EESTI MAAÜLIKOOL
Tehnikainstituut

Siim Holtsmann

MAAKÜTTE SÜSTEEMI EFEKTIIVSUSE SUURENDAMISE VÕIMALUSED PÄIKESEENERGIA ABIL

POSSIBILITIES FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF GEOTHERMAL HEATING SYSTEM BY SOLAR ENERGY

Magistritöö
Energiakasutuse õppekava

Juhendaja: dotsent Eugen Kokin, *PhD*

Tartu 2015

LÜHIKOKKUVÕTE

Holtsmann, S. Maaküttе süsteemi efektiivsuse suurendamise võimalused päikeseenergia abil. Magistritöö, 2 köites. – Tartu: EMÜ, 2015. 65 lk, 28 joonist, 13 tabelit, formaadis A4, eesti keeles.

Magistritöö eesmärk on välja pakkuda lahendused maaküttе süsteemi efektiivsuse tõstmiseks päikesepaneelide abil. Lõputöö ülesande täitmiseks tutvustatakse soojuspumpasid, päikesepaneele ja soojusenergia salvesteid. Soojuspumpade ja päikesepaneelide puhul on tutvutud nende kasutamisega Euroopas ning Eestis ja tutvustatakse erinevaid tüüpe. Soojusenergia salvestite korral käsitletakse nende kontseptsiooni üldiselt ning tutvutatakse lähemalt tajutava soojuse salvesteid. Lisaks pakutakse välja kaks maaküttе süsteemi lahendust, mis on kombineeritud päikesekollektoritega ja analüüsitakse kui suurt efektiivsust on nendega võimalik saavutada, kui üldse on võimalik.

Mõlema süsteemi eesmärk on tõsta maasoojuspumba efektiivsust ehk COP'd. Selleks on analüüsitud neid süsteeme, tehti erinevaid arvutusi ja leiti hinnangulised tulemused. Teada oli, et küttevajadus oli 25 563 kW·h ja selle vajaduse rahuldamiseks kulutas 10 kW maasoojuspump 6 753 kW·h elektrienergiat aastas ja keskmiseks COP'ks oli 4,161. Pärast arvutusi leiti, et süsteem 1 maasoojuspump kulutaks 6 030 kW·h elektrienergiat, mis on 723 kW·h väiksem esialgsest ja aasta keskmine COP oleks 4,452. Süsteem 2 elektrikuluks leiti 6 529 kW·h ja COP'ks kujunes 4,475. Süsteem 1 võimaldab vähendada maasoojuspumba elektrikulu hinnanguliselt 10,7 % ja süsteem 2 hinnanguliselt 3,3 %. Põhinedes leitud tulemustele eelistaks süsteem 1, sest see võimaldab suuremat energia säästu, tõstab maasoojuspumba efektiivsust ja samas suurendab päikeseenergia kasutamist. Mida suurem on päikesekollektorite plokk ja soojusenergia salvesti, seda suurem on kokkuhoid maasoojuspumba elektrikulult. Selliste süsteemide puhul tuleks arvestada suurte investeerimiskuludega.

Võtmesõnad: maasoojuspump, päikesekollektor, soojusenergia salvesti, soojusenergia, efektiivne küttesüsteem.

ABSTRACT

Holtsmann, S. Possibilities for Increasing the Efficiency of Geothermal Heating System by Solar Energy. Master's thesis, bound in 2 copies. – Tartu: EMÜ, 2015. 65 pages, 28 figures, 13 tables, format A4, in Estonian language.

The aim of the Master's thesis is to offer possibilities for increasing the efficiency of geothermal heating system by solar energy. To solve the mission heat pumps, solar panels and thermal energy storages are introduced. The usage in Europe and Estonia and also different types of heat pumps and solar panels are being introduced. Overall conception of thermal energy storage is being handled and sensible thermal energy storagies are examined a bit more thoroughly. Additionally two geothermal heating systems are proposed, which combine solar collectors and they're efficiency was analyzed.

The aim of both systems was to increase the efficiency of geothermal heat pump otherwise COP. For this purpose they were analyzed. It was known that heating demand is 25,563 kW·h and use of electricity of 10 kW geothermal heat pump is 6,753 kW·h per year, which made annual COP 4.161. After the calculations the system 1 used 6,030 kW·h of electricity and the annual COP was 4.452. System 2 used 6,529 kW·h and the COP was 4.475. System 1 is able to decrease the usage of electricity by approximately 10.7 % and system 2 approximately 3,3 %. Based on these values system 1 would be preferred, because it provides bigger savings of electricity, higher increase of the efficiency of geothermal heat pump and bigger fraction of solar energy used. The bigger the block of solar collectors and energy storage used, the higher the savings of electricity of geothermal heat pump, but high investment costs must be condsidered.

Keywords: geothermal heat pump, solar collector, thermal energy storage, thermal energy, efficient heating system.

SISUKORD

SISSEJUHATUS 5
1. SOOJUSPUMPADEST JA PÄIKESEENERGIA KASUTAMISEST ÜLDISELT 6
1. Soojuspumpade kasutamine Euroopas ja Eestis ning nende erinevad tüübid 6
1.1.1. Soojuspumpade kasutamine Euroopas 6
1.1.2. Soojuspumpade kasutamine Eestis 8
1.1.3. Soojuspumpade tööpõhimõte 10
1.1.4. Maasoojuspump 13
1.1.5. Õhksoojuspump 15
1.1.6. Õhk-õhk soojuspump 16
1.1.7. Õhk-vesi soojuspump 18
1.1.8. Väljatõmbeõhu soojuspumbad 20
1.2. Päikeseenergia kasutamisest üldiselt 21
1.2.1. Päikeseenergia kasutamine Euroopas ja Eestis 21
1.2.2. Päikesekollektor 22
1.2.3. Plaatkollektor või vaakumtorudega kollektor 24
1.2.4. Päikesepaneel 25
2. SOOJUSENERGIA SALVESTI 27
2.1. Soojusenergia salvesti kontseptsioon ja erinevad tüübid 27
2.2. Põhjavee soojussalvesti 28
2.3. Puuraugu soojusenergia salvesti 29
2.4. Maa-aluste tühimike soojusenergia salvesti 32
3. KAHE MAAKÜTTE SÜSTEEMI ARVUTUS JA ANALÜÜS 33
3.1. Hoone konstruktsioon ja küttevajadus 33
3.2. Päikesepaneelide kombineerimine küttesüsteemiga 35
3.3. Võimalikud lahendused maakütte süsteemi efektiivsuse tõstmiseks 38
3.4. Kahe maakütte süsteemi võrdlus 54
KOKKUVÕTE 57
KIRJANDUS 59
POSSIBILITIES FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF GEOTHERMAL HEATING SYSTEM BY SOLAR ENERGY 63
Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta 65

SISSEJUHATUS

Käesolev magistritöö on koostatud teemal „Maaküttе süsteemi efektiivsuse suurendamise võimalused päikeseenergia abil“, mis sai valitud selle aktuaalsuse tõttu. Kasvuhoone-gaaside ja fossiilsete kütuste vajaduse vähendamiseks on välja töötatud erinevaid lahendusi mitmetes valdkondades, millest üks olulisemaid osasi on elamute ja ruumide kütmine. Tänu sellele on päevakorrale kerkinud alternatiivsete energiaallikate kasutamine, olemasolevate energiaallikate ning küttesüsteemide efektiivsem kasutamine, mille on põhjustanud energia hindade pidev tõus, suundumus energia- ja keskkonnasäästule.

Alternatiivsete energiaallikate osakaalu suurendamiseks, energiakulude vähendamiseks ning küttesüsteemide efektiivsemaks muutmiseks on välja töötatud mitmeid lahendusi, mis on võimalised neid probleeme lahendama ja tasakaalustama energia nõudlust ning tootmist. Taastuvenergiaallikate kättesaadavus õigel ajal ja õiges kohas on nende suurimaks probleemiks, mille võimalikke lahendusi käesolevas töös välja pakutakse.

Magistritöö eesmärk on välja pakkuda lahendused maaküttе süsteemi efektiivsuse tõstmiseks päikesepaneelide abil. Lõputöö ülesande täitmiseks tutvustatakse soojuspumpasid, päikesepaneele ja soojusenergia salvesteid. Soojuspumpade ja päikesepaneelide puhul on tutvutud nende kasutamisega Euroopas ning Eestis ja tutvusta-takse erinevaid tüüpe. Soojusenergia salvestite korral käsitletakse nende kontsep-tsiooni üldiselt ning tutvutatakse lähemalt tajutava soojusenergia salvesteid. Lisaks paku-takse välja kaks maaküttе süsteemi lahendust, mis on kombineeritud päikesekollektoritega ja analüüsitakse kui suurt efektiivsust on nendega võimalik saavutada, kui üldse on võimalik.

Magistritöö sisulise osa võib liigitada järgnevalt:

1. Tutvustatakse soojuspumpade ja päikesepaneelide kasutamist Euroopas ning Eestis ja nende erinevad kasutusel olevaid tüüpe;
2. Käsitletakse soojusenergia salvestite kontseptsiooni ja tutvustatakse lähemalt tajutava soojusenergia salvesteid;
3. Pakutakse välja kaks maaküttе süsteemi koos päikesekollektoritega ja analüüsitakse nende efektiivsust.

1. SOOJUSPUMPADEST JA PÄIKESEENERGIA KASUTAMISEST ÜLDISELT

1. Soojuspumpade kasutamine Euroopas ja Eestis ning nende erinevad tüübid

1.1.1. Soojuspumpade kasutamine Euroopas

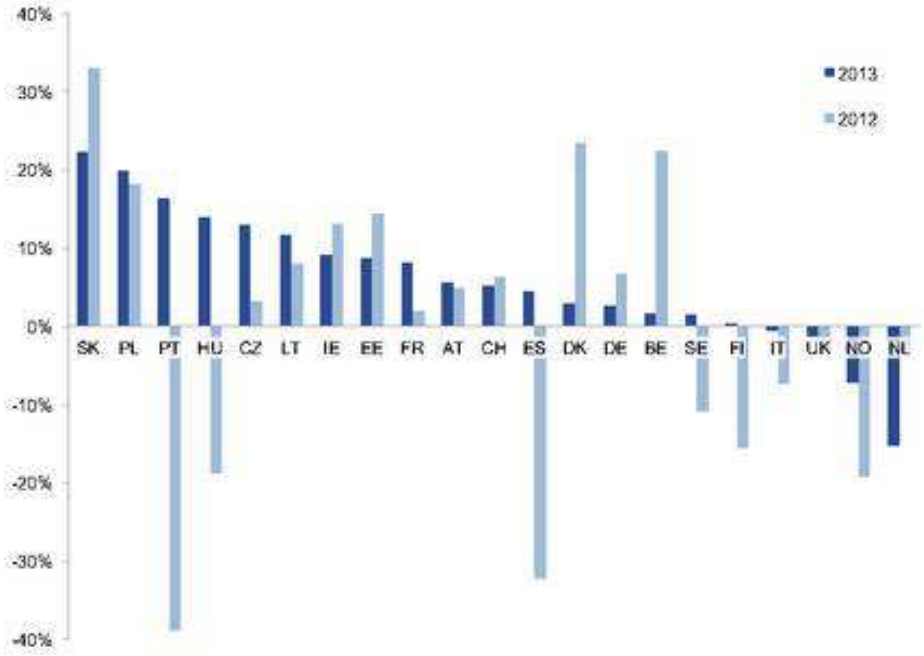
Paljudel Euroopa riikidel ei ole võimalik kasutada kõiki taastuvenergia allikaid piisavalt efektiivselt ja majanduslikult otstarbekalt, kuid soojuspumpade kasutamine on üks võimalikest lahendustest, mis kasvavat energiavajadust võiks rahuldada. Euroopa soojuspumpade turul on soojuspumpade müük 2013. aasta seisuga tõusu teel, kui täheldati 3% tõusu. Vastavalt Euroopa Soojuspumpade Liidu raportile müüdi 2013. aastal 21 vaadeldavas Euroopa riigis 769 879 ühikut (tabel 1.1). Arvestades, et soojuspumba kasulik tööiga on umbes 20 aastat ületas 2013. aasta lõpus ladustatud soojuspumpade summaarne arv 6,74 miljonit (tabel 1.1). [1]

Tabel 1.1. Soojuspumpade müük ja ladustamine Euroopas 2005–2013 [1]

Aasta	EU – 11 summa	EU – 21 summa	Ladustatud soojuspumbad
2005	446 037	–	1 015 607
2006	504 428	–	1 525 401
2007	568 131	–	2 114 519
2008	770 538	–	2 918 976
2009	686 076	–	3 644 998
2010	671 392	800 388	4 437 530
2011	666 873	808 591	5 237 003
2012	621 818	750 436	5 979 042
2013	636 639	768 879	6 741 521

Tabelist 1.1 on näha, et soojuspumpade ostetud ühikute arv on kasvanud püsivalt kuni 2011. aastani, välja arvatud 2009, mida võis mõjutada maailma tabanud majanduslangus. Soojuspumpade müügis kujunes raskeks aastaks 2012, mis aasta hiljem 2013 pöörati uuesti tõusu teele. Viisteist riiki 21-st vaadeldavast riigist suutsid soojuspumpade müügi 2013. aastal pöörata positiivseks (joonis 1.1). Kõige enam mõjutasid Euroopa turu tõusu kahe

suurima turu (Prantsusmaa ja Rootsi) soojuspumpade müükide positiivne areng. Mõned riigid suutsid kahekohalist tõusu säilitada isegi kaks aastat järjest. Riigid, nagu Portugal, Hispaania, Rootsi, Soome ja Ungari, suutsid oma turul teha täieliku pöörde, kus 2012. langus muudeti 2013. tõusu teele.



Joonis 1.1. Euroopa 21 riigi soojuspumpade müügi reitingud aastatel 2012 ja 2013 [1]

Soojuspumpade turg jaguneb põhiliselt kolme suurema trendi vahel: õhk, kuuma sanitaarvee soojuspumbad ja suuremad soojuspumbad, mis kütavad kommerts-, industriaal- või rajooni hooneid. Õhk on ja tõenäoliselt jääb kõige dominantsemaks energiaallikaks soojuspumpade puhul. Kuuma sanitaarvee soojuspumbad on Euroopas kõige kiiremini kasvav soojuspumba tüüp. See kategooria on kõige jõudsamini kasvav soojuspumba tüüp, mis sisaldab endas nii soojuspumpa ja kuuma vee säilitamise mahutit. Neid müüakse kas eraldi üksusena soojuspump ja mahuti koos või siis süsteemina, mis sisaldab soojuspumpa ja eraldi mahutit. Suurte soojuspumpade korral kasutatakse tihti geo- või hüdroenergiat. Samuti nende soojuspumpade korral on õhk üheks energiaallikaks. Need süsteemid parendavad energia efektiivsust, kuid ei kasuta taastuvaenergia allikaid. [1]

Teada on, et küttesektori kasvu üks suurimaid mõjutajaid on ehitussektori areng, mille väljavaade ei ole hea, kuid siiski soojuspumpade müük vaikselt kasvab. Soojuspumpade kasvava vajaduse on põhiliselt välja kujundanud aina rangemad hoonete energiatõhusus nõuded. Vastavalt nõuetele on soojuspumbad eelistatud valikuks, juhul kui hoonesse

paigaldatakse täiesti uus küttesüsteem. Energiatõhusus nõuete laienemine hoonete renoveerimisele on samuti kasulik olnud soojuspumpade müügile. Soojuspumpade müüki piiravad kõrged investeerimiskulud ning kõrge elektrienergia hind. [1]

2013. aastal on soojuspumpade installeeritud võimsus üle 24 GW, mis tootis umbes 13 TW·h kasulikku energiat, integreerides 8,26 TW·h taastuvat energiat kütmise ja jahutamisega ning hoides ära 2,12 Mt CO_2 ekvivalendi emissiooni. Lisaks säästeti 2013. aastal 4,83 TW·h primaarenergiat, mille tulemusel vähendati 10,56 TW·h võrra lõpptarbimist. Alates 1994. aastast on kokku installeeritud üle 6,7 miljoni soojuspumba, mis on kokku peaaegu 224 GW installeeritud soojuslikku võimsust. Kõik installeeritud soojuspumbad toodavad 120,8 TW·h kasulikku energiat, millest 77,8 TW·h on taastuv. Primaarenergiat säästeti 47,1 TW·h ja lõppenergiat 99,1 TW·h. [1]

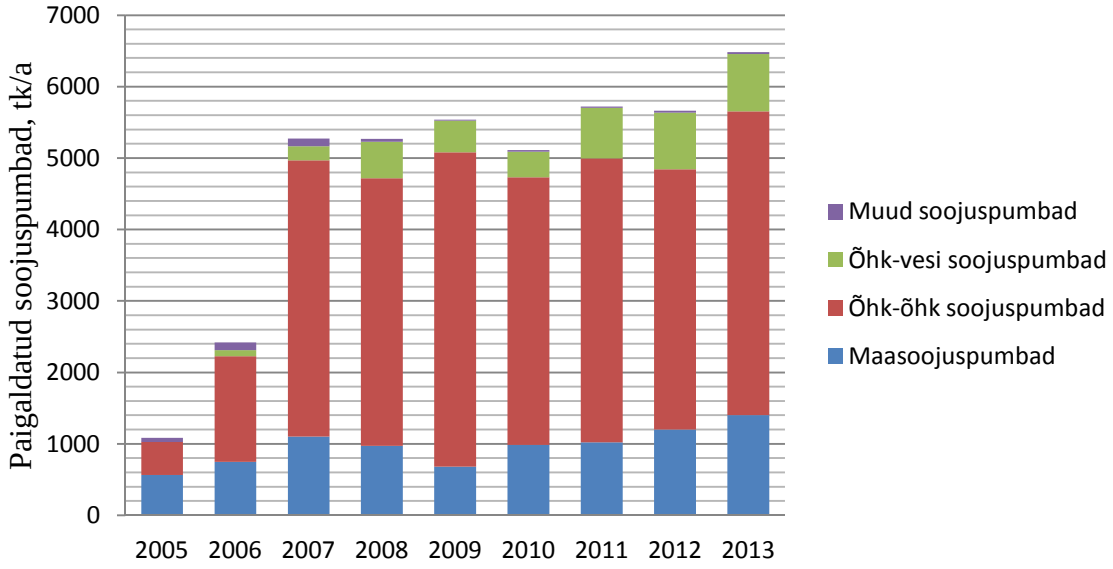
1.1.2. Soojuspumpade kasutamine Eestis

Eestis ühendab soojuspumpasid maaletoovaid ja edasimüüvaid ettevõtteid organisatsioon nimega Eesti Soojuspumba Liit (ESPL), kes kogub ka andmeid soojuspumpade kasutamise kohta. ESPL'i poolt on heaks kiidetud reeglid ja nõuded, mida ESPL'iga liitunud firmad peavad järgima. ESPL'i peaeesmärkideks on alternatiivse taastuva looduseenergia propageerimine, ühingu esindamine kõikidel tasanditel, soojuspumba propageerimine ning lisaks säilitada aus konkurents soojuspumbaturul, teenuse kvaliteet ja töötajate kõrge professionaalsus. [2]

Tabel 1.2. Soojuspumpade paigaldamine aastate lõikes [3]

Aasta	Maasoojus-pumbad, tk/a	Õhk-õhk soojuspumbad, tk/a	Õhk-vesi soojuspumbad, tk/a	Muud soojus-pumbad, tk/a	Kokku
2005	565	461	2	57	1085
2006	750	1476	87	107	2420
2007	1100	3867	199	109	5275
2008	970	3747	510	43	5270
2009	680	4402	440	16	5538
2010	985	3746	360	21	5112
2011	1020	3975	710	16	5721
2012	1200	3645	790	26	5661
2013	1400	4254	800	27	6481

Eestis on soojuspumpasid paigaldatud alates 1993. aastast ja selle aja jooksul on hinnanguliselt paigaldatud üle 88 200 soojuspumba, millest umbes 78 200 on õhksoojuspumbad ja umbes 10 000 on maasoojuspumbad. Eesti Statistika Ameti poolt koostatud uuringus [4] selgus, et eestlased kasutavad soojuspumpasid 3,3% eluruumide kütmiseks ja sooja veega varustatakse 0,9% eluruumidest. Soojuspumpade kasutamise osakaal on üsna väike, kuid nende kasutusele võtmine suureneb iga aastaga (tabel 1.2 ja joonis 1.2). [2]



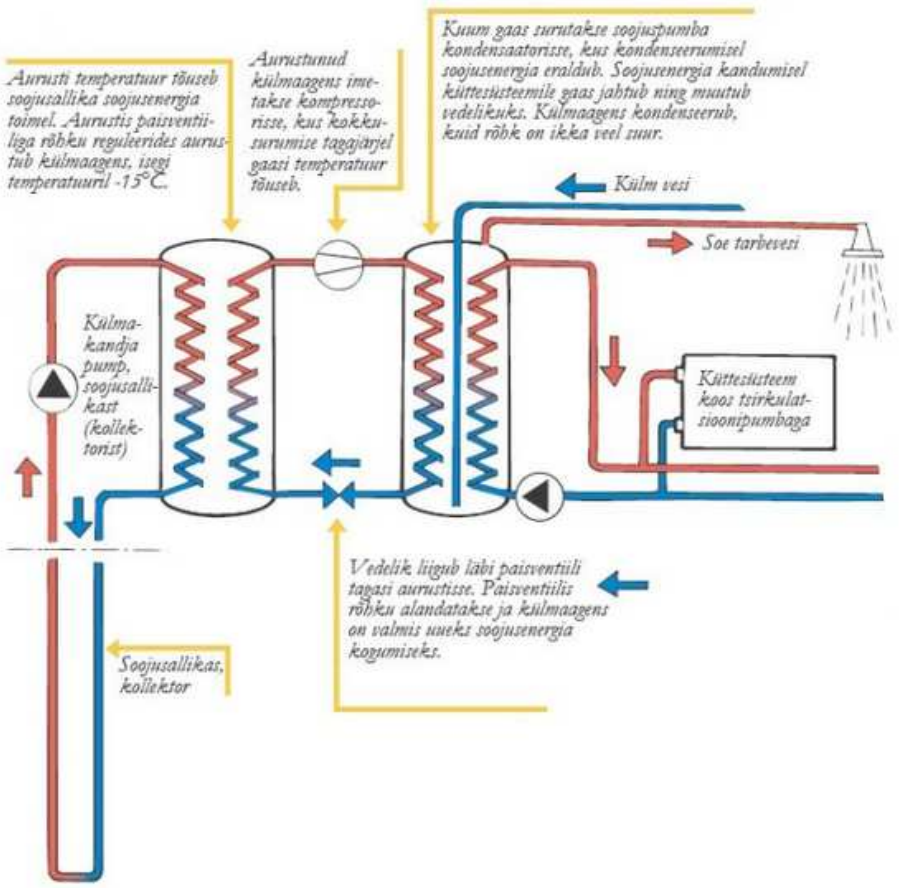
Joonis 1.2. Soojuspumpade paigaldamine aastate lõikes [3]

