

Opinnäytetyö (AMK)
Insinööri LVI-tekniikka
2020

Nikolas Salomaa

MATALALÄMPÖISEN LÄMPÖENERGIAN KAUSIVARASTOINTI SAVIMAAHAN

– malli kustannusten optimointiin

Tekijä Nikolas Salomaa

MATALALÄMPÖISEN LÄMPÖENERGIAN KAUSIVARASTOINTI SAVIMAAHAN

- Malli kustannusten optimointiin

Suomessa on tarjolla paljon ilmaista lämpöä kesällä. Vastaavasti talvella tarvitaan paljon lämpöä mutta edullista lämpöä ei ole tarjolla. Varastoimalla kesän edullista energiaa talveksi, myös talvella on mahdollista hyödyntää edullista lämpöä. Lämmön varastointi vaatii niin ison varaston että sen rakentaminen on kallista. Edullisin tapa rakentaa iso lämpövarasto, on hyödyntää rakennuksen yhteydessä oleva maaperä lämpövarastona. Tämä on yleisesti tiedossa mutta savimaata lämpövarastona ei kuitenkaan ole isossa mittakaavassa hyödynnetty. Yksi merkittävä syy on että rakentamisen tarkat kustannukset eivät ole olleet tiedossa. Toinen merkittävä syy on että lämpövaraston vaikutus rakennuksen energiankulutukseen on ollut kallista selvittää. Tilanteessa jossa ei tiedetä investointikustannuksia eikä investoinnin tuottoa on vaikeata tehdä päätöksiä. Aihealue on kuitenkin taloudellisesti kiinnostava koska suuri osa Suomeen rakennettavista uusista rakennuksista rakennetaan savimaalle. Tämä opinnäytetyö käsittelee lämpövarastoja savimaassa, savimaan geoteknisiä sekä geotermisiä ominaisuuksia ja savimaahan rakennettavien lämpövarastojen käyttö- sekä rakennuskustannuksia.

Opinnäytetyössä käsitellään erilaisia tapoja rakentaa lämpövarasto savimaahan. Savimaahan rakennettavan lämpövaraston suunnittelussa ja mitoituksessa tarvittavat tiedot käsitellään.

Opinnäytetyön tuloksena rakennettiin laskentamalli jonka avulla minkä tahansa savimaalle rakennettavan rakennuksen lämpövarasto voidaan mitoittaa ja suunnitella. Lopputuloksena syntynyt dynaaminen energialaskenta maaperän lämpötiloista, rakennuksen lämpö- ja jäähdystarpeen funktiona on excel-tiedosto joka on rakennettu niin että se voidaan liittää osaksi energiasimulointi- ja optimointiohjelmistoa. Ohjelma laskee myös järjestelmän rakentamiskustannukset.

ASIASANAT:

lämpöenergian kausivarastointi, energiapaalu, lämpövarasto

BACHELOR'S / MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Engineering, HVAC

Completion year of the thesis 2020 | 54 pages, number of pages in appendices

Nikolas Salomaa

LOW TEMPERATURE SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE IN CLAY GROUND

- a model for optimizing cost

There is a lot of free heating energy available in the nordic summer. In the winter a lot of heating energy is needed but no free energy is available. Storing free heating energy in the summer, free heating energy is available also in the winter. Building a heating energy storage is expensive because of the large size. The most cost-efficient way to build a seasonal thermal energy storage is to utilize the ground underneath the building. This is a fact that the construction industry knows, however the ground has not been utilized as energy storage in large scale. One major reason for this is that the exact investment cost has not been available. The second major reason is that the impact on the energy consumption of the building have been too complicated and therefore too expensive to find out. In a situation where investment cost and return on investment are not available, decision-making is easy; let's not do this. The subject is however interesting because a great share of new buildings in cold climate are built on soft ground. This thesis is about seasonal thermal energy storages in clay ground, the geotechnical properties of clay and the investment and life cycle costs of seasonal thermal energy storages built in clay ground.

