



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV ENERGETIKY

Dlouhodobá akumulace tepelné energie

Seasonal thermal energy storage

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetika
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Funda, Ph.D.

Bc. Ondřej Mareš

Praha 2016

Anotační list

Jméno autora	Bc. Ondřej Mareš
Název BP/DP	Dlouhodobá akumulace tepelné energie
Anglický název:	Seasonal thermal energy storage
Akademický rok:	2016/2017
Ústav/Odbor:	Ú12115 – Ústav energetiky
Vedoucí BP/DP:	Ing. Zdeněk Funda, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 88 Počet obrázků: 33 Počet tabulek: 23 Počet příloh: 5
Klíčová slova:	akumulace tepelné energie, solární kolektor, akumulční zásobník, bytový dům
Keyword:	Thermal energy storage, solar collector, reservoir storage, residential house
Anotace:	Diplomová práce se zabývá návrhem systému dlouhodobé akumulace tepelné energie získané ze slunečního záření. Návrh je proveden pro modelový bytový dům o 20 bytových jednotkách. Dále je provedena energetická bilance provozu systému a následné posouzení z ekonomického hlediska. V práci jsou také uvedeny v současnosti používané technologie dlouhodobé akumulace tepelné energie.
Abstract:	The main topic of the master thesis is design of seasonal thermal energy storage system with energy gain from solar radiation. The project is applied on model residential house containing 20 flats. During next steps the operating energy balance of the system and economical assessment are made. Thesis also presents the research of current technology solutions of seasonal thermal energy storage.

Bibliografická citace

MAREŠ, O. *Dlouhodobá akumulace tepelné energie*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Funda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Dlouhodobá akumulace tepelné energie“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Fundy, Ph.D. Během psaní jsem využíval zdroje uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použitých zdrojů.

V Praze, dne 15. 12. 2016

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Fundovi, Ph.D. za cenné rady, odborné vedení a ochotnou spolupráci.

Dále děkuji svým rodičům za jejich podporu během doby mého studia.

Obsah

1	Úvod.....	10
2	V současnosti používané sezónní zásobníky	11
2.1	Aquifer - zásobníky	11
2.1.1	Zásadní faktory rozhodující o efektivním provozu systému ATES:.....	12
2.1.2	Provozní limitace systému ATES.....	13
2.2	BOREHOLE - zásobníky	14
2.2.1	Zakrytí vrchní části zásobníku.....	15
2.3	TANK - zásobníky.....	17
2.3.1	Konstrukce zásobníků	17
2.3.2	Možnosti snižování tepelných ztrát.....	19
2.4	PIT - zásobníky.....	20
2.4.1	Navrhování a konstrukce	20
2.4.2	Tvar zásobníku	21
2.4.3	Hydroizolační vrstva	21
2.4.4	Krycí plovoucí vrstva	22
2.4.5	Systém vstupního a výstupního potrubí.....	24
2.4.6	Geologické podmínky	26
2.5	Příklady instalovaných zásobníků	27
2.5.1	TANK	27
2.5.2	PIT	32
3	Prvky solární soustavy	33
3.1	Solární kolektory	33
3.1.1	Ploché kolektory	33
3.1.2	Trubkové vakuové kolektory	34
3.1.3	Účinnost a výkon kolektoru	36
3.1.4	Navrhování plochy solárních kolektorů.....	39
3.1.5	Zapojení kolektorů a kolektorových polí.....	40
3.1.6	Teplonosná kapalina.....	40
3.1.7	Instalace solárních kolektorů na střechy bytových domů.....	41
3.2	Ostatní prvky solární soustavy	44
3.2.1	Oběhová čerpadla.....	44

3.2.2	Výměníky tepla	44
3.2.3	Provozní zásobníky	44
3.2.4	Ostatní prvky	46
4	Výběr lokality a stanovení modelové budovy	47
4.1	Výběr lokality	47
4.2	Modelová budova	47
4.2.1	Charakteristika modelové budovy.....	48
4.3	Energetické hodnocení modelové budovy	50
4.3.1	Tepelná ztráta modelové budovy.....	50
4.3.2	Potřeba tepla na vytápění	50
4.3.3	Potřeba tepla pro přípravu teplé vody	52
5	Výběr technického řešení	54
6	Návrh technického řešení.....	56
6.1	Popis hlavních prvků systému.....	56
6.1.1	Solární kolektory.....	56
6.1.2	Sezónní zásobník tepla a dispozice a úpravy sklepních prostor.....	57
6.1.3	Tepelné čerpadlo voda - voda	60
6.1.4	Elektrický kotel	60
6.2	Popis provozu systému během roku.....	60
7	Energetická bilance provozu systému	62
7.1	Návrh a bilance soustavy solárních kolektorů	62
7.1.1	Skutečná denní dávka slunečního ozáření	62
7.1.2	Účinnost solárního kolektoru	64
7.1.3	Stanovení plochy apertury kolektorů	65
7.1.4	Měsíční využitelné tepelné zisky solárních kolektorů	65
7.2	Tepelná ztráta akumulčních zásobníků.....	66
7.3	Energetická bilance systému	67
7.3.1	Obecná charakteristika.....	67
7.3.2	Bilanční postup	68
7.4	Vyhodnocení	71
8	Ekonomická úvaha.....	75
8.1	Odhad nákladů projektu	75

8.2	Doba návratnosti investice	76
8.3	SWOT analýza	77
9	Závěr	78
10	Seznam použitých zdrojů.....	80
11	Seznam použitých symbolů a zkratek.....	83
12	Seznam obrázků, tabulek a příloh	86
12.1	Seznam obrázků	86
12.2	Seznam tabulek	87
12.3	Seznam příloh.....	88

1 Úvod

Motivací ke psaní diplomové práce tohoto tématu jsou především dva trendy, které panují v dnešní energetice.

Tím prvním je snaha snižovat energetickou závislost na neobnovitelných zdrojích. Tím pádem zvýšit spotřebu energie získané z alternativních, obnovitelných zdrojů, mezi které bezesporu patří energie solární. Druhým trendem je decentralizace. Neboli snaha jednotlivých objektů nebo menších skupin objektů o energetickou nezávislost na větším, centrálním zdroji energie.

Diplomová práce je zaměřena na téma využití dlouhodobé akumulace tepelné energie získané ze slunečního záření pro energetické potřeby bytového domu. Obecně systémy s dlouhodobou akumulací uchovávají přebytky tepla získané v určitém období, tyto přebytky dokáží následně účelně využívat v období se zvýšenou spotřebou energie. Konkrétně se zde jedná o akumulaci letních přebytků tepla získaných ze solárního záření a o jejich následné využití k dodávkám tepla do bytového domu v období přechodném a zimním.

První část práce se zaměřuje na popis čtyř v současnosti používaných systémů dlouhodobé akumulace citelného tepla získaného ze solárního záření. Každý ze systémů využívá odlišný sezónní zásobník, jinak je jejich funkční princip velmi podobný.

Druhá část práce se zabývá samotným návrhem systému dlouhodobé akumulace tepelné energie v modelovém bytovém domě. Během návrhu je systém tepelně bilancován. Hlavním výsledkem tepelné bilance bude solární pokrytí tepelných potřeb bytového domu.

2 V současnosti používané sezónní zásobníky

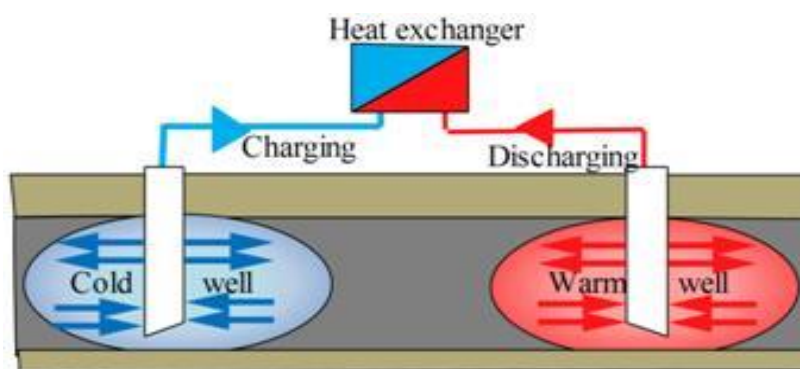
Výzkum technologií dlouhodobé akumulace tepelné energie v Evropě započal již v 70. let minulého století. První zkušební systém byl postaven a uveden do provozu ve Švédsku v roce 1979. Díky působení mezinárodní energetické agentury se podařilo výzkum těchto systémů rozšířit dále po Evropě. Do Švýcarska, Řecka, Itálie, Nizozemska a zejména do Dánska a Německa.

Z výzkumů prováděných během posledních 20 let vyšly jako nejvhodnější čtyři různé typy akumulátorů, kterými se zabývá následující část práce. Všechny systémy jsou založeny na akumulaci citelného tepla získaného ze slunečního záření pomocí solárních kolektorů.

2.1 Aquifer - zásobníky

Ukládání tepelné energie do propustného podloží (angl. aquifer thermal energy storage – ATES) spadá do kategorie akumulace tepelné energie pod zemský povrch (angl. underground thermal energy storage - UTES). Využití tohoto typu akumulace vždy úzce závisí na lokálních geologických podmínkách, na tom, jaký typ úložiště bude zvolen (otevřený nebo uzavřený okruh), na pracovním rozsahu teplot a na tom zda bude využito pro zásobování teplem i chladem.

ATES se řadí mezi systémy s otevřeným okruhem. Pro ukládání a znovuzískávání tepelné energie je v tomto případě využito spodních vod nacházejících se v propustných vrstvách horniny pod povrchem země. Systém ATES se obecně skládá ze dvou od sebe vzdálených studní, sloužících pro čerpání podzemních vod, tepelných výměníků, oběhových čerpadel a systému vytápění respektive chlazení budovy.



Obrázek 1: ATES systém [14]

V běžném provozu ATES během letního období je studená spodní voda o teplotách v obvyklém rozsahu 5 až 10 °C čerpána z jímací studny a dopravena do výměníku tepla, kde odebírá teplo teplému chladivu nebo vzduchu, který je do výměníku přiváděn ze systému vytápění/chlazení budovy. Ochlazený vzduch nebo chladivo je poté dodán zpět do budovy, kde slouží k zajištění požadované dodávky chladu. Ohřátá spodní voda je po průchodu tepelným výměníkem čerpána akumulací studnou zpět pod zemský povrch z důvodu udržení konstantní hladiny spodní vody a také akumulace tepelné energie.

Během zimního nebo přechodného období je ohřátá spodní voda čerpána z jímací studny do výměníku tepla a navrácena ochlazená zpět akumulací studnou pod zemský povrch. Podobně jako při režimu chlazení je studený vzduch nebo chladivo ohříváno spodní vodou ve výměníku tepla a následně dopraveno do budovy, kde slouží k efektivnímu zajištění požadované dodávky tepla.

2.1.1 Zásadní faktory rozhodující o efektivním provozu systému ATES:

- V lokalitě určené k výstavbě systému ATES musí být před zahájením stavebních prací proveden geologický výzkum. Musí být zjištěna míra stability zemského povrchu a hodnoty přirozených průtoků spodní vody. Obecně platí čím nižší průtok, tím lépe. Ideální jsou stojaté spodní vody, jelikož do nich akumulovaná tepelná energie není nikam proudící vodou odnášena.
- Instalace systému ATES by měla být provedena mezi dvěma nepropustnými vrstvami horniny.
- Zemské vrstvy obsahující pískovec, vápenec, štěrk nebo vodou naplněné propustné písky jsou rovněž výhodné k instalaci ATES systému.
- Konstrukce zařízení musí být přizpůsobena hydraulickým poměrům podzemních vod v dané lokalitě. S tím také souvisí správné navržení kapacity akumulací zásobníku
- Geologický průzkum také stanoví teploty v jednotlivých vrstvách podzemních vod. Dle toho se dále určuje hloubka vrtu pro jímací a akumulací studnu.
- Ověření směru toku spodní vody, její chemické koncentrace a statické výšky.

Na základě konfigurace systému a jeho jednotlivých komponent zahrnující jímací studnu, akumulární studnu, tepelné výměníky a čerpadla zajišťující průtok jak spodní vody, tak vody topné jsou ATES systémy hodnocené jako proveditelné pro středně velké až velké instalace akumulace tepelné energie. Tepelná kapacita zásobníku systému ATES může být až 15 kWh/m^3 podzemní vody. Očekávaná životnost systému ATES je odhadována na 20 až 25 let.

Studny obvykle zasahují do hloubek 50 - 300 m pod zemský povrch. Existují, ale i takové instalace, kde jsou studny vrtány až do hloubky přesahující 1 200 m pod povrchem. Podzemní voda je ohřívána do nízkých teplot nepřesahujících $50 \text{ }^\circ\text{C}$ a to z důvodu absence tepelné izolace a také z důvodu hygienických a etických, kdy jsou spodní vody využívány jako zdroj vody pitné a přílišné ohřátí by mohlo ovlivnit jejich kvalitu. [1]

2.1.2 Provozní limitace systému ATES

- Možná destabilizace kvality podzemní vody uložené v zemských vrstvách.
- Rozmístění hloubkových vrtů sloužících k založení jímací a akumulární studny.
- Podmínky s vysokou náchylností k výskytu a množení bakterií, plísní, řas a parazitů na teplosměnných plochách. Dáno provozními teplotami.
- Možnost vytvoření nepříznivého jevu fluktuace hladiny podzemní vody při provozu ATES systému.



Obrázek 2: Využití ATES systému. Letiště Arlanda, Stockholm, Švédsko [7]

2.2 BOREHOLE - zásobníky

Dlouhodobá akumulace tepelné energie v soustavě podzemních vrtů (angl. borehole thermal energy storage - BTES) spadá do kategorie systémů akumulace tepelné energie přímo do zemského povrchu (UTES) s uzavřeným okruhem. Provozní vlastnosti systému BTES jsou tak podobné jako systémy ATES. BTES systém se primárně skládá ze soustavy HDPE U-trubek vložených do soustavy svislých vrtů, vytvářejících rozměrný tepelný výměník. U-trubky jsou naplněny kapalinou, která slouží k přenosu tepla, většinou se jedná o vodu doplněnou o nemrznoucí složku. Kapalina proudí v trubkách dodává nebo odebírá teplo ze zemského povrchu. Během nabíjení je udržován směr proudění od středu ke krajním hranicím akumulátoru z důvodu udržení nejvyšších teplot ve středu a nižších na okrajích akumulátoru. Během vybíjení se směr proudění obrací. Samotný zásobník tepla představuje nahřátý objem zeminy. Svrchní vrstva akumulátoru musí být tepelně zaizolována, aby nedocházelo k přílišným tepelným ztrátám. Další důležité prvky systému zpravidla tvoří oběhová čerpadla, tepelný výměník uvnitř budovy (výměňiková stanice), tepelné čerpadlo, solární kolektory pro nabíjení systému akumulace.

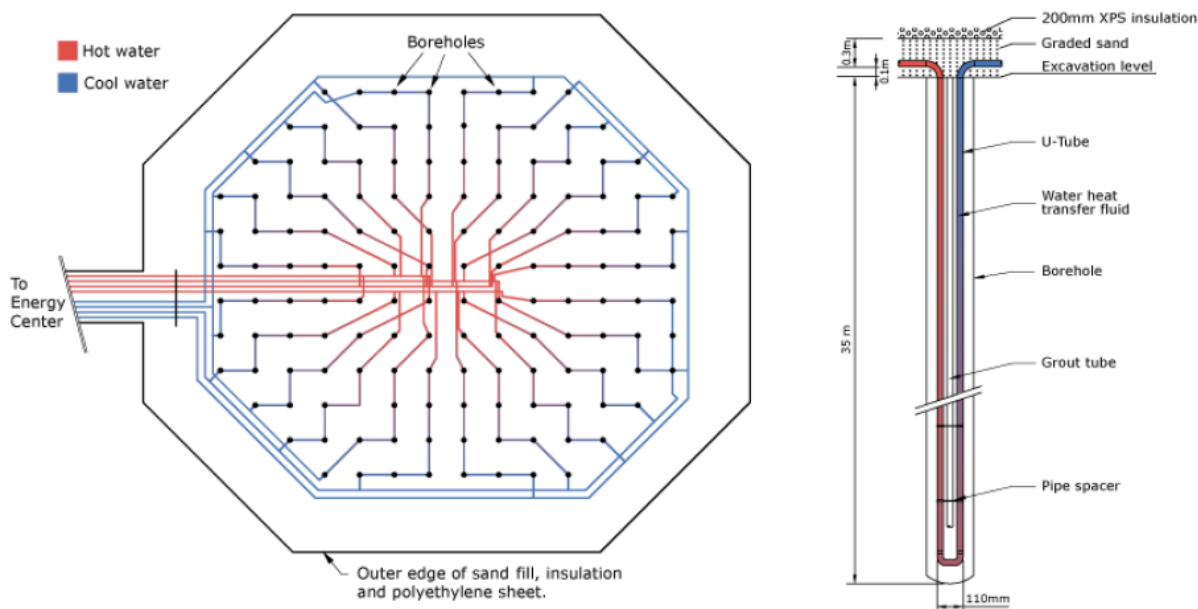
Vhodné geologické podmínky pro tento typ akumulčních zásobníků tvoří půda obsahující hodně kameniva, nebo vodou nasycená půda s žádným nebo velmi nízkým přirozeným průtokem podzemní vody. BTES bývají obvykle implementovány do půdy z vysokou tepelnou kapacitou a naopak nízkou propustností. Ve většině případů jsou vyžadovány údaje o rozsahu oblasti, která bude ovlivněna teplotními změnami.

Maximální teploty v BTES systému mohou dosahovat 80 °C. Nicméně, k dosažení stejné kapacity jako u tradičních velkokapacitních vodních zásobníků musí být BTES akumulátor třikrát až pětikrát objemnější. To je dáno tím, že kapacita půdy je ve většině případů jen 15 - 30 kWh/m³. Pro porovnání voda dokáže při uvažování teplotního rozdílu 70 K pojmout 81,2 kWh/m³.

Aby tento typ zásobníků byl energeticky a finančně výhodný měl by mít objem minimálně 20000 m³ zeminy. Výhodou těchto zásobníků je jejich flexibilita, kdy je možné snadno připojit dodatečné vrty a tím rozšířit akumulční objem a kapacitu systému. [6]

Systém BTES je možno používat celoročně jak k vytápění budovy, tak k jejímu chlazení. Během celého roku kapalina proudí v polyethylenových U-trubkách zapuštěných do

zemských vrtů. Jedná se o uzavřený okruh. V zimním období je teplo naakumulované v půdě využíváno jako zdroj pro výrobu tepla s pomocí tepelného čerpadla a následné vytápění budovy a dodávku TV. Během letního období se kapalina proudící v podzemních vrtech ochlazuje. Kapalina poté ve výměníku odebere teplo z chladicího systému budovy, ohřátá se vrací zpět pod zem, kde se znovu ochladí odevzdáním tepla do zeminy a celý děj se opakuje.

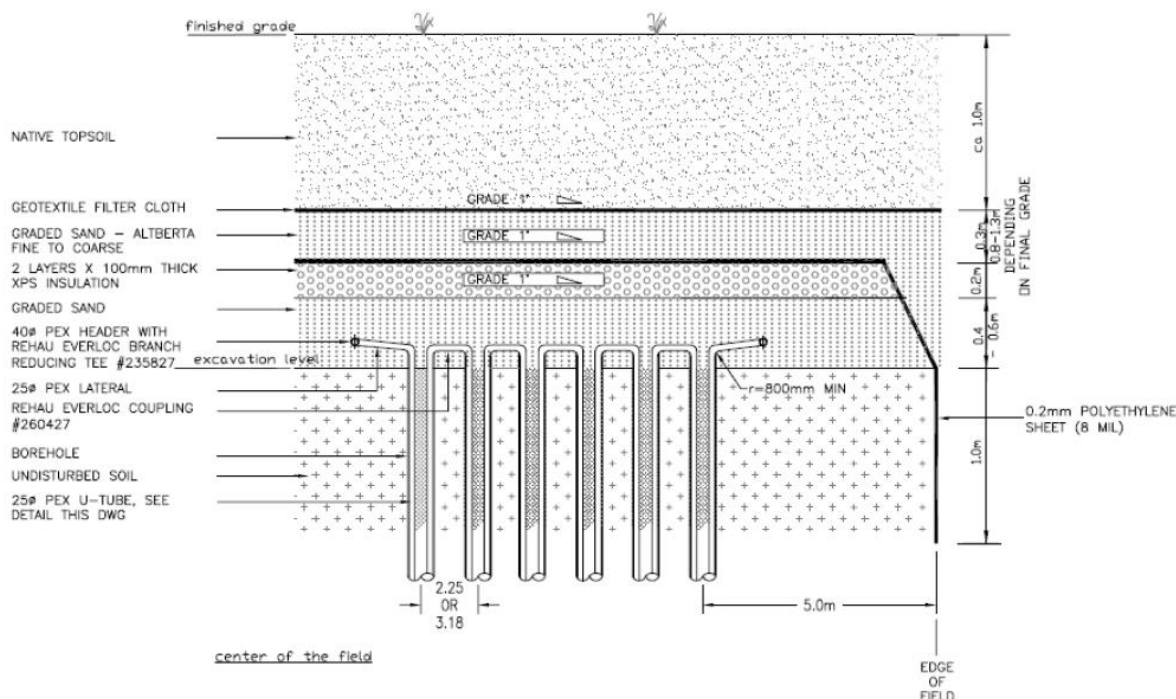


Obrázek 3: Dispozice BTES zásobníku a příčný řez jedním vrtem. Drake Landing Solar Community, Canada [6]

2.2.1 Zakrytí vrchní části zásobníku

Pospojované polyetylenové trubky a sběrný jsou nejdříve pokryty asi 0,5 metru silnou vrstvou písku, na kterou je následně vložena tepelně izolační vrstva. Pro tu se s výhodou často využívá extrudovaného polystyrenu (XPS). Ten není příliš náchylný na vlhké prostředí a je odolný vůči tlakovému zatížení. To je vyvolané navrstvením další 0,5 metru silné vrstvy písku a 1 metr silné vrstvy původní zeminy. Mezi vrstvou písku a vrstvou původní zeminy se vkládá geotextilie. [6]

Plocha vzniklá nad takto zakrytým akumulátorem je vhodná k různým použitím. Může se osadit zelení, může se na ní vytvořit parkoviště, hřiště, atd.



Obrázek 4: Řez vrchní části BTES zásobníku [6]

Tabulka 1: Charakteristické hodnoty BTES [1]

Charakteristické hodnoty BTES		
Parametr	Hodnota	Jednotky
Průměr vrtu	100 - 150	mm
Hloubka vrtu	30 - 100	m
Rozteč jednotlivých vrtů	2 - 4	m
Tepelná vodivost zeminy	2 - 4	W/mK
Rychlost proudění v HDPE U-trubkách	0,5 - 1	m/s
Průměrná tepelná kapacita na 1 metr délky vrtu	20 - 30	W/m
Min / max vstupní teplota	-5 / + 90	°C

Obdobně jako systémy ATES mají BTES systémy určité limitace v jejich použití ve středně velkých až velkých aplikacích:

- Relativně vysokou část investičních nákladů si vyžádá samotné vyvrtání hlubinných sond (vrtů). V obvyklých případech se jedná o 20 až 25 % z celkové ceny BTES systému.
- Možnost vytvoření tepelných fluktuací v podzemních hydrogeologických strukturách.

2.3 TANK - zásobníky

Jedná se o další technické řešení, jak lze dlouhodobě akumulovat tepelnou energii získanou ze solárních systémů a tím snižovat závislost budov na spotřebě energie z neobnovitelných zdrojů.