ESPL'i poolt saadud andmete põhjal on koostatud tabel 1.2 ja selle põhjal joonis 1.2. Andmed ei sisalda kõiki soojuspumpasid, sest ESPL'il pole informatsiooni kõikide pumpade kohta, mis kasutusele võetud firmade kaudu väljaspool organisatsiooni. 2014. aasta alguseks olid ESPL'i liikmed paigaldanud 42 030 soojuspumpa, millest 8 208 on maasoojuspumbad, 31 029 õhk-õhk soojuspumbad, 2340 õhk-vesi soojuspumbad ja 453 muud soojuspumbad. Nende soojuspumpade kõguvõimsus on umbes 320 MW, mis toodaksid hinnanguliselt 880 GW·h soojusenergiat, kulutades 290 GW·h elektrienergiat. Alates 1993. aastast on kõikide paigaldatud soojuspumpade koguvõimsus hinnanguliselt 530 MW. [3]

1.1.3. Soojuspumpade tööpõhimõte

Suurim energiaallikas Päike soojendab maad, õhku ja veekogusid ning see soojusenergia on suhteliselt lihtsalt transporditav ja kasutamiseks valmis. Soojuspumpade abil on võimalik ümbritsevasse keskkonda salvestunud soojusenergia kasutada hoonete küttevajaduse katmiseks, saastamata keskkonda ja hoides kokku maavarasid. Soojuspumpa kasutades on võimalik luua küttesüsteem, mis vähendab küttekulusid, on keskkonnasõbralik ja lisaks klassifitseerub taastuvate energiaallikate hulka. Kui küttesüsteem kasutab seadeldise käitamiseks näiteks tuule või päikseenergiat on võimalik energiakasutus viia nulli lähedale. Soojuspump on seade, millega köetakse eluruume ja tarbevett, kuid on võimalik ka jahutada eluruume. [5]

Vastupidiselt külmutuskapile transpordib soojuspump soojusenergia õhust, maapinnast või veest hoonesse. Soojuspump koosneb neljast põhiosast, milleks on aurusti, kondensaator, kompressor (rõhu tõstmiseks) ja paisventiil (rõhu langetamiseks), mis kõik on ühendatud torustike abil suletud süsteemiks. Suletud süsteemis ringleb külmaagens, mis süsteemi eri osades on kas vedelas või gaasilises olekus. Külmaagensi puhul on ära kasutatud vedelike omadust, kus vedeliku keemistemperatuur ehk keemispunkt sõltub rõhust. Rõhu tõstmisel vedeliku keemispunkt on kõrgem ja rõhu langetamisel keemispunkt on madalam kui normaalrõhu korral. Külmaagensi eripäraks on väga madal keemispunkt, mis näiteks normaalrõhu korral on –40 ^{o}C. See võimaldabki soojuspumpadel kanda soojust külmema temperatuuriga keskkonnast soojema temperatuuriga keskkonda.[5]



Joonis 1.3. Soojuspumba põhimõtteskeem [5]

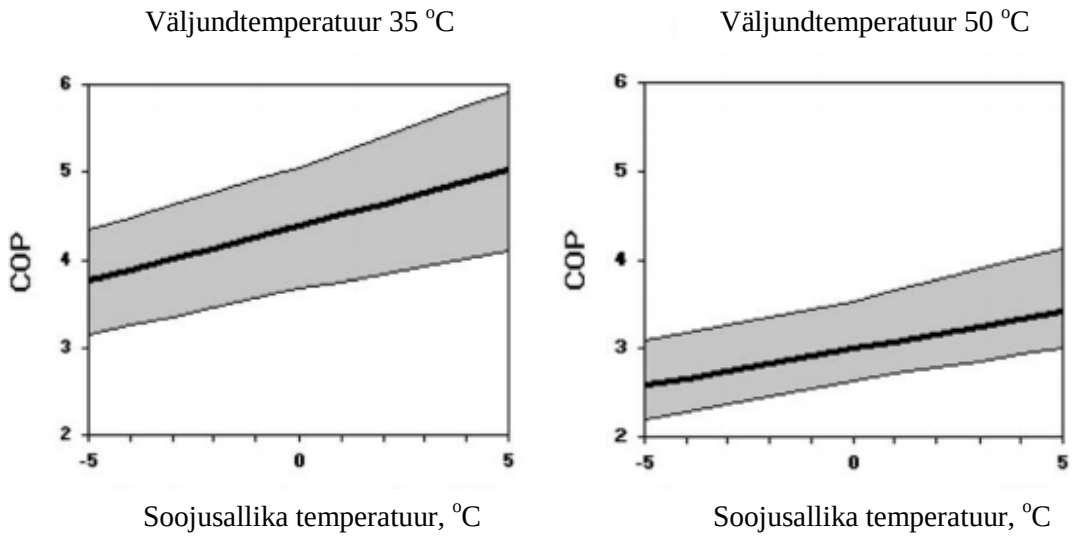
Põhimõtteskeemil (joonis 1.3) on kujutatud soojuspumba tööpõhimõtte maasoojuspumba näitel. Teiste soojuspumpade tööpõhimõte on analoogne, kuid erinevus seisneb ainult asjaolus, kust soe võetakse. Külmakandja abil kogutakse maapinda salvestunud soojus kollektori kaudu soojuspumba kappi. Soojust kandev külmakandja transporditakse külmkandja pumba abil aurustisse, kus soojusenergia kantakse üle teises kinnises süsteemis ringlevale külmaagensile. Tänu väga madalale keemispunktile külmaagens aurustub ja see imetakse kompressorisse. Kompressoris tõstetakse rõhku ja külmaagensi temperatuur hakkab selle tõttu tõusma. Kuum gaas liigub kondensaatorisse, kus soojus kantakse üle maja küttesüsteemile ja tarbeveele. Gaasiline külmaagens kondenseerub ja pärast paisventiilis rõhu alandamist on vedelik valmis uueks soojuseenergia kogumiseks. Paisventiili ülesandeks on rõhu alandamise kõrval ka külmaagensi vooluhulga reguleerimine, et hoida rõhkude vahe aurusti ja kondensaatori vahel optimaalsena. [5]

Soojuspumba efektiivsust näitab kasuliku energia suhe kasutatud elektrienergia suhtes ja see on defineeritud kui soojustegur (*Coefficient of Performance*) ehk COP (valem 1.1). COP sõltub geoloogilistest tingimustest ja tehnilistest parameetritest. Geoloogiliste tingimuste all mõeldakse pinnase termaal- ja hüdraulilisi parameetreid ning kliima tingimusi. Tehnilisteks parameetriteks on kontuuri pikkus ja tüüp, materjal, kontuuri kaeve tüüp ja kvaliteet. Lisaks mõjutavad soojuspumba COP-i kütte/jahutuse koormus, hoone kütte/jahutuse süsteem ning muude süsteemis olevate ainete temperatuurid. Euroopa Liidus peavad soojuspumbad ja nende soojustegurid vastama Euroopa standarditele EN 255 ja EN 14155. [6]

COP on leitav valemiga [7]:

$$COP = \frac{\text{Küttevõimsus (kW)}}{\text{Kulutatud elektrienergia (kW)}} \tag{1.1}$$

Kuigi soojuspumpade maksimum COP võib ulatuda 4,5 või isegi kõrgemale, siis tegelik keskmine COP on tunduvalt madalam. Keskmine COP, mida kutsutakse ka *Seasonal Performance Factor* (hooaja keskmine soojustegur) ehk SPF, on leitud soojuspumba töötamise käigus saavutatud keskmise COP kaudu ja see jääb üldjuhul vahemikku 3,0 kuni 3,8. On võimalik ka saavutada kõrgemat COP-i väärtust juhul kui kõigile soojuspumba süsteemi komponentidele on rakendatud kõrged kvaliteedi standardid ja hoonesse on paigaldatud parim küttesüsteemi lahendus. Soojuspumba COP-i on võimalik ka tõsta juhul, kui sellega ei soojendata tarbevett ehk kui pump on mõeldud ainult kütmiseks. [6]



Joonis 1.4. COP väärtuste sõltuvus soojusallika temperatuurist erinevate väljundvee temperatuuride korral [6]

Jooniselt 1.4 on näha, et soojuspumba, mille küttesüsteemi lastava vee temperatuur on 35 ^{o}C (põrandaküte), COP on 4,0 juures kui soojusallika temperatuur kõigest 0 ^{o}C. Soojuspump, mis toodab 50 ^{o}C vett (radiaatorid), saavutab 0 ^{o}C soojusallika puhul COP väärtuse umbes 3,0, seega on põrandaküttega soojuspump efektiivsem.

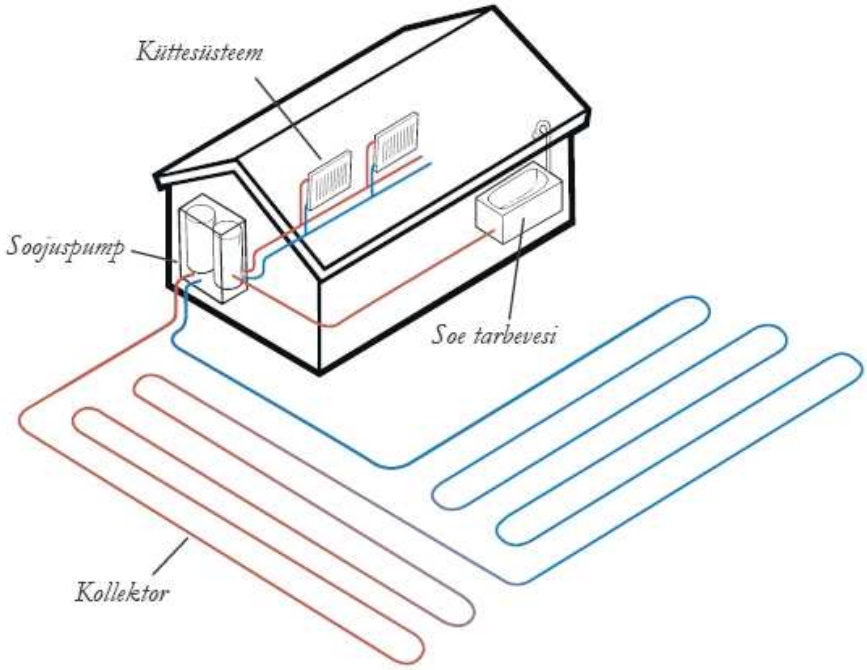
1.1.4. Maasoojuspump

Maasoojuspump kasutab hoone kütmiseks päikeseenergiat, mis on salvestunud maapinda, pinnase ülemistesse kihtidesse, kalju sisse või hoone lähedal asuvasse veekogusse. Maasoojuspump saab kasutada soojusenergia tootmiseks maapinna konstantset temperatuuri, mis on 1,2 m sügavusel üldjuhul vahemikus 4–12 ^{o}C. Maapinda salvestunud soojusenergia kogutakse pinnasesse paigaldatud plastiktoru ehk maakollektori abil, mis on ühendatud soojuspumbaga ja transpordib soojuse aurustisse. Soojuspumba tööks ehk soojuse pumpamiseks on vaja elektrienergiat. Maasoojuspumba kasutamine on mugav, peaaegu hooldusvaba ja tagab väikesed küttekulud. Vastavalt aurusti tüübile ja soojuse kogumise viisile jagatakse maasoojussüsteemid kinnisteks, avatuteks ja otseaurustiga süsteemideks. [8, 9]

Kinnise soojussüsteemi on pinnasesse uuristatud puuraugud, kuhu on paigaldatud soojuskontuur ning lisaks kuulub siia ka avaveekogudesse paigaldatud süsteem. Puuraugud võivad olla vertikaalsed, horisontaalsed kui ka kaldu. Pinnasesse paigaldatud kontuuris ringleb vesilahus, mis kannab maasisest soojust soojusvahetisse ja kontuur on kinnine, mis tõttu vesilahus ei puutu kokku kivimite ega põhjaveega. Kontuur on sisuliselt survestamata ja soojuspumba juurde on paigaldatud paisupaak, mis minimeerib vedeliku temperatuuri muutustega kaasneva soojuspaisumise mõju. [9]

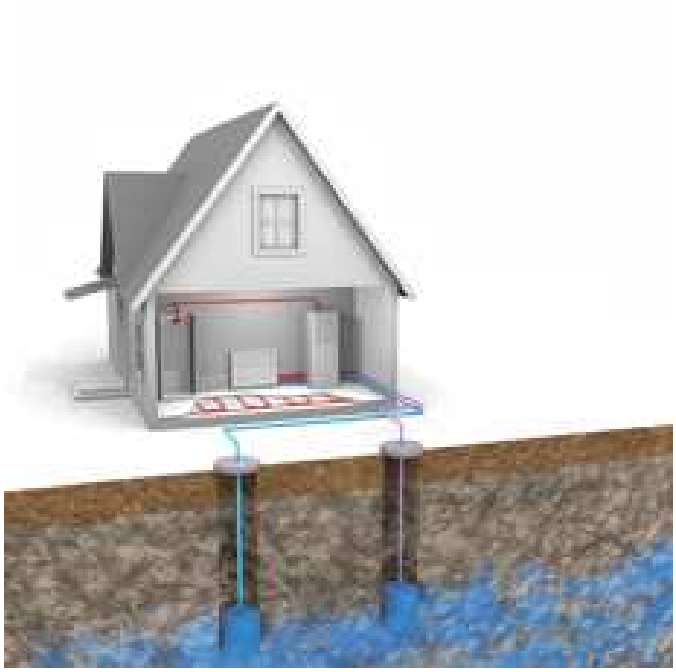
Kinnise kontuuriga süsteemideks on maakollektor, energiakaev ja veekollektor, mis erinevad üksteisest erinevate konfiguratsioonide poolest või on paigaldatud hoopis avaveekogudesse. Maakollektori kontuur on paigaldatud horisontaalselt maapinna ülemistesse kihtidesse (joonis 1.5), mis kogub sinna salvestunud päikeseenergiat, vihmavee- ja maapinna lähedase õhu soojusenergiat. Kollektori pikkus on 250–50 000 m ja paigaldatakse umbes 1,2 m sügavusele vahekaugusega 1 m. Kontuurid on paigaldatud

sirgelt või püstiste spiraalidena. Energiakaevu kontuur paigaldatakse vertikaalselt või kaldu ühte või mitmesse puurauku. Puuraugu läbimõõt on 50–160 mm ja sügavusega 100–200 m. Kui energiakaevud ei täitu veega, siis need täidetakse. Energiakaevust saadav soojus ühe meetri kohta on kaks korda suurem kui horisontaalse paigaldusega. Soojuspuuraukude rajamiseks on puurimisloa taotlemine suhteliselt keeruline, mis tõttu kasutatakse energiakaeve vähe. Kui maja on ehitatud mõne veekogu kõrvale, siis on võimalik paigaldada kontuur veekogu põhja, kus ammutatakse vajalik soojusenergia. [8, 9]



Joonis 1.5. Horisontaalse kontuuriga maasoojuspump [8]

Avatud soojussüsteemi puhul kasutatakse samuti puurauke, kus ühest puuraugust pumbatakse põhjavett, mis pärast soojusvahetit juhitakse läbi teise puuraugu tagasi põhjavette (joonis 1.6). Lõik, mis jääb puuraukude vahele on avatud ja osa ringlevast veest kandub regionaalse põhjavee liikumise käigus süsteemist kaugemale. Avatud süsteemide puhul kasutatakse soojusenergiaallikana põhjavett. Puurkaevud on samade andmetega nagu kinnistesüsteemide puhul, kuid nende kaugus on üksteisest 15–20 m, neid on alati kaks ja on alati sama sügavusel (peavad asuma samas veekihis). [8, 9]



Joonis 1.6. Avatud soojussüsteem [10]

Otseaurustiga süsteemid on kinnistest ja avatud süsteemidest veelgi kõrgema kasuteguriga, sest sellel on ainult kaks tsirkuleerivat ringi, milleks on soojuspumba ja küttesüsteemi ring, ja seetõttu ei kulutata energiat külmaaine tsirkuleerimiseks kontuuris ega põhjavee pumpamiseks puurkaevust. Kontuuri asemel on otseaurustiga süsteemil pinnasesse või kivimisse paigaldatud torustik, milles olev külmaaine aurustub maast saadava soojuse mõjul ehk soojuspumba aurusti asub maa sees. Võrreldes avatud ja suletud süsteemidega on otseaurustiga süsteemid tehniliselt nõudlikumad, sest aurustiks olev torustik peab olema surve all oleva gaasilise külmaaine jaoks hermeetiline. Torustiku materjalina kasutatakse vasktorusid, millel on hea soojusjuhtivus. Eestis on rajatud otseaurustiga süsteemide sügavus 10–20 m. [8, 9]

1.1.5. Õhksoojuspump

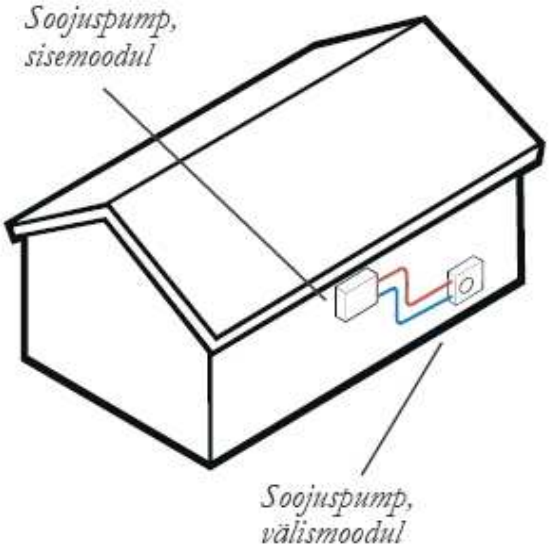
Õhksoojuspumbad pumbavad soojust õhust, saades vajaliku soojuse välisõhust või hoonest ventilatsioonisüsteemi kaudu väljuvast õhust. Kui soojuse saamine ventilatsiooniõhust on suhteliselt lihtne, sest temperatuur on umbes 20 ^{o}C, siis keerulisem on see välisõhust soojuse pumpamise korral, sest mida külmem on välisõhk seda vähemaks jääb efektiivsus, kuid isegi –20 ^{o}C'sest välisõhust saab veel kütmiseks vajalikku soojusenergiat. [11]

Õhksoojuspumbad võtavad ümbritsevast välisõhust või ventilatsioonisüsteemi kaudu väljuvast õhust energiat ja muundavad selle soojusenergiaks, millega köetakse maja. Energia muundamiseks soojuseks kasutatakse elektrienergiat. Õhksoojuspumpade soojustegurite määramisel ja testimisel lähtutakse Euroopa standarditest EN 255 ja EN 14511, mille järgi on välistemperatuurideks määratud +2 ^{o}C ja +7 ^{o}C. Õhksoojuspumbad on säästlikud ja keskkonnasõbralikud küttelahendused, kuid meie laiuskraadidel on lisakütteallikas kindlasti vajalik. Õhksoojuspumpasid saab jagada kolmeks vastavalt sellele, kust soojus võetakse või kuhu soojus üle kantakse: õhk-õhk, õhk-vesi ja ventilatsiooni- ehk väljatõmbeõhu soojuspumbad. [11]

1.1.6. Õhk-õhk soojuspump

Õhk-õhk soojuspump (joonis 1.7) pumpab soojusenergia välisõhust ja see antakse edasi hoones ringlevale õhule. Seda sorti soojuspumbad on sobilikud kuni 100 m^2 hoonetele, nagu ühepereelamud, väikesed poed, kontorid, garaažid jne. Õhk-õhk soojuspumpa on võimalik kasutada ka õhu jahutamiseks ehk õhukonditsioneerina. Antud tüüpi soojuspump on kõige enam levinud soojuspump, sest selle soetamis-, paigaldamis- ja püsikulud on võrreldes teiste soojuspumpade tüüpidega kõige väiksemad. Lisaks paigaldatakse õhk-õhk soojuspump väga kiiresti. Õhk-õhk soojuspump peaks Eesti kliimaoludes olema kombineeritud mõne teise kütteliigiga, sest ainult soojuspumba kasutamine ei ole mõttekas või isegi alati võimalik.[12]

Õhk-õhk soojuspumbal on üsna palju puuduseid. Esiteks peab olema hoone, kuhu soojuspump paigaldatakse avatud planeeringuga, et sisemoodulist tulev soe õhk saaks kütta kõiki ruume hoones. Optimaalse õhuringluse saavutamiseks peab ka sisemoodul olema paigutatud hoone õigesse puntki. Lisaks on soovitatud, et soojuse paremaks levimiseks oleks ruumide uksed lahti ning kui on tegemist suurema hoone pindalaga kui 100 m^2 või on kahekorruseline, siis oleks mõistlik paigaldada 2 sisemooduliga ja 1 välismooduliga süsteem või hoopis kaks eraldi süsteemi. Suureks miinuseks õhk-õhk soojuspumpade puhul on sooja tarbevee tootmise võimaluse puudumine. Lisaks sõltub soojuspumba töö efektiivsus välistemperatuurist, mistõttu –10 ^{o}C'st külmemate temperatuuride korral



Joonis 1.7. Ühe välis- ja sisemooduliga õhk-õhk soojuspump hoone seinal [12]

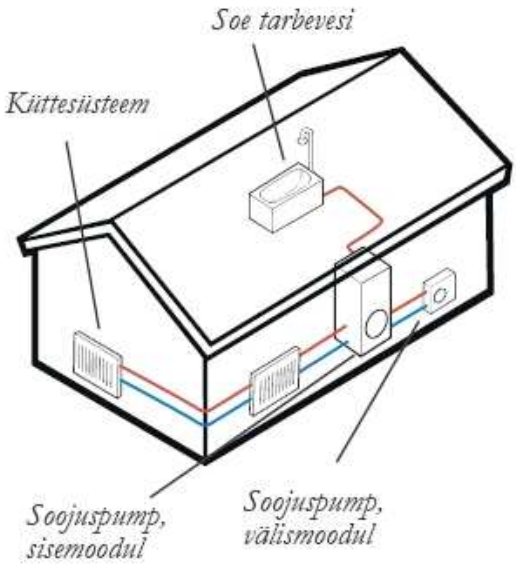
on vajalik lisakütteallikas. Lisaenergia kulub nii soojuse pumpamiseks kui ka välisseadme karteri soojendamisele ja sulatusprotsessidele, mis kõik kokku alandavad soojuspumba efektiivsust. [12]

