



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKY SOBĚSTAČNÝ DŮM

ENERGY SELF-SUFFICIENT HOUSE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Prudký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Filip Toman, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Roman Prudký**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Filip Toman, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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

Energeticky soběstačný dům

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V dnešní době více než 2 000 objektů v ČR využívá bateriová úložiště, která slouží pro uchování elektrické energie získané z fotovoltaiky. Díky programům Ministerstva životního prostředí, vývoji technologií, rostoucímu důrazu na ekologii a postupnému snižování cen bateriových úložišť poptávka po domácích systémech ukládání energie v Česku neustále roste. Cílem práce bude zpracovat přehled o možnostech výroby a skladování energie v rodinných domech.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracovat přehled o možnostech výroby a skladování energie v rodinných domech.
- 2) Zpracovat studii o energetickém potenciálu systémů snižující závislost na primárních zdrojích energie pro konkrétní rodinný dům.
- 3) Zpracovat ekonomické zhodnocení a studii návratnosti jednotlivých systému.

Seznam doporučené literatury:

HLAVSA, Tomáš. Tvorba konceptu energeticky soběstačných obytných budov. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta architektury, 2017.

POPARA, Nikola. Moderní technologie pro soběstačné domy. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zaměřuje na možnosti výroby a skladování energie v rodinných domech a návrh opatření snižující energetickou závislost na primárních zdrojích reálného objektu. Na začátku je čtenář seznámen s teorií soběstačných domů a přehledem výroby elektrické a tepelné energie. Praktická část se zaměřuje na výpočet tepelných ztrát a návrh komplexního zateplení objektu, doplněný o další systémy, jako jsou rekuperace, fotovoltaická elektrárna a tepelné čerpadlo. Součástí práce je také ekonomické vyhodnocení jednotlivých opatření včetně stanovení návratnosti investic.

Klíčová slova

Energeticky soběstačný dům, obnovitelné zdroje, neobnovitelné zdroje, tepelné ztráty, rekuperace, fotovoltaika, tepelná čerpadla.

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the possibilities of energy production and storage in family houses and the design of measures aimed at reducing the dependency of a real residential building on primary energy sources. The initial chapters introduce the concept of energy-sufficient houses and provide an overview of electricity and heat production. The practical part is devoted to the calculation of heat losses and the proposal of a comprehensive insulation system, complemented by additional technologies such as heat recovery ventilation, a photovoltaic power system, and a heat pump. The thesis also includes an economic evaluation of the proposed measures, including the assessment of their investment payback periods.

Key words

Energy self-sufficient house, renewable energy sources, non-renewable energy sources, heat losses, heat recovery ventilation, photovoltaics, heat pumps.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PRUDKÝ, Roman. *Energeticky soběstačný dům*. Online, bakalářská práce. Filip TOMAN (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165214>.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Energeticky soběstačný dům** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Roman Prudký

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Filipu Tomanovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	10
1 Energeticky soběstačný dům	11
1.1 Jak se přiblížit energetické soběstačnosti?	12
1.2 Tepelná čerpadla.....	13
1.3 Rekuperace	14
1.4 Dotace.....	15
2 Zdroje elektrické a tepelné energie.....	16
2.1 Zdroje elektrické energie	16
2.1.1 Neobnovitelné zdroje elektrické energie	16
2.1.2 Obnovitelné zdroje elektrické energie.....	17
2.1.3 Domácí výroba elektrické energie.....	17
2.2 Zdroje tepelné energie	19
2.2.1 Obnovitelné a neobnovitelné zdroje tepelné energie.....	20
3 Praktická část.....	21
3.1 Popis objektu	21
3.2 Výpočet tepelných ztrát objektu	22
3.3 Rekuperace	31
3.4 Fotovoltaika	33
3.5 Tepelné čerpadlo.....	37
ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	48

ÚVOD

V současné době je kladen stále větší důraz na snižování energetické náročnosti budov a hledání alternativních řešení ke klasickému napojení na veřejné energetické sítě. Energetická soběstačnost představuje cestu, jak zvýšit nezávislost domácností na primárních zdrojích energie a zároveň přispět ke snižování environmentální zátěže. Cílem této bakalářské práce je zpracovat přehled možností výroby a skladování energie v podmínkách rodinných domů a navrhnout systémová opatření vedoucí ke snížení energetické závislosti konkrétního objektu. Součástí je i ekonomické zhodnocení navržených řešení a analýza jejich návratnosti.

V teoretické části je nejprve popsán koncept energeticky soběstačných domů a principy, jak se této soběstačnosti přiblížit. Dále jsou představeny tepelná čerpadla a rekuperační jednotky, zejména jejich historie či rozdělení. Pozornost je také věnována dostupným dotačním programům. V další kapitole je popsána výroba elektrické a tepelné energie, a to jak z obnovitelných, tak z neobnovitelných zdrojů, včetně možností domácí produkce elektřiny.

Praktická část se zaměřuje na návrh opatření pro konkrétní rodinný dům, který je pro účely výpočtu uvažován ve zjednodušené variantě jako zcela nezateplený objekt se značnými tepelnými ztrátami. Na základě výpočtů je následně provedeno porovnání tepelných ztrát před a po realizaci navržených opatření, včetně ekonomického vyhodnocení a odhadu návratnosti investice. Navazující část se věnuje dalším technickým řešením vedoucím ke snížení energetické náročnosti, konkrétně návrhu rekuperační jednotky, fotovoltaického systému a tepelného čerpadla. Nedílnou součástí práce je i posouzení jejich přínosu jak z ekonomického, tak technického hlediska.

1 Energeticky soběstačný dům

Energeticky soběstačné domy představují revoluční přístup k udržitelnému bydlení tím, že veškeré energetické potřeby pokrývají z obnovitelných zdrojů v rámci daného objektu. Bajpai a Sulaiman [1] popsali technická řešení, která kladou důraz na tradiční pasivní architektonické prvky v kombinaci s obnovitelnými energetickými systémy, čímž vytvořili základ pro moderní udržitelné stavby. V dnešní době se většina zařízení obrací na technologii využívající fotovoltaiku. Gstöhl a Pfenninger [2] zkoumali možnosti energeticky soběstačných domácností, které jsou plně napájeny fotovoltaickými systémy a elektrickými vozidly v mírných klimatických podmínkách. Ve své studii zdůraznili klíčový význam snižování spotřeby elektřiny a využívání efektivních řešení pro ukládání energie, jako jsou lithiové baterie a vodíkové systémy, pro dosažení energetické autonomie. Výzkum [3] doplňuje výsledky monitoringu z energeticky soběstačných domů v Německu, které ukázaly, že navzdory výzvám spojených s nízkou intenzitou slunečního záření tyto návrhy dosáhly významné soběstačnosti díky integraci solární a tepelné energie.

Stavba prvního energeticky soběstačného domu poblíž Vyššího Brodu v Jižních Čechách byla dle Saint-Gobain [4] dokončena v roce 2020, a to po téměř čtyřech letech příprav. energii si vyrábí pomocí fotovoltaické elektrárny s výkonem 10 kWp doplněné lithium-fosfátovým bateriovým uložištěm o kapacitě 20 kWh. Součástí koncepce soběstačnosti je rovněž efektivní nakládání s vodními zdroji. Dům zachytává dešťovou vodu do nádrže o objemu 16 m³ a následně ji filtruje. Umožňuje tak její opětovné využití pro splachování, praní či sprchování, čímž výrazně snižuje spotřebu pitné vody. Stavba využívá moderní izolační materiály, které zajišťují vysokou energetickou efektivitu domu. Použity jsou například cihly plněné izolační vatou či dřevo-hliníková okna s trojskly. V zimním období je hlavním zdrojem tepla peletový kotel s výkonem 8 kW. Tento kotel je vybaven Stirlingovým motorem, který kromě produkce tepla dokáže přeměnit část energie na elektřinu, čímž zvyšuje celkovou účinnost systému.

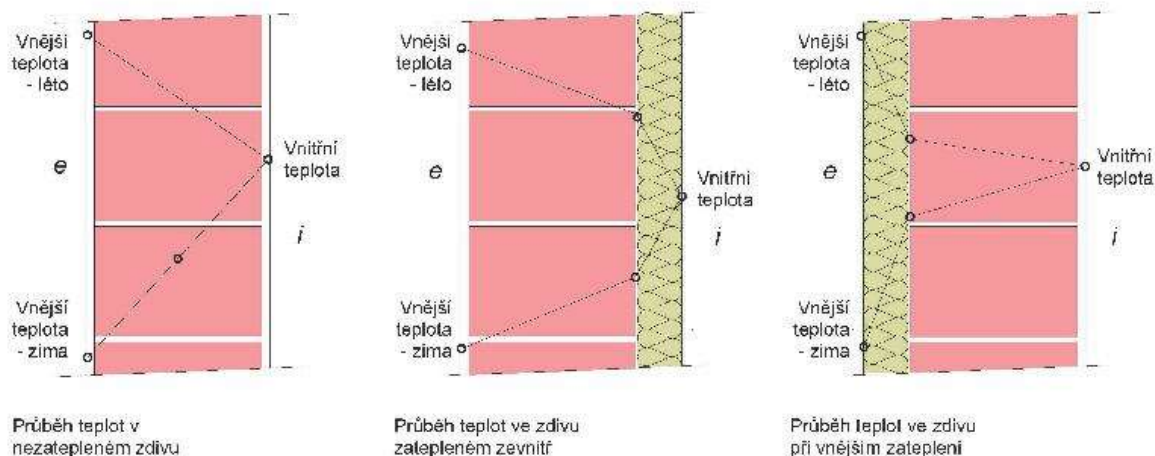


Obr. 1 – První energeticky soběstačný dům v ČR [5].

1.1 Jak se přiblížit energetické soběstačnosti?

Dosáhnout úplné energetické soběstačnosti nemusí být z ekonomického hlediska výhodné, zvláště na místech, kde jsou přírodní zdroje omezené nebo počáteční investice příliš vysoká. V některých případech může být výhodnější kombinovat částečnou energetickou soběstačnost s připojením na externí energetické sítě. Tento přístup dokáže výrazně snížit závislost na dodavateli energie, a přitom zajistit dostatečný komfort a nižší počáteční náklady.

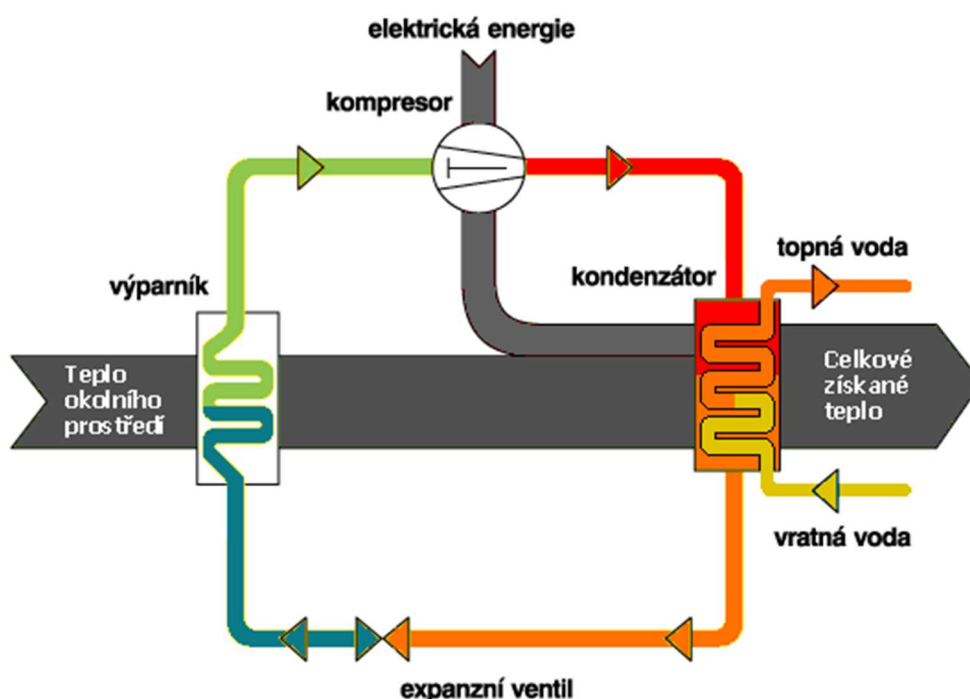
Prvním krokem k dosažení energetické soběstačnosti je minimalizace energetických ztrát. Podle [6], představují úniky tepla v domácnostech významný problém, zejména u starších staveb, které často postrádají moderní izolační materiály a technologie. Jednou z hlavních příčin tepelných ztrát jsou okna a dveře, u nichž dochází k úniku tepla vlivem špatného těsnění, jednoduchých skel nebo zastaralých rámců. Tento problém lze výrazně zmírnit instalací moderních dvojitých či trojitých oken s nízkoemisními povrchy a použitím kvalitních těsnících materiálů. Rovněž moderní dveře s izolačním jádrem přispívají ke snížení tepelných ztrát. Další kritickou oblastí je střecha a půda, kde kvůli špatné izolaci může unikat až 30 % veškerého tepla, neboť teplo přirozeně stoupá vzhůru. Efektivní opatření zahrnují zateplení půdních prostor a použití materiálů, jako je minerální vlna nebo stříkaná pěna, které minimalizují tento typ ztrát. Podobně podlahy a sklepy mohou být významným zdrojem úniků, především pokud se nacházejí nad nevytápěnými prostory nebo přímo nad zemí. Zateplení těchto částí budovy a instalace podkladové izolace v těchto místech výrazně přispívají ke snížení energetických ztrát. Dalším faktorem ovlivňujícím tepelné ztráty jsou stěny, které u starších staveb často postrádají dostatečnou izolaci. Modernizace pomocí vnitřního nebo vnějšího zateplení, například polystyrenem či minerální vlnou, dokáže zlepšit jejich tepelně izolační vlastnosti a tím minimalizovat tepelné ztráty. Vzduchovody a ventilační systémy také představují významný zdroj tepelných ztrát, přičemž špatné těsnění a neizolované rozvody vedou k únikům během distribuce teplého vzduchu. Účinným řešením je izolace vzduchovodů a těsnění spár. Rovněž otevřené komíny a nepoužívané krby mohou odvádět teplo, což lze řešit instalací komínových uzávěrů nebo zábran. Implementací těchto opatření lze dosáhnout nejen snížení tepelných ztrát, ale také zvýšení energetické účinnosti budov a zlepšení komfortu jejich užívání.