Obecně se velkoobjemové zásobníky pro kapaliny o vysokých teplotách v průmyslu používají již mnoho desítek let. K rozsáhlejšímu využití zásobníků pro účely dlouhodobé akumulace tepelné energie dochází ve světě až v posledních dvou dekadách. Tepelná energie naakumulovaná do zásobníků v letním období je v období zimním využívána k dodávce tepla pro obsluhované objekty.

Potřeba dlouhodobě akumulovat tepelnou energii klade na konstrukci zásobníků nelehké konstrukční požadavky zejména v oblasti minimalizování tepelných ztrát. Snahou je docílit, co nejnižších tepelných ztrát ze zásobníku do okolního prostředí a tím docílit, co nejvyšší účinnosti systému dlouhodobé akumulace tepelné energie. Tento požadavek se však střetává zejména se snahou udržet, co nejnižší investiční náklady zásobníku a celého funkčního celku akumulace.

I přes snahy o jejich snížení, dosahují roční tepelné ztráty zásobníku u již provozovaných systémů 20 až 50 % z celkové dodané energie solárním systémem. Existuje mnoho konstrukčních řešení akumulčních zásobníků, jejichž ceny se liší. Obecně však platí, že jednotková cena zásobníku za m^3 s rostoucím objemem klesá. U velkých zásobníků (objem nad $10\,000\ \text{m}^3$) se jednotková cena pohybuje rámcově okolo $3\,000\ \text{Kč}/\text{m}^3$ u zásobníků kategorizovaných jako malé (objem pod $400\ \text{m}^3$) to může být až $10\,000\ \text{Kč}/\text{m}^3$. [12]

2.3.1 Konstrukce zásobníků

Konstrukce zásobníků bývá většinou realizována z oceli, případně železobetonu, který může být monolitický, montovaný i předpjatý. Menší ocelové zásobníky, z pravidla o objemu do cca $250\ \text{m}^3$, bývají na stavbu dodávány v celku již z výroby. Větší zásobníky se montují přímo na stavbě. Obecně zásobníky sloužící pro dlouhodobou akumulaci tepelné energie bývají projektovány jako beztlaké. V praxi u objemů do cca $300\ \text{m}^3$ se lze setkat i s použitím tlakových nádob. [12]

Hydroizolační funkce je u zásobníků plněna buď vlastní konstrukcí (materiálem je ocel nebo vodostavebný beton), nebo jsou použity specifické hydroizolační vrstvy. Nejčastěji se používá plechů z nerezové oceli.

Na stanovení výše tepelných ztrát má rozhodující vliv konstrukce a materiál tepelněizolační vrstvy. Materiál tepelné izolace musí mít malou tepelnou vodivost, která by neměla být příliš závislá na okolních podmínkách (vysoká teplota a vlhkost prostředí, proudění vzduchu). V minulosti byla tepelněizolační vrstva tvořena zejména pomocí minerální vlny, u které při zvýšené vlhkosti a teplotě vzrůstá tepelná vodivost. V současnosti se na většině projektů uplatňuje tepelná izolace na bázi granulovaného pěnového skla většinou použitého v sytké formě. Dále se v těchto aplikacích nabízí využití různých lehčených kameniv (keramzit), perlitu a různých stříkaných izolací. Lze také použít polystyrenové tepelné izolace (EPS a XPS).

Z praxe vyplývá, že u většiny případů již postavených systémů dlouhodobé akumulace tepla v teplovodních zásobnících skutečné provozní tepelné ztráty převyšují tepelné ztráty uvažované ve fázi projektu. Hlavní důvody vedoucí ke zvýšeným tepelným ztrátám zásobníků uvádějí následující body:

- S rostoucí vlhkostí tepelné izolace vzrůstá její tepelná vodivost. To je navíc ještě umocněno s rostoucí teplotou. Problémy z vlhkostí izolační vrstvy jsou patrné zejména u podzemních zásobníků.
- Problematické proudění vzduchu v souvrství pláště. Způsobeno tím, že izolace ne vždy těsně přilehne na stěny zásobníku. Rozdílné teploty vzduchu ve vzniklých dutinách způsobují jeho nežádoucí proudění.
- Technologická nekázeň během montáže; nedodržení projektu. [12]

Většinu z uvedených bodů vedoucí ke zvýšeným tepelným ztrátám, až na technologickou nekázeň během montáže, lze předvídat. Proto mohou být tyto body pokryty již během projekčních prací.

2.3.2 Možnosti snižování tepelných ztrát

V současnosti je téma snižování tepelných ztrát teplovodních zásobníků sloužících ke dlouhodobé akumulaci tepelné energie v popředí zájmu. Proto by již při samotném návrhu měly být zohledněny výše uvedené body. Tepelněizolační plášť by měl těsně přiléhat ke stěně zásobníku, vlastní materiál izolace by měl mít nízký součinitel prostupu tepla i při zvýšené vlhkosti a teplotě, montáž by měla být provedena precizně a přesně. V otázce tepelných izolací se také v dnešní době nabízí použití nových materiálů a technologií. Kupříkladu lze vybírat mezi těmito metodami:

2.3.2.1 Aerogel

Porézní, ultra lehký (objemová hmotnost 3-5 kg/m³) materiál vyráběný převážně z oxidu křemičitého (tzv. silica gel) odstraňováním kapalné části z gelu. Má nízkou tepelnou vodivost ($\lambda = 0,015 - 0,020 \text{ W/mK}$). Tento materiál není odolný proti vodě. Kvůli vysoce porézním vlastnostem se při vzájemném kontaktu jeho struktura opět přeměňuje v gel. Proto musí být spolehlivě zamezen jeho styk s vodou konstrukčním řešením, nebo musí být opatřen ochrannou vrstvou. [12]

2.3.2.2 Vakuová izolace

Základem tohoto typu izolace je pevná porézní struktura, ve které je podtlak na hranici vakua. Tato vrstva je z obou stran opatřena vzduchotěsnou a mechanicky odolnou fólií. Vakuová vrstva se vyznačuje velmi nízkou tepelnou vodivostí ($\lambda = 0,007 \text{ W/mK}$). Vakuová izolace je vyráběna v podobě izolačních panelů s normovanými rozměry.

V současnosti je problémem rozsáhlejšího používání Aerogelu nebo vakuové izolace jejich vysoká cena. I přes určitý pokles v posledních letech dosahují ceny pro oba materiály cca 3000 Kč/m² (tloušťka 20 mm). Dalším úskalím může být tvarová stálost izolačních panelů. Panely nelze upravovat přesně dle požadavků zásobníku a proto je někdy velmi obtížné zásobník těmito technologiemi precizně zaizolovat. Z tohoto pohledu jsou ve výhodě stříkané tepelné izolace.

2.3.2.3 Vakuové zásobníky

U těchto zásobníků je k plnění izolačních schopností využito stejného principu jako u vakuové izolace. V podstatě se jedná o dvouplášťový zásobník, kde v dutině mezi pláští je

vytvořen podtlak. Převážná část tepla je pak sdílena pouze radiací. Působení radiace je pak možné omezit vkládáním stínících přepážek do dutiny. Zde je ale problematické samotné ukotvení přepážek tak, aby nevznikaly "tepelné mosty". Dále je možné snižovat vliv radiace podobně jako u vakuových izolací pomocí vložení porézního materiálu do dutiny mezi stěnami.

Výrobci vakuových zásobníků pro dlouhodobou akumulaci tepla figuruje prozatím na trhu velmi málo. Například v roce 2013 se na německém trhu objevil výrobce, který nabízí vakuové zásobníky o velikosti od 2 do 40 m³. Jedná se o ocelové dvouplášťové nádoby s dutinou vyplněnou porézním materiálem na bázi perlitu a evakuovanou na méně než 0,1 mbar. Změřený součinitel prostupu tepla stěn zásobníku dosahuje $U = 0,07 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ pro teplotní rozdíl 80 K. Zásobníky těchto objemů jsou vhodné k použití akumulace tepelné energie ze solárních kolektorů jak pro rodinné domy, tak pro větší bytové domy. Nevýhodou těchto akumulátorů je opět vysoká cena, která se dle údajů výrobce pohybuje okolo 2 500 €/m³. [15]

2.4 PIT - zásobníky

Princip funkce je zde obdobný jako u TANK zásobníků. Rozdíl je v tom, že se nevyužívá objemných ocelových nebo železobetonových nádrží, nýbrž rozměrných prohlubní v zemském povrchu naplněných vodou, která slouží jako akumulární náplň.

Tento typ akumulátorů se v současnosti využívá zejména pro rozsáhlejší systémy, kdy je teplem z akumulátoru zásobováno větší množství objektů. Investiční náklady jsou oproti klasickým nádržím výrazně nižší. Podle dosavadních instalací jsou měrné náklady na 1 m³ objemu PIT zhruba čtvrtinové v porovnání s TANK.

První PIT zásobníky sloužící pro dlouhodobou akumulaci tepelné energie byly vyvíjeny a instalovány v Dánsku.

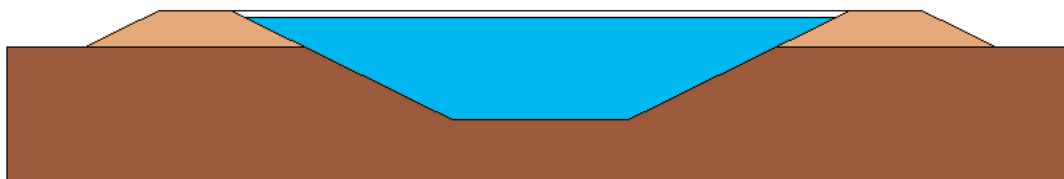
2.4.1 Navrhování a konstrukce

Základní princip stavby PIT teplovodních zásobníků je jednoduchý. Na předem vybraném místě se vytěží zemina a vytvoří prohlubeň. Stěny prohlubně se pokryjí hydroizolační vrstvou materiálu. Takto vytvořený zásobník se naplní vodou a zakryje plovoucí

zaizolovanou vrstvou. Přes jednoduchost systému je při návrhu a stavbě zásobníku nutné postupovat velice precizně z důvodu udržení funkce dlouhodobé akumulace tepelné energie.

2.4.2 Tvar zásobníku

Tvary jednotlivých zásobníků se mohou lišit, ale nejobvyklejší bývá tvar otočeného komolého jehlanu, znázorněný na obrázku č. 5. Proto, aby se minimalizovala cena za manipulaci a odvoz, je při stavbě vytěžená zemina ukládána ve vrchní části kolem zásobníku, kde vytváří "břeh" a navyšuje tak jeho objem.

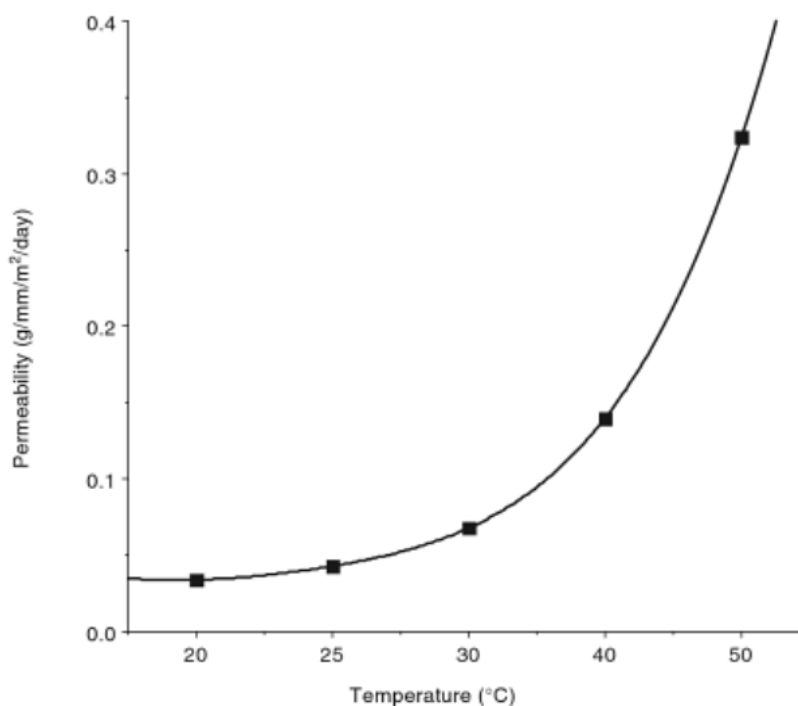


Obrázek 5: schematické znázornění PIT zásobníku v příčném řezu [4]

2.4.3 Hydroizolační vrstva

Vodotěsnost teplovodního zásobníku je realizována hydroizolační vrstvou, která ve většině případů překrývá vrstvu tepelné izolace. Materiály použité pro hydroizolační vrstvy mohou být různé. Používají se plasty (PP, PE), elastomery (EPDM), kovy (hliník, nerezová ocel). Plasty a elastomery mají oproti kovům daleko nižší jak pořizovací náklady, tak náklady spojené s montáží. Výhodou kovových vrstev je však jejich odolnost, se kterou se pojí delší životnost a také parotěsnost.

V současnosti se mezi plastovými vrstvami nejčastěji objevuje použití HDPE, neboli vysoce hustotního polyethylenu. Krycí vrstvy z tohoto materiálu vykazují výrazně nižší propustnost vodní páry oproti dříve využívaným PE a PP. Parotěsnost HDPE klesá exponenciálně se zvyšující se teplotou, jak je patrné z grafu na obrázku 6.



Obrázek 6: Závislost parotěsnosti krycí vrstvy z HDPE na teplotě [4]

Vývojem krycích vrstev z HDPE pro PIT zásobníky se zabývá Dánský technologický institut. V současnosti je možné najít HDPE se životností přesahující 20 let při okolních teplotách dosahujících až 90 °C. Tento materiál je použit jako krycí hydroizolační vrstva v PIT akumulátoru SUNSTORE 3 v dánském Dronninglundu. Elastomery se v současnosti příliš nepoužívají. Je to dáno zejména jejich nižší parotěsností při vyšších teplotách oproti HDPE vrstvám. Dále Elastomery není možné svařovat a pláty k sobě musí být připojeny pomocí speciálního vulkanizačního lepidla, což se obvykle negativně projeví na ceně montáže.

Jak již je zmíněno výše, značnou nevýhodou nerezové nebo hliníkové hydroizolační vrstvy jsou jejich vyšší pořizovací náklady a taktéž náklady spojené s montáží. Při projektování PIT akumulátoru v dánském Marstalu se uvažovalo s použitím nerezové hydroizolační vrstvy, pořizovací náklady však vycházely třikrát vyšší než pro HDPE. Nespornou výhodou kovových vrstev je však jejich odolnost a také parotěsnost. Při jejich použití je nutné brát v potaz případnou korozi a předem tak zajistit chemickou úpravu použité vody.

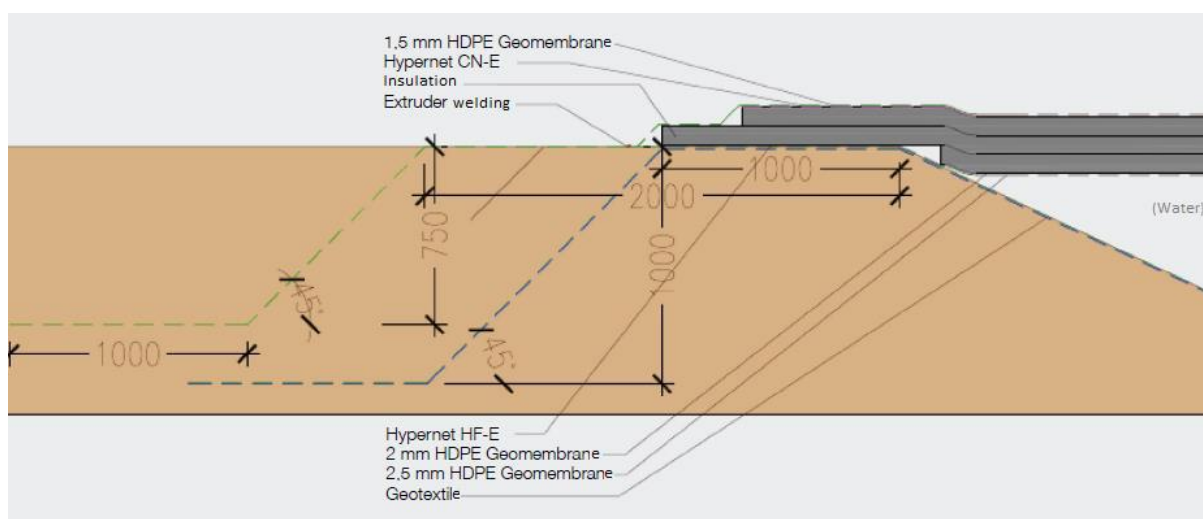
2.4.4 Krycí plovoucí vrstva

Hladina vody v PIT zásobnících je pokryta izolovanou plovoucí vrstvou. Plovoucí vrstva je jednou z nejdražších částí akumulátoru, proto bylo v minulosti věnováno značné úsilí

vývoji používaných technologií a materiálů. Obecně lze krycí plovoucí vrstvy řadit do tří kategorií:

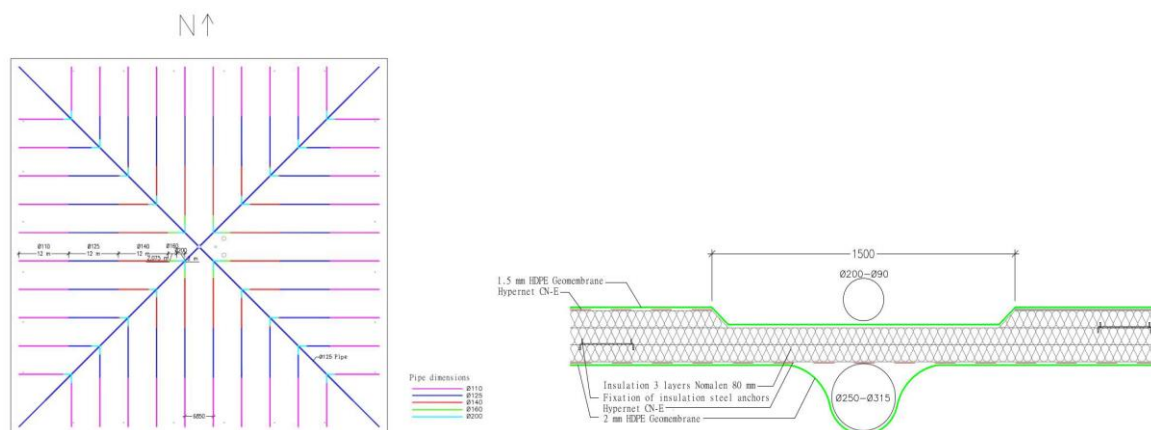
- 1) Vrstva založena na flexibilních izolačních materiálech
- 2) Vrstva založena na tuhých izolačních prvcích
- 3) Vrstva založena na objemné izolaci

Krycí vrstva z flexibilních izolačních materiálů se skládá z vodotěsné plovoucí vrstvy a horní vrstvy. Flexibilita použitých materiálů umožňuje vrstvě různě se pohybovat nebo roztahovat. To je zde velmi výhodné z důvodu tepelné roztažnosti vody. Typickým materiálem použitým pro tuto vrstvu je LDPE, neboli nízko hustotní polyethylen, doplněný o různé přísady. Takto vzniklý materiál se nazývá NOMALEN 28N a je použit na PIT zásobnících SUNSTORE 3 a 4, největších v Dánsku (60 000 m³, 75 000 m³). Plovoucí krycí vrstva je ukotvena na okrajích akumulátoru. Systém kotvení je patrný z obrázku č. 7.



Obrázek 7: Systém kotvení flexibilní plovoucí krycí vrstvy [4]

Vrstva je nainstalována s určitou vůlí, která je zde ponechána z důvodu vyrovnání tepelné roztažnosti vody. K plovoucí vrstvě jsou přichyceny tzv. zatěžovací trubky z HDPE vyplněné betonem. Ty se využívají pro napínání vrstvy, kdy je voda v akumulátoru studená, hladina je nejnižší a vůle vrstvy by byla nejvyšší.



Obrázek 8: Vlevo dispozice zatěžovacích trubek. Vpravo příčný řez krycí plovoucí vrstvou zobrazující uložení zatěžovacích trubek. [4]

Druhá kategorie krycích vrstev je založena na pevných izolačních prvcích. Tyto prvky bývají většinou z PUR a PIR pěny. Obecně jsou více odolné vůči vlhkosti a mají nižší tepelnou vodivost oproti flexibilním izolačním materiálům. Povrch pěnových izolačních prvků však nemůže být dlouhodobě vystaven horké vodě. Proto se izolace pokrývá další parotěsnou vrstvou, obvykle hliníkovým plechem. Opět zde pak musí být brány v potaz nežádoucí účinky koroze. Další technická úskalí přináší ukotvení pevné izolační vrstvy. Její okraje musí být projektovány tak, aby zvládly odolat fluktuaci hladiny zásobníku z důvodu tepelné roztažnosti vody.

Třetí kategorie krycích vrstev je založena na objemné izolační vrstvě většinou z keramzitu nebo granulovaného pěnového skla. Izolace je umístěna mezi vodotěsnou plovoucí vrstvou a vrchní krycí vrstvou, také vodotěsnou. Je nutné spolehlivě zamezit pronikání vlhkosti do izolační vrstvy. Vlhkost degraduje izolační vlastnosti. Tato plovoucí vrstva je použita například u PIT zásobníku v dánském městě Vojens. [4]

2.4.5 Systém vstupního a výstupního potrubí

K tomu, aby akumulátor plnil svou funkci a mohl být nabíjen a vybíjen slouží vstupní a výstupním systém potrubí. Systém se většinou skládá ze dvou hlavních potrubních větví, které ústí v zásobníku. Tyto větve jsou v zásobníku rozděleny na několik menších potrubních tras tak, aby bylo možné odebírat / dodávat vodu z / do různých výškových úrovní zásobníku. Tento systém se nazývá stratifikační vestavba.

Potrubí může být do zásobníku zaústěno skrz vrchní plovoucí vrstvu, zespodu nebo z boku. U většiny instalací se volí buď spodní, nebo boční zaústění. Průchod stěnou do zásobníku musí být velmi dobře utěsněn. Většinou se toto řeší přímo upevněním hydroizolační fólie mezi navařené příruby a použitím vhodného těsnění.

Výhodou potrubí přivedeného skrz dno akumulátoru je, že do zásobníku vstupuje kolmo a těsnící práce jsou jednodušší. Nevýhodou je hlubší uložení potrubí oproti bočnímu vstupu.

Potrubí je většinou vyhotovené z černé nebo nerezové oceli. Jak je zmíněno výše při plnění systému je nutné provést chemickou úpravu vody.



Obrázek 9: Potrubí vstupující skrz dno do nádrže. SUNSTORE 3, Dronninglund [4]



Obrázek 10: Potrubí vstupující skrz stěny do nádrže. SUNSTORE 4, Marstal [4]

2.4.6 Geologické podmínky

Před založením zemního PIT akumulátoru je nutné provést geologický výzkum daného místa. Jde zejména o místní podmínky podzemní vody a kvalitu a složení zeminy. U podzemních vod se zkoumá, zda jsou stojaté, či tekoucí. U tekoucích vod, musí být dno PIT akumulátoru bezpečně nad hladinou spodní vody. U stojatých vod je teoreticky možné akumulátor implementovat, ale nedoporučuje se.