On olemas mitmeid lahendusi, mis aitavad õhk-õhk soojuspumba efektiivsust tõsta. Antud tüüpi soojuspumba soetamisel tuleks eelistada inverterkompressoriga soojuspumpasid ON-OFF tüüpi soojuspumpadele. ON-OFF soojuspumbad töötavad ainult täisvõimsusel, mistõttu tehakse palju sisse-välja lülitamisi, mis suurendavad energiakulu. Inverterkompressor muudab soojuspumba võimsust vastavalt vajadusele, et säilitada püsivalt mugav temperatuur võimalikult efektiivselt. Soojuspumba efektiivsust mõjutab ka kasutatav külmaagens, mille puhul on soovitatud R410A, mis on andnud parima tulemuse talviste temperatuuride juures soojuse sidumisel võrreldes teiste külmaagensitega. Soojuspump peab olema vastav hoone soojusvajadusele, et ei tekiks üle- ega aladimensioneerimist. Üledimensioneerimisel peab väikestel küttekoormustel soojuspump end sisse ja välja lülitama hakkama, mistõttu suureneb energiakulu ning aladimensioneerimisel peab soojuspump töötama liigselt suurel koormusel. Kindlasti on tähtis soojuspumpade vastavus kliimaoludele, mis tagaks veatu töö igas tingimuses. Põhjamaade kliimaoludele vastavatel õhk-õhk soojuspumpadel peab olema korralik sulatusprogramm ning välisseadme põhja sulatamiseks termostaadiga soojenduskaabel. [12]

Õhk-õhk soojuspumba töö efektiivsus kui ka kasutusmugavus sõltub välisseadme asukohast. Parimaks lahenduseks on välismooduli paigaldamine spetsiaalse raamiga maapinnale, mis väldib vibratsiooni kandumist hoonesse. Kui välisseade siiski paigaldatakse hoone seinale vastavatele tugihoidjatele, siis on vajalik nende alla paigaldada spetsiaalsed külmakindlad vibratsioonipuksid. Välismooduli paigaldamisel liiga kõrgele muutub selle hooldamine raskeks, tugevate tuulte korral halveneb sulatusprotsess ning sulatusvesi võib tilkuda seintele ja lisaks on seadme järelvalve raskendatud. Paigaldades välisseadme katusele võib sulatusveest tekkiv jäämass kõigele lisaks veel lõhkuda katust, lumetõkkeid ja vihmaveerenne. Paigaldades välismoodul liiga madalale ei ole sellel üldse ruumi sulatusvee äravooluks ning on oht tuisu korral lund täis tuisata. [12]

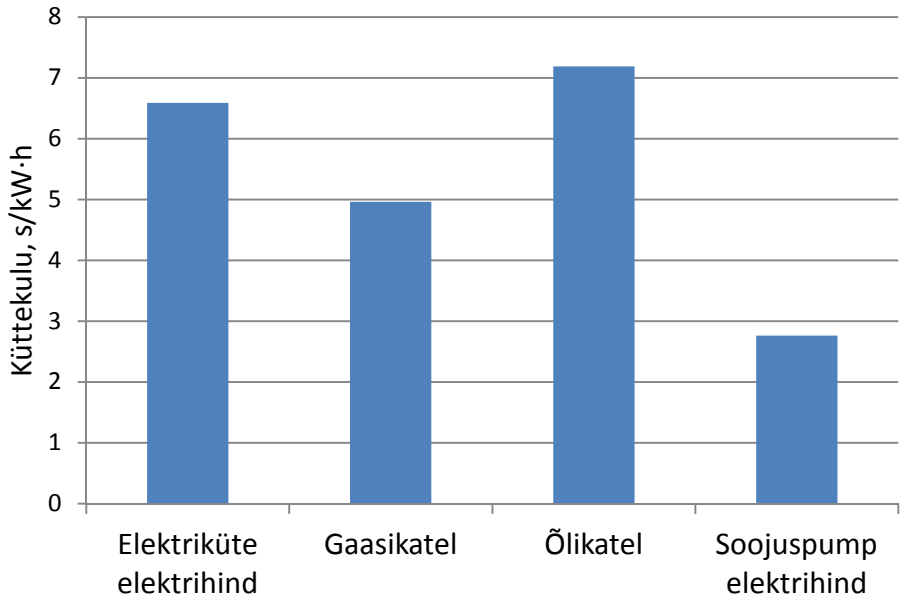
1.1.7. Õhk-vesi soojuspump

Õhk-vesi soojuspump (joonis 1.8) kogub soojusenergia õhust ja annab selle hoone küttesüsteemis ringlevale veele ning tarbevee soojendamiseks. Veeküttesüsteem baseerub radiaator- või põrandaküttel. Sarnaselt õhk-õhk soojuspumbale on antud tüüpi soojuspumpa lihtne paigaldada ja suveperioodil kasutada jahutamiseks, kuid ei vaja kombineerimist teiste kütteliikidega. Peamiseks eeliseks maasoojuspumba ees on maakollektori puudumine. [13]



Joonis 1.8. Õhk-vesi soojuspump radiaator- ja sooja tarbevee küttega [13]

Õhk-vesi soojuspumba efektiivsus sõltub erinevatest faktoritest, nagu maja asukoht, suurus ning jahutusfunktsiooni kasutamine või mittekasutamine. Antud tüüpi soojuspump on keskkonnasõbralik, sest selle kasutamine vähendab CO_2 emiteerimist ümbritsevasse keskkonda võrreldes fossiilsetel kütustel baseeruvate küttesüsteemidega. Küttekulud vähenevad kuni 65%, sest õhk-vesi soojuspump toodab 1 kW elektrienergiast keskmiselt 3 kW soojusenergiat. Õli- ja gaasikatlad ei toodavad 1 kW elektrienergiast vähem kui 1 kW soojusenergiat. Jooniselt 1.9 on näha, et ka küttekulud vähenevad võrreldes teiste küttesüsteemidega. Puukatla küttekulu hind on õhk-vesi soojuspumbaga umbes sama suur, kui soojuspumbaga võidab mugavuse suhtes, sest ei pea katelt kütma. [13]



Joonis 1.9. Erinevate küttesüsteemide küttekulude võrdlus [13]

Õhk-vesi soojuspump sobib põhiküttеks uutesse hoonetesse, kus soovitakse küttekulusid võimalikult madalal hoida, kuid hoone ümber pole piisavalt ruumi maasoojuspumba kontuuri paigaldamiseks. Antud soojuspump reageerib kiirelt temperatuuri muutustele või päikese paistmisele, mistõttu muutub ka soojustegur kiirelt. Seega õhk-vesi soojuspump hoiab suveperioodil säästlikult sanitaarruumid soojana ja kütab ka tarbevett. Oma lihtsa paigaldamise tõttu on võimalik kergelt paigaldada õhk-vesi soojuspumbasüsteem ka vanematesse majadesse, mis asendaks vana küttesüsteemi. [13]

Õhk-vesi soojuspumba efektiivsust aitab suurendada invertertehnoloogia, mis erinevate soojuskoormuste juures paneb soojuspumba piisava võimsusega tööle. See väldib sisse-

välja lülitumist ja töötamist ainult täiskoormusel. Analoogselt õhk-õhk soojuspumbale peab olema antud soojuspump mõeldud vastavas kliimaoludes töötamiseks ja peab olema dimensioneeritud vastavalt hoone soojusvajadusele. Küttesüsteemi välisseadme paigaldamisel tuleb lähtuda samadest põhimõtetest, mis on kirjeldatud eelneva peatüki viimases lõigus. [13]

1.1.8. Väljatõmbeõhu soojuspumbad

Väljatõmbeõhu soojuspumbad ehk ventilatsiooni soojuspumbad töötavad analoogselt õhk-õhk soojuspumbale, kuid võtavad soojuse hoone ventileeritavast õhust. Antud soojuspump võimaldab soojust taaskasutada hoonetes, kus on kas loomulik või sundventilatsioon, mis tõttu nimetatakse seda ka soojuse taaskasutusega ventilatsioonisüsteemiks. Sarnaselt õhk-vesi soojuspumpadele kütab ventilatsiooni soojuspump põrandakütte- või radiaatoritega vesiküttesüsteemi. Suureks eeliseks teiste soojuspumpade ees on see, et väljatõmbe soojuspump tagab majas pideva õhu ventileerimise, kuid siiski on sobilik ainult väiksematele majadel, kuni 150 m^2. [14]

Ventilatsioonisüsteeme saab jagada kaheks: väljatõmbe- ja väljatõmbe-sissepuhke ventilatsiooniks. Väljatõmbeventilatsiooni puhul siseneb õhk hoonesse läbi uste, akende ja muude avade, kaasa arvatud välisseinte klappide kaudu ning õhk tõmmatakse väljatõmbe ventilatsiooni (köögis, WC-s, pesuruumides jne) kaudu soojuspumpa, kus kasutatakse hoonest kogutud soojusenergia uuesti. Väljatõmbe-sissepuhke ventilatsioon on analoogne, kuid erinevalt ainult väljatõmbe ventilatsioonist on sellel lisaks eraldi kanalite süsteem ruumidesse puhutava õhu jaoks, mida eelsoojendatakse. [14]

Õhukanalid on ühendatud kergesti vahetatavate ühendustorudega, mis on isoleeritud difusioonikindlalt. Kanaleid peab olema võimalik kontrollide, sest kui õhukanalite läbimõõt mingis osas väheneb, võib väheneda ka ventilatsiooni tootlikkus. Õhulekete vältimiseks peavad kanalid vastama tihedusklassile B. Lisaks soojuspumba korrektsele paigaldamisele peab siin olema ka ventilatsioon paigaldatud õigesti, sest vastasel juhul suurenevad ekspluatatsioonikulud ning halvemal juhul isegi võib kahjustada hoonet. Kehtivate normide kohaselt on madalaim õhuhulk ühe ruutmeetri põrandapinna kohta

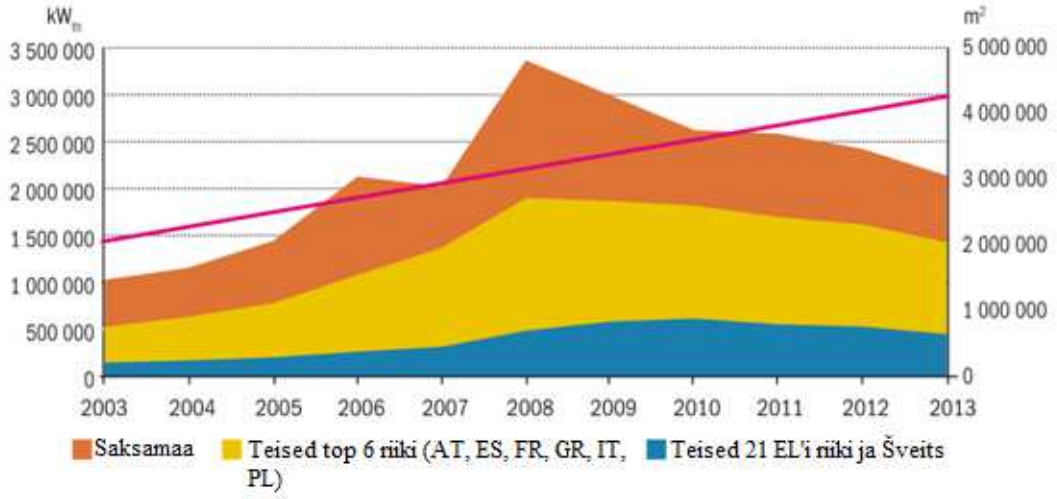
0,35 l/s, kuid antud soojuspumba paigaldamisel peaks hea efektiivsuse saavutamiseks lisaks juhinduma tootja poolt ettenähtud nõudmistele. [14]

1.2. Päikeseenergia kasutamisest üldiselt

1.2.1. Päikeseenergia kasutamine Euroopas ja Eestis

Päikeseenergia kasutamist vaadeldakse kahes kategoorias, milleks on soojuse tootmine ja elektri tootmine. Eestis kasutatakse soojusenergia tootmise korral mõistet päikesekollektor ning elektri tootmisel päikesepaneel [15]. Statistika raporteid koostatakse Euroopa Liidus nende kahe puhul eraldi. Eestis on olemas

Päikesekollektorite turu andmete põhjal on alates 2008. aastast müük vähenenud (joonis 1.10). 2013. aastal müüdud päikesekollektorite installeeritud võimsus oli 2,14 GW ja umbes 3,05 miljonit m^2, mis võrreldes 2012. aastaga näitab 11,8% langust. Kogu installeeritud tootlikkus suurenes 1,75 GW võrra, jõudes 30,2 GW (43,1 miljonit m^2). Erinevalt eelmistest aastatest, kus turgude käitumise osas olid suured erinevused, mõjutas suur langus 2013. aastal kõiki turgusid. Suurima turuga riik on Saksamaa, mis esindab ühte kolmandikku turust ja sellel oli 11% langus võrreldes 2012. seisuga. Ka teistel suurematel turgudel jätkus langus, nagu Prantsusmaa, Portugal, Austria, Itaalia ja isegi Kreeka. [16, 17]



Joonis 1.10. Päikesekollektorite Euroopa ja Šveitsi turu aastased tulemused [16]

Leiti, et 2013. aastal soetatud tasapinnalistest kollektoritest ligi 90% on klaasitud kollektorid, mis täielikult ületavad vaakumtorudega kollektorite müügi. Lisaks on turul ka painduva toruga kollektorid, aga nende turgu pole veel uuritud. Suurimad kolm riiki päikesekollektorite turul on juba mitu aastat muutumatud – Saksamaa, Austria ja Kreeka. Arvestades päikesekollektorite pindala ühe elaniku kohta, siis liider on Küpros 0,787 m^2 elaniku kohta. Eestis on andmeid päikesekollektorite kohta vähe, kuid EurObserv'ER'i [17] andmeil on nii plaatkollektorite kui vaakumkollektorite paigaldatud pindalad 900 m^2 ja seda nii 2013. kui 2012. aastal. Summaarselt 1800 m^2 peaks andma installeeritud võimsuse aastas 1,3 MW. [16, 17]

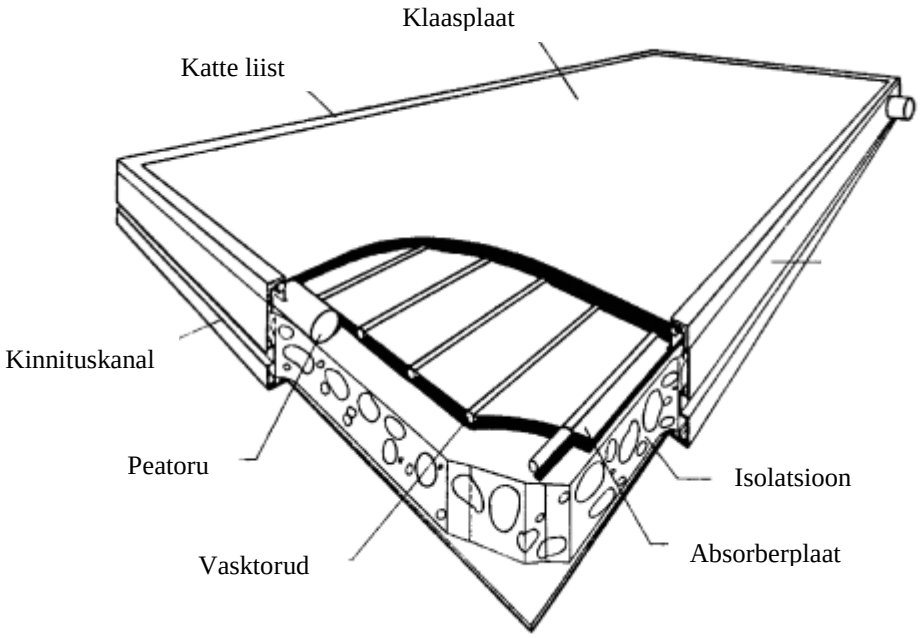
Päikesepaneelide turul oli Euroopa Liit kindel liider kuni 2011 aastani, omades peaaegu kolme veerandit turust. 2013. aastaks oli langenud Euroopa liidu turu osakaal 26,7%-ni, mis on 10,7 GW installeeritud võimsust 40 GW globaalsest kogu võimsusest. 2013. aastal olid suurimad turud Hiina, Jaapan ja USA. Euroopa Liidus paigaldatud päikesepaneelide installeeritud võimsus oli 2013. aastal 10 672,6 MW, mis annab kokku 79 622,8 MW. Kokku toodeti 2013. aastal 80,8 TW·h, millest suurimad tootjad olid Saksamaa (31 TW·h) ja Itaalia (21,6 TW·h). Eestis müüdi võrku tagasi 94 MW·h päikeseenergiat, kuid Eesti Taastuvenergia Koja hinnangul on kogu toodetud energia umbes 450 MW·h. [17, 18]

1.2.2. Päikesekollektor

Päikesekollektorid on soojusvahetid, mis absorbeerivad päikeselt saadava kiirguse, muudavad selle soojuseks ning kannavad selle üle soojuskandjale, mis läbib kollektorit. Kogutud päikeseenergia kantakse otse kuuma vette (ruumi konditsioneerimisseadmesse) või siis mõnda soojussalvesti paaki, kust saab soojust kasutada öösel või pilvisematel päevadel. Päikesekollektoreid saab jagada madalatemperatuurilisteks (kuni 100 ^oC) ning keskmise- ja kõrgtemperatuuriliseks (kuni 2000 ^oC) või siis kontsentreeritud ja mittekontsentreeritud ehk statsionaarsed päikesekollektorid. [19, 20]

Eestis on võimalik kasutada madalatemperatuurilisi päikesekollektoreid nii sooja tarbevee tootmiseks kui ka küttesüsteemina, kuid mitte iseseisvalt vaid toetava lahendusena. Põhilisemad päikesekollektorid on plaatkollektorid ja vaakumtorudega kollektorid. [20]

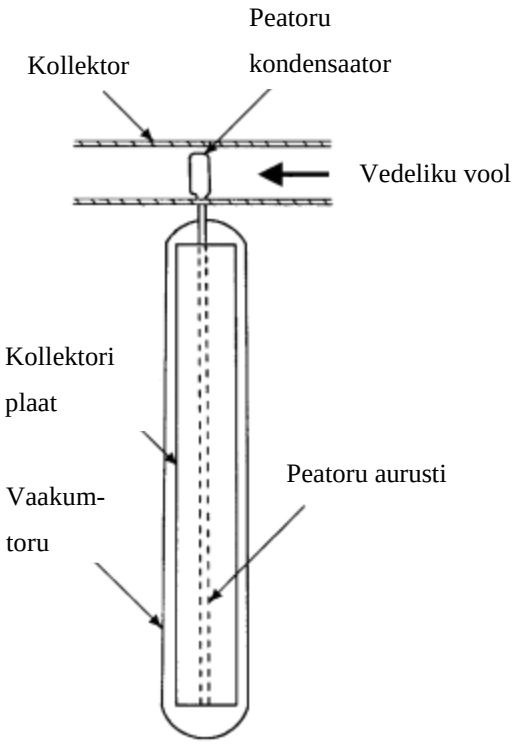
Tavaline plaatkollektor (joonis 1.11) on kaetud läbipaistva katteplaadiga, mille all on musta värvi absorbeeriv kiht. Abrsorberkiht on otseses kontaktis torudega (vasest), milles ringleb soojuskandja. Päikese kiirgus absorbeeritakse absorberkihis ja kantakse üle soojuskandjale nendes torudes, kust see transporditakse akumulatsiooni paaki või oste kasutamiseks. Absorberkihi alumine külg ja kesta servad on isoleeritud soojuskadude vähendamiseks. Soojuskandja torude mõlemasse otsa on paigutatud suurema diameetriga päise torud. Plaatkollektorid on püsivalt fikseeritud ja peaksid olema meil suunatud lõuna suunas. Optimaalne kollektori kaldenurk peaks olema võrdne asukoha laiuskraadiga, varieerudes 10–15^{o} sõltuvalt tootja juhistest. [19]



Joonis 1.11. Plaatkollektor [19]

Plaatkollektorid on välja arendatud töötama soojemates ja päikesepaistelisemates kliimad, seetõttu peaks siinses külmemas, pilvisemas ja tuulisemas kliimas eelistama just vaakumtorudega päikesekollektoreid (joonis 1.12). Vaakum ümbrises vähendatakse konvektsiooni ja soojusjuhtivuse kadusid, mistõttu töötab vaakumtorudega kollektor kõrgemate temperatuuridega kui plaatkollektorid. Nendes kollektorites on kõrge efektiivsusega soojustjuhtiv soojustoru, mis on asetatud vaakumtorusse. Vasest suletud toru on ühendatud musta vasest ribiga, mis on absorberplaadiks. Iga toru otsas on metallist kondensaator. Soojustoru sisaldab väikses koguses vedelikku (näiteks metanool), mis on aurustumis- ja kondenseerumistsüklis. Selles tsüklis vedelik aurustub päikeseenergia abil ja

aur liigub kondensaatorisse, kus soojus vabastatakse ja aur kondenseerub. Kondenseerunud vedelik siis liigub tagasi kollektorisse ja protsess kordub. Soojustorude metallis kondensaatorid asuvad kõiki soojustorusid ühendavas soojusvahetis, milles voolab vesi või glükool. Soojendatud vesi või glükool ringleb läbi mõne teise soojusvaheti, kus soojus kantakse üle protsessi või vette, mis on kogutud soojussalvesti paaki. [19, 20]



Joonis 1.12. Vaakumtorudega kollektori skeem [19]

Joonisel 1.12 on näidatud üksik vaakumtoru päikesekollektorist.

1.2.3. Plaatkollektor või vaakumtorudega kollektor

Päikesekollektorid jagunevad kahte gruppi, millest Eestis on populaarseim plaatkollektor ja teine on vaakumtorudega kollektor [21]. On teada, et plaatkollektorid on sobilikumad soojemas ja päikesepaistelisemates kliimades ning külmemates ja vähesema päikesepaistega kliimades just vaakumtorukollektorid, kuid siiski on mõlemal kollektoritüübil omad plussid ja miinused.