Obr. 2 – Průběh teplot konstrukcí [7].

1.2 Tepelná čerpadla

O první myšlence sestrojení tepelného čerpadla píše na svém blogu Elke Stangl [8], kde tvrdí, že původce této myšlenky byl Peter von Rittinger (1811-1872), rakouský inženýr a průkopník v oblasti hornictví a zpracování nerostů. Zkonstruování prvního tepelného čerpadla bylo realizováno v letech 1855-1857 za účelem efektivního odpařování solanky při výrobě soli, díky které se snížila spotřeba paliva potřebného k odpařování vody, a to až o 80 %, což mělo ekonomický i ekologický dopad. Systém představoval významný posun vpřed v technologii tepelného čerpadla a oblasti energeticky efektivních systémů vytápění a chlazení. Využíval kompresi vodní páry k zvýšení jejího tlaku a teploty. Pára pak kondenzovala na povrchu nádoby obsahující solanku, předávala jí teplo a tím podporovala odpařování vody ze solanky. První praktické využití tepelného čerpadla pro vytápění bylo zaznamenáno v roce 1927, kdy inženýr T. Haldane navrhl systém, pomocí kterého vytápěl úřední budovu v Los Angeles [9]. Dalším případem byla instalace tepelného čerpadla v roce 1938 do budovy radnice v Curychu, za jehož návrhem stál významný inženýr Aurel Stodola [10].



Obr. 3 – Schéma tepelného čerpadla [11].

Tepelná čerpadla se stala klíčovými a univerzálními technologiemi pro moderní aplikace vytápění a chlazení v obytných, komerčních, průmyslových a dopravních sektorech [12]. Tyto zařízení využívají termodynamické principy k přenosu tepla z jednoho místa na druhé, čímž nabízejí efektivní a ekologická řešení pro regulaci teploty a vytápění prostor [13].

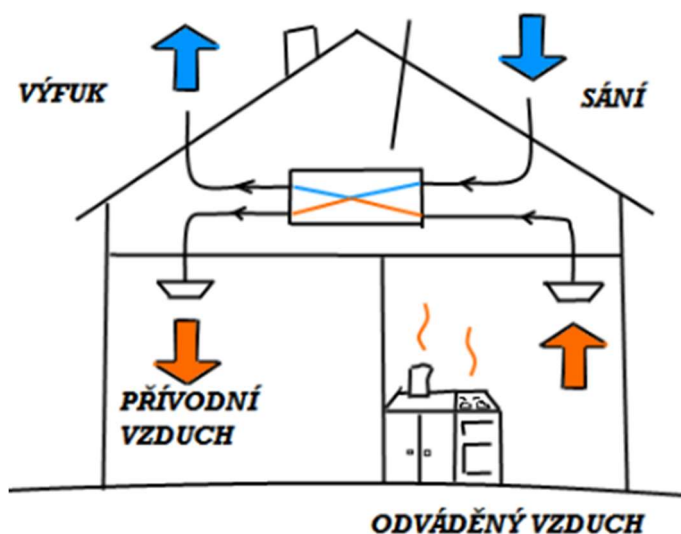
Autor webu [14] dělí hlavní typy tepelných čerpadel na následující:

- **Vzduch-vzduch (air-to-air):** Tento typ tepelného čerpadla patří mezi nejrozšířenější, protože funguje na principu přenosu tepla mezi vnitřním a venkovním vzduchem. Díky moderním technologiím dokážou tato zařízení snížit spotřebu elektřiny na vytápění až o 75 % oproti klasickým elektrickým topidlům. Kromě toho jsou také efektivnější při odvlhčování vzduchu ve srovnání s běžnými klimatizacemi, což přispívá k většímu pohodlí během horkých letních dnů.

- **Země-voda (ground-source nebo geotermální):** Tento druh tepelného čerpadla čerpá teplo ze země, která si udržuje stabilní teplotu po celý rok. Obecně jsou tato čerpadla účinnější než vzduchová, ale jejich instalace bývá složitější a finančně náročnější.
- **Absorpční (plynová) tepelná čerpadla:** Narozdíl od běžných tepelných čerpadel, absorpční tepelná čerpadla nevyužívají elektřinu, ale jako zdroj energie používají teplo nebo tepelnou energii, často z plynu. Tento typ je vhodný především pro větší domácnosti nebo speciální aplikace, kde je k dispozici dostatečný zdroj tepla.

1.3 Rekuperace

Dle článku [15], je rekuperace proces zpětného získávání energie, nejčastěji ve formě tepla, z odpadního vzduchu odváděného z budovy ven. Tato energie se využívá k přehřátí nebo ochlazení čerstvého vzduchu přiváděného do interiéru. Díky tomu se nejen šetří energie potřebná na vytápění nebo chlazení, ale také je zajištěn neustálý přísun zdravého a čistého vzduchu do místností. Dále web [16] tvrdí, že rekuperační výměníky tepla se obvykle instalují přímo do větracích jednotek a lze je využít téměř ve všech typech budov. Jsou efektivní jak v novostavbách, tak ve starších domech, kde mohou nahradit běžné větrání. Tento systém se uplatňuje nejen v rodinných domech, ale také v průmyslových objektech, kancelářích, úřadech, bankách nebo bazénech. Navíc systém rekuperace umožňuje výměnu pouze tepla, aniž by přenášel částice obsažené ve vzduchu, což přispívá k lepšímu vnitřnímu prostředí a k energetické úspornosti.



Obr. 4 – Schéma domu s rekuperační jednotkou [17].

Článek [18] tvrdí, že existují dva základní typy rekuperačních systémů – centrální a decentrální. Centrální rekuperace je navržena pro celoplošné větrání objektu. Rekuperační jednotka se obvykle instaluje v technické místnosti a je propojena s jednotlivými místnostmi prostřednictvím rozvodů vzduchotechniky. Tento typ systému je vhodný zejména pro novostavby nebo rozsáhlé rekonstrukce, kde lze plánovat rozmístění potrubí již ve stavební fázi. Výhodou centrální rekuperace je rovnoměrné rozložení přiváděného vzduchu a vysoká účinnost zpětného získávání tepla, což umožňuje výrazné snížení nákladů na vytápění. Na druhé straně se jedná o finančně náročnější variantu, která vyžaduje větší prostor pro instalaci systému a složitější montážní proces. Cena včetně instalace se pohybuje mezi 100 000-200 000 Kč [19; 20]. Web [18] dále tvrdí, že decentrální rekuperace funguje na principu individuálních jednotek umístěných přímo ve stěnách jednotlivých místností. Tento typ systému nevyžaduje

složité potrubní rozvody, což umožňuje jeho instalaci i v již hotových nebo starších objektech, kde by centrální systém byl stavebně obtížně realizovatelný. Decentrální rekuperaci lze postupně rozšiřovat podle potřeb jednotlivých místností a její údržba je jednodušší. Nevýhodou může být nižší celková účinnost systému, zejména při snaze o větrání celého objektu, a nutnost instalace více jednotek pro pokrytí všech obytných prostor. Ceny se začínají na 5 000 Kč za základní modely, za pokročilejší modely ceny rostou na 10 000-15 000 Kč [21; 22].

1.4 Dotace

Výstavba nového nebo rekonstrukce stávajícího domu tak, aby se stal energeticky soběstačným, vyžaduje vyšší počáteční investici. Tento kapitál je potřeba na instalaci moderních technologií, jako jsou solární panely, tepelná čerpadla, bateriové systémy nebo rekuperační jednotky. Energeticky soběstačný dům však přináší řadu dlouhodobých výhod – díky vlastní výrobě energie snižuje nebo zcela eliminuje závislost na energetické síti, která je z velké části napájena zdroji negativně ovlivňujícími životní prostředí, jako je spalování uhlí či zemního plynu [23].

Podle [24] takové domy také výrazně přispívají ke snížení emisí skleníkových plynů a naplňují cíle udržitelného rozvoje. Navíc posilují energetickou bezpečnost státu tím, že snižují jeho závislost na dovozu fosilních paliv, což má význam zejména v době energetických krizí. Dlouhodobě mohou energeticky soběstačné domy také přinášet finanční úspory, neboť domácnosti nejsou vystaveny výkyvům cen energií na trhu. Díky dotačním programům lze významně snížit náklady na realizaci těchto projektů, což zvyšuje dostupnost energetické soběstačnosti i pro běžné domácnosti.

2 Zdroje elektrické a tepelné energie

2.1 Zdroje elektrické energie

Elektrická energie je nedílnou součástí každodenního života skoro pro celý svět. Podle [25] došlo v Česku k výrazným energetickým úsporám, kdy čistá spotřeba elektřiny klesla na 57,8 TWh, což je nejnižší hodnota za posledních 14 let a meziroční pokles o více než 4 %. Valná většina této energie byla vyrobena pomocí neobnovitelných zdrojů energie, zbytek pak pomocí zdrojů obnovitelných.

2.1.1 Neobnovitelné zdroje elektrické energie

Výroba elektrické energie z neobnovitelných zdrojů spočívá ve využívání surovin, které se v přírodě obnovují jen velmi pomalu, nebo vůbec. Jejich zásoby jsou tedy omezené [26]. Autor Pixman s.r.o [27] říká, že energie vyrobena z neobnovitelných zdrojů tvoří v České republice až 87 % celkově vyrobené elektrické energie. Patří mezi ně následující metody.

- Nejvýznamnějším zdrojem pro Českou republiku je uhlí. Hnědé uhlí se využívá například v elektrárnách Prunéřov a Tušimice, zatímco černé uhlí je klíčové pro elektrárnu v Dětmarovicích. V roce 2022 bylo uhlí zdrojem přibližně 44 % vyrobené elektřiny. Přestože je spalování uhlí hlavním zdrojem energie, je zároveň největším přispěvatelem k emisím CO₂. Z tohoto důvodu se snažíme jeho podíl v energetice postupně snižovat.
- Jaderná energie je dalším zásadním neobnovitelným zdrojem energie v Česku. Hraje klíčovou roli v elektrárnách Dukovany a Temelín. V roce 2022 tvořila jaderná energie asi 37 % veškeré vyrobené elektřiny. Jádro je považováno za nízkoemisní zdroj energie z hlediska produkce CO₂, což vede některé státy Evropské unie k úsilí o jeho zařazení mezi obnovitelné zdroje. Na druhou stranu je ale nutné řešit otázky spojené s nakládáním s jaderným odpadem a zajištěním vysoké úrovně bezpečnosti.
- Dalším neobnovitelným zdrojem energie v České republice je zemní plyn, který má v českém energetickém mixu stále důležité místo, a to i přesto, že ho musíme dovážet. Využívá se jak v topení, tak ve výrobě elektřiny, například v paroplynové elektrárně v Počeradech. V roce 2022 tvořil zemní plyn přibližně 6 % z celkové výroby elektřiny. I když má oproti uhlí nižší emise CO₂, usilujeme o snížení závislosti na tomto zdroji.



Obr. 5 – Elektrárna Prunéřov [28].

2.1.2 Obnovitelné zdroje elektrické energie

Web [27] také poukazuje na to, že podíl obnovitelných zdrojů v České republice stále roste. Mezi nejpoužívanější v České republice řadíme následující.

- Biomasa a bioplyn tvoří významnou část českého energetického mixu, přičemž zajišťují téměř polovinu energie z obnovitelných zdrojů. Biomasa se uplatňuje především v teplárnách a elektrárnách, jako jsou Hodonín nebo Poříčí II, kde se spaluje například dřevní štěpka.
- Bioplynové stanice, jako třeba v Rapotíně, zpracovávají biologický odpad a přispívají jak k výrobě elektřiny, tak i tepla.
- Sluneční energie zažila v Česku výrazný rozmach kolem roku 2010 a počet fotovoltaických elektráren se neustále zvyšuje. Jednou z největších fotovoltaických elektráren u nás je například elektrárna Brno-Tuřany. Přestože podíl sluneční energie na celkové výrobě elektřiny zatím činí jen asi 3 %, díky modernizačním fondům lze očekávat další nárůst instalovaného výkonu.
- Podíl vodní energie na výrobě elektřiny činí přibližně 4 %, a to prostřednictvím velkých vodních elektráren, jako jsou Orlik nebo Lipno. Možnosti rozvoje velkých vodních elektráren v ČR jsou sice omezené, avšak malé vodní elektrárny hrají důležitou roli v decentralizované výrobě energie.
- Větrná energie se v České republice využívá zejména v Ústeckém a Karlovarském kraji. I když podíl větrných elektráren na celkové výrobě elektřiny nepřesahuje 1 %, příkladem úspěšného projektu je větrný park Nová Ves, který dokazuje potenciál tohoto obnovitelného zdroje energie.



Obr. 6 – Vodní elektrárna Orlik [29].

2.1.3 Domácí výroba elektrické energie

V dnešní době se stále více lidí zajímá o možnosti, jak si doma vyrobit vlastní elektřinu. Nejenže to může snížit účty za energii, ale také to přispívá k ochraně životního prostředí. Technologie jako solární panely nebo malé větrné turbíny jsou čím dál dostupnější, což umožňuje domácnostem stát se částečně nezávislými na velkých energetických společnostech. Navíc mít vlastní zdroj energie může být užitečné v případě výpadků proudu nebo v odlehlých oblastech, kde není snadný přístup k elektrické síti.

Podle [25], jsou solární elektrárny nejrozšířenějším výrobníkem elektrické energie v rodinných domech. Domácí solární elektrárny, také známé jako fotovoltaické systémy, fungují na principu přeměny fotonů (světla) na elektrinu pomocí fotoelektrického jevu. Panely se většinou montují na střechy domů, ale mohou být umístěny i na zahradní domky, pergoly nebo garáže. Pro dobrou funkčnost a vysokou účinnost je důležité, aby byly natočené na jih, měli sklon asi 30 stupňů a nebyly stíněné stromy nebo budovami v okolí [30].



Obr. 7 – Orientační plánec domácí solární elektrárny [31].