U zeminy se určují její vlastnosti a kvalita. Určí se tak, zda je materiál vhodný pro použití pro dno a stěny akumulátoru. Také se určí úhel, pod kterým mohou stěny akumulátoru stoupat. Čím strmější stoupání, tím lépe z hlediska většího dosaženého objemu na menší rozloze. Většinou stěny stoupají pod úhlem 26° vůči horizontální ose. [4]

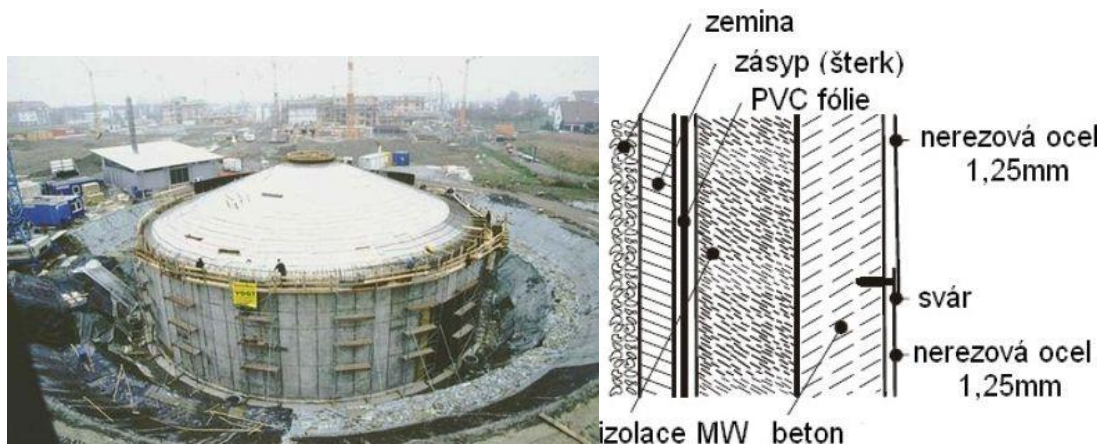
2.5 Příklady instalovaných zásobníků

2.5.1 TANK

Následující kapitola nejprve stručně popisuje čtyři TANK zásobníky a jejich systémy. Každý ze systémů představuje jiný typ konstrukce zásobníku. U všech čtyřech systémů je voda v zásobnících ohřívána pomocí solárních panelů umístěných na střeše obsluhovaných budov.

2.5.1.1 Německo - Friedrichschafen (1997)

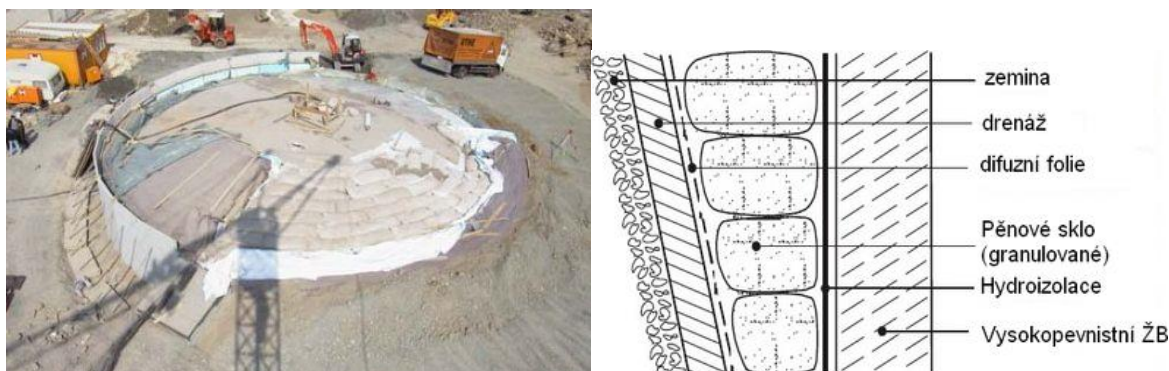
Tento systém zásobuje tepelnou energií nově vybudovaný soubor bytových domů v německém městě Friedrichschafen. Objem teplovodního zásobníku je 12 000 m³. Bytové domy byly stavěny ve dvou etapách. Nyní je teplo ze zásobníku dodáváno celkem do 570 bytových jednotek, vytápěná plocha činí 39 500 m². A plocha solárních kolektorů 5600 m². Solární pokrytí, které udává procentuální pokrytí celkové potřeby tepla tepelnými zisky solární soustavy, je zde stanoveno na 47 %. Jako další zdroj energie k vytápění bytů slouží plynová kotelná. [12]



Obrázek 11: Vlevo pohled na zásobník během montáže. Vpravo skladba vrstev pláště zásobníku. Jako tepelná izolace využity desky z minerální vlny (MW), vlastní konstrukce železobetonová, hydroizolační vrstva tvořena nerezovými plechy. [12]

2.5.1.2 Německo - Hannover (2000)

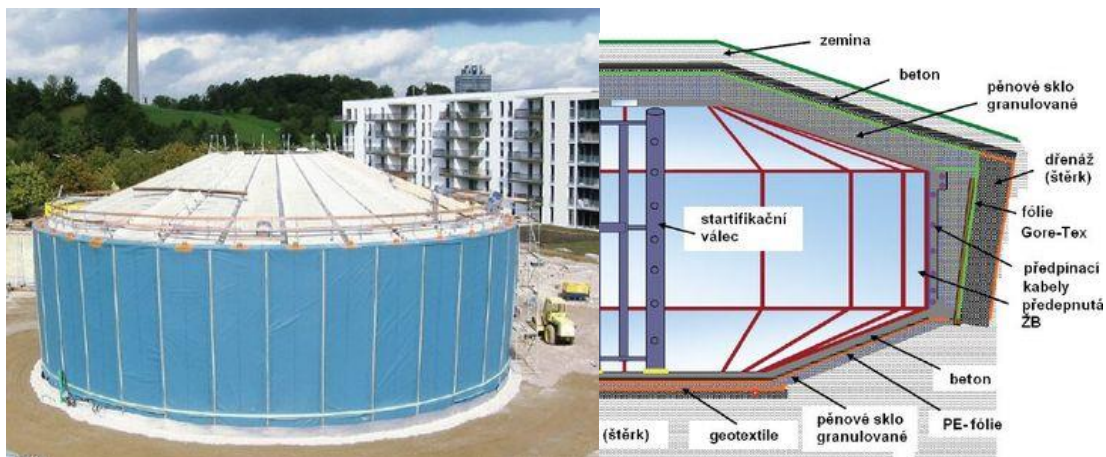
Podobně jako ve Friedrichschafenu i v Hannoveru systém s teplovodním zásobníkem slouží k dodávce tepelné energie do nově vybudovaného souboru bytových domů. Soubor celkem obsahuje 106 bytových jednotek o podlahové ploše 7365 m². Plocha solárních kolektorů činí 1350 m². Solární pokrytí je zde 39 %. Objem zásobníku je 2750 m³. Zásobník je v tomto případě celý uložen pod zemí, a je vybudován z betonu s vysokou hustotou a velmi nízkou propustností vody. Dalším zdrojem vytápění je místní systém CZT. [8]



Obrázek 12: Vlevo pohled na zásobník během montáže. Vpravo konstrukce pláště zásobníku. Tepelná izolace provedena pomocí vaků naplněných granulovaným pěnovým sklem, samotný plášť železobetonový z vodostavebného betonu. [12]

2.5.1.3 Německo - Mnichov (2007)

Opět jako v předchozích dvou případech je teplovodní zásobník využit k dlouhodobému ukládání a dodávce tepelné energie do souboru bytových domů. Celkem je zde 272 bytových jednotek o celkové podlahové ploše 22 610 m². Plocha solárních kolektorů činí 2700 m². Solární pokrytí zde činí 50 %. Objem zásobníku je 5 700 m³. Konstrukce zásobníku je železobetonová předpjatá prefabrikovaná, hydroizolace je z nerezových plechů. Pro tepelnou izolaci byl použit zásyp z granulovaného pěnového skla. Celý zásobník byl po dokončení montáže zakryt zeminou. Systém dlouhodobé akumulace tepelné energie je vybaven také tepelným čerpadlem voda-voda, které umožňuje odebírat tepelnou energii ze zásobníku až do cca 12 °C a zužitkovat ji k vytápění bytových jednotek. Doplňkovým zdrojem vytápění je místní systém CZT. [12]



Obrázek 13: Vlevo zásobník během montáže. Vpravo příčný řez zásobníkem. Pro tepelnou izolaci je zde použit zásyp z granulovaného pěnového skla. Konstrukce zásobníku je z předpjatého prefabrikovaného železobetonu. Hydroizolační vrstvu tvoří nerezové plechy. [12]



Obrázek 14: Vnitřek zásobníku před napuštěním [16]

2.5.1.4 Česká republika – Slatiňany (1996)

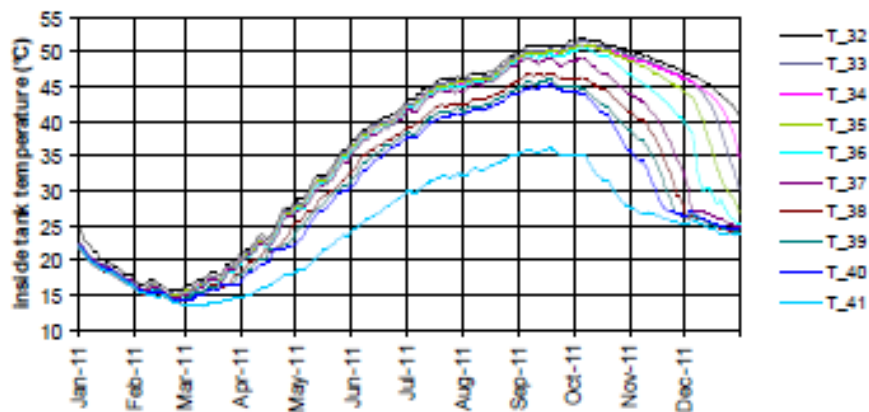
V tomto případě je poskytnut podrobnější popis systému a to z důvodu jeho dostupnosti. Tento systém zásobuje teplem areál chráněných dílen Domova sociálních služeb ve Slatiňanech. Tepelná ztráta objektu je 57 kW. Vytápěná plocha objektu má hodnotu 806 m². Otopná soustava je tvořena podlahovým vytápěním s teplotním spádem 37/31 °C. Solární kolektory jsou umístěny na střeše objektu se sklonem 38 ° a odklonem od jihu 10°. Počet kolektorů je 84. Celková plocha apertury činí 147,8 m². Akumulační zásobník je ocelový, smaltovaný a byl montován přímo na místě. Jeho užitečný objem je 1080 m³. Expanzní objem je 22 m³. Zásobník nemá stratifikační vestavbu. Tepelnou izolaci pláště i víka zásobníku tvoří tuhé desky z minerální vlny o celkové tloušťce 700 mm. Desky jsou

vkládáné do nosného roštu. Zásobník je opláštěn trapézovým plechem. Ocelové dno je uloženo na železobetonové desce o tloušťce 200 mm, pod kterou se nachází tepelně izolační vrstva perlitového betonu tloušťky 500 mm. [9]



Obrázek 15: Vlevo hotový zásobník. Vpravo konstrukce pláště zásobníku. Tepelnou izolaci tvoří tuhé desky z minerální vlny, vkládané do připraveného rámu. Zásobník je celý opláštěn trapézovým plechem. Samotná konstrukce z oceli, montovaná na místě. [Archiv O. Mareš; [12]]

Systém je vybaven TČ voda - voda o jmenovitém výkonu 37 kW, které umožňuje odebírat teplou vodu ze zásobníku až do cca 12 °C a zužitkovat ji k vytápění. Jako náhradní zdroj je zde nainstalován elektrokotel o jmenovitém výkon 37 kW, který slouží k pokrytí dodávky tepla v případě, že je akumulátor vybitý. Na obrázku 16. je patrný průběh teplot vody v zásobníku během roku, které se pohybují v rozmezí 12 – 52 °C.



Obrázek 16: Průběh teplot v akumulátoru ve Slatiňanech [10]

Solární pokrytí bylo projektováno na hodnotu $f = 80 \%$. Z měření prováděných po dobu několika let provozu systému nicméně vychází průměrná hodnota solárního pokrytí 65% . Takovýto rozdíl oproti projektu je přisuzován vysokým tepleným ztrátám akumulčního zásobníku. Typický roční provoz systému je takový, že v období od ledna do března je teplota v zásobníku nedostatečná pro přímé vytápění, v provozu je TČ, případně elektrokotel. V březnu dosahuje teplota vody v akumulátoru svého minima. V dubnu je stále v provozu TČ, solární zisky jsou ukládány do akumulátoru a teplota vody se zvyšuje. V období od května do září teplota vody v zásobníku stoupá, na konci srpna dosahuje svého maxima $52 \text{ }^\circ\text{C}$. V tomto období je objekt vytápěn po většinu času přímo z akumulčního zásobníku bez použití TČ. V období od října do konce prosince dochází k postupnému vybíjení akumulčního zásobníku. Nejprve je zajištěno přímé vytápění, posléze, když teplota vody v akumulátoru klesne pod $37 \text{ }^\circ\text{C}$, dochází ke spuštění tepelného čerpadla.

Za dobu provozu dle dostupných informací nebyly zjištěny žádné zásadní potíže. Došlo k výměně několika oběhových čerpadel a zaneseného deskového výměníku. Toto ale lze považovat za běžné funkční opotřebení pracovních prvků systému v průběhu času.

Následující tabulka 2. uvádí parametry výše zmíněných systémů. Je zde nutné podotknout, že na základě parametru solárního pokrytí mezi sebou nelze porovnávat systémy s TČ a bez TČ. Tabulka 2. tak slouží spíše k celkové sumarizaci.

Tabulka 2: Parametry uvedených systémů s TANK zásobníkem [8], [12]

Parametry uvedených systémů				
	Friedrichschafen (1997)	Hannover (2000)	Mnichov (2007)	Slatiňany (1996)
Počet bytových jednotek	570	106	272	-
Vytápěná plocha (m ²)	39 500	7 365	22 610	806
Objem zásobníku (m ³)	12 000	2 750	5 700	1 080
Měrná cena zásobníku (€/m ³)	115	240	150	110
max. / min. teploty v zásobníku (°C)	80 / 45	82 / 35	84 / 15	52 / 12
Plocha kolektorů	5 600	1 350	2 700	147,8
Tepelné čerpadlo	NE	NE	ANO	ANO
Spotřeba tepla celkem (MWh/rok)	4 106	694	1 976	43
Teplo dodané ze zásobníku (MWh/rok)	1915	269	988	28
Solární pokrytí (%)	47	39	50	65
Cena systému STES (mil. €)	3,2	1,2	1,7	0,3

2.5.2 PIT

V následující tabulce jsou vypsané základní parametry postavených a v současnosti provozovaných PIT zásobníků. Všechny zásobníky se nacházejí v Dánsku a k jejich nabíjení je využito vždy tepelné energie získané ze solárního zařízení. Dva z uvedených systémů využívají k zásobování teplem tepelné čerpadlo, což umožňuje vychlazení zásobníku až na 10 °C a tím navýšení jeho tepelné kapacity. V tabulce je z kolonky Jednotková cena patrné, že s rostoucím objemem zásobníku jeho cena klesá. Dále je zde vidět, že měrné náklady na stavbu PIT zásobníku jsou oproti TANK zásobníkům poloviční až čtvrtinové.

Tabulka 3: Parametry uvedených systémů s PIT zásobníkem [4]

Parametry uvedených systémů				
	Ottrupgard (1995)	SUNSTORE 2 Marstal (2003)	SUNSTORE 3 Dronninglund (2013)	SUNSTORE 4 Marstal (2012)
Objem zásobníku (m ³)	1 500	10 000	60 000	75 000
Nabíjecí a vybíjecí výkon (MW)	0,39	6,51	26,1	10,5
Teplotní rozsah (°C)	35 - 60	35 - 90	10 - 90	10 - 90
Tepelné čerpadlo	NE	NE	ANO	ANO
Plocha solárních kolektorů (m ²)	560	18 300	35 000	33 300
Stanovené ztráty (MWh/rok)	70	402	2 260	2 475
Jednotková cena (€/m ³)	150	67	38	35,6
Celková cena (mil. €)	0,225	0,67	2,28	2,67

3 Prvky solární soustavy

Kromě již výše zmíněných a podrobně rozebraných velkokapacitních tepelných zásobníků se solární soustava dlouhodobé akumulace tepelné energie skládá z dalších prvků, které jsou pro funkci samotné soustavy také nezbytně nutné.

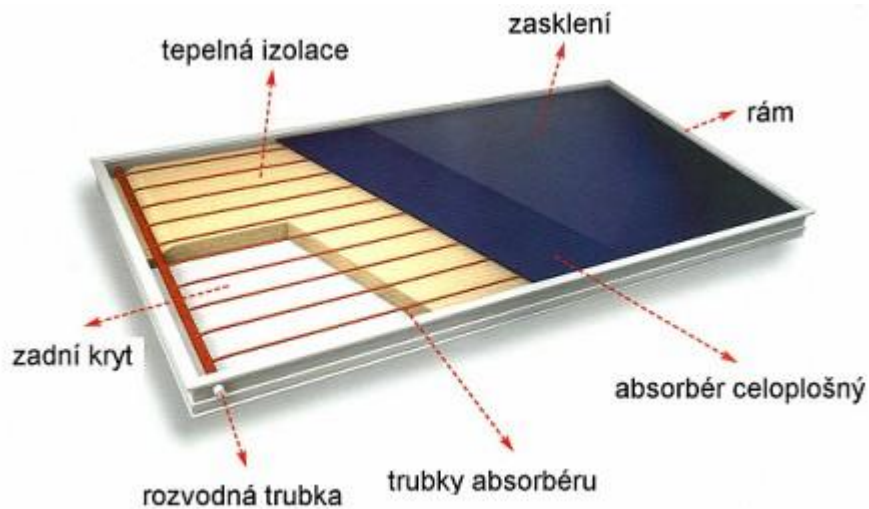
3.1 Solární kolektory

Solární kolektor je technické zařízení určené k pohlcení sluneční energie a následné přeměně v energii tepelnou, která je předávána teplotonosné látce protékající kolektorem. Pro přenos tepelné energie z kolektoru do místa určení je ve většině případů využíváno teplotonosných kapalin, jen velmi malá část kolektorů k tomu využívá vzduch (vzduchové kolektory).

3.1.1 Ploché kolektory

Tento typ kolektorů je charakterizován plochou aperturou (zasklením) a přibližně plochým absorbérem. Tepelně vodivý, zpravidla kovový absorbér může být celoplošný (tvořený jedním plechem) nebo tvořený z jednotlivých lamel. Absorpční plocha se k rozváděcí trubce (registru) připojuje různými způsoby. Může být ultrazvukově navařena, laserově navařena nebo nalisována.

Rám kolektoru bývá buď výlisek, nebo je svařen z jednotlivých profilů. Podle způsobu využití může být vyplněn tepelnou izolací. Lisovaný rám kolektoru je obvykle těsný s vnitřní částí chráněnou proti degradaci vlivem vlhkosti. Rám poskládaný z profilů je většinou opatřen větracími otvory sloužícími k odvodu vlhkosti.



Obrázek 17: Řez plochým solárním kolektorem [17]

Při instalacích velkých solárních soustav s rozlehlými kolektorovými poli se stále častěji uplatňuje použití velkoplošných kolektorů s plochou od 4 do 10 m². Absorbéry těchto kolektorů jsou tvořeny podélnými lamelami zapojenými do ležatého trubkového registru. Zasklení kolektoru je s ohledem na kompenzaci tepelné roztažnosti děleno do menších ploch. Výhodou velkoplošných kolektorů je rychlejší montáž vzhledem k počtu prováděných spojů.



Obrázek 18: Velkoplošný kolektor [18]

3.1.2 Trubkové vakuové kolektory

Trubkové vakuové kolektory jsou obecně kolektory s válcovou aperturou, u kterých je prostor mezi absorbérem a zasklením vakuován na velmi nízký tlak (pod 10⁻³ Pa). Takto konstruované kolektory dosahují velmi nízkých tepelných ztrát i v případech vysokých teplotních rozdílů mezi absorbérem a okolním prostředím. Jsou tak vhodné k instalacím,

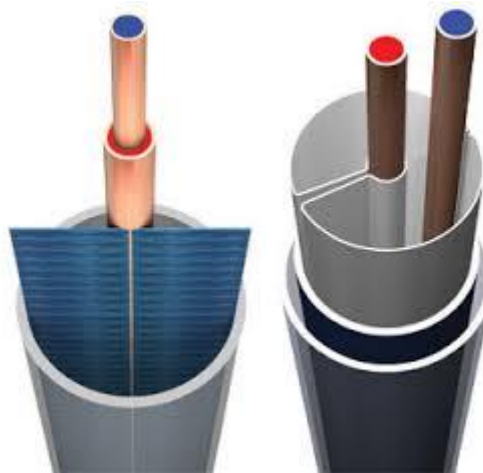
kde je zapotřebí vysokých provozních teplot, např. v oblasti průmyslového a technologického nebo solárního chlazení.

Na trhu existují dva základní typy trubkových kolektorů a to:

- **Trubkový kolektor s jednostěnnou trubkou**
- **Trubkový kolektor s dvojtěnnou trubkou (Sydney)**

Trubkový kolektor s jednostěnnou trubkou využívá skleněné trubice, ve které je umístěna plochá lamela absorbéru. Vnitřní prostor trubky je vakuován. Toto konstrukční řešení je v současnosti na vysoké technické úrovni. Nevýhodou je stále vysoká cena.

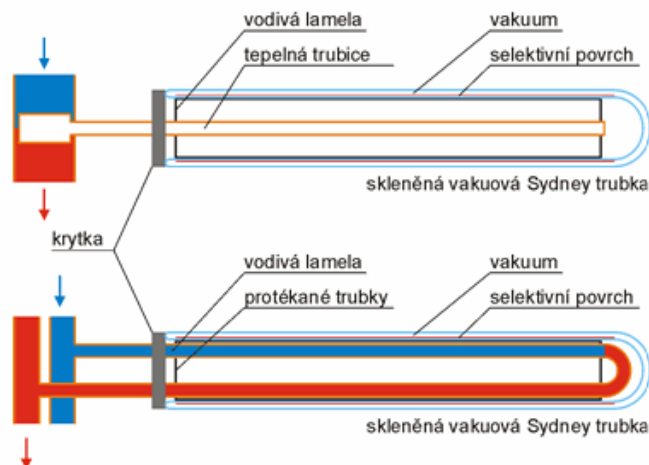
Trubkový kolektor s dvojtěnnou trubkou je založen na válcové dvojtěnné celoskleněné trubce, kde vnitřní absorpční trubka slouží k zachycování slunečního záření a přeměně na teplo a vnější pak jako ochrana před atmosférickými vlivy (funkce zasklení). Meziprostor vzniklý mezi trubkami je vakuován. Technickým problémem je u tohoto řešení často špatný přenos tepla z absorpčního povrchu do teplotonosné kapaliny. Toto se pak negativně podepisuje na účinnosti kolektoru.



Obrázek 19: vlevo jednostěnná trubka, plochý absorbér, vpravo dvojtěnná trubka, válcový absorbér [17]

Dále lze trubkové kolektory rozdělit dle konstrukčního uspořádání odvodu tepla:

- **přímo protékané** - Teplo z absorpční plochy se předává přímo teplotonosné kapalině (U-trubice)
- **s tepelnou trubicí** - pracovní látka tepelné trubice předává v cyklu vypařování a kondenzace teplo z výparníku (absorbéru) do kondenzátoru, kde se předává teplo teplotonosné kapalině solární soustavy.