Plaat- ehk lamekollektorid suveperioodil tootlikumad, kuna suvel on rohkem päikselisi päevi ja plaatkollektorid töötavad paremini otsese päikesekiirgusega. Võrreldes vaakumtorudega on lamekollektori absorberkihi pindala kogupindala suhtes üsna palju suurem. Plaatkollektoritel on lihtne tööpõhimõte ja tugevamad materjalid, mis teevad need vaakumtorudest töökindlamaks ning on ka eeldatavalt pikema elueaga. Plaatide torudes kasutatakse tõhusamat antifriisi ja kollektori kest on tugev, mis suurendab töökindlust. Plaatkollektorite suureks miinuseks on kehv tootlikus talveperioodil, sest see ei püüa hajusat kiirgust ja isolatsioon ei võimalda piisavalt soojuskadusid vähendada. [20, 21]

Vaakumtorudega kollektori suureks eeliseks on seega suurem tootlikkus talveperioodil, sest see püüab hajusat kiirgust ja soojuskaod on minimaalsed. Vaakumtorude võimsus on keskmiselt 30% suurem võrreldes plaatkollektoritega, mistõttu on ta Eesti kliima-tingimustes parem valik. Lisaks on ebasoodsa katuse suuna korral lihtne torusid ümber suunata, et paremat päikesekiirgust saada. Vaakumtorudega päikesekollektorite miinusteks on selle suur kasutusrisk õrnema klaasi tõttu ja ka väiksem absorberi pindala kogu paneeli suhtes. Vaakumtorudel on kõrgendatud risk ringleva vedelike keemiseks, sest mõne ootamatu häire korral võib vedelik seisma jääda ja soojeneda liiga kõrgeks, et ükski antifriis suudaks seda taluda. Vastupidiselt vaakumtoru eelisele püüda hajusat kiirgust ei talu see otsest päikesekiirgust ja lisaks on vaakumtorud kallimad kui plaatkollektorid. [20, 21]

1.2.4. Päikesepaneel

Päikesepaneele toodetakse elektrit päikesekiirgusest, mis võimaldab vähendada võrgust võetava elektri hulka, siluda päevaseid tarbimistippe ning müüa ülejääv elektrienergia võrku tagasi. Päikesepaneel peetakse kõige lihtsamaks ja hooldusvabamaks elektrienergia tootmise süsteemiks, mis koosneb paneelidest, kinnitustest ning inverterist. Eestis laskub maapinnale keskmiselt 3489 MJ ehk 969,2 $kW \cdot h/m^2$ päikeseenergiat aastas, mis võrreldes Saksamaaga on väga sarnane, kuid erinevus tuleb sellest, et talvekuudel on Eestis päikeseenergiat tunduvalt vähem ja suvel see eest rohkem. Mistõttu räägib päikesepaneelide kahjuks just suur ebaühtlus kuude lõikes. [20, 22, 23]

Elektrienergia tootmiseks kasutatakse paneelides fotogalvaanilist elementi ehk PV elementi (*Photovoltaic Cell*), mis ilma välise toiteallikata toodab elektrit. PV element koosneb viiest erinevast kihist, mis on pressi all lamineeritud ja paigutatud alumiiniumist raamide vahele. Päikesepaneelid koosnevad enamasti ränist: amorfne (a-Si) või kristalliline (c-Si). Sellest tulenevalt jagunevad paneelid mono- ja polükristallilisteks (kallimad, efektiivsemad) ning amorfse kilega (odavamad, vähem efektiivsed) paneelideks. Räni tüübist oleneb päikesepaneeli hind ja efektiivsus. Päikesepaneelide efektiivsus näitab mitu protsenti päikeseenergiat suudab paneel elektriks muundada. [20, 23]

Monokristallilistest elementidest paneel suudab elektrit toota efektiivsusega 11–17%, kuid polükristalliline paneel 11–15%. Monokristalliliste paneelide puhul kasutatakse suurte tahvlitena toodetud räni ehk räni lõigatakse paneeli suuruseks, mistõttu on selliste paneelide tootmine kallim, kuid nad on efektiivsemad. Polükristallilised paneelid pannakse kokku väiksematest elementidest ja on seetõttu odavam. Kristallilised paneelid on Eestis kõige populaarsemad ja nende tootlikkused on väga sarnased, tootes 10 m^2 pindalaga kuni 1 kW energiat. Amorfse kilega ehk õhukesekileliste päikesepaneelide efektiivsus on vahemikus 3–11%, seega on nad teiste tüüpidega võrreldes kõige madalam, tootes 10 m^2 pindala juures kuni 500 kW energiat. Amorfse kilega paneeli eeliseks on selle madalad tootmiskulud ning mitmekülgse kasutamise võimalused, sest kile saab paigaldada erinevatele materjalidele. [20, 23]

2. SOOJUSENERGIA SALVESTI

2.1. Soojusenergia salvesti kontseptsioon ja erinevad tüübid

Soojusenergia salvesti on tehnoloogia, kus soojusenergia salvestatakse salvestusaine soojendamise või jahutamise näol nii, et seda saab hiljem kasutada kütmisel ja jahutamisel või isegi elektri tootmisel. Soojusenergia salvestamise kontseptsioon on olnud kasutusel juba üle mitmekümne aasta ning seda tajutava soojuse, latentse soojuse ja ümberpööratavate termokeemiliste reaktsioonide vormis, millega on tasakaalustatud energia vajadust ja varusid päevade, nädalate või isegi aastaaegade baasil. Energia salvestid vähendavad tippnõudlust, energia tarbimist, CO_2 emissiooni ja kulusid, mille juures tõstab ka energiasüsteemi efektiivsust. Kasutades erinevaid taastuvenergia allikaid tõstetakse taastuvenergia osakaalu energia tarbimises. [24, 25]

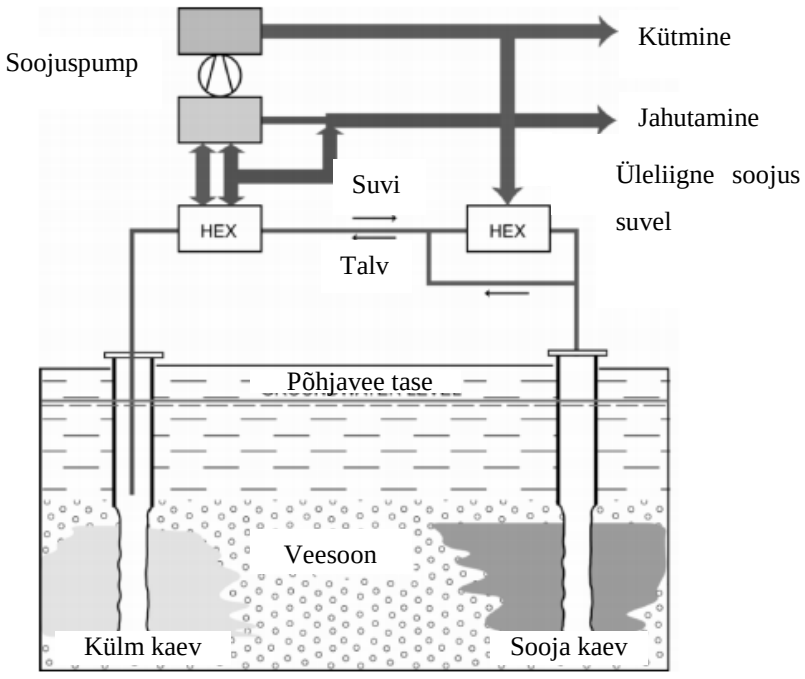
Soojusenergia salvestid jagunevad kolmeks suuremaks süsteemiks: tajutava soojuse salvesti, latentse soojuse salvesti ja termokeemiliste reaktsioonide salvesti. Tajutava soojuse salvesti põhineb vedela või tahke salvestusaine (näiteks vesi, liiv, sulasool, kivid jne) soojendamise või jahutamisega, millest kõige odavam valik oleks vesi. Latentse soojussalvesti korral kasutatakse faasimuutustega materjali, mis näiteks soojuse eraldumisel muutuvad tahkest olekust vedelasse olekusse. Termokeemiliste reaktsioonide salvesti korral kasutatakse soojusenergia salvestamiseks ja vabastamiseks keemilisi reaktsioone. [24, 25]

Tajutava soojusenergia salvesti on võrreldes teise kahe süsteemiga suhteliselt odav ja on sobilik pereelamute süsteemidele, piirkonna kütmiseks või tööstuslike vajaduste rahuldamiseks. Kuid tajutava soojuse salvesti vajab suuremat ruumala, sest selle energia tihedus on madal. Lisaks on vajalik väga hea salvesti konstruktsioon, et soojusenergia vabastada konstantsel temperatuuril. Praegusel ajal siiski on tajutava soojusenergia salvestid saadaval ja kasutuses, kui termokeemiliste reaktsioonide ja faasimuutustega salvesti süsteemid suuresti veel arendamisel ja katsetamisel. Seoses sellega, et energiana kasutatakse taastuvenergiat, mistõttu on see katkendlik ehk energia mingi aeg kogutakse ja

mingi aeg vabastatakse kütmiseks või jahutamiseks. Seega kasutatakse tajutava soojusenergia kontseptsiooni ka hooajalise soojusenergia salvesti korral, kus näiteks suvel kogutakse soojus salvestisse ja talvel kasutatakse seda ruumide kütmiseks. Kõige tuntumad tajutava soojusenergia salvesti tehnoloogiad on põhjavee, puuraugu ja maa-aluste tühimike soojusenergia salvesti süsteemid. Kuna viimati mainitud süsteemide korral salvestatakse soojus maa sisse, siis nimetatakse neid ka maa-alusteks soojussalvestiteks (*Underground Thermal Energy Storage* ehk UTES). [24, 25, 26]

2.2. Põhjavee soojussalvesti

Põhjavee soojusenergia salvesti (*aquifer thermal energy storage* ehk ATES) klassifitseerub avatud süsteemide alla, mis kasutab maapinna alumisi kihte, kuhu salvestatakse ja kust võetakse soojusenergia. Sellise süsteemi puhul on soojuse transportimise vahendiks põhjavesi, mida kasutatakse soojusvahetina soojuse transportimiseks põhjaveekihti. Seega soojust ei salvestata ainult põhjavette, vaid kivimite kihtidesse, millest põhjaveekiht moodustubki. Soojuse transportimiseks põhjaveekihtidesse kasutatakse veekaeve ja tavaliselt on neid kaks, kusjuures mõlemal kaevul on kaks funktsiooni – vesi võtta ja tagasi juhtida põhjavette. Kaks kaevu jagunevad külmaks ja soojaks kaevuks (joonis 2.1). Külm võetakse ja juhitakse tagasi külma kaevu ja soe analoogselt sooja kaevu. [25, 26]



Joonis 2.1. ATES'i põhimõtte skeem [26]

ATES süsteem (joonis 2.1) sisaldab külma kaevu, sooja kaevu, soojusvahetit (soojuspumpa) ja tsirkulatsioonipumpasid vee ringi ajamiseks kaevudest soojuspumpadeni ja tagasi. Soojuse salvestamise protsess toimub põhjavee liikumisel läbi kivimikihtide ja selle tulemusena tekib erinevate temperatuuridega soojuse front. See front liigub soojuse salvestamisel kiirgajalt laiali ja soojuse võtmisel liigub kaevu juurde tagasi. Näiteks kütmisperioodil pumbatakse see põhjaveekihti salvestatud soojus sooja kaevu kaudu soojuspumpa. Soojuspumbas kantakse soojus üle küttesüsteemis ringlevale soojuskandjale (veele). Põhjavesi, kust nüüd on soojus ära võetud, juhitakse põhjaveekihti tagasi külma kaevu kaudu, kus ta levib kiirgajalt uuesti kivimikihtidesse. Soojal perioodil, kui vaja hoonet jahutada, siis on protsess vastupidine. [25, 26]

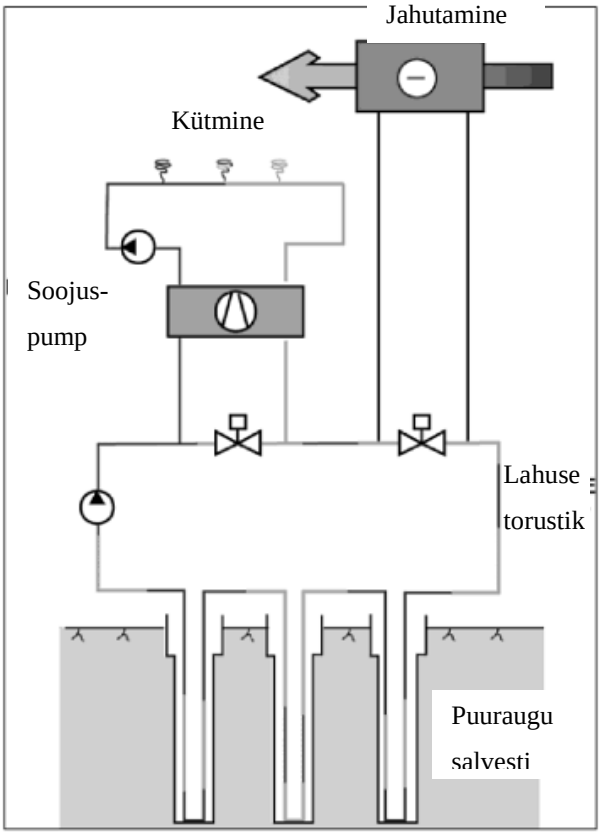
ATES süsteemid on kombineeritud tavaliselt päikesekollektoritega, mis on ühenduses ülejäänud süsteemiga. Päikesekollektorite soojusenergia salvestatakse põhjaveekihtidesse ja kütmisperioodil, kui küttevajadus suureneb, kasutatakse see salvestatud energia efektiivselt hoone ruumide ja sooja tarbevee kütmisel. ATES süsteemis olev soojuspumba COP võib tõusta kütmisrežiimil 4,5 kuni 6,5 ja jahutamisel veelgi kõrgemale. Lisaks on ATES võimeline efektiivsust üleval hoidma pikas perspektiivis ja seda väikeste hoolduskuludega. Põhjavee soojussalvesti tööiga võib ulatuda 20 kuni 25 aastani. [25]

ATES süsteeme on paigaldatud kõige enam Madalmaades, Rootsis ja Saksamaal ning need on üldiselt ehitatud madala temperatuurilistele seadmetele hooajaliseks soojusenergia salvestamiseks. Projekteeritud on süsteeme ka pikaajaliseks salvestamiseks. Eestis selliste süsteemide paigaldamine ei ole mõttekas, sest puurimislubade hankimine on pikk protsess ja teiseks eksisteerib teoreetiline põhjavee kihtide reostuse oht. Veepuurkaevu rajamisel on vaja tihedalt koostööd teha kohaliku omavalitsusega ning Keskkonnaametiga, et saada vajalikud taotlused ja load kooskõlastatud. [25, 26, 27]

2.3. Puuraugu soojusenergia salvesti

Puuraugu soojusenergia salvesti (joonis 2.2) või torusüsteem-soojussalvesti (*borehole thermal energy storage* ehk BTES) on ehituselt sarnane ATES'iga, kuid erineb selle

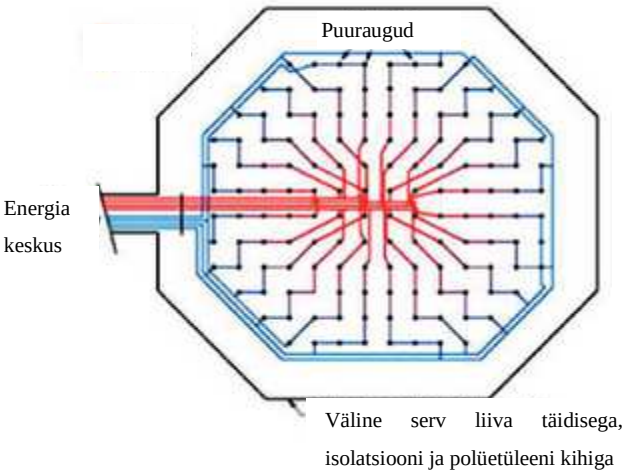
poolest, et BTES on kinnine süsteem, mis koosneb mitmest puuraugust. Torustik on enamasti polüetüleenist ja on pinnasesse paigaldatud vertikaalselt, horisontaalselt või ringjalt maapinna sisse. Maasse paigaldatud kontuuri abil toimub soojuse vahetus maapinnaga, kuhu siis salvestatakse või võetakse soojus. Kontuuris ringleb antifriisi lahus, mille jäätumistemperatuur on –10 ^{o}C või madalam. Sellel lahusel peab olema kõrge soojusmahtuvus, kõrge soojusjuhtivus ning samuti ka kõrge tihedus. Kuna BTES on kombineeritud päikesekollektoritega, siis kontuuris ringlev lahus peab kannatama soojuspumba kontuuri madalaid temperatuure ja sõltuvalt skeemilisest lahendusest mõningatel juhtudel ka päikesekollektori kõrgeid temperatuure. Maakollektori antifriis on tavaliselt etanooli lahus, mis päikesekollektori kõrgeid temperatuure ei kannata. Üheks võimaluseks on glütserooli baasil valmistatud rapsiõli derivaat, mille külmumispunkt on alla –15 ^{o}C ja kui see lahus ikkagi mingis punktis jäätub, siis ei ole paisumist, mis võib kahjustada päikesekollektoreid ja ka teisi seadmeid. [25, 26, 28]



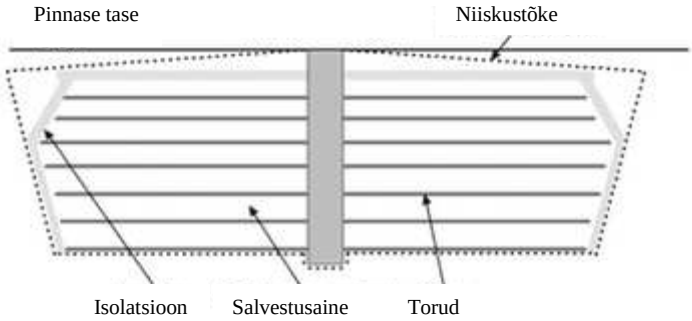
Joonis 2.2. BTES'i põhimõtte skeem vertikaalsete puuraukudega [26]

BTES'i süsteem sisaldab soojuspumpa, kontuuri, kontuuris ringlevat lahust, küttesüsteemi ja üldjuhul süsteemiga kombineeritud päikesekollektoreid (joonis 2.2). Maasse paigaldatud

kontuur moodustab salvesti, mille ümber on paigaldatud isolatsiooni ja hüdroisolatsiooni kiht (joonis 2.3, 2.4). Isolatsiooniks võib kasutada näiteks liiva või vahtpolüstürooli kihte ning niiskuse tõkkeks polüetüleeni kihte. Soojus salvestatakse suvisel perioodil kontuuri abil pinnasesse nii päikesekollektorite kaudu kui ka päikese enda abil, kus temperatuur pinnases võib –5 ^{o}C ulatuda kuni 90 ^{o}C. Salvesti on võimeline salvestama soojusenergiat pikemat aega ning kütmisperioodil on võimalik seda soojust soojuspumba abil efektiivselt hoone tarbevee ja ruumide kütteks ära kasutada. BTES on suletud süsteem ja sel on otsene soojusvahetus maapinnaga, siis mida pikem on kontuur seda suurem on süsteemi efektiivsus ja ka soojuspumba COP. [25, 26]



Joonis 2.3. BTES puuraukude paigutus pealt vaates [25]



Joonis 2.4. BTES horisontaalsete kollektorite paigutus külgvaates [25]

BTES'id on kasutuses paljudes maades ja enamasti just puuraukude näol. Eestis ei ole sarnaselt ATES'i süsteemidele mõttekas puurauke kasutada, sest nende puurimine on pikk protsess ja ka kallim kui horisontaalsete kontuuride paigaldamine. Puuraugu jooksva meetri hind võib Eestis jääda vahemikku 40–60 EUR'i, kuid horisontaalse maakollektori

jooksva meetri hind on keskmiselt 3,60 EUR'i. BTES'i süsteemil on siiski väikesed eelised ATES süsteemi ees, sest see on lihtsama ehitusega ja on aasta ringselt efektiivsemalt kasutatav. Lisaks kontuuris ringlev lahus BTES süsteemi ringist ei lahku ja seda on võimalik taaskasutada mitu sada kuni tuhat tsüklit. Üks tsükkel on üks soojuse salvestamine salvestisse ja hiljem selle efektiivne kasutamine kütmiseks. Sarnaselt ATES'ile on investeerimiskulud siiski suured. [25,29]

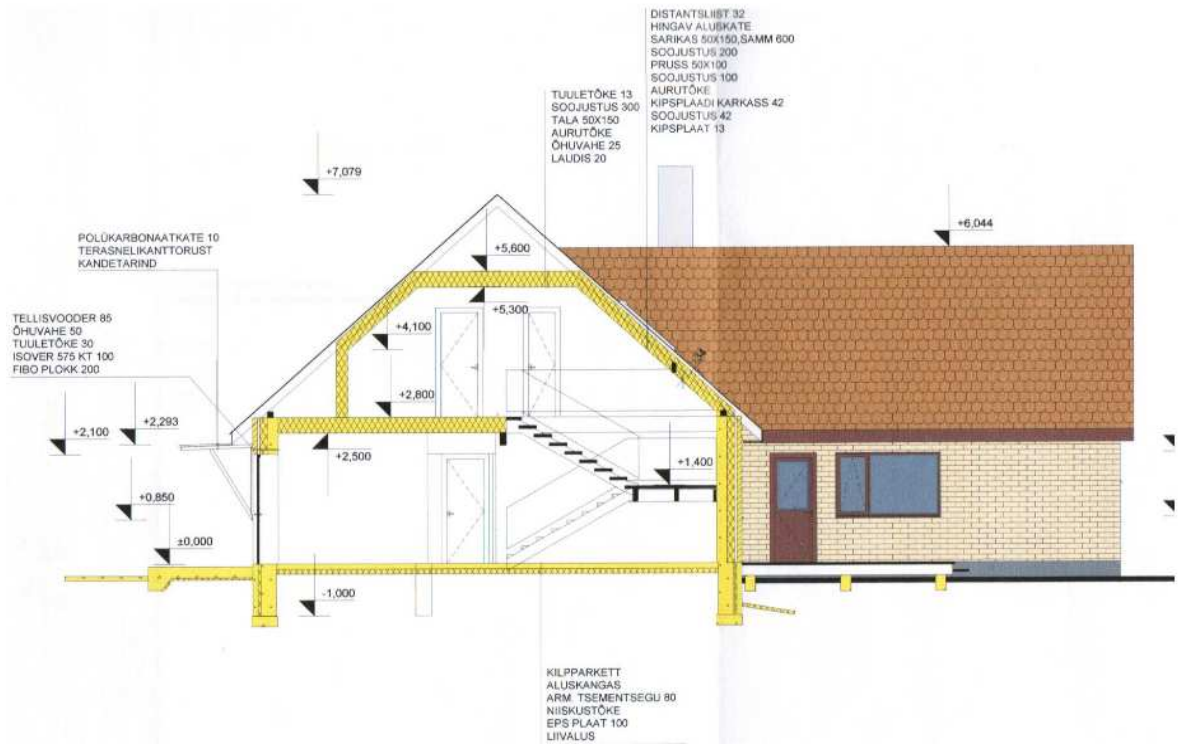
2.4. Maa-aluste tühimike soojusenergia salvesti

Maa-aluste tühimike soojusenergia salvesti kujutab endast salvestussüsteemi, kus soojus salvestatakse suurtesse maa-alustesse veereservuaaridesse. Nendes reservuaarides salvestatakse soojus lihtsalt vee sisse või kruus/vesi segu sisse. Reservuaarid konstrueeritakse maa alla, mis peavad olema väga hea hüdroisoltasiooniga, et vesi ei lekiks ja samuti soojusisolatsiooniga. Selliseid süsteeme on juba paigaldatud, kuid neil on suured investeerimiskulud ja nad on endiselt veel arendusjärgus, mistõttu on nad väga harva esinevad. [24, 25]

3. KAHE MAAKÜTTE SÜSTEEMI ARVUTUS JA ANALÜÜS

3.1. Hoone konstruktsioon ja küttevajadus

Antud töös pakutakse küttesüsteemi lahendused konkreetse maja näitel. Hoone küttevajadus sõltub hoone konstruktsioonist, eriti soojusisolatsioonist ja õhutihedusest, soovitavast sisetemperatuurist ja konstruktsioonist tulenevalt ka sõltuvusest välisõhu temperatuurist. Töös kasutatava hoone (joonis 3.1) põhikonstruktsiooniks on 20 cm paksune Fibo plokk, mis on seest poolt krohvitud ja väljast vooderdatud 10 cm soojustusvillaga. Soojustusvilla peal on 3 cm tuuletõket ning välisviimistluseks on 8,5 cm tellisvoodrit, mis on õhuvahe tekitamiseks tuuletõkkest 5 cm eemal. Väikeelamul on ka 1 meetrine Fibo plokist soojustatud vundament. Põrand asub liiva padjal ja on soojustatud vahtpolüstüreeniga. Katus on soojustatud 30 cm soojustusvillaga.