Další efektivní volba pro domácí výrobu elektrické energie jsou malé větrné elektrárny. Autor článku [32] tvrdí, že malé větrné elektrárny lze instalovat například na zahradě, což umožňuje využít větrnou energii k úspoře nákladů za elektrinu. Pokud objekt stojí na otevřeném a větrném místě, může být tato možnost obzvláště výhodná. Moderní turbíny s výškou do 10 metrů jsou navrženy tak, aby minimalizovaly hluk. Na rozdíl od solárních panelů mohou větrné elektrárny vyrábět elektřinu i v noci a během celého roku, což zvyšuje jejich potenciál v našich podmínkách. Nicméně je vhodné je považovat spíše za doplňkový zdroj energie pro snížení nákladů, přičemž návratnost investice se obvykle pohybuje kolem 15 let.



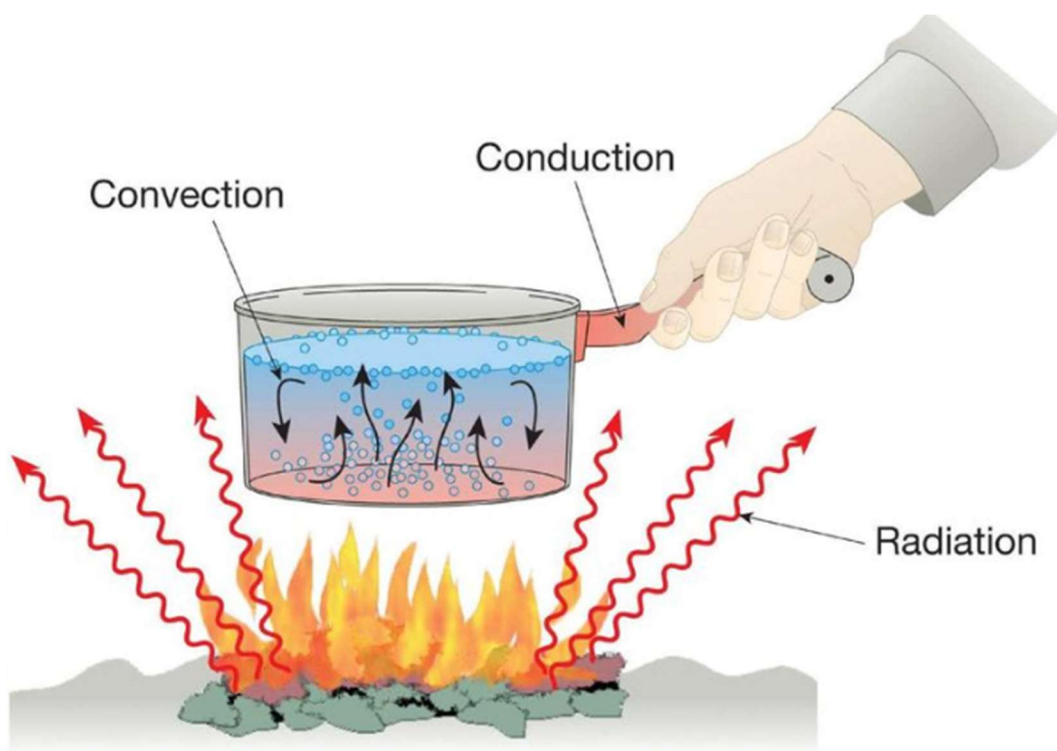
Obr. 8 – Domácí větrná elektrárna [33].

Podle [32] a [34] se na další místo řadí vodní elektrárna, která energii proudící vody přeměňuje na elektřinu. Základními komponenty jsou vodní turbína a generátor. Voda z vodního toku je přiváděna k turbíně, která přeměňuje její kinetickou a potenciální energii na mechanickou energii rotace. Tato rotace následně pohání generátor, jenž ji transformuje na elektrickou energii. Omezující podmínkou je existence vodního toku se stabilním průtokem. Návratnost se může dostavit už po 2,5 letech.

2.2 Zdroje tepelné energie

Web [35] tvrdí, že tepelná energie představuje formu energie, kterou si tělesa vzájemně předávají při teplotním rozdílu. Může se šířit třemi způsoby – vedením, prouděním nebo sáláním. Každý ohřátý objekt vyzařuje tepelné záření a během ohřevu dochází ke zvýšení jeho vnitřní energie. Tepelnou energii lze získat například spalováním fosilních paliv v teplárnách, nebo jako vedlejší produkt při výrobě elektrické energie – tzv. odpadní teplo. V obou případech ji lze dále efektivně využít například pro vytápění obytných budov. Pro přenos tepelné energie ze zdroje do domácností se v teplovodních systémech nejčastěji používá horká voda nebo vodní pára, která slouží jako teplotné médium.

Vytápění lze realizovat dvěma základními způsoby – centrálně (dálkově), kdy je teplo vyráběno mimo objekt a následně distribuováno do domácností, nebo decentrálně (lokálně), kdy se teplo produkuje přímo v místě spotřeby, tedy uvnitř samotného objektu. Dle článku [36] je v České republice na systémy dálkového vytápění napojeno přibližně 1,7 milionu domácností, což představuje zhruba 4 miliony obyvatel. Více než polovina palivové základny těchto soustav je dosud tvořena uhlím, jehož podíl sice postupně klesá, avšak nahrazování probíhá převážně zemním plynem – dalším fosilním zdrojem – namísto využití obnovitelných energií. U lokálního vytápění se teplo zajišťuje pomocí topidel umístěných přímo v jednotlivých místnostech. Mezi běžně využívané zdroje tepla patří například plynová topidla nebo elektrické konvektory.



Obr. 9 – Způsoby šíření tepla [37].

2.2.1 Obnovitelné a neobnovitelné zdroje tepelné energie

Mezi neobnovitelné zdroje tepelné energie patří dle [38] především fosilní paliva – černé a hnědé uhlí, zemní plyn a ropné produkty. Černé uhlí se vyznačuje vysokou výhřevností, avšak jeho těžba je náročná a doprovázená produkcí značného množství škodlivých emisí. Hnědé uhlí, i když je dostupnější, má nižší výhřevnost a rovněž přispívá ke znečištění ovzduší. Zemní plyn představuje ekologičtější variantu, protože při jeho spalování vzniká méně emisí. Na druhou stranu je jeho cena i závislost na dovozu výrazným faktorem. Ropné produkty, které rovněž disponují vysokou výhřevností, mají nižší podíl škodlivin oproti uhlí, ale jejich ekonomická výhodnost je nižší.

Mezi obnovitelné zdroje tepla web [38] řadí zejména biomasu, bioplyn, skládkový plyn, dřevo a v menší míře i sluneční záření. Biomasa a bioplyn představují udržitelnou alternativu k fosilním palivům, neboť jejich spalováním nevznikají toxické látky a jsou úzce navázány na zemědělskou výrobu. Dřevo je dostupným palivem zejména v oblastech s vlastní těžbou, avšak není vhodné pro velkoplošné systémy dálkového vytápění. Skládkové plyny, které vznikají obdobným způsobem jako bioplyn, mají srovnatelné výhody i nevýhody. Sluneční energie je sice snadno využitelná prostřednictvím solárních termických kolektorů, ale vzhledem k její proměnlivosti a sezónnosti není vhodná pro plošné vytápění budov v rámci centrálních systémů.



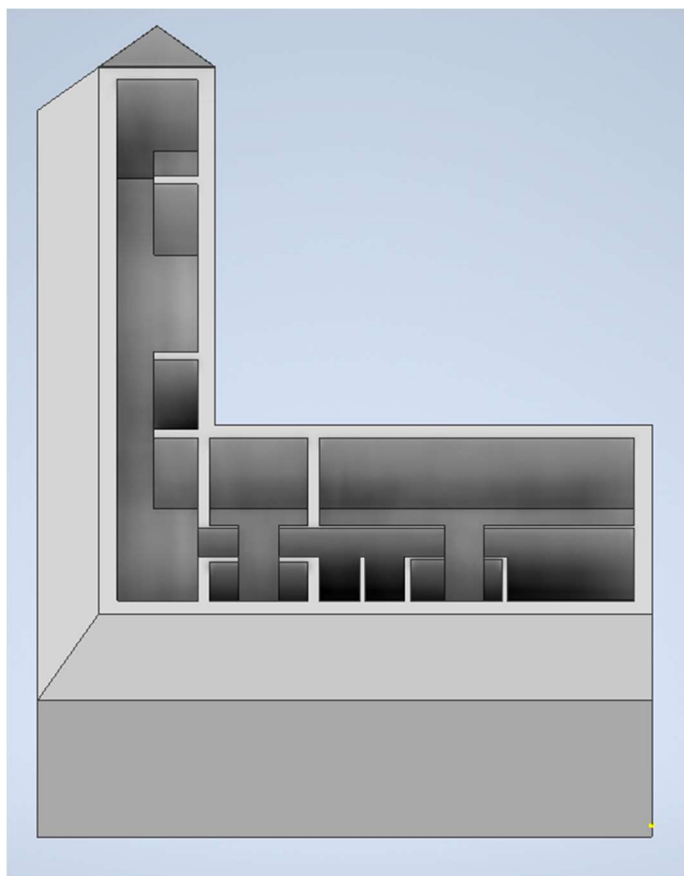
Obr. 10 – Teplárna Brno [68].

3 Praktická část

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na návrh opatření směřujících k přiblížení energetické soběstačnosti reálného objektu. Nejprve je proveden výpočet celkových tepelných ztrát objektu, včetně ztrát prostupem konstrukcí a větráním. Na základě výsledků těchto výpočtů je navrženo vhodné tepelné čerpadlo vzduch–voda, systém řízeného větrání s rekuperací tepla a vlastní výroba a skladování elektrické energie pomocí fotovoltaických panelů. Dále je provedeno ekonomické vyhodnocení navržených opatření, včetně posouzení návratnosti investic. Cílem je určit, zda jsou jednotlivé úpravy z ekonomického hlediska efektivní, případně zda jejich realizace dává smysl i v případě delší návratnosti, například z pohledu zajištění energetické nezávislosti, snížení budoucích provozních nákladů nebo zvýšení komfortu pro obyvatelé objektu.

3.1 Popis objektu

Objektem posuzovaným v této práci je třígenerační rodinný dům o dvou nadzemních podlažích s půdorysnou plochou 154,616 m² a obvodem 73,36 m. Konstrukční systém tvoří nosné stěny z plných pálených cihel o tloušťce 450 mm. Stropní konstrukce je trámová s prkenným záklopem bez tepelné izolace. Střecha je sedlová, krytá pálenými taškami, opět bez dodatečného zateplení. Okna jsou původní dřevěná dvojitá (kastlová) s jednoduchým zasklením. Podlaha je betonová, bez vrstvy tepelné izolace. Vytápění je zajištěno plynovým kondenzačním kotlem a systémem deskových radiátorů. Objekt je situován v oblasti Brna.



Obr. 11 – Model domu.

3.2 Výpočet tepelných ztrát objektu

Výpočet tepelných ztrát objektu je nezbytným krokem pro stanovení jeho energetických potřeb, návrh vhodných opatření ke zvýšení energetické efektivity a dosažení vyšší míry energetické soběstačnosti. V této kapitole je proveden přibližný výpočet tepelných ztrát pomocí vzorců a postupů dostupných z [39] jednotlivými konstrukčními částmi budovy. Pro prostup vnějšími stěnami bude výpočet rozepsán a jednotlivé kroky popsány, ostatní výpočty budou shrnuty pouze tabulkou a krátkým komentářem. Výpočty jsou prováděny pro stav objektu bez provedení zateplení a objekt je pro potřeby analýzy rozdělen na sedm částí.

- **vnější stěny**, které budou následně zatepleny z vnější strany;
- **střešní konstrukci** (podkroví), kde bude aplikováno zateplení z vnitřní strany;
- **strop pod nevytápěnou půdou**, k zateplení dojde na půdě;
- **okna**, představující prostupy tepla stávajícími neizolovanými rámy a zasklením;
- **ztráty dveřmi** pro staré dřevěné dveře;
- **podlahu** na betonovém podkladu, bez tepelné izolace a pro zanedbatelnou podlahovou vrstvu;
- **ztráty větráním**.

Výsledky jednotlivých výpočtů budou sloužit jako podklad pro návrh vhodných opatření ke snížení tepelných ztrát a zlepšení celkové energetické bilance objektu.

Teplotní rozdíl

Pro zjištění tepelných ztrát při prostupu tepla jakýmkoliv médiem je potřeba znát teploty na obou stranách. Uvažovaná teplota uvnitř domu je pro celý výpočet 21 °C. Průměrné teploty pro topnou sezónu jsou dle [40] následující.

Tab. 1 – Průměrné venkovní teploty pro období topné sezóny [40].

