4.14)$$

τ_{rok} – předpokládaná doba provozu TČ [h/rok].

Pro využití energie země je navrženo tepelné čerpadlo země-voda od firmy Viessman Vitocal 222-G 201.A06 pro ohřev TUV a vytápění s integrovaným 220 litrovým zásobníkem teplé vody. Teplo je odebíráno ze země pomocí vertikálního vrtu, do kterého je umístěna jednoduchá U-trubka. Tepelné čerpadlo bylo zvoleno dle jednoduchého výpočtu, který bude znázorněn v další kapitole [21].

Tab. 4.9 Technické údaje tepelného čerpadla Viessman Vitocal 222-G 201.A06 [21].

Jmenovitý tepelný výkon	6,2 kW
Chladicí výkon	4,9 kW
Typ	Země-voda
Elektrický příkon	1,36 kW
Topný faktor	4,5
Min. a Max. teplota solanky	-5/15 °C
Max. výstupní teplota topné vody	65 °C
Min. objemový průtok solanky $\Delta T=10$ K	820 l/h
Min. objemový průtok topné vody	600 l/h
Chladivo	R410
Zásobník teplé vody	220 l



Obr. 4.1 Tepelné čerpadlo Vitocal 222-G 201.A06 [21].

V České republice se dimenzování primárního okruhu tepelných čerpadel do výkonu 12 kW řídí podle německé směrnice VDI 4650 [29].

Tab. 1 Specifické směrné hodnoty pro 1 m vrtu

Podloží	Specifický odběrový výkon	
	Pro 1 800 h	Pro 2 400 h
Všeobecné orientační hodnoty		
Špatné podloží (suchý sediment) ($\lambda < 1,5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	25 W/m	20 W/m
Normální podloží z nezapevněných hornin a vodou nasycený sedi- ment ($\lambda < 1,5\text{--}3,0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	60 W/m	50 W/m
Nezapevněné horniny s vysokou tepelnou vodivostí ($\lambda > 3,0 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$)	84 W/m	70 W/m
Jednotlivé horniny		
Štěrka, písek, suchý	< 25 W/m	< 20 W/m
Štěrka, písek, vodonosný	65–80 W/m	55–65 W/m
Při silném průtoku spodní vody do štěrku a písku, pro jednotlivá zařízení		
Hlína, jíl, vlhké	35–50 W/m	30–40 W/m
Vápenec (masiv)	55–70 W/m	45–60 W/m
Pískovec	65–80 W/m	55–65 W/m
Kyselé magmatity (např. granit)	65–80 W/m	55–70 W/m
Zásadité magmatity (např. bazalt)	40–65 W/m	35–55 W/m
Rula	70–85 W/m	60–70 W/m
Hodnoty mohou značně kolísat, jsou ovlivněny jevy v horninách, jako jsou pukání, břídlíčnatost a zvětrání		

Obr. 4.2 Specifické směrné hodnoty pro 1 m vrtu dle VDI 4650 [29].

V dalším kroku vypočítáme množství odebírané energie z vrtu [29]:

$$Q_{ex} = \frac{(Q_{vyt,r} + Q_{TUV,r})}{\Phi_{chl}} \cdot \Phi_{top}, \quad (4.15)$$

Φ_{top} – topný výkon tepelného čerpadla [kW];

Φ_{chl} – chladicí výkon tepelného čerpadla [kW].

$$Q_{ex} = \frac{(6,45 \cdot 1000 + 8,16 \cdot 1000)}{4,9} \cdot 6,2 = 18486,13 \text{ kWh/rok}$$

Dle geodetických map se větší část města Brna nachází na čtvrtohorních horninách – písky, hlíny, štěrky atd. Ve svých výpočtech uvažuji s horninou – hlína. Z tab.4.2 specifický odběrový tepelný tok $q_l=35 \text{ W/m}$ [29].

Stanovíme délku vrtu ze vztahu [30]:

$$L = \frac{1000 \cdot \Phi_{chl}}{q_l}, \quad (4.16)$$

Φ_{chl} – chladicí výkon tepelného čerpadla [kW];

q_l – specifický odběrový tepelný tok [W/m].

$$L_{vrt} = \frac{1000 \cdot 4,9}{35} = 140 \text{ m}$$

Dále určíme specifickou roční odebranou energii:

$$Q_{rok} = \frac{Q_{ex}}{L_{vrt}} = \frac{18920,27}{140} = 132,04 \frac{\text{kWh}}{\text{m}} \text{ za rok} \quad (4.17)$$

Množství odebraného tepla za rok se musí pohybovat v rozmezí 100 až 150 kWh/m za rok, což se dle výpočtu shoduje s hodnotami ze směrnice [30].

4.3 Výpočet tepelných parametrů vrtu

Vzhledem k tomu, že v trubce tepelného výměníku proudí teplá voda, teplo se bude šířit konvekcí. Proto musíme spočítat základní hodnoty pro konvekční přenos tepla. V následujících podkapitolách vypočítáme základní parametry pro přenos tepla konvekcí.

4.3.1 Výpočtové parametry

Pro další výpočet je nutné znát základní hodnoty, jako je měrná tepelná kapacita, hustota, tepelná vodivost apod. Pro potrubí, které bude sloužit jako výměník tepla, zeminu a proudící kapalinu jsou hodnoty zapsané v níže uvedených tabulkách.

Tab. 4.10 Výpočtové parametry hlíny.

Název	Označení [měrná jednotka]	Hodnota
Tepelná vodivost	λ_{hl} [W/m·K]	1,5
Objemová tepelná kapacita $\rho \cdot c \cdot 10^{-6}$	$c_{v,hl}$ [J/m ³ ·K]	3
Měrná tepelná kapacita	$c_{p,hl}$ [J/kg·K]	920
Hustota	ρ_{hl} [kg/ m ³]	2000

Obvykle se jako vrtný výměník tepla používá jednoduchá plastová trubka v U-tvaru. Pro výpočet je určena trubka PE-RC 32×2,9 mm PN 16 (Polyethylen). Další parametry materiálu trubky jsou popsány v Tab.4.11:

Tab. 4.11 Výpočtové parametry PE-RC trubky.

Název	Označení [měrná jednotka]	Hodnota
Vnější průměr trubky	$d_{tr,vnější}$ [m]	0,032
Vnitřní průměr trubky	$d_{tr,vnitřní}$ [m]	0,026
Tloušťka stěny trubky	δ_{tr} [m]	0,003
Hustota	ρ_{tr} [kg/ m ³]	940
Tepelná vodivost	λ_{tr} [W/m·K]	0,4

Vrtem bude cirkulovat teplá voda o teplotě 40 °C. V následující tabulce jsou uvedeny parametry vody při této teplotě.

Tab. 4.12 Výpočtové parametry vody při 40 °C [31]

Název	Označení [měrná jednotka]	Hodnota
Tepelná vodivost	λ_{vody} [W/m·K]	0,633
Kinematická viskozita	$\nu \cdot 10^6$ [m ² /s]	0,658
Dynamická viskozita	$\mu \cdot 10^6$ [Pa/s]	658,026
Měrná tepelná kapacita	$c_{p,\text{voda}}$ [J/kg·K]	4175
Hustota	ρ_{voda} [kg/ m ³]	992,2

4.3.2 Výpočet součinitele přestupu tepla

Zemní vrt je tvořen otvorem o hloubce 140 m, do kterého je zavedena jednoduchá U smyčka. Uvnitř trubky proudí voda o teplotě 40 °C. Stvol vrtu je vyplněn suchou injektážní směsí ThermoCem s tepelnou vodivostí $\lambda_{\text{vrt}}=2$ W/m·K, která je určena k provádění hlubinných vrtů pro tepelná čerpadla země-voda. Uvnitř trubky se teplo přenáší pomocí konvekce. Hlavní veličina, která charakterizuje přenos tepla konvekce, je součinitel přestupu tepla α .

Pro konvekční přenos tepla se součinitel α vypočítá pomocí vztahu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{voda}}}{d_{\text{char.}}}, \quad (4.18)$$

Nu – Nusseltovo bezrozměrné číslo [-];

λ_{voda} – součinitel tepelné vodivosti vody [W/m·K];

$d_{\text{char.}}$ – charakteristický rozměr [m].

Pro výběr vhodného vzorce pro výpočet Nusseltového čísla je nutné na začátku určit typ proudění kapaliny. Pro určení typu proudění kapaliny musíme spočítat hodnotu Reynoldsova čísla:

$$Re = \frac{v_{\text{voda}} \cdot d_{\text{char.}}}{\nu_{\text{vody}}}, \quad (4.19)$$

v_{voda} – rychlost proudění vody v trubce [m/s];

ν_{voda} – kinematická viskozita vody [m²/s].

Všechny potřebné hodnoty pro určení Reynoldsova čísla nám jsou známy. Rychlost proudění vody v trubce v celém výpočtu uvažujeme $v_{\text{voda}} = 1$ m/s. Charakteristický rozměr je vnitřní průměr trubky $d_{\text{tr,vnitřní}}$.

$$Re = \frac{1 \cdot 0,026}{0,658 \cdot 10^{-6}} = 39513,68$$

$Re > 4000$ – turbulentní proudění.

Pro turbulentní proudění v celém potrubí o průměru d se Nusseltovo číslo vypočítá pomocí Dittus-Boelterovy rovnice:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n, \quad (4.20)$$

Re – Reynoldsovo bezrozměrné číslo;

Pr – Prandtlovo bezrozměrné číslo;

$n = 0,35$.

$$Nu = 0,023 \cdot 39513,68^{0,8} \cdot 4,36^{0,35} = 183,21$$

Nyní máme spočítány všechny parametry, abychom zjistili součinitel přestupu tepla dle vztahu 4.18:

$$\alpha = \frac{183,21 \cdot 0,633}{0,026} = 4460,43 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

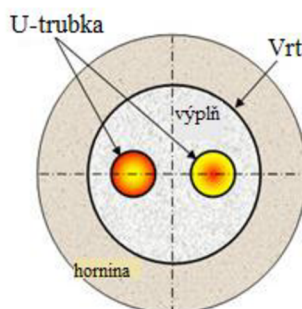
4.3.3 Výpočet tepelného odporu vrtu

Návrhové rovnice pro dimenzování zemního výměníku tepla mají čtyři členy pro tepelný odpor na jednotku délky vrtání (nikoli jednotkovou délku potrubí). Tři z nich zahrnují odpor země. Mají formu ustálených hodnot, ale ve skutečnosti jsou odvozeny z přechodných rychlostí tepla během nejkritičtějších období požadavků na chlazení a vytápění budovy. Zbývající veličina je ekvivalentní tepelný odpor vývrtu (R_{vrt}). Protože má kapalina uvnitř smyčky, potrubí a výplňového materiálu velmi malou tepelnou hmotnost ve srovnání s okolní zemí, lze R_{vrt} považovat za konstantní (ustálenou) hodnotu. Obrázek 4.3 představuje příčný řez typickým vrtem s U-trubkovým výměníkem tepla. Tepelný odpor zemního výměníku tepla zohledňuje účinky odporu potrubí a odpor výplňového materiálu mezikruží vrtu [32]:

$$R_{vrt} = R_p + R_{vm}, \quad (4.21)$$

R_p – tepelný odpor potrubí [$m \cdot K / W$];

R_{vm} – tepelný odpor výplňového materiálu [$m \cdot K / W$].



Obr. 4.3 Příčný řez vrtu s U-trubkou.

Odpor potrubí zahrnuje odpor konvekčního filmu tekutiny a vodivý odpor stěn potrubí. Kontaktní odpory mezi stěnami potrubí a materiálem jsou zanedbatelné ve srovnání s vysokým odporem plastových stěn potrubí a prstencových záливоk. Pro jednoduchou U-trubku je tepelný odpor [32]:

$$R_p = \frac{R_{konv.} + R_{tr}}{2}, \quad (4.22)$$

R_{konv} – tepelný odpor konvekce uvnitř trubky [$m \cdot K / W$];

R_{tr} – tepelný odpor mezi stěnou trubky a výplní vrtu [$m \cdot K / W$].

Tepelný odpor konvekčního filmu kapaliny popíšeme vztahem [32]:

$$R_{konv} = \frac{1}{\pi \cdot d_{tr,vnitřní} \cdot \alpha_{voda}}, \quad (4.23)$$

$d_{tr,vnitřní}$ – vnitřní průměr trubky [m];

α_{voda} – součinitel přestupu tepla [$W/m^2 \cdot K$];

$$R_{konv} = \frac{1}{\pi \cdot 0,026 \cdot 4460,43} = 0,00274 \frac{m \cdot K}{W}$$

Odpor mezi stěnou trubky a výplní vrtu se dá vypočítat dle vztahu pro složenou válcovou stěnu [32]:

$$R_{tr} = \frac{\ln\left(\frac{d_{tr,vnější}}{d_{tr,vnitřní}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{voda}}, \quad (4.24)$$

$d_{tr,vnější}$ – vnější průměr trubky [m];

λ_{voda} – součinitel tepelné vodivosti vody [$W/m \cdot K$].

$$R_{tr} = \frac{\ln\left(\frac{0,032}{0,026}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,633} = 0,08262 \frac{m \cdot K}{W}$$

Celkový tepelný odpor R_p se rovná:

$$R_p = \frac{0,00274 + 0,08262}{2} = 0,04268 \frac{m \cdot K}{W}$$

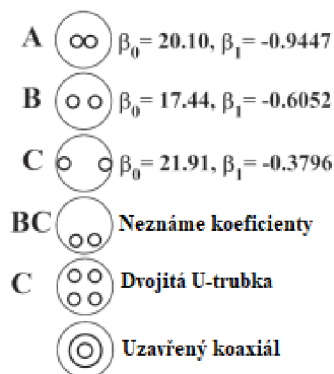
Korelace pro tepelný odpor záливоk vrtu byla vyvinuta pomocí korelací tvarových faktorů (Remund 1999) [32]:

$$R_{vm} = \left[\beta_0 \cdot \left(\frac{d_{vrt}}{d_{tr,vnější}} \right)^{\beta_1} \cdot \lambda_{vrt} \right]^{-1}, \quad (4.25)$$

β_0, β_1 – koeficienty;

d_{vrt} – průměr vrtu [m].

