



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Energiatehnoloogia instituut

ENERGIAVAIADE KASUTUS WOHO-2 ÄRIHOONE NÄITEL

USE OF ENERGY PILES BASED ON EXAMPLE OF WOHO-2 COMMERCIAL
BUILDING

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Peeter Tiimus

Üliõpilaskood 163423 MASM

Juhendaja: Andrei Dedov, dotsent

Tallinn 2020

AUTORI DEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"27" mai 2020

Autor: Peeter Tiimus

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"27" mai 2020.

Juhendaja: Andrei Dedov

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina _____Peeter Tiimus_____ (*autori nimi*) (sünnikuupäev: ...22.07.1993...)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
__Energiavaiade kasutus Woho-2 ärihoone näitel

(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja on Andrei Dedov,

(*juhendaja nimi*)

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil.

_____ (*allkiri*)

_____ (*kuupäev*)

Energiatehnoloogia Instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: PEETER TIIMUS

Õppekava, peeriala: Energiatehnoloogia ja soojusenergeetika

Juhendaja(d): Andrei Dedov, dotsent, 6203913 (amet, nimi, telefon)

Konsultant: (nimi, amet)

..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles)Energiavaiade kasutus Woho-2 ärihoone näitel

(inglise keeles) Use of energy piles on example of WOHO-2 commercial building

Lõputöö põhieesmärgid:

1. anda üldine ülevaade energiavai süsteemidest
2. tuua näide energiavaiade kasutamisest praktikas
3. analüüside energiavaiade majanduslikku tasuvust

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Lõputöö teema ning eesmärkide sõnastamine ja struktuuri ülesehitus	18.02.2020
2.	Lõputöö algandmete kogumine	05.04.2020
3.	Andmete analüüs. Tehnilised arvutused. Majanduslik analüüs	15.05.2020
4.	Lõputöö vormistamine	22.05.2020
5.	Lõputöö esitamine	27.05.2020

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "27 " mai ..2020a

Üliõpilane: Peeter Tiimus ".....".....2020.a
/allkiri/

Juhendaja: Andrei Dedov ".....".....2020.a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....2020.a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....2020.a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

Eessõna	7
Lühendite ja tähiste loetelu.....	8
Sissejuhatus	9
1 Soojuspumbad	11
1.1 Soojuspumba tööpõhimõte.....	11
1.1.1 Primaarne tsirkulatsioon.....	11
1.1.2 Sekundaarne tsirkulatsioon.....	13
1.1.3 Soojuspumba efektiivsus.....	14
1.2 Maaküte ja sellega soojuse kogumine.....	15
1.3 Avatud kontuuriga ringlus	16
1.4 Suletud ringlus	17
1.5 Maapinna termilised omadused.....	19
1.5.1 Maapinna termilised omadused Eestis	21
2 Energiavaiad	23
2.1 Primaarne ja sekundaarne tsirkulatsioon.....	24
2.2 Energiavaiade paigaldamine	26
2.3 Soojusjuhtivus betoonis.....	32
2.4 Torud ja nende suurus.....	32
2.5 Energiavaiade vormid ja disain	33
2.6 Termiline reageerimise test	36
2.7 Mehaaniline pinge energiavaiadele	37
3 Energiavaiade kasutamine maailmas ja Eestis	39
3.1 Olukord Eestis	39
4 Mustamäe tee 3 ärihoone.....	41
4.1 Küttesüsteemi kirjeldus	44
4.2 Hoone geoloogilised tingimused	46
4.3 Jahutussüsteemi kirjeldus	47
4.4 Energiavaiad hoones	50
4.5 Energiavaiade ehitamiseks kasutatavad materjalid.....	55
4.6 Hoone mõõtmistulemuste analüüs	56
4.6.1 Jahutus	56
4.6.2 Soojus	57
4.6.3 Energiavaiasüsteemi kasutegur.....	58
4.6.4 Hoone energiamaksumuse analüüs.....	59

4.6.5 Energiavaiasüsteemiga saavutatav sääst ja investeeringu tasuvus.....	62
Kokkuvõte	65
Summary	67
Kasutatud kirjandus.....	69

EESSÕNA

Töö teema on valitud töö autori poolt kooskõlastatult juhendajaga. Autorile on huvi antud valdkonna vastu, kuna töötab ise ehituse valdkonnas, mis hõlmab endas kütteseadmete rajamist. Töö eesmärgiks on analüüsida suhteliselt uut tehnoloogiat Eesti ehitusmaastikul, mis kannab nime energiavai. Kuna tegemist on suhteliselt uue tehnoloogiaga ja Eestis pole nende kasutamine jõudnud hetkel veel üldse populariseerida, siis oli ka selle kohta info otsimine suhteliselt keeruline. Vaadeldav ärihoone on tegelikkuses valminud aastal 2017. Seega tuli tugineda toonaste ehitajate, müügimeeste ja majahalduri andmetele. Töö on koostatud Tallinnas. Sooviks tänada enda lõputöö kaasa aitamises Woho-2 majahaldurit Martin Komedanti, Woho-2 ehituse objektijuhti Joosep Nõupuud ning juhendajat Andrei Dedovi.

Võtmesõnad: energiavai, kütteseade, soojuspump, magistritöö, maaküte

Lühendite ja tähiste loetelu

COP - coefficient of performance - soojustegur

HDPE - high-density polyethylene - kõrge tihedusega polüetüleen

TRT- thermal response test – termilise tagasiside test

TABS – thermally activated building system - Termiliselt aktiveeritud hoonesüsteem

SPF - seasonal performance factor – hooaja keskmine soojustegur

CFA - continuous flight auger- pika spiraaliga valmistatavad vaiad

PEM - Polyethylene medium density – keskmise tihedusega polüetüleen

PE-X toru - cross-linked polyethylene pipe - kõrgtihedast ristseotud polüetüleenist toru

SISSEJUHATUS

Fossiilkütuseid on kasutatud üle maailma juba pikemat aega primaarse energiressursina. Tänapäeva maailmas valitseb olukord, kus otsitakse lisaks ja kasutatakse alternatiivlahendusi, mille tulemusena välditakse fossiilsete kütuste kasutamist. Taastuvenergia tehnoloogiate arendamine on kliimaga võitlemisel muutunud üha olulisemaks. Oleks kasulik mitte ainult kasutada vähese süsiniku sisaldusega fossiilkütuseid, vaid ka vähendada ülddist energiatarbimist. Eesti Vabariigi valitsuse poolt heaks kiidetud energiamajanduse arengukava aastani 2030 võib välja lugeda, et 2030nendaks aastaks peab olema 80% Eestis toodetud soojusest toodetud taastuv energiaallikate baasil ning taastuvenergia osakaal energia lõpptarbimises moodustab 50 %. [1]

Siinkohal võib välja tuua maasoojuspumpsüsteemi, mis on eelnimetatud eesmärkide täitmiseks suhteliselt usaldusväärne ja mõistlik vahend. Arvestades, et ärihoonete ja eramute kütte- ja jahutusvajadused moodustavad suure osa üldisest energiatarbimisest ja hea lahendus on lokaalne energia tootmine, siis on selle tõttu pälvitud ka tähelepanu ning arendust just maasoojuspumbad, jämedas joones soojuspumbad. Enamus maasoojuspumpasid töötavad koos erinevat tüüpi maasoojusvahetitega. Tavaliselt kasutatakse maasoojusvahetina maakollektorit, mille sees on spetsiaalne soojusülekanedetorustik, mis toimib ringleva soojusülekande kanalina. Teisalt on populaarsust kogumas maasoojuspumbasüsteem, mida kutsutakse energiavaiasüsteemiks. Energiavaide korral on soojusülekanedetorustik asetatud maja vaistruktuuri ehk teisisõnu täidab energiavai kahte eesmärki. Põhieesmärk on siiski hoone kandevfunktsioon ning sellele järgneb maakütte pool. Lisaks teeb energiavaide kasutamine hoone kompaktsemaks – ei pea hakkama eraldi kusagile hoone küljele rajama ala, mida täita maakollektoritega. See on ka energiavaide eelis tavalise maasoojuspumba ees. Ühildatud on nii hoone kandevfunktsioon ja maasoojuspump. See toob kaasa rahalise säästlikkuse.

Nimetatud Woho-2 hoones kasutatakse hetkel energiavaiasid hoone kütmiseks ja jahutamiseks.

Üldiselt on maailmas energiavaide kasutuselevõtt üha suurenev trend (seda eriti Euroopas). Eestis on see alles arenemisjärgus, nimelt hooneid, kus neid kasutatakse, võib üles lugeda kahe käe sõrmedel ja samasugune olukord on ka oskusteabega. Sellist oskusteavet on saadud mõningatelt välismaa firmadelt. Eesti keelset infot energiavaide kohta põhimõtteliselt ei olegi ja seetõttu tuli lähtuda inglise keelsetest allikatest. Samamoodi on Eestis puudulik ka energiavaide paigaldamiseks ja testimiseks olev

tehnoloogia. Energiavaiade kasutamine on väga potentsiaalne ala, mille kohta on üldises plaanis väga vähe informatsiooni ning seda valdkonda tuleks veel lähemalt uurida. Energiavaiade kasutamine maailmas on üleüldiselt kasvavas trendis ja arvestades hoonete energiatõhususe karmistuvaid nõudeid on energiavai süsteem efektiivne lahendus hoonete energiaga varustamiseks.

Töö esimeses osas kirjeldatakse, mis on soojuspump ja milline on selle tööpõhimõte. Lisaks vaadeldakse soojuspumpade eri liike ja mis on nende omapärad. Rohkem on kirjutatud seoses lõputöö teemast tulenevalt maasoojuspumpadest ja sellega seondult maapinna termilistest omadustest. Seejärel tuleb teoreetiline osa energiavaiadest, kus on kirjeldatud nende tööpõhimõttest kuni nende paigaldamiseni.

Töö teises osas on uurimise all Mustamäe tee 3 asuv Woho-2 hoone, kuhu on paigaldatud energiavaiad. Kirjeldatud on objekti energiavaiad, nende paigaldustehnoloogia, millist tüüpi energiavaiasid kasutati. Lisaks on kirjeldatud hoone kütte- ja jahutussüsteem ja sellega kaasnevalt ka kütte- ja jahutusseadmed. Viimasena on analüüsitud hoone energiatarvet, mille tulemustega on läbi viidud majanduslik tasuvusanalüüs.

Lõputöö eesmärgiks on anda üldine ülevaade energiavaiasüsteemidest. Tuua näide energiavaiade kasutamisest praktikas ning viimaks analüüsida energiavaiade majanduslikku tasuvust.

1 SOOJUSPUMBAD

1.1 Soojuspumba tööpõhimõte

Päikese poolt soojendatud maapinnast on võimalik ammutada energiat. Soojuspumpasid saab kasutada, et transportida maapinda salvestunud energia hoonete küttevajaduste katmiseks. Antud süsteem hoiab kokku küttekulusid ning on keskkonnasõbralik. Maapinna sees olev suhteliselt madal temperatuur ei suuda rahuldada otseselt inimeste soojusvajadusi, aga selle jaoks on kasutusele võetud maasoojuspumbad, mis seda võimaldavad. Maasoojuspumpasid rakendatakse äri- ja eluhoonetes ka sooja tarbevee tootmiseks.

Maasoojuspumpade eelised võrreldes teiste kütteviisidega on:

- Suur valik maasoojuspumba tüüpe ja võimsusi
- Madalad müratase
- Madalad hoolduskulud
- Lihtne paigaldada
- Keskkonnasõbralik ja tuleohutu (puudub põlemisprotsess)
- Võimalik kasutada nii radiaator- kui ka pörandaküttega [2] [3]

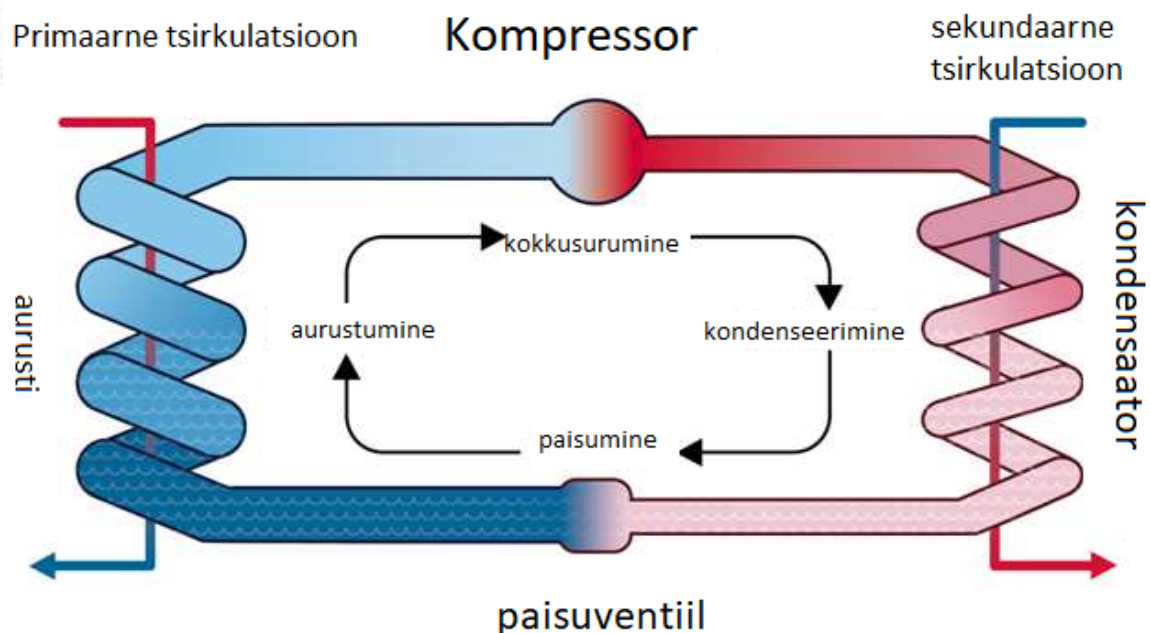
1.1.1 Primaarne tsirkulatsioon

Soojuspump transpordib õhus, maapinnas või vees sisalduva soojusenergia hoonesse. Soojuspump Joonis 1 koosneb neljast põhiosast: aurustist, kondensaatorist, kompressorist (seade millega tõstetakse rõhku) ja paisventiilist (ventiil millega langetatakse rõhku). Need komponendid on ühendatud torustiku abil suletud süsteemiks. Süsteemis ringleb külmaagens, mis ühes süsteemi osas on vedelas ja teises gaasilises olekus.

Vedelikel on sõltuvalt rõhust erinev keemistemperatuur ehk keemispunkt. Mida kõrgem rõhk seda kõrgem keemispunkt. Näiteks vee keemispunkt normaalrõhul (1atm) on 100°C. Rõhku kahekordistades on vee keemispunkt 120°C. Kui vähendada normaalrõhku poole võrra on tavalise vee keemispunktiks vaid 80°C. Soojuspumbas ringlev külmaagens on sarnase funktsioneerimisega, selle keemispunkt on tingitud rõhu muutusest. Külmaagensi eriomaduseks on väga madal keemispunkt, mis on

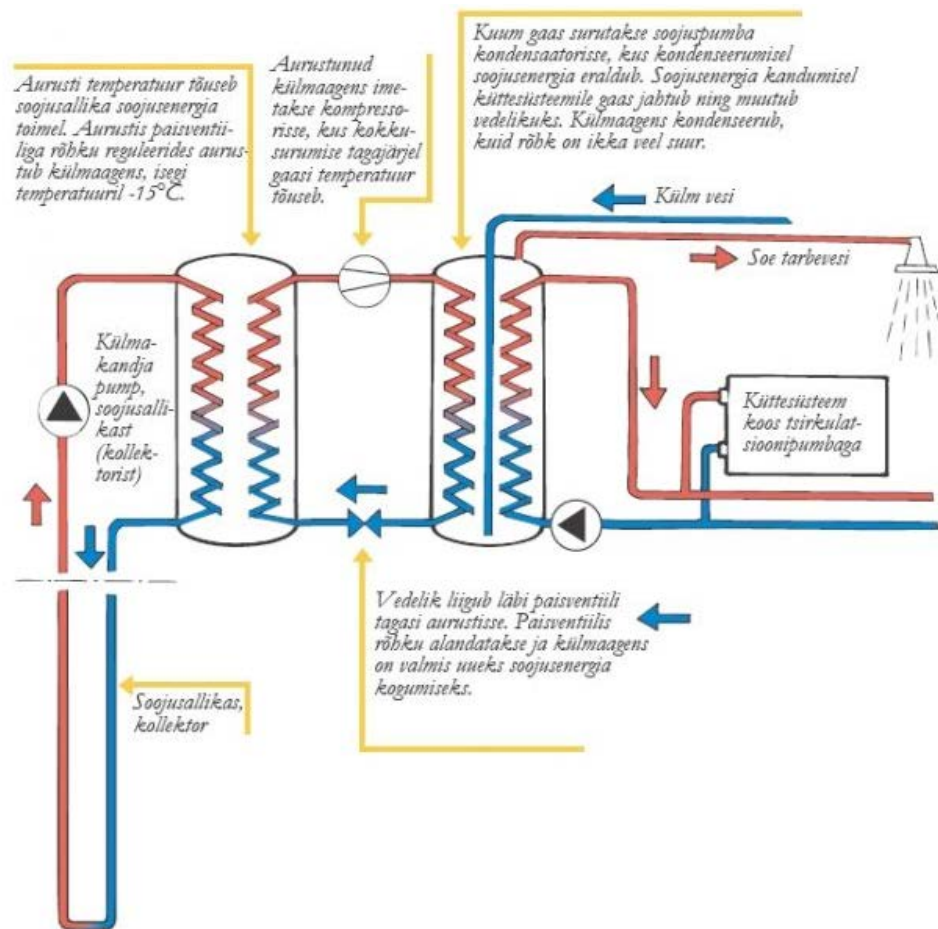
standardrõhul on- 40 °C. See võimaldab külmaagensi kasutada madala temperatuuriliste soojusallikate juures. [2]

Kollektoris ringlev külma kindel lahus soojeneb maapinda salvestunud energia toimel. Kütteperioodi ajal on vedelik soojusallikast primaarses tsirkulatsioonis jahedam ja neelab sellest endale soojust. Külmutusagens keeb (suhteliselt madalal rõhul ning läbib seejärel kompressorit, suurendades seeläbi rõhku ja temperatuuri. Lõpuks, kui gaas lahkub kompressorist, siis see omakorda kondenseerub sekundaarses tsirkulatsioonis, mis on hoone sisene ja seda tänu madalamale välistemperatuurile. Selles staadiumis leiab aset soojusvahetus hoone ja sekundaarse tsirkulatsiooni vahel. Peale seda suundub vedelik paisventiili, kus ta taastab enda lähteoleku.



Joonis 1 Soojuspumba tööpõhimõte [4]

Aurustunud külmaagens tõmmatakse kompressorisse, kus kokku surumise tulemusena gaasi temperatuur tõuseb. Seejärel suundub kuum gaas kondensaatorisse, kus veeldumisprotsessi käigus antakse soojusenergia edasi maja küttesüsteemile. Gaasiline külmaagens muutub kondenseerudes vedelikuks ja peale paisventiilis rõhu alandamist on valmis uueks soojusenergia kogumiseks. Külmaagensi vooluhulk on reguleeritud paisventiili poolt, et saavutada kõige sobivamat rõhkude vahet aurusti ja kondensaatori vahel. [2] Põhimõtteliselt kehtib tööpõhimõte ka maasoojuspumbas (vt. Joonis 2).



Joonis 2 Soojuspumba tööpõhimõtte kirjeldus maasoojuspumba näitel [2]

1.1.2 Sekundaarne tsirkulatsioon

Maasoojuspumpades ja energiavaiades on sekundaarne tsirkulatsioon soojuse ja jahutuse transpordisüsteem, mis on paigaldatud hoonesse ja ei ole otseselt seotud primaarse tsirkulatsiooniga. Maksimaalse efektiivsuse saavutab sekundaarne tsirkulatsioon kui temperatuuri juurdekasv on mõlema tsirkulatsiooni korral minimaalne, mille käigus soojuspump kulutaks elektrienergiat võimalikult vähe, et hoida temperatuuri püsivana.