Měsíc	Září	Říjen	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen
Průměrná teplota	13,8	8,6	3,5	-0,2	-2,1	-0,7	3,6	8,5	13,8

Průměrná teplota během otopné sezóny je 5,42 °C. Rozdíl teplot, který je uvažován při výpočtu je popsán v rovnici 1.

$$\Delta T = T_{\text{uvnitř}} - T_{\text{venku}} = 21 - 5,42 = 15,58 \text{ K} \quad (1)$$

Tato teplota je uvažována u výpočtů tepelných ztrát stěnami, okny či střechou. Pro výpočet tepelných ztrát podlahou je uvažována dle [41] teplota zeminy 10 °C. Rozdíl těchto teplot je popsán v rovnici 2.

$$\Delta T_{\text{zem}} = T_{\text{uvnitř}} - T_{\text{zeminy}} = 21 - 10 = 11 \text{ K} \quad (2)$$

Pro návrh vhodného tepelného čerpadla či jiného topného prvku je potřeba spočítat i tepelné ztráty pro výpočtové venkovní teploty, aby měl topný prvek dostatečně velký výkon a dokázal tak vytopit celý dům. Tato teplota je dle [42] udávána normami ČSN 38 3350 a ČSN 06 0210. Pro Brno byla tato hodnota stanovena na $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozdíl teplot je popsán v rovnici 3.

$$\Delta T_{\text{výpočtová}} = T_{\text{uvnitř}} - T_{\text{výpočtová}} = 21 - (-12) = 33\text{ K} \quad (3)$$

Prostup tepla stěnami

Prvním zdrojem tepelných ztrát jsou obvodové stěny domu. Jejich celková plocha činí $413,972\text{ m}^2$, z čehož tvoří $23,483\text{ m}^2$ okna a $7,2\text{ m}^2$ dveře. Čistá plocha zdíva po odečtu oken označená jako $S_{\text{stěn}}$ je pak $383,290\text{ m}^2$. Součinitel prostupu tepla pro zdívo z pálených cihel o tloušťce 450 mm je značen jako U_{cihel} a rovná se $1,3\text{ W/m}^2\text{K}$ [43]. Odpor cihel spočteme jako převrácenou hodnotu součinitele prostupu tepla v rovnici 4.

$$R_{\text{cihel}} = \frac{1}{U_{\text{cihel}}} = 0,7692 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (4)$$

K tepelnému odporu stěn dále přičteme odpory vzduch uvnitř a zvenku objektu v rovnici 5. Ty jsou určeny online kalkulačkou [44]. Odpor vzduchu z vnitřní strany je označován R_{si} a má velikost $0,13\text{ m}^2\text{K/W}$, z vnější strany označován R_{se} a o hodnotě $0,04\text{ m}^2\text{K/W}$. Celkový odpor bude dán součtem jednotlivých odporů.

$$R_{\text{stěn,před}} = R_{\text{cihel}} + R_{\text{si}} + R_{\text{se}} = 0,9392 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (5)$$

Součinitel prostupu tepla pro celou stěnu bude dán převrácenou hodnotou celkového odporu stěn v rovnici 6.

$$U_{\text{stěn,před}} = \frac{1}{R_{\text{stěn,před}}} = 1,0647 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (6)$$

Tepelné ztráty pro zeď bez zateplení budou odpovídat vztahu v rovnici 7.

$$Q_{\text{stěn,před}} = U_{\text{stěn,před}} \cdot S_{\text{stěn}} \cdot \Delta T = 6\,358\text{ W} \quad (7)$$

Odborný web [45] tvrdí, že doporučená hodnota součinitele prostupu tepla pro pasivní budovy by měl být dle ČSN 73 0540-2:2011 v rozmezí od $0,18$ až $0,12\text{ W/m}^2\text{K}$. V rovnici 8 je označován $U_{\text{stěn,čsn}}$ a jeho hodnota je uvažována $0,15\text{ W/m}^2\text{K}$. Doporučená hodnota tepelného odporu stěn je popsána v rovnici 8.

$$R_{\text{stěn,čsn}} = \frac{1}{U_{\text{stěn,čsn}}} = 6,6667 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (8)$$

Dále je v rovnici 9 určena hodnota odporu, o kterou bude potřeba zvýšit hodnotu tepelného odporu stěn.

$$R_{\text{izolace}} = R_{\text{stěn,čsn}} - R_{\text{stěn,před}} = 5,7274 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \quad (9)$$

Jako materiál pro zateplení vnějších stěn volím tepelnou izolaci Isover EPS GreyWall Plus. Součinitel tepelné vodivosti pro daný materiál je reprezentován λ_{EPS} a roven 0,031W/mK dle webu [46]. Minimální tloušťka izolace, která splní minimální hodnotu tepelného odporu stěn je spočtena v rovnici 10.

$$d_{izolace} = R_{izolace} \cdot \lambda_{EPS} = 0,1776 \text{ m} \quad (10)$$

Stavebniny [46] nabízí tuto tepelnou izolaci o rozměrech 0,18 m, nebo 0,2 m, je tedy zvolena tloušťka izolace 0,2 m. Dále je z rovnice 10 vyjádřen tepelný odpor a v rovnici 11 spočtena jeho reálná hodnota pro tloušťku izolace 0.2 m, označenou jako $d_{izolace,zvolená}$.

$$R_{izolace,realná} = \frac{d_{izolace,zvolená}}{\lambda_{EPS}} = 6,4516 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (11)$$

Celková hodnota tepelného odporu stěny po zateplení je dána součtem odporu izolace s odporem nezatepleného stavu v rovnici 12. Součinitel prostupu tepla pak bude dán převrácenou hodnotu celkového tepelného odporu v rovnici 13.

$$R_{stěn,po} = R_{izolace} + R_{stěn,před} = 7,3908 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (12)$$

$$U_{stěn,po} = \frac{1}{R_{stěn,po}} = 0,1353 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (13)$$

Hodnota tepelných ztrát stěnou po zateplení je spočtena v rovnici 14 podle totožného vzorce jako pro stěnu bez zateplení v rovnici 7.

$$Q_{stěn,po} = U_{stěn,po} \cdot S_{stěn} \cdot \Delta T = 808,98 \text{ W} \quad (14)$$

Cena za zateplení fasády, včetně pronájmu lešení, nákladů na materiál a veškerých montážních prací, byla stanovena firmou Balstavo s.r.o. na 876 423 Kč.

Prostup tepla střechou

Druhým významným zdrojem tepelných ztrát objektu je prostup tepla střešní konstrukcí. Vzhledem k tomu, že by plošné zateplení celé střechy nebylo ekonomicky ani technicky efektivní, je v návrhu uvažováno pouze zateplení části střechy nacházející se nad obytnými místnostmi. Tato část střechy je vidět na obrázku 11.

Střecha je ve výpočtu uvažována bez jakéhokoliv zateplení, do prostupu tepla je tak uvažována pouze vrstva dřevěných prken o tloušťce 25 mm, vedením tepla kolmo na vlákna. Hodnota součinitele tepelné vodivosti je dle [47] rovna 0,18 W/mK. Zateplení bude provedeno z vnitřní strany objektu, a to pomocí stejné tepelné izolace jako bylo provedeno zateplení vnějších stěn, konkrétně Isover EPS GreyWall Plus tentokrát o tloušťce 260 mm, dostupný ze stavebnin [48]. Hodnoty tepelného odporu vzduchu jsou uvažovány totožné, jako u prostupu tepla stěnami.

Tab. 2 – Tepelné ztráty střechou.

Plocha střechy	61,108 m ²
Ztráty před zateplením	3 082,209 W
Ztráty po zateplení	109,483 W
Součinitel prostupu tepla před zateplením	3,237 W/m ² K
Součinitel prostupu tepla po zateplení	0,115 W/m ² K
Normová hodnota součinitele prostupu tepla pro pasivní dům	0,12 W/m ² K

Cena za zateplení střechy, konkrétně nákladů na materiál a veškerých montážních prací, byla stanovena pomocí ceníku, který je dostupný na portálu [49]. Celková investiční částka na realizaci zateplení střechy činí přibližně 55 000 Kč.

Prostup tepla stropem na nezateplenou půdu

Další částí konstrukce, kterou dochází k významným tepelným ztrátám, je strop oddělující vytápěné obytné prostory od nezateplené půdy. Tento prostor není využíván k trvalému pobytu osob, proto je ve výpočtech uvažována nižší teplota rovna venkovnímu prostředí. V původním stavu není strop opatřen žádnou tepelnou izolací. Konstrukci tvoří, stejně jako u střechy, pouze dřevěná prkna o tloušťce 25 mm, které mají součinitel tepelné vodivosti roven 0,18 W/mK [47]. Pro snížení tepelných ztrát je navrženo zateplení stropu foukanou izolací od firmy Marek Klementa – Foukaná izolace Olomouc spol s.r.o. o výšce izolace 320 mm. Materiál má součinitel tepelné vodivosti roven 0,039 W/mK [50]. Na izolaci bude následně položena druhá vrstva prken. Z vnitřní strany objektu je uvažován tepelný odpor vzduchu 0,13 m²K/W, z vnější strany pak 0,1 m²K/W [44].

Tab. 3 – Tepelné ztráty stropem na půdu.

Plocha stropu	102,024 m ²
Ztráty před zateplením	4 308, 988 W
Ztráty po zateplení	182,435W
Součinitel prostupu tepla před zateplením	2,711 W/m ² K
Součinitel prostupu tepla po zateplení	0,115 W/m ² K
Normová hodnota součinitele prostupu tepla pro pasivní dům	0,12 W/m ² K

Cenová nabídka od firmy Marek Klementa – Foukaná izolace Olomouc spol s.r.o. činí 50 281 Kč.

Prostup tepla podlahou

Čtvrtým zdrojem tepelných ztrát je prostup tepla podlahovou konstrukcí. V původním stavu je podlaha tvořena pouze betonovou deskou o tloušťce 100 mm, jejíž součinitel tepelné vodivosti činí 1,4 W/mK [51]. Pro zateplení byla zvolena tepelná izolace Austrotherm EPS 100 o tloušťce 250 mm a součinitelem tepelné vodivosti o hodnotě 0,037 W/mK [52]. Z vnitřní strany objektu je uvažován tepelný odpor vzduchu 0,13 m²K/W, z vnější strany z důvodu přilehlé zeminy 0 m²K/W [44].

Tab. 4 – Tepelné ztráty podlahou.

Plocha podlahy	154,616 m ²
Ztráty před zateplením	6 887,878 W
Ztráty po zateplení	242,840 W
Součinitel prostupu tepla před zateplením	4,050 W/m ² K
Součinitel prostupu tepla po zateplení	0,143 W/m ² K
Normová hodnota součinitele prostupu tepla pro pasivní dům	0,15 W/m ² K

V ceně za podlahy je uvažována pouze cena za materiál, který je dostupný ve stavebninách [52]. Celková investiční částka za materiál, kdy by byla práce provedena majitelem objektu, je 80 707 Kč.

Prostup tepla okny

Pátým zdrojem tepelných ztrát jsou ve výpočtu okna. Tyto konstrukční prvky mají ve srovnání s běžnými obvodovými stěnami zpravidla vyšší součinitel prostupu tepla, z tohoto důvodu představují méně účinnou tepelnou bariéru mezi interiérem a exteriérem, jejich plocha je však několika násobně menší. V původním stavu objektu jsou uvažována stará dřevěná okna. Součinitel prostupu tepla pro staré okna je uvažován dle [53] a pro nová okna z [54]. Z vnitřní i z vnější strany objektu je uvažován stejný tepelný odpor vzduchu, se kterým bylo počítáno u prostupu tepla stěnami.

Tab. 5 – Tepelné ztráty okny.

Plocha oken	27,983 m ²
Ztráty před zateplením	764,855 W
Ztráty po zateplení	307,019 W
Součinitel prostupu tepla před zateplením	1,754 W/m ² K
Součinitel prostupu tepla po zateplení	0,704 W/m ² K
Normová hodnota součinitele prostupu tepla pro pasivní dům	0,8 W/m ² K

Výměna oken je ve výpočtu uvažována pouze zjednodušeně. Celková plocha je rozdělena na dvě části – okna a balkónové dveře. Cena balkónových dveří byla stanovena jako pevná částka dle dostupné nabídky, zatímco cena oken byla vypočtena přepočtem nákupní ceny konkrétního okna s izolačním trojsklem na 1 m² dle [54]. Cena za práci je dána dle kupní smlouvy od firmy SDK Systém CZ z roku 2021. Plocha oken činí celkem 19,143 m², plocha balkónových dveří pak 8,84 m². Výsledná orientační cena za výměnu oken a balkónových dveří společně s prací činí 219 370 Kč.

Prostup tepla dveřmi

Posledním uvažovaným zdrojem tepelných ztrát jsou dveře, pro které platí stejná pravidla jako pro okna. Jejich ztráty bývají poměrově vyšší než u obvodových stěn, ale platí pro menší plochy. Uvažovány jsou čtyři jednoduché dřevěné dveře bez skleněné výplně rozdělující venkovní prostory od vnitřních o rozměrech 2x0,9 m se součinitelem prostupu tepla uvažovaným dle [55]. Nové dveře jsou uvažovány se součinitelem prostupu tepla dle [56]. Tepelný odpor vzduchu opět uvažujeme stejný jako u prostupu tepla stěnami.

Tab. 6 – Tepelné ztráty dveří.

Plocha dveří	7,2 m ²
Ztráty před zateplením	222,866 W
Ztráty po zateplení	63,834 W
Součinitel prostupu tepla před zateplením	1,987 W/m ² K
Součinitel prostupu tepla po zateplení	0,567 W/m ² K
Normová hodnota součinitele prostupu tepla pro pasivní dům	0,9 W/m ² K

Cena za vstupní dveře s montáží pro pasivní dům je dle [57] 40 219 Kč. Za čtyři kusy by celková cena činila 160 876 Kč.

Tepelné ztráty větrání

Tyto ztráty vznikají výměnou vzduchu mezi interiérem a exteriérem, při níž je z vytápěného prostoru odváděn ohřátý vzduch, který je nahrazován chladnějším venkovním vzduchem. Celková půdorysná plocha objektu je označována jako $S_{pūdorys}$ a její hodnota činí 186,823 m². Výška stropů je uvažována jako 2,7 m pro jedno patro, tedy 5,4 m pro 2 nadzemní podlaží. Tato hodnota je značena $H_{objektu}$. Objem vzduchu v domě je pak spočten v rovnici 15.

$$V_{vzduchu} = S_{pūdorys} \cdot H_{objektu} = 1008,842 \text{ m}^3 \quad (15)$$

Dle odborného zdroje [58] je doporučená hodnota intenzity větrání 0,3 h⁻¹, v těchto výpočtech je značena jako $n_{vzduchu}$. Dále jsou ve výpočtu zahrnuty vlastnosti vzduchu, konkrétně jeho hustota, ve výpočtech značená $\rho_{vzduchu}$ a rovna 1,29 kg/m³, a měrná tepelná kapacita, značená $c_{vzduchu}$ a rovna 1 005 J/kgK [59]. Výpočet tepelných ztrát větráním probíhá dle vztahu v rovnici 16.

$$Q_{vzduchu} = V_{vzduchu} \cdot \rho_{vzduchu} \cdot c_{vzduchu} \cdot \Delta T \cdot n_{vzduchu} = \quad (16)$$

$$Q_{vzduchu} = 1579,634 \text{ W}$$

Závěr k tepelným ztrátám

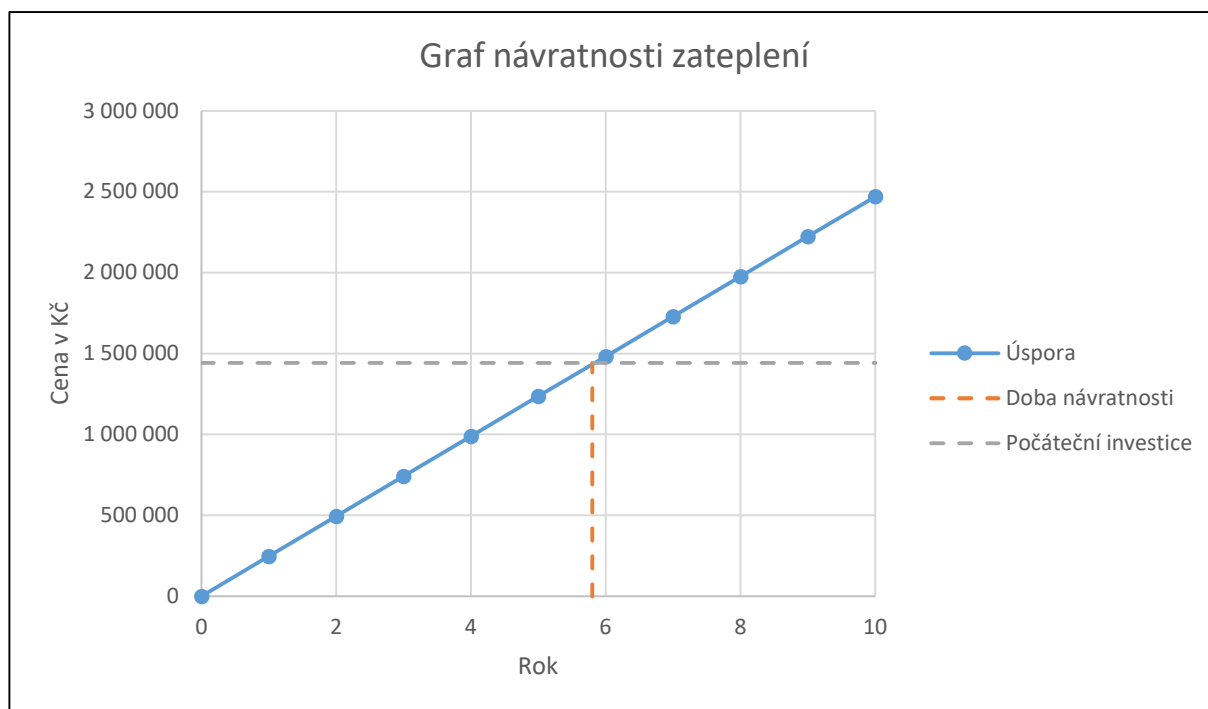
Na základě provedených výpočtů byla stanovena celková tepelná ztráta objektu ve výchozím, nezatepleném stavu a po realizaci navržených tepelně izolačních opatření a zapsána do tabulky 7.