Koeficienty pro rovnici 4.24 byly vyvinuty pro tři umístění trubek, jak je znázorněno na Obr.4.4. Dle prvního znázornění umístění trubek ve vrtu (A) jsou trubky vystředěny ve vrtu a jsou ve vzájemném kontaktu. Druhým možným umístěním trubek (B) je jejich vystředění a rozmístění rovnoměrně ve vrtu. Posledním možným rozmístěním, pro který byl vyvinut koeficient je možnost (C), kdy jsou trubky vystředěny a zároveň jsou v kontaktu se stěnou vrtu. Nejpravděpodobnější umístění U-trubic je BC – avšak koeficienty pro toto umístění nejsou k dispozici. Podobný, ale o něco podrobnější přístup byl vyvinut Hellströmem (1991) a aplikován na návrhový postup (Philippe et al.2010). Protože skutečná instalovaná umístění U-trubek nelze určit, i když jsou instalovány rozpěrky, je přesný výpočet hodnot odporu vrtání poněkud nejistý. Je možné použít výsledky zkoušek tepelných vlastností pro výpočet odporu vrtu, pokud jsou známy rozměry U-trubice, vodivost zálivky a průměr vrtu (Kavanaugh 2010) [32].



Obr. 4.4 Tvarové faktory odporu vrtu pro umístění U-trubice [32].

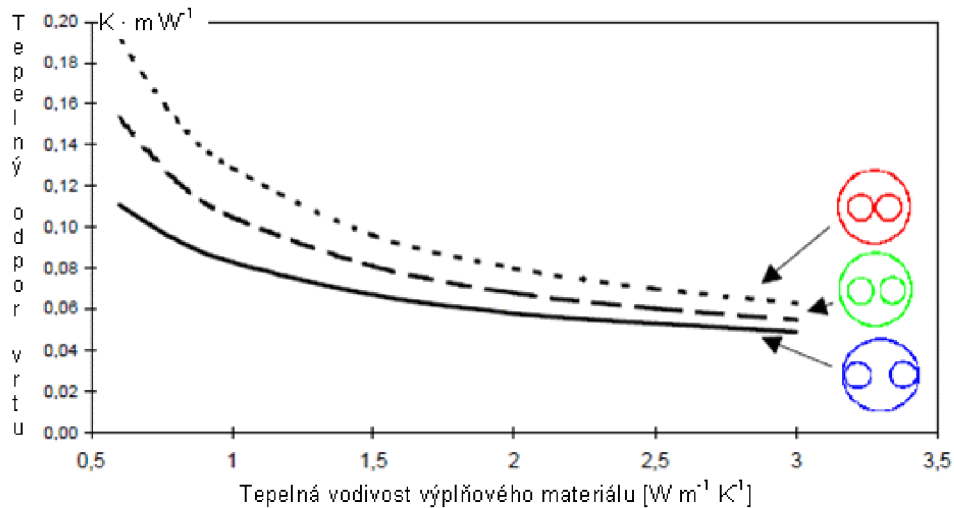
Ve diplomové práci uvažuji z umístění typu (B), takže $\beta_0 = 17,44$, $\beta_1 = -0,6052$. Průměr vrtu je většinou v rozmezí 125-160 mm. Pro výpočet je navržen průměr $d_{vrt} = 125$ mm. Nyní spočítáme tepelný odpor výplně vrtu dle vzorce 4.24:

$$R_{vm} = \left[17,44 \cdot \left(\frac{0,125}{0,032} \right)^{-0,6052} \cdot 2 \right]^{-1} = 0,0654 \frac{m \cdot K}{W}$$

Celkový tepelný odpor vrtu R_{vrt} se rovná:

$$R_{vrt} = 0,04268 + 0,0654 = 0,10808 \frac{m \cdot K}{W}$$

Na níže uvedeném obrázku jsou zakresleny střední hodnoty tepelného odporu vrtu závislého na tvaru umístění trubek ve vrtu a součiniteli tepelné vodivosti výplňového materiálu. Horní křivka odpovídá často praktikovanému zapaštění těsně svázaných trubek, prostřední křivka odpovídá zapaštění nesvázaných trubek a spodní křivka znázorňuje zapaštění trubek uchycených do speciálních rozpěrek, aby se udržovaly, co nejdále od sebe u protějších stěn vrtu [33]:

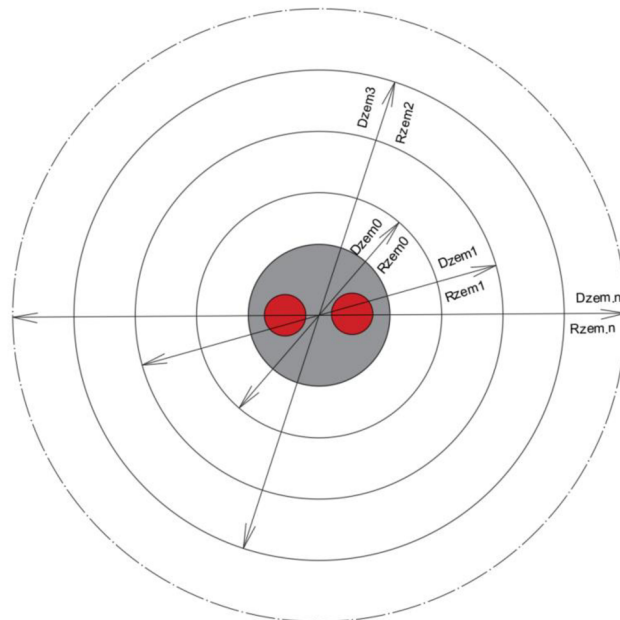


Obr. 4.5 Tepelný odpor vrtu jako závislost na tepelné vodivosti výplně vrtu [33].

Jak vidíme z Obr.4.5, hodnota vypočítaného tepelného odporu vrtu přibližně odpovídá hodnotě, kterou můžeme zjistit graficky. Tím spočítanou hodnotu považuji za správnou.

4.3.4 Výpočet tepelných odporů zeminy

Tepelný odpor zeminy spočítáme stejně jako pro složenou válcovou stěnu. V diplomové práci uvažuji s dvaceti vrstvami zeminy. Průměry zeminy jsou v rozmezí 0,5 až 20,5 m s krokem 1 m. Na Obr.4.6 jsou znázorněny první vrstvy zeminy jako příklad a jednotlivé tepelné odpory.



Obr. 4.6 Příklad umístění vrtu a okolní horniny.

Jak již bylo uvedeno jako zeminu ve výpočtech uvažuji hlínu. Tepelná vodivost hlíny je $\lambda_{hl}=1,5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Délka vrtu pro výpočet odporů je 1 m. Dle Obr.4.6 můžeme říct, že v kalkulaci prvního odporu $R_{zeminy,0}$ uvažujeme tepelný odpor vrtu a vzorec bude vypadat následovně:

$$R_{zeminy,0,5} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,1}}{d_{vrt}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}}, \quad (4.26)$$

$d_{zeminy,1}$ – průměr první vrstvy zeminy [m];
 d_{vrt} – průměr vrtu [m];
 L – délka [m];
 λ_{hl} – součinitel tepelné vodivosti zeminy [W/m·K].

$$R_{zeminy,0,5} = \frac{\ln\left(\frac{0,5}{0,125}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5} = 0,14709 \frac{m \cdot K}{W}$$

Odpor další vrstvy už uvažuje s průměrem prvního „válce“ zeminy a každý další odpor se bude počítat stejným způsobem. Rovnice pro výpočet dalších vrstev se zapíše jako:

$$R_{zeminy,n} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,n}}{d_{zeminy,n-1}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}} \quad (4.27)$$

Indexy v dalších rovnicích znamenají průměr jednotlivých vrstev zeminy. Jako příklad spočítáme rovnici 4.25 pro následující pět vrstev:

$$R_{zeminy,1,5} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,1,5}}{d_{zeminy,0,5}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}} = \frac{\ln\left(\frac{1,5}{0,5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5} = 0,11657 \frac{m \cdot K}{W};$$

$$R_{zeminy,2,5} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,2,5}}{d_{zeminy,1,5}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}} = \frac{\ln\left(\frac{2,5}{1,5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5} = 0,0542 \frac{m \cdot K}{W};$$

$$R_{zeminy,3,5} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,3,5}}{d_{zeminy,2,5}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}} = \frac{\ln\left(\frac{3,5}{2,5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5} = 0,0357 \frac{m \cdot K}{W};$$

$$R_{zeminy,4,5} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,4,5}}{d_{zeminy,3,5}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}} = \frac{\ln\left(\frac{4,5}{3,5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5} = 0,02667 \frac{m \cdot K}{W};$$

$$R_{zeminy,5,5} = \frac{\ln\left(\frac{d_{zeminy,5,5}}{d_{zeminy,4,5}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot \lambda_{hl}} = \frac{\ln\left(\frac{5,5}{4,5}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1,5} = 0,02129 \frac{m \cdot K}{W};$$

Výpočet tepelných odporů dále pokračuje stejným způsobem. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.13:

Tab. 4.13 Výsledné hodnoty jednotlivých tepelných odporů.

Průměr $d_{zeminy,n}$ [m]	Označení	R[m·K/W]
0,5	R _{zeminy,0,5}	0,14709
1,5	R _{zeminy,1,5}	0,11657
2,5	R _{zeminy,2,5}	0,05420
3,5	R _{zeminy,3,5}	0,03570
4,5	R _{zeminy,4,5}	0,02667
5,5	R _{zeminy,5,5}	0,02129
6,5	R _{zeminy,6,5}	0,01772
7,5	R _{zeminy,7,5}	0,01518
8,5	R _{zeminy,8,5}	0,01328
9,5	R _{zeminy,9,5}	0,01180
10,5	R _{zeminy,10,5}	0,01062
11,5	R _{zeminy,11,5}	0,00965
12,5	R _{zeminy,12,5}	0,00885
13,5	R _{zeminy,13,5}	0,00817
14,5	R _{zeminy,14,5}	0,00758
15,5	R _{zeminy,15,5}	0,00708
16,5	R _{zeminy,16,5}	0,00663
17,5	R _{zeminy,17,5}	0,00624
18,5	R _{zeminy,18,5}	0,00590
19,5	R _{zeminy,19,5}	0,00559
20,5	R _{zeminy,20,5}	0,00531

Jednotlivé tepelné odpory zeminy a odpor vrtu budou dále sloužit pro výpočet tepelných toků v zemině.

5 Výpočtový návrh akumulátoru tepelné energie

V této kapitole bude popsána energetická bilance akumulačního systému. Jako tepelný akumulátor bude využívána hornina v okolí vrtu. Předpokládá se, že v létě během nejteplejších dnů bude cirkulovat voda v trubce o teplotě 40 °C a bude ohřívát okolí vrtu. Následně během otopného období se bude teplo odebírat. V této kapitole bude ukázán průběh teplot v režimu nabíjení a vybití.

Výpočtový návrh bude proveden v prostředí MS Excel.

5.1 Tepelná bilance

Návrh tepelné bilance vychází z použití rovnice tepelného toku pro složenou válcovou stěnu. Pokud se použije koncept Ohmova zákona – sériově „zapojené“ tepelné odpory se sčítají (viz. Obr.5.1), rovnice vypadá následovně [34]:

$$Q_n = \frac{\Delta T}{R_{zeminy,n}} \cdot \tau, \quad (5.1)$$

Q – tepelná energie [J/m]

ΔT – rozdíl teplot vedlejších vrstev [K];

R – tepelný odpor zeminy [kg];

τ – čas [s].

Pomocí rovnice 5.1 se iterační metodou spočítají jednotlivá množství tepla. Abychom zjistili o kolik stupňů se zemina ohřívá za určitý čas, použijeme kalorimetrickou rovnici pro předávání tepla, která uvažuje tepelné a fyzikální parametry zeminy [35]:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (5.2)$$

c_p – měrná tepelná kapacita materiálu [J/kg·K];

m – hmotnost [kg];

T_1, T_2 – jsou teploty soustavy na počátku a konci předávání tepla [K];

τ – čas [s].