Different ways to build a seasonal thermal energy storage in clay are covered. The technical details needed in designing a seasonal thermal energy storage in clay are also covered.

The thesis created a model for designing and optimizing the construction and life cycle costs of a seasonal thermal energy storage built for any building. The dynamic energy calculation tool simulates the temperatures of the clay at any given moment as a function of the heating- and cooling demand of the building, is an excel-file that can be connected to a energy simulation- and optimization software.

KEYWORDS:

Seasonal thermal energy storage, energy pile, clay

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 LÄHES NOLLAENERGIATALOT	3
2.1 Passiivitalot	4
2.2 Nollaenergiatalot	4
3 RAKENNUSTEN LÄMMITYSJÄRJESTELMIEN LÄMMÖNLÄHTEET	6
3.1 Ensimmäisen sukupolven lämmönlähteet	6
3.2 Toisen sukupolven lämmönlähteet	7
3.2.1 Kylmäprosessi	7
3.2.2 Ilmalämpöpumppu	8
3.2.3 Poistoilmalämpöpumppu	9
3.2.4 Ilma-vesilämpöpumppu	11
3.2.5 Maalämpöpumppu	12
3.3 Kolmannen sukupolven lämmönlähteet	16
3.3.1 Aurinkolämpöjärjestelmät	16
3.3.2 Kausilämpövarastot	17
4 LÄMMÖN KAUSIVARASTOINTI MAAPERÄÄN	19
4.1 Lämpövarastotyypit savimaassa	20
4.1.1 Maapiiri savessa	20
4.1.2 Energiapaalut	21
4.1.3 Teräsyöntipaalut	22
4.1.4 Teräsbetonipaalu	24
4.1.5 Ruuvipaalu	25
4.1.6 Porapaalu	26
5 SAVIMAA	27
5.1 Saven termiset ominaisuudet	27
5.2 Pohjavesivirtaamat	31
5.3 Ääriämpötilojen vaikutus saven ominaisuuksiin	31
6 LÄMPÖVARASTON MUOTOILU	35
6.1 Lämpövaraston geometrinen malli	35
6.2 Kollektoreiden etäisyys toisistaan	36

6.3 Lämpövaraston etäisyys maanpinnasta	36
6.4 Lämpövaraston nestevirtaamat	36
6.5 Tavallinen U-putki	37
6.6 Kierteitetty putki	37
6.7 Spacer-putki	38
6.8 Muut putket	38
7 LÄMPÖVARASTON MITOITUS	39
7.1 Konvektio	39
7.2 Epästationääri lämmönsiirto	41
7.3 Tehomitoitus	46
7.4 Vuosikulutus pohjainen mitoitus	47
8 LÄMPÖVARASTON RAKENNUSKUSTANNUKSET	48
8.1 Lämmön käyttökohteen simulointi ja optimointi	48
8.1.1 Monitavoiteoptimointi	49
8.1.2 Sijoitetun pääoman tuotto	49
8.1.3 Maanalaisen pysäköintilaitoksen monitavoiteoptimointi	51
8.2 Kollektoriputket	54
8.3 Paalujen optimointi	55
8.4 Rakennuttamistekniset kustannukset	56
9 LÄMMÖN KAUSIVARASTOINNIN TULEVAISUUS	58
10 LÄHTEET	59

KUVALUETTELO

Kuva 1 Finzeb-hankkeen ehdotus lähes nollaenergiatalon e-luvuksi asuinkerrostaloissa	3
Kuva 2 kylmäprosessi. Dimplex 2020	8
Kuva 3 Ilma-vesilämpöpumpun lämmöntuotto eri ulkolämpötiloilla (Kaukora 2020)	12
Kuva 4 Tekninen kuvaus DHP-M-XL maalämpöpumpun menoveden lämpötila eri keruupiirien lämpötiloilla (Danfoss 2018)	13
Kuva 5 Tekninen kuvaus DHP-M-XL, lämmitysteho eri keruupiirien lämpötiloilla (Danfoss 2018)	14
Kuva 6 Kiinteistölämpöpumppu, lämmöntuotto eri menoveden lämpötiloilla ja keruupiirin lämpötiloilla (Alpha Innotec 2018)	15
Kuva 7 Aurinkolämpöjärjestelmän toimintaperiaate (Wagner Solar GmbH 2012)	17
Kuva 8 Turun toriparkki lämpövaraston toimintaperiaate (nollaE 2019)	20
Kuva 9 Maapiiri savessa (Bandera County Courier 2020)	21