Samamoodi on mõttekas jahutamiseks kasutada sobivat jahutamissüsteemi, mis minimaliseerib temperatuuri vahemiku kliimaseadme ja maapinna vahel.

Soojusvajadused hoones võivad olla erinevad ja sõltuda erinevatest nõuetest ning töörežiime on erinevaid. Maa termilise tasakaaluga, mis on seotud hoone sisemiste jahutus -ja küttenõuetega, peab arvestama hoone energiasüsteemide ja soojusvahetuse transpordisüsteemi projekteerimisel. Nagu eespool mainitud saab süsteemi efektiivsust mõõta COP ja SSPF mõõtmise teel. [4]

Töörežiimid jagunevad järgmiselt:

- Ainult jahutus – need süsteemid töötavad ilma soojuspumpa kasutamata ja kasutavad otse soojendatud soojusülekanvedelikkusse sekundaarsest tsirkulatsioonist primaarse tsirkulatsioonini, et jahutada hoonet. Sellist tüüpi jahutamissüsteemid on väga efektiivsed aga nende tingimuseks on väike temperatuuride erinevus maapinna ja soojusvaheti vahel. Majanduslikult tasuv.
- Ainult küte – Seda töörežiimi kasutatakse piirkondades, kus on külm ja soojuspumpa kasutatakse ainult hoone kütmiseks. Sellise süsteemi puhul peab tagama ka hilisema maapinna termilise balansi. Suur soojuse äravõtmine maapinnast toob endaga kaasa jäätumise.
- Balanseeritud – talvel kasutatakse maapinna soojust kütmiseks ja suvekuudel jahutamiseks. Suvel kasutatakse maapinna termilise tasakaalu saavutamiseks kogu suve vältel üle jäävat lisasoojust, mis laaditakse maapinda, et see oleks talveperioodiks termiliselt balansis. Termiliselt balansis maapind tähendab kõrgemat efektiivsust ja suuremat kasutegurit. [4]

1.1.3 Soojuspumba efektiivsus

Soojuspump ühendab omavahel primaarse ja sekundaarse tsirkulatsiooni kontuurid töstes primaarse tsirkulatsiooni temperatuuritaseme (vahemikus 10 °C kuni 15 °C) vajaliku temperatuuri tasemeni sekundaarses tsirkulatsioonis (vahemikus 25 °C kuni 35 °C). Et saavutada sellist temperatuuri kasvu on vaja kas täiendavat elektrienergiat või mehaanilist energiat. [5]

Soojuspumba tõhusust väljendab soojuspumba soojustegur (COP – Coefficient of Performance). COP näitab mitu korda annab seade rohkem soojusvõimsust võrreldes kulutatud elektrivõimsusega. [5] Selle jaoks on valem:

$$COP = \frac{\text{küttevõimsus (kW)}}{\text{Kulutatud elektrivõimsus (kW)}} \quad (1.1)$$

Näide: kui soojustegur on 4, siis see tähendab et soojuspump annab välja kulutatava elektrienergiaga võrreldes neli korda rohkem soojusenergiat. Majanduslikel kaalutlustel tuleks soojusteguri väärtus hoida $COP \geq 4$. [6]

Soojuspumpade efektiivsusnäitajana kasutatakse veel aastast soojustegurit (SPF – Seasonal Performance Factor) ehk aasta (hooaja) jooksul toodetud soojusenergia suhet kulutatud energiasse. See näitaja annab parema ülevaate soojuspumba võimekusest pikema perioodi vältel. [5]

$$SPF = \frac{\text{aastas saadav soojusenergia (kWh)}}{\text{aastas kulutatav elektrienergia(kWh)}} \quad (1.2)$$

1.2 Maaküte ja sellega soojuste kogumine

Maapõue (geotermilisel) soojustel põhinevad kütte- ja jahutuslahendused kasutavad ära maapõue energiat. Võrreldes elektri- või kaugküttega on maasoojus energia, mida on võimalik maapinnast ammutada kohapeal, hoone all ja seetõttu ei ole vaja energiat üle kanda suurte vahemaade taha. Maasoojus on energia, mille moodustab maapõue kogunenud päikeseenergia ja geotermiline energia. Tavapraktikas kogutakse soojust maapinnast, kasutades selleks horisontaalseid torusi, mis on paigaldatud puurides umbes 1 meetri sügavusele maapinna aluspinnasesse.

Maasoojust saab kasutada nii suuremates hoonetes kui ka individuaalelamutes. Maasoojuste ülekandmist hoone küttekontuuri teostatakse soojuspumbaga. Soojuspumpad aurustavad ringleva soojusvahetusvedeliku (jahutusaine) ja kondenseerivad selle. Aurustamiseks läheb vaja kuumust, mida ammutatakse maapõuest. Aurustumine toimub soojuspumba aurustis. Saadud aur surutakse kokku, millele järgneb omakorda auru temperatuuri tõus. Seejärel kõrge temperatuuriline aur jahutatakse kondensaatoris, kus see veeldub. Antud protsessist vabanenud soojus soojendab läbi kondensaatori voolavat vett ja õhku. Seejärel suunatakse ülessoojendatud õhk või vesi küttesüsteemi.

Maasoojusenergia saamisel tuleb eelistada madala temperatuurilisi soojusjaotuse meetodeid. Optimaalsed soojusjaotuse meetodid soojuspumpade jaoks on pörandaküte ja mitmesugused soojuskiirguse paneelidel põhinevad süsteemid.

Küttesüsteemid, mis põhinevad maasoojustel, ei saa olla dimensioneeritud hoone maksimaalsele soojusenergia tipukoormusele, seda juba puhtalt finantsiliselt. Et investering toimiks ja oleks elujõuline, tuleks maksimaalse küttevajaduse katmiseks lisada sekundaarne energiaallikas. Külmade talvede küttevajaduse katmiseks on sobilikud näiteks elektri- ja gaasiküte.

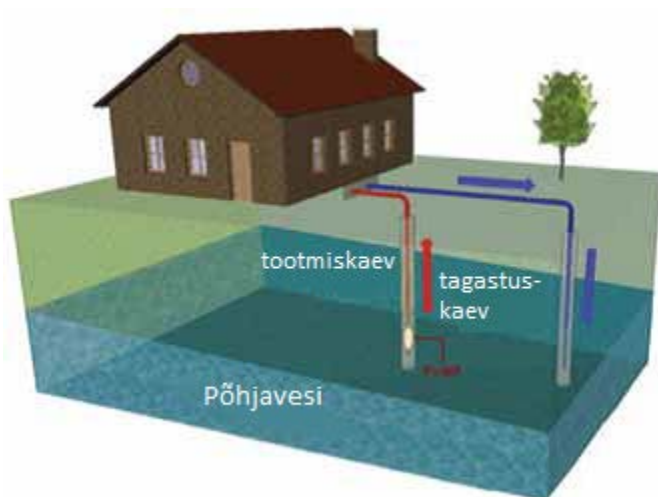
Osa aastast, peamiselt kevadeti, võib mehaanilise kompressori jahutuse asendada vabavoolu lahendusega. Madalama temperatuuriga maapinnast tulevat vedelikku saab kasutada ka ilma, et selle jaoks peaks käivitama elektriga töötavat kompressorit. Suvekuudel saab jahutamisel tekkiva kondensaatori kuumuse suunata tagasi maapõue, mis parandab maapinna energiatasakaalu ja seda kogu aasta vältel. Sama idee põhjal saab kasutada suviti maapinnast tulenevat külmaenergiat näiteks ventilatsiooni eeljahutamiseks. See on eriti praktiline kortermajade puhul, millel on eraldi kliimaseaded. [7]

1.3 Avatud kontuuriga ringlus

Avatud ringlusega süsteemil on kaks puurauku, mis peavad üksteisest olema üsna kaugel (15 – 20 m). Üht puurauku kasutatakse vee võtmiseks ja pumpamiseks soojuspumpa ja teise kaudu pumbatakse vesi taas maapinda.

Puurkaevud peavad olema üksteistest eemal kuna põhjavee temperatuuri muutusel tekivad erinevad lahustunud mineraalid ja lisaks tuleb jälgida, et põhjavees ei oleks suur rauasisaldus. Vajadusel tuleb liiga rauarikast vett töödelda ja sellest sõltub puurkaevu hind. Põhjavett saab kasutada soojusallikana, sest temperatuur on aastaringselt stabiilne -4 - 12°C. Soojuspump kogub põhjavette salvestunud päikeseenergiat. Tavapraktikas tagastatakse põhjavesi küll maapinda aga seda saab ka tagastada jõgedesse, järvedesse ja teistesse looduslikesse veekogudesse.

Joonis 3 on näidatud, kuidas põhjavesi pumbatakse põhjaveekihist ja transporditakse soojuspumpa, kus eraldatakse soojus ning seejärel juhitakse jahedamana teise puurkaevu.

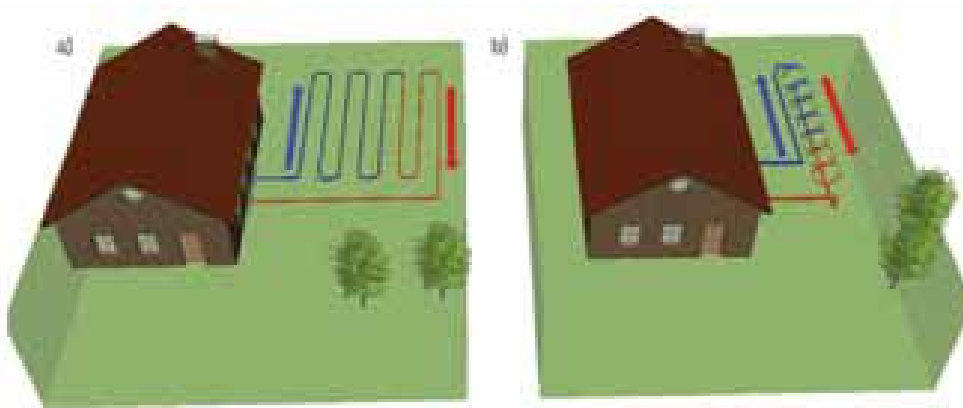


Joonis 3 Avatud ringlusega süsteem [8]

1.4 Suletud ringlus

Suletud kontuuriga ringlus ehk kinnine süsteem (tamponeeritud) on suhteliselt moodne lahendus. Selle meetodi korral on pinnasesse puuritud puuraugud. Suletud ringluses mängib olulist rolli puuraugus olev torustik, mis on ühendatud maapealse soojuspumbaga. Pinnases oleva kinnise kontuuriga ringluse korral ringleb torustikus agens, mis kannab maasoojust soojuspumpa ja seeläbi ei puutu kokku maapinnas olevate kivimite, põhjaveega jne. Torud, mis on alati täidetud sama koguse töövedelikuga on enamasti valmistatud elastsest ja vastupidavast polüetüleenist või polübuteenist. Antud torude paigaldamisviisi järgi jagatakse need kas horistaal- või vertikaalsüsteemideks.

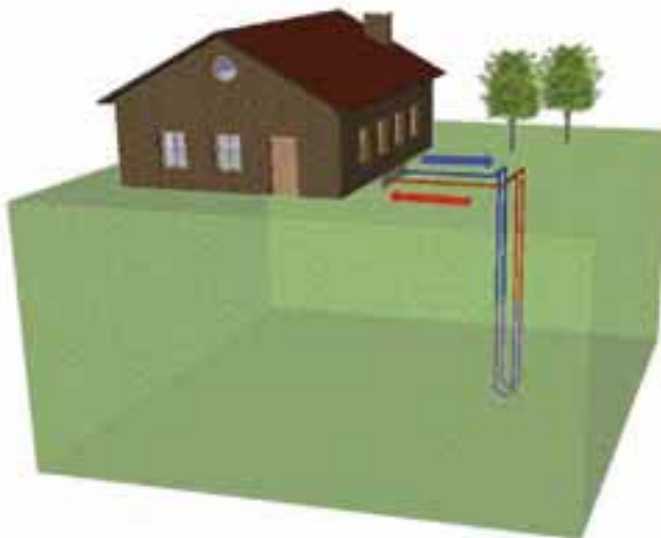
Horisontaalse süsteemi (vt. Joonis 4) korral on torud paigutatud pikkadesse kaevikutesse, mis asetsevad allapool maapinna külmumispiiri. See süsteem toimub põhimõttel, et päikesekiirgusega tulenev maapinnasoojus kantakse torudes oleva töövedelikule. Kuna torud on siiski paigaldatud suheliselt maapinna lähedale, siis ei ole antud süsteem kõige parem, seda eriti piirkondades, kus on äärmuslikumad ilmastikutingimused ja seetõttu eelistatakse vertikaalse kontuuriga suletud ringlusega süsteeme. [8]



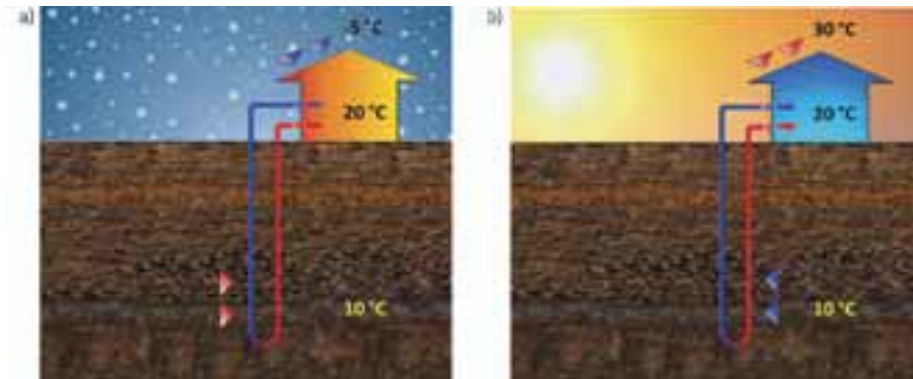
Joonis 4 Maakütte horisontaalne suletud ringlusega süsteem [8]

Vertikaalne suletud ringlusega süsteem (vt. Joonis 5, Joonis 6) on efektiivsem kui horisontaalne piirkondades, kus on karmimad ilmastiku tingimused. Lisaks on vertikaalse süsteemi eeliseks selle vähene ruumivajadus, kuna puurauk kulgeb maapinna suhtes vertikaalselt. Kui tahetakse kasutada kivimite geotermilist potentsiaali, siis horisontaalse süsteemi puhul on kaevetööde tegemine palju keerulisem.

Vertikaalse süsteemi korral asetatakse vedelikukandjad torud, kas vertikaalselt või natuke kaldu. Tavapraktikas on puuraugu läbimõõt enamasti 50 -160 mm. Väiksema läbimõõduga puuraukudesse (50 -100 mm), mida kasutatakse otseaurustumisega soojuspumpade korral, paigaldatakse 15 – 30 m sügavusele väikese läbimõõduga vasktorud. Plasttorustikuga energiakaevud vajavad suurema läbimõõduga (100 -160 mm) ja sügavusega (100 - 200 m) puurauke.



Joonis 5 Maakütte vertikaalne suletud ringlusega süsteem [8]



Joonis 6 Vertikaalne suletud ringlusega süsteem. a) vasakul kütmine talveperioodil b) paremal jahutamine suvisel perioodil [8]

Töövedelikuga täidetud torusi saab asetada puuraukudesse erinevat moodi. Neist enam levinud torude paigaldusmeetod on nn U-kujulise soojusvahetustorude kasutamine. See tähendab, et toru mis on asetatud puurkaevu teeb puuraugu põhjas 180° U kujulise pöörde. Maa sees olevad torud ja puuraugu sein täidetakse hiljem spetsiaalse täitematerjaliga. Puuraugu täitmine on oluline, kuna see takistab pinnasevee sisenemist auku ja hoiab ära ka võimaliku sodi sattumine puurauku. Tavaliselt kasutatakse täitematerjalidena paksemat vedelat ainet, mis on tsemendi baasil valmistatud. Peamiselt on selleks betoon. Eksperimentaalselt on proovitud ka kasutada kivisöe põletamisel saadavat lendtuhka [8]

Otseaurustumisega maasoojuspumpadeks nimetatakse soojuspumpasid, milles puudub külmaandja (etüleenglükool) tsirkulatsiooniring. Soojuse ülekande väliskeskkonnast toimub otse külmaainele. Üldiselt sarnaneb, arvestades oma tööpõhimõtet, see õhk-vesi soojuspumbaga. Vahe on vaid selles, et aurusti paikneb maa sees ja soojusenergiat saadakse maapinda akumulunud päikeseenergiast, mitte õhust.

Torustik paigaldatakse pinnasesse kas horisontaalselt kaevamise teel analoogselt plastiktoruga puuritavasse energiakaevu vertikaalselt või kaldu. Aurusti torumaterjalina kasutatakse enamjaolt hea soojusjuhtivusega vasktoru. Oluline on saavutada hea kontakt pinnasega. [2]

1.5 Maapinna termilised omadused

Soojusvoo tihedus annab edasi soojushulka, mis läbib pindalaühikut kindla aja jooksul ning arvutatakse temperatuuri gradiendi ja soojusjuhtivuse korrutisena. Enamasti on soojusvoog suurim vertikaalsuunas ehk teisisõnu risti maapinnaga, kuid mõningatel

juhtudel ei pruugi see alati nii moodi olla.. Erinevatel sügavustel soojusvoo tihedus küll muutub aga pikemate puuraukude korral (sadades meetrites) jääb see lõpuks püsivaks.

Soojusjuhtivus tähendab soojusülekannet, mis toimub ainesisese soojusvõnkumise tulemusena. Peale soojusülekanne võib soojus kanduda edasi ka kiirguslikult, mis hakkab rolli mängima alles temperatuuridel üle 1000 °C ja konvektiivselt, mille puhul soojus kandub edasi koos ainese enesega, seda siis fluidumitega või põhjaveega. Kivimite soojusjuhtivus varieerub oluliselt, isegi kordades. Erinevates savikamates ja poorsemates setendites on soojusjuhtivus paraku madalam ning kvartsi- ja dolomiidirikastes mittepoorsetes kivimites seevastu kõrgem.

Maapinnast allpool 10–15 m sügavusel ei ole ainult ümbritsev temperatuur domineerivaks faktoriks soojusülekanne (juhul kui esineb ka põhjavesi). Maapinna temperatuuri mõjutavad veel omakorda kliimaatilised faktorid (maapealne vesi, õhk), radiatsioon tänu päiksele, latentne soojusülekanne, mis tekib vee faasiolekute muutuste tõttu. Päikesekiirguse mõju väheneb maapinna sügavusega ja 15 m järel on see olematu.

Niiskuse levik põhjustab ka omakorda pinnasesoojusjuhtivus omadusi, eriti, kus on maapind küllastamata. Maapinna poorides aurustuv vesi liigub omakorda selles suunas, kus on väiksem aurustumisrõhk. Kui temperatuur on uues kohas madalam, võib see hakata kondenseeruma ja soojusenergia vabastatakse aine faasisiirdel. Sellist protsessi kutsutakse maapinna niiskusrändeks, ning see muudab pinnase termilisi omadusi.