Pomocí rovnice 5.1 a 5.2 jsme schopni zapsat rovnici pro určení ΔT . Změny teplot v určitých vrstvách zapíšeme jako:

$$\Delta T = \frac{Q_n - Q_{n+1}}{m \cdot c_p} \quad (5.3)$$

V předchozí kapitole je uvedeno, že hornina, se kterou počítáme v diplomové práci je hlína. Tepelné a fyzikální vlastnosti hlíny byly již uvedeny v Tab.4.10. Dalším bodem je výpočet hmoty, které se bude předávat teplo. Vzhledem k tomu, že celkový tvar vrtu a okolí je jako složená válcová stěna, můžeme hmotnost jednotlivých vrstev zeminy spočítat dle rovnice:

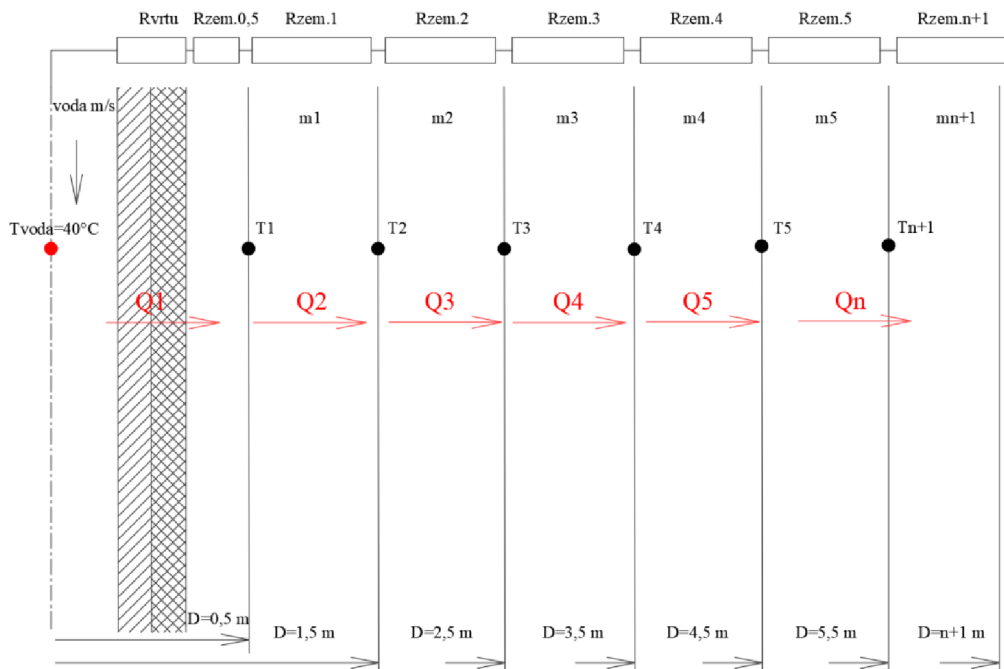
$$m_n = \frac{\pi \cdot (D_n^2 - D_{n-1}^2)}{4} \cdot L \cdot \rho_{hl}, \quad (5.4)$$

D_n, D_{n-1} – průměry následující a předchozí vrstvy zeminy;

L – délka [m].

ρ_{hl} – hustota hlíny [kg/m³].

Na Obr.5.1 je schematické zobrazení vrtu a jeho okolní zeminy, směr tepelných toků a hmotnosti jednotlivých vrstev:



Obr. 5.1 Schematické zobrazení vrstev zeminy.

Dále je uveden výpočet hmotností jednotlivých vrstev dle vzorce 5.4. Pro první vrstvu, která hraničí s vrtem, bude rovnice vypadat následovně:

$$m_{1,5} = \frac{\pi \cdot (D_{1,5}^2 - D_{vrt}^2)}{4} \cdot L \cdot \rho_{hl},$$

$$m_{1,5} = \frac{\pi \cdot (1,5^2 - 0,125^2)}{4} \cdot 1 \cdot 2000 = 3509,75 \frac{kg}{m};$$

Pro další vrstvy:

$$m_n = \frac{\pi \cdot (D_n^2 - D_{n-1}^2)}{4} \cdot L \cdot \rho_{hl}$$

$$m_{2,5} = \frac{\pi \cdot (2,5^2 - 1,5^2)}{4} \cdot 1 \cdot 2000 = 6283,19 \frac{kg}{m};$$

$$m_{3,5} = \frac{\pi \cdot (3,5^2 - 2,5^2)}{4} \cdot 1 \cdot 2000 = 9424,78 \frac{kg}{m};$$

$$m_{4,5} = \frac{\pi \cdot (4,5^2 - 3,5^2)}{4} \cdot 1 \cdot 2000 = 12566,37 \frac{kg}{m};$$

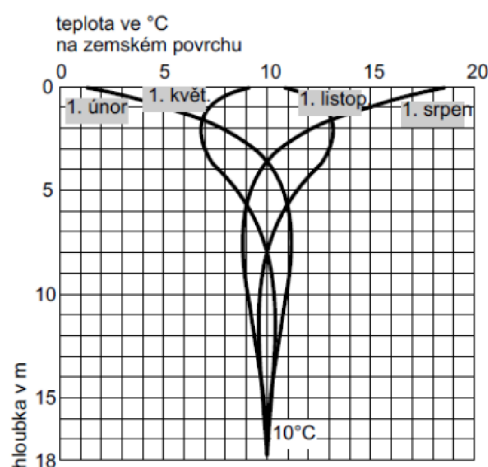
Ostatní hmotnosti se vypočítají stejně. Výsledky pro jednotlivé vrstvy jsou uvedeny v Tab.5.1:

Tab. 5.1 Výsledné hodnoty jednotlivých hmotností zeminy.

Označení	[kg/m]
m _{zeminy,1,5}	3 509,75
m _{zeminy,2,5}	6 283,19
m _{zeminy,3,5}	9 424,78
m _{zeminy,4,5}	12 566,37
m _{zeminy,5,5}	15 707,96
m _{zeminy,6,5}	18 849,56
m _{zeminy,7,5}	21 991,15
m _{zeminy,8,5}	25 132,74
m _{zeminy,9,5}	28 274,33
m _{zeminy,10,5}	31 415,93
m _{zeminy,11,5}	34 557,52
m _{zeminy,12,5}	37 699,11
m _{zeminy,13,5}	40 840,70
m _{zeminy,14,5}	43 982,30
m _{zeminy,15,5}	47 123,89
m _{zeminy,16,5}	50 265,48
m _{zeminy,17,5}	53 407,08
m _{zeminy,18,5}	56 548,67
m _{zeminy,19,5}	59 690,26
m _{zeminy,20,5}	62 831,85

5.2 Režim nabíjení

V této části diplomové práce bude popsán průběh teplot na 1 m délky v režimu nabíjení akumulátoru. V předchozích kapitolách již bylo uvedeno, že ohřev zeminy bude probíhat prouděním vody o teplotě 40 °C v trubce uvnitř vrtu. Akumulátor se bude nabíjet během 40 nejteplejších dní v létě. Jak víme, teplota směrem do hloubky každých 33 m stoupá o přibližně 1 °C. Přibližný průběh teplot v zemi je uveden na Obr.5.2. Z obrázku je vidět, že v hloubce kolem 18 m pod terémem se teplota blíží 10 °C.



Průběh teploty v neporušené zemi v závislosti na hloubce a ročním období

Obr. 5.2 Průběh teplot v zemi.

Parametry počátečního stavu „Den 1“ jsou v Tab.5.2:

Tab. 5.2 Počáteční stav – nabíjení „Den 1“.

Den 1			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T _{voda}	40		
T _{zemina,1,5}	10	T _{zemina,11,5}	10
T _{zemina,2,5}	10	T _{zemina,12,5}	10
T _{zemina,3,5}	10	T _{zemina,13,5}	10
T _{zemina,4,5}	10	T _{zemina,14,5}	10
T _{zemina,5,5}	10	T _{zemina,15,5}	10
T _{zemina,6,5}	10	T _{zemina,16,5}	10
T _{zemina,7,5}	10	T _{zemina,17,5}	10
T _{zemina,8,5}	10	T _{zemina,18,5}	10
T _{zemina,9,5}	10	T _{zemina,19,5}	10
T _{zemina,10,5}	10	T _{zemina,20,5}	10

Jako příklad spočítáme množství tepla a změnu teploty první vrstvy zeminy. Pro výpočet použijeme již definovaný vzorec 5.1. Pro první vrstvu se sečtou odpory R_{zeminy,0,5} a R_{vrt}:

$$Q_1 = \frac{T_{voda} - T_{zeminy,1,5}}{R_{zeminy,0,5} + R_{vrt}} \cdot \tau = \frac{(40 + 273,15) - (10 + 273,15)}{0,14709 + 0,10808} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60$$

$$= 10158008,11 \frac{J}{m}$$

Dalším krokem je výpočet změny teploty první vrstvy zeminy za „Den 1“. Vycházíme ze vzorce 5.3:

$$\Delta T_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{m_{zeminy,1,5} \cdot c_{p,hl}} = \frac{10158008,11 - 0}{3509,75 \cdot 920} = 3,146 \text{ °C}$$

Tepelný tok Q₂ je nulový, protože rozdíl teplot první a druhé vrstvy zeminy se rovná nule.

Pro „Den 2“ bude platit teplota první vrstvy:

$$T_{zeminy,1,5}^{nová} = \Delta T_1 + T_{zeminy,1,5} = 10 + 3,146 = 13,146 \text{ °C}$$

Další hodnoty pro stav „Den 2“ jsou v Tab.5.2:

Tab. 5.3 Počáteční stav – nabíjení „Den 2“.

Den 2			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T _{voda}	40		
T _{zemina,1,5}	13,146	T _{zemina,11,5}	10
T _{zemina,2,5}	10	T _{zemina,12,5}	10
T _{zemina,3,5}	10	T _{zemina,13,5}	10
T _{zemina,4,5}	10	T _{zemina,14,5}	10
T _{zemina,5,5}	10	T _{zemina,15,5}	10
T _{zemina,6,5}	10	T _{zemina,16,5}	10
T _{zemina,7,5}	10	T _{zemina,17,5}	10
T _{zemina,8,5}	10	T _{zemina,18,5}	10
T _{zemina,9,5}	10	T _{zemina,19,5}	10
T _{zemina,10,5}	10	T _{zemina,20,5}	10

Pro „Den 2“ bude platit výpočet:

$$Q_1 = \frac{T_{voda} - T_{zeminy,1,5}}{R_{zeminy,0,5} + R_{vrt}} \cdot \tau = \frac{(40 + 273,15) - (13,146 + 273,15)}{0,14709 + 0,10808} \cdot 86400$$

$$= 9092805,83 \frac{J}{m}$$

$$Q_2 = \frac{T_{zeminy,1,5} - T_{zeminy,2,5}}{R_{zeminy,1,5}} \cdot \tau = \frac{(13,146 + 273,15) - (10 + 273,15)}{0,11657} \cdot 86400$$

$$= 2331767,29 \frac{J}{m}$$

$$\Delta T_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{m_{zeminy,1,5} \cdot c_{p,hl}} = \frac{9092805,83 - 2331767,29}{3509,75 \cdot 920} = 2,094 \text{ °C}$$

$$\Delta T_2 = \frac{Q_2 - Q_3}{m_{zeminy,2,5} \cdot c_{p,hl}} = \frac{2331767,29 - 0}{6283,19 \cdot 920} = 0,403 \text{ °C}$$

$$T_{zeminy,1,5}^{nová} = \Delta T_1 + T_{zeminy,1,5} = 2,094 + 13,146 = 15,24 \text{ °C}$$

$$T_{zeminy,2,5}^{nová} = \Delta T_2 + T_{zeminy,2,5} = 0,403 + 10 = 10,40 \text{ °C}$$

Tímto stylem byl výpočet proveden pro 40 dní pro každou vrstvu zeminy. Ukazka z vypočtového programu je na Obr.5.3:

DEN 1														
Počáteční stav [°C]	Tvody	Tzeminy1	Tzeminy2	Tzeminy3	Tzeminy4	Tzeminy5	Tzeminy6	Tzeminy7	Tzeminy8	Tzeminy9	Tzeminy10	Tzeminy11	Tzeminy12	Tzeminy13
	40	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Teplo Q _z [J/m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
		10158008,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		3,14599088	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DEN 2														
Stav zeminy T [°C]	Tvody [°C]	Tzeminy,nova 1	Tzeminy,nova 2	Tzeminy,nova 3	Tzeminy,nova 4	Tzeminy,nova 5	Tzeminy,nova 6	Tzeminy,nova 7	Tzeminy,nova 8	Tzeminy,nova 9	Tzeminy,nova 10	Tzeminy,nova 11	Tzeminy,nova 12	Tzeminy,nova 13
	40	13,15	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Teplo Q _z [J/m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
		9992805,83	2331767,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		2,09389956	0,402382923	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DEN 3														
Stav zeminy T [°C]	Tvody [°C]	Tzeminy,nova 1	Tzeminy,nova 2	Tzeminy,nova 3	Tzeminy,nova 4	Tzeminy,nova 5	Tzeminy,nova 6	Tzeminy,nova 7	Tzeminy,nova 8	Tzeminy,nova 9	Tzeminy,nova 10	Tzeminy,nova 11	Tzeminy,nova 12	Tzeminy,nova 13
	40	15,24	10,40	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Teplo Q _z [J/m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
		8382821,00	3384770,50	643027,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		1,48624892	0,508901329	0,074169176	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DEN 4														
Stav zeminy T [°C]	Tvody [°C]	Tzeminy,nova 1	Tzeminy,nova 2	Tzeminy,nova 3	Tzeminy,nova 4	Tzeminy,nova 5	Tzeminy,nova 6	Tzeminy,nova 7	Tzeminy,nova 8	Tzeminy,nova 9	Tzeminy,nova 10	Tzeminy,nova 11	Tzeminy,nova 12	Tzeminy,nova 13
	40	16,73	10,91	10,07	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Teplo Q _z [J/m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
		7880576,71	4399185,92	1338049,61	179476,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		1,106941062	0,514336239	0,133387252	0,015234181	0	0	0	0	0	0	0	0	0