Kuva 10 Teräsputkipaalu energiaputkistolla (Uponor 2012)	23
Kuva 11 Teräsbetonipaalu energiapaaluna (Brandt)	24
Kuva 12 Ruuvipaalu (Paalupiste).....	25
Kuva 13 Porapaalu (SSAB 2019).....	26
Kuva 14 Saven vedenläpäisevyys (Ronkainen 2012)	31
Kuva 15 Erityyppisten kollektoriputkien lämmöntuottoja eri virtaamilla (Acuna et al. 2008)	37
Kuva 16 Kausilämpövaraston eri vyöhykkeiden lämpötilat (k) tuntitasolla vähän yli vuoden ajalta. Kaavio opinnäytetyön osana tehdystä Excel-työkalusta	43
Kuva 17 Saven lämpötilakehitys 1 metrin etäisyydellä 1,5 vuoden ajalta pisteessä 5 metrin syvyydessä. Opinnäytetyön osana tehdyn excelin kaavio.	45
Kuva 18 Saven lämpötila 15 metrin syvyydessä, pisteessä 1,5 metrin päässä energiapaalusta. Opinnäytetyön osana tehdyn excelin kaavio.	46
Kuva 19: Kokonaiskustannukset netto nykyarvoon diskontattuna, nollaE-ohjelmisto 2020	50
Kuva 20: Vuosittaiset kokonaiskustannukset netto nykyarvoon diskontattuna, nollaE-ohjelmisto 2020	51
Kuva 21: Maanalaisen pysäköintilaitoksen lämmitystehon tarve mitoituslämpötilassa, nollaE-ohjelmisto 2020.....	52
Kuva 22: Maanalaisen pysäköintilaitoksen vuosittaiset lämpöhäviöt, nollaE-ohjelmisto 2020	53

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1 ilman tiheys eri lämpötiloissa	10
Taulukko 2 Maalajien luokittelu ja raekoko (MaaRYL 2010).....	27
Taulukko 3 Maalajien termiset ominaisuudet (Alanen et al. 2003).....	28

KAVALUETTELO

Kaava 1: Ilman lämmittämiseen tarvittava energia	10
Kaava 2: Saven vesipitoisuus (Ronkainen 2012)	29
Kaava 3: Saven lämmönjohtavuus (Johansen 1975)	30
Kaava 4: Saven kyllästymisaste (saturaatio) (Johansen 1975)	30
Kaava 5: Saven kuivatiheys (Ronkainen 2012).....	30
Kaava 6: Saven huokosylipaine (Bergdahl et al 1997).	32
Kaava 7: Kokonaispainuma (Bergdahl et al 1997)	33
Kaava 8: Maan lämpötila lämpövaraston ulkopuolella (Bergdahl et al. 1997).....	35
Kaava 9: Lieriön seinämän läpi kulkeva lämpöteho. (Kotiaho et al. 2014).....	39
Kaava 10: Reynoldsin luku (Kotiaho et al. 2014).....	40
Kaava 11: Nusseltin luku (Hokajärvi 1987).....	40
Kaava 12: Prandtlin luku (Hokajärvi 1987).	41
Kaava 13: Fourierin yhtälö (Lienhard et al. 2015).....	41
Kaava 14: Epästationääri lämmönsiirto (Lienhard et al. 2015).	44
Kaava 15 Laskentasolun lämpötilanmuutos aika-askeleessa (Lienhard et al. 2015) ...	44

Kaava 16 Seuraavan laskentasolun lämmönsiirto aika-askeleessa (Lienhard et al. 2015)	46
--	----

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö käsittelee matalalämpöisen lämpöenergian kausivarastointia savimaahan. Matalalämpöinen lämpöenergia on lämpötilaltaan 35 asteista tai alle. Kausivarastointi on lämpöenergiaa joka kerätään kesällä, varastoidaan maahan ja käytetään talvella.