Obrázek 20: Rozdělení trubkových kolektorů. [19]

3.1.3 Účinnost a výkon kolektoru

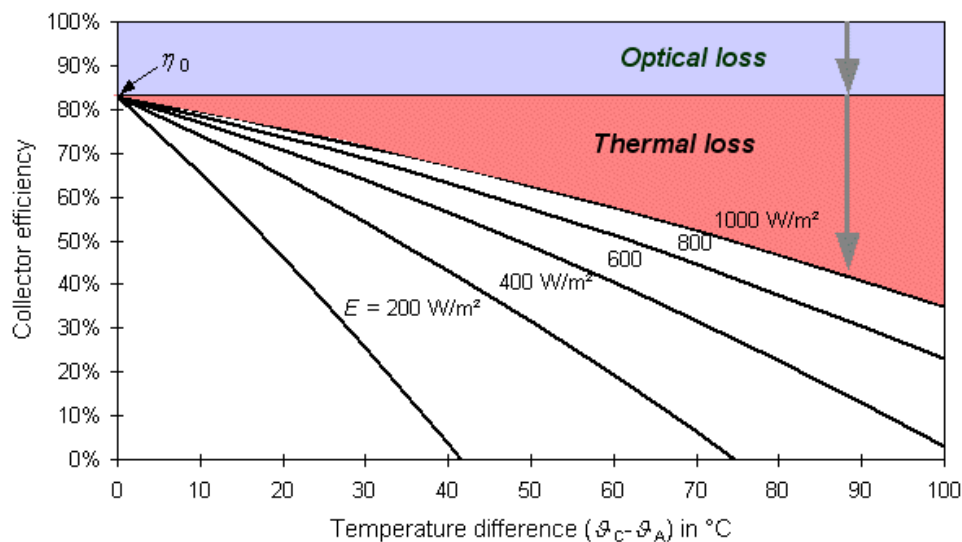
Výkon a účinnost solárního kolektoru jsou dány jeho optickými a tepelnými charakteristikami. K dosažení, co nejvyšší účinnosti solární kolektory využívají:

- Spektrálně selektivní absorpční povrch, který má pohltivost slunečního záření nad 92 % a zároveň nízkou emisivitu pro omezení tepelných ztrát sáláním (pod 15%).
- Kovový absorbér s vysokou vodivostí a přenosem tepla do teplotonosné kapaliny.
- Zasklení s propustností slunečního záření nad 90 %. Používá se solární nízkoželezité sklo.
- Trvanlivou tepelnou izolaci skříně kolektoru (MW, vakuum).

Účinnost solárního kolektoru je poměr mezi tepelným výkonem Q_k odvedeným ze solárního kolektoru a slunečním zářením G dopadlým na vztahnou plochu kolektoru A_k .

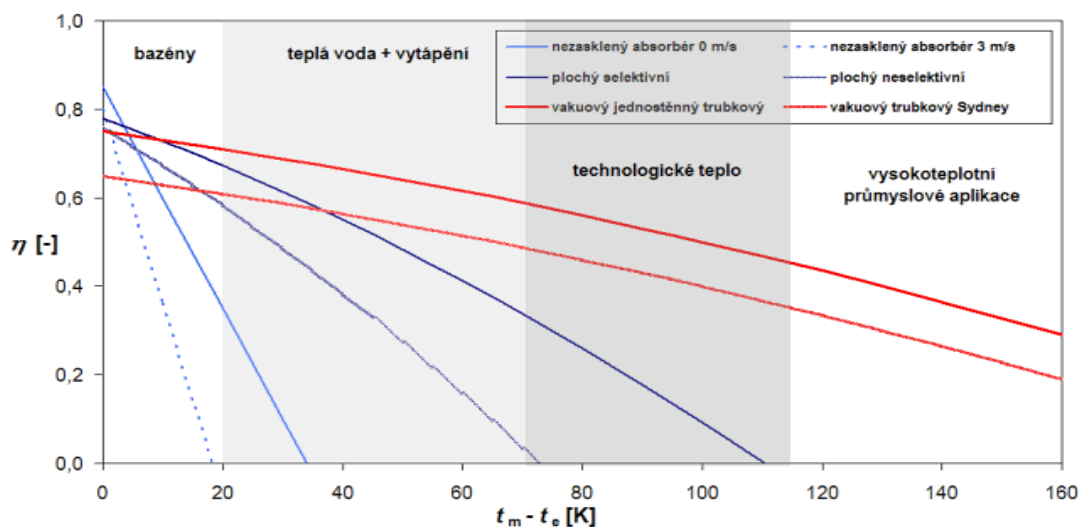
$$\eta_k = \frac{Q_k}{G \cdot A_k}$$

Vztažnou plochou solárního kolektoru může být plocha absorberu, plocha apertury nebo celková obrysová plocha. Ve vztahu k účinnosti nejlépe vychází plocha absorberu a tak bývá s oblibou využívána výrobci při tvorbě marketingových a propagačních materiálů. Nicméně Evropské normy a certifikační systémy používají jako vztažnou plochu pro solární kolektory plochu apertury. To umožňuje porovnat vlastnosti dvou solárních kolektorů různé konstrukce a kvality provedení. Účinnost kolektoru je vzhledem k jeho tepelným ztrátám závislá na rozdílu teplot mezi teplotou kapaliny v kolektoru t_m a teplotou okolního vzduchu t_e a dále na slunečním ozáření. Na obrázku 21 jsou zobrazeny křivky účinnosti solárního kolektoru pro různé hladiny solárního ozáření. Je zde vidět jak sluneční záření výrazně ovlivňuje účinnost solárního kolektoru.



Obrázek 21: Závislost η_k solárního kolektoru na rozdílu teplot při různém slunečním ozáření [20]

V grafu na obrázku 22 jsou znázorněny typické křivky účinnosti základních typů solárních kolektorů, vyjádřené v závislosti na teplotním spádu pro hodnotu slunečního ozáření 800 W/m².



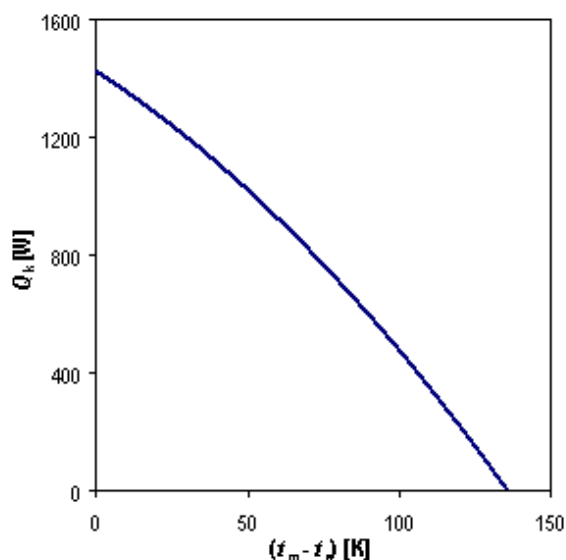
Obrázek 22: Křivky účinnosti různých konstrukcí solárních kolektorů [20]

Ze srovnání křivek v grafu vyplývají některé zásady použití různých typů kolektorů. Například to, že nemá smysl používat drahé trubkové vakuové kolektory pro sezónní ohřev bazénové vody, jelikož jejich účinnost je při malém teplotním rozdílu dokonce nižší než u jednoduchých nezasklených kolektorů. V teplotních oblastech přípravy teplé vody mají trubkové kolektory a atmosférické ploché kolektory srovnatelnou účinnost vztahenou k ploše apertury. Pro průmyslové vysokoteplotní aplikace jsou vhodné kolektory s nízkou tepelnou ztrátou - trubkové vakuové.

Tepelný výkon kolektoru se vyhodnocuje jako závislost na teplotním rozdílu ($t_m - t_e$) při referenční hodnotě slunečního ozáření $G = 1000 \text{ W/m}^2$. Výkon kolektoru je vyjádřen vztahem:

$$Q_k = A_k \cdot [G \cdot \eta_0 - a_1 \cdot (t_m - t_e) - a_2 \cdot (t_m - t_e)^2] \quad [2]$$

Na *obrázku 23* je uveden graf, který zobrazuje průběh křivky tepelného výkonu kolektoru.



Obrázek 23: Křivka tepelného výkonu solárního kolektoru [20]

„Instalovaný výkon kolektorového pole podle dokumentu Evropské federace průmyslových společností v oblasti solární tepelné techniky je určen bez ohledu na sklon, či orientaci kolektoru, předpokládá se kolmý dopad paprsků na aperturu kolektoru. Často se ve statistických šetřeních používá obecná hodnota vyjadřující měrný výkon kolektoru bez ohledu na typ nebo způsob instalace **700 W/m²**.“ [2] V případě přesnějších výpočtů, kdy nestačí výkon kolektoru stanovit pouze pro ideální podmínky (jasný slunečný den, kolmý úhel dopadu slunečního záření na rovinu kolektoru) se používá tzv. modifikátor úhlu dopadu.

3.1.4 Navrhování plochy solárních kolektorů

Navrhování plochy solárních kolektorů obvykle bývá stěžejním bodem návrhu jakékoliv solární soustavy. Plocha kolektorového pole se stanoví z parametrů solárního kolektoru (křivka účinnosti, výkonu), klimatických podmínek, bilance tepelných ztrát soustavy a potřeby tepla, která má být solárními zisky kryta na základě zvolených rozhodovacích kritérií a podmínek.

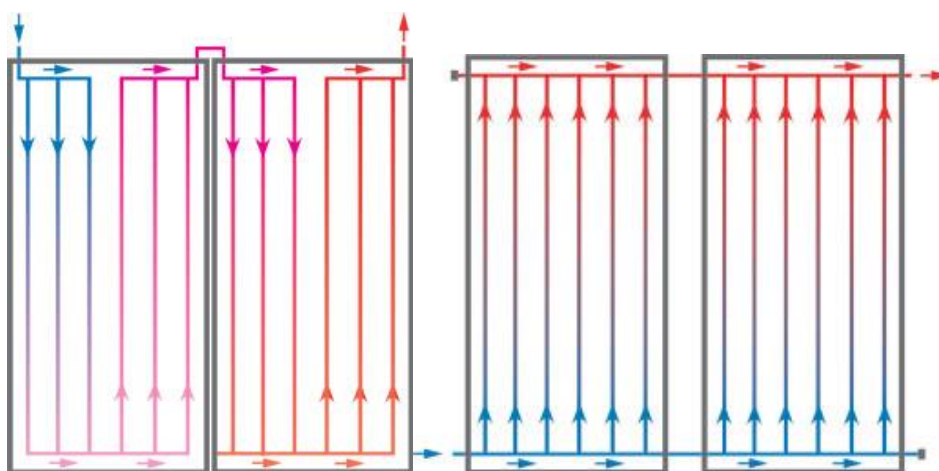
V případě dlouhodobé akumulace tepelné energie by měla být soustava navrhována na vysoké zisky. To znamená, že je soustava navržena na vysoké solární pokrytí tepelné potřeby zásobovaného objektu, zpravidla vyšší než 50 %. U běžných solárních soustav bez

uvažování dlouhodobé akumulace tepla takové řešení vede k předdimenzované solární soustavě s vysokými letními přebytky, u sezónní akumulace je to naopak žádoucí.

3.1.5 Zapojení kolektorů a kolektorových polí

Jednotlivé kolektory by měly být zapojovány tak, aby byl zajištěn stejnoměrný průtok všemi kolektory, respektive všemi trubkami registru uvnitř kolektoru. Kolektory mohou být zapojeny sériově nebo paralelně viz *obrázek 24*. Sériové zapojení zachovává nominální průtok kolektorem a jeho účinnost. V případě paralelního zapojení může docházet ke snížení účinnosti kolektoru vlivem horšího přestupu tepla uvnitř trubek a také k hydraulické nerovnováze trubkového registru.

U zapojování kolektorových polí do větších solárních soustav se dříve využívalo paralelního zapojení podle Tichelmanna. V dnešní době se od tohoto systému již ustupuje a stále více se využívá sério-paralelního zapojení kolektorových polí osazených vyvažovacími ventily. Vyvažovací ventily slouží k regulaci průtoku teplotné kapaliny solárním systémem.



Obrázek 24: Zapojení solárních kolektorů. Vlevo zapojení do série. Vpravo paralelní zapojení.[21]

3.1.6 Teplonosná kapalina

Při celoročním použití solárních soustav v bytových domech se v kolektorovém okruhu z důvodu ochrany jednotlivých prvků soustavy před poškozením mrazem v zimním období používá nemrznoucí směs. V současnosti je nejpoužívanější teplonosnou kapalinou v solárních soustavách směs propylenglykolu a vody s inhibitory koroze. Podle požadované

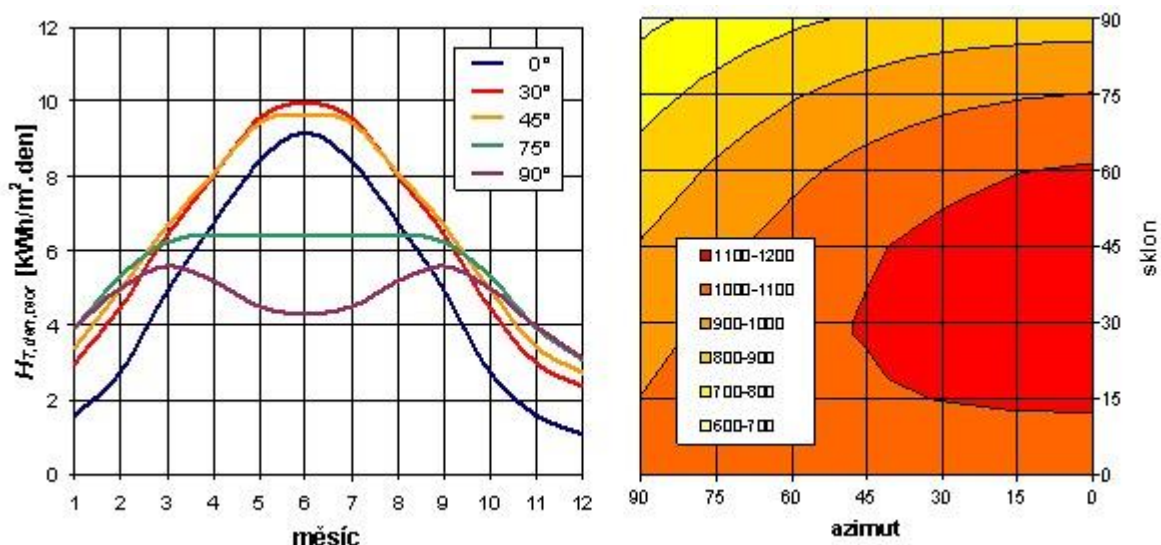
teploty tuhnutí se směs většinou používá v objemovém ředění 40 až 50 % propylenglykolu. Takto namíchaná směs má teplotu tuhnutí kolem $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. [2]

3.1.7 Instalace solárních kolektorů na střechy bytových domů

3.1.7.1 Správná orientace solárních kolektorů

Pro účely dlouhodobé akumulace tepelné energie v bytovém domě je z energetického hlediska nejvýhodnější instalovat kolektorové pole na střechu budovy.

Sluneční záření, které dopadne za určitý časový úsek na plochu solárního kolektoru je závislé na jejím sklonu a obecné orientaci (azimutu plochy). Pro maximalizaci celoročního příjmu slunečního záření je vhodné kolektory instalovat se sklonem 45° a azimutem 0° (jih). Roční dopad sluneční energie na vhodně orientovanou plochu kolektoru se v podnebních podmínkách ČR pohybuje mezi $1000 - 1200\text{ kWh/m}^2$. Pro natočení kolektorové plochy do 45° od jižního směru lze předpokládat podobné dávky slunečního záření. V případě orientace kolektoru na východ či západ již dochází k poklesu o 20 - 25 %, což má za následek také obdobný pokles tepelných zisků celé solární soustavy. Z tohoto důvodu je vhodné se čistě západní, či východní orientaci kolektorů vyhnout. [2]



Obrázek 25: Vliv sklonu a orientace plochy kolektoru na denní dávku slunečního ozáření. [2]

3.1.7.2 Problematika instalace na střechu bytového domu

Již na začátku projektování solární soustavy je nutné brát zřetel na to, jaká plocha bytového domu je k dispozici pro instalaci solárních kolektorů. Záleží zejména na její velikosti a na možnosti instalovat kolektory se správnou orientací a sklonem.

Kolektory lze u bytových domů umístit na střechu nebo na fasádu. Pro většinu instalací, zejména pak pro systémy dlouhodobé akumulace tepelné energie je výhodnější kolektory instalovat na střeše budovy, jelikož se jednodušeji docílí správného sklonu solárního panelu a také zde nehrozí tak velké riziko stínění kolektoru vnějšími překážkami. Při instalaci solárních soustav na střechy bytových domů je nutné počítat s možností kolize se zástavbou na střeše. Jedná se především o vyústění větracích jednotek, strojovny výtahů, zařízení komunikačních sítí GSM a WiFi atd., které mohou výrazně omezit plochu využitelnou pro instalaci solárních kolektorů.

3.1.7.3 Instalace na ploché střechy

Solární kolektory se na plochých střechách umísťují na nosné konstrukce podpírající pole solárních kolektorů a potrubní trasy. Nosné konstrukce mohou být buď zátěžové, nebo kotvené. Při použití zátěžových nosných konstrukcí nedochází k přímému zásahu do obálky budovy. Na střechu se volně položí zátěžové prvky (např. železobetonové kvádry), na které se následně kotví samotné solární kolektory. Vlastní hmotnost zátěžových prvků zajišťuje stabilitu solárního kolektorového pole. Hmotnost zátěžových prvků by se měla předem posoudit statickým výpočtem. Většinou se pohybuje od 100 do 200 kg/m² plochy kolektoru [2].

Použitá tepelná izolace střešního pláště budovy pak musí být pevnostně odolná vůči tlaku plochy kolektorového pole a zátěžových prvků.

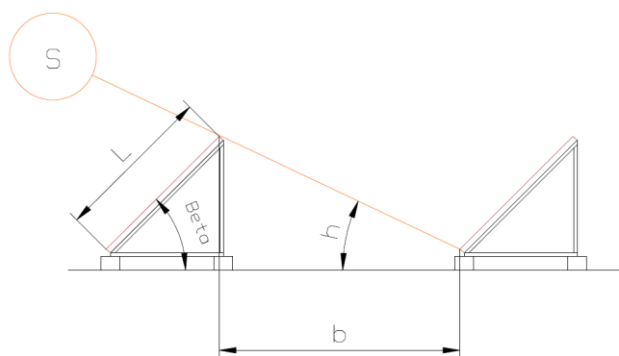
Kotvená nosná konstrukce je pevně svázána s konstrukcí střechy bytového domu kotvicími prvky. Kotvicí prvky se vrtají přímo do nosné konstrukce střechy budovy. Před realizací je nutné provést statické posouzení únosnosti střešní konstrukce. Po realizaci tohoto řešení je nutné obnovit hydroizolační vlastnosti střešního pláště a zajistit eliminaci tepelných mostů tepelně-izolačními prostředky.

Detail umístění a kotvení systému kolektorů na střechách objektů přesahuje účel a rámec této práce.



Obrázek 26: Vlevo zátěžová nosná konstrukce solárních kolektorů. Vpravo Kotvená nosná konstrukce solárních kolektorů. [22]

Při umísťování solárních kolektorů na ploché střechy je nutné zabezpečit dostatečný rozestup mezi jednotlivými řadami kolektorových polí tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému stínění.



Obrázek 27: Určení vhodného odstupu mezi řadami kolektorů.

Vzdálenost b na obrázku 27 určuje rozestup mezi kolektory tak, aby nedocházelo k jejich vzájemnému stínění při určité výšce slunce. Tuto vzdálenost lze vyjádřit pomocí vztahu:

$$b = L \cdot \frac{\sin \beta}{\operatorname{tg} h}$$

3.2 Ostatní prvky solární soustavy

3.2.1 Oběhová čerpadla

V solárních soustavách jsou dnes nejčastěji používána bezucpávková oběhová čerpadla (mokroběžná) s vestavěným frekvenčním měničem sloužícím k regulaci otáček. Oběhová čerpadla by měla být vybírána s přihlédnutím k typické provozní oblasti solárních soustav - měla by vykazovat vysokou účinnost v oblasti nízkých průtoků a vysokých tlakových ztrát. Oběhová čerpadla použitá v okruhu kolektorového pole by pak měla být vhodná k čerpání nemrznoucí směsi za zvýšených teplot.

3.2.2 Výměníky tepla

Pro přenos tepla mezi kolektorovým okruhem a zásobníkem tepelné energie slouží tepelné výměníky. Výměníky mohou být buď trubkové, nebo deskové. Obecně platí, že pro solární pole o ploše nad 20 m² je vhodné využít deskový výměník, který vykazuje vyšší výkony při menších geometrických rozměrech. To je dáno efektivnějším zvládnutím přestupu tepla mezi proudícími kapalinami. [2]

3.2.3 Provozní zásobníky

I v případě systémů dlouhodobé akumulace tepelné energie, kde je jedním z hlavních prvků velký sezónní zásobník je většinou třeba užít i zásobníky menší, které lze nazvat provozními zásobníky. U kombinovaných solárních soustav lze tyto zásobníky rozdělit podle jejich užití na zásobníky TV a zásobníky použité v otopné soustavě (pohotovostní zásobníky).

Zásobník TV bývá u systémů dlouhodobé akumulace tepelné energie použit skoro vždy. V letním období slouží tepelná energie získaná solárními kolektory jak pro nabíjení sezónního akumulátoru, tak přímo pro přípravu teplé vody v TV zásobníku. V zimním období je TV zásobník nabíjen ze sezónního akumulátoru. TV zásobníky bývají vybaveny elektrickou topnou vložkou pro případný dohřev TV, kdy je její teplota v zásobníku nedostatečná. Zásobníky TV podléhají hygienickým požadavkům na pitnou vodu. Vnitřní plášť zásobníku musí být opatřen povrchovou úpravou s hygienickým atestem nebo vyroben z nerezové oceli a musí být řešena teplotní ochrana proti bakteriím legionela.

Pohotovostní zásobníky (PZ) implementované do otopné soustavy se používají z důvodu usnadnění regulace výkonu systému. Tyto zásobníky jsou s výhodou instalovány společně s tepelným čerpadlem. Pokud má voda v sezónním zásobníku dostatečnou teplotu může být přímo přečerpávána do PZ. Pokud je teplota vody v sezónním zásobníku nižší než požadovaná, využije se TČ k nabití PZ. Na konstrukci PZ nejsou kladeny žádné zvláštní hygienické nároky, proto se ve většině případů využívá běžných ocelových nádrží bez vnitřní úpravy.

U obou typů provozních zásobníků je z důvodu tepelných ztrát nutné dbát na použití vhodné tepelné izolace. V projektu se může postupovat podle vyhlášky č. 193/2007 Sb., kterou se stanoví podrobnosti účinnosti užití energie při rozvodu tepelné energie a vnitřním rozvodu tepelné energie a chladu. Tato vyhláška stanovuje minimální tloušťku tepelné izolace zásobníků tepla 100 mm při její tepelné vodivosti menší než 0,045 W/m.K.



Obrázek 28: Vlevo zásobník TV vybaven elektrickou topnou vložkou. Vpravo pohotovostní zásobník pro otopnou soustavu. [archiv O. Mareš]

3.2.4 Ostatní prvky

V solární soustavě dlouhodobé akumulace tepelné energie se vyskytuje řada dalších pro spolehlivý provoz velmi důležitých i méně důležitých prvků. Jedná se například o **pojistné ventily** chránící primární okruh solární soustavy (okruh solárních kolektorů) proti nedovolenému přetlaku. Maximální tlak v soustavě se volí podle nejslabšího prvku, kterým je zde většinou solární kolektor. Primární okruh solární soustavy musí být také vybaven **expanzní nádobou**, která umožňuje změny objemu teplotně roztažené kapaliny vlivem teplotní objemové roztažnosti, aniž by byl překročen nedovolený tlak v soustavě. Při instalaci jak primárního okruhu kolektorového pole, tak okruhů pro otopnou a teplovodní soustavu je nutné dbát na zakomponování **odvzdušňovacích ventilů**. V solárních soustavách se často používají automatické odvzdušňovací ventily, je ale možné také použít jednoduché ruční odvzdušňovací ventily.