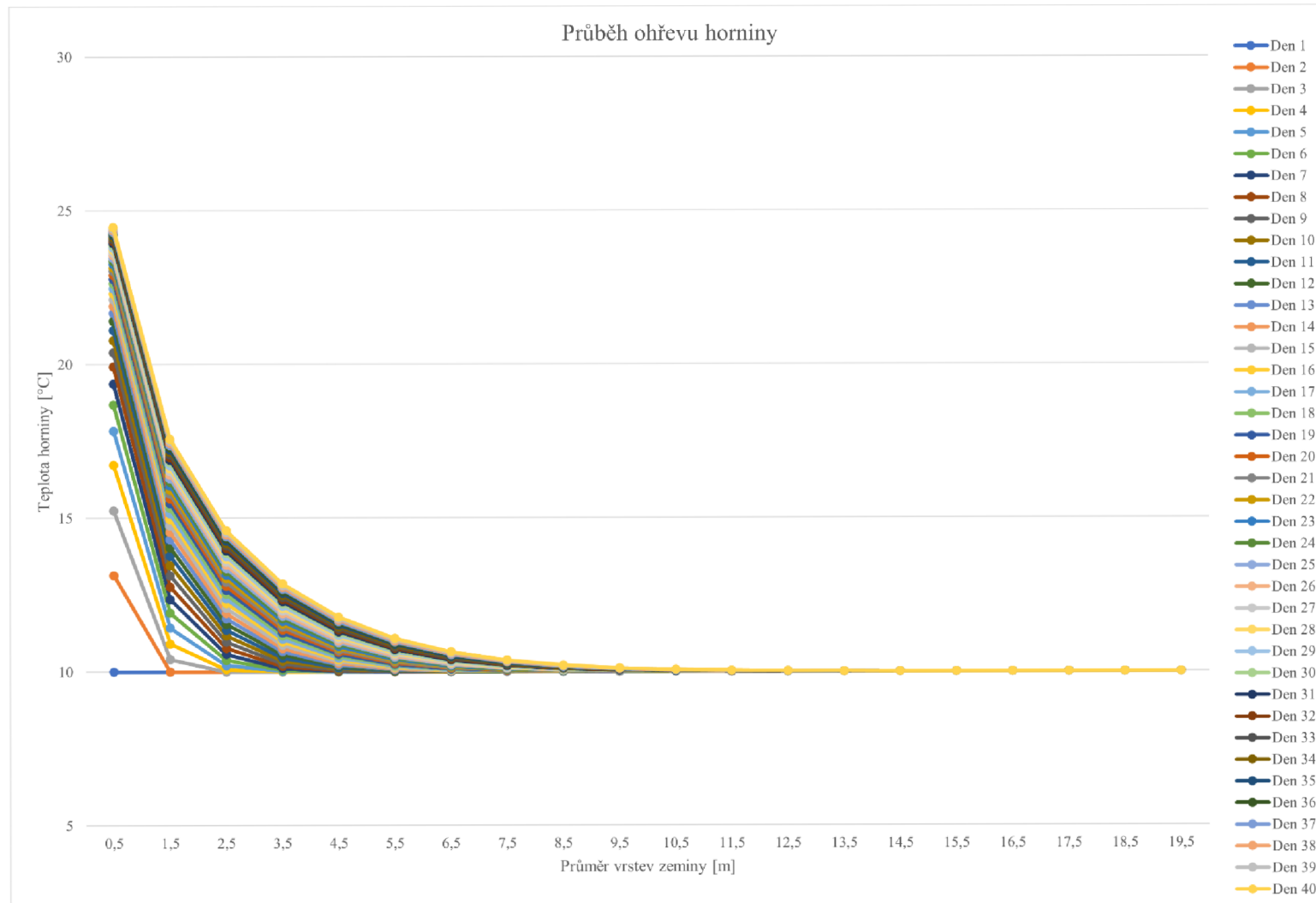
Obr. 5.3 Ukázka výpočtu nabíjení zeminy.

40. den došlo ke změně teploty v průměru 11,5 m. Teplo, které protékalo dalšími vrstvami příliš teplotu zeminy neovlivnilo. V Tab.5.4 jsou uvedené výsledné hodnoty pro poslední den nabíjení „Den 40“. Na další straně je výsledný graf průběhu nabíjení akumulátoru během celého období.

Tab. 5.4 Koncový stav – nabíjení „Den 40“.

Den 40			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T _{voda}	40		
T _{zemina,1,5}	24,46	T _{zemina,11,5}	10,06
T _{zemina,2,5}	17,57	T _{zemina,12,5}	10,03
T _{zemina,3,5}	14,60	T _{zemina,13,5}	10,01
T _{zemina,4,5}	12,87	T _{zemina,14,5}	10
T _{zemina,5,5}	11,78	T _{zemina,15,5}	10
T _{zemina,6,5}	11,08	T _{zemina,16,5}	10
T _{zemina,7,5}	10,64	T _{zemina,17,5}	10
T _{zemina,8,5}	10,37	T _{zemina,18,5}	10
T _{zemina,9,5}	10,21	T _{zemina,19,5}	10
T _{zemina,10,5}	10,11	T _{zemina,20,5}	10

Teplota T_{zeminy,14,5} až T_{zeminy,20,5} se mění v mezích desetitisícin, což je dle mého názoru zanedbatelné.



Obr. 5.4 Graf nabíjení akumulátoru tepla během 40 dní.

5.3 Režim vybíjení

Pro vybíjení akumulátoru musíme dosáhnout stavu, kdy zemina začne teplo odvádět zpět do vrtu. Tohoto stavu dosáhneme pouštěním vody do vrtu o teplotě nižší, než je teplota okolní zeminy. Tuto hodnotu nelze odhadnout, ale můžeme spočítat střední teplotu celé délky trubky pomocí iterací. Iterační výpočet je nastavený tak, aby získané teplo pokrývalo denní potřebu tepla. Vybíjení akumulátoru je vypočítáno pro dobu 232 dní. Počáteční stav vybíjení „Den 1“ je uveden v Tab.5.5.

Tab. 5.5 Počáteční stav – vybíjení „Den 1“.

Den 1			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T _{voda}	22,398		
T _{zemina,1,5}	24,46	T _{zemina,11,5}	10,06
T _{zemina,2,5}	17,57	T _{zemina,12,5}	10,03
T _{zemina,3,5}	14,60	T _{zemina,13,5}	10,01
T _{zemina,4,5}	12,87	T _{zemina,14,5}	10
T _{zemina,5,5}	11,78	T _{zemina,15,5}	10
T _{zemina,6,5}	11,08	T _{zemina,16,5}	10
T _{zemina,7,5}	10,64	T _{zemina,17,5}	10
T _{zemina,8,5}	10,37	T _{zemina,18,5}	10
T _{zemina,9,5}	10,21	T _{zemina,19,5}	10
T _{zemina,10,5}	10,11	T _{zemina,20,5}	10

Výpočet bude skoro stejný jako u režimu „nabíjení“, liší se pouze tím, že pomocí iterací se dopočítává nutná teplota vody.

$$Q_1 = \frac{T_{voda} - T_{zeminy,1,5}}{R_{zeminy,0,5} + R_{vrt}} \cdot \tau = \frac{(22,398 + 273,15) - (24,46 + 273,15)}{0,14709 + 0,10808} \cdot 86400$$

$$= -714469,49 \frac{J}{m}$$

Dalším krokem je výpočet změny teploty první vrstvy zeminy za „Den 1“. Vycházíme ze vzorce 5.3:

$$\Delta T_1 = \frac{Q_1 - Q_2}{m_{zeminy,1,5} \cdot c_{p,hl}} = \frac{-714469,49 - 5106473,36}{3509,75 \cdot 920} = -1,8027 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pro „Den 2“ bude platit teplota první vrstvy:

$$T_{zeminy,1,5}^{nová} = \Delta T_1 + T_{zeminy,1,5} = -1,8027 + 24,46 = 22,66 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vzhledem k tomu, že každá vrstva má svou teplotu, u každé z nich dojde ke změně teplot a tepelných toků. U většiny vrstev během prvního týdne vybíjení dojde k minimálnímu nárůstu teploty, jako například ve druhé vrstvě. Je to způsobeno tím, že se teplo začíná nejvíce odebírat z nejbližšího okolí vrtu. Další vrstvy se budou během nějakého období ohřívat o desítky stupňů:

$$Q_2 = \frac{T_{zeminy,1,5} - T_{zeminy,2,5}}{R_{zeminy,1,5}} \cdot \tau = \frac{(24,46 + 273,15) - (17,57 + 273,15)}{0,11657} \cdot 86400$$

$$= 5106473,36 \frac{J}{m}$$

$$\Delta T_1 = \frac{Q_2 - Q_3}{m_{zeminy,2,5} \cdot c_{p,hl}} = \frac{5106473,36 - 4740659,08}{6283,19 \cdot 920} = 0,063 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{zeminy,1,5}^{nová} = \Delta T_1 + T_{zeminy,2,5} = 0,063 + 17,57 = 17,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

V Tab.5.6 znázorněny teploty ve stavu „Den 2“.

Tab. 5.6 Počáteční stav – vybíjení „Den 2“.

Den 2			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T _{voda}	20,547		
T _{zemina,1,5}	22,66	T _{zemina,11,5}	10,06
T _{zemina,2,5}	17,63	T _{zemina,12,5}	10,03
T _{zemina,3,5}	14,66	T _{zemina,13,5}	10,02
T _{zemina,4,5}	12,92	T _{zemina,14,5}	10,01
T _{zemina,5,5}	11,83	T _{zemina,15,5}	10
T _{zemina,6,5}	11,12	T _{zemina,16,5}	10
T _{zemina,7,5}	10,67	T _{zemina,17,5}	10
T _{zemina,8,5}	10,39	T _{zemina,18,5}	10
T _{zemina,9,5}	10,22	T _{zemina,19,5}	10
T _{zemina,10,5}	10,12	T _{zemina,20,5}	10

Jak již bylo uvedeno, teplota klesla pouze u první vrstvy zeminy, u ostatních vrstev došlo k malému přírůstku teploty.

DEN 1														
Stav zeminy T [°C]	T _{vody} [°C]	T _{zeminy,nova 1}	T _{zeminy,nova 2}	T _{zeminy,nova 3}	T _{zeminy,nova 4}	T _{zeminy,nova 5}	T _{zeminy,nova 6}	T _{zeminy,nova 7}	T _{zeminy,nova 8}	T _{zeminy,nova 9}	T _{zeminy,nova 10}	T _{zeminy,nova 11}	T _{zeminy,nova 12}	T _{zeminy,nova 13}
Stav zeminy T [°C]	22,35007708	24,46	17,57	14,60	12,87	11,78	11,08	10,64	10,37	10,21	10,11	10,06	10,03	10,01
Teplota Qi [J / m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
Teplota Qi [J / vsi]		-114469,49	5106473,36	4740659,08	4189976,83	3523480,80	2818968,16	2143707,73	1554315,15	1072726,97	706614,92	406208,35	265084,34	149371,77
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		-1,802723538	0,06328386	0,063510002	0,057650092	0,048757632	0,038817683	0,029220076	0,020836676	0,014074528	0,010393737	0,00443885	0,003336273	0,001848828
-100023728,3 Integrace			-2,05638E-06											
	22,35007708													
DEN 2														
Stav zeminy T [°C]	T _{vody} [°C]	T _{zeminy,nova 1}	T _{zeminy,nova 2}	T _{zeminy,nova 3}	T _{zeminy,nova 4}	T _{zeminy,nova 5}	T _{zeminy,nova 6}	T _{zeminy,nova 7}	T _{zeminy,nova 8}	T _{zeminy,nova 9}	T _{zeminy,nova 10}	T _{zeminy,nova 11}	T _{zeminy,nova 12}	T _{zeminy,nova 13}
Stav zeminy T [°C]	20,54735172	22,66	17,63	14,66	12,92	11,83	11,12	10,67	10,39	10,22	10,12	10,06	10,03	10,02
Teplota Qi [J / m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
Teplota Qi [J / vsi]		-114469,49	3723371,39	4740396,59	4204158,48	3552295,66	2855033,43	2192487,12	1602224,58	1116720,94	733362,58	454608,69	274955,66	163398,09
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		-1,314883381	-0,175922817	0,061832862	0,056384215	0,04786082	0,038446088	0,029174907	0,020897565	0,014729843	0,009649771	0,0054652338	0,003202001	0,001848813
-100023728,3 Integrace			-2,05638E-06											
	20,54735172													
DEN 3														
Stav zeminy T [°C]	T _{vody} [°C]	T _{zeminy,nova 1}	T _{zeminy,nova 2}	T _{zeminy,nova 3}	T _{zeminy,nova 4}	T _{zeminy,nova 5}	T _{zeminy,nova 6}	T _{zeminy,nova 7}	T _{zeminy,nova 8}	T _{zeminy,nova 9}	T _{zeminy,nova 10}	T _{zeminy,nova 11}	T _{zeminy,nova 12}	T _{zeminy,nova 13}
Stav zeminy T [°C]	19,17296814	21,28	17,46	14,72	12,98	11,87	11,16	10,70	10,41	10,23	10,13	10,07	10,04	10,02
Teplota Qi [J / m]		Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13
Teplota Qi [J / vsi]		-114469,49	2835062,05	4381395,20	4217344,09	3579589,46	2897811,21	2237679,24	1648758,06	1157496,92	770754,60	487182,45	298887,14	175146,98
Změna teploty deltaT [°C]		deltaT1	deltaT2	deltaT3	deltaT4	deltaT5	deltaT6	deltaT7	deltaT8	deltaT9	deltaT10	deltaT11	deltaT12	deltaT13
		-1,999277323	-0,26403895	0,016601834	0,055164023	0,047177556	0,0386664	0,029109608	0,021246369	0,014867621	0,009811283	0,005985461	0,003492764	0,002043831
-100023728,3 Integrace			6,10948E-07											
	19,17296814													