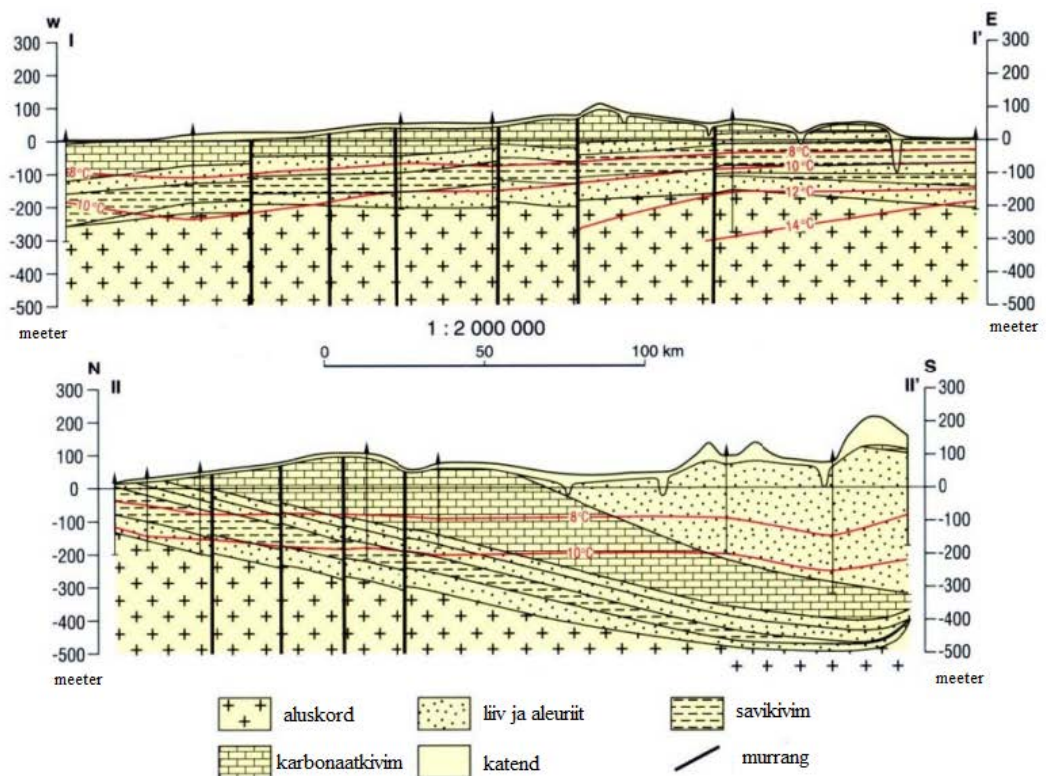
Voolav vesi kannab energiat kaasas, mida kutsutakse konvektiivseks soojusülekanneks ning põhjustab temperatuuri anomaaliaid. Põhjavee toitealal kasutatakse vee soojendamise energia kivimitest ja kantakse seda väljavoolu ala suunas. Paratamatusena kaasnevad alati põhjavee tsirkulatsiooniga nii negatiivsed anomaaliad põhjavee toitumisalal ning ka positiivsed anomaaliad väljavoolu alal. Toitumise ja väljavoolu vahelisel alal ei pruugi soojusvoo anomaaliaid esineda, kuna horisontaalse voolamise korral asendub kivimi poorides olev vesi sama sooja veega.

Eelnimetatud omadused sõltuvad pinnase tüübist, koostisosadest (mineraloogilised ühendid), vee sisaldusest ja selle tihedusest. Tavaliselt on pinnase ja kivimite soojusjuhtivus vahemikus 0,2 W / mK kuni 5 W / mK ning seda kõige äärmuslikumatel juhtumitel. Soojusjuhtivust sõltub pinnase omadustest, proportsioonidest ja kivimite koostisosakestest, mis on kõige määravamad. Seejärel lisanduvad soojusjuhtivusse vesi ning õhk. Kvarts on üks kõrgema soojusjuhtivusega mineraalidest ning maapinnad, milles on kõige rohkem kvartsiühenditega osakesi, omavad ka väga head soojusjuhtivust.

Maasisesed temperatuurid on pidevas seoses maapinna temperatuuriga. Maapinna temperatuuri muutus toob kaasa ka temperatuuri muutuse maa sees, et saavutada soojuslikku tasakaalu ehk konstantne soojusvoog. Soojusliku tasakaalu saavutamine on küllaltki ajamahukas protsess kivimite suure soojusmahtuvuse tõttu. võrreldes mõõdetavas sügavuses olevate kivimite temperatuuriga muutuvad ilm ja maapinnatemperatuur palju kiiremini. [9]

1.5.1 Maapinna termilised omadused Eestis

Maapinna sees olevad temperatuurid sõltuvad järgmistest teguritest: maasise soojusvoo tihedus ja maapinna temperatuur. Maapinna temperatuuri all tuleb silmas pidada aasta keskmist pinnase temperatuuri, milleks Eestis on 6 - 8°C. Tavaliselt on maapinna temperatuur 1 - 2°C kõrgem kui aasta keskmine temperatuur samas kohas. Kui maapinna lähedal on temperatuuri erinevused 1—2 kraadi, siis juba 100—200 meetri sügavusel on erinevused 4—5 kraadi (vt. Joonis 7). Peamiselt on gradiendi muutlikkuse põhjuseks erandliku soojusjuhtivusega kivimid. [10]



Joonis 7 Ülemisel profiilil kajastatud Põhja Eestis kulgeval lääne-ida suunaline profiil ja alumisel Pandivere- Haanja joonel põhja-lõuna suunaline läbilõige [9]

Võttes arvesse Eesti aluspõhjas esinevaid kivimeid ja nende soojusjuhtivusi, siis tuleb lähtuda keskmisest veega küllastunud kivimi soojuskandvusest 50 W/m. Saksa Inseneride Assotsatsioon (Verein Deutscher Ingenieure) soovitab, et kui soojuspuuraukude sügavus on kuni 50m, siis peaks puuraukude vahekaugus olema vähemalt 5 m ja kuni 100 m sügavuste puuraukude korral vähemalt 6 m. Eestis tuleks kaaluda veelgi suuremat vahekaugust, kuna meie kütteperiood on pikem. Suurem osa Eesti settekivimite soojusjuhtivus veega küllastunud olekus jääb vahemikku 2–3 W/mK, savikivimites 1–1,5 W/mK.

Maismaa alade globaalne keskmine on 65 mW/m², mis päikeselt tulevast soojuskiirgusest üle tuhande korra väiksem. Eestis umbes 200 W/m² aasta keskmisena. Eesti oma paiknemisega kuulub suhteliselt jahedate maade hulka, kus maasisene soojusvoog on tavaliselt vahemikus 30–40 mW/m², mineviku kliimamuutuste tõttu (jääaeg) on suhtes parandatud väärtused on pisut kõrgemad ja jäävad vahemikku 40–50 mW/m². [10] [9]

Tabel 1 Soojuspuuraukudest topelt U torustikuga saadav soojushulk ühe meetri kohta [9]

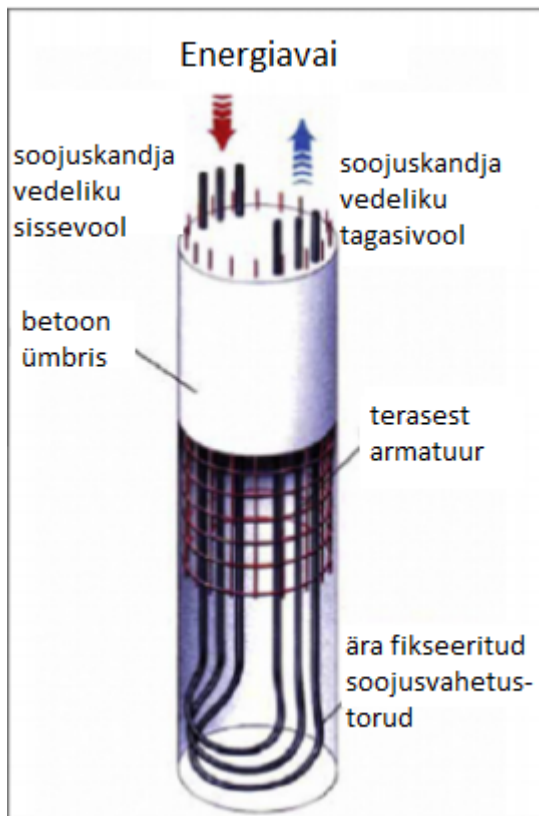
kuiv setend (soojusjuhtivus $\lambda < 1,5$ W/m/K)	20 W/m
tavaline veeküllastunud kivim ($1,5$ W/m/K $< \lambda < 3,0$ W/m/K)	50 W/m
Kõrge soojusjuhtivusega kivim ($\lambda > 3,0$ W/m/K)	70 W/m
Kivimtüübiti	
kuiv kruus ja liiv	<20 W/m
veega küllastunud kruus ja liiv	55–65 W/m
lubjakivi	45–60 W/m
liivakivi	55–65 W/m

2 ENERGIAVAIAD

Energiavaiad on oma olemuselt analoogilised tampooneeritud soojuspuuraukudele, sest nad puuritakse ja hiljem täidetakse vett mittejuhtiva materjaliga. Vaiade ehitamist ja kasutamist reguleerib Eestis ehitusseadustik, mis käsitleb puurimist oluliselt leebemalt ja puurimisloa saamine on palju lihtsam. On ka juhtumeid kus energiavaia puuraugu sügavus sarnaneb puuraugu sügavusele. Põhimõtteline vastuolo Eesti tingimustes seisneb selles, et soojuspuurauke käsitletakse puurkaevudena, mille rajamiseks nõutakse tavapraktikas 10 m hooldusala (kaugus ehitistest ja krundi piirist) olemasolu, samas kui energuavaiad asuvad vahetult ehitise all.

Energiavaiade puhul on tegemist soojusvahetitorude integreerimisel hoone vundamendivaiadega (vt. Joonis 8, Joonis 9). Energiavaiade kasutamine ehk võttes kasutusele korraga maja vundamenti ja soojusvahetid võivad säästa märkimisväärse koguse hoone energiakulsid eriti kui maapinda kasutatakse energiasalvestina.

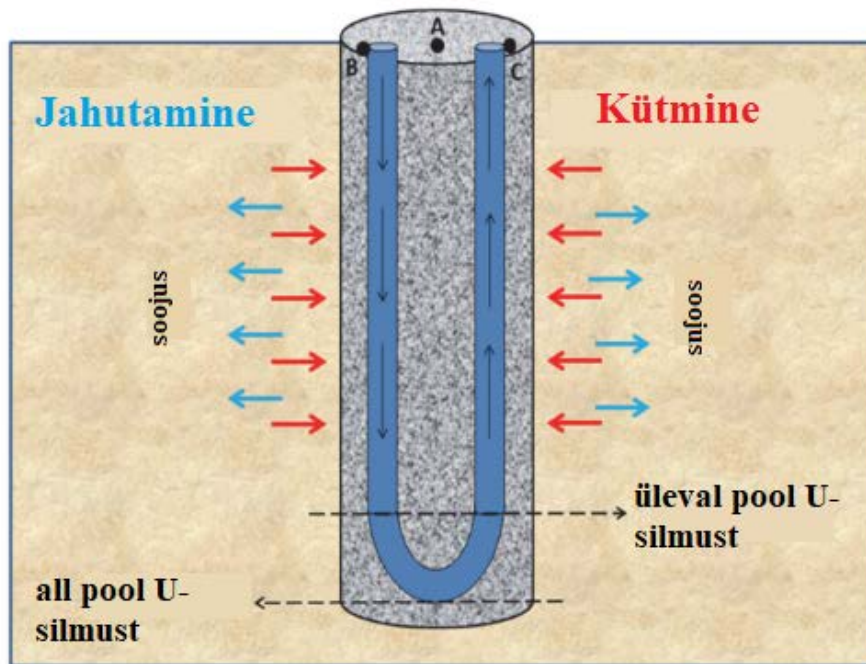
Horisontaalsed soojusvahetid, vertikaalsed puuravaisoojusvahetid ja energiavaiad koosnevad peamistest erinevat tüüpi suletud ahelaga maasoojusvahetitest. Energiavaiad on sisse ehitatud geotermiliste torudega, mis on termoaktiivsed maapinnasisesed ehitised, mille vertikaal asendis olevates raudbetoonist vundamendivaiades on omakorda suletud ahelaga soojusvahetid. Eelnimetatud soojusülekanne torud on tavaliselt valmistatud HDPE-st (suure tihedusega polüetüleen), et tagada torude pikaajaline töö ja vastupidavus, kuna peale torude betooni valamist ei ole võimalik neid enam kätte saada. [9]



Joonis 8 Energiavaia sisemus [11]

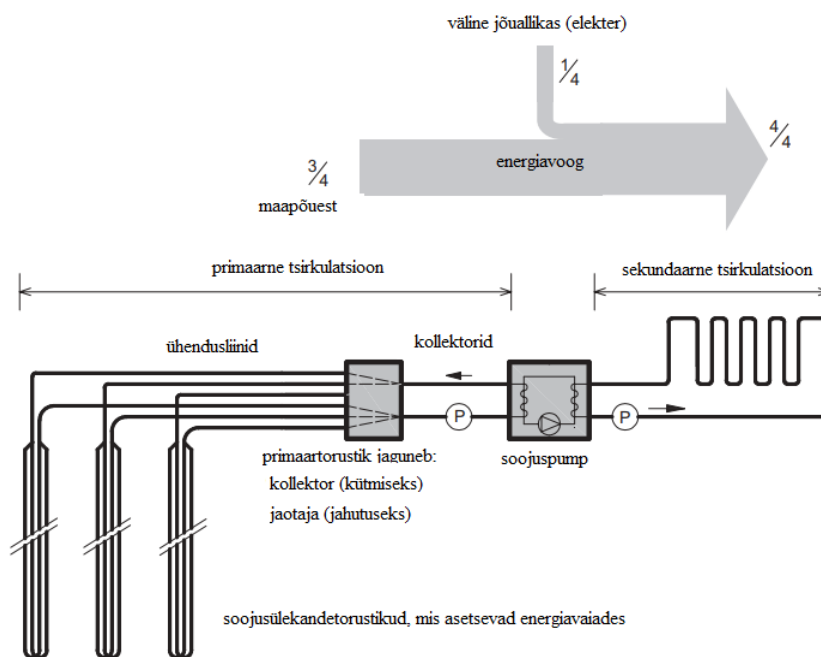
2.1 Primaarne ja sekundaarne tsirkulatsioon

Primaarkontuur sisaldab suletud torustikke maapinnaga kokkupuutuvates betoonielementides, mille kaudu pumbatakse soojuskandja vedelikku maapinnast hoonesse ja tagasi. Soojuskandja vedelikuna kasutatakse vett, veesegu antifriisiga (glükool) või soolalahust. Glükooli ja veesegu on osutunud siamaani kõige sobivamaks, kuna see aitab ennetada korrosiooni teket soojuspumpades, kraanides jne. Nende ainete omapäraks on suurenenud viskoossus, mis suurendab pumpamiseks vaja minevat energiat. Kõige parem soojusülekanne vedelik on vesi, aga siinkohal peab arvestama, et vesi võib maapinna piiri juures 0°C juures külmuda ja seega pole selle kasutamine võimalik. Kasutatakse ka propüleenglükooli ja etüleen glükooli. Kuigi etüleen glükooli soojusülekanne omadused on paremad, kasutatakse seda suhteliselt harva tänu oma mürgisusele. Primaarne ja sekundaarne tsirkulatsioon on kajastatud Joonis 10. [12]



Joonis 9 Energiavaiade talitlus kütmiseks ja jahutamiseks [13]

Sekundaarne tsirkulatsioon on suletud vedelikupõhine süsteem, kus soojusvahetustorud jooksevad põrandas ja seinas ning millega köetakse või jahutatakse hoonet. Tavaliselt on primaarne ja sekundaarne tsirkulatsioon ühendatud soojuspumbaga, mis tõstab temperatuuri vahemiku 10 – 15°C temperatuuri vahemikule 25 - 35°C. [13]



Joonis 10 Energiavaiade primaarne ja sekundaarne tsirkulatsioon [3]

2.2 Energiavaiade paigaldamine

Energiavaiade ehituses on kaks peamist peamist valdkonda, millele tuleb hoolikalt tähelepanu juhtida, et saavutada rahuldav tulemus. Esimesena soojusvahetustorude hoolikas käsitlemine ja paigaldamine, et need ei saaks kahjustada. Teisalt kaasata energiavaiade kasutus hoone üldehitusse nii, et minimaliseerida täiendavad katkestusi ja muid kulutusi.

Vaiade pikkus varieerub vahemikus 7 kuni 50 m, ristlõikega 0,3 kuni 1,5 m. Vaiade sees on suure tihedusega polüetüleenplastist torud läbimõelduga 20 mm või 25 mm ning toru seinapaksus 2,0 mm või 2,3 mm. Torud on asetatud nii, et nad moodustaksid suletud ringiga mähise või silmuse, milles tsirkuleerib soojuskandja vedelik. Antud torud saab ära fikseerida energiavaiade paigaldamise ajal armatuuris (vt. Joonis 11, Joonis 12), enne betooni valamist. [3]



Joonis 11 Soojusjuhtivustorud ühendatuna armatuuri külge [5]



Joonis 12 Soojusjuhtivustorud ühendatuna röstvärki [5]

Küttetoru otsad fikseeritakse ära, pannakse külge kraanid ning survestatakse rõhuni 8 baari. Seda põhjusel, et armatuuri täitmisel betooniga ei lõmastataks ära soojusvahetustorusid.

Soojusvahetustorude integreerimisel vaiadesse tuleb vältida järgmisi probleeme:

- hõõrdumine või kriimustamine
- liigne painutamine (vt. Joonis 13).
- Augud soojusvahetustorus, mis viib sodi sissepääsemise torusse ja sealt tekib omakorda ummistus. [14]



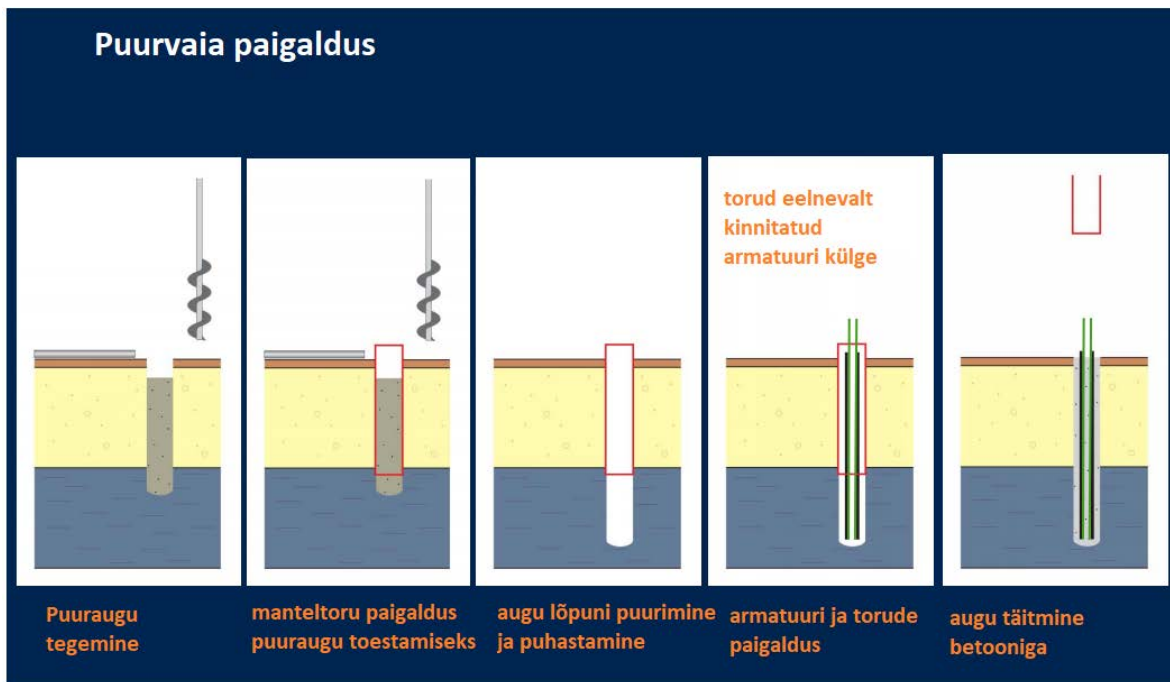
Joonis 13 Ära painutatud soojusvahetustoru [14]

Eelnimetatud defektide võimalikkus sõltub eelkõige energiavaiade paigaldamistehnoloogiast ja kuidas rakendatakse paigaldusskeemi kohapeal. Paigaldamistehnoloogia sõltub omakorda maapinna omadustest. [15]

Tavaline puurvaia (kohapealne vaia paigaldus) paigaldus tehnoloogia korral kinnitatakse soojusvahetustorud eelnevalt betoonarmatuuri külge (enamikel juhtudel armatuuri sisse poole aga paigaldatakse ka välja poole) enne betoneerimist. Kõigepealt tehakse spetsiaalse maapinna puuriga maa sisse puurauk (vt. Joonis 14), seejärel pannakse puuritud auku manteltoru, mis hoiab ära puuraugu kokku vajumise [15]. Järgmisena puuritakse auk maksimaalse sügavuseni ning asetatakse sinna sisse armatuur, mille külge on eelnevalt kinnitatud soojusvahetustorud. Peale neid protseduure täidetakse puurauk betooniga. Toru silmused võivad ulatuda ka armatuurist natuke väljapoole (vt. Joonis 16).