Tab. 7 – Celkové tepelné ztráty prostupem tepla.

Celkové ztráty před zateplením	22 932 W
Celkové ztráty po zateplení	3 021 W

Na základě provedených výpočtů lze říct, že navrženými tepelně izolačními opatřeními došlo u posuzovaného objektu ke snížení celkových tepelných ztrát až o 86,83 %. Je třeba však zdůraznit, že takto vysoké procento vychází z výpočtového porovnání se zcela nezatepleným stavem, což tento rozdíl přirozeně výrazně zvyšuje.

Jestliže je pro oblast Brna dle [60] uvažována topná sezóna dlouhá 232 dní, roční úspora tepla vyroste až na 110,866 MWh. Dále je uvažován plynový kotel s účinností 80 %. Ušetřeného plynu na vytápění bude 133,039 MWh. S ohledem na aktuální smluvní cenu za zemní plyn s dodavatelem Centropol, která činí 1 857 Kč/MWh, představuje tato úspora potenciální snížení ročních nákladů na vytápění až o 247 073 Kč. Celková cena za zateplení objektu je 1 442 657 Kč. Doba návratnosti je vykreslena na grafu v obrázku 12.



Obr. 12 – Graf návratnosti zateplení

Teoretická návratnost zateplení domu by dle obrázku 12 byla přibližně 5,8 let. Investiční částka by se však mohla vyšplhat na vyšší hodnoty po vypracování reálnějších nabídek zateplení. Mohlo by však dojít i k jejímu snížení po započítání dotace z programu Nová zelená úsporám.

3.3 Rekuperace

Kvalita vnitřního prostředí je klíčovým prvkem moderního a energeticky úsporného bydlení. Jedním ze způsobů, jak zajistit trvalý přívod čerstvého vzduchu bez zbytečných tepelných ztrát je využít větrání s řízenou rekuperací tepla. Pro návrh správného zařízení je potřeba znát tepelné ztráty větráním (viz. kapitola 3.2) a požadovanou výměnu vzduchu, která je spočtena pomocí vztahu v rovnici 17.

$$Q_{\text{výměna,vzduchu}} = V_{\text{vzduchu}} \cdot n_{\text{vzduchu}} = 302,654 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (17)$$

Podle potřebné výměny vzduchu je zvolena rekuperační jednotka Ventbox II 400 EVR Premium z online obchodu [61] za cenu 114 829 Kč. Entalpický výměník tepla této rekuperační jednotka dokáže podle technického listu dostupného z [61] pracovat při 70% výkonu a průtoku 280 m³/h s účinností až 76,9 %. To znamená, že by tepelné ztráty větráním spočtené v předchozí kapitole dokázal snížit o 76,9 %, neboli 1 214,739 W. Není však potřeba, aby rekuperace pracovala celý den na 70 % svého výkonu. Je tedy uvažováno následující rozdělení doplněné příslušnými parametry z technického listu.

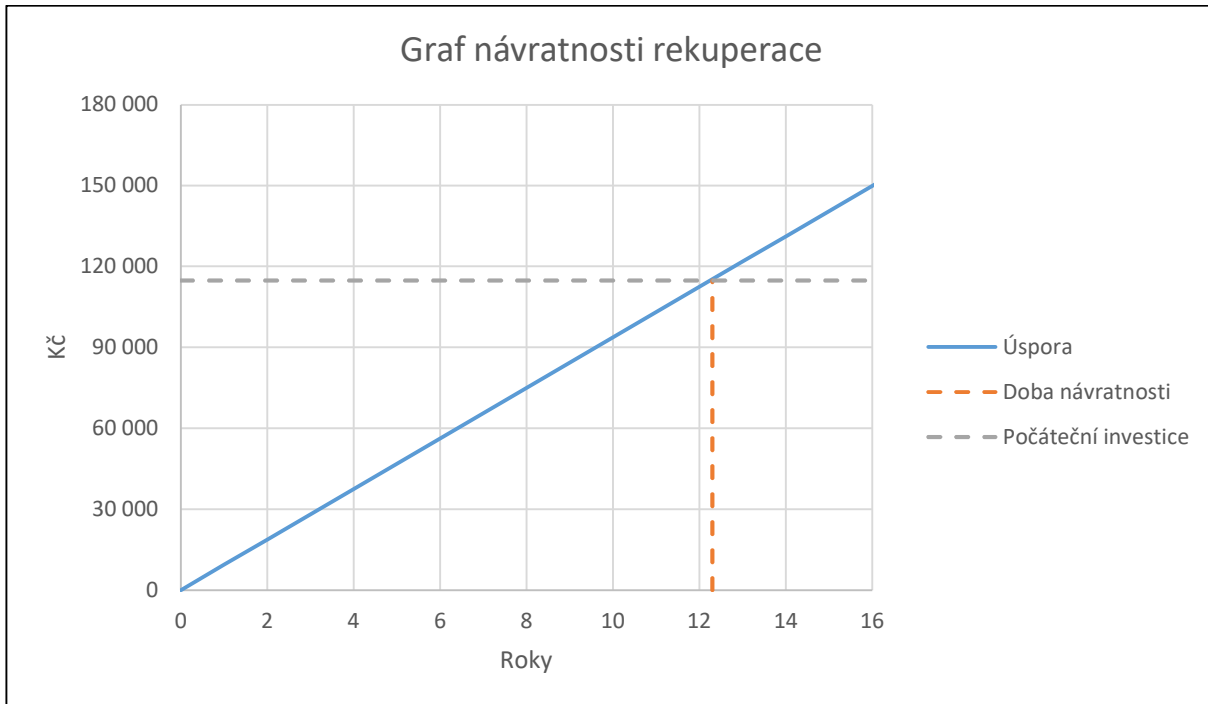
- 8 hodin (přes noc) bude uvažován klidový režim a jednotka pojede na 20 % s účinností 90,1 %. Velikost příkonu je pro tento režim stanovena na 18 W.
- 12 hodin pro obvyčejný provoz o výkonu 70 % s uvažovanou účinností 76,9 %. Velikost příkonu je zde 63 W
- 4 hodiny, kdy jednotka pojede se zvýšeným výkonem blížícím se 100 % (při sprchování, vaření) s účinností 73 % a příkonem 128 W.

Průměrná účinnost jednotky během dne bude podle tohoto rozdělení 80,7 %. Během topné sezóny by tak rekuperace mohla ušetřit až 5 870,63 kWh tepelných ztrát. Jestliže je pro vytápění uvažován kondenzační plynový kotel s účinností 80 % a cena 1,857 Kč/kWh, představuje to úsporu nákladů na vytápění ve výši 13 083 Kč/rok.

Při uvažování daného rozdělení bude za jeden den rekuperační jednotce potřeba dodat 1,412 kWh elektrické energie. Délka topné sezóny je stanovena dle [60] na 232 dní a cena 5,267 Kč/kWh elektrické energie dle smlouvy s firmou E.ON Energie a.s. Podle prodejce této rekuperační jednotky je potřeba 2x ročně výměna filtrů za celkových 1 990 Kč [61]. Investiční částka do rekuperační jednotky bez uvažování ceny za instalaci je 114 829 Kč.

Tab. 8 – Celková pořizovací cena a úspora rekuperace

Cena za rekuperační jednotku	114 829 Kč
Celková úspora způsobena rekuperační jednotkou	9 368 Kč/rok



Obr. 13 – Graf návratnosti rekuperace

K navrácení investice do rekuperační jednotky by došlo dle grafu na obrázku 13 za 12,3 let. Návratnost by se razantně prodloužila po započtení její instalace. Zároveň by se ale také dala snížit zažádáním o dotaci v programu Nová zelená úsporám. Dále je třeba dodat, že přínosy rekuperační jednotky nejsou pouze ekonomické, ale také kvalitativní – v podobě vyššího komfortu a zdravějšího vnitřního prostředí a například v letních měsících by mohla přispět snížením vnitřní teploty, což ve výpočtu není zahrnuto.

3.4 Fotovoltaika

Za rok 2024 bylo v objektu dle smlouvy s firmou E.ON Energie spotřebováno 6,338 MWh elektrické energie, ve výpočtu značeno jako $Q_{\text{elektriny}}$. Jestliže jeden panel od firmy [62] má výkon označovaný P_{panelu} o velikosti 500 W a slunce dle odborného webu [63] svítí přibližně 1620 h/rok, označeno n_{slunce} , výpočet pro dostačující počet panelů je spočítán v rovnici 18.

$$n_{\text{panelů,rok}} = \frac{Q_{\text{elektriny}}}{P_{\text{panelu}} \cdot n_{\text{slunce}}} = 7,825 \approx 8 \quad (18)$$

Teoreticky by tedy stačilo osm fotovoltaických panelů na pokrytí roční spotřeby elektrické energie. Problém však nastává po zjištění skutečnosti, že až 2 596 kWh elektriny je vyrobeno v letních měsících (červen, červenec, srpen), kdy je spotřeba elektriny mnohem menší než v zimních měsících (prosinec, leden, únor), kdy by 8 panelů vyrobilo pouze 58 kWh elektrické energie.

Následující výpočet se snaží navrhnout takový počet panelů, které by zajistily objektu nezávislost na elektrické energii při měsících, ve kterých dle odborného webu [63] svítí slunce více než 150 hodin, viz. tabulka 9. Mezi tyto požadavky spadají měsíce: duben, květen, červen, červenec, srpen, září.

Tab. 9 – Statistiky za rok 2024.

Měsíc	Spotřeba [kWh]	Počet slunečných hodin v měsíci
Leden	985	41
Únor	450	67
Březen	430	127
Duben	390	159
Květen	350	224
Červen	360	218
Červenec	380	212
Srpen	310	219
Září	430	155
Říjen	640	117
Listopad	720	44
Prosinec	890	37

Nejnáročnější měsíc, co se týče spotřeby elektriny je dle tabulky 9 září. Spotřeba v tomto měsíci činila 430 kWh elektrické energie a ve výpočtu je označována jako $Q_{\text{elektriny,září}}$. Slunce během tohoto měsíce svítilo 155 hodin, označováno jako $n_{\text{slunce,září}}$. Potřebný počet panelů je spočten v rovnici 19.

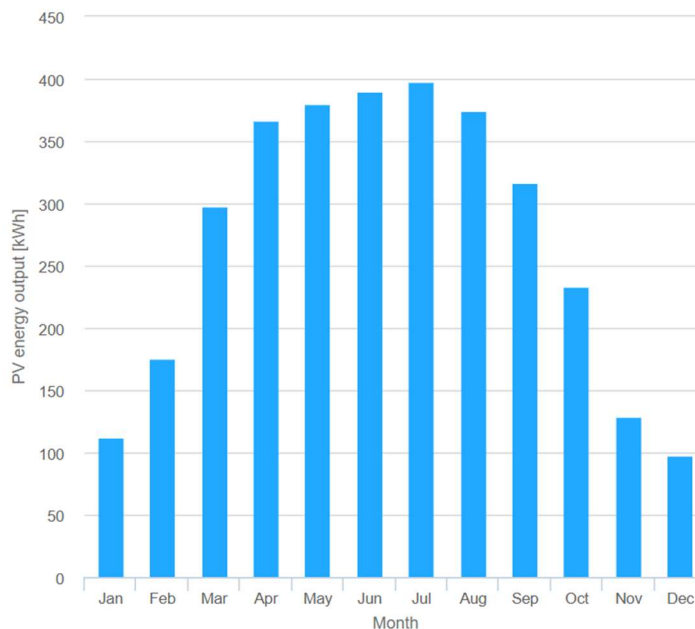
$$n_{\text{panelů,150h}} = \frac{Q_{\text{elektriny,září}}}{P_{\text{panelu}} \cdot n_{\text{slunce,září}}} = 5,55 \approx 6 \quad (19)$$

Šest panelů by tedy teoreticky mělo stačit na pokrytí výdajů za elektrickou energii v určených měsících.

Pro přesnější výpočet roční výroby fotovoltaického systému byl využit nástroj PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) od Evropské komise dostupný z [64]. Výsledky byly generovány pro lokalitu Pozořic, vybráno šest panelů typu Crystalline silicon o celkovém výkonu 3 kWp, nainstalovány na střeše se sklonem 35° a orientovány na jih. Systémová ztráta byla doporučena nástrojem a to 14 %. Výstup je uveden na obrázku 14 a graf, který porovnává jednotlivé rozdíly ve výrobě energie pro jednotlivé měsíce na obrázku 15.