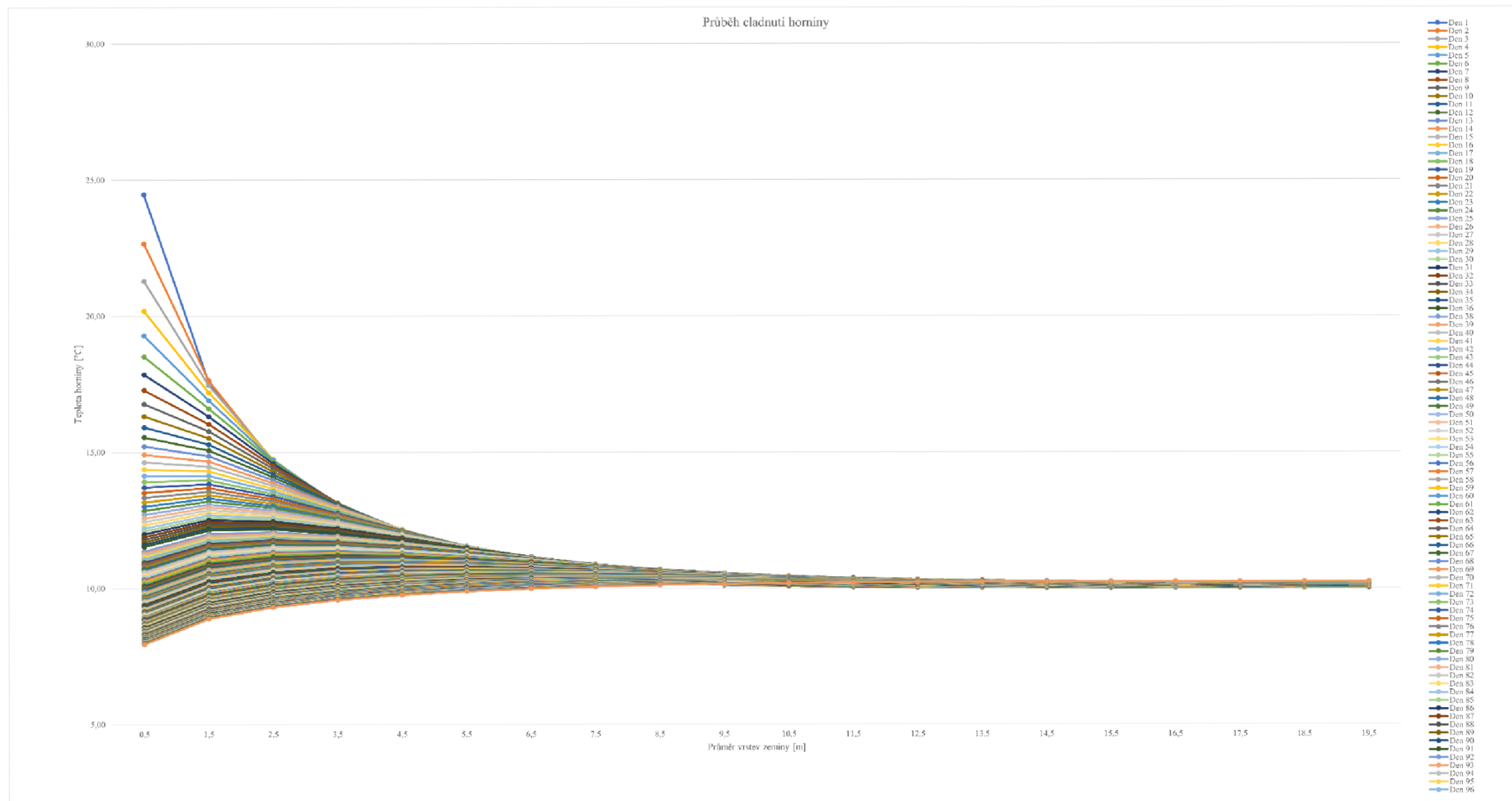
Obr. 5.5 Ukázka výpočtu vybíjení akumulátoru.

Na konci otopného období stav vybitého akumulátoru bude vypadat následovně:

Tab. 5.7 Koncový stav – vybíjení „Den 232“.

Den 232			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T _{voda}	5,83		
T _{zemina,1,5}	7,94	T _{zemina,11,5}	10,18
T _{zemina,2,5}	8,88	T _{zemina,12,5}	10,20
T _{zemina,3,5}	9,31	T _{zemina,13,5}	10,21
T _{zemina,4,5}	9,57	T _{zemina,14,5}	10,22
T _{zemina,5,5}	9,75	T _{zemina,15,5}	10,22
T _{zemina,6,5}	9,88	T _{zemina,16,5}	10,23
T _{zemina,7,5}	9,98	T _{zemina,17,5}	10,23
T _{zemina,8,5}	10,06	T _{zemina,18,5}	10,23
T _{zemina,9,5}	10,11	T _{zemina,19,5}	10,23
T _{zemina,10,5}	10,15	T _{zemina,20,5}	10,23

Ke 130. dni otopného období dochází k chladnutí ve vrstvě o průměru 13,5 m. K poslednímu dni vybíjení došlo k tomu, že se teplo začalo odebírat z dalších vrstev zeminy. Na následující straně je v grafu znázorněn průběh vybíjení akumulátoru. Z grafu jsme schopni konstatovat, že se teplo nejvíce odebírá v nejbližších vrstvách k vrtu.



Obr. 5.6 Graf vybíjení akumulátoru tepla během 232 dní

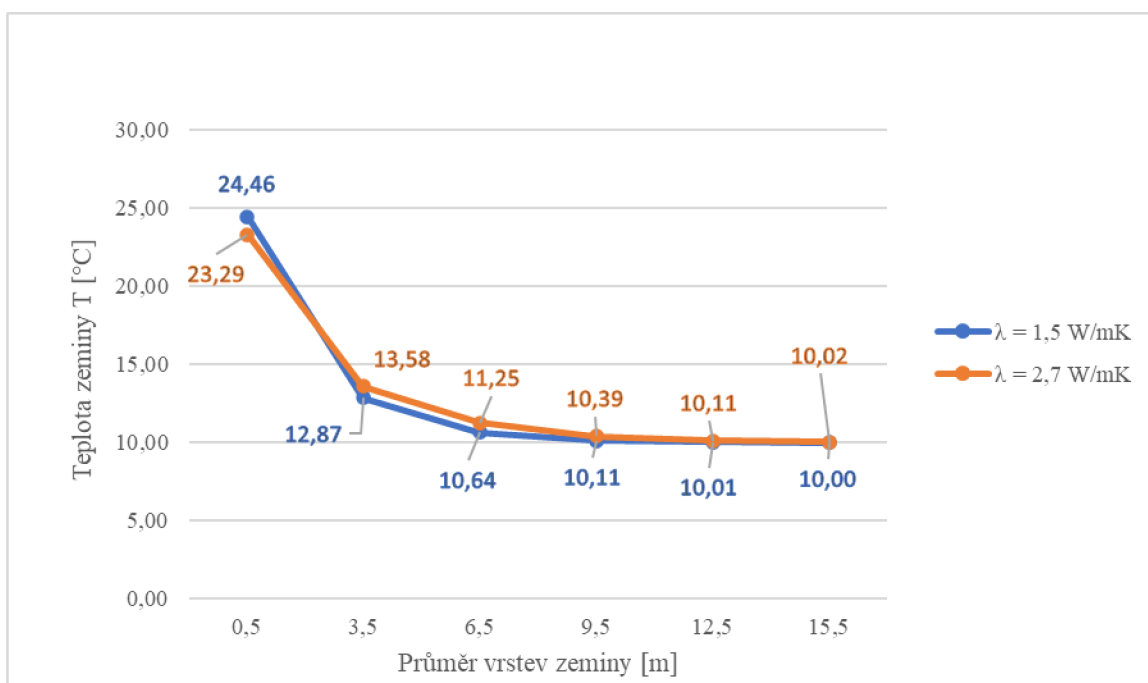
6 Test provozních parametrů tepelného akumulátoru

V této kapitole budou popsány případy změn tepelných a fyzikálních parametrů pro porovnání s navrhovanými podmínkami provozu nízkoteplotního akumulátoru. Srovnání provozu bude zobrazeno v grafech.

6.1 Změna součinitele tepelné vodivosti

Tepelná vodivost materiálu je důležitá veličina, která popisuje schopnost materiálu vést teplo a rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí. V daném testu nízkoteplotního akumulátoru tepla navýšíme součinitel tepelné vodivosti zeminy. Zvýšením λ_{zem} ukážeme rozdíl mezi koncovými stavy nabíjení a vybíjení tepelného akumulátoru s vyšší a nižší tepelnou vodivostí země. Pro výpočet a návrh byla použita hodnota $\lambda_{hl} = 1,5$ [W/m·K]. Pro test provozních podmínek použijeme $\lambda_{zem} = 2,7$ [W/m·K].

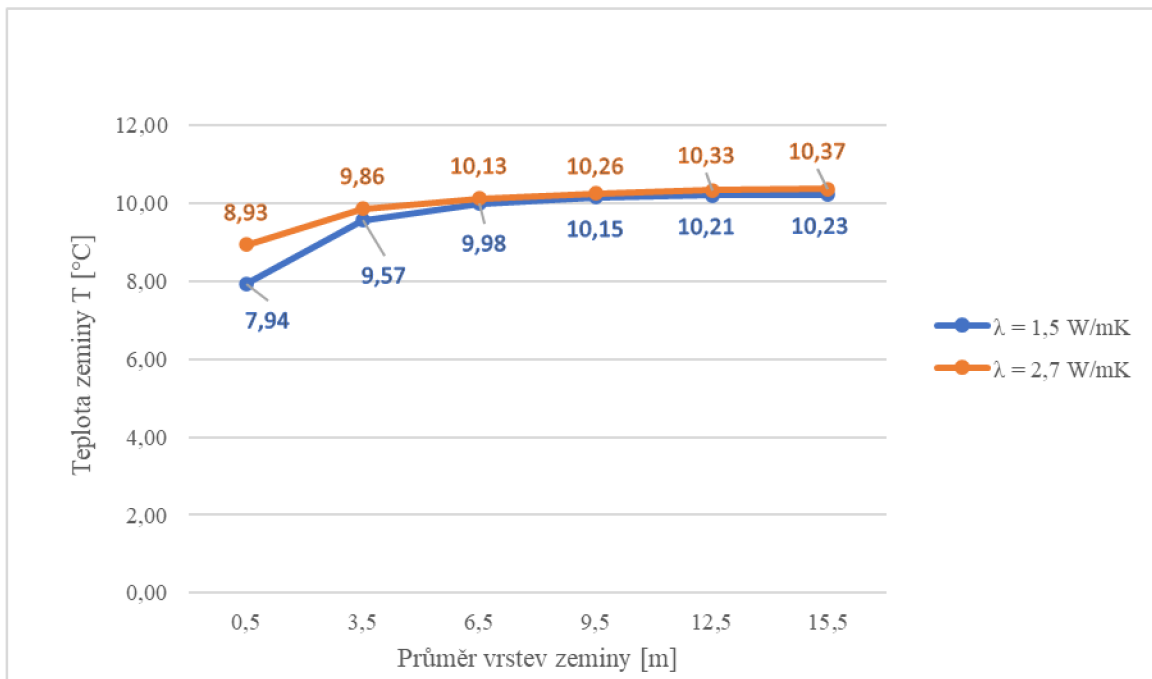
Na Obr.6.1 je zobrazený graf porovnání teplot jednotlivých vrstev zeminy závislých na tepelné vodivosti:



Obr. 6.1 Graf závislosti průběhu teploty zeminou na tepelné vodivosti. Režim nabíjení.

Na výše zobrazeném grafu vidíme, že s vyšší tepelnou vodivostí došlo k lepšímu prohřátí okolní zeminy než s menší. Teplota v prvním bodě při $\lambda_{zem} = 2,7$ [W/m·K] je nižší, než v případě $\lambda_{hl} = 1,5$ [W/m·K], protože čím vyšší je hodnota tepelné vodivosti materiálu, tím rychleji se šíří teplo do okolních chladnějších vrstev.

Dále je zobrazen případ vybíjení tepelného akumulátoru při stejných podmínkách:

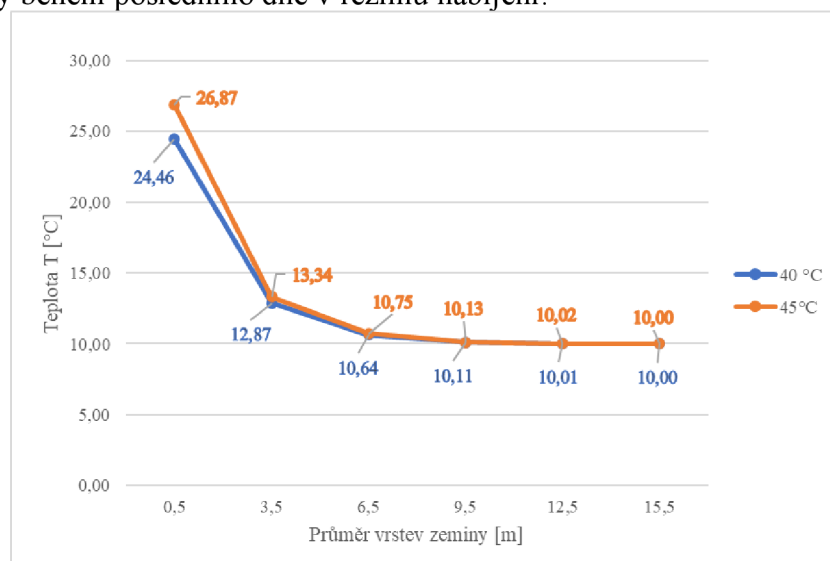


Obr. 6.2 Graf závislosti průběhu teploty zeminou na tepelné vodivosti. Režim vybíjení.