Põhiliseks katsumuseks on torude deformatsioonid ja nihkumine, kui armatuuri täidetakse betooniga. Paigaldamisel tuleb jälgida et torud oleksid korrektselt kinnitatud armatuuri külge, eriti selle paigaldamisel maa sisse (vt. Joonis 15). Vajadusel

kasutatakse veekindlast betoonerimistoru, mis ei lase pinnase pealsel või puuraugus oleval veel ära uhada vedelat betooni.



Joonis 14 Tavalise puuravaia paigaldus [16]



Joonis 15 Energiavaia armatuuri installatsioon [14]

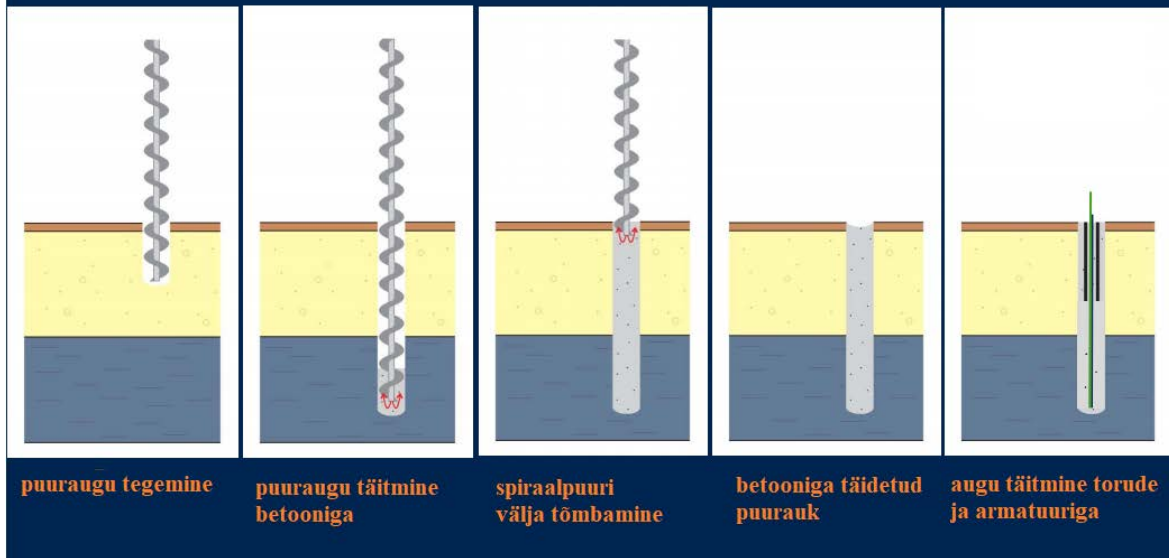


Joonis 16 Energiavaia installatsioon [14]

CFA (continuous flight auger) eesti keeles pika spiraaliga valmistatavad vaiad) meetodi puhul pinnast asendavate vaiade eritüübiks on pika spiraaliga valmistatavad vaiad. Selle tehnoloogia korral on paigutatud armatuuri veel lisa varras ja selle külge omakorda soojusvahetustorud, et tagada piisav tugevus. Puuraugu sein kindlustab spiraali vahele jääv pinnas. (vt. Joonis 17) Esmalt süvistatakse vajalikule sügavusele spiraalse keermega toru. Seejärel hakatakse toru üles keerama ja samal ajal täidetakse toru otsa alune betooniga. [15]

Armatuur koos sellesse kinnitatud soojusvahetustorudega vibreeritakse värskesse betooni kohe, kui spiraal on tervenisti puuraugust eemaldatud. Võrreldes tavaliste puurvaiadega ei ole põhja puhastamisega probleeme. Tagatud on puuraugu seinte püsivus. Antud meetodit on tavalise puurvaia tegemisest 30% kallim. Vaiade läbimõõt ja ka pikkus on väiksem eelmainitud puurvaiadest. Soojusvahetustorude maksimaalne lubatud pikkus on 20m. Torude paigaldamisel betooni tuleb need betooni sisse suruda äärmise ettevaatlikusega, et vältida toru enda deformatsioone.

pika spiraaliga valmistatavad vaiad (CFA)



Joonis 17 Pika spiraaliga valmistatavad vaiad (CFA) [16]

Peale betooni valamist tuleb soojusülekandevõrgu betoonist välja ulatuv osa katta spetsiaalse vahuga ja seejärel plastikuga. Seda selle jaoks et tulevaste ehitustööde või parandustööde käigus ei tekiks torule kahjustusi. (vt. Joonis 19). Tuleb väga hoolikalt jälgida, et armatuurist välja tulevat toru otsa ei aetaks segamini armatuuri terasotsaga, kuna plastikust toru võib väga kergelt ära väänduda või üldse murduda (vt. Joonis 18).

Nagu eelnevalt mainitud, siis deformeerunud toru tähendab võõrmaterjali ja osakeste kandumist torusüsteemi, mis omakorda toob esile ummistuse ja pikemas perspektiivis madalama tööefektiivsuse. Tuleb ka arvestada asjaolu, et CFA meetod on riskantsem kui tavaline puurvaia paigaldusmeetod, kuna soojusjuhtivus asetamisprotsess on palju keerulisem ja aeganõudvam. [16]



Joonis 18 Murdnunud soojusvahetustoru [16]

Soojusjuhtivus silmuste valmistamine võiks ideaalis toimuda tehases, kus on selle seisukohast „steriilne“ keskkond. Arvestades, et torudel tuleb mingis staadiumis otsad omavahel kokku sulatada. Torude kinnitamine armatuurile juba ehitus platsil või enne ehitusplatsi nii suurt tähtsust ei oma. See sõltub paigaldamistingimustest ja transpordist. Torude sidumine betoonarmatuuri külge peaks olema kinnitatud plastiksõlmedega, mis ei oleks liiga jäik ja tugev, et kahjukstaks toru ennast. Kui betoonarmatuuril on keevitamata kohtasid, siis tuleks need keevitada soojusjuhtivustorudest eemal. [14]



Joonis 19 Soojusjuhtivustorude otste katmine plastikvahaga [14]

Soojusvahetussüsteem koosneb maapinda neeldunud ja kogunenud soojusenergia tsirkulatsioonilist transportimist hoonesse läbi spetsiaalsete torude, mis sisaldab endas vedelikku. Vaiade sees olevad torud on ühendatud soojuspumbaga, mida talvel kasutatakse soojuse saamiseks ja suvel jahutamiseks. Energiavaiade erinevus võrreldes teiste geotermaalsüsteemidega, on selle seotus ka hoone kandefunktsioonidega. [3]

2.3 Soojusjuhtivus betoonis

Betoonil on väga hea soojusjuhtivus ja soojussalvestus võime, mis teeb sellest väga hea täitematerjali soojusvahetustorude katmiseks. Täitebetooni soojusjuhtivus sõltub betooni tüübist, mahust ja niiskuse sisaldusest. Et maksimaliseerida betooni soojusjuhtivust, tuleks sinna omakorda lisada veel kõrge kvartsisisaldusega koostisosi. Üldiselt igasuguste muude segude ja tsemendi asendustoodete kasutamine vähendab betooni soojusjuhtivust.

Samas tuleb ka lähtuda sellest, et betooni peamine eesmärk ei ole täitematerjalina hea soojusjuhtivus, vaid maja kandefunktsioon. Kuna vaiade täitematerjalide kohta väga palju informatsiooni ei ole, soovitakse praktikas arvestada vaibetooni soojusjuhtivuseks mitte rohkem kui $1,5 \text{ W / mK}$. Soojusülekanne betoonis määravad kolm peamist omadust, milleks on termiline juhtivus, soojusmahtuvus ja soojusjuhtivus. [12]

2.4 Torud ja nende suurus

Toru ja liitmike õige suurus peab olema projekteeritud, et tagada maasoojusvaheti tõhus soojusülekanne. Torustiku mõõtmed peavad olema kohandatud selliselt, et neid oleks võimalik vajalikus olukorras uuesti täita või siis loputada. Soojusülekanndetorud peavad olema projekteeritud vastavalt turbulentssele voolamisele, mille minimaalne Reynoldsi arv on 2500 tippkoormuse juures (kõige külmem vedeliku temperatuur) ja voolukiiruste tingimustele. [3]

Süsteemi omadused nagu soojusülekannevedeliku kontsentratsioon, süsteemi minimaalne töökindlus, käitamistemperatuurid jms võetakse Reynoldsi arvu määramisel arvesse. Turbulentsel voolamisel tekkiv kiirus ja rõhk ei ole ühtlased ja nii tagab omakorda parema soojusülekannde kui laminaarvool ja seetõttu on parem saavutada soojusülekanndetorudes turbulentsne voolamine. Voolamisel silindrilises torus tähendab 4000-st suurem Reynoldsi arv turbulentsset voolamist. Kui Reynoldsi arv on väiksem kui 2300 on voolamine laminaarne. Väärtused mis jäävad piirkonna vahele ($2100 < Re <$

4000) nimetatakse mööduvaks alaks või siis üleminekualaks. Selles piirkonnas on vedelikul samaaegselt nii laminaarse kui turbulentsse voolamise tunnused. Praktikas on laminaarne voolamine ainult viskoossetel vedelikel (õlid). Konvektiivne soojusülekanne toimub vedelike ja tahke pinna vahel juhul, kui kehade vahel on temperatuurierinevus. [12] [17]

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3.1)$$

kus ρ = on vooluse tihedus, kg/m^3 ;

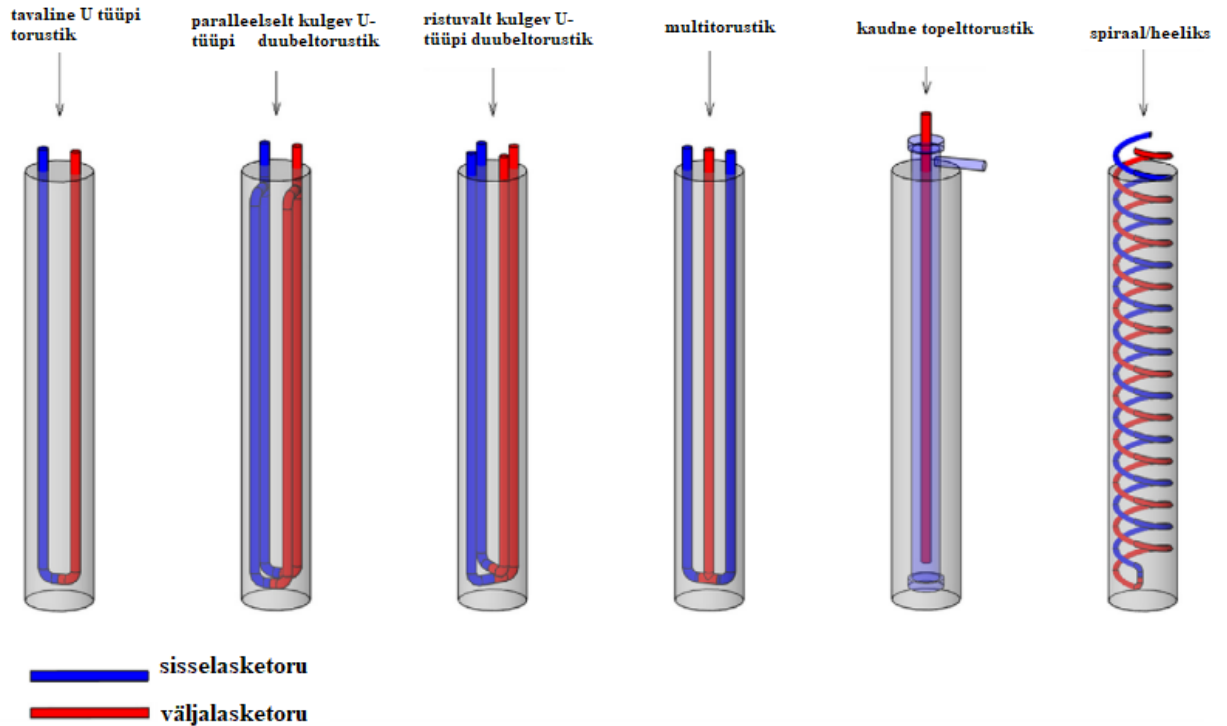
v = vooluse suhteline kiirus, m/s ;

d = toru läbimõõt, m

μ = keskkonna dünaamiline viskkoosus, $\text{Pa}\cdot\text{s}$

2.5 Energiavaiade vormid ja disain

Energiavaiasi saab jagada vastavalt vaiade materjalide ja soojusvahetite järgi. Materjali järgi kasutatakse kolme peamist vaia tüüpi: kohapeal maapinda valatud betoonist vai, eelpingestatud betoonvai (PHC) ja terasvai. Soojusvaheti silmus, mis käib betooni sisse on kas üks U toru, kahekordne U toru ja W toru (multitorustik), toru koos mähisega ja spiraalne toru. Kui on võimalik asetada torustik koos armatuuriga koheselt maapinda, siis kasutatakse selle jaoks spiraalset lahendust (vt. Joonis 20).



Joonis 20 Energiavaiaade erinevad modifikatsioonid [18]

Sõltuvalt energiavaia diameetrist, kasutatakse topelt U ja W silmuseid suuremate diameetrite puhul. Kui spiraal/heeliks tüüpi silmused on populaarsed just energiavaiaade uurimistöodes, siis tavapraktikas neid ei kasutata. Et teada saada pinnase tegelikke soojuslike omadusi nagu soojusjuhtivus ja difusioon, tehakse kohapeal termiline test TRT (Thermal Response Test), millega samuti veendutakse energiavaia vastupidavuses. TRT testi korral lastakse 72 tunni jooksul U- kujulisse sõlme konstantselt 35°C vedelikku ja võrreldakse tagastuva temperatuuriga.

Energiavaiaade projekteerimisel tuleb lähtuda sellest, kui palju energiat saab maapinnast ammutada ehk kui palju vaiasi tuleb selle jaoks hoonele projekteerida. Samamoodi peab vaiadel olema hea tööefektiivsus, samal ajal piirates temperatuuri muutusi pinnases ja vaia mõistlikuse piirides. Süsteemi efektiivsust vaadeldakse jõudluskoefitsendi või süsteemi hooajalise jõudluse järgi. Efektiivsel energiavaia süsteemil peab olema õigete kabariitidega soojuspump ja mehaaniline konstruktsioon, et tagada vähim vajalik energiatarbimine vedeliku ringlussüsteemi käimas hoidmiseks ja ühtlasi säilitades turbulentsse voolamist.

Kokkuvõtvalt, soojusvahetite tulenev energia sõltub täielikult maapinna omadustest ja selle soojuslikest omadustest, energiavaia tüübist kaasa arvatud selle suurusest, soojusvahetustorude paiknemisest ning termilise koormuse rakendamiseks vaja minev aeg ja kogus.

Energiapuurgaevude uurimisel on tehtud palju uuringuid, aga seda mitte energiavaiade puhul. Esmapilgul võib tunduda, et energiavaiad töötavad suhteliselt sarnastes tingimustes. Lähemal uurimisel siiski ilmnevad erinevad tõsiasjad nende kaht tüüpi soojusvahetite töötingimustes. Puurgaevu paksus on projekteeritud vastavalt kui paksud on sinna minevad soojusülekanedetoru ja selle tugijalad, täitesegu jne. [18]

Suurim efektiivsus saavutatakse ka siis, soojuse lõpptarbimine ei toimu väga kõrgete temperatuuride juures. Hästi projekteeritud, konstrueeritud ja käitatud süsteemi puhul peaks olema saavutatav SPF vahemikus 3 kuni 4.

Energiavaiade projekteerimisel tuleb lisaks vaiade geomeetriliste suurusele ja soojusvahetustorude omavaheliste kaugustele ning paiknemistele, arvesse võtta veel:

- Vaiade soojuspidavus. Seda arvutust kasutatakse, et teada saada temperatuuride erinevust, mis tekib soojusvahetustorudes oleva vedeliku ja vaiasi ümbritsevas maapinnases. Tavaliselt eeldatakse projekteerimisel, et vai on püsiv ja seetõttu on takistus konstantne. Vaiade termilise takistuse kohta informatsiooni väga palju ei ole ning eelnimetatud mõttekäiku ei tohiks projekteerimisel iseenesest mõistetavana võtta. [18]
- Maapinna soojusjuhtivus. Samamoodi nagu vaiade soojuspidavusel, selle kohta on teoreetiline informatsioon olemas aga seda ei saa võtta reaalsuses toimuvana. Rohkem saadakse selle kohta infot, kui viiakse läbi termilise reageerimise test.
- Maapinna soojusmahtuvus
- Keskmine maapinna temperatuur
- Energiavaiade paigutus fikseeritakse vastavalt hoone konstruktsiooni ja geotehnoloogiliste omadustejärgi. See tähendab, et energiavaiade projekteerimisel peab projekteerija lähtuma hoone kandefunktsioonidest, mitte maksimaalsest hoone kütte- ning jahutuskoormusest. [19]
- Energiavaiad on võrreldes maapuurgaevudega palju lühemad ja suurema diameetriga. Need geomeetrilised erinevused tähendavad, et lühiajalise analüüsi jaoks on vaja teada soojusvaheti tegelikku suurust ja kuju ning pikemaajalise analüüsi jaoks seevastu 3D analüütilist või numbrilist mudelit. [18]
- Temperatuurivahemik, millega töötavad vaiade soojusvahetid tuleb kokku leppida projekteerijaga. Eriti oluline on tagada, et maapind ei külmuks. See võib nii olla saavutatav kahel viisil. Lihtsaim viis on täpsustada miinimum pealevoolu temperatuur soojuspumbal $+2\text{ °C}$, lubatud hälve $\pm 2\text{ °C}$. Praktikas ei vii selle meetodi kasutamine optimaalse termilise projekteerimiseni. Selleks, et tagada madalatel temperatuuridel töötamine peab ära näitama et kavandatud soojusvaheti töö korral ei lange temperatuur pinnase ja betooni liitumispunktid alla 0 °C . [12]

- Tavaline on, et mitu toru ühendatakse ühe toruahelaga. See võib mõjutada üksikute vaia soojusvahetite soojusülekanne omadusi ja võib ka põhjustada muutuvaid temperatuuriväljasi maapinnases.
- Kindlasti tuleb projekteerimisel arvestada ka energiavaiade varuga. Energia vaiade ehitamise käigus, hilisemate süsteemi tööle panemisel tehtavate vigade tõttu ei pruugi kõik energia vaiad tööle hakata. Kuna vaiad oma soojusülekanndetorudega on asetatud hoone alla ning valatud betooni, siis nende edasine remontimine ja hooldamine pole enam võimalik.