Joonis 3.1. Väikeelamu ristlõige [30]

Väikeelamu kogupindala on 199 m^2, millest köetav on 188,4 m^2. Hoone ruumide kütmiseks on paigaldatud põrandakütte süsteem nii esimesele kui teisele korrusele. Väikeelamu igakuine küttevajadus on esitatud joonisel 3.2. Aastane küttevajadus on kokku 25 563 kW·h, mis sisaldab nii ruumide kui ka tarbevee kütmiseks kuluvat energiat. Hoone energiaerikulu on leitav järgmiselt:

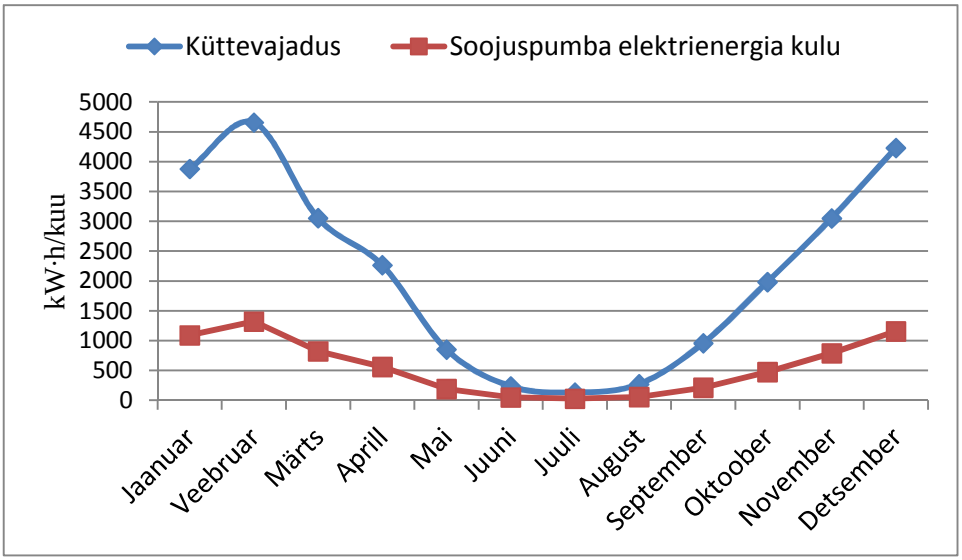
$$Q = \frac{A}{S_k} = \frac{25\,563}{188{,}4} = 135{,}7\ \text{kW} \cdot \text{h/m}^2, \tag{3.1}$$

kus Q on hoone erienergiakulu, kW·h/m^2;

A – hoone aastane kütteenergia kulu, kW·h;

S_k – hoone köetava osa pindala, m^2.

Valemi 3.1 järgi on töös kasutatava väikeelamu kütte erikulu 135,7 kW·h/m^2 aastas. Eestis loetakse hästi ehitatud 150 m^2 väikeelamu erikuluks 133 kW·h/m^2 [31], mis sisaldab nii ruumide kui tarbevee kütmiseks kuluvat energiat. Vastavalt energiatõhususe miinimumnõuetele [32] peab ehitatava hoone kütte erikulu olema alla 160 kW·h/m^2. Seega võib töös kasutatavat hoonet pidada hästi ehitatud majaks.



Joonis 3.2. Väikeelamu aastane küttevajadus ja soojuspumba käitamiseks kuluv elektrienergia kuude lõikes

Jooniselt 3.2 on näha, et kõige suurem hulk energiat kulub veebruaris, kus hoone hea sisekliima hoidmiseks kuluks 4656 kW·h. Kõige vähem energiat kulub loomulikult suvekuudel, kus enamus energiat kulub tarbevee soojendamiseks ja vastav väikseim

energiakulu oleks 132 kW·h/kuu. Eesti Standardile EVS 893:2003 vastavate arvutuste kohaselt on teada ka hoone maksimaalne arvutuslik soojuskadu, mis on 9,8 kW. Hoone arvutuslik soojuskadu on leitud piirdekonstruktsioonide, ventilatsiooni ja infiltratsiooni soojuskadude summeerimisel, kuhu juurde on lisatud ka tarbevee soojendamiseks kuluv energia. Arvutusliku soojuskao järgi saab valida küttesüsteemi võimsuse, mis antud hoone puhul jääks 10 kW (väljundvõimsus) juurde. Kütteseadmeks valitakse vastavalt töö eesmärgile maasoojuspump.

3.2. Päikesepaneelide kombineerimine küttesüsteemiga

Käesoleva töö eesmärk on maakütte süsteemi efektiivsuse tõstmine päikesepaneelidega, seetõttu on vajalik teada, kui palju energiat Eestis päikeselt oleks võimalik saada. Kuna PV päikesepaneelide kasutegurid jäävad alla 20%, siis nendele töös ei keskenduta. Küttesüsteemidega kombineeriks just päikesekollektoreid, sest nende kasutegur jääb 80% juurde. Vastavalt Tõravere meteoroloogia jaamas mõõdetud kiirgusandmetele oli aastane summaarne kiirguse hulk 2014. aastal 3588,8 MJ/m^2 ehk 996,9 kW·h/m^2 [33]. Tabelis 3.1 on esitatud summaarsed päikesekiirguse hulgad kuude lõikes.

Tabel 3.1. Summaarse päikesekiirguse hulk kuude lõikes aastal 2014 [33]

Kuu	**Kiirguse hulk, MJ/m^2**	**Kiirguse hulk, kW·h/m^2**
Jaanuar	59,4	16,5
Veebruar	74,1	20,6
Märts	274,3	76,2
Aprill	516,4	143,4
Mai	523,7	145,5
Juuni	485,6	134,9
Juuli	655,3	182,0
August	470,2	130,6
September	336,3	93,4
Oktoober	131,8	36,6
November	39,8	11,1
Detsember	22,0	6,1
Kokku	3588,8	996,9

Tabeli 3.1 järgi on järeldatav, et päikesekiirguse langemine maapinnale on Eestis kuude lõikes ebaühtlane. Kui aprillist augustini on päikesekiirguse hulk 130,6–182,0 kW·h/m^2, siis jaanuar-veebruar ja november-detsember on see alla 20,6 kW·h/m^2. Aastane summaarne päikesekiirguse hulk on siiski suur, sest on ligilähedane Kesk-Euroopas mõõdetud päikesekiirgus hulkadega, kuid aastaringi stabiilsemalt. Seega suveperioodil, kui hoone küttevajadus on väike ja päikesekollektorite tootlikus suur, oleks vaja üleliigne soojusenergia salvestada, et seda kütmisperioodil efektiivsemalt kasutada. Maasoojuspumba COP-i tõstmise üheks võimaluseks oleks ka päikesekollektorite poolt toodetud soojusenergia lisamine maakontuuri või selle lähedale pinnasesse. Kevadel ja hilissügisel kui maapind maakollektori ümber jahtub, siis selle tulemusena väheneb COP. Päikesekollektoritelt saadava soojusenergiaga oleks võimalik jahtumisprotsessi aeglustada ja selle võrra hoida COP-i kauem kõrgemal või isegi tõsta.

Kui suurt päikesejaama paigaldada oleneb hoone küttevajadusest, küttevõimsusest ja ka tarbija enda soovist. Mida suurem on päikesekollektorite plokk, seda vähem päikeseenergiat on vaja sama võimsuse tootmiseks. Suurema plokki abil on võimalik maapinna soojakadusid kompenseerida varem kevadel ja hiljem sügisel. Päikeseküttesüsteemi kõrge efektiivsuse tagamiseks on vaja kollektoreid jahutada, seda kas suure tarbimise või soojuse salvestamise näol [34]. Päikesekollektori efektiivsus oleneb kollektoris ringleva lahuse keskmise temperatuuri ja välistemperatuuri vahest, päikesekiirguse hulgast ja päikesekollektori toodetud energiahulgast [28]. Joonisel 3.3 on esitatud 30 m^2, 20 m^2 ja 10 m^2 päikesekollektorite tootlikus vastavalt 2014. päikesekiirgus hulgale kuude lõikes. Oletades, et paigaldatud on vaakumtorudega kollektorid, mille kasutegur on aastaringselt keskmiselt näiteks 70 %, siis päikesekollektori toodetav energia hulk näiteks 30 m^2 pindalaga veebruarikuus on leitud järgmiselt:

$$q = A \cdot G \cdot \eta = 30 \cdot 20{,}6 \cdot 0{,}7 = 432{,}3 \text{ kW} \cdot \text{h}, \tag{3.2}$$

kus q on päikesekollektorite poolt toodetav energiahulk, kW·h;

A – päikesekollektorite pindala, m^2;

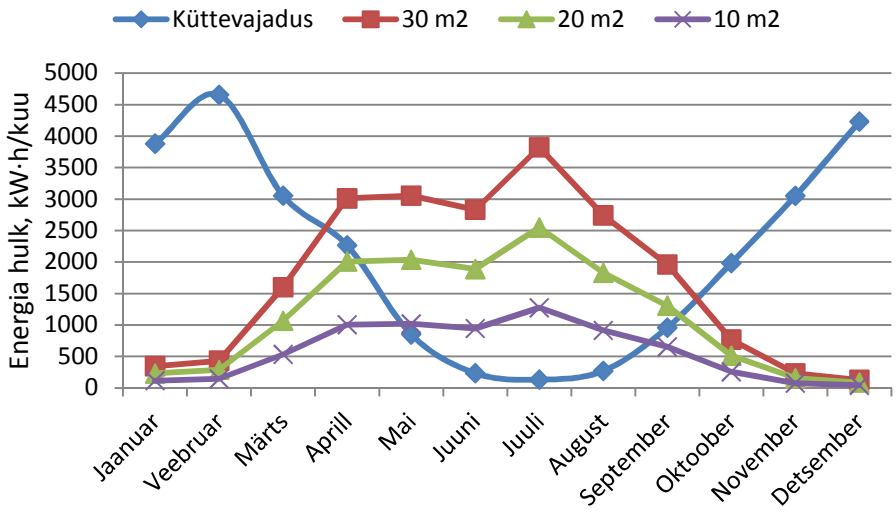
G – päikesekiirguse hulk, kW·h/m^2;

η – kasutegur.

Sarnaselt valemile 3.2 on teostatud kõik arvutused kõikide päikesekollektorite pindalade kohta ja andmed on esitatud tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Päikesekollektorite hinnanguline tootlikus kuude lõikes 2014 aasta andemete põhjal

Kuu	Kiirgusehulk, kW·h/m2 [31]	Hoone küttevajadus, kW·h	30 m^2 tootlikus, kW·h	20 m^2 tootlikus, kW·h	10 m^2 tootlikus, kW·h
Jaanuar	16,5	3879	346,5	231,0	115,5
Veebruar	20,6	4656	432,3	288,2	144,1
Märts	76,2	3054	1600,1	1066,7	533,4
Aprill	143,4	2265	3012,3	2008,2	1004,1
Mai	145,5	852	3054,9	2036,6	1018,3
Juuni	134,9	234	2832,7	1888,4	944,2
Juuli	182,0	132	3822,6	2548,4	1274,2
August	130,6	270	2742,8	1828,6	914,3
September	93,4	957	1961,8	1307,8	653,9
Oktoober	36,6	1983	768,8	512,6	256,3
November	11,1	3051	232,2	154,8	77,4
Detsember	6,1	4230	128,3	85,6	42,8
Kokku	996,9	25563	20935,3	13956,8	6978,4



Joonis 3.3. Päikesekollektorite tootlikkus ja hoone küttevajadus kuude lõikes

Tabelist 3.2 ja jooniselt 3.3 erinevate pindaladega päiksekollektorite tootlikkus erinevus on suur. Kui 30 m^2 pindalaga päikesekollektorid toodavad aastas kokku umbes 81,9% kogu hoone küttevajadusest, siis 10 m^2 pindalaga kollektorid kõigest 27,3%. Teiseks on jooniselt 3.3 näha, et enamus osa energiast toodetakse päikesekollektorite abil just suveperioodil, mis ületab kordades vajaminevat küttevajadust. Seega oleks hea seda energiat salvestada pikemaks perioodiks ning kasutada külmemal perioodil maasoojuspumba efektiivsuse

tõstmiseks. Kui suurt plokki paigaldada ja kui palju päikeseenergia arvelt kokku hoida, oleneb tarbijast endast.

3.3. Võimalikud lahendused maakütte süsteemi efektiivsuse tõstmiseks

Töös kasutatava väikeelamu üldpindala on 199 m^2, millest köetav osa 188,4 m^2. Hoone maksimaalne arvutuslik soojuskadu on 9,8 kW ja hoone küttevajaduse rahuldamiseks on paigaldatud 10 kW väljundvõimsusega maasoojuspump. Teades, et üks m^2 köetavat pinda vajab vähemalt 3 m maakollektorit [10], siis antud süsteemile on paigaldatud 600 m tavalist maakollektorit, mis on võimeline ammutama piisavalt energiat hoone küttevajaduse katmiseks.

Maaküttesüsteemis on maasoojuspump kombineeritud päikesepaneelide plokiga, mis salvestab energia maa-alusesse soojussalvestisse ja sealt juhitakse soojus läbi soojusvaheti maasoojuspumba maakollektorisse. Soojussalvestist võetavat soojust kasutatakse maakollektoris ringleva etanoolilahuse temperatuuri tõstmiseks. Teades, et etanooli lahuse temperatuurist sõltub maasoojuspumba COP (joonis 1.4), oleks päikesekollektoritelt saadava energia abil võimalik tõsta küttesüsteemi efektiivsust. Kui suurt päikesekollektorite plokki kasutada oleneb sellest, kui palju lahuse temperatuuri tõsta.

Maakollektoris tsikuleerib 30%-line etanoolilahus, mille termodünaamilised andmed on esitatud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Etanoolilahuse termodünaamilised andmed [28]

Lahus	**Jäätumispunkt, °C**	**Soojusjuhtivus *k*, W/(m·K)**	**Erisoojusmahtuvus *c*, J/(kg·K)**	**Tihedus *ρ*, kg/m³**
Etanool 30%	–20	0,399	4170	966

Maakollektori pikkus on 600 m ja kollektorina kasutatakse plastiktoru PEM 40x2,4, mille siseraadius 17,6 mm ehk 0,0176 m. Maakollektoris ringleva etanoolilahuse kogus on leitav järgmise valemiga:

$$V = (r^2 \cdot \pi) \cdot l = (0{,}0176^2 \cdot \pi) \cdot 600 = 0{,}6\ \mathrm{m}^3, \tag{3.3}$$

kus V on etanoolilahuse kogus, m^3;

r – plastiktoru siseraadius, mm;

l – kollektori pikkus, m.

0,6 m^3 etanoolilahuse mass on leitut valemiga 3.4:

$$m = V \cdot \rho = 0{,}6 \cdot 966 = 579{,}6 \text{ kg}, \tag{3.4}$$

kus m on etanoolilahuse mass, kg;

ρ – tihedus, kg/m^3 (tabel 3.3).

Maakollektoris tsirkuleeriva etanoolilahuse temperatuuri tõstmiseks 1 ^oC võrra kulutatav energia on leitud valemiga:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 4170 \cdot 579{,}6 \cdot 1 = 2416932 \text{ J}, \tag{3.5}$$

kus Q on temperatuuri tõstmiseks kuluv energia, J;

Δt – temperatuuride vahe.

Vastavalt valemile 3.5 etanooli temperatuuri tõstmiseks 1 ^oC võrra kulub 2 416 932 J ehk 0,671 kW·h energiat. Ühe kuu jooksul oleks vaja energiat kokku umbes 483,4 kW·h. Analoogselt valemile 3.5 on leitud vajalikud keskmised energiahulgad enam kui 1 ^oC võrra tõstmiseks ja tulemused on esitatud tabelis 3.4.

Tabel 3.4. Keskmine energiahulk, mis on vajalik etanoolilahuse temperatuuri tõstmiseks ja keskmine energiakulu ühes kuus

Temperatuuride vahe	**+1 ^{o}C**	**+2 ^{o}C**	**+3 ^{o}C**	**+4 ^{o}C**	**+5 ^{o}C**
Energia, kW·h	0,671	1,343	2,014	2,685	3,357
Energia kulu, kW·h/kuu	483,4	966,8	1450,2	1933,5	2416,9

Maasoojuspumbale on paigaldatud tsirkulatsioonipump, mille maksimaalne tootlikkus 2,2 m^3/h ehk 0,000611 m^3/s (0,611 l/s). Teades, et etanoolilahuse kogus maakollektoris on 0,6 m^3 (valem 3.3), siis sellise koguse tsirkuleermiseks kuluv aeg on leitav järgmiselt:

$$t = \frac{V}{v} = \frac{0{,}6}{0{,}000611} = 982 \text{ s}, \tag{3.6}$$

kus t on kogu etanoolilahuse koguse tsirkuleerimiseks kuluv aeg, s;

v – tsirkulatsioonipumba tootlikus, m^3/s.

Üldjuhul on maasoojuspumbast lahkuva ja siseneva külmakandja temperatuuride vahe 3 ^{o}C [34]. Kasutades valemit 3.5 saab leida energia, mis võetakse maa seest ja kasutatakse etanoolilahuse soojendamiseks:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 4170 \cdot 579{,}6 \cdot 3 = 7250796 \text{ J}.$$

Võimsus, mida kasutatakse etanoolilahuse temperatuuri tõstmiseks, on leitud järgmiselt:

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{7250796}{982} = 7383{,}7 \text{ W}, \tag{3.7}$$

kus P on etanoolilahuse tõstmiseks kasutatav võimsus pinnasest, W.

Kuna maaküttesüsteem on kombineeritud päikesekollektorite plokiga, mille abil toodetakse lisasoojust, et tõsta etanoolilahuse temperatuuri ja COP'd. Maksimaalne võimsus, mida kasutatakse 1 ^{o}C võrra tõstmiseks päikesekollektorite poolt, on leitud järgmiselt:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 4170 \cdot 579{,}6 \cdot 1 = 2416932 \text{ J},$$

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{2416932}{982} = 2461{,}2 \text{ W} \approx 2{,}461 \text{ kW}.$$

Sarnaselt on leitud maksimaalsed võimsused kui tõsta etanoolilahuse temperatuuri rohkem kui 1 ^{o}C võrra ja tulemused on kantud tabelisse 3.5.