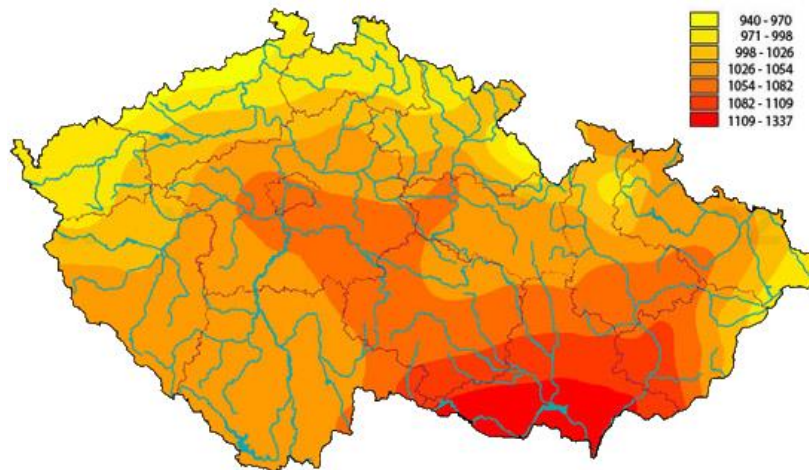
Dalším velmi důležitým prvkem je zde řídicí systém celé soustavy. **Elektronická regulace** se stará o provozně správný, bezobslužný automatický provoz solární soustavy. Řídí nabíjení a vybíjení sezónního akumulátoru. S tím spjaté správné rozebíhání oběhových čerpadel a otevírání / uzavírání různých armatur (ventily, klapky, kulové kohouty). Pro správnou funkci elektronické regulace je nutné použít přesná, trvanlivá a správně rozmístěná **měřící čidla** (teplota, průtok). Pro měření teplot v primárních nebo sekundárních okruzích se v naprosté většině využívá odporových teplotních čidel (Pt100, Pt500). Ta jsou buď instalována do jímek, nebo v bezjímkovém provedení. Průtok je v solárních soustavách většinou měřen jednoduchými plovákovými průtokoměry.

V neposlední řadě je při instalaci solární soustavy třeba vhodně dimenzovat **potrubní trasy**. Zásadním požadavkem na potrubí je zde funkčnost a životnost. U menších solárních soustav se často z výhodou využívá potrubí z mědi. V případě dlouhodobé akumulace tepelné energie, kde celý systém bývá rozměrnější, se však předpokládá použití potrubních tras větších světlostí, kde měděné potrubí vychází již velmi drahé, a proto se volí potrubí ocelové. Velmi vhodné z důvodu životnosti je použití trubek z nerezové oceli, jejichž měrná cena je však v porovnání s běžnou ocelí výrazně vyšší.

4 Výběr lokality a stanovení modelové budovy

4.1 Výběr lokality

Ačkoliv se práce zabývá návrhem systému dlouhodobé akumulace tepelné energie pro modelový fiktivní dům, je z hlediska větší přesnosti meteorologických údajů použitých při výpočtech vhodné určit konkrétní lokalitu, ve které se bude budova nacházet.



Obrázek 29: Roční dávky slunečního záření v ČR (kWh/m^2) [24]

Z hlediska efektivity využití sluneční energie by bylo nejvhodnější budovu situovat do míst ČR s nejvyšší koncentrací slunečního záření během roku. To by při pohledu na mapu na obrázku 29 znamenalo využít potenciálu Jihomoravského kraje.

Nicméně pro umístění fiktivní budovy je vybrán Středočeský kraj, konkrétně město Kutná Hora. Roční úhrn slunečního záření v této lokalitě dosahuje zhruba průměrných hodnot pro celou oblast ČR. Tento fakt může být vhodný například pro možnost přenesení výsledných vypočtených hodnot i do jiných oblastí republiky, kde poté lze předpokládat podobné výsledky.

4.2 Modelová budova

Dle zadání diplomové práce je systém dlouhodobé akumulace tepelné energie navržen pro již postavený bytový dům obsahující 20 bytových jednotek. Veškeré ostatní parametry budovy jsou v práci zvoleny.

Při volbě ostatních parametrů je v práci mimo jiné využito dat ze Sčítání lidu, domů a bytů - 2011 získaných z archivu Českého statistického úřadu a výpočetních metod volně dostupných na webových stránkách www.tzb-info.cz.

Následující tabulka uvádí hodnoty získané na základě Sčítání lidu, domů a bytů v roce 2011.

Tabulka 4: Bytové domy v ČR [25]

Obydlené domy s byty celkem (2011)	
Počet bytových domů	211 252
Počet bytů v domech celkem	2 416 033
Počet osob žijících v bytových domech	4 999 727
Průměrný počet bytů v byt. Domech	11,4
Průměrný počet obyvatel na 1 byt	2,1
Vytápěná plocha celkem (m ²)	135 848 968
Obytná plocha v průměru na 1 byt (m²)	56

4.2.1 Charakteristika modelové budovy

Z tabulky 4 vyplývá, že průměrná obytná podlahová plocha jednoho bytu v bytovém domě v ČR je 56 m². Tohoto faktu je v diplomové práci využito k sestavení modelového bytového domu, který se bude skládat z 20 bytů právě o této výměře.

Z dat sčítání lidu, domů a bytů v roce 2011 vychází průměrný počet obyvatel na 1 byt v bytovém domě na 2,1. To by při počtu 20 bytů znamenalo 42 obyvatel žijících v bytovém domě. Diplomová práce však uvažuje o něco nižší počet a to 30 osob obývajících modelovou budovu. Předem stanovený počet lidí v bytovém domě je potřebný pro následné dimenzování prvků sloužících k přípravě TV.

Počet bytových domů v ČR v roce 2011 byl 211 252. Přibližně 34 % z tohoto počtu je postaveno panelovou technologií. [25] Panelové domy byly v ČR ve větším měřítku budovány od přelomu 50. a 60. let do 90. let minulého století. Obecným problémem panelových domů je jejich nedostatečná tepelná izolace a s tou související vysoké tepelné ztráty do okolí. Dodnes se postupně provádí kompletní revitalizace panelových domů. Tyto revitalizace většinou obnáší výměnu starých oken za okna plastová, zasklívání balkonů, zateplování, změnu fasády, rekonstrukci střechy a rekonstrukci otopných těles.

V práci je uvažováno s tím, že zvolená modelová budova již takovouto revitalizací prošla. Konstrukce obvodového pláště budovy je nyní sestavena ze čtyř vrstev. V pořadí z interiéru do exteriéru první vrstvu tvoří 15 mm silná vápenná omítka, dále 200 mm silný železobetonový panel, na kterém jsou nově přidány 170 mm silné panely z pěnového polystyrenu sloužící jako tepelná izolace, panely jsou následně zakryty 15 mm silnou perlitovou omítkou. Celkový součinitel prostupu tepla touto konstrukcí je poté $U = 0,21 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Modelová budova má plastová jednoduchá okna s izolačním dvojsklem se selektivní vrstvou. Výpočtová hodnota součinitele prostupu tepla těchto oken je $U = 2,1 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ a součinitel spárové průvzdušnosti $i_{LV}.10^{-4} = 1,90 \text{ m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-n}$.

Modelová budova je jako většina panelových domů zastřešena plochou dvouplášťovou střechou. Jako hlavní tepelně-izolační prvek jsou zde použity panely z minerální vlny. Celkový součinitel prostupu tepla střechou má hodnotu $U = 0,24 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Nízkoteplotní otopná soustava bytového domu je navržena na teplotní spád 55/40 °C ($\Delta t = 15 \text{ K}$). Pro vytápění je využito deskových otopných těles vhodných právě pro nízkoteplotní otopné soustavy.

Modelová budova nedisponuje žádným přidruženým pozemkem. Ostatní data týkající se převážně geometrických charakteristik modelové budovy jsou uvedena v následující tabulce 5.

Tabulka 5: Charakteristika modelové budovy

Charakteristika modelové budovy		
Počet obyvatel	30	-
Počet bytů celkem	20	-
Počet podlaží	4	-
Počet bytů na 1 podlaží	5	-
Obydlená vytápěná plocha na 1 podlaží	281	m ²
Ostatní užitková plocha na 1 podlaží	30	m ²
Plocha 1 podlaží celkem	311	m ²
podlahová plocha budovy celkem	1 245	m ²
Konstrukční rozměry		
Délka čelní a zadní stěny	18	m
Délka bočních stěn	17,5	m
Konstrukční výška podlaží	2,9	m
Celková výška budovy	13,7	m

4.3 Energetické hodnocení modelové budovy

4.3.1 Tepelná ztráta modelové budovy

K výpočtu tepelné ztráty je využito hodnot a poznatků obsažených v podkapitole 4.2.1 Charakteristika modelové budovy. Výpočet tepelné ztráty objektu je proveden zjednodušenou obálkovou metodou.

Následující tabulka uvádí hodnotu tepelné ztráty modelové budovy.

Tabulka 6: Tepelná ztráta modelové budovy [26]

Tepelná ztráta modelové budovy		
Tepelná ztráta prostupem – Q_p	29,12	kW
Tepelná ztráta větráním a infiltrací – Q_v	24,93	kW
Celkem	54,06	kW

Pozn.: K výpočtu tepelné ztráty obálkovou metodou bylo využito výpočetního programu dostupného on-line na internetových stránkách stavba.tzb-info.cz. Výpis z výpočtu je obsažen v příloze 5.

4.3.2 Potřeba tepla na vytápění

V případě, že je stanovena tepelná ztráta, lze určit množství tepla potřebné k vytápění budovy. Pro hodnocení otopného období je v práci využita denostupňová metoda. Ke stanovení počtu denostupňů je třeba znát denní průměrné teploty pro určitou oblast během celého roku. Dále je nutné stanovit průměrnou teplotu v interiéru (t_{is}) a referenční teplotu. Referenční teplota je průměrná denní teplota venkovního vzduchu, při které se zahajuje a ukončuje dodávka tepla. V ČR je tato teplota stanovena legislativně vyhláškou č. 152/2001 Sb. na hodnotu $t_{em} = 13 \text{ °C}$. Základní výpočtový vztah pro denostupně je pak:

$$D^\circ(t_{is}) = d * (t_{is} - t_{es}).$$

„Počet denostupňů charakterizovaných příslušnou vnitřní teplotou je dán součinem počtu topných dnů a rozdílu průměrné vnitřní a venkovní teploty. „ [27]

K výpočtu denostupňů bylo v práci využito dat z meteorologické stanice nacházející se v Čáslavi. Tato stanice je nejbližší ke Kutné Hoře. Meteorologická data byla vztažena pro otopnou sezónu 2012/2013 jakožto sezónu blízkou se dlouhodobému normálu. V této sezóně by měla být dodávka tepla dle legislativy zahájena 15.9.2012 a ukončena

31.5.2013. Následující tabulka uvádí počty denostupňů v jednotlivých měsících během otopné sezóny 2012/2013.

Tabulka 7: Denostupně

Denostupně Čáslav 2012/2013			
Průměrná teplota v interiéru t_{is}		19 °C	
Měsíc	Denostupně D_{19}	Počet dnů	Průměrná teplota
	[D.K]		[°C]
09/2012	36,00	9	15
10/2012	301,60	29	8,6
11/2012	381,00	30	6,3
12/2012	582,80	31	0,2
01/2013	610,70	31	-0,7
02/2013	532,00	28	0
03/2013	570,40	31	0,6
04/2013	216,20	23	9,6
05/2013	102,60	19	13,6
Celkem	3 333,30	231	5,9

Pozn.: Meteorologická data byla získána z [28]. K samotnému výpočtu denostupňů nebyl využit on-line dostupný program z [28].

Pro stanovení samotné potřeby tepla v jednotlivých měsících se následně využije vztahu:

$$Q_{vyt} = \frac{\varepsilon}{\eta_o \cdot \eta_r} \cdot \frac{24 \cdot Q_z \cdot D}{(t_{is} - t_e)} \quad [kWh]$$

Význam jednotlivých členů rovnice:

- ε – Opravný součinitel
- η_o – Účinnost obsluhy
- η_r – Účinnost rozvodu vytápění
- Q_z – Tepelná ztráta budovy
- D – počet denostupňů
- t_{is} – Průměrná vnitřní výpočtová teplota
- t_e - Venkovní výpočtová teplota

V tabulce 8. jsou uvedeny volené parametry vstupující do rovnici a také výsledné měsíční potřeby tepla pro vytápění.

Tabulka 8: Potřeba tepla na vytápění modelové budovy

Potřeba tepla na vytápění				
Parametr	Hodnota	Jednotka	Měsíc	Potřeba tepla [kWh/měs]
t_{ic}	19	°C	Leden	20179
t_e	-12	°C	Únor	17579
ϵ	0,75	-	Březen	18848
η_o	1	-	Duben	7144
η_r	0,95	-	Květen	3390
			Červen	0
			Červenec	0
			Srpen	0
			Září	1190
			Říjen	9966
			Listopad	12589
			Prosinec	19257
			Celkem	110 140

4.3.3 Potřeba tepla pro přípravu teplé vody

V práci je uvažováno s využitím systému dlouhodobé akumulace tepelné energie získané ze solárních kolektorů jak pro vytápění, tak také pro ohřev teplé vody. Pro určení množství tepla potřebného k ohřevu teplé vody v modelové budově během roku je nutné stanovit spotřebu TV.

Denní specifickou potřebu teplé vody v měrných jednotkách pro různé typy budov lze získat v ČSN EN 15316-3-1, 2, 3 a TNI 73 0302. Tyto normy uvádějí pro bytový dům hodnotu **40 l/osobu za den**. Tato hodnota bude využita i pro stanovení potřeby tepla k ohřátí TV v modelové budově. [29]

Teplá voda bude vždy ohřívána na 55 °C. Vstupní teploty studené vody se pro měsíce červen, červenec a srpen budou lišit od teplot během ostatních měsíců, to je uvedené v tabulce 9. Koeficient energetických ztrát systému pro přípravu teplé vody obsáhne energetické ztráty rozvodů TV a také teplovodního zásobníku. Pro běžné stavby se jeho hodnota volí v rozmezí 40 – 100 %. Ostatní hodnoty potřebné k výpočtu potřeby tepla na ohřev TV jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Hodnoty potřebné ke stanovení denní potřeby tepla pro ohřev TV

Vstupní hodnoty		
Teplota studené vody – t_1	10	°C
Teplota studené vody léto – t_1	15	°C
Teplota ohřáté vody – t_2	55	°C
Měrná hmotnost vody - ρ	1 000	kg/m ³
Měrná tepelná kapacita vody – c_w	4,186	kJ/kg.K
Denní spotřeba TV (osoba)	0,04	m ³ /os
Počet osob žijících v budově	30	-
Denní spotřeba TV (modelová budova) – V_p	1,2	m ³ /den
Koeficient energetických ztrát - z	0,5	
Snížení spotřeby červenec, srpen	20%	

Ke stanovení denní potřeby tepla na ohřev teplé vody v modelové budově bude užito vztahu:

$$Q_{TV,d} = (1 + z) \cdot \frac{\rho \cdot c_w \cdot V_p \cdot (t_2 - t_1)}{3\,600} \quad [kWh]$$

Po dosazení vstupních hodnot do vztahu vycházejí denní potřeby tepla pro přípravu TV následovně:

$$Q_{TV,d} = 94,2 \text{ kWh/den}$$

$$Q_{TV,d, \text{léto}} = 83,7 \text{ kWh/den}$$

Nyní lze již určit měsíční potřeby tepla. Pro měsíce červenec a srpen je obvykle v bytových domech uvažováno s částečným snížením spotřeby TV. Toto snížení souvisí s letními dovolenými obyvatelů bytových domů. V práci je obvyklá spotřeba během letních měsíců snížena o **20 %**. Výsledné měsíční hodnoty potřeby tepla pro přípravu TV uvádí tabulka 10.

Tabulka 10: Měsíční potřeba tepla pro přípravu TV v modelové budově

Měsíční potřeba tepla pro přípravu TV			
Měsíc	Spotřeba [kWh/měs.]	Měsíc	Spotřeba [kWh/měs.]
Leden	2919,7	Červenec	2076,3
Únor	2637,2	Srpen	2076,3
Březen	2919,7	Září	2825,6
Duben	2825,6	Říjen	2919,7
Květen	2919,7	Listopad	2825,6
Červen	2511,6	Prosinec	2919,7
Celkem [kWh/rok]		32376,6	

5 Výběr technického řešení

Zadáním práce je navrhnout systém využití dlouhodobé akumulace tepelné energie pro modelový bytový dům. Jak je uvedeno v podkapitole 4.2 jedná se o panelový bytový dům s plochou střechou nedisponující přidruženým pozemkem.

Kvůli prostorovému omezení v tomto případě nelze využít tepelných zásobníků typu ATES, BTES a PIT. Nicméně i kdyby zde takovéto omezení nebylo, tyto zásobníky, zejména ATES a BTES, by bylo z ekonomického hlediska nevhodné použít pro samostatně stojící středně velký bytový dům. Jak je zmíněno v rešeršní části práce, měrná cena těchto zásobníků za m^3 klesá s rostoucím objemem. Pro bytový dům by poté byl použit menší zásobník s relativně vysokou pořizovací hodnotou. Dalším omezením může být fakt, že každý podzemní zásobník vyžaduje ke své funkci určitou geologickou charakteristiku podloží. Zda je místo vybrané pro stavbu systému dlouhodobé akumulace tepelné energie využívající podzemní zásobník vhodné, určí tím pádem až provedený geologický průzkum podloží.

K akumulaci tepelné energie je proto navrženo využití tepelně zaizolované beztlaké ocelové nádrže. Teplonosnou látkou, do které bude tepelná energie akumulována, je voda. Samotnému zásobníku a ostatním prvkům soustavy jsou obětovány veškeré sklepní prostory bytového domu.

K nabíjení zásobníku bude využito energie získané ze slunečního záření. Solární energie bude přeměňována v tepelnou v plochých solárních kolektorech, které budou umístěny na střeše bytového domu v několika řadách. Plocha střechy se tak stává dalším prostorovým omezením pro instalaci systému dlouhodobé akumulace tepelné energie. Samotný okruh kolektorů bude od akumulčního zásobníku hydraulicky oddělen deskovým výměníkem tepla. Okruh kolektorů bude vybaven expanzní nádobou, která umožní změny objemu teplonosné kapaliny.

Jak již bylo zmíněno v podkapitole 4.2.1 Charakteristika modelové budovy, otopná soustava bytového domu je navržena pro teplotní spád 55/40 °C a vytápění zajišťují desková otopná tělesa. Teplota TV bude po celý rok udržována na 55 °C. Z důvodu co nejvyšší využitelnosti naakumulovaného citelného tepla bude snaha nahřát vodu během

letního období v beztlakém sezónním zásobníku na co nejvyšší teploty. Předpokladem je, že teplota vody bude na konci měsíce září 90 °C.

Během provozu při poklesu teploty vody v akumulátoru pod 55 °C by tak bylo možné akumulátor považovat za vybitý. Z důvodu navýšení kapacity akumulčního zásobníku je do solární soustavy instalováno tepelné čerpadlo typu voda – voda. TČ má svůj primární okruh napojený na akumulční zásobník. Sekundární okruh je napojený na rozvody otopné soustavy. Instalací TČ se zruší přímá závislost teploty otopné soustavy na teplotách v akumulátoru. Toto řešení umožní využívat vodu z akumulční nádrže až do její teploty 10 °C a navýší její kapacitu zhruba o 50 %. Při poklesu teploty vody v akumulčním zásobníku pod 10 °C by hrozilo namrzání výparníku TČ, případně by mohlo dojít k nežádoucí kondenzaci vzdušné vlhkosti v solárních kolektorech. Proto dojde při poklesu teploty pod 10 °C k odstavení akumulční nádrže i tepelného čerpadla. Otopná soustava je vybavena elektrokotlem, který zde slouží jako náhradní zdroj tepla v případě, kdy je hlavní sezónní akumulátor vybit. Elektrokotel je zde uveden pouze jako jeden možný náhradní zdroj tepla. Dal by se zde uplatnit například také plynový kotel. Vždy poté záleží na dostupnosti zdroje náhradní energie. Zda jsou zavedeny plynové rozvody apod.

Soustava rozvodů TV je vybavena zásobníkovým ohříváčem o objemu 1,5 m³. Zásobníkový ohříváč je přes deskový výměník propojen s hlavním sezónním akumulčním zásobníkem. To umožňuje přípravu TV s přímým využitím tepla naakumulovaného v sezónní nádrži. Ohříváč je také vybaven elektrickou topnou vložkou o výkonu 20 kW, jejíž úkolem je vždy zajistit požadovanou výstupní teplotu TV 55 °C.

Proudění teplotonosných kapalin ve všech okruzích bude zajišťovat celkem 7 oběhových bezc pávkových čerpadel. Provozní schéma systému je zobrazeno v *příloze 1* této práce.

6 Návrh technického řešení

6.1 Popis hlavních prvků systému

6.1.1 Solární kolektory

Pole plochých solárních kolektorů bude umístěno na střeše panelové budovy. Pro využití v soustavě dlouhodobé akumulace tepelné energie byly vybrány solární kolektory **Regulus KPG1+**, které jsou vhodné pro instalaci jak ve vertikální, tak horizontální poloze. Kolektor KPG1+ je vybaven lyrovým hliníkovým absorbérem. Maximální pracovní teplota teplotnosné látky je 120 °C, stagnační teplota 234 °C. Maximální pracovní tlak je 6 bar (g). Teplotnosnou kapalinou v kolektorech je vodní roztok propylenglykolu. Ostatní hodnoty potřebné pro dimenzování solární soustavy uvádí tabulka 11.

tabulka 11: Charakteristika KPG1+

Charakteristika KPG1+		
Rozměry a hmotnost		
výška x šířka x tloušťka	2 150 x 1 170 x 83	mm
plocha apertury	2,392	m ²
suchá hmotnost	38	kg
Okamžitá účinnost vztažená k ploše apertury		
η_0	0,786	-
a_1	3,747	W/m ² .K
a_2	0,0048	W/m ² .K
Max. výkon při osvitu 1000 W/m ²		
$Q_{k, max}$	1 883	W

Kolektory budou na střechu modelového bytového domu namontovány v horizontální poloze, tím bude maximalizován jejich počet. Sklon plochy solárních kolektorů vůči horizontální rovině činí **45°**. Mezera mezi jednotlivými řadami solárních kolektorů je 980 mm. Tyto parametry zajistí, že při výšce slunce 40 ° nedojde k vzájemnému stínění mezi jednotlivými řadami kolektorů.

Při těchto dispozicích lze solární kolektory na střechu domu o půdorysu 18 x 17,5 m rozmístit do 10 řad po 8 kolektorech. Maximální počet solárních kolektorů je tedy 80 s celkovou plochou apertury 191,4 m². Finální počet, bude uveden v kapitole 7

Energetická bilance provozu systému. Čelní stěna modelového bytového domu bude orientovaná jižně. Kolektory umístěné na střeše budou mít shodnou orientaci, tzn. azimutový úhel osluněné plochy $\gamma = \pm 0^\circ$.

6.1.2 Sezónní zásobník tepla a dispozice a úpravy sklepních prostor

Jak již bylo v práci zmíněno, akumulačnímu zásobníku a přidružené technologii budou obětovány veškeré sklepní prostory bytového domu. Obyvatelé domu tak přijdou o možnost využívání sklepních prostor jiným typickým způsobem pro panelové domy, jako je například umístění sklepních kójí. To může být považováno za jedno z negativ využití systému dlouhodobé akumulace tepelné energie v bytovém domě, který nedisponuje přidruženou parcelou.

Sklepní prostory jsou uvažovány pod celým modelovým bytovým domem. Světla výška sklepních prostor je 2,6 m. Zde se vychází ze změřené světlé výšky sklepních prostor v reálném panelovém domě nacházejícím se v Kutné Hoře.

Ve sklepních prostorech modelového domu bude zachována výtahová šachta a jednoramenné schodiště. Dále zde zůstane příčná nosná zeď táhnoucí se přes celý sklepní prostor.