2.6 Termiline reageerimise test

Termilise reageerimise test viiakse läbi, et saada täpset teavet maapinna termiliste omaduste kohta, kuhu ehitatakse energiavaiad. Eelnimetatud test on ka kõige täpsem selgitamiseks välja maapinna termilisi omadusi. Katsetuses teada saava soojusjuhtivuse infoga saab teha soojuspumba tööd efektiivsemaks ja soojusvahetustorude modelleerimise täpsust. Energiavaiade seisukohalt teeb katse veel oluliseks, et saada aru, kuidas vaiad reageerivad struktuuriliselt ja geotermiliselt töö ajal avaldatud soojuslike muutuste suhtes. Selle jaoks kasutatakse järgnevaid meetodeid:

- Puuraugu termilise reageerimise test, kus energiavaiade kasutamise varajane potentsiaal on kindlaks tehtud, siis tehakse antud asukohta katsetuspuurauk. Katseauku peab olema pandud U-paindetoru, mitte suurem kui 200 mm ning auk täidetakse kõrge soojusjuhtivusliku täitematerjaliga. Kuumutatud vesi pumbatakse turbulentsse voolamisega läbi toru. Antud protsessi jälgitakse iga aja tsükli tagant ning tehakse järeldused maapinna soojusjuhtivuse kohta. Katse peamised määravad on keskmine temperatuuri muutus ja maapinna keskmine soojusjuhtivus.
- Kulude ja ajaliste piirangute tõttu on füüsiliselt võimalik katsetada ainult 300 mm diameetriga energiavaiasid. Selles katses on vai ise juba termilise takistuse element. Katse peamised määravad on keskmine temperatuuri muutus ja maapinna keskmine soojusjuhtivus ja vaiade soojuspidavus. Testi ei tohiks alustada enne kui 21 päeva peale betooni valamist, et ära tahkunud betooni temperatuur ühilduks maapinna temperatuuriga.
- Kui ehitatavate energiavaiade läbimõõt on suurem kui 300mm, siis on selleks otstarbeks olemas test, mis on ajaliselt pikem võrreldes eelnevatega ning katsetamine on oluliselt keerukam. Kohapeal suurema läbimõõduga vaiade suhtes võib kohaldada termilise reageerimise eritesti, eeldusel, et katse kestust saab piisavalt pikendada, et ületada vaia soojapidavus.

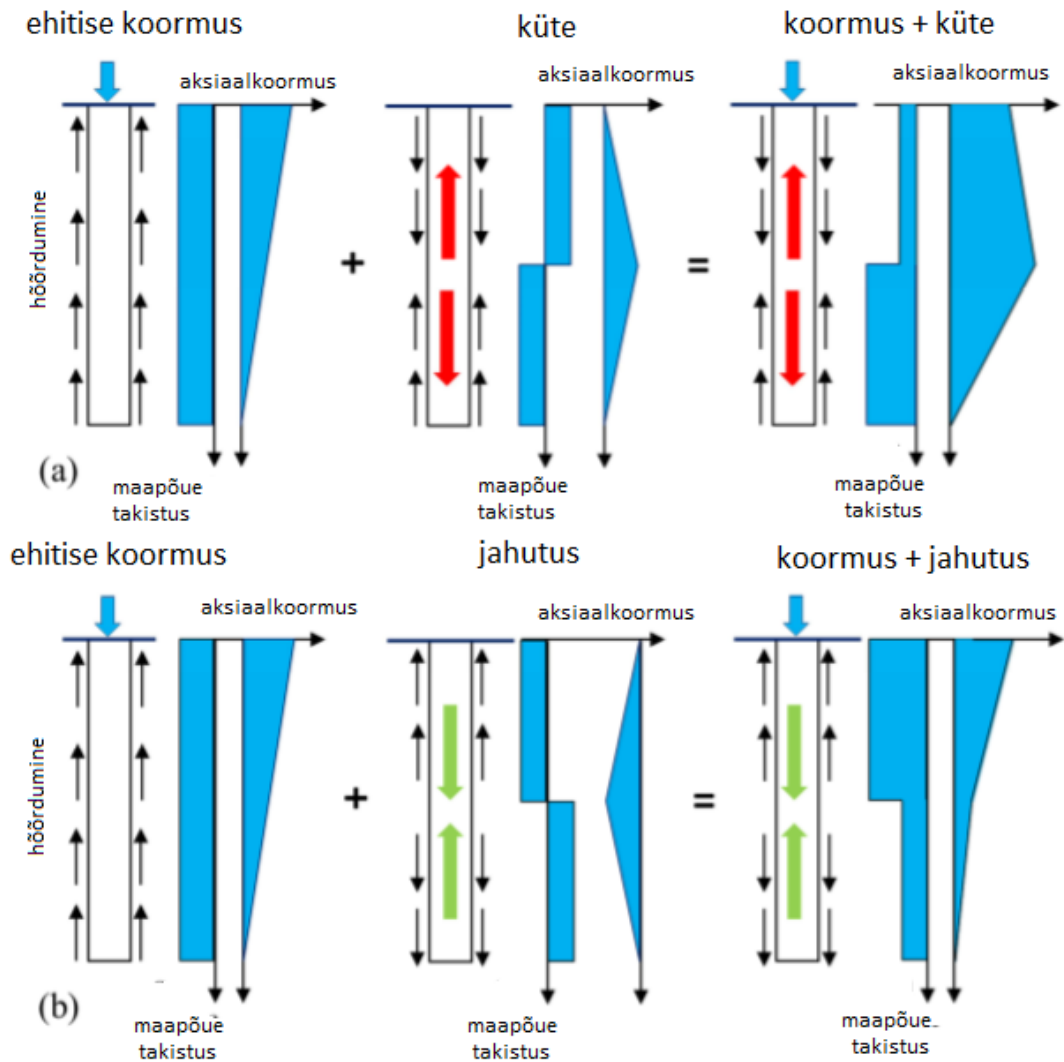
- Mehaanilise koormuse mõõdikud ja temperatuuriandurid paigaldatakse vaia alla ning sellega saab mõõta temperatuuri muutuseid vaias ning mehaanilise koormuse koosmõju. [12]

2.7 Mehaaniline pinge energiavaiadele

Energiavaiadel peab arvestama, et termiliste koormuste rakendamisel tekivad sinna pinged. Temperatuuri tõustes hakkab vai paisuma ning temperatuuri alanedes kokku tõmbuma. Teisisõnu tähendab see, et soojuse äravõtmisel (küttetsükklis) tõmbub vai kokku ja soojuse tagasiandmise perioodil (jahutustsükkel) vai paisub. Tegelikult võib energiavaiade temperatuur varieeruda vahemikus 5 °C kuni 40 °C ja võib seega põhjustada stressimuutusi piki vaia ennast ning vaia ülaosas.

Jahutamistsükklis vaia termiline paisumine tekitab endas vaia ja maapinna vahelise hõõrumise, mis lisab omakorda vaiale koormust. Katsetused on näidanud, et mitme tsüklilisi termilist koormuste rakendamist soojuspaisumine kutsub vaiades esile staatilisi muutusi. Omakorda toob vaia paisumine ka esile maapinna deformatsioone. Joonis 21 on näha kuidas soojuspaisumine tekitab paisumise vaia keskel ning kui lisada juurde mehaaniline koormus, kandub see vaia ülal osasse. Kindlasti peab juurde lisama, et antud katsetuses ei ole käsitletud maapinna enda koormust ja käitumist vaiade suhtes.

Vaiade jahutamisel kehtib peegelpildis põhimõtteliselt samasugune olukord. Ainult sel juhul on tegemist kokkutõmbega ning pinge moodustub samamoodi vaia keskel. [19]



Joonis 21 Energiavaia koormustaluvus [19]

Pinnase mahu muutus ja energiavaias tänu temperatuurile toob omakorda kaasa vaias deformatsioonid. Deformatsioonid sõltuvad omakorda temperatuuri kõikumisest ja soojuspaisumistegurist ning seda iseloomustab järgmine valem

$$\varepsilon = \alpha * \Delta T \quad (3.2)$$

ε = deformatsioon, m

ΔT – temperatuuride vahe, °C

α = soojuspaisumistegur, m

3 ENERGIAVAIADE KASUTAMINE MAAILMAS JA EESTIS

Alates 1980nendatest on geotermaalenergia olnud tähelepanu all ning esimesed energiavaiade katsetused on toimunud Austrias ja Šveitsis (1984). Tänapäeval on energiavaiade kasutamine aktualiseerunud eriti Euroopa riikides nagu Austria, Šveits, Saksamaa ja Suurbritannia, kuna Euroopa Liit on võtnud endale kohustuse vähendada kasvuhoonegaaside heitkoguseid 2020 aastaks 20% allapoole 1990. aasta taset, nagu on sätestatud Kyoto protokollis. Enamik energiavaiadest asuvad Euroopas ja teistes arenenud riikides (USA), mida iseloomustab parasvöötme piirkonnale iseloomulik kliima. [3]

Hetkel kasutatakse selliseid energiasüsteeme edukalt arenenud riikides. Energiavaiadele sarnaselt arendatakse hetkel ka energiatunneleid, energiaseinasid jne. Ehkki Hiina ja India on maailma esiviisikus olevad riigid taastuenergia arendamises, siis seni termoaktiivsete geostruktuuride arendamine nendes riikides on endiselt piiratud.

3.1 Olukord Eestis

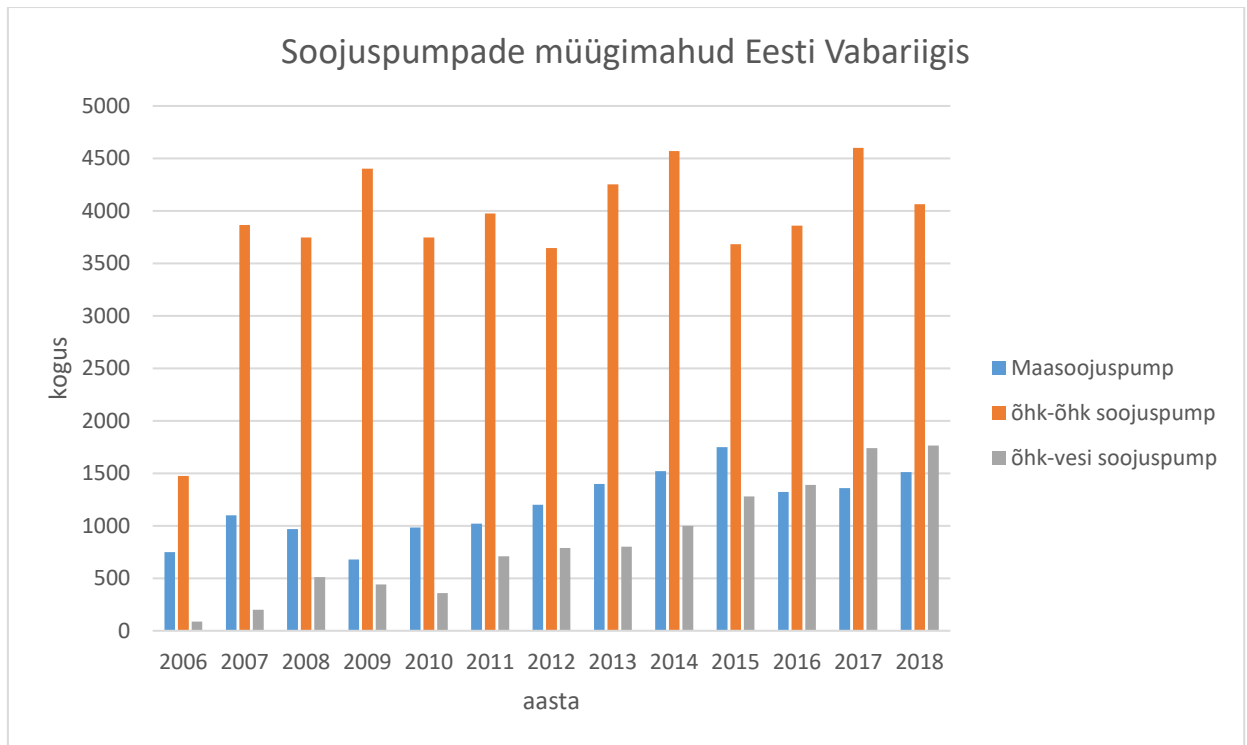
Eesti vabariigis on tänaseks ehitatud objekte energiavaiadega umbkaudu 10ne ringis ja võimsust üle 2000 kW. Viimase aja suurimad objektid on Teliä (Woho 1) hoone, Woho 2 ja hetkel pooleli olev arendaja Kaamose Avala kvartal. Hetkel on projekteerimises veel hulk hooneid, kus hakatakse kasutama energiavaiasi, aga nende andmeid ei avaldata.

Peamine Eestis tegutsev energiavaiadega firma on Maaküte. Algteadmised maakütte ja energiavaiade kohta on nad ammutanud sarnaselt objektilt Euroopast, koostöös firma Uponoriga. Eestis on kasutatakse peamiselt energiavaiade soojuskoormuste arvestamisel TABS lahendust, kus on aktiveeritud maja konstruktsioon, mille läbi saab maja tippsoojuskoormust alla ning ka kütte- ja jahutusvee temperatuure soojuspumba jaoks sobivamaks (küte kuni 40 kraadi ja jahutus ca 17 kraadi).

Ehituse ajal on põhilised raskused seotud vaiatorustiku kokku toomisega kuna ehituslikud iseärasused on objektidel erinevad. [20]

Eesti soojuspumba Liidu andmetel on keskmine soojuspumba võimsuses aastate lõikes vähenenud. Näiteks aastatel 2000 – 2010 oli keskmine paigaldatud soojuspumba võimsus üle 10 kW (enamasti ca. 12 - 14 kW). Tänapäevaks on keskmine võimsus lüüdnud juba alla 10 kW (enamasti 6 – 8 kW). See näitab liidu sõnutsi seda, et uusehitiste pindalad on muutunud väiksemaks ja oluliselt on paranenud hoonete energiaefektiivsus.

Eesti soojuspumpade paigaldusest on kõige uuemad andmed kajastatud käesolevas
Joonis 22:



Joonis 22 Soojuspumpade müügitahud [21]

4 WOHO-2 ÄRIHOONE

Antud hoone asetseb aadressil Mustamäe tee 3 ja kannab nime WoHo -2. Kuna seal kõrval asetseb ka teine kõrghoone nimega Woho -1, siis kutsutakse teist hoonet vastava nimega. Tegemist on ärihoonega. Hoone asub Harjumaa, Tallinnalinnas, Kristiine linnaosas, Mustamäe tee 3 (vt. Joonis 23). Woho teine etapp on 14-korruseline ärihoone ja 6-korruseline parkimismaja. Projekteeritud ärihoone on ristkülikukujulise põhjaplaaniga mõõtudega ca 42x25 m ja kõrgusega kuni 54,2 m ning projekteeritav parkimismaja on ristkülikukujulise põhjaplaaniga mõõtudega ca 51x35 m ja kõrgusega kuni 20,8 m. Parkla läheb osaliselt kuni ca 3 m ulatuses maa-alla.



Joonis 23 Woho-2 Mustamäe tee 3 ärihoone

Hoone kaalutud keskmine energiatõhususarv on 121,9 kWh/(m²·a). 03. juuni 2015 määruses nr.55 Hoone energiatõhususe miinimumnõuded sätestatud energiatõhususarvu piirväärtus korterelamutele on 150 kWh/(m²·a) ja büroohoonetele 160 kWh/(m²·a). Seega käesolev hoone vastab energiatõhususe miinimumnõuetele ja kuulub energiatõhususe klassi B.

Hoone küttesüsteemi projekteerimisel on võetud lähteandmeteks talvine arvutuslik välisõhu temperatuur -21 °C ja suhteline niiskus 90%. Suvine arvutuslik välisõhu temperatuur on +27 °C ja suhteline niiskus 50%. Vastavalt tellija soovile ja kehtivatele

standarditele on hoones ette nähtud optimaalse sisetemperatuuri tagamine nii talve- kui ka suveperioodil.

Põhilistes siseruumides tuleb tagada olenevalt ruumist talvel temperatuur +16 °C kuni +22 °C, duširuumides +24 °C. Suvine arvutuslik siseõhutemperatuur jahutatava õhuga äri-, büroo-, toitlustus- ja konverentsiruumides on +24 °C, eluruumides (korterite elu- ja magamistubades) +27 °C. Suvist siseõhutemperatuuri tagamist ei ole ette nähtud üldistele ruumidele ja tehnoloogilistele ruumidele. Ruumide arvutuslikud talvised siseõhutemperatuurid vastavalt Eesti Standardile EVS 844:2016.

Radiaatorkütte ja põrandakütte osas toimub õhutemperatuuri reguleerimine ruumipõhiste termostaatidega. Hoone 1. korruse kuni 9. korruse enamikes ruumides varustatakse radiaatorite reguleeriviilid elektriajamiga ning neid juhitakse ruumi termostaadist või suure ruumi puhul ruumi tsooni termostaadist.

Hoone soojuskoormused

Hoone arvutuslikud soojuskoormused on järgnevad [22]:

- Kütteks $Q_{\text{küte}}=235$ kW, mis jaguneb omakorda:
- Radiaatorkütteks $Q_{\text{radiaatorküte}}=150$ kW;
- Põrandakütteks $Q_{\text{põrandaküte}}=85$ kW
- Ventilatsiooni soojusvarustuseks $Q_{\text{ventilatsioonisojusvarustus}}=270$ kW;

Sooja tarbevee kuumutamiseks:

1. survegrupp $Q_{\text{sv1}}= 220$ kW.

2. survegrupp $Q_{\text{sv2}}= 360$ kW.

Kokku 1085 kW. Arvutuslik maksimaalne soojuskoormus soojussõlme valikul ja kaugküttevõrgu dimensioneerimisel oli 1085kW.

Alternatiivse soojusallikana on kasutusel maasoojuspump, mis saab oma energia hoonealustest energiavaiadest. Maasoojuspump koos sinna juurde kuuluva seadmestikuga paikneb keldrikorrusel soojussõlme ruumis (vt. Joonis 24, Joonis 25). [22]



Joonis 24 WoHo-2 hoone soojussõlm [23]



Joonis 25 Woho -2 hoone soojussõlm [23]

4.1 Küttesüsteemi kirjeldus

Hoone varustatakse vesikeskkütte süsteemiga. Hoonete kütmine toimub sõltuvalt ruumide otstarbest järgnevalt:

- Radiaatorküte - hoone 1.k.-9.k. ruumides (äripinnad, kohvik, bürood) ,kõikides trepikodades, 1.-14.k. liftihallides;
- Vee baasil põrandaküte – hoone 2.k. saunakompleksis ja 10.k.-14.k. korterites;
- Vee baasil soojapuhuritega küte – keldrikorruse parklas valveküte, soojapuhurid on ühendatud radiaatorküttesüsteemi peamagistraalide külge.

Eraldi küttesüsteemi harud soojussõlme ruumist on ette nähtud:

- radiaatorküttesüsteem
- põrandaküttesüsteem
- ventilatsiooni soojusvarustussüsteem.

Soojuskanaja arvutuslikud temperatuurirežiimid hoone süsteemides:

- radiaatorküte 45/35 °C
- pörandaküte 42/37 °C;
- ventilatsiooni soojusvarustus 45/30 °C (ventilatsiooniseadme kalorifeeris 40/30 °C);
- soe tarbevesi/külm vesi 55/5 °C.

Hoone soojusvarustussüsteemi ühendamiseks soojusallikaga on ette nähtud soojussõlm. Soojussõlme primaarpoole soojuskandja arvutuslikud temperatuurirežiimid on toodud soojusvarustussüsteemi põhimõttelisel skeemil vastavate plaatsoojusvahetite juures. Soojussõlmes paiknevad soojusvahetid 1.survegrupi soojale tarbeveele, 2.survegrupi soojale tarbeveele, radiaatorküttele, pörandaküttele ja ventilatsiooni soojusvarustusele.

Küttesüsteemide ja ventilatsiooni soojusvarustussüsteemi soojuskandja pealevoolutemperatuuri ning sooja tarbevee temperatuuri reguleerimiseks paigaldatakse soojusvahetite primaarpoolele elektriajamiga kaheteeventiilid.