Tabel 3.5. Päikesekollektorite poolt juurde antav võimsus etanoolilahuse tõstmiseks teatud temperatuuri võrra

Temperatuuride vahe	**+1 ^{o}C**	**+2 ^{o}C**	**+3 ^{o}C**	**+4 ^{o}C**	**+5 ^{o}C**
Võimsus, kW	2,461	4,923	7,384	9,845	12,306

Tabeli 3.4 toodud andmete ja joonise 1.4 [6] põhjal on valmistatud joonis 3.4, kus on näidatud maasoojuspumba teoreetilise COP'i tõus. Joonise 3.4 valmistamiseks on kasutatud Excel'it, kus esialgsele COP'ile paigaldati eksponentsiaalne *trendline*, mille valemiks saadi Excel'i abil järgmine valem:

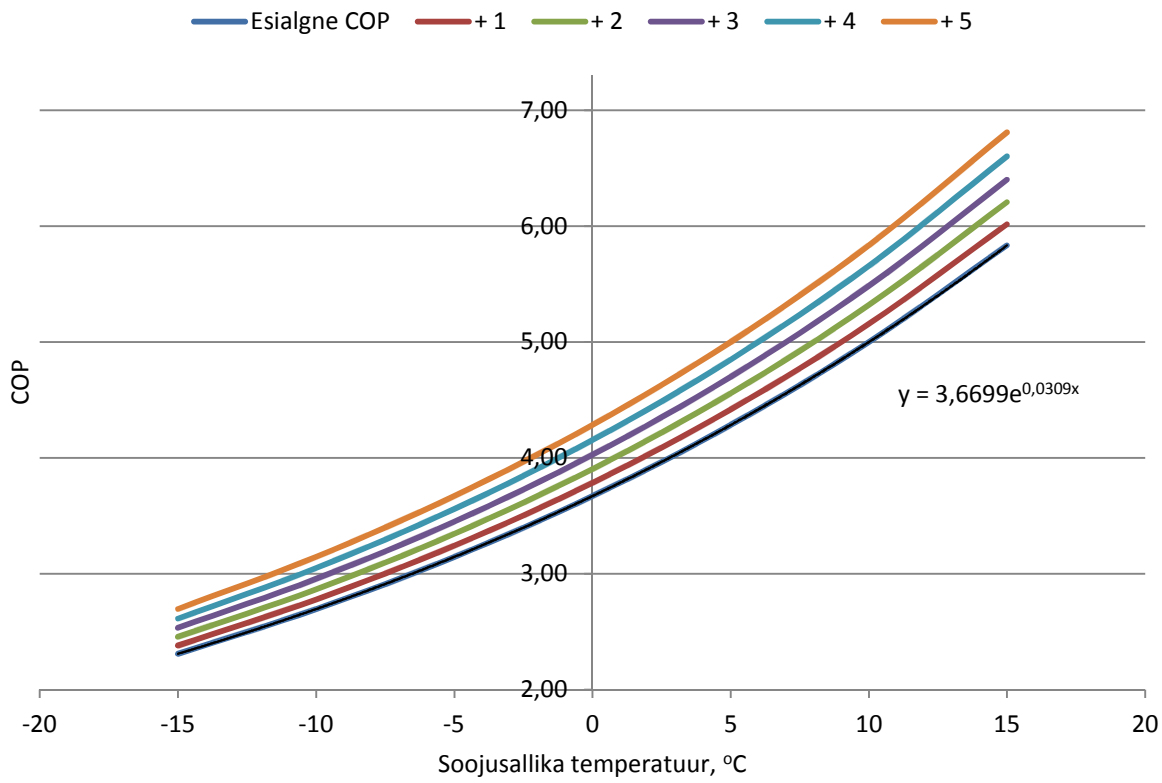
$$y = 3{,}6699 \cdot e^{0{,}0309 \cdot x}, \tag{3.8}$$

kus y on soojuspumba COP;

x – soojusallika temperatuur, ^{o}C.

Valemi 3.8 abil on moodustatud joonise 3.4 kõverad temperatuuride tõstmise tulemusena, liites valemis 3.8 *x*-le juurde vastava arvu kraade. Joonise 1.4 on tumeda joonena keskmine

leitud COP, kui joonisel 3.4 on joonisel 1.4 näidatud COP'de vahemiku alumised väärtused, sest need tunduvad reaalsemad.



Joonis 3.4. Maasoojuspumba esialgne COP [6] ja etanoolilahuse temperatuuri tõstmise tulemusena leitud hinnanguline COP

Jooniselt 3.4 saab järeldada, et tõstes etanoolilahuse temperatuuri on võimalik suurendada soojuspumba COP'd ja seetõttu peab tarbija kulutama vähem elektrienergiat maasoojuspumba käitamiseks. Joonisel 3.4 on antud soojusallika ehk pinnase temperatuurid, kuid etanoolilahus peaks saavutama enne maasoojuspumpa sama temperatuuri, mis pinnasel või väga lähedal sellele. Oletades, et maakontuuri etanoolilahuse temperatuuri tahetakse tõsta 4 ^{o}C võrra, siis ühes kuus kuluks keskmiselt 1933,5 kW·h. Tõstes etanoolilahuse temperatuuri kütmisperioodil oktoobrist aprillini, siis kogu vajaminev lisaenergia oleks 13 534,5 kW·h. Selle vajaduse kataks kui paigaldada 30 m^2 päikesekollektori plokk, mis tabeli 3.2 andmete järgi toodaks 20 935,3 kW·h aastas ja maist septembrini toodaks 14 414,8 kW·h. Tabelist 3.2 ja jooniselt 3.3 on näha, et talvisel perioodil toodaks selline päikesekollektorite plokk kõvasti alla 1933,5 kW·h kuus. Selleks, et hilissügisest kuni varakevadeni oleks võimalik etanoolilahuse temperatuuri kõrgemal hoida tuleb kasutusse maa-alune soojussalvesti.

Soojussalvesti kaevatakse maa alla, mille ehitus on sarnane joonisele 2.4. Salvesti soojusisolatsioonina kasutatakse 30 cm paksust vahtpolüstüreeni kihti ja hüdroisolatsioonina kasutatakse polüetüleenist katet, mis kaitseb nii ümbritseva pinnase niiskuse eest kui ka salvestis endas oleva niiskuse laiali valgumise eest. Salvestusvahendina kasutatakse liiva, kuhu sisse paigaldatakse päikesekollektoritest tulevad kontuurid. Salvestist edasi läheb kontuur soojusvahetisse, mis on ühenduses maakollektori kontuuriga. Salvesti suurus oleneb salvestatava energia hulgast, mis antud salvesti puhul oleks ümardatult 15 000 kW·h. Kogu päikeselt saadavat soojusenergiat ei koguta salvestisse, vaid on võimalus ka otse läbi soojussalvesti maakollektorisse juhtida.

Liiva termodünaamilised andmed on esitatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Liiva ja vee termodünaamilised andmed

Liiva erisoojusmahtuvus c_1, J/kg·K	**Vee erisoojusmahtuvus c_2, J/kg·K**	**Kuiva liiva tihedus ρ_1, kg/m^3**	**Veega täidetud liiva tihedus ρ_2, kg/m^3**
800 [36]	4182 [36]	1281 [37]	1922 [37]

Kasutades termodünaamilisi andmeid tabelis 3.6 saab leida soojussalvesti mahu järgmise valemiga [38]:

$$V = \frac{Q_s}{((\rho_1 \cdot c_1) + ((\rho_2 - \rho_1) \cdot c_2)) \cdot \Delta T}, \tag{3.9}$$

kus V on liiva maht, m^3;

Q_s – salvesti mahtuvus, J;

ρ_1 – liiva tihedus, kg/m^3;

c_1 – liiva erisoojusmahtuvus, J/kg·K;

ρ_2 – veega täidetud liiva tihedus, kg/m^3;

c_2 – vee erisoojusmahtuvus, J/kg·K;

ΔT – temperatuuride vahe, $\Delta T = 100 - 10 = 90$ [19].

$$V = \frac{15000 \cdot 3{,}6 \cdot 10^6}{((1281 \cdot 800) + ((1922 - 1281) \cdot 4182)) \cdot 90} = 162 \text{ m}^3$$

Valemi 3.9 abil leiti, et salvesti suurus on 162 m^3 ning oletades, et selle kõrgus *h* on 2 m, siis salvesti raadius *r* on leitud järgmiselt:

$$r = \sqrt{\frac{V}{h \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{162}{2 \cdot \pi}} = 5{,}1 \text{ m}, \tag{3.10}$$

kus r on salvesti raadius, m;

h – salvesti kõrgus, m.

Seega salvesti kõrguseks on 2 m ja raadiuseks 5,1 m. See kaevatakse maa alla, mille ümber paigaldatakse soojus- ja hüdroisolatsioon. Sellise süsteemi puhul siis kogutakse soojust salvestisse maist kuni septembrini. Alates küttevajaduse tõusust oktoobris kuni aprillini juhitakse seda soojust maasoojuspumba kontuuri, et etanoolilahuse temperatuuri tõsta. Kui suured on sellise salvesti soojuskaod on vaja kõigepealt leida salvesti piirete pindala. Salvesti ligikaudne piirde pindala, mis on kokkupuutes maapinnaga on leitud järgmise valemiga:

$$S = (2 \cdot \pi \cdot r) \cdot h + (\pi \cdot r^2) = (2 \cdot \pi \cdot 5{,}1) \cdot 2 + (\pi \cdot 26{,}01) = 145{,}8 \text{ m}^2, \tag{3.11}$$

kus S on salvesti piirete pindala, m^2.

Salvesti kaas on küll kaetud pinnasega, kuid selle kiht on nii õhuke, et seda mõjutab enamasti välisõhk. Seega kaane pindala tuleb leida eraldi, mis on järgmine:

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 26{,}01 = 81{,}7 \text{ m}^2, \tag{3.12}$$

kus S on salvesti piirete pindala, m^2.

Standardi EVS 829:2003 [39] põhjal arvutatakse salvesti soojuskadu sarnaselt hoone põranda soojuskadude arvutamise metoodikale. Lihtsustamise mõttes arvestatakse kogu salvesti IV tsooni alla, sest salvesti peab olema väga hea isolatsiooniga ja külmasildu seal olla ei tohi. Sellest tulenevalt on salvesti piirde soojustakistus leitud järgmiselt [39]:

$$R = R_1 + \frac{\delta}{\lambda} = 14{,}2 + \frac{0{,}3}{0{,}033} = 23{,}3 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}, \tag{3.13}$$

kus R on salvesti piirde soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$;

R_4 – neljanda tsooni soojustakistus, $m^2 \cdot K/W$;

δ – piirde kihi paksus, m;

λ – vahtpolüstüreeni soojuserijuhtivus, λ = 0,033 W/m·K [40].

Teades maapinnaga kokkupuutuva salvesti pindala on võimalik leida teoreetiline soojuskadu järgmiselt [39]:

$$Q_m = S \cdot U \cdot (T_s - T_v) = 145{,}8 \cdot \frac{1}{23{,}3} \cdot (60 - 5) = 344 \text{ W}, \quad (3.14)$$

kus Q_m on soojuskadu läbi maapinnaga kokkupuutes oleva osa, W;

U – salvesti piirde soojusjuhtivus ehk U – väärtus (soojustakistuse pöördv.), W/m^2·K;

T_s – salvestis olev temperatuur, nt 60 ^{o}C;

T_v – maapinna temperatuur, nt 5 ^{o}C.

Sarnaselt valemile 3.14 saab leida soojuskao läbi salvesti kaane, mida mõjutab õhutemperatuur:

$$Q_{\tilde{o}} = S \cdot U \cdot (T_s - T_v) = 81{,}7 \cdot \frac{1}{23{,}3} \cdot (60 - 0) = 210 \text{ W},$$

kus $Q_{\tilde{o}}$ on soojuskadu läbi välisõhuga kokkupuutuva osa, W;

T_s – salvestis olev temperatuur, nt 60 ^{o}C;

T_v – õhutemperatuur, nt 0 ^{o}C.

Seega kogu ligikaudne soojuskadu läbi soojussalvesti oleks:

$$Q = Q_m + Q_{\tilde{o}} = 344 + 210 = 554 \text{ W}, \quad (3.15)$$

kus Q on salvesti kogu ligikaudne soojuskadu, W.

Valemi 3.15 järgi on salvesti ligikaudne soojuskadu 554 W ehk 0,554 kW, mis on teoreetiline ja lihtsustatud. Oletades, et suveperioodil kui kogutakse energia salvestisse, on soojuskaod minimaalsed, sest õhutemperatuur on soojem, päikest rohkem ja selle võrra ka maapinna temperatuur kõrgem. Kütteperioodil on õhk jahedam ja maapind külmem, mistõttu hakkab soojuskadu suuremat mõju avaldama. Valemiga 3.15 leitud soojuskao tõttu väheneks ühes kuus energiahulk hinnaguliselt 399 kW·h võrra ja kütteperioodil kokku 2793 kW·h võrra. Sellest tulenevalt 30 m^2 pindalaga päikesekollektorite plokk ei suuda piisavalt soojusenergiat salvestisse suvekuude jooksul koguda. Kuid plokk on piisavalt suur, et talveperioodil lisasoojust toota ning aitaks kadusid kompenseerida. Kui palju päikesekollektorid talveperioodil etanoolilahuse temperatuuri tõsta suudavad on leitud valemiga 3.16 (jaanuari kuu näitel):

$$t = \frac{Q_p}{Q_e} = \frac{346,5}{483,4} = 0,717\ °C, \tag{3.16}$$

kus t on maapinna temperatuuri tõus, ^{o}C;

Q_p – päikesekollektorite ploki poolt toodetud energia ühes kuus, kW·h (tabel 3.2);

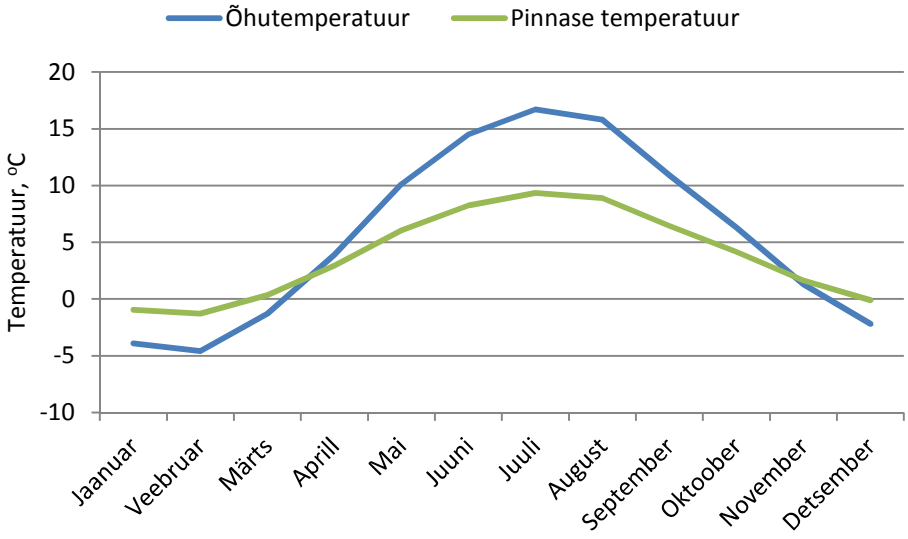
Q_e – vajalik energia etanoolilahuse tõstmiseks ühe ^{o}C võrra ühe kuu jooksul, kW·h (tabel 3.4);

Vastavalt valemile 3.16 on leitud kui palju päikesekollektorid suudavad tõsta etanoolilahuse temperatuuri teistel kütteperioodi kuudel ja andmed on lisatud tabelisse 3.7. Vastavalt tabelis 3.7 leitud tulemustele saab arvestada, et päikesekollektorid on võimelised soojussalvesti soojuskadusid kompenseerima ja edaspidistes arvutustes soojuskadusid ei arvestata.

Tabel 3.7. Päikesekollektorite poolt tõstetav etanoolilahuse temperatuur kütteperioodi kuude lõikes

Kuu	**30 m^2 tootlikus, kW·h**	**Temperatuuri tõus, ^{o}C**
Jaanuar	346,5	0,717
Veebruar	432,3	0,894
Märts	1600,1	3,310
Aprill	3012,3	6,231
Oktoober	768,8	1,590
November	232,2	0,480
Detsember	128,3	0,265

Teades Eesti aastate keskmist temperatuuri kuude lõikes [33] ja aastast keskmist pinnase temperatuuri, mis on ligikaudu 4 ^{o}C, on konstrueeritud joonis 3.7.



Joonis 3.7. Eesti aastate keskmine temperatuur ja hinnanguline maapinna temperatuur 1,2 m sügavusel kuude lõikes

On eeldatud, et maakontuuris ringlev etanoolilahus saavutab maapinna temperatuuri enne maasoojuspumpa sisenemist ja joonisel 3.7 hinnanguliselt leitud maapinna temperatuurid on esitatud tabelis 3.8. Kasutades neid temperatuure edaspidi kui etanoolilahuse vastava kuu keskmiste temperatuuridena ja valemit 3.8 on võimalik leida esialgne COP (jaanuari kuu näitel):

$$y = 3{,}6699 \cdot e^{0{,}0309 \cdot x} = 3{,}6699 \cdot e^{0{,}0309 \cdot (-1)} = 3{,}558,$$

kus y on soojuspumba COP;

x – soojusallika (etanoolilahuse) temperatuur, °C.

Sarnaselt on leitud ka teiste kuude ligikaudsed COP'd, mis kanti tabelisse 3.8. Elektrikulu on leitud tabelist 3.2 vastava kuu küttevajaduse jagamisel COP'ga ja tulemused on kantud tabelisse 3.8. Kasutades uuesti valemit 3.8 ja liites x-le 4 °C, leiti uus teoreetiline COP järgmiselt (jaanuari kuu näitel):

$$y = 3{,}6699 \cdot e^{0{,}0309 \cdot (-1+4)} = 4{,}026.$$

Analoogselt on leitud ka teiste kuude uued teoreetilised COP'd, mille jooksul salvestisse kogutud soojusenergiat etanoolilahuse tempertuuri tõstmiseks kasutatakse ja tulemused kantud tabelisse 3.8. Kuu keskmine elektrikulu on leitud tabelist 3.2 vastava kuu küttevajaduse jagamisel uue COP'ga ja tulemused on samuti kantud tabelisse 3.8.

Tabel 3.8. Esialgsed ja arvutatud maasoojuspumba elektrikulu ning COP kuude lõikes

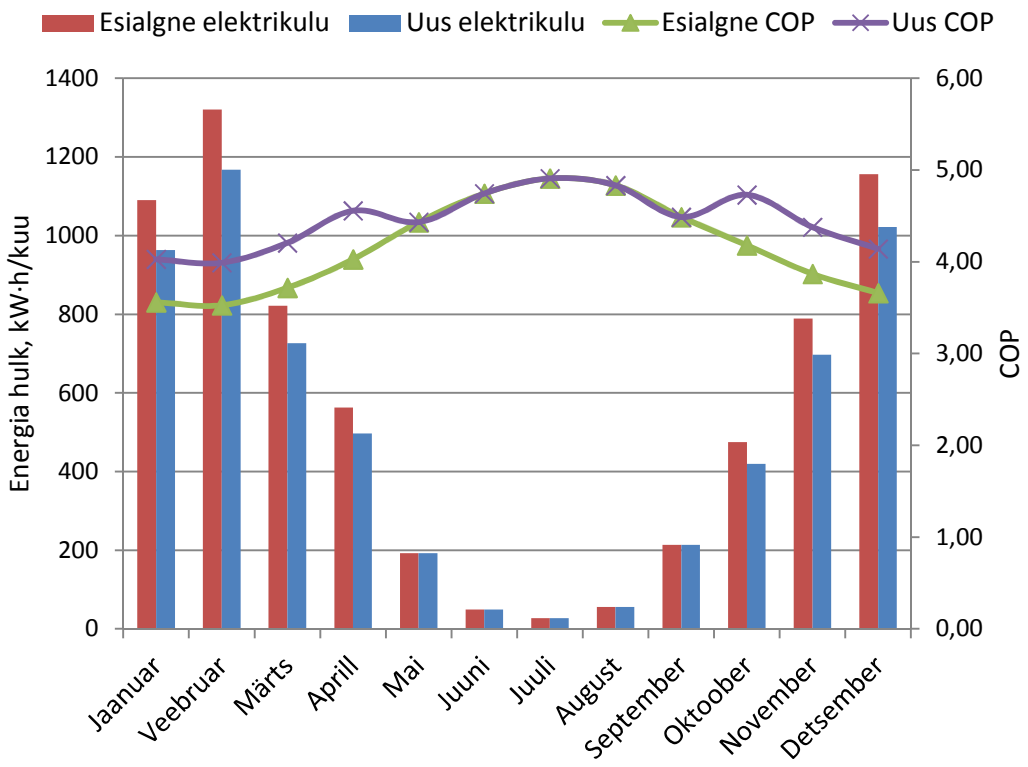
Kuu	Etanoolilahuse temperatuur, °C	Esialgne COP	Esialgne elektrikulu, kW·h	Uus COP	Uus elektrikulu, kW·h
Jaanuar	–1,0	3,558	1090	4,026	963
Veebruar	–1,3	3,525	1321	3,989	1167
Märts	0,4	3,716	822	4,204	726
Aprill	3,0	4,026	563	4,556	497
Mai	6,1	4,431	192	4,431	192
Juuni	8,3	4,743	49	4,743	49
Juuli	9,4	4,907	27	4,907	27
August	8,9	4,832	56	4,832	56
September	6,5	4,486	213	4,486	213
Oktoober	4,2	4,178	475	4,728	419
November	1,7	3,868	789	4,377	697
Detsember	–0,1	3,659	1156	4,140	1022
Kokku	–	–	6753	–	6030

Tabelist 3.8 on näha, et kütmisperioodil paraneb iga kuu keskmine COP ligikaudu 0,5 võrra. Selle tulemusena kulutatakse aastas 723 kW·h vähem elektrienergiat, mis tähendab 10,7 % väiksemat elektrikulu. Päikesekollektorite plokk on võimeline veelgi maasoojuspumba elektrikulu kütteperioodil vähendama, kuid antud töös arvestatakse, et päikesekollektorite plokk kompenseerib ainult soojussalvesti soojuskadusid. Teades, et 2014. aasta seisuga on elektrihind koos käibemaksuga 10,4 s/kW·h [41,42], siis rahaline kokkuhoid on leitud järgmiselt:

$$T = \frac{723 \cdot 10{,}4}{100} = 75{,}2, \tag{3.17}$$

kus T on rahaline kokkuhoid eurodes.

Vastavalt valemile 3.17 on rahaline kokkuhoid 75,2 eurot aastas. Joonisel 3.8 on kujutatud esialgse ja uue elektrikulu ning COP erinevused kuude lõikes tuginedes tabeli 3.8 andmetele.



Joonis 3.8. Esialgne ja uus elektrikulu ning COP kuude lõikes

Jooniselt 3.8 ja tabelist 3.8 avaldub, et kütmiseprioodil kui etanoolilahuse temperatuuri tõstetakse 4 ^{o}C kraadi võrra, siis maasoojuspumba elektrikulu väheneb ja suureneb maasoojuspumba COP. Soojemal perioodil maist septembrini toimub soojuse salvestamine soojussalvestisse ning sellel perioodil efektiivsus jääb samaks. Kogu aasta keskmine esialgne teoreetiline COP oli 4,161 ja uus teoreetiline COP peale lahuse temperatuuri tõstmist tuli 4,452. Seega töö eesmärk, mis oli maakütte süsteemi efektiivsust tõsta, on selle süsteemi abil teoreetiliselt täidetud. Tabelis 3.9 on välja toodud tulemused kui etanoolilahuse temperatuuri tõsta 2 ^{o}C, 3 ^{o}C ja 5 ^{o}C võrra.