V případě vybíjení vidíme, že s vyšší tepelnou vodivostí okolí vrtu zůstává lépe prohřáté. Jako výsledek můžeme konstatovat, že se s větší tepelnou vodivostí zeminy bude teplo akumulovat lépe. Zvýšením λ_{zem} stoupá rychlost šíření tepla, a proto se zemina ohřívá lépe na větší vzdálenosti od vrtu.

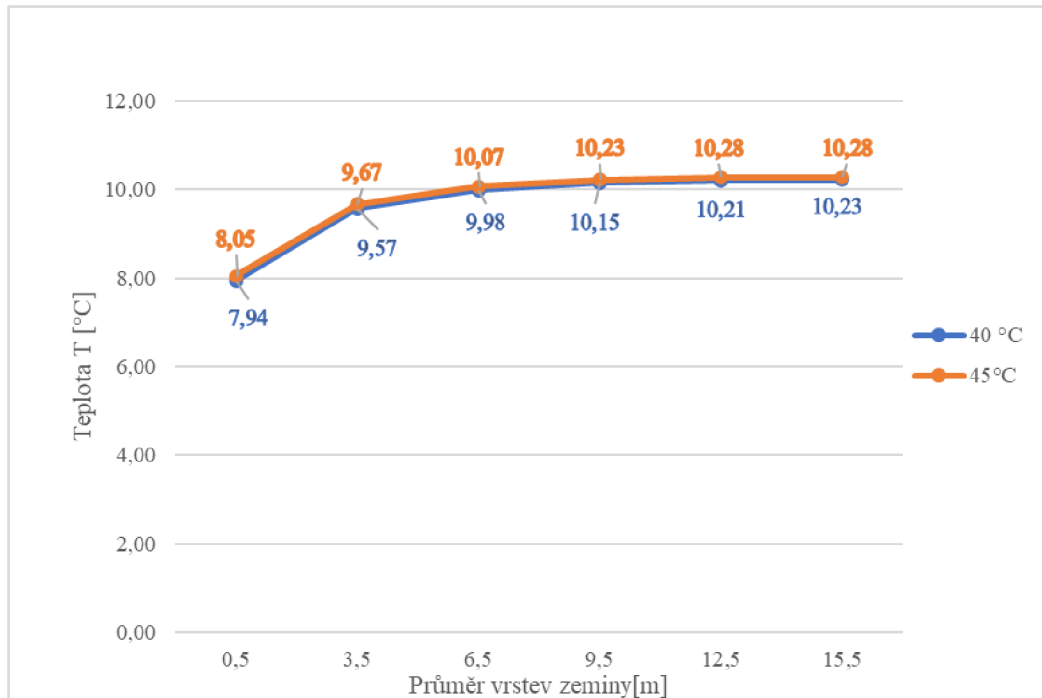
6.2 Změna teploty vody

V tomto testu provozních parametrů se jedná o navýšení teploty vody, která proudí vrtem během režimu nabíjení. Teplota bude navýšena o 5 °C, to znamená $T_{voda} = 45^\circ\text{C}$. Se zvýšením teploty vody se zvýšily teploty zeminy, což je v podstatě logickým důsledkem. Na Obr.6.3 jsou zobrazeny teploty během posledního dne v režimu nabíjení:



Obr. 6.3 Graf nabíjení akumulátoru závislé na teplotě ohřivacího media. Režim nabíjení.

Pro režim vybíjení graf bude vypadat následovně:

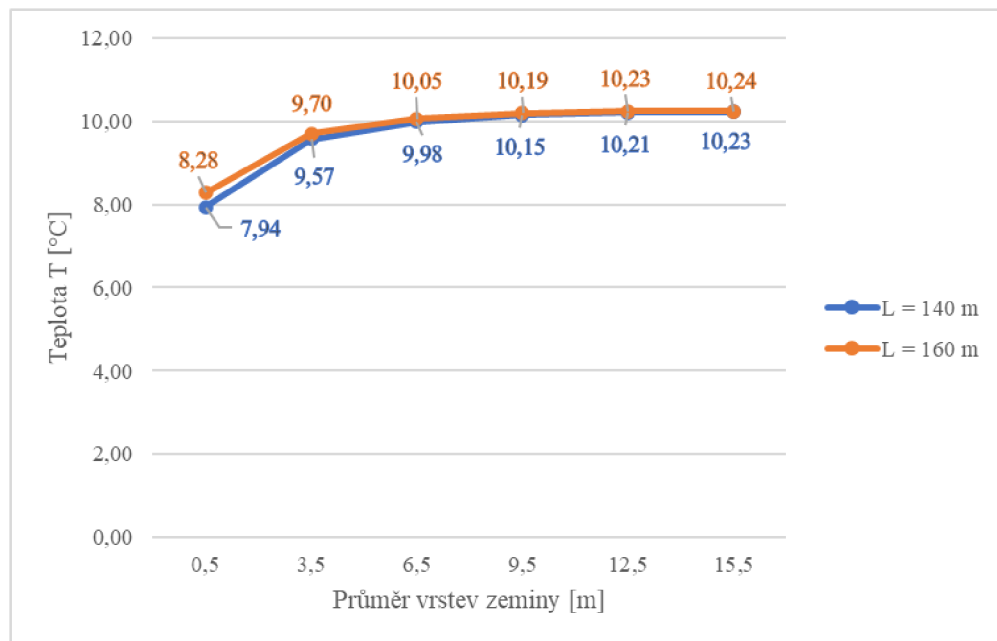


Obr. 6.4 Vybíjení akumulátoru závisle na teplotě ohřívacího media. Režim vybíjení.

V režimu vybíjení teploty jednotlivých vrstev okolní zeminy se moc neliší. Rozdíl teplot činí cca 0,11 °C.

6.3 Zvýšení délky vrtu

Tento případ ukáže, jak délka vrtu ovlivňuje průběh teplot v nízkoteplotním akumulátoru. Tento test je proveden pouze pro režim vybíjení. Na grafu jsou zobrazeny průběhy teplot v posledním dni vybíjecího stavu.

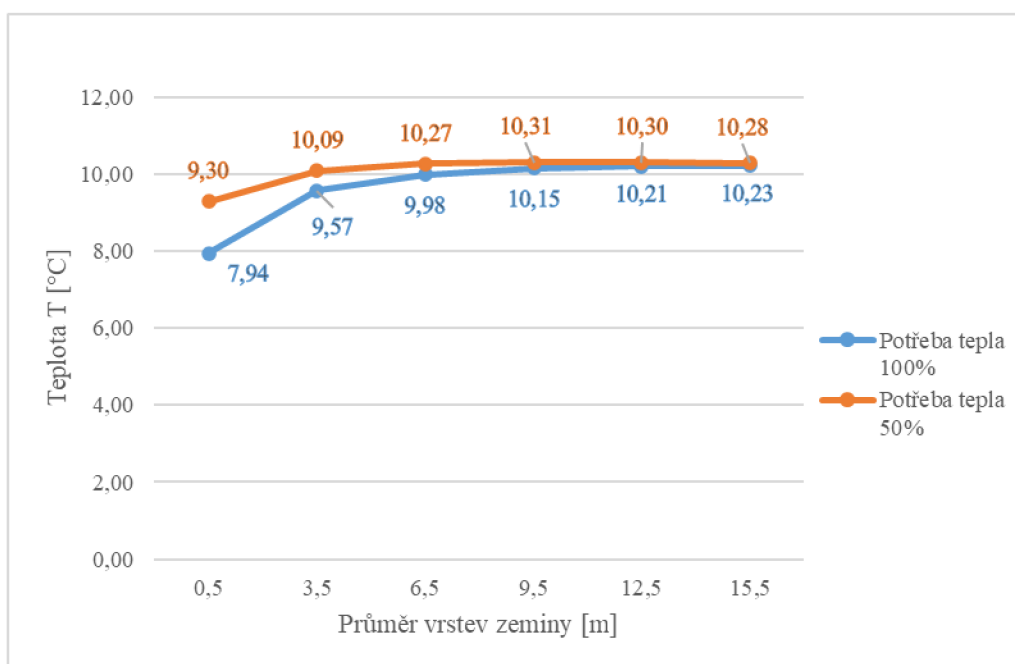


Obr. 6.5 Graf vybíjení akumulátoru závisle na délce vrtu.

Z grafu můžeme říci, že se zemina s větší hloubkou vrtu ochlazuje s pomalejší intenzitou. Chtěl bych uvést, že délka vrtu se vypočítá dle chladicího výkonu tepelného čerpadla a dle specifické odběrového tepelného toku. Předpokládám, že tento test provozních podmínek není spolehlivý, ale pro přehlednost závislosti průběhu teplot na délce vrtu pro účely této diplomové práce je dostatečný.

6.4 Snížení potřeby tepla o 50%

Pokud snížíme potřebu tepla o 50 %, klesne množství odebírané energie z vrtu. A proto se akumulátor pro získání potřebného množství tepla bude vybíjet pomaleji. Rozdíl mezi skutečnou potřebou tepla a potřebou sníženou o 50 % je zobrazen na Obr.6.7:

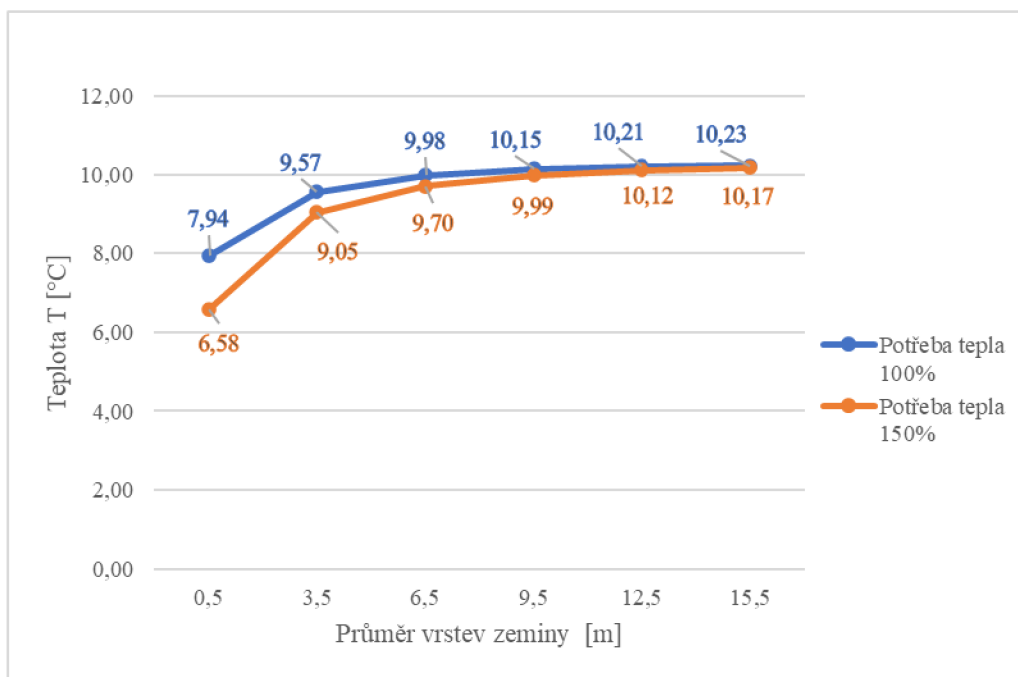


Obr. 6.6 Graf vybíjení akumulátoru při snížení potřeby tepla.

V grafu můžeme sledovat průběh teplot při různé potřebě tepla. Jak vidíme, při nižší potřebě tepla hlína zůstává více prohřátá. Je to způsobeno tím, že se na ohřev vrtu využívá méně energie. Průběh teplot při snížené potřebě tepla na konci otopné sezony je podobný počátečnímu stavu zeminy před začátkem nabíjení.

6.5 Zvýšení potřeby tepla o 50%

Dále je proveden test provozních parametrů akumulátoru při navýšení potřeby tepla o 50 %. V tomhle případě se nízkoteplotní akumulátor bude vybíjet rychleji a teplota okolní zeminy bude klesat. Nejvíce se ochladí první vrstvy zeminy. Na níže uvedeném obrázku jsou zobrazeny teplotní stavy zeminy při různé potřebě tepla:



Obr. 6.7 Graf vybíjení akumulátoru při zvýšení potřeby tepla.

Na závěr tohoto testu se dá říci, že při navýšení potřeby tepla dochází ke snížení teplot jednotlivých vrstev okolní horniny. K většímu ochlazení vede množství energie využitě pro získání potřebného množství tepla.

6.6 Odběr tepla bez předchozího nabíjení

Tento test je proveden pro přehled efektivnosti systému akumulace. Je proveden tak, že se z hlíny začíná odebírat teplo ve stavu, kdy není tepelně ovlivněna. Odběr tepla probíhá během celého otopného období. Teplota vody se vypočítá pomocí iterací. Počáteční stav zeminy je pro přehled uveden v Tab.6.1:

Tab. 6.1 Počáteční stav – vybíjení „Den 1“.