Pörandaküttesüsteemi soojuskandja pealevoolutemperatuuri juhitakse vastavalt välisõhutemperatuurile ja etteantud temperatuurigraafikule. Soojussõlme automaatika peab võimaldama graafiku kaldenurgamuutmist. Soojussõlme automaatika peab võimaldama pörandaküttele seadistada murdepunktiga graafiku sellisel viisil, et alates +10 °C (eelseadistatav murdepunkt) kõrgema välisõhutemperatuuri puhul hoitakse pörandaküttesüsteemi soojuskandja pealevoolutemperatuuri konstantsel etteantud väärtusel +30 °C.

Radiaatorküttesüsteemi ja ventilatsiooni soojusvarustussüsteemi soojuskandja pealevoolutemperatuuri juhitakse vastavalt välisõhutemperatuurile ja etteantud temperatuurigraafikule. Soojussõlme automaatika peab võimaldama graafiku kaldenurga muutmist. Sooja tarbevee soojusvahetite suure võimsuse tõttu paigaldatakse mõlema soojusvaheti juurde temperatuuri reguleerimiseks paralleelselt kaks elektriajamiga kaheteeventiili.

Sooja tarbevee temperatuuri vastavast soojusvahetist väljumisel hoitakse konstantsel etteantud tasemel +55 °C. Soojussõlme primaarpoole torustikule paigaldatakse üldsoojusmootja ja diferentsiaalrõhuregulaator.

Sekundaarpoole soojuskandja tsirkuleerimiseks on ette nähtud EC-mootoritega või sagedusmuunduritega varustatud tsirkulatsioonipumbad. Reservpumpasid ette ei nähta.

Soojuspaisumiste kompenseerimiseks on ette nähtud membraanpaisupaagid. Kaitsearmatuuriks on ettenähtud kaitseklapid. Kogu soojusvarustussüsteemi täitmine ja lekete kompenseerimine toimub kaugküttevõrgu veega. Täitetorule paigaldatakse elektriline täitepump, kulumõõtja ja täiteventiil.

Soojuse mõõtmine toimub soojussõlmes paikneva üldise soojusmõõtjaga. Korteripõhise soojushulga mõõtmiseks on ette nähtud lokaalsed soojusmõõtjad. Soojusvarustussüsteem varustatakse vajalike sulgemis-reguleerimiseadmete ja näitavate mõõteriistade ning automaatikaga. Soojussõlme automaatika peab võimaldama ühendust hooneautomaatika süsteemiga, kõikide andurite näidud ja süsteemide töös esinevad häired edastatakse hooneautomaatika süsteemile. Kõik torustikud tehnoloogilistes ruumides on isoleeritud.

4.2 Hoone geoloogilised tingimused

Hoone paiknemisala pinnakate koosneb pindmisekihinaesinevast täitepinnaste kompleksist, mille lamamiks on merelised, jääjärvelised ja jääjõelised liiv- ja savipinnased ning ~18...20m sügavusel maapinnast avanev kõva moreen. Aluspõhja kivimitena esineb Alam-Kambriumi Lontova kihistusinisavi aleuoliidi ja liivakivi vahekihtidega, aluspõhja kivimid jäävad üldgeoloogilistel andmetel >50 m sügavusse.

Välitööde andmete põhjal on eraldatud järgmised pinnasekihid:

Kiht 1. täitekiht, ehituspraht liiva ja mullaga. Täitekompleksi kogupaksus on 0,50...1,80 m. Kiht avati maapinnal (absoluutkõrgusel 4,65...5,75m).

Kiht 2. peenliiv, möllikas /savikas, kohev kuni kesktihe. Kiht avati maapinnast 0,50...1,80 m sügavusel (absoluutkõrgusel 3,65...4,35m). Kihi paksus on 1,20...2,30 m.

Kiht 3. Keskliiv rohke peenliivaga, möllikas/savikas, kesktihe. Kiht avati maapinnast 2,25...3,35m sügavusel (absoluutkõrgusel 2,40...2,70m). Kihi paksus on 0,15...0,65m.

Kiht 4. savimöll, voolav. Kiht avati maapinnast 2,80...3,50 m sügavusel (absoluutkõrgusel 1,75...2,30m). Kihi paksus on 5,50...8,05m.

Kiht 5. Möllsavi, voolav. Möllsavi (viirsavi) on voolava konsistentsiga, kihilise tekstuuriga, paiguti esineb kihi üla- ja alaosas savimölli ja mölli vahekihte, värvuselt hall kuni hallikas-pruun. Kiht avati maapinnast 8,30...11,50 m sügavusel (absoluutkõrgusel -3,60...-5,85m). Kihi paksus on 1,15...2,00m.

Kiht 6. Rohke liivaga möll, tihe. Kiht koosneb valdavalt möllist, mis sisaldab ka peen- ja keskliiva läätsi, värvuselt valkjas-hall. Kiht on tihe. Kiht avati maapinnast 10,30...12,65m sügavusel (absoluutkõrgusel -5,20...-7,00m). Kihi paksus on 2,50...5,95m.

Kiht 7. Möll, kohev kuni kesktihe. Kiht koosneb valdavalt möllist, milles esineb savimölli vahekihte, värvuselt valkjas-hall. Kiht on kohev kuni kesktihe. Kiht avati maapinnast 14,70...17,20 m sügavusel (absoluutkõrgusel -9,40...-11,60m). Kihi paksus on 2,55...4,80m.

Kiht 8. Savimöllumoreen, kõva. Savimöllumoreen on kõva konsistentsiga, sisaldab jämepurdmaterjali kuni 25%, värvuselt hall. Kiht avati maapinnast 17,75...19,95m sügavusel (absoluutkõrgusel -13,10...-14,30 m). Kihi läbitud paksus on 2,10...4,70 m.

Välitööde ajal (12.-15. oktoobril 2015.a.) mõõdeti pinnasevee tase maapinnast 1,45...2,05m sügavusel (absoluutkõrgusel 3,10...3,75m). Tegemist on savikompleksi (kihid 4 ja 5) peal merelistes liivades (kihid 2 ja 3) esineva vabapinnalise veehorisondiga. Pinnasevesi toitub põhiliselt sademetest. Pinnasevee maksimaalne tase võib tõusta ~0,5 m kõrgemale välitööde ajal mõõdetud tasemest. Vee äravool toimub loode suunas Kopli lahte. Varasema töö [1] andmetel on savikompleksi (kihid 4 ja 5) all jääjõelises liivas (kihid 6 ja 7) surveiline vesi, mille piesomeetriline tase mõõdeti toonaste välitööde ajal 10.09.2001 maapinnast 6,55 m sügavusel (abs. kõrgusel -0,95 m). [24]

4.3 Jahutussüsteemi kirjeldus

Maasoojuspump/külmamasin 1SP1 võimaldab kõikide kompressorite baasil samaaegselt kütet/jahutust ilma soojust väliskeskkonda juhtimata. See on väga energiatõhus lahendus hoone erinevate osade samaaegsel kütmisel ja jahutamisel. Samaaegse kütmise ja jahutuse efektiivsust iseloomustav näitaja ITEE on projekteeritud seadme puhul ette nähtud vähemalt 8,0. Hoone soojusvarustuse ja külmavarustuse tarbeks on ette nähtud Denco Happel Heamo tüüpi soojuspump, mis võimaldab samaaegselt ruumide kütmist ja jahutamist, tõstes oluliselt kasutusperioodil hoone kui terviku

energeetilist efektiivsust. Üldiselt on hoonel aktiivjahutus, kuigi automaatikaga on ära määratud öine jahutamine ventilatsiooni kaudu.

Hoone külmavarustus on ette nähtud ühise külmasüsteemi baasil, millede poolt teenindatavad seadmed, jahutusvõimsused ja külmakandja temperatuurirežiimid on järgnevad:

- ventilatsiooniagregaatide komplekti kuuluvad vesijahutuspatareid. Külmakandjaks on vesi temperatuurirežiimiga 7/12°C. Süsteem ühendatakse jahutuse akumulaatorpaagiga otse, ilma segamissõlmega.
- jahutuskonvektoritega jahutussüsteem. Süsteem on ette nähtud äripindade, toitlustusruumide, büroorumide lisajahutuseks ja eluruumide jahutuseks. Külmakandjaks on vesi temperatuurirežiimiga 7/12 °C. Süsteem ühendatakse jahutuse akumulaatorpaagiga otse, ilma segamissõlmega.

Hoone jahutus toimub 2 külmaseadme baasil, milleks on maasoojuspump/külmamasin 1SP1 (vt. Joonis 26) ja reservkülmamasin.

Hoone jahutusvõimsuste arvutamisel on aluseks võetud arvutuslik välisõhu temperatuur +27 °C ja suhteline niiskus 50 %. Suvine arvutuslik siseõhutemperatuur jahutatava õhuga äri,- büroo-, toitlustus- ja konverentsiruumides on +24 °C, eluruumides (korterite elu- ja magamistubades) +27 °C.



Joonis 26 Woho- 2 hoone sojussõlme külmamasin [23]

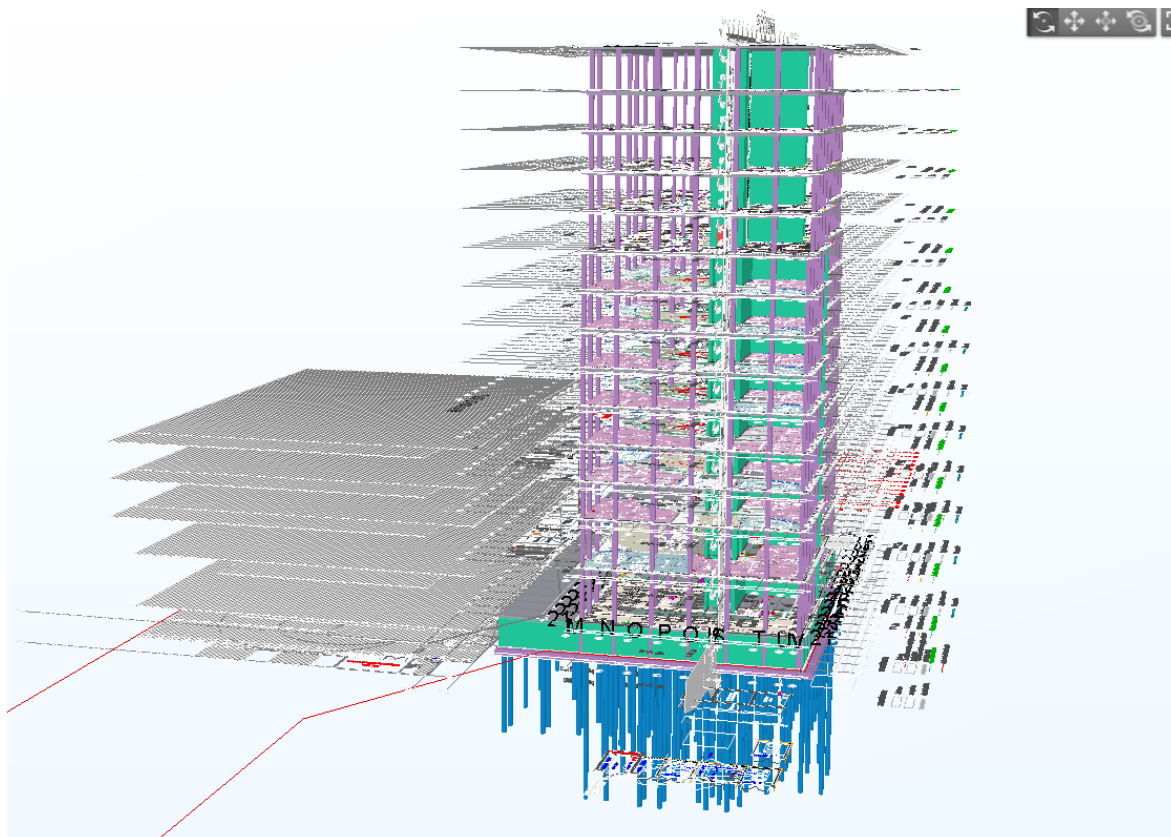
Hoone summaarne vajalik jahutusvõimsus on 572 kW, mis jaguneb järgnevalt:

- 220 kW - ventilatsiooniagregaatide komplekti kuuluvate vesijahutuspatareide koguvõimsus;
- 352 kW - jahutuskonvektorid.

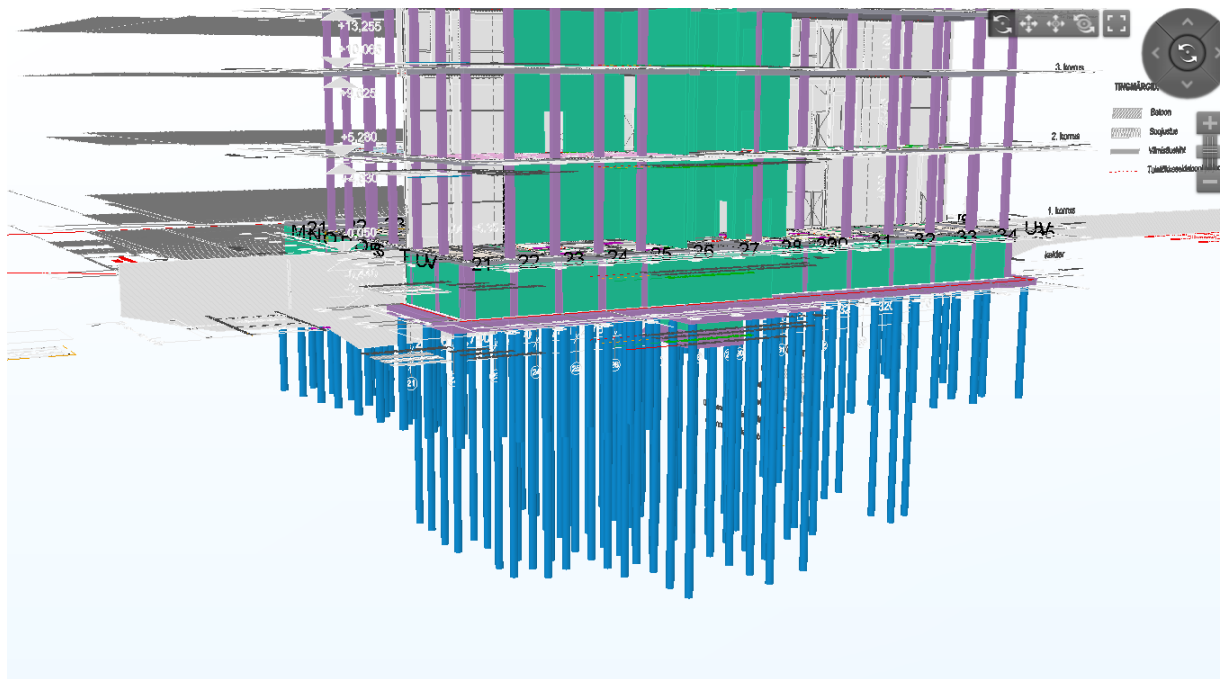
Kokku – 572 kW. [25]

4.4 Energiavaiad hoones

Käesolevas projektis lahendati seade soojuspump-külmamasina primaarenergia ammutamine pinnases paiknevate termoaktiveeritud betoonvaiadega (vt. Joonis 27, Joonis 28). Betoonvaiadesse paigutati plasttorustik, mille sees liigub energiakandjana 29%-ne bioetanooli lahus. Süsteemi eesmärk on jahutada/kütta soojuspump/külmamasina primaarset kontuuri. Hoonele on projekteeritud kaugkütte ja maasoojuspumba kombineeritud küttelahendus. Kokku paigaldati hoonesse 115 vaia, millele lisandus hilisemalt veel 35 lisaks.



Joonis 27 Woho-2 hoone külgaade läbi BIM mudeli. Vasakul pool parkla, paremal hoone [23]



Joonis 28 Woho -2 hoone eestvaade läbi BIM mudeli. Allpool hoonet teostavad vaiad [23]

Maasoojusenergia saadava energia kavandamisel on kasutatud tarkvara maasoojuse simulatsiooni programmi (TABS, vt peatükk 4.1) , millega on koostatud maast saadava soojusenergia bilanss nii küttele kui jahutusele.

Maasoojuse jaotus teostati torudega PE-X. Kasutades sidumistraati paigaldati termoaktiveeritud vaiade sees olevale armatuurile Uponor PE-X 25 mm toru. Toru arv vaias on 2 ringi, mis on ühendatud jadasse. Vaiadesse sisenev toru paigaldati torurüüsi, kuna vaiadesse minev vedeliku temperatuur võib olla negatiivne.

Vaiadest väljuvad läbimõõduga 25 mm maasoojustorustikud liideti kokku ühendustorustikega kasutades liitmike, mis ühendati tööstusliku põrandakütte kollektoritega. Ühendustorustikud viivad energiakandja energiavaiast kollektorini ja on horisontaalselt killustikpadja sees. Kollektorist kuni soojustehnilise sõlmeni kasutatakse jaotustorustikku läbimõõdus 32-110 mm, mis paikneb keldrikorruse põranda sees. Kasutatav materjal on PEM. [26]

Enne maasoojustorude paigutamist betoonarmatuuri (vt. joonised 29,30), tehti nendele 4bar-iga survekatse lekete tuvastamiseks ja toru üldiseks vastupidavuseks. Armatuur asetati puurauku ning täideti betooniga. Seejärel piigati ettevaatlikult lahti vaia ülemine ots, et saada kätte soojusülekandevõrkude otsad. Ka siis tuli teha uuesti survekatse veendumaks ega torud ei ole valu käigus purunenud. Peale seda ühendati need magistraaltorudega, mis jooksevad Woho hoone keldrikorrusel olevasse kollektorisse (vt. Joonis 31). [27]



Joonis 29 Maas asetsevad betoonarmatuurid ning taamal spetsiaalsed masinad millega neid puurauku tõsta [27]



Joonis 30 Betoonarmatuur, kuhu sisse on asetatud soojusülekangetoru [27]

Maasoojustorustiku läbiviimisel betoonplaatidest ei kasutata eraldi veetihendus abinõusid, sest vundamendi betoonplaadid ei teostata veetihedalt. Kollektorkappides on iga termovai omaette kontuur, kui ilmneb termovaia rike on võimalus vai sulgeda kuni rike on kõrvaldatud. [27]



Joonis 31 Woho-2 hoone soojasõlme kollektorkapp [23]

Maakontuuri vigastuse puhul on võimalik eksploatatsioonis kasutada toru parandamiseks kavandatud plastkiud vee lisandeid, mis lekkekohas kokkupuutel õhuga kivistuvad ja likvideerivad lekke. Plastkiud on elastsed, mis võimaldavad ka toru liikumist peale lekkekoha paranemist.

Kõik energiavaiad on tähistatud ja nummerdatud vastava vaia numbriga. Kollektorkapis on tähistatud kõik kontuurid. Termovaia rikke puhul saab selle välja lülitada võimalike parandustööde või meetmete rakendamiseks. Süsteemi jaotus magistraalitoruski tähistatakse kleepsiltidega vastavalt nõudele. Kollektorkapid tähistatakse, samuti igas kollektorkapis paiknev seadeventiil. Seadeventiil moodsustatakse ning mõõtetulemused ja seade arv kantakse ventiili infosedelile.

Maasoojus ja jahutussüsteem ühendatakse soojuspump jahutusseadmega, mis asub hoone tehnilises ruumis. Samuti ühendati süsteemi täitevee otsik. Täitevee kraan on varustatud tagasilöögiklapiga. Täitevesi ühendati tarbevee süsteemi, täitmine toimub tarbeveega või antifriisiga.