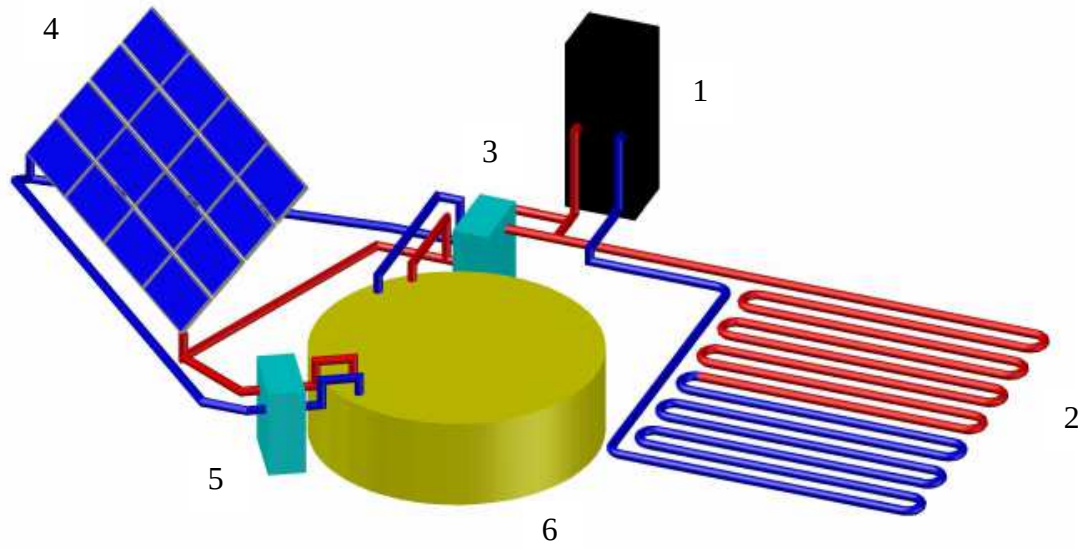
Tabel 3.9. COP ja elektrikulu kuude lõikes etanoolilahuse temperatuuri tõstmisel

Kuu	COP (+2 ^{o}C)	Elektrikulu, kW·h	COP (+3 ^{o}C)	Elektrikulu, kW·h	COP (+5 ^{o}C)	Elektrikulu, kW·h
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Jaanuar	3,785	1025	3,904	994	4,153	934
Veebruar	3,750	1242	3,868	1204	4,114	1132
Märts	3,952	773	4,076	749	4,336	704
Aprill	4,283	529	4,417	513	4,699	482
Mai	4,431	192	4,431	192	4,431	192
Juuni	4,743	49	4,743	49	4,743	49

Tabel 3.9. jätk

1	2	3	4	5	6	7
Juuli	4,907	27	4,907	27	4,907	27
August	4,832	56	4,832	56	4,832	56
September	4,486	213	4,486	213	4,486	213
Oktoober	4,445	446	4,584	433	4,877	407
November	4,114	742	4,244	719	4,514	676
Detsember	3,892	1087	4,014	1054	4,270	991
Kokku	–	6380	–	6202	–	5863

Tabelist 3.9 selgub, et mida rohkem etanoolilahuse temperatuuri tõsta seda kõrgem on COP ja seda väiksem on maasoojuspumba käitamiseks vajaminev elektrikulu.

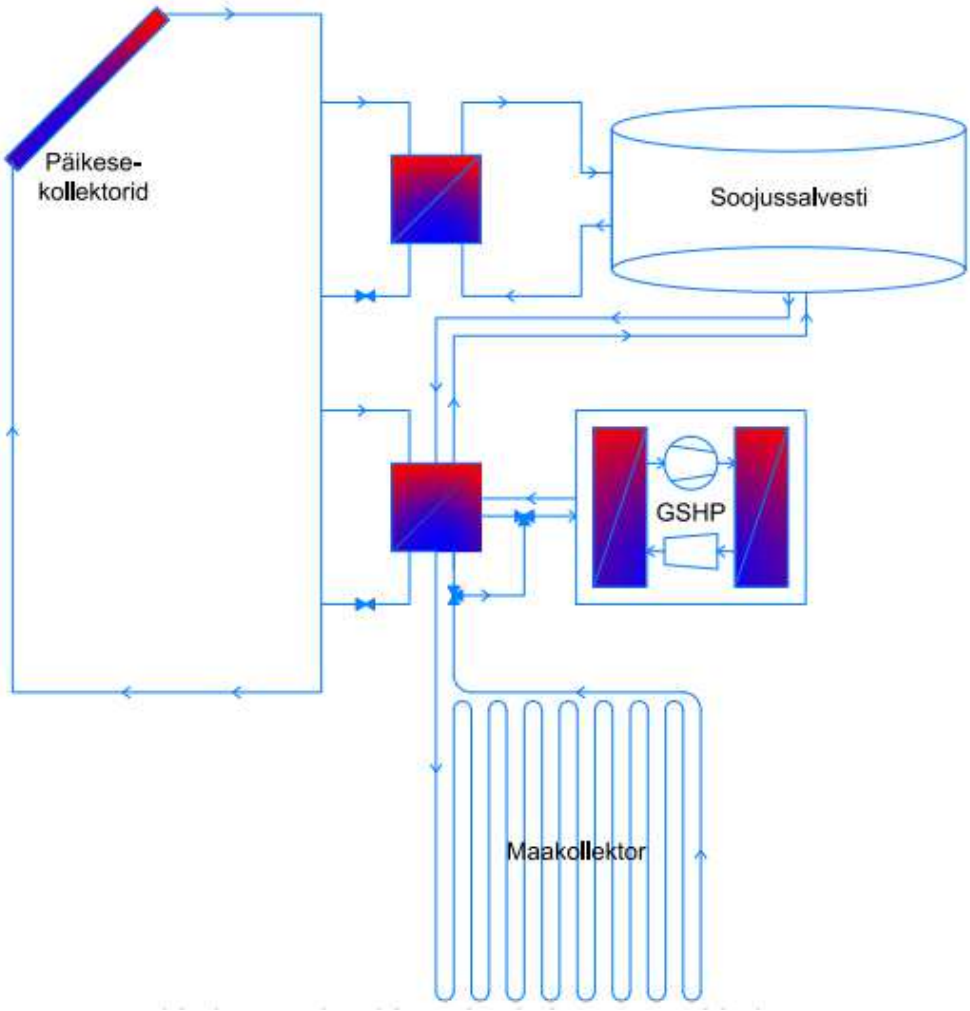


Joonis 3.9. Maaküttе süsteemi põhimõtteskeem, mis on kombineeritud päikesekollektorite ja maa-aluse soojusenergia salvestiga

Samas mida rohkem tõsta etanoolilahuse temperatuuri seda suuremat päikesekollektorite plokki ja soojussalvestit on vaja ehk suurenevad investeerimiskulud ja samuti soojuskaod.

Joonisel 3.9 on kujutatud põhimõtteskeem, kus maasoojuspump on kombineeritud päikesekollektorite ja maa-aluse soojussalvestiga. Joonisel on maasoojuspump (1) ning maa-alune soojusenergia kollektor (2), mille abil köetakse hoone ruume ja soojendatakse tarbevett. Maakontuur võib tulla otse tagasi soojuspumpa või siis läbi soojusvaheti (3), kus kütteperioodil antakse etanoolilahusele lisasoojust. Vajalik lisavõimsus etanoolilahuse tõstmiseks saadakse 30 m^2 päikesekollektorite ploki (4) abil. Kollektoritelt saadav soojus kogutakse läbi soojusvaheti (5) suveperioodil soojussalvestisse (6), kust kütteperioodil

vajalik soojus juhitakse soojusvahetisse (3), mis on ühenduses maakontuuriga. Kontuurides ringlev lahus liigub sinisest (madalam temperatuur) punase suunas (kõrgem temperatuur).

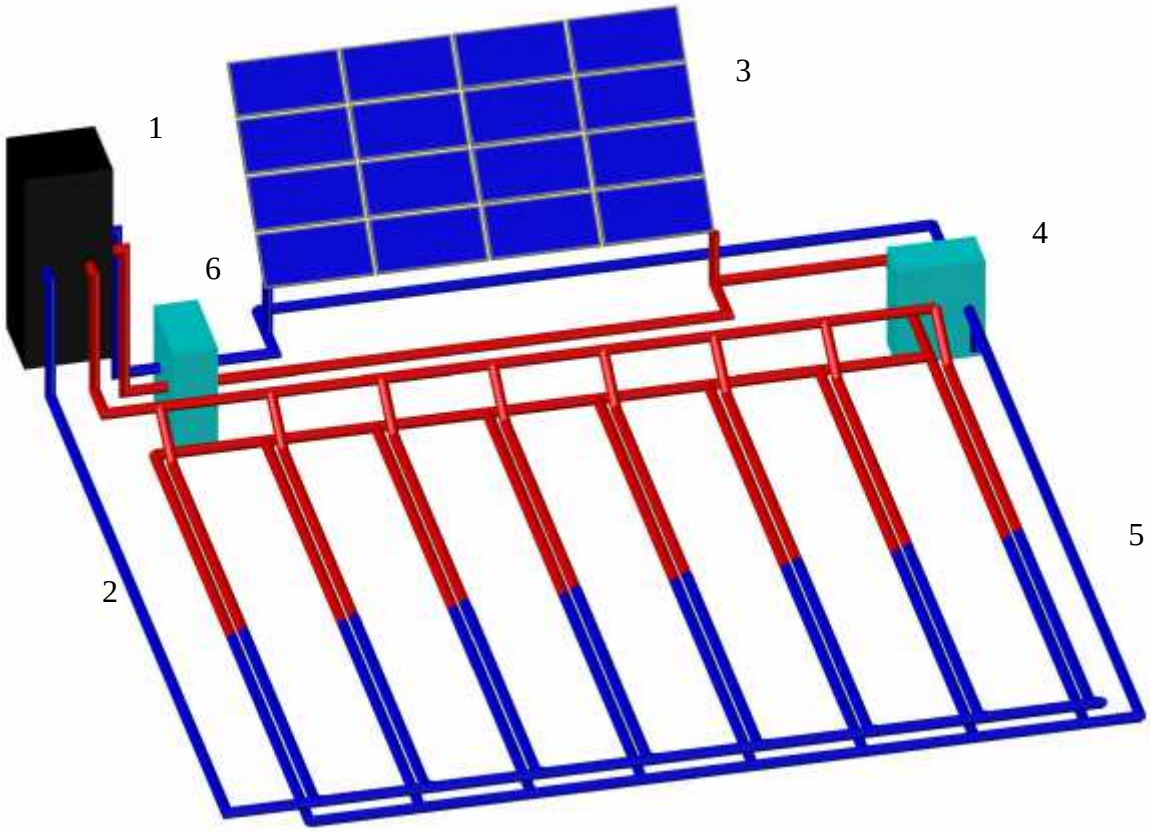


Joonis 3.10. Soojussalvestiga süsteemi põhimõtteskeem

Joonisel 3.10 on välja toodud soojussalvestiga süsteemi põhimõtteskeem. Süsteemi teise variandi korral on maasoojuspump kombineeritud päikesekollektoritega.

Antud süsteemis on samuti paigaldatud 10 kW maasoojuspump, et rahuldada hoone küttevajadust. Erinevalt eelnevalt kirjeldatud süsteemile on selle soojuspumba maakontuur paigaldatud pinnasesse rööbiti lisakontuuriga (joonis 3.11). Lisakontuur (5) on isoleeritud, et vältida liigset soojuse kandumist ümberkaudsesse pinnasesse. Isoltasioon puudub lisakontuuri ja maakontuuri kokkupuute kohas, et soojusenergia kandumine maakontuuri oleks võimalikult suur. Seega on süsteemis maasoojuspump (1) kombineeritud päikesekollektoritega (3), mille soojus juhitakse läbi soojusvaheti (4) pinnasesse eraldi

kontuuriga (5), mis on paigutatud maakontuuri (2) kõrvale. Vastavalt joonisele 3.11 liigub maakontuuris (2) lahus suunaga siniselt punase poole ehk pinnasest võetakse soojus. Päikesekollektorite kontuuris (5) ringlev lahus annab pinnasesse soojust ehk liigub punasest sinise suunas. Lisaks on süsteemil võimalus päikesekollektoritelt soojus läbi soojusvaheti (6) otse soojuspumpa juhtida, mida kasutatakse põhiliselt tarbevee soojendamiseks, kuid on võimalus ka ruumide kütteks kasutada.



Joonis 3.11. Maakütte süsteemi põhimõtteskeem, mis on kombineeritud päikesekollektoritega

Oletades, et antud süsteemis kasutatakse 30 m^2 päikesekollektorite plokk, siis on vaja teada kui suurt võimsust selline plokk suudaks tuua ja palju suudaks see etanoolilahuse temperatuuri tõsta, kui üldse võimalik. Tabelist 3.2 võetakse 30 m^2 päikesekollektorite ploki tootlikus kuude lõikes. Tabelist 3.4 on teada, et kui 600 m maakontuuris tsirkuleerib 30% etanoolilahus, siis selle lahuse tõstmiseks 1 ^oC võrra kulub ühes kuus 483,4 kW·h. Seega saab leida mitu kraadi suudab päikesekollektor etanoolilahuse temperatuuri tõsta järgmise valemiga (jaanuari kuu näitel):

$$t = \frac{Q_p \cdot k}{Q_e} = \frac{346{,}5 \cdot 0{,}6}{483{,}4} = 0{,}430\ ^{\circ}\text{C}, \tag{3.18}$$

kus t on maapinna temperatuuri tõus, ^{o}C;

Q_p – päikesekollektorite ploki poolt toodetud energia ühes kuus, kW·h (tabel 3.2);

k – koenfitsient, mis arvestab ligikaudset soojuskadu ümberkaudsesse pinnasesse, k = 0,6.

Q_e – vajalik energia etanoolilahuse tõstmiseks ühe ^{o}C võrra ühe kuu jooksul, kW·h (tabel 3.4);

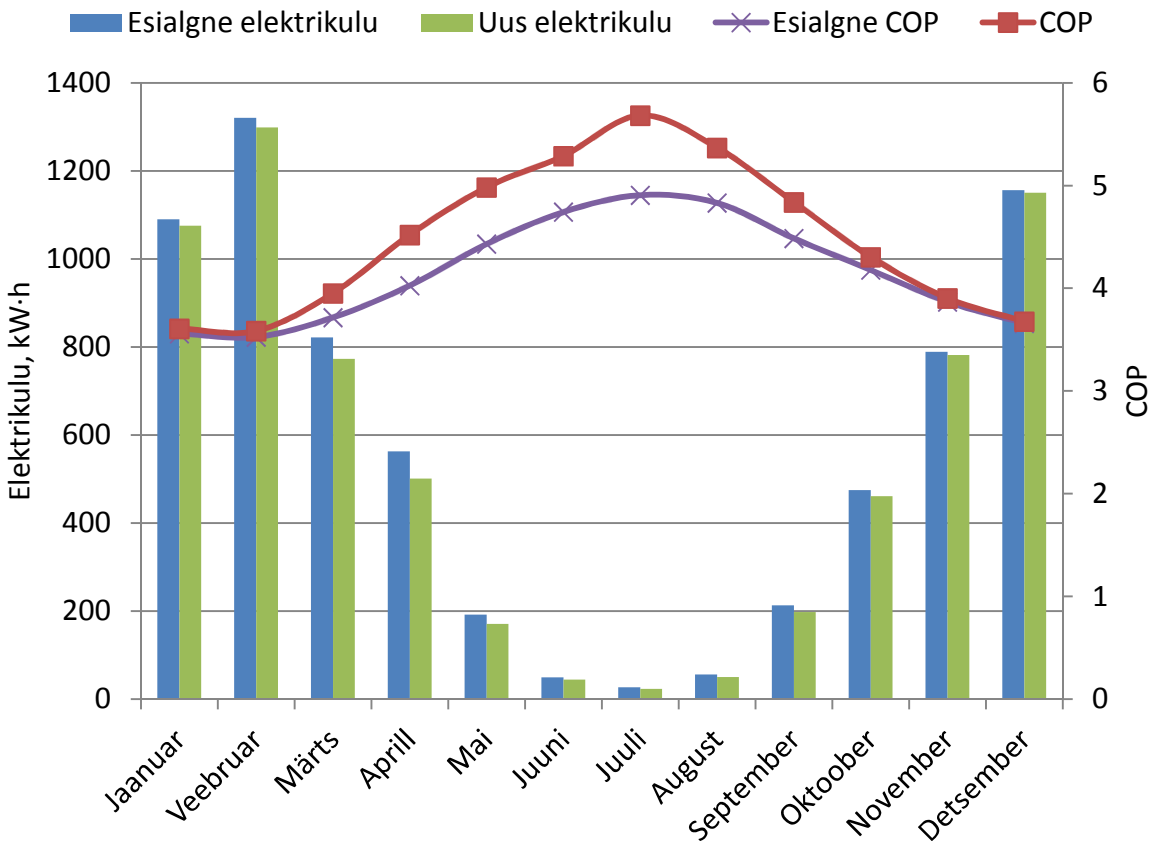
Vastavalt valemile 3.18 on leitud maapinna temperatuuri tõus iga kuu kohta ja tulemused on esitatud tabelis 3.10. Valemis 3.18 esitatud koenfitsient arvestab osa soojusenergia kandumisega ümberkaudsesse pinnasesse ehk umbes 60 % soojust antakse maakontuurile.

Tabel 3.10. Arvutuste tulemused

Kuu	**30 m^2 tootlikus, kW·h**	**Tempera-tuuri tõus, ^{o}C**	**Esialgne etanoolilahuse temperatuur, ^{o}C**	**Uus teoreeti-line COP**	**Küttevajadus, kW·h**	**Uus elektrikulu, kW·h**
Jaanuar	346,5	0,430	–1,0	3,606	3879	1076
Veebruar	432,3	0,537	–1,3	3,584	4656	1299
Märts	1600,1	1,986	0,4	3,951	3054	773
Aprill	3012,3	3,739	3,0	4,519	2265	501
Mai	3054,9	3,792	6,1	4,982	852	171
Juuni	2832,7	3,516	8,3	5,287	234	44
Juuli	3822,6	4,745	9,4	5,682	132	23
August	2742,8	3,404	8,9	5,368	270	50
September	1961,8	2,435	6,5	4,837	957	198
Oktoober	768,8	0,954	4,2	4,304	1983	461
November	232,2	0,288	1,7	3,902	3051	782
Detsember	128,3	0,159	–0,1	3,677	4230	1151
Kokku	20935,3	–	–	–	25563	6529

Valemi 3.8 põhjal on leitav uus teoreetiline COP iga kuu kohta ja andmed on samuti lisatud tabelisse 3.10. Jagades küttevajaduse (tabel 3.2) leitud COP-ga määratakse uus elektrikulu, mille tulemused on kanti tabelisse 3.10.

Tabelist 3.10 järeldub, et soojuspumbale kuluks antud süsteemi kasutades 6529 kW·h elektrienergiat ja aasta keskmine teoreetiline COP oleks 4,475. Tabeli 3.10 andmetel on koostatud joonis 3.12, kus on esitatud esialgne ja uus elektrikulu ning COP.

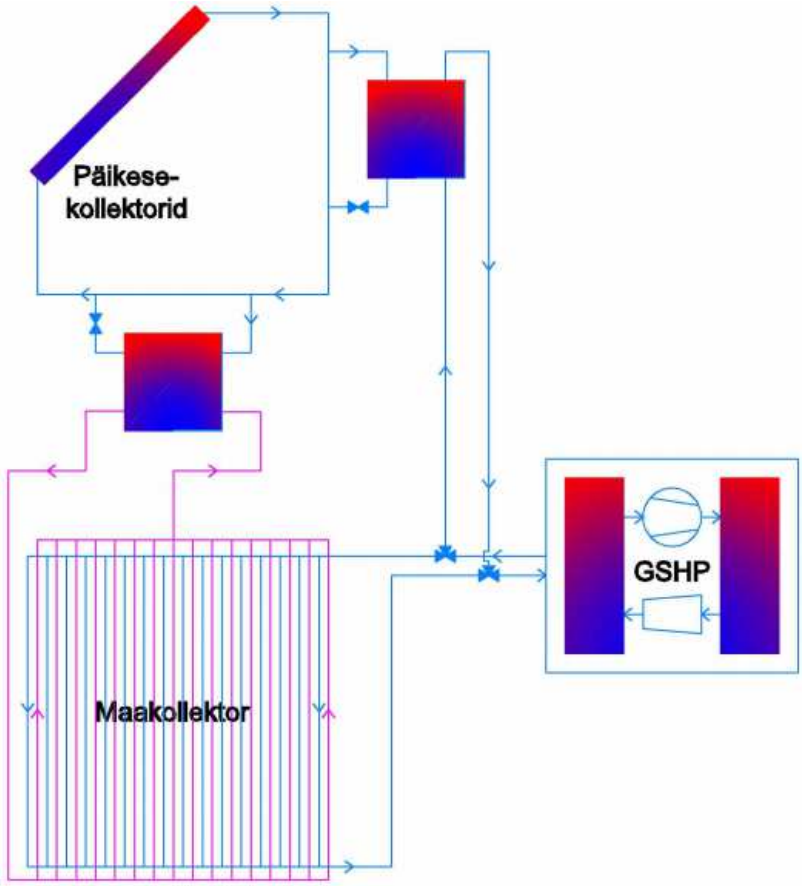


Joonis 3.12. Süsteem 2 esialgne ja uus elektrikulu ning COP kuude lõikes

Teades, et 2014. aasta seisuga on elektrihind koos käibemaksuga 10,4 s/kW·h [41,42] ja esialgse maasoojuspumbale kulutatava aastase elektrikuluga (tabel 3.8) on vahe 224 kW·h, siis rahaliselt oleks kokkuhoid leitud järgmiselt (valem 3.17):

$$T = \frac{224 \cdot 10{,}4}{100} = 23{,}3.$$

Vastavalt valemile 3.17 on rahaline kokkuhoid selle süsteemi puhul 23,3 eurot aastas. Päikesekollektorite tootlikkus on suurim suvekuudel, mil küttevajadus väikseim. Seega on süsteemil võimalus panna päikesekollektorid otse tarbevett soojendama, mistõttu maasoojuspump ei peaks üldse töötama, kuid siin töös on arvestatud, et maasoojuspump jääb tööle koos päikesekollektorite abiga.



Joonis 3.13. Soojussalvestita süsteemi põhimõtteskeem

Joonisel 3.13 on välja toodud teise, soojussalvestita süsteemi põhimõtteskeem.