Den 232			
Označení	Teplota[°C]	Označení	Teplota[°C]
T_{voda}	7,88		
$T_{\text{zemina},1,5}$	10	$T_{\text{zemina},11,5}$	10
$T_{\text{zemina},2,5}$	10	$T_{\text{zemina},12,5}$	10
$T_{\text{zemina},3,5}$	10	$T_{\text{zemina},13,5}$	10
$T_{\text{zemina},4,5}$	10	$T_{\text{zemina},14,5}$	10
$T_{\text{zemina},5,5}$	10	$T_{\text{zemina},15,5}$	10
$T_{\text{zemina},6,5}$	10	$T_{\text{zemina},16,5}$	10
$T_{\text{zemina},7,5}$	10	$T_{\text{zemina},17,5}$	10
$T_{\text{zemina},8,5}$	10	$T_{\text{zemina},18,5}$	10
$T_{\text{zemina},9,5}$	10	$T_{\text{zemina},19,5}$	10
$T_{\text{zemina},10,5}$	10	$T_{\text{zemina},20,5}$	10

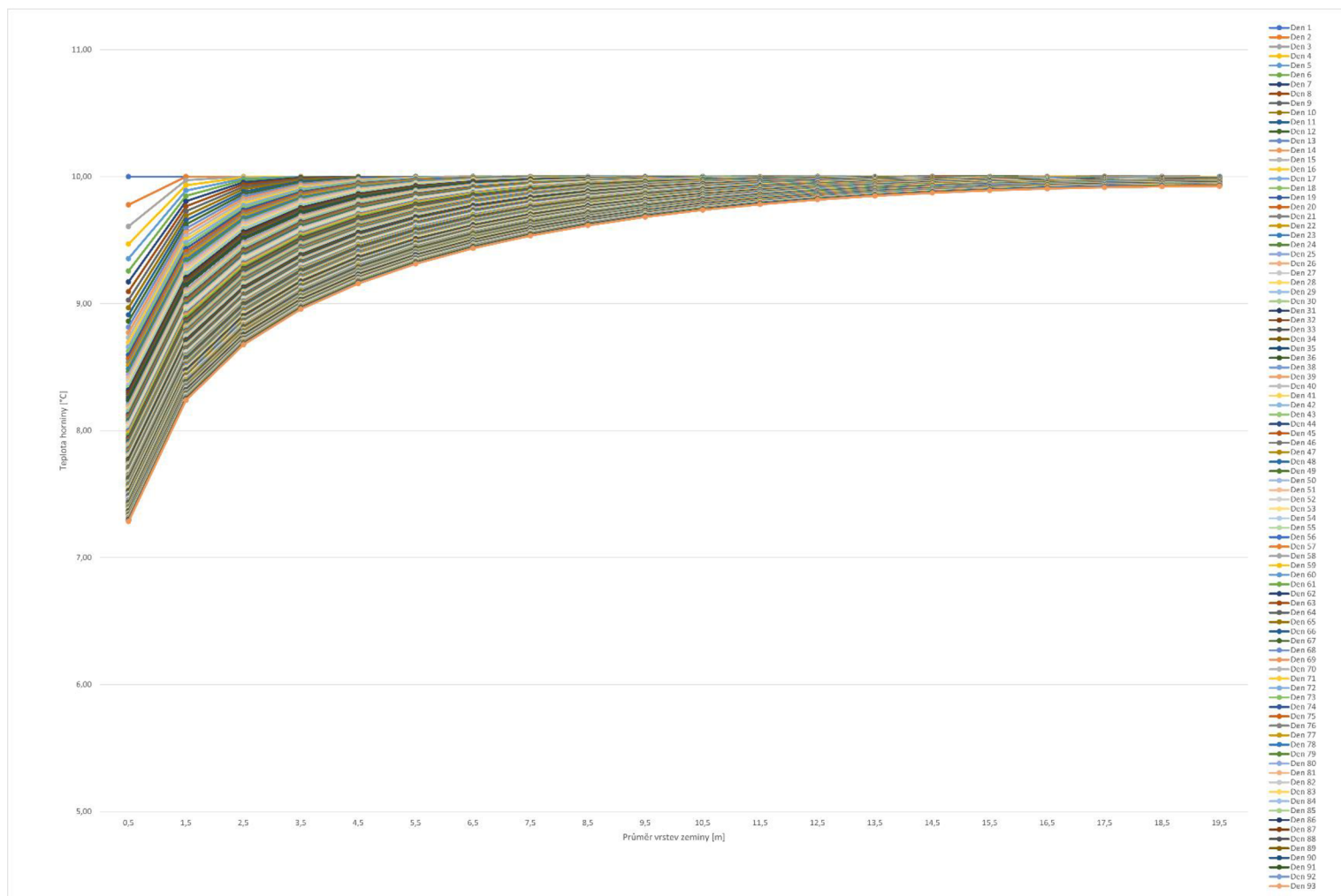
V průběhu otopné sezóny dochází k odběru tepla z posledních vrstev hlíny, k čemuž nedochází, pokud systém nabijeme. Teplotní stav zeminy na konci otopného období je pro přehled zobrazen v Tab.6.2. Také je pro porovnání v tabulce uveden koncový stav systému s nabíjením.

Tab. 6.2 Koncový stav – vybíjení „Den 232“.

Den 232							
		Systém bez nabíjení		Systém s nabíjením			
Označení	[°C]	Označení	[°C]	Označení	[°C]	Označení	[°C]
T _{voda}	5,17			T _{voda}	5,83		
T _{zemina,1,5}	7,28	T _{zemina,11,5}	9,74	T _{zemina,1,5}	7,94	T _{zemina,11,5}	10,18
T _{zemina,2,5}	8,24	T _{zemina,12,5}	9,78	T _{zemina,2,5}	8,88	T _{zemina,12,5}	10,20
T _{zemina,3,5}	8,68	T _{zemina,13,5}	9,82	T _{zemina,3,5}	9,31	T _{zemina,13,5}	10,21
T _{zemina,4,5}	8,96	T _{zemina,14,5}	9,85	T _{zemina,4,5}	9,57	T _{zemina,14,5}	10,22
T _{zemina,5,5}	9,16	T _{zemina,15,5}	9,87	T _{zemina,5,5}	9,75	T _{zemina,15,5}	10,22
T _{zemina,6,5}	9,31	T _{zemina,16,5}	9,89	T _{zemina,6,5}	9,88	T _{zemina,16,5}	10,23
T _{zemina,7,5}	9,44	T _{zemina,17,5}	9,91	T _{zemina,7,5}	9,98	T _{zemina,17,5}	10,23
T _{zemina,8,5}	9,53	T _{zemina,18,5}	9,92	T _{zemina,8,5}	10,06	T _{zemina,18,5}	10,23
T _{zemina,9,5}	9,62	T _{zemina,19,5}	9,92	T _{zemina,9,5}	10,11	T _{zemina,19,5}	10,23
T _{zemina,10,5}	9,68	T _{zemina,20,5}	9,93	T _{zemina,10,5}	10,15	T _{zemina,20,5}	10,23

Po zhodnocení teplot v tabulkách pro stav „bez nabíjení“ a stav „s nabíjením“ můžeme říci, že lépe prohřata zůstává hlína, pokud akumulátor nabijeme. Nejbližší vrstvy systému „s nabíjením“ mají v koncovém stavu vyšší teplotu, než měly v počátečním stavu. Dále je velmi důležité poznamenat, že je pro ohřev „nenabité“ zeminy potřeba nejen více času, ale také větší množství tepla. Pro znázornění můžeme určit střední teplotu v první vrstvě pro oba režimy. Systém bez nabíjení má $T_{zeminy, stř} = 8,64$ °C, zatímco akumulací systém má $T_{zeminy, stř} = 16,2$ °C. Jako souhrn tohoto testu můžeme uvést, že systém s akumulací je účinnější než systém bez ní. Akumulace tepelné energie vyvolá lepší COP.

Na další straně je pro přehled graficky znázorněn průběh teplot systému bez nabíjení akumulátoru.



Obr. 6.8 Graf odběru tepla bez předchozího nabíjení.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout nízkoteplotní akumulátor tepla pro dlouhodobou akumulaci, vytvořit výpočtový model popisující nabíjení a vybíjení akumulátoru v čase a využít jeho výsledky pro test provozních podmínek. Práce je rozdělena do šesti částí.

První a druhá kapitola se zabývají teoretickým hlediskem akumulace tepelné energie. V první kapitole byla popsána problematika nízkoteplotní akumulace, dále byly popsány aktivní a pasivní skladování tepla. Následně bylo uvedeno rozdělení akumulace dle typu využívaného tepla.

Druhá kapitola popisuje problematiku využití nízkoteplotní akumulace pro systémy dálkového vytápění. V této kapitole byla zpracována stručná rešerše, ve které byly zohledněny nejpoužívanější systémy nízkoteplotních akumulací. Důležitým bodem této kapitoly je popis využití horninového zásobníku tepla, který posloužil jako inspirace. Dále jsou detailně popsány pilotní realizace projektů s využitím dlouhodobé nízkoteplotní akumulace tepla používající tepelná čerpadla země-voda pro vytápění a chlazení budov s obrázky schémat zapojení jednotlivých systémů.

Třetí kapitola popisuje konkrétní realizační návrh, na který navazuje praktická část diplomové práce. Byl proveden výběr určité budovy a byly uvedeny její technické parametry.

Ve čtvrté kapitole byly provedeny výpočty tepelných ztrát budovy, návrhu tepelného čerpadla země-voda a parametrů hlubinného vrtu. Na začátku byly navrženy skladby obvodových stěn, podlahy, střechy, typy oken a dveří. Následně byly provedeny výpočty tepelných ztrát budovy přes jednotlivé konstrukce. Pro zjištění celkové tepelné ztráty se dopočítala tepelná ztráta větráním. Dalším úkolem byl výpočet základní potřeby tepla na ohřev TUV a vytápění. Pomocí zjištěných veličin bylo navrženo tepelné čerpadlo a vypočítána potřebná délka vrtu. Potom byl pomocí rovnic pro nucenou konvekci vypočítán součinitel přestupu tepla. Následný výpočet byl proveden pro určení tepelného odporu vrtu a tepelných odporů okolní zeminy.

V páté kapitole byl vytvořen návrh výpočtového modelu, ve kterém jsou popsány režimy nabíjení a vybíjení v čase. Výpočtový model byl vytvořen v prostředí MS Excel. Režimy nabíjení a vybíjení jsou znázorněny na odpovídajících obrázcích.

V poslední šesté kapitole byl proveden test provozních parametrů. Testy byly udělány způsobem změny tepelných a technických parametrů, například pro navýšenou hodnotu tepelné vodivosti zeminy, pro snížení potřeby tepla atd. Výsledky testů jsou zobrazeny na odpovídajících grafech.

Po zhodnocení výpočtů se dá říci, že navržený nízkoteplotní akumulátor tepla je dostačujícím pro pokrytí potřeby tepla na vytápění. Vhodnější použití tohoto typu akumulátoru je v kombinaci se zeminou o vyšší tepelné vodivosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Ibrahim Dincer a Mehmet Akif Ezan. *Heat storage: A Unique Solution for Energy Systems*. ISBN 978-3-319-91893-8.
- [2] Andrew Seaman, Andrew Martin a John Sands. *HVAC THERMAL STORAGE: Practical application and performance issues*. ISBN 0860225593.
- [3] Guidelines for Low-temperature District Heating: “EUDP 2010-11: Full-Scale Demonstration of Low-Temperature District Heating in Existing Buildings” [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <http://www.danskfjernvarme.dk>
- [4] DINÇER, İbrahim a Marc ROSEN. *Thermal energy storage systems and applications*. New York: Wiley, c2002. ISBN 978-0-470-97073-7.
- [5] Martin Bloemendal a Niels Hartog. *Analysis of the impact of storage conditions on the thermal recovery efficiency of low-temperature ATEs systems* [online]. [cit. 2021-01-21] Dostupné z: http://www.nielshartog.nl/publications/Bloemendal_Hartog_Geothermics_2017.pdf
- [6] Harun Chowdhury, Nadeem Nafis a Bodius Salam. *Experimental study of Solar Ponds with Different Geometry and Construction Materials* [online]. [cit. 2021-01-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/305655224_Experimental_Study_of_Solar_Ponds_with_Different_Geometry_and_Construction_Materials
- [7] Ioan Sarbu a Calin Sebarchievici. *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage* [online]. [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/322757998_A_Comprehensive_Review_of_Thermal_Energy_Storage
- [8] A.E. Dixon a J.D. Leslie. *Solar energy conversion: An Introductory Course*. ISBN 0 08 024744 X.
- [9] S. Kalaiselvam a R. Parameshwaran. *Thermal energy storage technologies for sustainability: systems design, assessment and applications*. ISBN 978-0-12-417291-3. Dostupné z: <https://www.elsevier.com/>
- [10] Guideline for Seasonal Thermal Energy Storage Systems in the Built Environment [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: http://www.ectp.org/fileadmin/user_upload/documents/E2B/EINSTEIN/einstein-guidelines_stes-tanks-del-38.pdf
- [11] Ali Asadinik, M.Sc., P.Eng. Energy pile: A source of Green Energy Under Our Buildings [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: https://www.linkedin.com/pulse/energy-pile-source-green-under-our-buildings-asadinik-m-sc-p-eng/?trk=articles_directory