Termovaia torustiku hooldust ja ülevaatus teostatakse kord aastas. Süsteemi hoolduse käigus moodsustatakse energiakandja vedeliku külmumisvastast

kontsentratsiooni Mõõtmist teostatakse alkoholomeetriga mis kavandatud alkoholi ja vee segude mõõtmiseks. Vajaduse, kui alkoholi vee segu kontsentratsioon on langenud alla 29%, lisatakse antifriisi, et saavutada vajalik kontsentratsioon. Kontrollitakse kollektorkappides paiknevaid kollektoreid, et avastada võimalik leke või külmumine. Kontrollitakse kas kõik kontuurid on töökorras ning kas igast kontuurist on läbivool. Läbivoolu on võimalik tuvastada vooluhulga regulaatori indikaatori järgi, mis näitab läbivooluhulka. Kui näidik on 0 nivool siis läbivool puudub. Puhastatakse süsteemi mudafiltrid ning jälgitakse süsteemi töörohku. [26]

4.5 Energiavaiade ehitamiseks kasutatavad materjalid

Betoonvaiade valamisel satub küttetorustik väga agressiivsesse keskkonda. Selle keskkonna tarbeks valiti toona PE-Xa tüüpi toru. Mitmekihiline toru kannatab hästi kriipimist ning PE-Xa materjal oma molekulaarset struktuurmälu, mis lubab toru kuju taastada võimaliku deformatsiooni puhul. Liitmikena kasutatakse Q ja E liitmike firmalt Uponor. Liitmikud on ajas tihenevad ning mittelahtivõetavad. Liitmiku kokkupuutumine betooniga on lubatud kuna betooni mõju liitmiku materjalile on minimaalne.

Süsteem on puhas, seda on lihtne paigaldada ja ta on paindlik. Paindlikkus tähendab ka näiteks võimalust paigaldada pikemaid torulõike, sest liitmike hulk ja abitööde osatähtsus on väike.

PE-X toru kasutatakse ka sooja- ja külmaveesüsteemides. Torud on valmistatud kõrgtihedast ristseotud polüetüleenist (PE-X). Ristsidumine on protsess, mille käigus toimub polüetüleeni keemilise struktuuri muutus selliselt, et polümeeri molekulahelad seotakse keemiliste sidemete abil omavahel tugevaks kolmemõõtmeliseks võrguks.

Keemiline struktuur ei võimalda polümeeri sulatamist või lahustamist ilma selle struktuuri lõhkumata. Seetõttu võib PE-Xa torusid kasutada temperatuuridel ja rõhkudel, mis varem olid võimalikud ainult metalltorude puhul. Lisaks sellele on PE-Xa torud erakordselt elastsed. Venitamisel püüab toru alati taastada oma esi algseid mõõtmeid (väljaarvatud juhul, kui venitus ületab katkemispunkti, mis on üle 300%). Selle omaduse ära kasutamine võimaldab lihtsalt ja kindlalt torusid ühendada. PE-Xa torud on korrosioonikindlad ja väga pika kasutuseaga. Siseläbimõõt ei vähene aja jooksul korrosiooni või setete ladestumise tõttu, nagu seda sageli juhtub metalltorudega. Toru materjali ei kahjusta suured voolukiirused ega madala pH-tasemega (agressiivne) vesi. Toru ei kahjusta ka sellised ehitusmaterjalid nagu betoon, lubimört ja kips.

PE-X torude paigaldamisel tuli vältida toru kontakti plastifikaatoreid sisaldavate teipide, värvide ja hermeetikutega ning lahusteid sisaldavate ainetega, sest nendega kokkupuutumine võib lühendada toru kasutusiga. Kuna UV-kiirgus kahjustab toru, ei tohi seda tüüpi torusi ladustada otse taeva alla (päikese poolt tehtavad kahjustused), vaid varju.

PE-X torudel on hulk omadusi, mis lihtsustavad nende paigaldamist. Nad on kerged ja elastsed, puudub vajadus keevitamise või jootmise, st kõrgel temperatuuril tehtavate paigaldustööde järele. Transportimise ja kasutamise hõlbustamiseks tarniti torud rullidena.

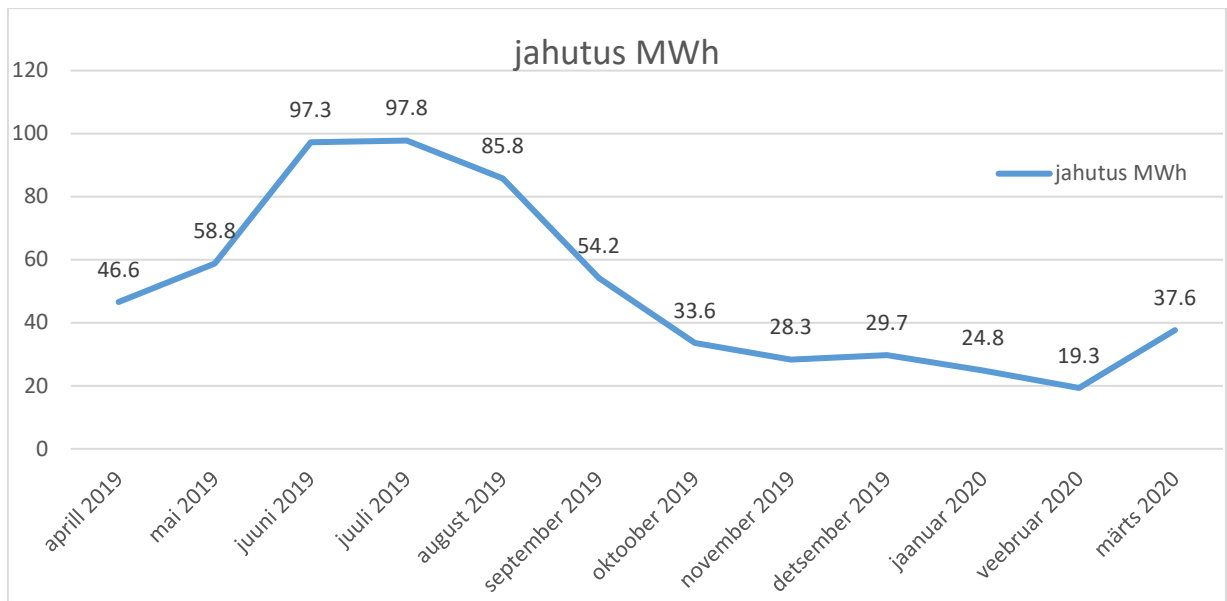
Kuna ristseotud polüetüleen ei ole keevitav ega liimitav, on juhuslikult vigastatud toru parandamise kindlaim ja lihtsaim viis selline, et vigastatud koht lõigatakse välja ja jätkatakse Uponori jätkudega. Kui toru on näiteks liialt kiirel painutamisel kokku murtud, sobib alternatiivne parandusviis, kus kasutatakse ristseotud polüetüleenile ise loomulikku soojusliku mälu omadust. Selline parandusviis taastab toru kuju. [26]

4.6 Hoone mõõtmistulemuste analüüs

Hoone mõõtmistulemused on läbi viidud alates aprillist 2019 kuni märtsini 2020. Mõõtmistulemustes on kajastatud hoone nende kuude soojus- ja jahutusenergia tarbimine. Lisaks on välja toodud eraldi soojuspumba elektritarve. Sõltuvalt aastaajast on ka hoone energiatarbimine erinev.

4.6.1 Jahutus

Suvel ei ole hoone kütmine tarvilik ning kasutatakse energiavaiasi hoopis jahutamiseks, seevastu talviti kasutatakse neid hoone kütmiseks. Kütte- ja jahutussüsteem on üles ehitatud kasutades maasoojuspump ja külmamasin kombineerituna võimaldab kõikide kompressorite baasil samaaegselt kütet/jahutust ilma soojust väliskeskkonda juhtimata. Seetõttu hoonet saab kütta ja jahutada korraga sõltumata aastaajast.

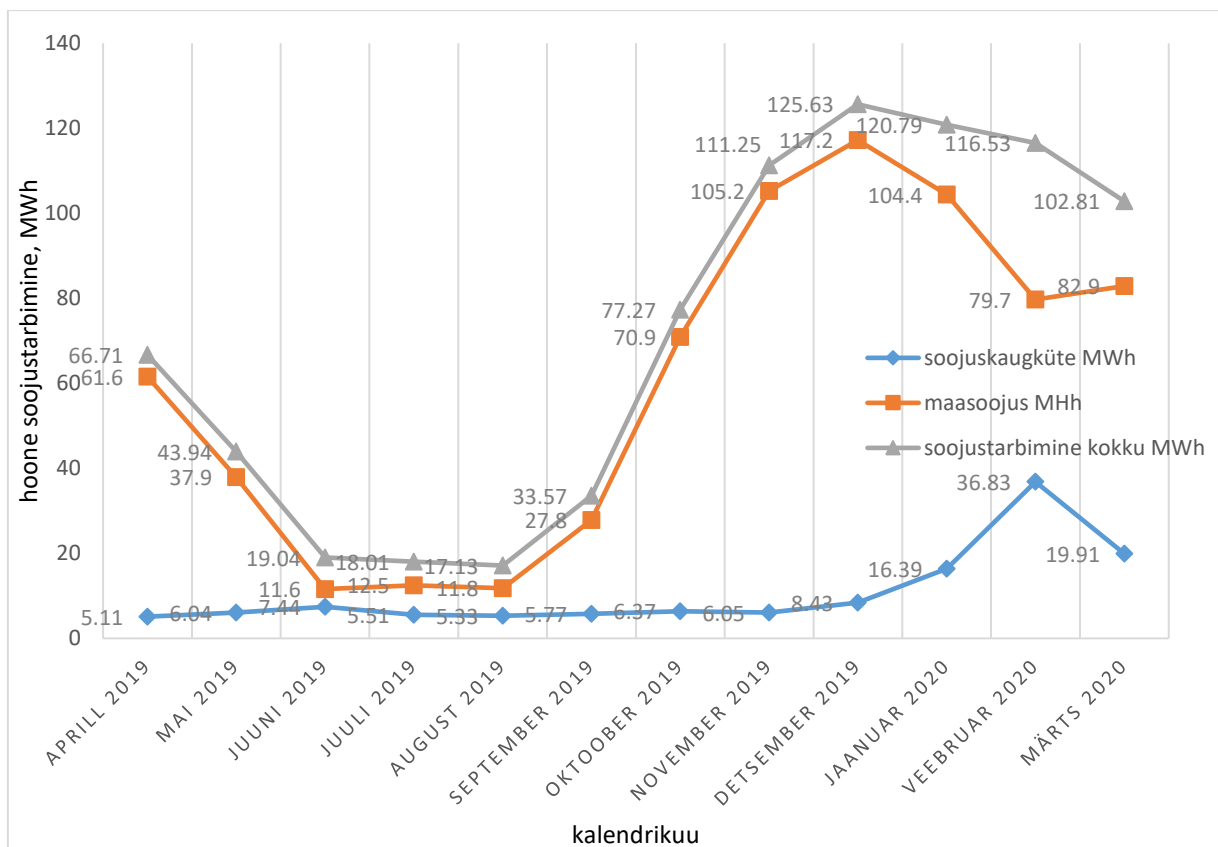


Joonis 32 Hoone energiatarve jahutamiseks [23]

Joonis 32 selgub, et peamiselt kasutatakse jahutust suvekuudel. Info on saadud hoones paiknevast arvestist. Jahutuse kasutamine väheneb märkimisväärselt talviti aga siiski on hoones ruume, mis vajavad ka talveperioodil jahutust. Tuleb arvestada asjaoluga, et kuna antud hoones paikneb IT ettevõtte ja kaasnevad sellega suured serveriruumid, mis nõuavad pidevat jahutust. Samuti kasutatakse jahutust büroo osas lokaaljahutusena.

4.6.2 Soojus

Soojuse tarbimine moodustab põhiosa hoone üldisest energiatarbimisest. Põhilise soojuskoormuse katab ära energiavaiadelt saadav soojusenergia ning tipukoormus kaetakse kaugküttega. Joonis 33 on näha, et suurem soojustarbimine toimub Woho-2 hoonel talvekuudel alates oktoobrist kuni märtsini, suvekuudel on see oluliselt väiksem. Seejuures võib välja tuua, et kaugkütte tarbimine püsib alates aprillist kuni novembrini suhteliselt stabiilsena ca. 5 -7 MWh vahel ning talvekuudel suureneb oluliselt. Alates IV kvartalist on näha märgatavat maasoojuse kasvu vähenemist ning selle võrra soojuskaugkütte osakaalu suurenemist. Seda eriti veebruari kuus. Põhjuseks on asjaolu, et maapinnast olev soojus ammutatakse nendel kuudel ära ning küttesüsteem on sunnitud oma tipu katma kaugkütte kaudu. Suvel kasutatakse soojust peamiselt toitevee soojendamiseks ja talvel hoone kütmiseks.

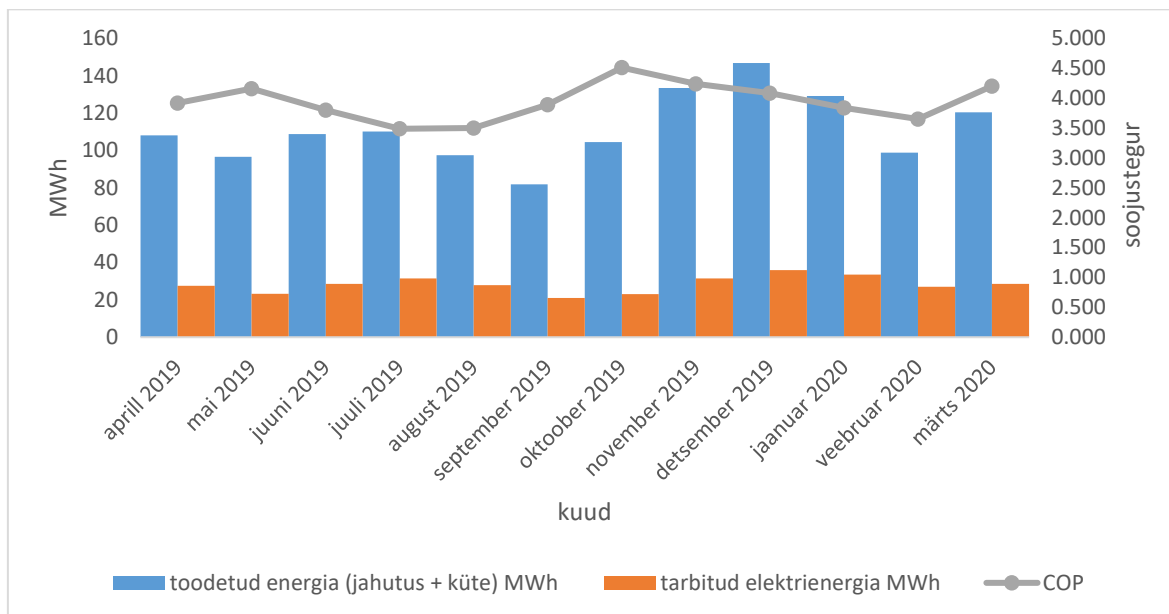


Joonis 33 Tulemused saadud arvesti pealt [23]

4.6.3 Energiavasisüsteemi kasutegur

Energiavasisüsteemi kasutegur näitab energiavasisüsteemi poolt toodetud energia ja selle tootmisesse rakendatud elektrienergia suhet. Kuna nagu eelpool mainitud on tegemist sellise soojussüsteemiga, kus soojussõlm suudab korraka jahutada ja kütta, siis antud mõõtmistulemustes vaadeldakse neid tervikliku süsteemina. Joonis 34 on kajastatud kuude lõikes energiavasisüsteemi poolt toodetud energia ja tarbitud elekter. Tulpskaalast üleval pool on ära toodud ka soojuspump/külmaseadme COP. Joonisel näidatud toodetud energia kätkeb endas korraka nii jahutus kui ka soojusenergiat. Tarbitud elektrienergia hulk näitab ära palju kulus elektrit, et toota sama aegselt nii soojust kui ka jahutust. Sellest johtuvalt on COP arvutus teostatud võttes arvesse kütte ja jahutuse peale kulunud elektrienergiat ja sellega toodetud kütte ja jahutusenergia. Kuna

soojuspump/külmaseade on suvisel ajal aktiivselt seotud pigem jahutuse tootmisega, siis on ära reguleeritud, et toitevee soojendusvajadus kaetakse hoopis kaugküttega.



Joonis 34 Tulemused saadud arvesti pealt, soojustegur saadud arvutuslikult [23]

4.6.4 Hoone energiamaksumuse analüüs

Antud energiamaksumuse analüüs on läbi viidud arvestades stsenaariumit, kui hoone küte toimub puhtalt kaugkütte pealt ning kasutatakse ainult kohalikke jahutusseadmeid, ehk jahutamine toimuks elektriga. Sellise juhul jääb kasutamata maaküttest saadav soojus- ja jahutusenergia. Samamoodi muutuvad ka kulutused elektritarbe peale. Võrdlus on läbi viidud kuupäevade seisuga aprill 2019 kuni märts 2020. Kaugkütte ja elektrihindade maksumusel on aluseks võetud antud perioodi keskmine hind tarbijale €/MWh.

Kõigepealt tuleb välja tuua käimasoleva energiasüsteemi MWh antud perioodil mis jagunevad:

Tabel 2 Olemasoleva süsteemi energiakulud

Olemasolev süsteem	
Energiakulu liik	MWh
Küte	724
Jahutus	614
Kaugküte	129
Kokku	1466
Elekter	340

Tabelist 2 on näha, et kokku tarbiti eelnimetatud perioodil kütet energiavaiadest kokku 724 MWh ning kaugkütet 129 MWh. Jahutuseks kulus 614 MWh, mis on samuti saadud energiavaiadest. Kokku teeb see toodetud energia summaks 1466 MWh. Perioodi peale kokku on süsteemi käitamiseks läinud elektrienergia 340 MWh.

Hinna arvutamisel tuli lähtuda hetke kaugkütte hinnast milleks on 47,8 €/MWh [28]. Elektri hinnaks keskmiselt lähiperioodi statistika järgi 91,7 €/MWh [29].

Hindasi arvestades tuli perioodil aprill 2019 kuni märts 2020 tuli 129 MWh kaugkütte soojuse eest hinna 47,8 €/MWh korral tasuda 6175 eurot. 340 MWh elektrienergia peale kulus hinna 91,7 €/MWh juures kokku 31 162 eurot. Kokku läheb hoone energeetiliste kulutuste peale 37 337 eurot.

Teise stsenaariumi järgi on Woho-2 hoonele tehtud energiamaksumuse analüüs juhul kui hoonel puuduks energiavaiade süsteem. Sellisel juhul kataks hoone soojustarbimise puhtalt kaugküte ja kasutataks lokaalseid jahutusseadmeid, mis teisisõnu tähendab, et jahutamine toimuks ainult elektriga. Perioodiks on arvutustel võetud samamoodi aprill 2019 – märts 2020.