Provided inputs:	
Location [Lat/Lon]:	49.217,16.797
Horizon:	Calculated
Database used:	PVGIS-SARAH3
PV technology:	Crystalline silicon
PV installed [kWp]:	3
System loss [%]:	14
Simulation outputs:	
Slope angle [°]:	35
Azimuth angle [°]:	0
Yearly PV energy production [kWh]:	3269.84
Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1417.71
Year-to-year variability [kWh]:	145.98
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-2.95
Spectral effects [%]:	1.56
Temperature and low irradiance [%]:	-9.29
Total loss [%]:	-23.12

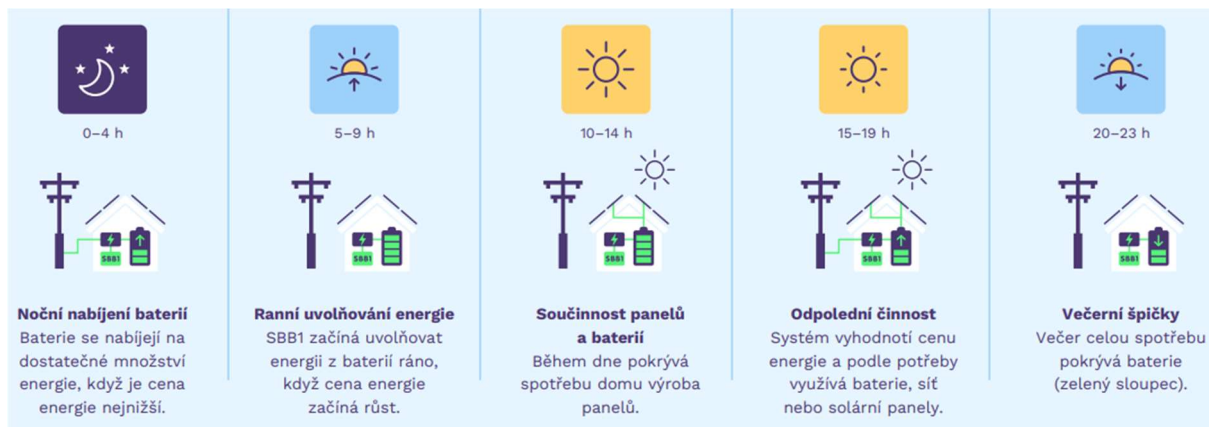
Obr. 14 – Tabulka vstupních a výstupních hodnot [64].



Obr. 15 – Porovnání vyrobené energie v jednotlivých měsících [64].

Na obrázku 15 jde vidět, že elektrická energie vyrobená fotovoltaikou během měsíců duben–srpen by z většiny stačila na pokrytí denních potřeb. V zimních měsících by naopak pomohla k vysoké spotřebě alespoň částečně. Spotřebovat však 100 % vyrobené energie by

bylo prakticky nemožné, pro přiblížení této hodnotě je potřeba pořízení bateriového úložiště a chytré řízení spotřeby energie. Při zařizování fotovoltaiky od firmy [62] mohou být k systému přikoupeny baterie o kapacitě 5 kWh. Chytré zařízení popisované na obrázku 16 je pak dodáváno firmou z webu [65].



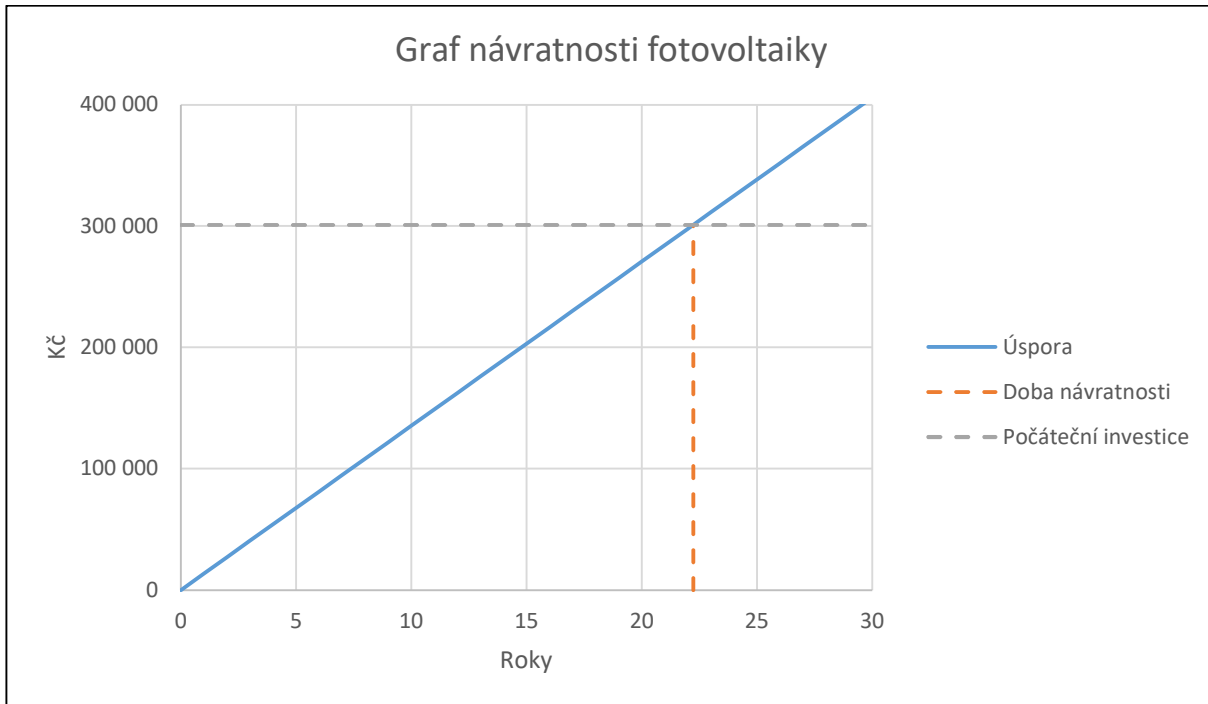
Obr. 16 – Schéma řízení spotřeby energie [65].

Při uvažování pouze spotřebované elektrické energie o velikosti 90 % z veškeré vyrobené fotovoltaika za rok vyrobí celkem 2 933,856 kWh energie za celkových 15 454 Kč. Cena elektrické energie je uvažována dle smlouvy s firmou E.ON Energie, a.s. 5,267 Kč/kWh.

Protože nebyla k dispozici aktuální cenová nabídka, byla pro odhad nákladů na fotovoltaický systém využita historická data z roku 2018, kdy byl v objektu instalován systém o výkonu 3,3 kWp s bateriovým úložištěm za celkovou cenu 319 000 Kč firmou Sunny Power s.r.o. Cena za 1 kWp tehdy činila přibližně 96 666 Kč. Při zachování této jednotkové ceny by odpovídající systém o výkonu 3 kWp vyšel na cca 290 000 Kč včetně bateriového úložiště. Je však nutné poznamenat, že ceny fotovoltaických systémů se neřídí výhradně obecnou mírou inflace. Vývoj cen v tomto segmentu závisí na technologiích, poptávce, dotační politice a vývoji výrobních nákladů. Tyto aspekty jsou v tomto orientačním výpočtu zanedbány. Cena za zařízení Smart Battery Box, který umožňuje řízení spotřeby a efektivně využívá přebytky z fotovoltaické elektrárny činí dle [65] 10 900 Kč a paušálním poplatkem 160 Kč/měsíc za provoz služby. Celkové shrnutí pořizovacích nákladů a ušetřené částky za rok je v tabulce 10.

Tab. 10 – Celková pořizovací cena a úspora.

Celková cena za fotovoltaiku	300 900 Kč
Celkem ušetřeno	13 534 Kč/rok



Obr. 17 – Graf návratnosti fotovoltaiky.

Návratnost investice, která je popsána na obrázku 17, fotovoltaické elektrárny je odhadována na 22,2 let. Tuto dobu by bylo možné zkrátit získáním dotace z programu Nová zelená úsporám. Výrobce poskytuje záruku na funkčnost panelů po dobu 12 let a záruku na jejich výkon až na 30 let. O tom, zda je investice do fotovoltaiky skutečně výhodná, lze rozhodnout až po zahrnutí reálného cenového odhadu. Je však důležité zmínit, že přínos takové investice nemusí být pouze ekonomický – fotovoltaika zároveň snižuje závislost na dodávkách elektřiny ze sítě.

3.5 Tepelné čerpadlo

Pro správný návrh tepelného čerpadla je důležité znát požadovaný tepelný výkon. Požadovaný tepelný výkon se dle [42] určuje k výpočtové teplotě $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ (viz. kapitola o teplotním rozdílu). Vztah pro přepočítání celkových tepelných ztrát objektu z hodnoty pro průměrnou teplotu (viz tabulka 7, ve vzorci označená jako $Q_{\text{celková}}$) na výpočtovou teplotu je popsán v rovnici 20.

$$Q_{\text{výpočtová}} = (Q_{\text{celková}} - Q_{\text{podlahou}}) \cdot \frac{\Delta T_{\text{výpočtová}}}{\Delta T} + Q_{\text{podlahou}} = \quad (20)$$
$$Q_{\text{výpočtová}} = 6,127 \text{ kW}$$

Při výpočtu v rovnici 20 je uvažováno, že tepelné ztráty podlahou jsou konstantní díky stabilní teplotě zeminy, proto se do poměru teplot zahrnují odděleně. Na základě výpočtové hodnoty tepelných ztrát je potřeba zvolit tepelné čerpadlo s výkonem blízkým této hodnotě. Tuto podmínku splňuje tepelné čerpadlo vzduch-voda LG Therma V Split 1f 7 kW o výkonu 7 kW a hodnotě SCOP 4,65, dostupné z [66]. Hodnota SCOP dle [66] uvádí tzv. sezónní topný faktor, kdy z 1 kWh elektrické energie vyrobí tepelné čerpadlo průměrně 4,65 kWh tepla. V technickém listě je však hodnota 4,65 uvedena pro výstup vody o teplotě $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Voda o této teplotě však odpovídá pouze provozu s podlahovým topením. Pro ohřev na vyšší výstupní teplotu vody, která by proudila radiátory je SCOP stanoveno na 3,23. Pro ohřev teplé vody je v technickém listě uváděna hodnota COP 3,15. Samotné tepelné čerpadlo (bez práce) je naceněno firmou LG na 128 139 Kč. Tepelné čerpadlo by na pokrytí tepelných ztrát zatepleného domu spotřebovalo ročně hodnotu popisovanou v rovnici 21.

$$E_{\text{elektriny}} = \frac{Q_{\text{výpočtová}}}{SCOP} = 5\,207,564 \text{ kWh} \quad (21)$$

Při ceně elektřiny 5,267 Kč/kWh by roční náklady na vytápění dosáhli 27 430 Kč. Oproti tomu by plynový kotel s 80 % účinností spotřeboval na pokrytí ročních tepelných ztrát zatepleného domu 20 184,518 kWh plynu. Za plyn s cenou 1,857 Kč/kWh by tedy bylo dodavateli zapláceno 37 486 Kč.

Dle statistiky vedené majitelem objektu bylo za rok 2024 spotřebováno celkem 35 MWh plynu. Dle publikovaných statistik [67] se v českých domácnostech spotřeba plynu rozděluje přibližně takto:

- 66 % na vytápění,
- 22 % na ohřev vody,
- 12 % na vaření.

Rozdělení pro dům, který nevyužívá plyn k vaření by pak přibližně odpovídal:

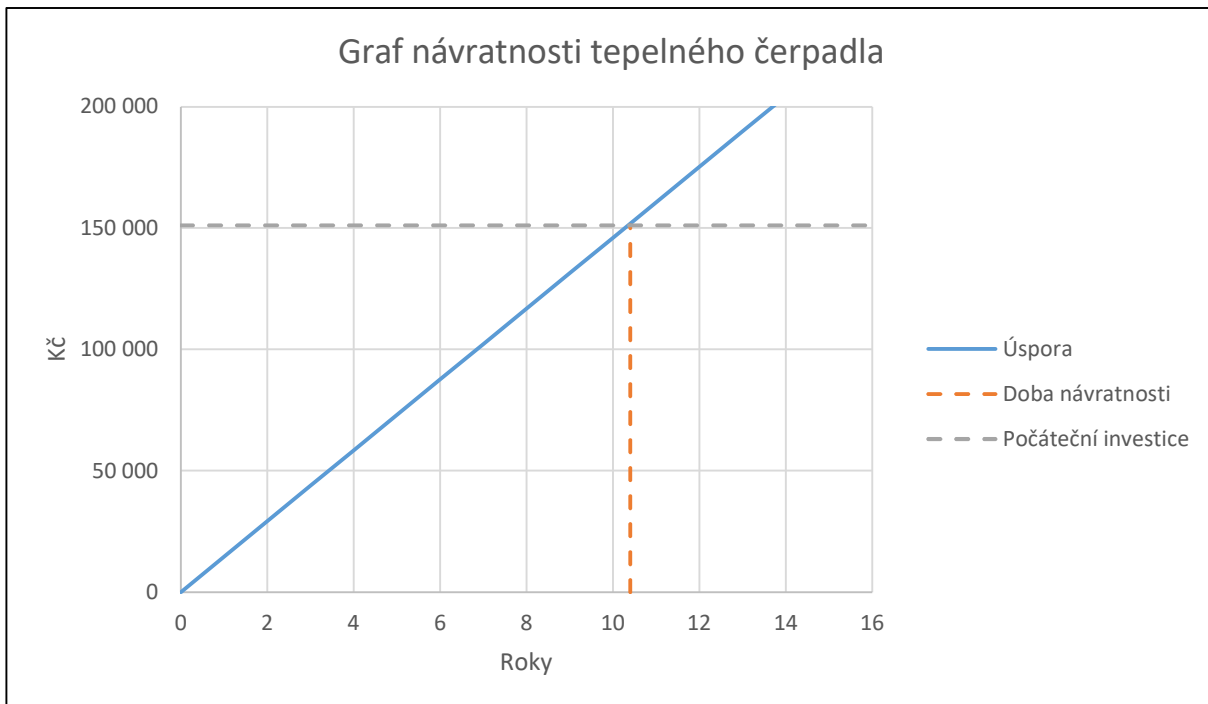
- 75 % na vytápění,
- 25 % na ohřev vody.