- [12] Per Alex Sørensen, Oliver Miedaner. *Borehole thermal energy storage systems in Germany and Denmark – Construction and operation experiences*. [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: https://www.academia.edu/27922357/Borehole_thermal_energy_storage_systems_in_Germany_and_Denmark_Construction_and_operation_experiences
- [13] Luisa F. Cabeza. *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications. Second edition*. ISBN: 978-0-12-819888-9
- [14] Jeffrey D. Spitler and Signhild Gehlin. Article “*Measured Performance of a Mixed-Use Commercial-Building Ground Source Heat Pump System in Sweden*” [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/journal/energies>
- [15] Jorn Stene, COWI AS. Article “*Long – Term Performance Monitoring of GSHP Systems for Commercial, Institutional and Multi – Family Buildings. Case study report for 1) KIWI Dalgård, 2) The SWECO Building and 3) Moholt 50/50 – Norway*” [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/documents/>
- [16] Frenziska Nockelmann “*Long – Term Performance Monitoring of GSHP Systems for Commercial, Institutional and Multi – Family Buildings. Case study report for KON, Germany*” [online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex52/documents/>
- [17] *Solar pond as a low-grade energy source for water desalination and power generation: a short review*[online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: https://www.reesjournal.org/articles/rees/full_html/2020/01/rees190009/rees190009.html
- [18] *Solární vytápění domů pomocí Trombeho stěny* [online]. [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.chytre-bydleni.cz/dum/solarni-vytapeni-domu-pomoci-trombeho-steny>
- [19] *Applicability of thermal energy storage in future low-temperature district heating systems – Case study using multi-scenario analysis*[online]. [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://research.chalmers.se/en/publication/ccca5b68-12c5-499e-8d26-5029ce86da8d>
- [20] *Rodinný dům* [online]. [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://www.rdrymarov.cz/rohe-90--1>
- [21] *Tepelné čerpadlo Viessman Vitocal 222-G 201.A-06* [online]. [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/bytne-budovy/tepelna-čerpadla/tepelna-čerpadla-zemevoda/vitocal-222g.html>
- [22] *Broušená cihla Porotherm 30 Profi* [online] [cit.2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.wienerberger.cz/zdivo-porotherm/produkty/cihly/porotherm-30-profi.html>

- [23] *Tepelná izolace Isover* [online]. [cit.2022-04-02].
Dostupné z: <https://www.isover.cz>
- [24] *Skládaný systémový strop Xella* [online]. [cit.2022-04-02].
Dostupné z: https://www.xella.cz/cs_CZ/stropni-system-klasik
- [25] *Vinylová podlaha VIVO CLICK* [online]. [cit.2022-04-02].
Dostupné z: <https://www.breno.cz/vivo-click-19-1-x-131-6-cm-richmond-oak-112-pvc-lamely/p91.0000099961/>
- [26] *VEKRA – český výrobce kvalitních oken a dveří* [online]. [cit.2022-04-02].
Dostupné z: <https://www.vekra.cz/>
- [27] *Výpočet tepelné ztráty budovy* [online]. [cit.2022-04-03]. Dostupné z:
<https://www.selfiehome.cz/2019/03/vypocet-tepelne-ztraty-budovy/>
- [28] *Výpočet potřeby tepla pro vytápění, větrání a přípravu teplé vody*
[online]. [cit.2022-04-03]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/47-vypocet-potreby-tepla-pro-vytapeni-vetrani-a-pripravu-teple-vody>
- [29] *Návrh vrtu pro tepelná čerpadla* [online]. [cit.2022-04-06]. Dostupné z:
<https://www.gerotop.cz/dimenzovani-hlubinnych-vrtu>
- [30] *Návrh zemní sondy pro tepelné čerpadlo* [online]. [cit.2022-04-06]. Dostupné z:
<https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/13052-navrh-zemni-sondy-pro-tepelne-cerpadlo>
- [31] *Tepelné vlastnosti vody při tlaku nasycení* [online]. [cit.2022-04-10]. Dostupné z:
<https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/7-tepelne-vlastnosti-vody-pri-tlaku-nasyceni>
- [32] Steve Kavanaugh, Kevin Rafferty. *Geothermal heating and cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems*. ISBN 978-1-936504-85-5.
- [33] *Základní vlastnosti vrtu pro tepelná čerpadla* [online]. [cit.2022-05-02].
Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/tepelna-cerpadla/9245-zakladni-vlastnosti-vrtu-pro-tepelna-cerpadla>
- [34] Prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc: *Přenos tepla a látky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 8021420294.
- [35] PAVELEK, M., *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A	Plocha	[m ²]
b	Korekční součinitel	[-]
c _p	Měrná tepelná kapacita	[J/kg·K]
c _v	Objemová tepelná kapacita	[J/ m ³ ·K]
D	Vytápěcí denostupně	[K.dny]
d _{tr}	Průměr trubky	[m]
d	Délka otopného období	[den]
e _d	Opravný součinitel	[-]
e _i	Opravný součinitel	[-]
e _t	Opravný součinitel	[-]
H	Měrná tepelná ztráta	[W/K]
L	délka	[m]
m	hmotnost	[kg]
N	Počet pracovních dní soustavy v roce	[den]
Nu	Nusseltovo bezrozměrné číslo	[-]
n	Množství vzduchu vyměněné za jednu hodinu	[-]
Q _n	Tepelná energie	[J/m]
Q _{ex}	Množství odebrané energie z vrtu	[kWh/rok]
Q _t	Tepelná ztráta prostupem	[W]
Q _v	Tepelná ztráta větráním	[W]
Q _{vyt,r}	Roční potřeba tepla na vytápění	[MWh/rok]
Q _{TUV}	Potřeba tepla na ohřev TUV	[kWh]
q _l	Specifický odběrový tepelný tok	[W/m]
Pr	Prandtlovo bezrozměrné číslo	[-]
R	Tepelný odpor	[m ² ·K/W]
R _{vrt}	Tepelný odpor	[m·K/W]
Re	Reynoldsovo bezrozměrné číslo	[-]
t _i	Vnitřní teplota	[°C]
t _{e1}	Skutečná teplota na straně exteriéru	[°C]
t _{e2}	Výpočtová venkovní teplota	[°C]
t _{es}	Průměrná teplota během otopného období	[°C]
U	Součinitel prostupu tepla	[W/m ² ·K]
V	Objem vzduchu v domě	[m ³]
V _{2p}	Celková potřeba vody za 1 den	[m ³ /den]
α	Součinitel přestupu tepla	[W/m ² ·K]
β ₀	Koeficient	[-]
β ₁	Koeficient	[-]
δ	tloušťka	[m]

Symbol	Veličina	Jednotka
ε	Opravný součinitel	[-]
η_o	Účinnost možnosti regulace soustavy	[%]
η_r	Účinnost rozvodu vytápění	[%]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W/m·K]
μ	Dynamická viskozita	[Pa/s]
ν	Kinematická viskozita	[m ² /s]
ρ	hustota	[kg/ m ³]
τ	čas	[s]
τ_{rok}	čas	[h/rok]
Φ	Výkon tepelného čerpadla	[kW]
Ψ	Lineární činitel prostupu tepla	[W/m·K]

Zkratka	Význam
ATES	Aquifer thermal energy storage
BTES	Borehole thermal energy storage
COP	Coefficient of Perfomance
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
TČ	Tepelné čerpadlo
TES	Thermal energy storage
TCM	Thermochemical Materials
TUV	Teplá užitková voda
PCM	Phase Change Materials
RBTS	Rock bed thermal energy storage
VVT	Vrtný výměník tepla

Index	Význam
bet.maz.	betonová mazanina
char.	charakteristický
chl	chladicí
d	den
hydr.iz.	hydroizolace
hl	hlína
iz	izolace
konv	konvekce
p	potrubí
r	rok
RD	rodinný dům
svl	studená voda v letě
svz	studená voda v zimě
top	topný
tr	trubka

Index	Význam
v	voda
vm	výplňový materiál
vin.podl	vinylová podlaha
vz	vzduch
zem	zemina

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1.1 Typický cyklus nabíjení, uschování a vybíjení tepelného akumulátoru [1].
- Obr. 2.1 Rozsah návrhové přivedené a vratné teploty nízkoteplotního dálkového vytápění [3].
- Obr. 2.2 Základní pracovní princip ATES [5].
- Obr. 2.3 Schematické zobrazení solárního bazénu [6].
- Obr. 2.4 Trombého stěna [7].
- Obr. 2.5 Drum Wall (Steve Baer) [8].
- Obr. 2.6 Schematické zobrazení akumulací tepla v horninovém materiálu [9].
- Obr. 2.7 Schéma jámového zásobníku [10].
- Obr. 2.8 Základní pracovní princip energetických pilotů [11].
- Obr. 2.9 Schematické zobrazení instalaci energetických pilot [11].
- Obr. 2.10 Využití energetických pilot pro odmrazování mostní desky [11].
- Obr. 2.11 Využití energetických pilot pro tání sněhů na chodníku ve městě Klamath Falls (Spojené státy) [11].
- Obr. 2.12 Běžné typy a vertikální řezy vrtných výměníků [12].
- Obr. 2.13 Rozložení BTES ve městě Braedstrup, pohled shora a řez [12].
- Obr. 2.14 Pohled na Studenthuset [14].
- Obr. 2.15 Schématické zobrazení systému vytápění a chlazení budovy Studenthuset [14].
- Obr. 2.16 Budova SWECO [15].
- Obr. 2.17 Umístění solárních panelů na budově SWECO (pohled shora) [15].
- Obr. 2.18 Schematické zobrazení umístění vrtů [15].
- Obr. 2.19 Výkresová schéma systému v „režimu vytápění“ – požadavek na vytápění [15].
- Obr. 2.20 Výkresová schéma systému v „režimu chlazení“ – požadavek na chlazení [15].
- Obr. 2.21 Pohled na dvě budovy z východní strany [16].
- Obr. 2.22 Půdorys umístění vrtů [16].
- Obr. 2.23 Zjednodušené schéma systému pro vytápění a ohřev TUV [16].
- Obr. 3.1 Model rodinného domu [20].
- Obr. 4.1 Tepelné čerpadlo Vitocal 222-G 201.A06 [21].
- Obr. 4.2 Specifické směrné hodnoty pro 1 m vrtu dle VDI 4650 [29].
- Obr. 4.3 Příčný řez vrtu s U-trubkou.
- Obr. 4.4 Tvarové faktory odporu vrtu pro umístění U-trubice [32].
- Obr. 4.5 Tepelný odpor vrtu jako závislost na tepelné vodivosti výplní vrtu [33].
- Obr. 4.6 Příklad umístění vrtu a okolní horniny.
- Obr. 5.1 Schematické zobrazení vrstev zeminy.
- Obr. 5.2 Průběh teplot v zemi.
- Obr. 5.3 Ukázka výpočtu nabíjení zeminy.
- Obr. 5.4 Graf nabíjení akumulátoru tepla během 40 dní.
- Obr. 5.5 Ukázka výpočtu vybíjení akumulátoru.
- Obr. 5.6 Graf vybíjení akumulátoru tepla během 232 dní
- Obr. 6.1 Graf závislosti průběhu teploty zeminou na tepelné vodivosti. Režim nabíjení.
- Obr. 6.2 Graf závislosti průběhu teploty zeminou na tepelné vodivosti. Režim vybíjení.
- Obr. 6.3 Graf nabíjení akumulátoru závislé na teplotě ohřivacího media. Režim nabíjení.
- Obr. 6.4 Vybíjení akumulátoru závisle na teplotě ohřivacího media. Režim vybíjení.
- Obr. 6.5 Graf vybíjení akumulátoru závisle na délce vrtu.
- Obr. 6.6 Graf vybíjení akumulátoru při snížení potřeby tepla.
- Obr. 6.7 Graf vybíjení akumulátoru při zvýšení potřeby tepla.
- Obr. 6.8 Graf odběru tepla bez předchozího nabíjení.

SEZNAM TABULEK

- Tab. 3.1 Parametry rodinného domu [20].
- Tab. 4.1 Použité materiály obvodových stěn [22], [23].
- Tab. 4.2 Použité materiály pro střechu [23], [24].
- Tab. 4.3 Okna [26].
- Tab. 4.4 Dveře [26].
- Tab. 4.5 Použité materiály pro podlahu [25].
- Tab. 4.6 Vypočtené hodnoty tepelných odporů.
- Tab. 4.7 Vypočtené hodnoty součinitele prostupu tepla.
- Tab. 4.8 Výsledné hodnoty
- Tab. 4.9 Technické údaje tepelného čerpadla Viessman Vitocal 222-G 201.A06 [21].
- Tab. 4.10 Výpočtové parametry hlíny.
- Tab. 4.11 Výpočtové parametry PE-RC trubky.
- Tab. 4.12 Výpočtové parametry vody při 40 °C [31]
- Tab. 4.13 Výsledné hodnoty jednotlivých tepelných odporů.
- Tab. 5.1 Výsledné hodnoty jednotlivých hmotností zeminy.
- Tab. 5.2 Počáteční stav – nabíjení „Den 1“.
- Tab. 5.3 Počáteční stav – nabíjení „Den 2“.
- Tab. 5.4 Koncový stav – nabíjení „Den 40“.
- Tab. 5.5 Počáteční stav – vybíjení „Den 1“.
- Tab. 5.6 Počáteční stav – vybíjení „Den 2“.
- Tab. 5.7 Koncový stav – vybíjení „Den 232“.
- Tab. 6.1 Počáteční stav – vybíjení „Den 1“.
- Tab. 6.2 Koncový stav – vybíjení „Den 232“.