Rakennusten lämmitys aiheuttaa noin 30 % Suomen kokonaiskasvihuonekaasupäästöistä (Mattinen, Heljo, Savolahti:2016). Suomen hallitus on asettanut tavoitteeksi hiilineutraalin suomen vuonna 2035 (Valtioneuvosto 2019). Toinen mitattavissa oleva tavoite on että vuoteen 2050 mennessä suomen täytyy leikata hiilidioksidipäästöjään 85-90%:lla vuoden 1990 tasoon verrattuna (Eurooppa-neuvosto 2014). Hiilidioksidipäästöleikkaustavoitteisiin pääsemistä rakennusten päästöjen osalta helpottaisi jos uudet rakennukset jotka rakennetaan suomeen olisivat nollaenergiataloja.

Uusien rakennusten eristeiden paksuus on jo sellaisella tasolla että eristepaksuuksien kasvattaminen voisi vaarantaa rakennusfysikaalisen toimivuuden. Lisäksi eristeiden lisäämisen taloudellisen kannattavuuden raja on voimassa oleiven rakennusmääräysten mukaisella tasolla (Lylykangas 2016).

Osa uusista rakennuksista rakennetaan savimaalle. Rakennukset, joiden lämmitysjärjestelmä hyödyntää matalia lämpötiloja ja jotka rakennetaan savimaalle, on mahdollista osittain tai kokonaan lämmittää saveen rakennetulla lämpöenergian kausivarastolla. Uuden rakennuksen alla tai läheisyydessä olevan savimaan hyödyntäminen kausilämpövarastona voi, rakennuksen sekä maaperän teknisistä yksityiskohdista riippuen, olla kustannustehokasta (Gabrielsson et al. 1997, Reuss et al. 1997). Rakennus jonka tarvitsema lämmitysenergia kerätään päästöttömistä lämmönlähteistä kesällä ja jonka lämmitys talvella toteutetaan hyödyntäen kesällä kerättyä päästöttömää lämpöä, on lämmityksen osalta päästötön.

Savimaahan rakennettavia lämpöenergian kausivarastoja rakennetaan vähän siitä huolimatta että ne tutkimuksen perusteella ovat kustannustehokas tapa varastoida lämpöä. Syynä on rakennuskustannusten sekä tuottolaskelmien puuttuminen päätöksenteosta (Brandt). Rakennusten energiankulutukseen liittyvät päätökset rakennushankkeissa tehdään yleisesti nyrkkisääntöihin perustuvilla takaisinmaksulaskelmilla. Suunnittelukouksissa muutamassa minuutissa tehtävät päätökset eivät perustu kohdekohtaisiin

taloudellisiin laskelmiin vaan ylimalkaisiin arvauksiin sekä kohteen energiankulutuksesta että eri energiaratkaisujen rakennus- sekä käyttökustannuksista (Brandt).