Pro kotel s účinností 80 % by bylo na ohřev vody potřeba přibližně 8 750 kWh za celkových 16 250 Kč. Tepelné čerpadlo by pak spotřebovalo 2 222,222 kWh elektrické energie za celkových 11 705 Kč.

Tepelné čerpadlo výrazně snižuje náklady jak na vytápění, tak na ohřev vody. Celková roční úspora při použití tepelného čerpadla namísto plynového kotle je uvedena společně s cenou za tepelné čerpadlo v tabulce 11.

Tab. 11 – Celková pořizovací cena a úspora.

Cena za tepelné čerpadlo	151 129 Kč
Úspora tepelného čerpadla vůči plynovému kotli	14 600 Kč/rok



Obr. 18 – Graf návratnosti tepelného čerpadla.

Doba návratnosti investice do tepelného čerpadla je popsána grafem na obrázku 18. Její velikost vychází přibližně na 10,3 let. Reálná návratnost by se prodloužila po započtení nákladů na instalaci, naopak by se však dala zkrátit získáním dotace z programu Nová zelená úsporám. O tom, zda se pořízení skutečně vyplatí, lze rozhodnout až po zohlednění celkových pořizovacích nákladů.

ZÁVĚR

Cílem teoretické části bakalářské práce bylo zpracovat přehled možností výroby a skladování energie v rodinných domech se zaměřením na dosažení energetické soběstačnosti. Praktická část se následně věnovala návrhu konkrétních opatření pro reálný dvoupodlažní rodinný dům o půdorysné ploše 155 m² v nezatepleném stavu. Cílem bylo snížit jeho závislost na primárních energetických zdrojích.

V rámci návrhu byla provedena kompletní analýza tepelných ztrát a navrženo zateplení obvodových stěn, části střechy, stropu pod nevytápěným prostorem, podlahy a výměna oken a dveří. Výsledkem těchto opatření bylo snížení tepelných ztrát až o 86,83 %. Investiční náklady byly stanoveny s využitím online kalkulaček a ceníků firem, přičemž návratnost investice byla vypočtena na 5,8 let. Tato hodnota je ovšem spíše teoretická, neboť vychází z extrémního rozdílu mezi výchozím a upraveným stavem objektu společně s pouhým odhadem cen za provedení práce.

Dále byla navržena vhodná rekuperační jednotka, jejíž parametry vycházely z teoretického výpočtu výměny vzduchu. Předpokládaná návratnost investice činí přibližně 12,3 let, přičemž výpočet zohledňuje pouze cenu samotné jednotky bez nákladů za instalaci a nutné stavební úpravy. Pokus o získání přesnější cenové nabídky od konkrétního dodavatele nebyl realizován kvůli požadované platbě za vyhotovení.

V rámci návrhu fotovoltaického systému byl zvolen takový výkon, který by postačoval k pokrytí spotřeby elektrické energie v letních měsících. Teoretická návratnost byla stanovena na 22,2 let. Pořizovací cena bylo vypočtena na základě odhadu ceny za 1 kWp z instalace provedené v roce 2018, protože se přesnou cenovou nabídku nepodařilo získat.

Posledním navrženým opatřením bylo tepelné čerpadlo vzduch–voda, které má zajistit vytápění i ohřev vody v objektu. Jeho výkon vychází z výpočtu tepelných ztrát po provedení navrženého zateplení. Návratnost investice bez započtení ceny za instalaci byla stanovena na 10,3 let, přičemž s připočtením nákladů za instalaci by se tato doba přirozeně prodloužila.

Všechny návratnosti investic by mohly být zkráceny díky dotačnímu programu Nová zelená úsporám. Zvláště v případě fotovoltaiky by taková podpora mohla významně zvýšit ekonomickou efektivitu projektu. U tepelného čerpadla a rekuperace je návratnost i s dotací diskutabilní. Je však důležité zdůraznit, že rekuperační jednotka kromě úspor zvyšuje kvalitu vnitřního prostředí, což představuje nezanedbatelný přínos z hlediska komfortu obyvatel. Ve výpočtu rovněž není započítána proměnlivá cena za energie, kdy by pokles cen za elektřinu zkrátil návratnost tepelného čerpadla či rekuperace. Naopak pokles ceny za plyn by návratnost prodloužil.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BAJPAI, S.C. a SULAIMAN, A.T. Energy Self-Sufficient House. Online. In: *Energy for Rural and Island Communities*. Elsevier, 1986, s. 329-334. ISBN 9780080334233. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-033423-3.50050-2>. [cit. 2025-01-23].
- [2] URIARTE, Irati; ERKOREKA, Aitor; EGUIA, Pablo; GRANADA, Enrique a MARTIN-ESCUADERO, Koldo. Estimation of the Heat Loss Coefficient of Two Occupied Residential Buildings through an Average Method. Online. *Energies*. 2020, roč. 13, č. 21. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13215724>. [cit. 2025-01-23].
- [3] RAHIMIAN, Mina; IULO, Lisa a DUARTE, Jose Pinto. Spatial design of energy self-sufficient communities. Online. In: *Artificial Intelligence in Urban Planning and Design*. Elsevier, 2022, s. 139-162. ISBN 9780128239414. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823941-4.00021-4>. [cit. 2025-01-23].
- [4] SAINT-GOBAIN. *Stavba zahájena: První Český soběstačný dům*. Online. Saint-Gobain. 2024. Dostupné z: <https://www.saint-gobain.cz/novinky/stavba-zahajena-prvni-cesky-sobestacny-dum>. [cit. 2025-03-19].
- [5] *Český soběstačný dům*. Online. Adaptterra Awards. 2025. Dostupné z: <http://www.adaptterraawards.cz/cs/databaze/2022/cesky-sobestacny-dum>. [cit. 2025-05-07].
- [6] MARKETING@WILMINGTONDESIGNCO.COM. *6 Areas Of Your Home Where You Lose The Most Heat*. Online. Diamond Heating. Dostupné z: <https://www.diamondheatingalaska.com/about/blog/6-areas-of-your-home-where-you-lose-the-most-heat/>. [cit. 2025-01-24].
- [7] *Průběh teplot zateplené a nezateplené konstrukce*. Online. Průběh teplot zateplené a nezateplené konstrukce. 2001. Dostupné z: <https://www.prozi.cz/cs/43-rodinne-domy-prubeh-teplot-zateplene-a-nezateplene-konstrukce.html>. [cit. 2025-05-07].
- [8] STANGL, Elke. *Peter von Rittinger's Steam Pump (AKA: The First Heat Pump)*. Online. Elkemental Force. 2015. Dostupné z: <https://elkement.art/2015/11/24/peter-von-rittingers-steam-pump-aka-the-first-heat-pump/>. [cit. 2025-03-19].
- [9] CZECH NATURE ENERGY, a. s. *Úvod do tepelných čerpadel*. Online. CNE Czech Nature Energy, a. s. 2024. Dostupné z: <https://www.cne.cz/tepelnacerpada/uvod-do-tepelnych-cerpadel/>. [cit. 2025-03-19].
- [10] ROJKO, Martin. *Predaj tepelných čerpadiel stúpne za päť rokov desaťnásobne. Treba sa pripraviť, vraví výrobca*. Online. ENERGIE-PORTAL.SK. 2022. Dostupné z: <https://www.energie-portal.sk/Dokument/predaj-tepelnych-cerpadiel-stupne-desatnasobne-108470.aspx>. [cit. 2025-03-19].
- [11] *Tepelná čerpadla EKOVY*. Online. Nenalezený vydavatel. 2011. Dostupné z: <https://www.ekovy.cz/jak-funguje-tepelne-cerpadlo.htm>. [cit. 2025-05-07].
- [12] KOŞAN, Meltem a AKTAŞ, Mustafa. Experimental investigation of a novel thermal energy storage unit in the heat pump system. Online. *Journal of Cleaner Production*. 2021, roč. 311. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127607>. [cit. 2025-01-26].

- [13] ABREHA, Berihu Gebreyohannes; MAHANTA, Pinakeswar a TRIVEDI, Gaurav. Thermal performance evaluation of multi-tube cylindrical LHS system. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2020, roč. 179. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115743>. [cit. 2025-01-26].
- [14] *Projekt Elekřina.cz*. Online. 2014. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/uniky-tepla-v-dome>. [cit. 2025-01-23].
- [15] *ATREA*. Online. 2024. Dostupné z: <https://atrea.eu/cs/vyrobky/vetrani-rodinnych-domu/koncovy-uzivatel-investor-rd/>. [cit. 2025-01-26].
- [16] SANITINO. *Rekuperace: co to je a proč rekuperaci pořídít do domu?* Online. Sanitino.cz. 2008. Dostupné z: <https://www.sanitino.cz/rekuperace-co-to-je-a-proc-rekuperaci-poridit-do-domu>. [cit. 2025-01-26].
- [17] *Co je to rekuperace*. Online. Luftuj.cz. 2021. Dostupné z: <https://www.luftuj.cz/clanky/co-je-to-rekuperace/>. [cit. 2025-05-07].
- [18] SEVENTILATION. *Centrální nebo decentrální rekuperace? Co je pro mě to pravé? Poradíme Vám!*. Online. SEVentilation. Dostupné z: <https://www.seventilation.cz/centralni-nebo-decentralni-rekuperace/>. [cit. 2025-02-04].
- [19] FROGI DESIGN S.R.O. *Orientační ceník*. Online. TZB Vysočina s.r.o. 2025. Dostupné z: <https://www.tzb-vysocina.cz/cenik/>. [cit. 2025-02-04].
- [20] STIEBEL ELTRON GMBH & CO. KG (DE). *Jaká je cena rekuperace?* Online. STIEBEL ELTRON. 2025. Dostupné z: <https://www.stiebel-eltron.cz/cs/onas/zajimave-clanky/zajimave-clanky/jaka-je-cena-rekuperace.html>. [cit. 2025-02-04].
- [21] S.R.O, eBRÁNA. *Rekuperace vzduchu - orientační ceník pro váš byt i dům*. Online. Orientační ceník pro váš byt i dům. 2025. Dostupné z: <https://www.brana-bydleni.cz/novinka-rekuperace-vzduchu---orientacni-cenik-pro-vas-byt-i-dum>. [cit. 2025-02-04].
- [22] LÁZOKOVÁ, Eva. *Jaká je cena rekuperace pro běžný rodinný dům?* Online. Nasestrecha.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.nasestrecha.cz/clanky/jaka-je-cena-rekuperace-pro-bezny-rodinny-dum/>. [cit. 2025-02-04].
- [23] *Energetický soběstačný dům*. Online. Viessmann CZ. 2025. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/technologie/fotovoltaika/energeticky-sobestacny-dum.html>. [cit. 2025-01-27].
- [24] *Nová zelená úsporám*. Online. SFŽP ČR. Dostupné z: <https://www.sfzp.cz/dotace-a-pujcky/nova-zelena-usporam/>. [cit. 2025-01-27].
- [25] TECHNICKAZ. *ERÚ: Spotřeba v ČR se za rok 2023 snížila o 4,1 %*. Online. Technicka-zarizeni.cz - odborný portál zabývající se problematikou vyhrazených technických zařízení dle zákona č. 250/2021 Sb. a příbuzných oborů. 2022. Dostupné z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/eru-spotreba-v-cr-se-za-rok-2023-snizila-o-41/>. [cit. 2025-01-24].
- [26] S.R.O., Pixman. *Alternativní zdroje energie: Budoucnost šetrné výroby elektriny*. Online. SPP. Dostupné z: <https://www.spp.cz/magazin/alternativni-zdroje-energie-budoucnost-setrne-vyroby-elektriny>. [cit. 2025-01-25].
- [27] S.R.O., Pixman. *Zdroje energie v ČR: Jak funguje česká energetika?* Online. SPP. Dostupné z: <https://www.spp.cz/magazin/zdroje-energie-v-cr-jak-funguje-ceska-energetika>. [cit. 2025-01-24].

- [28] *Elektrárny Prunéřov*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. 2024. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elekt%C3%A1rny_Prun%C3%A9%C5%99ov. [cit. 2025-05-07].
- [29] *Infocentrum a vodní elektrárna Orlik*. Online. PR Deník. 2021. Dostupné z: <https://pr.denik.cz/cesty-mesty/infocentrum-a-vodni-elektrarna-orlik-20210615.html>. [cit. 2025-05-07].
- [30] FG FORREST, a.s. *Domácí solární elektrárna: Jaká je její cena?* Online. Skupina ČEZ - Produktová sekce. 2025. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/clanky/fotovoltaika/domaci-solarni-elektrarna-jaka-je-jejji-cena-174067>. [cit. 2025-01-25].
- [31] *Klasické, ostrovní a hybridní: Solární elektrárny v kostce*. Online. Alza.cz. 2019. Dostupné z: <https://www.alza.cz/solarni-elektramy-hybridni-ostrovní-klasicke>. [cit. 2025-05-07].
- [32] UŠETŘENO.CZ S.R.O. (INFO@USETRENO.CZ). *Domácí výroba elektřiny – realita, nebo sci-fi?* Online. Realita, nebo sci-fi? | Ušetřeno.cz. 2010. Dostupné z: <https://www.usetreno.cz/clanky/domaci-vyroba-elektřiny/>. [cit. 2025-01-25].
- [33] BEKOVÁ, Dana. *Jak si zařídit domácí větrnou elektrárnu?* Online. MAX Reality. 2022. Dostupné z: <https://www.max-reality.cz/jak-si-zaridit-domaci-vetrnou-elektrarnu/>. [cit. 2025-05-07].
- [34] *Domácí vodní elektrárna: Jaké jsou pořizovací náklady a kdy se investice vrátí?* Online. Elektrina.co. Dostupné z: <https://www.elektrina.co/blog/elektrina/domaci-vodni-elektrarna-jake-jsou-porizovaci-naklady-a-kdy-se-investice-vrati>. [cit. 2025-01-25].
- [35] *Co je tepelná energie?* Online. Ušetřeno.cz. Dostupné z: <https://www.usetreno.cz/slovník-pojmu/tepelná-energie/>. [cit. 2025-05-16].
- [36] VÍTKOVÁ, Eva. *Jaké jsou možnosti transformace českého teplárenství?* Online. Energie 21 - časopis o obnovitelných zdrojích energie. 2024. Dostupné z: <https://energie21.cz/jake-jsou-realne-moznosti-transformace-ceskeho-teplarenstvi/>. [cit. 2025-05-07].
- [37] *Pro studenty, Podpora výuky, Přenos tepla a látky, IPT, Energetický ústav, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně*. Online. 2025. Dostupné z: <https://www.eu.fme.vutbr.cz/pro-studenty-podpora-vyuky-prenos-tepla-a-latky>. [cit. 2025-05-16].
- [38] *Teplárenství - Zdroje*. Online. Zdroje: mojeEnergie. Dostupné z: <https://www.mojeenergie.cz/cz/teplarenstvi-zdroje>. [cit. 2025-05-16].
- [39] ÇENGEL, YUNUS A. a BOLES, MICHAEL A. *THERMODYNAMICS - AN ENGINEERING APPROACH*. 8. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339817-4.
- [40] *Průměrné venkovní teploty v otopném období pro vybrané lokality*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/26-prumerne-venkovni-teploty-v-otopnem-obdobi-pro-vybrane-lokality>. [cit. 2025-04-28].
- [41] VARGA, Ing. Martin a KUPSA, Ing. Tomáš. *Požadavek na součinitel prostupu tepla konstrukce podlah na zemině, řešení podlah s ohledem na tento požadavek*. Online. TZB-info. 2010. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tepelné>