Snahou je získat i přes dispoziční omezení, co největší využitelný objem teplovodního zásobníku. Proto budou použity zásobníky dva, které budou navzájem propojeny. Jejich označení je AZ1 a AZ2. Schematické znázornění umístění zásobníků a ostatní technologie STES je patrné v příloze 2. *Dispozice sklepních prostor*. Oba zásobníky budou ocelové smaltované beztlaké a tepelně zaizolované. Akumulační zásobníky budou dvakrát propojeny tepelně zaizolovaným ocelovým potrubím světlosti DN250. Jedno potrubí bude procházet nosnou zdí těsně nad podlahou sklepa, druhé pak ve výšce 1,8 m nad zemí. Tím by mělo být zajištěno míchání vody mezi zásobníky během provozu systému. Veškerá vstupní a výstupní potrubí budou připojena k větší nádrži AZ1, hlavní nádrži. Nádrž AZ1 je vybavena také stratifikační vestavbou sloužící pro vrstvení přiváděné kapaliny podle různých objemových hmotností. Ostatní geometrické parametry zásobníků jsou uvedené v tabulce 12.

Tabulka 12: Geometrické parametry AZ

Geometrické parametry AZ					
AZ1			AZ2		
šířka	15,6	m	šířka	5,7	m
délka	8,2	m	délka	4,7	m
výška	2,3	m	výška	2,3	m
objem	294,2	m ³	objem	61,6	m ³
Celkem					
Celkový objem	355,8	m ³			
výpočtový objem	350,3	m³			

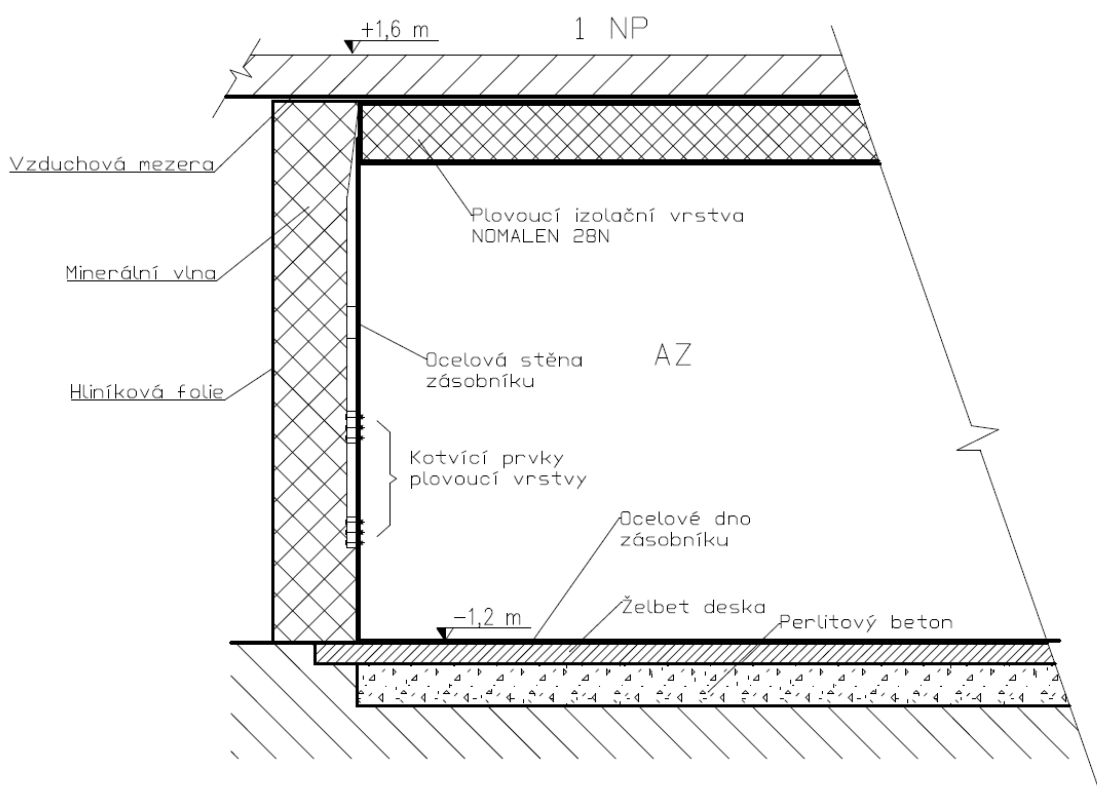
AZ1 a AZ2 budou montovány na místě ve sklepních prostorech bytového domu z jednotlivých montážních dílců. Pro přepravu těchto dílců do vnitřku budovy bude rozšířeno jedno okno původně sloužící k prosvětlování sklepních prostor. Původní šířka okna je 1 200 mm, bude rozšířeno na 3 600 mm. V nosné zdi dojde z obdobného důvodu k vytvoření vrat o šířce 4 000 mm. Jedná se o předpoklad, který bude potvrzen statickým výpočtem. Konkrétní návrh postupu transportu materiálu od prostor montáže přesahuje rozsah této práce.

Pro zlepšení tepelně-izolačních vlastností a snížení tepelných ztrát skrze ocelové dno zásobníku dojde ještě před montáží systému k odbourání 300 mm tlusté vrstvy současné podlahy ve sklepních prostorech, tato vrstva bude nahrazena 200 mm silnou vrstvou perlitového betonu, jehož tepelná vodivost má hodnotu $\lambda = 0,11 \text{ W/m.K}$. Na perlitový beton budou položeny 100 mm silné železobetonové desky, které zamezí deformacím perlitové vrstvy vlivem hmotnosti napuštěných zásobníků. Záměna podlahové vrstvy se provede pouze v místech, na kterých budou posléze stát AZ1 a AZ2.

Pro tepelnou izolaci bočního pláště zásobníku AZ1 a AZ2 bude využito panelů z minerální vlny. Tepelná vodivost těchto izolačního materiálu je $\lambda = 0,037 \text{ W/m.K}$. Tloušťka takto vzniklé izolační vrstvy bude 400 mm. Poslední izolační panel je vždy opatřen z vnější strany hliníkovou fólií. Plášť akumulčních nádrží nacházejících se ve sklepních prostorech není třeba oplechovat.

Zásobníky AZ1 a AZ2 nemají vrchní ocelový plášť, jsou otevřené. Pro zakrytí zásobníků zde bude využito poznatků z PIT zásobníků a jejich krycích vrstev. Jako hydro a tepelně izolační plášť zde bude použita krycí plovoucí vrstva na bázi flexibilních materiálů. Hlavním

stavebním a také tepelně-izolačním prvkem je zde NOMALEN 28N. Tepelná vodivost tepelně-izolačního materiálu má hodnotu $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$. Vrstva bude silná 0,3 m. Výhodou tohoto řešení je navýšení využitelného objemu zásobníku a také flexibilita vrstvy, která umožňuje reakce na tepelnou roztažnost vody. Krycí vrstva bude pevně přichycena z vnější strany k boční stěně zásobníku. Příčný řez zásobníkem schematicky zobrazující skladbu jednotlivých tepelně a hydroizolačních prvků je znázorněn na obrázku 30.



Obrázek 30: Příčný řez akumulčním zásobníkem

Výsledné součinitele prostupu tepla jednotlivými plochami zásobníku uvádí následující tabulka 13. Hodnoty budou využity pro stanovení tepelných ztrát zásobníku v jednotlivých měsících. Hodnoty byly stanoveny pro průměrnou teplotu vody v zásobnících, nebudou se proto v průběhu roku měnit.

Tabulka 13: Součinitelé prostupu tepla konstrukcí AZ

Součinitel prostupu tepla		
$U_{\text{plášť}}$	0,1	W/m ² .K
U_{dno}	0,32	W/m ² .K
$U_{\text{víko}}$	0,12	W/m ² .K

6.1.3 Tepelné čerpadlo voda - voda

Výkon tepelného čerpadla se v technické praxi stanovuje jako 70 % tepelných ztrát budovy, tedy v případě modelového bytového domu:

$$P_{T\check{c}} = 0,7 * 54,06 = 37,84 \quad \text{kW}$$

Pro systém dlouhodobé akumulace tepelné energie bude využito TČ firmy **IVT typ GEO G 238**. Jedná se o dvoustupňové TČ typu voda – voda disponující výkonem 38 kW za podmínek W0/W45. Čerpadlo využívá tandemového zapojení dvou scroll kompresorů. Výhody využití tohoto typu TČ pro instalaci se sezónním zásobníkem teplé vody jsou v tom, že díky dvoustupňovému cyklu dokáže dosáhnout výstupní teploty vody 68 °C i při teplotě primáru 0 °C. Další výhodou je široký rozsah teplot vody vstupující do primárního okruhu. Teploty se mohou pohybovat od -5 do + 30 °C. Voda vstupující do primárního okruhu TČ je voda odebíraná z akumulčního zásobníku. Technický list tepelného čerpadla je 3. přílohou této práce.

6.1.4 Elektrický kotel

Jako náhradní zdroj tepla zde bude instalován elektrokotel **Dakon PTE 45** o jmenovitém tepelné výkonu 45 kW. Ten bude pokrývat potřebu tepla na vytápění v případě, že již budou vybity hlavní sezónní akumulátory. Kotel je možné krátkodobě přetížit tak, aby byla pokryta potřeba tepla i v případě velmi nízké venkovní teploty.

6.2 Popis provozu systému během roku

Systém dlouhodobé akumulace tepelné energie využitý v modelovém bytovém domě je schematicky znázorněn v příloze 1. Popis provozu systému začíná na konci měsíce září, kdy je předpokládáno plné nabití akumulčních zásobníků AZ1 a AZ2 na teplotu 90 °C. V dalších měsících se AZ1 a AZ2 postupně vybíjí. Tepelná energie je spotřebovávána přímo

pro otopnou soustavu, respektive přes deskový výměník pro přípravu TV bez využití tepelného čerpadla a topné elektrické vložky v zásobníkovém ohříváči TV. Ochlazená voda, která odevzdala svou energii otopné soustavě nebo TV je vracena zpět do akumulčních zásobníků. Ve chvíli, kdy teplota vody v akumulčních zásobnících klesne pod požadovanou teplotu 55 °C je do provozu uvedeno TČ, které chladnější vodu ze zásobníku dohřívá zpět na požadovaných 55 °C. Pokud bude teplota odebírané vody z akumulčního zásobníku vyšší než 30 °C, dojde k jejímu ochlazení směřováním s chladnou výstupní vodou z TČ. Směšovací trasa je znázorněna ve schématu v příloze 1. Tento jev bude nastávat pouze zřídka, jelikož voda pro primární okruh TČ bude odebírána ze spodní oblasti zásobníku, kde jsou předpokládány nejnižší teploty vody během roku. TV je v zásobníkovém ohříváči dohřívána na teplotu 55 °C elektrickou topnou vložkou. V případě, že teplota vody v akumulčních zásobnících poklesne pod 10 °C, akumulční zásobníky jsou vybity a odstaveny od okruhu otopné soustavy a TV. V tomto případě dojde k zapnutí elektrokotle, který pokryje potřebu tepla na vytápění. TV je ohřívána pouze pomocí elektrické topné vložky. Akumulční zásobníky jsou během této doby opět nabíjeny energií získanou ze solárního záření. V momentě, kdy dojde k opětovnému navýšení teploty vody v AZ1 a AZ2 na 30 °C, dochází k odstavení elektrokotle. Do chodu je opět uvedeno tepelné čerpadlo a oběhové čerpadlo, které zajišťuje průtok vody z akumulčních zásobníků deskovým výměníkem sloužícím pro ohřev TV. Předpokladem je, že tato situace nastává někdy v průběhu měsíce března až dubna. To znamená, že i když opět dochází k vybití solárních akumulčních zásobníků, solární zisky se již budou zvyšovat a potřeba tepla bytového domu snižovat. Bude tak docházet k pozvolnému nabíjení akumulčních zásobníků. V případě, že by se tak nestalo a teplota vody v AZ1 a AZ2 klesla pod 10 °C, opět dojde k jejich odstavení a nájezdu elektrokotle a popsany děj se bude opakovat. V následujících letních měsících, solární zisky výrazně převýší potřebu tepla na přípravu TV, a opětovně dojde ke zvýšení teploty vody v akumulčních zásobnících na 90 °C. Tím se celý roční cyklus uzavírá.

7 Energetická bilance provozu systému

Pro technické vyhodnocení využitelnosti a přínosnosti systému dlouhodobé akumulace tepelné energie v modelovém bytovém domě slouží energetická bilance provozu systému během roku.

V této kapitola bude nejprve samostatně vyhodnocena soustava solárních kolektorů a stanoveny její využitelné tepelné zisky, poté bude provedena bilancování celého systému.

7.1 Návrh a bilance soustavy solárních kolektorů

Cílem návrhu a bilance soustavy solárních kolektorů je především stanovit využitelné tepelné zisky solární soustavy $Q_{ss,u}$ v jednotlivých měsících. Pro jejich vyhodnocení bude využito zjednodušeného výpočtového postupu sloužícího pro navrhování a stanovení měsíční bilance solárních soustav, který zohledňuje tepelné ztráty solární soustavy (kolektory, rozvody), orientaci a úhel sklonu kolektorů. Samotný postup výpočtu je uveden v [13]. Tento výpočtový postup je použit v souladu s technickou normalizační informací TNI 73 0302.

7.1.1 Skutečná denní dávka slunečního ozáření

Nejprve je potřeba stanovit skutečnou denní dávku slunečního ozáření $H_{T,den}$. Ta bude stanovena vztahem:

$$H_{T,den} = \tau_r \cdot H_{T,den,teor} + H_{T,den,dif} \quad [kWh/m^2 \cdot den]$$

kde,

τ_r – poměrná doba slunečního svitu

$H_{T,den, teor}$ – Teoretická denní dávka slunečního ozáření

$H_{T,den, dif}$ – Teoretická denní dávka difúzního ozáření

Skutečná denní dávka slunečního ozáření bude stanovena pro charakteristickou oblast **město**, kde průměrná hodnota součinitele znečištění $Z = 4$. Dále bude využito údajů o poloze solárních kolektorů z podkapitoly 6.1 Popis hlavních prvků systému, kde je uveden sklon kolektorů 45° a jejich azimutový úhel $\lambda = \pm 0^\circ$. Tabulka 14 uvádí hodnoty poměrné

doby slunečního svitu, teoretické denní dávky slunečního ozáření a teoretické denní dávky difúzního ozáření pro případ modelové budovy. Tyto hodnoty vznikly na základě dlouhodobých meteorologických měření ve vybraných oblastech. Ve [13] je možné nalézt průměrné hodnoty i pro odlišné oblasti, orientace a sklony kolektorů.

Tabulka 14: Hodnoty τ_r , $H_{T,den, teor}$, $H_{T,den, dif}$ v jednotlivých měsících

Měsíc	$H_{T,den, teor}$	$H_{T,den, dif}$	T_r
	[kWh/m ² .den]	[kWh/m ² .den]	-
Leden	3,52	0,46	0,21
Únor	4,79	0,65	0,32
Březen	6,28	0,97	0,42
Duben	7,1	1,34	0,45
Květen	7,57	1,62	0,51
Červen	7,69	1,75	0,54
Červenec	7,56	1,72	0,55
Srpen	7,19	1,5	0,55
Září	6,41	1,16	0,53
Říjen	5,13	0,8	0,37
Listopad	3,78	0,53	0,21
Prosinec	3,07	0,4	0,14

Po dosazení tabulkových hodnot do uvedené rovnice je možné stanovit skutečnou denní dávku slunečního ozáření $H_{T,den}$. Vypočítané hodnoty budou posléze vynásobeny počtem dnů v měsíci, tím se stanoví skutečná měsíční dávka slunečního ozáření $H_{T, měs}$. Výsledky uvádí tabulka 15.

Tabulka 15: Výsledné hodnoty $H_{T,den}$ a $H_{T, měs}$

Měsíc	$H_{T,den}$	$H_{T, měs}$	Měsíc	$H_{T,den}$	$H_{T, měs}$
	[kWh/m ² .den]	[kWh/m ²]		[kWh/m ² .den]	[kWh/m ²]
Leden	1,1	34,2	Červenec	4,9	152,9
Únor	2,0	55,3	Srpen	4,6	143,5
Březen	3,2	99,2	Září	3,9	118,3
Duben	3,9	118,0	Říjen	2,4	74,5
Květen	4,7	144,3	Listopad	1,2	36,4
Červen	5,0	148,7	Prosinec	0,8	24,0

7.1.2 Účinnost solárního kolektoru

Průměrná účinnost solárního kolektoru se stanoví z rovnice křivky účinnosti

$$\eta_k = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{t_{k,m} - t_{es1}}{G_{T,m}} \right) - a_2 \left(\frac{t_{k,m} - t_{es1}}{G_{T,m}} \right)^2$$

$G_{T,m}$ – Střední denní sluneční ozáření uvažované plochy solárních kolektorů ve W/m^2

$t_{k,m}$ – Průměrná teplota teplotnosné kapaliny v solárních kolektorech v $^{\circ}C$ během roku.

t_{es1} – Průměrná venkovní teplota v době slunečního svitu v $^{\circ}C$

Hodnoty parametrů $G_{T,m}$ a t_{es1} jsou uvedeny v tabulce 16. Tyto hodnoty opět vznikly na základě dlouhodobých meteorologických měření a lze je dohledat v [13].

Průměrná teplota v solárních kolektorech je volena podle typu aplikace. Pro aplikace, kde je použito solární soustavy pro přípravu TV i vytápění a solární pokrytí by mělo být vyšší než 25 %, což je případ aplikace uvažované v této práci, je hodnota $t_{k,m} = 60^{\circ}C$.

Parametry solárního kolektoru, tzn. hodnotu optické účinnosti η_0 , lineárního součinitele tepelné ztráty a_1 a kvadratického součinitele tepelné ztráty kolektoru a_2 vztažené k ploše apertury je možno vyčíst z tabulky 11. Tyto hodnoty by měly být vždy udávány výrobcem nebo dodavatelem solárního kolektoru.

Tabulka 16: Hodnoty parametrů $G_{T,m}$ a t_{es1}

Měsíc	$G_{T,m}$	t_{es1}	Měsíc	$G_{T,m}$	t_{es1}
	[W/m ²]	$^{\circ}C$		[W/m ²]	$^{\circ}C$
Leden	418	2,2	Červenec	483	22,5
Únor	489	3,4	Srpen	505	22,6
Březen	536	6,5	Září	516	19,4
Duben	522	12,1	Říjen	489	13,8
Květen	497	16,6	Listopad	427	7,3
Červen	479	20,6	Prosinec	386	3,5

Tabulka 17 uvádí výsledné hodnoty průměrné účinnosti solárního kolektoru, které byly získány dosazením potřebných hodnot do uvedeného vztahu.

Tabulka 17: Výsledné hodnoty η_k

Měsíc	η_k	Měsíc	η_k
Leden	23,0%	Červenec	48,1%
Únor	32,1%	Srpen	49,5%
Březen	38,6%	Září	47,6%
Duben	42,1%	Říjen	41,1%
Květen	44,1%	Listopad	29,2%
Červen	46,2%	Prosinec	19,8%

7.1.3 Stanovení plochy apertury kolektorů

Plocha apertury solárních kolektorů A_k je dalším parametrem potřebným ke stanovení tepelných zisků solární soustavy. Plocha byla stanovena v podkapitole 6.1 Popis hlavních prvků jako $A_k = 191,4 \text{ m}^2$. Nejedná se ještě o finální hodnotu, ta bude stanovena, podle výsledků tepelné bilance celého systému dlouhodobé akumulace tepelné energie. Navržená plocha je plochou apertury, neboť k ní je vztažena křivka účinnosti použitá ve výpočtu.

7.1.4 Měsíční využitelné tepelné zisky solárních kolektorů

Měsíční využitelné tepelné zisky solárních kolektorů $Q_{ss,u}$ jsou dány vztahem:

$$Q_{ss,u} = 0,9 \cdot \eta_k \cdot H_{T,m\acute{e}s} \cdot A_k \cdot (1 - p) \quad [kWh/m\acute{e}s]$$

Kde p je paušální hodnota srážky z tepelných zisků solárních kolektorů vlivem tepelných ztrát soustavy. Obvykle jsou v této hodnotě zahrnuty i tepelné ztráty solárního zásobníku. V případě této práce to tak nebude, ztráty zásobníku budou určeny přesnější metodou během tepelné bilance systému. Podle TNI 73 0302 je pro solární soustavu dodávající energii na přípravu TV a vytápění do objektu o vytápěné ploše nad 200 m^2 hodnota parametru $p = 6 \%$.

Ostatní hodnoty parametrů výpočtového vztahu jsou již známé. Výsledné hodnoty $Q_{ss,u}$ jsou zobrazeny v tabulce 18.

Tabulka 18: Výsledné měsíční $Q_{ss,u}$

Měsíc	$Q_{ss,u}$	Měsíc	Q
	kWh/měs		kWh/měs
Leden	1 270	Červenec	11 908
Únor	2 872	Srpen	11 505
Březen	6 205	Září	9 111
Duben	8 041	Říjen	4 955
Květen	10 292	Listopad	1 721
Červen	11 130	Prosinec	768

7.2 Tepelná ztráta akumulčních zásobníků

Tepelná ztráta akumulčního zásobníku je vyjádřena vztahem:

$$Q_z = (U_{plášť} \cdot A_{plášť} + U_{dno} \cdot A_{dno} + U_{víko} \cdot A_{víko}) \cdot (t_w - t_e) \quad [kW]$$

Kde

U součinitel prostupu tepla konstrukce [W/m².K],

A plocha [m²],

t_w teplota vody v zásobníku [°C],

t_e teplota okolí [°C].

Tabulka 19 obsahující hodnoty parametru U bude rozšířena o plochy jednotlivých stěn zásobníků. Vždy se bude jednat o součet ploch zásobníku AZ1 a AZ2.

Tabulka 19: hodnoty parametru U a A

U_{plášť}	0,1	W/m ² .K
U_{dno}	0,32	W/m ² .K
U_{víko}	0,12	W/m ² .K
A_{plášť}	161,46	m ²
A_{dno}	154,71	m ²
A_{víko}	154,71	m ²

Teplotu okolí t_e v tomto případě představují průměrné měsíční teploty vzduchu ve sklepních prostorech bytového domu. Hodnoty těchto teplot jsou pro potřeby tepelné bilance systému v práci odhadnuty. Při odhadu byl uvažován vliv teploty vody

v akumulčním zásobníku a venkovních teplot vzduchu. Hodnoty tepelných ztrát akumulčních zásobníků uvádí tabulka č. 20.

7.3 Energetická bilance systému

7.3.1 Obecná charakteristika

Systém dlouhodobé akumulace tepelné energie v modelovém bytovém domě je energeticky bilancován podle navržených provozních stavů, které jsou popsány v podkapitole 6.2 Popis provozu systému během roku.

Nejzásadnějším výsledkem energetické bilance systému budou hodnoty solárního pokrytí f . Solární pokrytí představuje základní technické hodnotící kritérium používané pro solární soustavy s dlouhodobou akumulací tepelné energie. Udává procentuální hodnotu využití tepelné energie získané ze solárního záření pro energetické potřeby bytového domu. Solární pokrytí je stanoveno vztahem:

$$f = \frac{Q_{u,tot} - E_{el,tot}}{Q_{u,tot}} \cdot 100 \quad [\%]$$

$Q_{u,tot}$ Celkové množství tepla dodané do systému otopné soustavy a rozvodů TV během určitého časového období (rok) [kWh],

$E_{el,tot}$ Celková spotřeba el. energie jednotlivými prvky systému během určitého časového období (rok) [kWh]. [11]

Základními vstupními hodnotami energetické bilance systému jsou potřeba tepla na vytápění, potřeba tepla na přípravu TV a využitelné tepelné zisky solárních kolektorů. Hodnoty těchto výpočtových parametrů byly stanoveny v podkapitolách 4.3 Energetické hodnocení modelové budovy a 7.1 Návrh a bilance soustavy solárních kolektorů. Spotřeby elektrické energie oběhovými čerpadly, které také vstupují do bilančního výpočtu, byly v této práci odhadnuty.