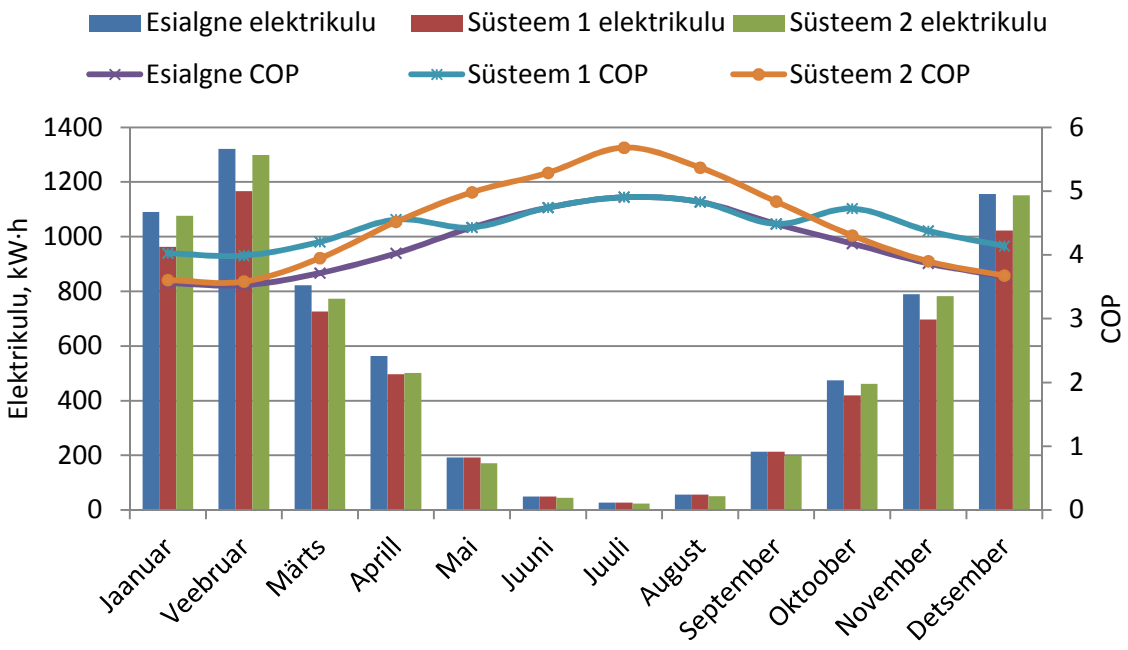
3.4. Kahe maaküte süsteemi võrdlus

Esialgne küttesüsteem on 10 kW väljundvõimsusega maasoojuspump, millel on 600 m maakontuuri, mis on paigaldatud 1,2 m sügavusele. Süsteem 1 koosneb samast maasoojuspumbast ja 600 m maakontuurist, kuid sellega on kombineeritud päikesekollektorite plokk ja maa-alune soojussalvesti (joonis 3.9). Süsteem 2 erineb eelmistest selle poolest, et maakontuuriga rööbiti on paigaldatud lisakontuur (joonis 3.11), kogu 600 m pikkus ulatuses ja samuti 1,2 m sügavusele. Selle süsteemi päikesekollektorite plokk soojendab lisakontuuri soojuskandjat ja selle abil ka teatud määral põhikontuuri ümbritsevat maapinda. Kõik süsteemid toodavad sooja ruumide kütmiseks ja tarbevee soojendamiseks.

Tabel 3.11. Esialgse küttesüsteemi ja kahe uue süsteemi elektrikulu ning COP andmed

Kuu	Esialgne elektrikulu, kW·h	Esialgne teoreetiline COP	Süsteem 1 elektrikulu, kW·h	Süsteem 1 COP	Süsteem 2 elektrikulu, kW·h	Süsteem 2 COP
Jaanuar	1090	3,558	963	4,026	1076	3,606
Veebruar	1321	3,525	1167	3,989	1299	3,584
Märts	822	3,716	726	4,204	773	3,951
Aprill	563	4,026	497	4,556	501	4,519
Mai	192	4,431	192	4,431	171	4,982
Juuni	49	4,743	49	4,743	44	5,287
Juuli	27	4,907	27	4,907	23	5,682
August	56	4,832	56	4,832	50	5,368
September	213	4,486	213	4,486	198	4,837
Oktoober	475	4,178	419	4,728	461	4,304
November	789	3,868	697	4,377	782	3,902
Detsember	1156	3,659	1022	4,140	1151	3,677
Kokku	6753	–	6030	–	6529	–
Keskmine	–	4,161	–	4,452	–	4,475

Tabelis 3.11 leitud COP’d on kõik arvutatud analoogselt etanoolilahuse ja hinnanguliselt leitud maapinna temperatuuride kaudu (joonis 3.4, valem 3.8 ja joonis 3.7). Esialgne maasoojuspumba keskmine COP saadi 4,161, süsteem 1 puhul 4,452 ja süsteem 2 puhul 4,475. Süsteem 2 keskmine COP oli kõige kõrgem, sest selle süsteemi puhul päikeseenergiat ei koguta ja seetõttu tõstetakse etanoolilahuse temperatuur väga kõrgele, mis omakorda tõstab COP kõrgemale. Kuid suvekuudel on küttevajadus kõige väiksem, mistõttu maasoojuspumba elektrikulu poolest suurt säästu ei saavutata. Sellest tulenevalt on süsteem 2’l võimalus panna päikesekollektorid otse tarbevett soojendama ja maasoojuspumpa peab kasutama minimaalselt.



Joonis 3.14. Esialgse, süsteem 1 ja süsteem 2 elektrikulu ning COP kuude lõikes

Süsteem 1 keskmine COP ei olnud nii kõrge kui süsteem 2'l, kuid elektrikulu oli sellel süsteemil kõige väiksem. Jooniselt 3.14 selgub samuti, et suvekuudel on süsteem 2 COP tunduvalt kõrgem kui süsteem 1 COP, kuid siis on küttevajadus väiksem ja suurt kokkuhoidu elektrikulu pealt ei saavutata. Esialgse küttesüsteemiga võrreldes oli süsteem 1 elektrikulu 723 kW·h ehk 10,7% võrra väiksem, kuid süsteem 2 elektrikulu oli kõigest 3,3% võrra väiksem esialgsest. Süsteem 1 suureks eeliseks on see, et soojal perioodil maist septembrini kogutakse päikesekollektorite abil soojus ja salvestatakse soojussalvestisse, mida kasutatakse efektiivsemalt kütteperioodil etanoolilahuse soojendamiseks.

Mõlema süsteemi eesmärk oli maakütte süsteemi efektiivsust tõsta päikesepaneelide abil. Pärast arvutusi sai see eesmärk teoreetiliselt täidetud, kuid täpsete andmete teada saamiseks oleks vaja reaalselt süsteem ehitada ja katsetada. Teada on, et reaalne COP maasoojuspumba puhul on kindlasti madalam. Lisaks on raske hinnata kui kiiresti ja kui palju väheneb maapinna temperatuur selle tulemusena, et maasoojuspump sealt energiat võtab. Sellest tulenevalt on raske hinnata kui palju annab soojuspumba efektiivsusele juurde soojuse lisamine pinnassesse, seda eriti just süsteem 2 puhul. Tegelikult peaks mõlema süsteemi puhul pinnase temperatuuri langemine aeglustuma, sest soojust antakse päikesekollektorite kaudu juurde. Seega vastavalt tabelis 3.11 esitatud andmetele eelistaks just maakütte süsteemi 1, sest selle elektrikulu on tunduvalt väiksem kui süsteem 2 puhul.

KOKKUVÕTE

Käesolev magistritöö on koostatud peamiselt kolmes osas. Esimeses osas käsitletakse soojuspumpade ja päikesepaneelide kasutamist Euroopas ning Eestis ja tutvustatakse nende erinevaid olemasolevaid tüüpe. Teises osas käsitletakse soojusenergia salvestite kontseptsiooni üldiselt ning tutvustatakse lugejale lähemalt tajutava soojusenergia salvesteid. Kolmandas osas pakutakse välja kaks maaküttе süsteemi lahendust koos päikesekollektoritega ning analüüsitakse nende võimalikku efektiivsust võrreldes küttesüsteemiga, kus kasutataks ainult maasoojuspumpa.

Töö esimeses kahes osas keskendutakse soojuspumpadele, päikesepaneelidele ja soojusenergia salvestitele, mille abil on võimalik kasutada taastuvenergiaallikaid ja selle läbi taastuvenergia osakaalu energiatarbimises suurendada. Kolmandas osas on eelnevalt tutvustatud olemasolevate küttesüsteemide kontseptsioone silmas pidades välja pakutud kaks maaküttе süsteemi.

Kolmandas osas välja pakutud süsteem 1 koosneb maasoojuspumbast, 30 m^2 päikese-kollektorite plokist ja soojusenergia salvestist, kus salvestusainene kasutatakse liiva ja vee segu. Salvesti on kaevatud pinnasesse ja isoleeritud soojuse ning niiskuse kaitseks. Antud süsteemi puhul kogutakse maist septembrini päikesekollektorite kaudu soojus salvestisse ja salvestisse kogutud soojusenergiat kasutatakse maasoojuspumba maakollektoris ringleva etanoolilahuse temperatuuri tõstmiseks oktoobrist aprillini. Süsteem 2 koosneb maasoojuspumbast ja 30 m^2 päikesekollektorite plokist. Maasoojuspumba kollektorid jooksevad maapinnas rööbiti ja päikesekollektorite kontuur on paigutatud analoogselt kohe maakontuuri kõrvale ning on isoleeritud nii, et maakontuuri poole osa on lahti. Kui süsteem 1 puhul antakse soojus otse maakontuuris ringlevale etanoolilahusele, siis süsteem 2 puhul kandub osa soojusest maapinda, mida kaudu hoitakse etanoolilahuse temperatuuri kõrgemal ja samas antakse ka võimalikult otse läbi maakontuuri etanoolilahusele.

Mõlema süsteemi eesmärk on tõsta maasoojuspumba efektiivsust ehk COP'd. Selleks on analüüsitud neid süsteeme, tehti erinevaid arvutusi ja leiti hinnangulised tulemused. Teada

oli, et küttevajadus oli 25 563 kW·h ja selle vajaduse rahuldamiseks kulutas 10 kW väljundvõimsusega maasoojuspump 6 753 kW·h elektrienergiat aastas ja keskmiseks COP'ks oli 4,161. Pärast arvutusi leiti, et süsteem 1 maasoojuspump kulutaks 6 030 kW·h elektrienergiat, mis on 723 kW·h vähem esialgsest ja aasta keskmine COP oleks 4,452. Süsteem 2 elektrikuluks leiti 6 529 kW·h ja COP'ks kujunes 4,475. Süsteem 1 võimaldab vähendada maasoojuspumba elektrikulu hinnanguliselt 10,7 % ja süsteem 2 hinnanguliselt 3,3 %. Kuigi süsteem 2 COP oli kõrgem süsteem 1 COP'st, siis selle aastane hinnanguline elektrikulu oli suurem. See tuleneb sellest, et süsteem 2 päikesekollektorite plokk tõstab suvekuudel maapinna temperatuuri kõrgemale, mis omakorda tõstab maasoojuspumba COP'd, kuid see toimub perioodil, mil küttevajadus on väga väike. Seetõttu jääb ka efekt väga väikeseks. Põhinedes leitud tulemustele eelistaks süsteem 1, sest see võimaldab suuremat energia säästu, tõstab maasoojuspumba efektiivsust kuude lõikes rohkem ja samas suurendab päikeseenergia kasutamist. Mida suurem on päikesekollektorite plokk ja soojusenergia salvesti, seda suurem on kokkuhoid maasoojuspumba elektrikulult, kuid selle võrra on ka soojuskaod suuremad. Selliste süsteemide puhul tuleks arvestada suurte investeerimiskuludega.

Edaspidi tasuks uurida selliste süsteemide efektiivsust kui lisada tuulegeneraatorid ja leida selliste süsteemide efektiivsus, kui need ehitatada suurema skaalaliseks, mis oleks võimelised kütma mõnda rajooni või linnaosa. Väikeelamu jaoks ei ole välja pakutud süsteemid piisavalt tõhusad, et sellist investeeringut ära tasuks.

KIRJANDUS

1. European Heat Pump Market and Statistics Report. (2014). European Heat Pump Association. [WWW] http://www.ehpa.org/about/news/article/european-heat-pump-market-and-statistics-report-soon-available/ (14.02.15).
2. Eesti Soojuspumba Liit. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/ (15.02.15).
3. Soojuspumpade kasutuselevõtu dünaamika Eestis (2005 – 2013). (2014). (2014). /Koost. J. Miks. Eesti Soojuspumba Liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/upload/editor/files/Soojuspumpade_kasutuselevotu_dynaamika_Eestis_2013.pdf (15.02.15).
4. Leibkondade energiatarbimise uuring. (2013). – *Eesti Statistika andmebaas*. [WWW] https://www.stat.ee/dokumendid/67933 (15.02.15).
5. Soojuspumba tööpõhimõte. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote (16.02.15).
6. **Sanner, B., Karytsas, C., Mendrinos, D., Rybach, L.** (2003).Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe. – *Geothermics.* Nr. 32, lk 579–588. [WWW] http://flareproduction.com/files/geo_heat_pumps.pdf (16.02.15).
7. Soojustegur. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojustegur (17.02.15).
8. Maasoojuspump. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Maasoojuspump (19.02.15).
9. **Jõeleht, A., Gaškov, M., Polikarpus, M.** (2012). Soojussüsteemi puurkaevu ja –augu mõju põhjavee ja pinnase füüsikalistele omadustele ja põhjavee keemilisele koostisele Eesti tingimustes. – Tartu: Tartu Ülikool. [WWW] http://www.envir.ee/sites/default/files/soojuspuuraukudearuanne2012.pdf (19.02.15).
10. Maasoojuspump: Võrdlustestid. [WWW] http://www.maasoojuspump.com/maakute/ (19.02.15).
11. Õhksoojuspump. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Ohksoojuspumbad (01.03.15).

12. Õhk – õhk soojuspump. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Ohk-ohk-soojuspumbad (01.03.15).

13. Õhk – vesi soojuspump. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Ohk-vesi-soojuspumbad (06.03.15).

14. Väljatõmbeõhu soojuspump. Eesti Soojuspumba liit. [WWW] http://www.soojuspumbaliit.ee/Valjatombeohu-soojuspumbad (17.03.15).

15. Päikesepaneelid ja päikesekollektorid. Päikeseküte.ee. [WWW] http://www.xn--pikesekte-v2a4y.ee/artiklid/paikesepaneel-paikesekollektor/ (25.03.15).

16. European Solar Thermal Industry Federation. (2014). Solar Thermal Markets in Europe. − *Trends and Market Statistics 2013.* [WWW] http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/market_data/downloads/solar_thermal_markets2013_v01.pdf (25.03.15).

17. /Koost. le Seigneur, V. J. (2014). The State of Renewable Energies in Europe. − *14th EurOberv'ER Report*. [WWW] http://www.energies-renouvelables.org/observer/stat_baro/barobilan/barobilan14_EN.pdf (25.03.15).

18. Taastuvenergia aastaraamat 2013. (2013). /Koost. Mari-Liis Ahven, Aivo Lokk, Raul Potisepp, Rene Tammist. – Tallinn: Eesti Taastuvenergia Koda. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/5/52/Eesti_Taastuvenergia_Koda._Taastuvenergia_aastaraamat_2013..pdf (27.03.15).

19. **Kalogirou, S.A.** (2004). Solar Thermal Collectors and Applications. − *Progress in Energy and Combustion Science*. Nr. 30, 231–295. [WWW] https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/55828/mod_resource/content/1/kalogiru.pdf (31.03.15)

20. Päikesepaneelid ja päikesekollektorid. Päikeseküte.ee. [WWW] http://www.xn--pikesekte-v2a4y.ee/artiklid/paikesepaneel-paikesekollektor/ (31.03.15).

21. Miks eelistame plaatkollektorit. SUNHEAT. [WWW] http://www.sunheat.ee/index.php?go=plaatVStoru (31.03.15)

22. Saar, M. (2013). Nullenergiahooned maasoojuse ja päikeseenergiaga − Energiapartner OÜ. [WWW] http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/6/6b/Saar%2C_M._Nullenergiahooned_maasoojuse_ja_p%C3%A4ikeseenergiaga._Energiapartner_O%C3%9C._2013.pdf (31.03.15).

23. Päikeseenergia Eestis: sissejuhatus. Päikeseküte.ee. [WWW]ttp://www.xn--pikesekte-v2a4y.ee/artiklid/paikeseenergia-eestis/ (31.03.15).

24. Thermal Energy Storage. (2013). /Koost. A. Hauer. − IRENA, ETSAP. [WWW] https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP%20Tech%20Brief%20E17%20Thermal%20Energy%20Storage.pdf

25. **Kalaiselvam, S., Parameshwaran, R.** (2014). Thermal Energy Storage Technologies for Sustainability. – USA: Academic Press. 444 lk.

26. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. (2007). /Ed. H.Paksoy. Springer. [*on-line*] springer (07.04.15).

27. Puurkaevude rajamine. Puurkaevude Inforportaal. [WWW] http://www.puurkaev.eu/puurkaevu-rajamine/ (11.04.15).

28. **Kjellsson, E.** (2009). Solar Collectors Combined with Ground – Source Heat Pumps in Dwellings. Lund: Lund Univesity. [WWW] http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordOId=1501869&fileOId=1501885 (11.04.15).

29. Maaküte, energiakaev ja soojuspuurauk. Puurkaevude Inforportaal. [WWW] http://www.puurkaev.eu/maakute-ja-energiakaev/ (12.04.15).

30. Väikeelamu Uus 12 projekt. (2006).

31. Soojuse kulu hoone või korteri kütmiseks sõltub hoone suurusest, tehnilisest seisukorrast, temperatuuride vahest ruumi ja õues ning hoone küttesüsteemist. Säästva arengu ja halduse portaal. [WWW] http://www.property24.ee/?lang=est&m1=4&m2=58&m3=115 (13.04.15).

32. Energiatõhususe miinimumnõuded. (vastu võetud 30.08.2012). – *Riigi Teataja* [WWW] https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004 (16.05.15).

33. Eesti meteoroloogia aastaraamat 2014. (2015). /Ed. Kallis, A., Loodla, Külli., Tillmann, E. jt. Talinn: Keskkonnaagentuur. [WWW] http://www.ilmateenistus.ee/wp-content/uploads/2013/01/aastaraamat_2014.pdf (14.04.15).

34. Päikesekütte ABC. SUNHEAT. [WWW] http://www.sunheat.ee/?go=kuidasehitada (15.04.15).

35. **Mierlo, B.** (2011). Coupled thermal solar collector and heat pump simulation for improved system performance. Praha: Czech Technical University. [WWW] http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/team/past/master/Mierlo_2011.pdf (28.04.15).

36. Solids – Specific Heats. The Engineering Toolbox. [WWW] http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html (18.04.15).

37. Densities of some Common Materials. The Engineering Toolbox. [WWW] http://www.engineeringtoolbox.com/density-materials-d_1652.html (18.04.15).

38. **Ercan Ataer, O.** (2006). Storage of Thermal Energy. – *Encyclopedia of Life Support Systems.* Oxford: Eolss Publishers. [WWW] http://www.eolss.net/ebooks/sample%20chapters/c08/e3-14-02-00.pdf (21.04.15).

39. Hoone soojuskoormuse määramine. (2003). Eesti Standard EVS 829:2003. Eesti Standardikeskus.

40. EPS SILVER Innovatiivne soojustamine. Reklaam brožüür. [WWW] http://www.estplast.ee/files/u2/EPS_60_Silver_EST.pdf (23.04.15).

41. ELSPOT PRICES. (2015). Nord Pool Spot. [WWW] http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/EE/Yearly/?view=table (23.04.15).

42. Võrguteenuse hind. Elektrilevi. [WWW] https://www.elektrilevi.ee/hind (23.04.15).

POSSIBILITIES FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF GEOTHERMAL HEATING SYSTEM BY SOLAR ENERGY

RESUME

The aim of the Master's thesis is to offer possibilities for increasing the efficiency of geothermal heating system by solar energy. To solve the mission heat pumps, solar panels and thermal energy storages are introduced. The usage in Europe and Estonia and also different types of heat pumps and solar panels are being introduced. Overall conception of thermal energy storage is being handled and sensible thermal energy storagies are examined a bit more thoroughly. Additionally two geothermal heating systems are proposed, which combine solar collectors and they're efficiency was analyzed and are compared to heating system were only geothermal heat pump is used.

First two parts are concentrating on heat pumps, solar panels and thermal energy storagies, which are making possible to use renewable energies and to increase the fraction of renewable energy in the energy consumption. In the third part of the thesis two geothermal heating systems are offered keeping in mind previously introduced conteptions of heating systems.

System 1 consists of geothermal heat pump, 30 m^2 of solar collectors and thermal energy storage. The storage medium is sand and water, and the storage is digged underground. The storage has heat and moisture insulation. System 1 collects solar heat into the storage from May to September and the heat is used directly to raise the temperature of the ethanol – water mix from October to April. The block of solar collectors are able to compensate heat loss of the thermal energy storage so that they're not included in the calculations. System 2 consists of geothermal heat pump and 30 m^2 of solar collectors. These collectors of geothermal heat pump are digged underground in parallel and the collectors from solar panels are digged right next to it. Solar collectors pipes are insulated, but opened from the heat pump's collector side to direct the heat. In system 2 the heat from solar collectors are

carried underground, which raises the temperature of the ethanol mix and also helps to maintain higher ground temperature longer.

The aim of both systems was to increase the efficiency of geothermal heat pump otherwise COP. For this purpose they were analyzed. It was known that heating demand is 25,563 kW·h and use of electricity of 10 kW geothermal heat pump is 6,753 kW·h per year, which made annual COP 4.161. After the calculations the system 1 used 6,030 kW·h of electricity and the annual COP was 4.452. System 2 used 6,529 kW·h and the COP was 4.475. System 1 is able to decrease the usage of electricity by approximately 10.7 % and system 2 approximately 3.3 %. Based on these values system 1 would be preferred, because it provides bigger savings of electricity, higher increase of the efficiency of geothermal heat pump and bigger fraction of solar energy used. Though system 2 COP is higher, the use of electricity is also higher. It’s due to low heating demand in the summer and the surplus energy can’t be used effectively. The bigger the block of solar collectors and energy storage used, the higher the savings of electricity of geothermal heat pump at the same time bigger the heat losses. High investment costs must be condsidered.

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina,Siim Holtsmann,(01.11.1988)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Maaküttе efektiivsuse suurendamise võimalused päikeseenergia abil“,mille juhendaja on dotsent Eugen Kokin,

   1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
   1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
   1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
allkiri

Tartu, 19.05.2015

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev*)

_____ _____
(*juhendaja nimi ja allkiri*) (*kuupäev)*