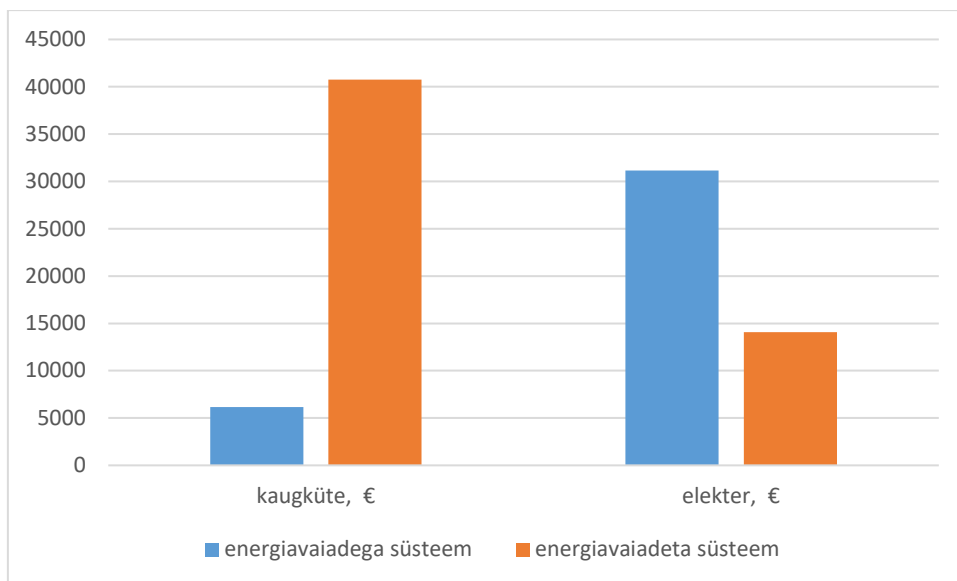
Tabel 3 Ilma energiavaiadeta süsteemi energiakulu

Ilma energiavaiadeta	
Energiakulu liik	MWh
Kaugküte	853
Elekter	153

Et teada saada soojustarbimist antud perioodil läbi kaugkütte, võeti arvesse MWh, mis saadi energiavaiadest ning liideti otsa MWh kaugküttest. Sellises olukorras kuluku puhtalt kaugkütte peale kokku 853 MWh. Jahutussüsteemil sai arvestatud lokaalsete jahutusseadmetega. Et teada saada hoone jahutusele kuluvat elektrikogust tuli olemasoleva jahutussüsteemile minev jahutus MWh summa jagada külmaseadmete keskmise SCOP-iga, milleks on 4 [30]. Vastavalt SCOP-i valemile tuletati vaja minev elektrienergia kogus (vt. valem 5.1). Nii tuli antud perioodi vältel vaja minevaks elektrienergia koguseks jahutusseadmete peale aasta kohta 153 MWh.

$$SCOP = \frac{\text{kütte ja jahutusvõimsus (kW)}}{\text{Kulutatud elektrivõimsus (kW)}} \quad (5.1)$$

Ilma energiavaiadeta tuleks kaugküttevõrgust tarbida 853 MWh kaugkütte soojust ja kaugkütte hinna 47,8 €/MWh korral tähendab see summaarseks küttekulukuks 40 758 eurot. Energeetilise kulutuste ülevaade on näha joonisel Joonis 35. Arvestades eraldiseisvat jahutusseadmete elektrikulu 153 MWh aastas ja elektri hind 91,7 €/MWh on elektri kogukulukuks 14 071 eurot.



Joonis 35 Energiavaiadega ja energiavaiadeta süsteemi peale rahaliste kulutuste võrdlus

4.6.5 Energiavaiasüsteemiga saavutatav sääst ja investeeringu tasuvus

Kui võrrelda mõlemat kütmis- ja jahutusmeetodi säästu nii kütte kui ka elektri suhtes, siis vahed on üpris suured. Ilma energiavaiadeta süsteemi korral on kulu kaugküttele 40 758 eurot ja energiavaiadega süsteemiga on kulu 6175 eurot ehk energiavaiadega saavutatav sääst küttele on 34 583 eurot võrreldes ainult kaugkütet tarviva süsteemiga. See näitab, et soojus ammutamine maapõuest energiavaiade kaudu on rahaliselt palju säästlikum. Ilma energiavaiadeta süsteemi korral oleks elektritarbimisele kuluv summa 14 071 eurot ja energiavaiadega süsteemi korral 31 162 eurot. Energiavaiadega süsteemi elektrienergia kulu on 17 092 eurot suurem. Lõppkokkuvõttes on siiski majanduslikult kasulikum kasutada energiavaiasi, mille puhul summaarne sääst on 17 492 eurot.

Tabelis nr. 4 on kajastatud Woho-2 energiavaiade investeeringu tehtud kulutused.

Tabel 4 Woho-2 energiavaiade investeeringu tehtud kulutused.

Energiavaiade maksumus	
valdkond	hind (lisandub km) €
energiavaiade aktiveerimine hoone all	35 000
maasoojuspumba sõlme maksumus	52 000
soojuspump/külmamasin maksumus	80 000
magistraalitorud, kollektorid, jahutusagens, käivitus	32 000
kokku	199 000

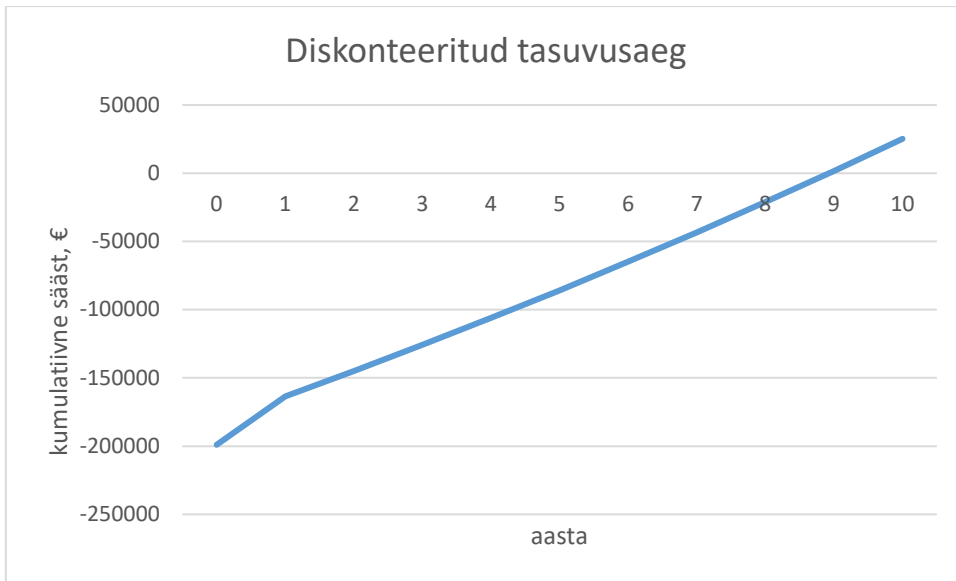
Tabelist tuleb välja, et süsteemi kõige kallima osa on soojuspump/külmamasin maksumus. Kõik kulud kokku on 199 000 eurot. Teada oli ka energiapuuraudude maksumus, milleks oli 30 000 eurot aga antud tabelis seda arvesse ei võetud, kuna need oleksid hoonele rajatud sõltumata, kas neid vaiasi oleks kasutatud energeetilistel eesmärkidel või mitte. Tulemuste põhjal on võimalik analüüsida lihttasuvusaega [31].

$$Tasuvusaeg T (aastat) = \frac{Investeering (\text{€})}{aastas säästetud maksumus (\text{€/a})} \quad (5.2)$$

Kui nüüd võtta arvesse süsteemi investeeringut ja eelpool mainitud saavutatavat säästu, siis tuleb käesoleva süsteemi lihttasuvusajaks 11,4 aastat.

Diskonteeritud tasuvuse hindamisel on eeldatud kaugkütte soojuse ja elektrienergia hinna 3% suurusel aastast kasvu. Kui 2020 aastal on kaugkütte soojuse hind 47,8 €/MWh ja elektrienergia hind 91,7 €/MWh, siis eeldatud hinna suurenemise korral on 2030. aastal ehk 10 aastase perioodi järel vastavad hinnad 64,24 €/MWh kaugkütte soojusele ja 123,24 €/MWh elektri peale. Kui 2020. aastal oli energiavaiade süsteemide summaarne rahaline sääst võrreldes alternatiiviga 17 492 eurot aastas, siis 2030. aastal on rahaline sääst samade energiakoguste juures 23 529 eurot.

Saavutatav sääst kumuleerub aastate jooksul. 2025 aasta lõpuks on energiavaiade süsteem säästnud kokku 113 246 eurot ja 2030 aasta lõpuks on energiavaiade süsteem säästnud kokku 224 233 eurot. Algne investeering oli 199 000 eurot ja süsteem saavutab sellest suurema säästu 9. aastal ehk energiavaiade süsteemi diskonteeritud tasuvusaeg on üheksa aastat (vt. Joonis 36).



Joonis 36 Diskonteeritud tasuvusaeg

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli uurida, mida kujutavad endast energiavaiad, mis tingimustel ja kuidas need toimivad. Töö esimeses pooles anti ülevaade soojuspumpadest ja energiavaiasüsteemidest üldisemalt. Tutvustati soojuspumba ja maakollektorite sortimenti ja tööpõhimõtteid ning millised on maapinnase tingimused vaiade rajamiseks. Lisaks toodi näiteid üldisest teooriast, kuidas toimub energiavaiade paigaldamine, mis tingimustel ja milliseid asjaolusi tuleb arvestada. Samuti analüüsiti, millest tuleb energiavaiade projekteerimisel lähtuda. Uurivas osas vaadeldi energiavaiade kasutamist, paigaldamist ja võimekust Mustamäe tee 3 (Woho-2) ärihoone näitel. Analüüsiti hoone soojus- ja jahutusvajadusi ning kuidas saavad energiavaiad hakkama nende nõudmiste täitmisega. Kokkuvõttes võib öelda, et Eesti Vabariigis energiavaiade paigaldustehnika on sarnane maailmas kasutatavate meetoditega. Võrreldi ka energiavaiasüsteemiga saavutatavat säästu, kui hoone kasutaks soojusenergia saamiseks ainult kaugkütet ja jahutamiseks lokaalseid jahutusseadmeid.

Kokku installeeriti Woho-2 ehitamisel 135 energiavaiat, vastavalt vajadusele kasutati 8 meetri või 16 meetri pikkuseid vaiasid. Energiavaiat installeerimisel kasutati pika spiraaliga paigaldusmeetodit ning betooniarmatuuri paigaldati U- tüüpi PEX materjalist soojusülekandevõrgustik, milles liigub energiakandjana 29%-ne bioetanooli lahus. Viidi läbi geoloogiline uuring. Maapinna omadused olid energiavaiade kasutamiseks üllatavalt soodsad seoses tavapärasest suurema liivasisaldusega ja intensiivsema põhjavee liikuvusega. Siiski peab arvestama asjaoluga, et energiavaiade prioriteetne eesmärk on hoone kandev funktsioon ja sellele järgneb energeetiline pool. Vaiadest edasi soojusülekandevõrgustiku suundusid edasi hoone keldris olevatesse kollektoritesse, ühinesid magistraalvõrkudeks ja sealt järgnevalt hoone soojussõlmes paiknevasse soojuspumpkõlmajama, mis suudab ühtlasi kasutada maast tulevat energiat ühtlasi nii hoone kütmiseks kui ka jahutamiseks.

Maakütet kasutati hoone kütmiseks ja tarbevee soojendamiseks, jahutust suveperioodidel kui ka serveriruumides. Kõige suurem kulutus maaküttesüsteemil kütte ja jahutuse tootmiseks on elekter. Kui kasutada hoone kütmiseks ainult kaugkütet ja jahutamiseks lokaalseid jahutusseadmeid, siis tuleb energiavaiade kasutamine rahaliselt säästlikum. Uuritava energiavaiasüsteemi lihttasuvusaeg on 11 aastat ja diskonteeritud tasuvusaeg 9 aastat.

Üldiselt tasuv energiavaiade kasutus ennast ära ka selles perspektiivis, et tavalise maasoojuspumba puhul on vaja soojuskollektorvõrkude paigutamiseks vaba pinda. Energiavaiade ehitamisel tuleb arvestada, et kui vaia sees oleva

soojusvahetustorustikuga midagi juhtub, siis jääb vaiale alles ainult kandefunktsioon. Energeetiliselt on ta edaspidiselt kasutu. Väga oluline tagada, et maapind ei külmuks. Võib välja tuua, et töös eelpool esitatud energiavaiade rajamise teoreetiline osa kattub põhimõtteliselt küll Woho-2 hoone ehitusel olnud praktikaga, kuid samas oli ka nüansse. See tuleneb sellest, et kuna antud tehnoloogia on alles Eesti Vabariigis uus ja teadmised saadakse teiste Euroopa firmade praktiliste kogemuste pealt.

SUMMARY

The aim of the work was to study what energy piles are, under what conditions and how they work. In the first half of the work, an overview of heat pumps and energy recovery systems in general was given. The assortment and working principles of the heat pump and ground collectors and the ground conditions for the construction of piles were introduced. In addition, examples were given of the general theory of how energy piles are installed, under what conditions and under what circumstances. It was also analyzed what should be followed when designing energy piles. In the research part, the use, installation and capacity of energy piles were examined on the example of the commercial building at Mustamäe tee 3 (Woho-2). The heating and cooling needs of the building and how energy piles can meet these requirements were analyzed. In summary, it can be said that the installation technology of energy piles in the Republic of Estonia is similar to the methods used in the world. The savings achieved with an energy pile system were also compared if the building used only district heating to generate heat and local cooling equipment for cooling.

A total of 135 energy piles were used in the Mustamäe tee 3 commercial building (Woho-2). 8 and 16 meter energy piles were used for the variant. A long spiral installation method was used to install the energy pile, and a U-type PEX heat transfer pipeline was installed in the concrete reinforcement, in which a 29% bioethanol solution moves as an energy carrier. A geological survey was carried out. The properties of the ground were surprisingly favorable for the use of energy piles due to the slightly higher sand content and more intensive groundwater mobility. However, it must be borne in mind that the priority purpose of energy piles is the load-bearing function of the building, followed by the energy side. From the piles, the heat transfer pipes went to the collectors in the basement of the building, merged into main pipes and then to a heat pump-cold plant in the building's heating unit, which can also use ground energy for heating and cooling the building.

The largest expenditure on geothermal heating and cooling production is electricity. If only district heating is used to heat the building and local cooling equipment is used for cooling, the use of energy piles will be more cost-effective. The simple payback period of the tested energy fruit system is 11 years and the discounted payback period is 9 years.

Geothermal heating was used to heat the building and domestic water, cooling in summer periods as well as in server rooms. Most of the heating demand was in the

winter period, while in the summer period the cooling consumption was higher. At the same time, cooling consumption was also required during the winter. The largest expenditure on geothermal heating and cooling production is electricity. If only district heating is used to heat the building and local cooling equipment is used for cooling, the use of energy piles will be more cost-effective. In general, the use of energy piles also pays off in the perspective that a conventional ground source heat pump requires a free space for the heat collector pipes. When building energy piles, it must be taken into account that if something happens to the heat exchange piping inside the pile, then only the load-bearing function of the pile remains and it will be energetically useless in the future. It is certainly very important to ensure that the ground does not freeze. It can be pointed out that the theoretical part of the construction of energy piles presented in the work basically coincides with the practice during the construction of the Woho-2 building, but there were also nuances. This is due to the fact that this technology is so new in the Republic of Estonia and knowledge is gained from the practical experience of other European companies.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. j. kommunikatsiooniministeerium, „Energiamajanduse arengukava aastani 2030,“ Majandus ja kommunikatsiooniministeerium, Tallinn, 2017.
- [2] E. s. Liit, „soojuspumba tööpõhimõte,“ Eesti soojuspumba liit, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.soojuspumbaliit.ee/Soojuspumba-toopohimote>.
- [3] H. Brandtl, „Energy foundations and other thermo-active ground structures,“ Geotechnique, Vienna, 2006.
- [4] F. Loveridge, „The thermal performance of foundation piles used as heat exchangers in ground energy systems,“ 01 06 2012. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.researchgate.net/publication/299464116_The_thermal_performance_of_foundation_piles_used_as_heat_exchangers_in_ground_energy_systems.
- [5] H. Brandtl, „Thermo-Active Ground-Source Structures for Heating and Cooling,“ 18 09 2013. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705813007352>.
- [6] maaküte, „maakyte.info,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.xn--maakte-6ya.info/artiklid/maasoojuspump-cop/>.
- [7] Ruukki, „Energy-efficient buildings,“ 01 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.farto-fin.com/assets/files/ruukki-en-energeticheskie-svai-teplovye-nasosy.pdf>.
- [8] M. B. I. A. Meho Saša Kovačević, „Possibilities of underground engineering,“ 27 12 2012. [Võrgumaterjal]. Available: https://pdfs.semanticscholar.org/ffe4/b8295d59c69b062408315af0855f7f1c8011.pdf?_ga=2.71541467.954164799.1588439679-1616009719.1588439679.
- [9] A. Jõelet, „Soojuspuuraukude mõju keskkonnale,“ Tartu Ülikool, Tallinn, 2007.
- [10] A. Soesoo, „Ülevaade Eesti geotermilisest potentsiaalidest ja ülevaade maasoojusenergiast,“ Tallinna Tehnikaülikooli Geoloogia Instituut, Tallinn, 2012.
- [11] G. V. R. Biagio Morrone, „Energy and economic savings using geothermal heat pumps in different,“ 12 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414007316>.
- [12] G. association, „Thermal Pile design, installation and material standards,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.gshp.org.uk/pdf/GSHPA_Thermal_Pile_Standard.pdf.
- [13] E. Hassani ja N. Gashti, „Thermo Mechanical behaviour of ground source thermo-active structures,“ 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526214061.pdf>.
- [14] F. Loveridge, W. Powrie ja P. Smith, „A review of the design and construction aspects for bored thermal piles,“ ground engineering, 2013.
- [15] A. Parts, „vaivundamendid TTÜ,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://staff.ttu.ee/~aldur/?fbclid=IwAR1fjuSL_J1nfO4D6MaZ-MLyhp8mpGWhAlAtg37_lFeLxWSzJlhA3vPCz2E.
- [16] P. Smith, „Thermal Pile Installation,“ Skanska, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.gshp.org.uk/Cardiff/Peter_Smith.pdf.
- [17] TheEngineeringtoolbox, „TheEngineeringtoolbox,“ 2003. [Võrgumaterjal]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html.

- [18] J. Fadejev, R. Simson, J. Kurnitski ja F. Haghghat, „A review on energy piles design, sizing and modelling,“ sciencedirect, Tallinn, Espoo, Montreal, 2016.
- [19] B. Amatya, K. Soga, P. Bourne-Webb, T. Amis ja L. Laulou, „Thermo-mechanical behaviour of energy piles,“ 25 05 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/geot.10.P.116>.
- [20] T. Gehrke, Interviewee, *Maakütte firma kogemused energiavaiadega*. [Intervjuu]. 15 04 2020.
- [21] R. Malõshev, Interviewee, *Soojuspumpade kasutus Eesti Vabariigis*. [Intervjuu]. 30 04 2020.
- [22] M. Mäekivi, „Mustamäe tee 3 ärihoone kütte projekt,“ Finnlog Infra OÜ, Tallinn, 2017.
- [23] M. Komendant, Interviewee, *Woho-2 hoone haldur*. [Intervjuu]. 23 04 2020.
- [24] M. Sööt, „Projekteeritav ärihoone ja parkimismaja EHITUSGEOLOOGILINE UURING,“ Reaalprojekt, Tallinn, 2015.
- [25] M. Mäekivi, „Mustamäe tee 3 ärihoone jahutusprojekt,“ Finnlog Infra OÜ, Tallinn, 2017.
- [26] H. Beljäev, „Termovaiade aktiveerimine ja maasoojuse jaotus,“ Maaküte OÜ, Tallinn, 2016.
- [27] J. Nõupuu, Interviewee, *Energiavaiade paigaldus Woho-2 hoones*. [Intervjuu]. 30 04 2020.
- [28] Utilitas, „Utilitas soojuse hinnad,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.utilitas.ee/soojuse_hinnad/. [Kasutatud 05 09 2020].
- [29] Eurostat, „Eurostat elektrihindade statistika,“ 2019. [Võrgumaterjal]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics%2Fet&fbclid=IwAR0ZQNRBSDUvHzG48jxOgFsxCuoZK04xCnKzvjQ8bAhA53ArQmDAc1p17oU. [Kasutatud 05 09 2020].
- [30] energy.gov.au, „Factsheet Chiller energy,“ HVAC Hess, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.energy.gov.au/sites/default/files/hvac-factsheet-chiller-efficiency.pdf?fbclid=IwAR1XPSrr6xQBWiB66nxyjlcRCtpjL2NQG5PkJJ4IWFo0-IahvjapA1_Q5R0. [Kasutatud 09 04 2020].
- [31] TTU, „Tasuvusarvutused energiatõhususe,“ [Võrgumaterjal]. Available: [KODUL.521810.05.2016_20_41_09_09 loeng tasuvusarvutused](https://www.ttu.ee/kodul/521810.05.2016_20_41_09_09_loeng_tasuvusarvutused). [Kasutatud 30 04 2020].