7.3.2 Bilanční postup

Následující kapitola uvádí příklad postupu bilancování pro měsíc říjen, během kterého dochází k zahájení topné sezóny. Před popsáním postupu bilancování je potřeba zmínit, že původně navržený počet 80 solárních kolektorů ($A_k = 191,4 \text{ m}^2$) byl snížen na 75 ($A_k = 179,4 \text{ m}^2$). Tato změna byla provedena z důvodu příliš vysokých teplot v akumulačním zásobníku, které během měsíce srpna přesahovaly $95 \text{ }^\circ\text{C}$. Zásobník byl již plně nabit a vzniklé solární přebytky nebylo možné akumulovat. Snížením počtu kolektorů a tím i solárních zisků soustavy došlo k vyřešení tohoto problému. Veškeré následující hodnoty jsou již aktuální a platné pro 75 solárních kolektorů. Vzhledem k omezenému prostoru nebylo možné zásobník zvětšit.

Říjnová bilance

Uvažovaná teplota v akumulačním zásobníku na počátku měsíce je $90 \text{ }^\circ\text{C}$, tedy zásobník je plně nabitý a připravený k dodávce tepelné energie. Průměrná teplota vody v zásobnících během bilance nezohledňuje vliv stratifikace.

Potřeba tepla celkem

$$Q_{p,celk} = Q_{vyt} + Q_{TV} = 9\,966 + 2\,919,7 = 12\,886 \text{ kWh}$$

Teplo dodané do akumulačních zásobníků ze solárních panelů

$$Q_{ss,u} = 4\,584 \text{ kWh}$$

Rozdíl celkové potřeby tepla a tepla dodaného ze solárních kolektorů

$$Q_R = Q_p - Q_{ss,u} = 12\,886 - 4\,584 = 8\,302 \text{ kWh}$$

Pomocný přepočít merné tepelné kapacity vody

$$c_w = 4186 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} = 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}\cdot\text{K}} = c_{wh}$$

Teplota v nádržích na konci měsíce před započtením tepelných ztrát

$$t_k = t_p - \left(\frac{Q_R \cdot 1\,000}{\rho_w \cdot c_{wh} \cdot V_{AZ}} \right) = 90 - \left(\frac{8\,302 \cdot 1\,000}{1\,000 \cdot 1,163 \cdot 350,3} \right) = 69,6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tepelná ztráta akumulačních zásobníků

Střední výpočtová teplota vody v AZ1 a AZ2 sloužící ke stanovení tepelných ztrát je pro říjen 80 °C. Uvažovaná teplota vzduchu ve sklepních prostorech je 27 °C.

$$Q_z = (U \cdot A)_{celk} \cdot (t_w - t_e) = 84,22 \cdot (80 - 27) = 4,47 \text{ kW}$$

Množství ztrátové energie během října

$$Q_{ZE} = 3\,323 \text{ kWh}$$

Tepelný zisk z tepelných ztrát

Jelikož jsou sezónní zásobníky umístěny uvnitř budovy, lze považovat určité množství tepelných ztrát za tepelné zisky. Jako tepelný zisk pro budovu je uvažována část tepelných ztrát pláštěm a víkem zásobníku. Tepelná energie uniklá dnem zásobníků zde nebude považována za tepelný zisk. Procentuální hodnota tepelných zisků z tepelných ztrát je poté stanovena na **35 %**.

$$Q_{zisk} = 0,35 \cdot Q_{ZE} = 0,35 \cdot 3\,323 = 1\,163,1 \text{ kWh}$$

Nevyužitá část tepelných ztrát

$$Q_{ZE,tot} = (1 - 0,35) \cdot Q_{ZE} = (1 - 0,35) \cdot 3\,323 = 2\,160 \text{ kWh}$$

Rozdíl tepla do zásobníku dodaného a potřeby tepla po započtení tepelných ztrát

$$Q_{R,nový} = Q_p + Q_{ZE,tot} - Q_{ss,u} = 12\,886 + 2\,160 - 4\,584 = 10\,462 \text{ kWh}$$

Teplota v nádržích na konci měsíce po započtení tepelných ztrát

$$t_k = t_p - \left(\frac{Q_{R,nový} \cdot 1\,000}{\rho_w \cdot c_{wh} \cdot V_{AZ}} \right) = 90 - \left(\frac{10\,462 \cdot 1\,000}{1000 \cdot 1,16 \cdot 350,3} \right) = 64,5 \text{ °C}$$

Množství zbývajících využitelné energie v akumulačních zásobnících

Tepelná kapacita plně nabitých zásobníků je **Q_{Az} = 32 996 kWh**. Předpokladem jsou plně nabitě zásobníky na začátku října. Tepelná kapacita je vztažena k minimální teplotě vody v zásobnících 10 °C. Pro získání hodnoty kapacity zásobníků na konci měsíce bude k počátečnímu stavu připočteno množství tepla dodané ze solárních kolektorů, odečtena energie dodaná přímo ze zásobníků pro energetické potřeby budovy a odečteny tepelné ztráty zásobníků. Toto lze vyjádřit vztahem:

$$Q_{konec} = Q_{AZ} - Q_{R,nový} = 32\,996 - 10\,462 = 22\,602 \text{ kWh}$$

Stav zásobníku v procentech

Předpoklad: plné nabití 32 996 kWh = 100 %

$$Q_{konec} = 22\,602 \text{ kWh} = 68,5 \%$$

Solární pokrytí pro měsíc říjen

Spotřeba elektrické energie oběhových čerpadel byla pro měsíc říjen odhadnuta na 95 kWh.

$$f = \frac{Q_p - E_{el,tot}}{Q_p} \cdot 100 = \frac{12\,886 - 95}{12\,886} \cdot 100 = 99,26 \%$$

Hodnota měsíčního solárního pokrytí nemá ve finálním hodnocení systému vysokou váhu. Důležité je solární pokrytí, které je dosaženo provozem systému během celého roku.

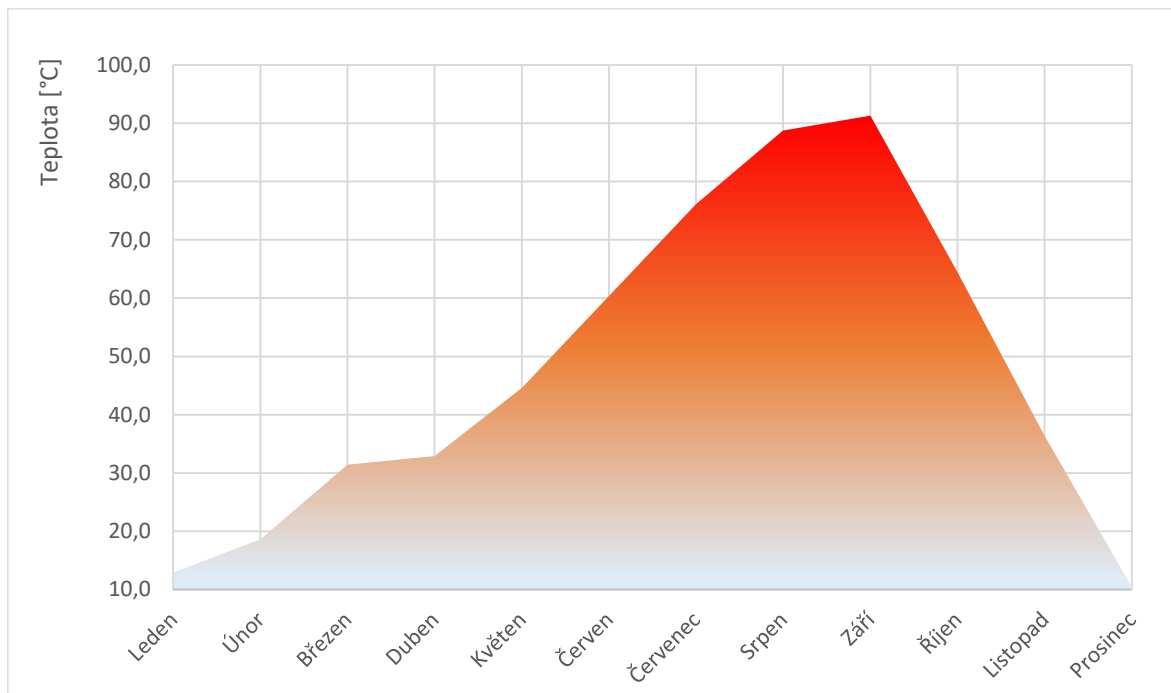
Měsíc říjen je charakteristický tím, že z důvodu dostatečně vysokých teplot v akumulčních zásobnících není třeba využívat TČ, elektrokotel a topnou vložku v zásobníkovém ohřívači TV. Elektrickou energii spotřebovávají pouze oběhová čerpadla. U jiných měsíců, například během měsíce dubna dochází k využití TČ a také k elektrickému ohřevu TV v zásobníkovém ohřívači. Spotřeba elektrické energie pohonu kompresoru TČ závisí na průměrném topném faktoru TČ. Ten je pro každý měsíc volen ve vztahu k teplotě vody v zásobníku a podle údajů poskytnutých výrobcem TČ. Spotřeba elektrické energie tepelného čerpadla a elektrické topné vložky v jednotlivých měsících je poté započtena do výsledné hodnoty solárního pokrytí f .

7.4 Vyhodnocení

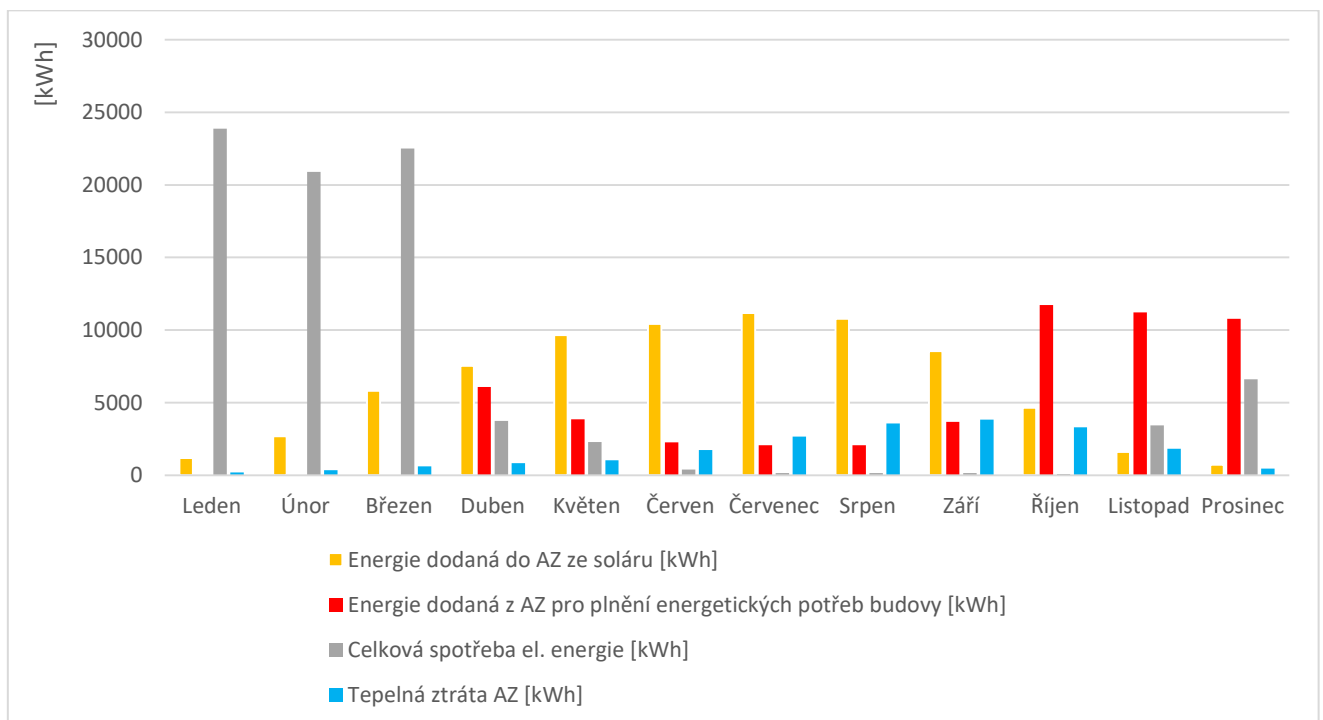
Tabulka 20: Výsledné hodnoty energetické bilance systému

Měsíc	Solární energie dodaná do zásobníku [kWh]	Potřeba tepla na vytápění [kWh]	Potřeba tepla na přípravu TV [kWh]	Průměrná teplota ve sklepních prostorech [°C]	Energie dodaná přímo z AZ [kWh]	Tepelná ztráta AZ [kWh]	Tepelný zisk budovy z tepelných ztrát AZ [kWh]	Teplota vody v AZ na konci měsíce [°C]
Leden	1 191	20 179	2 919,7	9	0,0	189,7	0,0	12,9
Únor	2 693	17 579	2 637,2	10	0,0	351,0	0,0	18,6
Březen	5 817	18 848	2 919,7	16	0,0	613,2	214,6	31,4
Duben	7 538	7 144	2 825,6	19	6 091,1	839,1	293,7	32,9
Květen	9 649	3 390	2 919,7	23	3 860,4	1 038,5	363,5	44,6
Červen	10 434	0	2 511,6	26	2 277,3	1 733,4	n/a	60,3
Červenec	11 164	0	2 076,3	29	2 076,3	2 662,8	n/a	76,1
Srpen	10 786	0	2 076,3	30	2 076,3	3 559,4	n/a	88,8
Září	8 542	1 190	2 825,6	31	3 669,6	3 839,3	345,5	91,3
Říjen	4 645	9 966	2 919,7	27	11 725,7	3 313,8	1 159,8	64,5
Listopad	1 614	12 589	2 825,6	21	11 207,3	1 831,0	640,9	36,4
Prosinec	720	19 257	2 919,7	11	10 770,3	449,8	157,4	10,4
Celkem	74 794	110 142	32 376,6	21	53 754,2	20 421,0	3 175,4	47,4
Měsíc	Spotřeba el. energie pro TČ [kWh]	Spotřeba el. energie pro přípravu TV [kWh]	Spotřeba el. energie pro elektrokotel [kWh]	Spotřeba el. Energie pro oběhová čerpadla [kWh]	Množství zbývajících využitelné energie v AZ [kWh]	Stav AZ [%]	40,8	
Leden	0	3 212	20 591	65,00	1 180,4	3,6		
Únor	0	2 901	17 937	65,00	3 522,0	10,7		
Březen	0	3 212	19 232	65,00	8 726,3	26,4		
Duben	1 701	1 884	0,00	170,00	9 334,5	28,3		
Květen	788	1 298	0,00	200,00	14 084,5	42,7		
Červen	0	234	0,00	160,00	20 507,7	62,2		
Červenec	0	0	0,00	160,00	26 932,6	81,6		
Srpen	0	0	0,00	160,00	32 083,3	97,2		
Září	0	0	0,00	140,00	33 116,3	100,4		
Říjen	0	0	0,00	95,00	22 602,1	68,5		
Listopad	2 308	1 012	0,00	120,00	11 177,6	33,9		
Prosinec	4 414	2 072	0,00	115,00	179,5	0,5		
Celkem	9 211	15 824	57 761	1 515	-	-		

Obrázek 31: Průběh teplot vody v AZ během roku



Obrázek 32: Graf zobrazující energetické hodnoty jednotlivých prvků systému



Z hodnotící tabulky 20 a z obrázků 31 a 32 je patrný teoreticky možný roční provoz systému dlouhodobé akumulace tepelné energie v modelovém bytovém domě. Během bilancování se vycházelo z předpokladu plného nabití akumulčních zásobníků na konci měsíce září. V průběhu října a listopadu je teplo naakumulované v AZ1 a AZ2 přímo využíváno pro otopnou soustavu a přípravu TV bez spouštění tepelného čerpadla a elektrické topné vložky v zásobníkovém ohříváči. Dle výpočtu zhruba v polovině listopadu (12.11.) dochází k poklesu teploty vody v AZ1 a AZ2 pod 55 °C. Od této chvíle je systém v provozu s TČ i elektrickým dohřevem teplé vody. Tento provozní stav trvá téměř do konce prosince, kdy dochází k poklesu teploty vody v AZ1 a AZ2 pod hodnotu 10 °C. Sezónní zásobníky jsou proto od systému otopné soustavy a přípravy TV odpojeny. Je také odstaveno TČ a do provozu je uveden elektrokotel. TV je ohřívána pouze elektrickou topnou vložkou v zásobníkovém ohříváči. Zásobníky AZ1 a AZ2 jsou nabíjeny solárními zisky kolektorového pole. Na konci března je v AZ1 a AZ2 dosaženo požadované teploty 30 °C. Dochází k odstavení elektrokotle, do provozu je opět uvedeno TČ a solární příprava teplé vody. V tomto provozním stavu je systém do konce května, respektive do konce topné sezóny. V červnu již není v provozu otopná soustava. Teplo z AZ1 a AZ2 je využíváno pouze pro přípravu TV. V polovině června teplota vody v AZ1 a AZ2 přesáhne 55 °C, dochází k vypnutí elektrické topné vložky v zásobníkovém ohříváči TV. Během letních měsíců je pro ohřev TV využito pouze solární energie. Nevyužité solární přebytky jsou akumulovány v sezónních zásobnících AZ1 a AZ2, k jejich opětovnému plnému nabití dochází na konci září, kdy je teplota vody cca 91 °C. Celkové roční solární pokrytí má v takovémto případě hodnotu 40,8 %.

Z výpočtové tabulky 20 je patrné, že systém navržený pro modelový bytový dům dosahuje nižších hodnot solárního pokrytí v porovnání s jinými systémy dlouhodobé akumulace tepelné energie také využívající tepelné čerpadlo. Například instalace ve Slatiňanech, která je uvedena v rešeršní části této práce, disponuje hodnotou reálného solárního pokrytí 65 %. Tato hodnota byla stanovena na základě dlouholetého měření provozních dat systému.

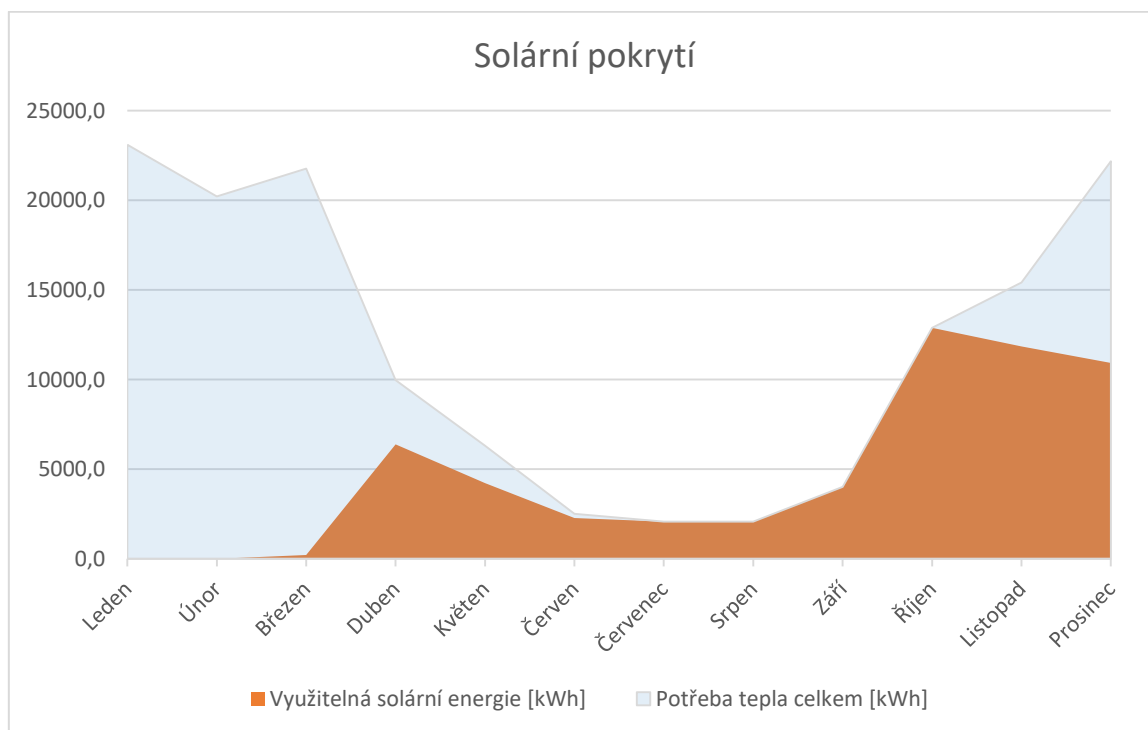
V případě této práce představuje zásadní omezení v navýšení solárního pokrytí celkový objem použitých akumulčních zásobníků, který je dán dispozičními rozměry sklepních prostor. Optimální objem zásobníků by měl být stanoven tak, aby tepelná kapacita

zásobníků korespondovala s potřebou tepla bytového domu během přechodného a zimního období. Respektive, aby k vybití akumulční nádrže došlo až ke konci topné sezóny a minimalizoval se tak počet dní, během kterých je v provozu elektrokotel. Těmito kroky by došlo k navýšení solárního pokrytí.

Na druhou stranu umístění zásobníků uvnitř budovy přináší výhodu v podobě možnosti využití části jejich tepelných ztrát. Tuto část lze během topné sezóny považovat za tepelné zisky pro modelovou budovu. Problémem je, že tepelné ztráty AZ1 a AZ2 dosahují nejvyšších hodnot na konci letního období, kdy je nelze efektivně využít. Nabízela by se zde možnost například instalace tepelného čerpadla vzduch – voda, kde by byl teplý vzduch ze sklepních prostor využit pro přípravu TV.

Hodnota solárního pokrytí ve své podstatě představuje množství energie získané ze slunečního záření, které lze u systému využít. V případě, že by nebyl použit solární systém dlouhodobé akumulace, muselo by být toto množství energie dodáno jiným zdrojem.

Obrázek 33: Graf zobrazující solární pokrytí



Na obrázku 33 je patrné využití solární energie dodané ze zásobníků během roku. Procentuální hodnotě solárního pokrytí 40,8 % odpovídá **58 208 kWh** solární tepelné energie dodané do systému vytápění a přípravy TV. Tato hodnota bude sloužit jako předpoklad pro ekonomickou úvahu.

8 Ekonomická úvaha

8.1 Odhad nákladů projektu

Pro potřeby ekonomické úvahy je potřeba stanovit náklady spojené s výstavbou a montáží systému dlouhodobé akumulace tepelné energie. Odhad výše těchto nákladů poskytuje tabulka 21.

Tabulka 21: Odhadované náklady projektu

Odhad nákladů projektu		
PS	Název provozního souboru a dílčí položky	Předpokládaná cena [tis. Kč]
Technologická část		
PS 01	Solární kolektory + náplň + exp. nádoba + střešní rámy	979
	Deskové výměníky tepla solár a TV (160 kW, 25 kW)	35
	6 x oběhové čerpadlo (0,2 - 0,4 kW)	90
	Akumulační zásobníky AZ1 a AZ2	750
	Tepelná izolace pro AZ1 a AZ2	230
	Tepelné čerpadlo (38 kW)	300
	Elektrokotel (45 kW)	29
	Zásobníkový ohřivač TV s el. topnou vložkou	65
	Potrubí + izolace	300
	Armatury a pohony	120
	Elektro a MaR	
PS 02	Kabelové trasy + montážní materiál	25
	Vytvoření řídicího programu + vizualizace	50
Montáž a stavba		
PS 03	Montážní práce na technologické části systému	350
	Montáž elektro	30
	Stavební úpravy sklepních prostor - práce	200
	Stavební materiál	250
Celkem za projekt		3 803

Celková suma 3 803 000 Kč zobrazuje hodnotu přímých výdajů fixní kapitálové investice. Je to také částka, kterou je nutné vynaložit k tomu, aby bylo možné zajistit roční solární

pokrytí tepelných potřeb modelového bytového domu o hodnotě 40,8 %. Životnost systému je s určitými servisními zásahy stanovena na 30 let. Za častější servisní zásahy lze považovat například výměnu oběhových čerpadel, těsnění, armatur a výměnu teplotnosné látky v okruhu solárních kolektorů.