- izolace/6220-pozadavek-na-soucinitel-prostupu-tepla-konstrukce-podlah-na-zemine-reseni-podlah-s-ohledem-na-tento-pozadavek. [cit. 2025-04-28].
- [42] *Venkovní výpočtové teploty a otopná období dle lokalit*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/25-venkovni-vypoctove-teploty-a-otopna-obdobi-dle-lokalit>. [cit. 2025-04-28].
- [43] JANEBA, Oldřich. *Tepelný odpor zdiva určuje, kolik tepla dům uvnitř udrží*. Online. Stavíme z cihel. 2023. Dostupné z: <https://stavimezcihel.cz/tepelny-odpor-zdiva-urcuje-kolik-tepla-dum-uvnitř-udrži/>. [cit. 2025-04-28].
- [44] *Výpočet prostupu tepla vícevrstvou konstrukcí a průběhu teplot v konstrukci*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/140-vypocet-prostupu-tepla-vicestruvou-konstrukci-a-prubehu-teplot-v-konstrukci>. [cit. 2025-05-22].
- [45] *Normové hodnoty součinitele prostupu tepla UN,20 jednotlivých konstrukcí dle ČSN 73 0540-2: 2011 Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/136-normove-hodnoty-soucinitele-prostupu-tepla-un-20-jednotlivych-konstrukci-dle-csn-73-0540-2-2011-tepelna-ochrana-budov-cast-2-pozadavky>. [cit. 2025-04-28].
- [46] A.S., Dek. *Tepelná izolace Isover EPS GreyWall Plus 220 mm (1 m²/bal.)*. Online. Nenalezený vydavatel. 2025. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/1415205340-eps-greywall-plus-220mm-500x1000-isover-1m2-bal>. [cit. 2025-04-28].
- [47] BULANT, Tomáš. *Stavby s nosnou konstrukcí z CLT panelů*. Online, Diplomová práce, vedoucí Petr Kuklík. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2023. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/107559>. [cit. 2025-05-01].
- [48] A.S., Dek. *Tepelná izolace DEKWOOL G 035r 160 mm (4,8 m²/bal.)*. Online. DEK. 2025. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/1456103150-dekwool-g-035r-160mm-4-8m2-rola>. [cit. 2025-05-01].
- [49] *Vyberte kalkulačku ceny zateplení*. Online. CenaZatepleni.cz. 2025. Dostupné z: <https://cenazatepleni.cz/>. [cit. 2025-05-02].
- [50] PIXA, Josef. *Foukaná minerální izolace ISOVER Gulull*. Online. Nenalezený vydavatel. 2024. Dostupné z: <https://www.izolacepixa.cz/foukana-mineralni-izolace-isover-gulull/>. [cit. 2025-05-05].
- [51] *Hodnoty fyzikálních veličin vybraných stavebních materiálů*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu>. [cit. 2025-05-01].
- [52] A.S., Dek. *Tepelná izolace Austrotherm EPS 100 250 mm (1 m²/bal.)*. Online. Nenalezený vydavatel. 2025. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/1470160764-eps-100-250mm-500x1000-dek-austrotherm-1m2-bal>. [cit. 2025-05-01].
- [53] PETRTYL, Zdeněk. *Vlastnosti a parametry starých dřevěných zdvojených oken*. Online. INKAPO. 2013. Dostupné z: <https://www.inkapo.cz/dotaz/vlastnosti-a-parametry-starych-drevenych-zdvojenych-oken?com>. [cit. 2025-05-02].
- [54] *Jednokřídlé plastové okno trojsklo REHAU Smartline , otvíravo-sklopné pravé 1100 x 1400*. Online. Skladova-okna.cz. 2025. Dostupné z:

- <https://www.skladova-okna.cz/jednokridle-plastove-okno-trojsklo-rehau-smartline-otviravo-sklopne-prave-1100-x-1400.html>. [cit. 2025-05-02].
- [55] *Součinitel prostupu tepla a součinitel spárové průvzdušnosti oken a dveří dle ČSN 73 0540-3 (1994)*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/32-soucinitel-prostupu-tepla-a-soucinitel-sparove-pruvzdusnosti-okna-a-dveri-dle-csn-73-0540>. [cit. 2025-05-02].
- [56] DASHÖFER, Verlag. *Tepelně technické požadavky dveří*. Online. Stavební právo, kontrolní listy, normy, příklady a doporučení pro oblast stavebnictví. 2015. Dostupné z: https://www.stavebniklub.cz/33/tepelne-technicke-pozadavky-dveri-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4Egs_q619u7DQ5Pb8qcOIMoGMB8q2Z8oGSQ/. [cit. 2025-05-02].
- [57] *Pasivní vchodové dveře do domů i firem*. Online. Dlmont.cz. 2025. Dostupné z: <https://www.dlmont.cz/vchodove-dvere-pasivni/>. [cit. 2025-05-02].
- [58] KABRHELOVÁ, Hana. *Požadavky na větrání obytných staveb k 1. 1. 2023*. Online. TZB-info. 2023. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vetrani-klimatizace/24888-pozadavky-na-vetrani-obytnych-staveb-k-1-1-2023>. [cit. 2025-05-01].
- [59] BUREŠ, Jiří. *Vzduch*. Online. Fyzikální a chemické vlastnosti vzduchu. 2002. Dostupné z: <https://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>. [cit. 2025-05-01].
- [60] *Venkovní výpočtové teploty a otopná období dle lokalit*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/25-venkovni-vypoctove-teploty-a-otopna-obdobi-dle-lokalit>. [cit. 2025-05-02].
- [61] MARŠÁLEK, Michal. *Rekupační jednotka Ventbox II 400 EVR Premium*. Online. Nenalezený vydavatel. 2025. Dostupné z: <https://www.chytry-obchod.cz/rekuperacni-jednotka-Ventbox-II-400-EVR-Premium?tab=description#anch1>. [cit. 2025-05-03].
- [62] *Fotovoltaika pro rodinné domy*. Online. Bc engineering s.r.o. Dostupné z: <https://bce.cz/rodinne-domy/>. [cit. 2025-05-03].
- [63] *Průměrné měsíční doby slunečního svitu ve vybraných lokalitách ČR*. Online. TZB-info. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/99-prumerne-mesicni-doby-sluncenihovo-svitu-ve-vybranych-lokalitach-cr>. [cit. 2025-05-03].
- [64] *JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Online. European Commission. Dostupné z: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/. [cit. 2025-05-17].
- [65] NĚMEC, Vít a SULÁN, Vojtěch. *Chytré řešení*. Online. SmartSpot. 2024. Dostupné z: <https://www.smartspot.cz/>. [cit. 2025-05-05].
- [66] *Tepelné čerpadlo 4 kW LG R32 IWT*. Online. Lgtepelnacerpadla.cz. Dostupné z: <https://www.lgtepelnacerpadla.cz/tepelne-čerpadlo-4-kw-lg-r32-iwt?com>. [cit. 2025-05-04].
- [67] DUFKA, Aleš; VEVEKOVÁ, Jana a MODLÍK, Miloslav. *Zemní plyn v České republice 2010–2020*. Online. Nenalezený vydavatel. 2021. Dostupné z: https://mpo.gov.cz/assets/cz/energetika/statistika/plynna-paliva/2022/1/Zemni-plyn-2010-2020_1.pdf. [cit. 2025-03-19].
- [68] *Jsme vaše energie*. Online. Teplárny Brno. Dostupné z: <https://www.teplarny.cz/>. [cit. 2025-05-17].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
c_{vzduchu}	Měrná tepelná kapacita vzduchu	$\frac{J}{\text{kg} \cdot K}$
d_{izolace}	Minimální tloušťka tepelné izolace	m
$d_{\text{izolace,zvolená}}$	Zvolená tloušťka tepelné izolace	m
$E_{\text{elektriny}}$	Spotřebována elektrická energie tepelným čerpadlem	Wh
H_{objektu}	Výška stropů pro dvě podlaží	m
$n_{\text{panelů,150h}}$	Potřebný počet panelů na pokrytí spotřebované energie za určité měsíce	–
$n_{\text{panelů,rok}}$	Potřebný počet panelů na pokrytí spotřebované energie za celý rok	–
n_{slunce}	Počet hodin svítícího slunce za 2024	h
$n_{\text{slunce,září}}$	Počet hodin svítícího slunce za září 2024	h
n_{vzduchu}	Hodnota intenzity větrání	h^{-1}
P_{panelu}	Výkon panelu	W
$Q_{\text{celková}}$	Celkové tepelné ztráty objektu	W
$Q_{\text{elektriny}}$	Spotřeba elektrické energie za rok 2024	W
$Q_{\text{elektriny,září}}$	Spotřeba elektriny za září 2024	Wh
Q_{podlahou}	Tepelné ztráty podlahou	W
$Q_{\text{stěn,před}}$	Tepelné ztráty pro zeď bez zateplení	W
$Q_{\text{stěn,po}}$	Tepelné ztráty zateplené stěny	W
$Q_{\text{výměna,vzduchu}}$	Požadovaná výměna vzduchu	$\frac{m^3}{h}$
$Q_{\text{výpočtová}}$	Výpočtová hodnota tepelných ztrát	W
Q_{vzduchu}	Tepelné ztráty větráním	W
R_{cihel}	Tepelný odpor pálených cihel	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
R_{izolace}	Tepelný odpor izolační vrstvy	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$R_{\text{izolace,reálná}}$	Tepelný odpor izolace	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
R_{se}	Tepelný odpor vzduchu zvenku	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
R_{si}	Tepelný odpor vzduchu zevnitř	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$R_{\text{stěn,čsn}}$	Doporučená hodnota tepelného odporu stěn	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
$R_{\text{stěn,po}}$	Tepelný odpor zateplené stěny	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$

$R_{\text{stěn,před}}$	Tepelný odpor nezateplené stěny	$\frac{m^2 \cdot K}{W}$
SCOP	Hodnota SCOP tepelného čerpadla	–
$S_{\text{pūdorys}}$	Pūdorysná plocha objektu	m^2
$T_{\text{uvnitř}}$	Teplota uvnitř objektu	$^{\circ}C$
T_{venku}	Průměrná venkovní teplota během topnou sezónu	$^{\circ}C$
$T_{\text{výpočtová}}$	Výpočtová venkovní teplota	$^{\circ}C$
T_{zeminy}	Teplota zeminy	$^{\circ}C$
U_{cihel}	Součinitel prostupu tepla pálených cihel	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$U_{\text{stěn,čsn}}$	Doporučená hodnota součinitele prostupu tepla	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$U_{\text{stěn,po}}$	Součinitel prostupu tepla zateplené stěny	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$U_{\text{stěn,před}}$	Součinitel prostupu tepla před zateplením	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
V_{vzduchu}	Objem vzduchu v domě	m^3
λ_{EPS}	Součinitel tepelné vodivosti tepelné izolace	$\frac{W}{m \cdot K}$
ρ_{vzduchu}	Hustota vzduchu	$\frac{kg}{m^3}$
ΔT	Rozdíl teplot pro průměrnou venkovní teplotu	K
ΔT_{zem}	Rozdíl teplot pro teplotu zeminy	K
$\Delta T_{\text{výpočtová}}$	Rozdíl teplot pro výpočtovou teplotu	K

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – První energeticky soběstačný dům v ČR [5].....	11
Obr. 2 – Průběh teplot konstrukcí [7].	12
Obr. 3 – Schéma tepelného čerpadla [11].	13
Obr. 4 – Schéma domu s rekuperační jednotkou [17].....	14
Obr. 5 – Elektrárna Prunéřov [28].....	16
Obr. 6 – Vodní elektrárna orlík [29].	17
Obr. 7 – Orientační plánec domácí solární elektrárny [31].	18
Obr. 8 – Domácí větrná elektrárna [33].	18
Obr. 9 – Způsoby šíření tepla [37].	19
Obr. 10 – Teplárna Brno [68].....	20
Obr. 11 – Model domu.	21
Obr. 12 – Graf návratnosti zateplení.....	30
Obr. 13 – Graf návratnosti rekuperace.....	32
Obr. 14 – Tabulka vstupních a výstupních hodnot [64].....	34
Obr. 15 – Porovnání vyrobené energie v jednotlivých měsících [64].....	34
Obr. 16 – Schéma řízení spotřeby energie [65].....	35
Obr. 17 – Graf návratnosti fotovoltaiky.....	36
Obr. 18 – Graf návratnosti tepelného čerpadla.	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Průměrné venkovní teploty pro období topné sezóny [40].	22
Tab. 2 – Tepelné ztráty střechou.	25
Tab. 3 – Tepelné ztráty stropem na půdu.	26
Tab. 4 – Tepelné ztráty podlahou.	27
Tab. 5 – Tepelné ztráty okny.	28
Tab. 6 – Tepelné ztráty dveří.	29
Tab. 7 – Celkové tepelné ztráty prostupem tepla.	30
Tab. 8 – Celková pořizovací cena a úspora rekuperace	31
Tab. 9 – Statistiky za rok 2024.	33
Tab. 10 – Celková pořizovací cena a úspora.	35
Tab. 11 – Celková pořizovací cena a úspora.	38