8.2 Doba návratnosti investice

Vzhledem k v čase proměnlivým cenám energií nelze dobu návratnosti investice s jistotou určit. Proto bude v této práci využito obráceného přístupu. Bude předem stanovena doba návratnosti a poté dopočítána cena energie, která této době návratnosti odpovídá. Výpočet bude zjednodušen tím, že bude uvažována prostá doba návratnosti.

Uvažovaná metodika hodnocení je založena na výpočtu z energetické bilance. Tento výpočet udává množství 58 208 kWh tepelné energie získané ze solárního záření, které je možné díky instalaci systému sezónní akumulace ročně využít pro krytí tepelných potřeb bytového domu. K tomu, aby to bylo možné, je třeba vynaložit finanční investici 3 803 000 Kč.

V případě stanovení prosté doby návratnosti jako $\tau = 6$ let a fixních ročních provozních nákladů na údržbu systému $F_{ct} = 15\,000$ Kč, bude poté:

$$x = \frac{IN + \tau \cdot F_{ct}}{\tau \cdot Q_{sv}} = \frac{3\,803\,000 + 6 \cdot 15\,000}{6 \cdot 58\,208} = 11,1 \text{ Kč/kWh}$$

K navrácení předpokládané investice do solárního sezónního akumulátoru během 6 let, musí být měrná cena energie, kterou lze získat z jiného zdroje rovna $x = 11,1$ Kč/kWh.

K možnosti porovnání jsou tabulce 22 uvedeny ceny elektrické energie a zemního plynu stanovené pro rok 2016 pro koncového odběratele.

Tabulka 22: Ceny elektrické energie a zemního plynu

El. Energie	Vysoký tarif	2,514	Kč/kWh
	Nízký tarif	2,438	Kč/kWh
Zemní plyn		1,37	Kč/kWh

Poznámka: ceny jsou uvedeny dle hodnot z [35] a [36].

Z tabulky 22 je patrné, že aktuální ceny elektrické energie a zemního plynu jsou nižší než měrná cena energie potřebná k navrácení investice za 6 let. V takovémto případě se investice do systému dlouhodobé akumulace tepelné energie získané ze solárního záření nevyplatí.

8.3 SWOT analýza

Tabulka 23: SWOT analýza

Silné stránky			Slabé stránky		
	důležitost	hodnocení		důležitost	hodnocení
Využití obnovitelných zdrojů	0,3	4	Vysoké investiční náklady	0,4	4
Snížení závislosti objektu na vnějších energetických dodávkách	0,5	5	Prostorové omezení	0,2	3
V ČR relativně nová technologie	0,2	3	Nesoučasnost plně nabitých zásobníků a maximální potřeby tepla pro vytápění	0,3	4
			Zastavění sklepních prostor	0,1	1
Součet	4,3		Součet	3,5	
Příležitosti			Hrozby		
	důležitost	hodnocení		důležitost	hodnocení
Využití tepelných ztrát zásobníků	0,4	5	Nízké ceny ostatních paliv a energií	0,7	5
Přidružená parcela sloužící pro umístění zásobníku optimální velikosti a rozšíření kolektorového pole	0,2	4			
Získání finanční dotace	0,2	5			
Možnost použití pro novostavbu v nízkoenergetickém standardu s teplovodním podlahovým vytápěním	0,2	4	Chladný a nepříliš slunečný rok	0,3	4
Součet	4,6		Součet	4,7	

9 Závěr

Hlavním cílem práce bylo navrhnout systém dlouhodobé akumulace tepelné energie získané ze slunečního záření pro plnění tepelných potřeb modelového bytového domu.

První část práce se zabývá rešerší v současnosti využívaných systémů dlouhodobé akumulace tepelné energie ve formě citelného tepla. Jsou zde uvedeny čtyři základní možnosti sezónní akumulace tepelné energie společně s příklady již ve světě provozovaných systémů.

Druhá část práce je zaměřena na konkrétní návrh systému pro modelový bytový dům. Nejprve jsou určeny parametry bytového domu. Jedná se o revitalizovaný panelový dům nacházející se ve městě Kutná Hora. Tepelná ztráta domu stanovena obálkovou metodou má hodnotu $Q_z = 54$ kW. Následně byly určeny potřeby tepla na vytápění a přípravu teplé vody v budově. Jejich celkové roční hodnoty jsou $Q_{vyt} = 110,14$ MWh a $Q_{TV} = 32,4$ MWh.

Pro bytový dům byl navržen systém využívající dvou vodních tepelně zaizolovaných akumulačních zásobníků umístěných ve sklepních prostorech. Akumulační zásobníky jsou navzájem propojené a jejich celkový objem má hodnotu $V_{celk} = 355,8$ m³. Pole solárních kolektorů je nainstalováno v několika řadách na ploché střeše domu, celková plocha apertury solárních kolektorů je $A_K = 179,4$ m². Dalším důležitým prvkem systému je tepelné čerpadlo, které svou funkcí navyšuje hodnotu využitelné tepelné kapacity akumulačních zásobníků.

Dále byla provedena celková energetická bilance provozu systému v jednotlivých měsících. Bylo vypočítáno množství tepelné energie dodané během celého roku do akumulačních zásobníků ze solárního systému, $Q_{ss,u} = 74,8$ MWh. Poté na základě bilančních výpočtů určeno solární pokrytí tepelných potřeb budovy, které má hodnotu $f = 40,8$ %. Tato hodnota je v porovnání s podobnými provozovanými systémy nižší. Je to dáno zejména nedostatečným objemem akumulačních zásobníků.

V ekonomické části práce byly nejprve odhadnuty investiční náklady projektu. A poté zjednodušeným výpočtem stanovena měrná cena energie, při které by projekt měl dobu návratnosti $\tau = 6$ let. V tomto případě by měrná cena energie musela být 11,1 Kč/kWh.

Z uvedených hodnot vyplývá, že při cenách energií a paliv, které panují v roce 2016, by se investice do tohoto projektu s přímým financováním nevyplatila.

V tabulce 23 SWOT analýza jsou uvedené příležitosti projektu výstavby systému dlouhodobé akumulace tepelné energie v bytovém domě. V případě, že by k objektu byla přidružená parcela, na kterou by bylo možné umístit akumulční zásobník optimální velikosti, pravděpodobně by došlo k navýšení investičních nákladů projektu, nicméně by s jistotou došlo také k navýšení solárního pokrytí f.

Další příležitostí projektu může být získaná finanční dotace. O získání dotace k tomuto projektu by případně bylo možné usilovat například v rámci operačního programu životního prostředí nebo v rámci operačního programu podnikání a inovace pro konkurenceschopnost, pod který spadá program podpory nízkouhlíkové technologie. Tento program podpory v sobě zahrnuje tři složky, z nichž jednu tvoří právě akumulace energie.

10 Seznam použitých zdrojů

- [1] KALAISELVAM, S. a R. PARAMESHWARAN. *Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability: Systems Design, Assessment and Applications*. Oxford: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-417291-3.
- [2] MATUŠKA, Tomáš. *Solární soustavy pro bytové domy*. Praha: Grada Publishing, 2010. ISBN 978-80-247-3503-0.
- [3] MYERS, Philip E. *Aboveground storage tanks*. New York: McGraw-Hill, c1997. ISBN 007044272X.
- [4] JENSEN, Morten Vang. *Seasonal storage - water pit guidelines* [online]. 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://task45.iea-shc.org/fact-sheets>
- [5] MANGOLD, Dirk a Laure DESCHAIANTRE. *Report on state of the art and necessary further R+D* [online]. 2015 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://task45.iea-shc.org/fact-sheets>
- [6] SIBBIT, Bruce a Doug MCCLENAHAN. *Seasonal Borehole Thermal Energy Storage: Guidelines for design and construction* [online]. 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://task45.iea-shc.org/fact-sheets>
- [7] WIGSTRAND, L. *The ATES project: A sustainable solution for Stockholm-Arlanda airport* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://www.underground-energy.com/The_ATES_project___a_sustainable_solution_for_Stockholm-Arlanda_airport.pdf
- [8] MANGOLD, Dirk a Thomas SCHMIDT. *Seasonal Thermal Energy Storage in Germany* [online]. 2003 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Publikationen/publikationen_03-09.pdf
- [9] KNY, Martin a Miroslav URBAN. Analýza provozu sezónní akumulace v podmínkách České republiky. *Topenářství instalace*. 2012, **2012**(3), 46 - 51.
- [10] KNY, Martin a Miroslav URBAN. *Solar System with Long-term Heat Storage - Analysis and Optimalization* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/vyucujici/101/400.pdf>
- [11] URBAN, Miroslav a Martin KNY. *Solární systém s dlouhodobou akumulací tepla - Simulační analýza* [online]. In: 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/13975-solarni-system-s-dlouhodobou-akumulaci-tepla-simulacni-analyza>
- [12] KNY, Martin a Miroslav URBAN. *Vodní zásobníky pro dlouhodobou akumulaci tepla* [online]. In: 2014 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/akumulace-tepla/11358-vodni-zasobniky-pro-dlouhodobou-akumulaci-tepla>

- [13] MATUŠKA, Tomáš. *Alternativní zdroje energie* [online]. Praha, 2010 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: https://www.ib.cvut.cz/sites/default/files/Studijni_materialy/AZE/Matuska_Alternativni_zdroje_energie.pdf
- [14] *Seasonal Sensible Thermal Energy Storage Solutions* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: http://lejpt.academicdirect.org/A19/049_068.htm
- [15] *Vacuum Storage* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://vacuum-storage.com>
- [16] *Bine Information Service* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.bine.info/en/publications/publikation/mit-sommersonne-gegen-winterkaelte/>
- [17] *Kom - sol* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.kom-sol.cz/sol/index.php/komponenty-sol>
- [18] *Výjimečné domy* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.vyjimecnedomy.cz/velkoplosny-solarni-kolektor>
- [19] MATUŠKA, Tomáš. *Účinnost vakuových trubkových solárních kolektorů (I)* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4903-ucinnost-vakuovych-trubkovych-solarnich-kolektoru-i>
- [20] MATUŠKA, Tomáš. *Parametry solárních kolektorů* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/solarni-kolektory/155-parametry-solarnich-kolektoru>
- [21] *Ploché sluneční kolektory* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.jktradehk.cz/portfolio/solarni-systemy/ploche-slunecni-kolektory>
- [22] POJAR, Petr. *Znáte nejlepší instalace solárních systémů* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.ceskestavby.cz/clanky/znate-nejlepsi-instalace-solarnich-systemu-19308.html>
- [23] *Drain-back solární systémy pro ohřev TV* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/10784-drain-back-solarni-systemy-pro-ohrev-teple-vody-a-podporu-vytapeni-pracuji-i-v-zime>
- [24] *Fotovoltaika v podmínkách České republiky* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.elektrinazestrechy.cz/Slunecni-zareni-v-CR.aspx>
- [25] *Sčítání lidu, domů a bytů 2011* [online]. 2011 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <https://vdb.czso.cz/vdbvo2/faces/index.jsf?page=statistiky&katalog=30261#katalog=30628>
- [26] *On-line kalkulačka úspor a dotací Zelená úsporám: Zjednodušený výpočet tepla na vytápění a tepelných ztrát obálkou budovy* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/128-on-line-kalkulacka-uspor-a-dotaci-zelena-usporam>

- [27] TINTĚRA, Ladislav. *Denostupně - Teorie k výpočetní pomůcce* [online]. 2005 [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/2592-denostupne-teorie-k-vypocetni-pomucce>
- [28] *Výpočet denostupňů* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/103-vypocet-denostupnu?stanice=3>
- [29] *TNI 73 0302: Energetické hodnocení solárních tepelných soustav - zjednodušený výpočtový postup*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [30] *Projekční podklady a pomůcky - Tepelná bilance objektu* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://tzb.fsv.cvut.cz/?mod=podklady&id=1>
- [31] *Sluneční kolektor KPG1+* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.regulus.cz/cz/slunecni-kolektor-kpg1-plus>
- [32] *IVT Tepelná čerpadla* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.cerpadla-ivt.cz/cz/ivt-geo-g-nad-20-kw>
- [33] *Dakon* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.dakon.cz/produkty/daline-pte-22-60-kw/>
- [34] *Zásobníky teplé vody* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.regulus.cz/cz/zasobniky-teple-vody#filter=&start=30>
- [35] *Přehled cen elektrické energie: ceny platné od 1.1.2016* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/14-prehled-cen-elektricke-energie#d56>
- [36] *Přehled cen zemního plynu: Ceny platné od 1.1.2016* [online]. [cit. 2016-12-15]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energii/13-prehled-cen-zemniho-plynu>

11 Seznam použitých symbolů a zkratek

SYMBOL	JEDNOTKA	NÁZEV - POPIS
A	m ²	Plocha
a ₁	W.m ⁻² .K ⁻¹	Lineární součinitel tepelné ztráty solárního kolektoru
a ₂	W.m ⁻² .K ⁻²	Kvadratický součinitel tepelné ztráty solárního kolektoru
A _k	m ²	Plocha apertury solárního kolektoru
ATES	-	Aquifer thermal energy storage / akumulace tepla v propustném podloží
AZ1	-	Akumulační zásobník 1 (hlavní)
AZ2	-	Akumulační zásobník 2
b	m	Rozestup mezi řadami solárních kolektorů
BTES	-	Borehole thermal energy storage / Akumulace tepelné energie v soustavě podzemních vrtů
c _w	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Měrná tepelná kapacita vody
c _{wh}	Wh.kg ⁻¹ .K ⁻¹	Měrná tepelná kapacita vody
CZT	-	Centrální zásobování teplem
D°	D.K	Denostupně
E _{el, tot}	Wh	Celková spotřeba elektrické energie jednotlivými prvky systému
EPDM	-	Elastomer
EPS	-	Pěnový expandovaný polystyren
f	%	Solární pokrytí
F _{ct}	Kč	Fixní provozní náklady na údržbu systému
G	W.m ⁻²	Sluneční záření dopadlé na vzažnou plochu kolektoru
G _{T,m}	W.m ⁻²	Střední denní sluneční ozáření vzažné plochy kolektoru
h	°	Výška slunce
H _{T, den}	kWh.m ⁻² .den ⁻¹	Skutečná denní dávka slunečního ozáření
H _{T, den teor}	kWh.m ⁻² .den ⁻¹	Teoretická denní dávka slunečního ozáření
H _{T, den dif}	kWh.m ⁻² .den ⁻¹	Teoretická denní dávka difúzního ozáření
H _{T,měs}	kWh.m ⁻²	Skutečná měsíční dávka slunečního ozáření
HDPE	-	High density polyethylen / vysoko-hustotní polyethylen
i _{LV}	m ⁻² .s ⁻¹ .Pa ⁻ⁿ	Součinitel spárové průvzdušnosti
IN	Kč	Investiční náklady
L	m	Výška solárního kolektoru
LDPE	-	Low density polyethylen / nízko-hustotní polyethylen

p	-	Paušální hodnota srážky z tepelných zisků solárních kolektorů
$P_{T\check{C}}$	W	Výkon tepelného čerpadla
PIT	-	Rozměrná prohlubeň (jáma) v zemském povrchu
PE	-	Polyethylen
PP	-	Polypropylen
PIR	-	Materiál tvořen kombinací uretanových a isokyanurátových vazeb
PUR	-	Polyuretan
PZ	-	Pohotovostní zásobník
Q_{AZ}	Wh	Tepelná kapacita akumulčního zásobníku
Q_k	W	Tepelný výkon odvedený ze solárního kolektoru
Q_{konec}	Wh	Stav zásobníku na konci měsíce
$Q_{k, max}$	W	Maximální výkon solárního kolektoru
Q_p	W	Tepelná ztráta prostupem
$Q_{p, celk}$	Wh	Potřeba tepla celkem
Q_R	Wh	Rozdíl tepla dodaného a potřeby tepla
$Q_{R, nový}$	Wh	Rozdíl tepla dodaného a potřeby tepla po započtení tepelných ztrát
$Q_{SS,u}$	Wh	Využitelné tepelné zisky solární soustavy
Q_{sv}	Wh	Solární energie využita pro krytí tepelných potřeb
Q_{TV}	Wh	Potřeba tepla na ohřev teplé vody
$Q_{u,tot}$	Wh	Celkové množství tepla dodané do systému otopné soustavy a rozvodů TV
Q_v	W	Tepelná ztráta větráním a infiltrací
Q_{vyt}	Wh	Potřeba tepla na vytápění
Q_{zisk}	W	Tepelný zisk
Q_z	W	Tepelná ztráta
Q_{ZE}	Wh	Ztrátová energie
$Q_{ZE, too}$	Wh	Nevyužitá část ztrátové energie
STES	-	Seasonal thermal energy storage / dlouhodobá akumulace tepelné energie
t_1	°C	Teplota studené vody
t_2	°C	Teplota ohřáté vody
t_e	-	Teplota okolního vzduchu
t_{es}	°C	Průměrná teplota okolního vzduchu
t_{es1}	°C	Průměrná venkovní teplota během slunečního svitu
t_{em}	°C	Referenční teplota venkovního vzduchu pro zahájení a ukončení

		dodávky tepla
t_{is}	$^{\circ}\text{C}$	Průměrná teplota v interiéru
t_k	$^{\circ}\text{C}$	Teplota vody v zásobníku na konci měsíce
t_{km}	$^{\circ}\text{C}$	Průměrná teplota teplotonosné kapaliny v solárních kolektorech během roku
t_m	$^{\circ}\text{C}$	Teplota kapaliny v solárním kolektoru
t_p	$^{\circ}\text{C}$	Teplota vody v zásobníku na počátku měsíce
t_w	$^{\circ}\text{C}$	Teplota vody v zásobníku
TANK	-	Vodní zásobník, nádrž
TČ	-	Tepelné čerpadlo
TV	-	Teplá voda
U	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	Součinitel prostupu tepla
UTES	-	Underground thermal energy storage / Akumulace tepla pod zemský povrch
V_{AZ}	m^3	Objem akumulčního zásobníku
V_p	m^3	Denní spotřeba teplé vody v budově
x	Kč/kWh	Měrná cena energie
XPS	-	Extrudovaný polystyren
z	-	Koeficient tepelných ztrát
β	$^{\circ}$	Úhel sklonu solárního kolektoru
γ	$^{\circ}$	Azimutový úhel
Δt	K	Teplotní rozdíl
ε	-	Opravný součinitel
η_0	-	Optická účinnost solárního kolektoru
η_k	-	Účinnost solárního kolektoru
η_o	-	Účinnost obsluhy
η_r	-	Účinnost rozvodu vytápění
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Hustota
ρ_w	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Hustota vody v akumulčním zásobníku
τ	Rok	Prostá doba návratnosti
τ_r	-	Poměrná doba slunečního svitu

12 Seznam obrázků, tabulek a příloh

12.1 Seznam obrázků

OBRÁZEK	STRANA
Obrázek 1: ATES Systém	11
Obrázek 2: Využití ATES systému	13
Obrázek 3: Dispozice BTES zásobníku a příčný řez jedním vrtem	15
Obrázek 4: Řez vrchní částí BTES zásobníku	16
Obrázek 5: Schematické znázornění PIT zásobníku v příčném řezu	21
Obrázek 6: Závislost parotěsnosti krycí vrstvy z HDPE na teplotě	22
Obrázek 7: Systém kotvení flexibilní plovoucí krycí vrstvy	23
Obrázek 8: Zatěžovací trubky krycí plovoucí vrstvy	24
Obrázek 9: Potrubí vstupující skrz dno do nádrže	25
Obrázek 10: Potrubí vstupující skrz stěny do nádrže	26
Obrázek 11: Akumulační zásobník ve Friedrichschafenu	27
Obrázek 12: Akumulační zásobník v Hannoveru	28
Obrázek 13: Akumulační zásobník v Mnichově	29
Obrázek 14: Vnitřek zásobníku před napuštěním	29
Obrázek 15: Akumulační zásobník ve Slatiňanech	30
Obrázek 16: Průběh teplot v akumulátoru ve Slatiňanech	30
Obrázek 17: Řez plochým solárním kolektorem	34
Obrázek 18: Velkoplošný kolektor	34
Obrázek 19: Řez trubkovým vakuovým kolektorem	35
Obrázek 20: Rozdělení trubkových kolektorů	36
Obrázek 21: Závislost η_k kolektoru na rozdílu teplot při různém slunečním ozáření	37
Obrázek 22: Křivky účinnosti různých konstrukcí solárních kolektorů	38
Obrázek 23: Křivka tepelného výkonu solárního kolektoru	39
Obrázek 24: Způsob zapojení solárních kolektorů	40
Obrázek 25: Vliv sklonu a orientace plochy kolektoru na denní dávku slunečního ozáření	41
Obrázek 26: Typy nosných konstrukcí solárních kolektorů	43
Obrázek 27: Určení vhodného odstupů mezi řadami kolektorů	43
Obrázek 28: Zásobník TV s topnou vložkou a pohotovostní zásobník	45
Obrázek 29: Roční dávka slunečního záření v ČR (kWh/m ²)	47

Obrázek 30: Příčný řez akumulčním zásobníkem	59
Obrázek 31: Průběh teplot v AZ během roku	72
Obrázek 32: Graf zobrazující energetické hodnoty jednotlivých prvků systému	72
Obrázek 33: Graf zobrazující solární pokrytí	74

12.2 Seznam tabulek

TABULKA	STRANA
Tabulka 1: Charakteristické hodnoty BTES	16
Tabulka 2: Parametry uvedených systémů s TANK zásobníkem	32
Tabulka 3: Parametry uvedených systémů s PIT zásobníkem	32
Tabulka 4: Bytové domy v ČR	48
Tabulka 5: Charakteristika modelové budovy	49
Tabulka 6: Tepelná ztráta modelové budovy	50
Tabulka 7: Denostupně	51
Tabulka 8: Potřeba tepla na vytápění modelové budovy	52
Tabulka 9: Hodnoty potřebné ke stanovení denní potřeby tepla pro ohřev TV	53
Tabulka 10: Měsíční potřeba tepla pro přípravu TV v modelové budově	53
Tabulka 11: Charakteristika KPG1+	56
Tabulka 12: Geometrické parametry AZ	57
Tabulka 13: Součinitelé prostupu tepla konstrukcí AZ	60
Tabulka 14: Hodnoty τ_r , $H_{T,den, teor}$, $H_{T,den, dif}$ v jednotlivých měsících	63
Tabulka 15: Výsledné hodnoty $H_{T,den}$ a $H_{T, měs}$	63
Tabulka 16: Hodnoty parametrů $G_{T,m}$ a t_{es1}	64
Tabulka 17: Výsledné hodnoty η_k	65
Tabulka 18: Výsledné měsíční $Q_{ss,u}$	66
Tabulka 19: Hodnoty parametru U a A	66
Tabulka 20: Výsledné hodnoty energetické bilance systému	71
Tabulka 21: Odhadované náklady projektu	75
Tabulka 22: Ceny elektrické energie a zemního plynu	76
Tabulka 23: SWOT analýza	77

12.3 Seznam příloh

- | | |
|---------------------|---|
| Příloha č. 1 | Provozní schéma systému (č. výkresu STES – 16 – 01) |
| Příloha č. 2 | Dispozice sklepních prostor (č. výkresu STES – 16 – 02) |
| Příloha č. 3 | Technický list tepelného čerpadla IVT GEO G |
| Příloha č. 4 | Technický list solárního kolektoru Regulus KPG1+ |
| Příloha č. 5 | Výpis z výpočtu tepelné ztráty budovy |