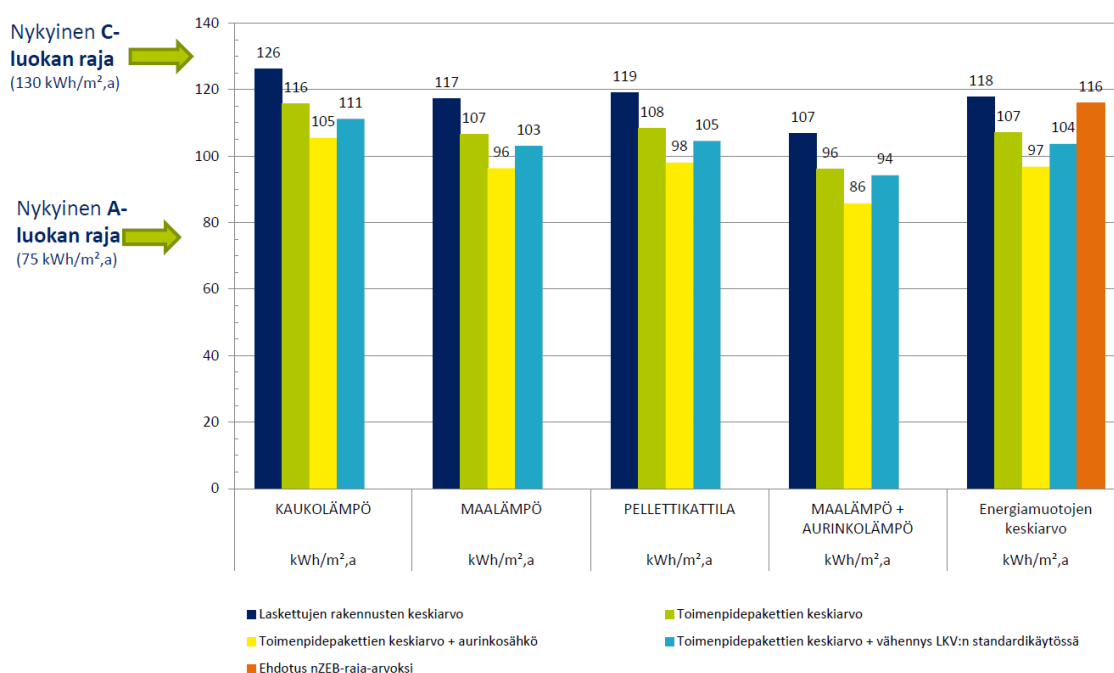
Tämän opinnäytetyön tavoite on rakentaa excel-taulukko joka laskee rakennuksen tuntikohtaisen lämpö- ja jäähdytysenergiankulutuksen perusteella maaperän tuntikohtaisen lämpötilan sekä laskee näiden perusteella lähtötiedot kustannusoptimaalisen saven kausilämpövaraston suunnitteluun. Excel-taulukko esittää savimaahan rakennettavan lämpöenergian kausivaraston investointikustannukset sekä tuoton rakennuksessa jota se palvelee. Työkalu ei ole käyttöliittymältään sellainen että sitä pystyisi helposti käyttämään yksinään vaan se rakennetaan muotoon josta se on helposti integroitavissa osaksi laajempaa simulointi- ja optimointiohjelmistoa.

Simulointi- ja optimointiohjelmistoon integroituna työkalu mahdollistaa minkä tahansa rakennuksen savimaahan rakennetun kausilämpövaraston investointi- sekä tuottolaskelmien saamisen päätöksenteon tueksi 30 sekunnissa. Tämä mahdollistaa saveen rakennettujen kausilämpövarastojen yleistymisen rakennusalan nykyistä suunnitteluprosessia muuttamatta.

2 LÄHES NOLLAENERGIATALOT

EU-direktiivi määrää että kaikki EU:n alueella 31.12.2020 jälkeen rakennettavat talot tulee olla ”lähes nollaenergiataloja”. Suomen kansallinen lainsäädäntö asetti Rakennustieteellisen Finzeb-hankkeen ansiosta riman alas vedoten siihen että Suomessa on niin kylmä että Suomalaisten rakennusten ei voida velvoittaa niin hyvään energiatehokkuuteen kun muualla EU:ssa (Loisa, Reinikainen, Tyni:2015). Alun perin tavoitteena ollut ”nollaenergiarakentamispakko” väistettiin argumentoimalla että rakentaminen tulisi liian kalliiksi. Väite kalliista rakentamisesta perusteltiin insinööritoimistoilta ostetuilla selvityksillä. Selvityksissä energiatehokkuuden parantamisesta esiteltiin esimerkkejä jotka ovat kalliita toteuttaa ja tuottavat ainoastaan marginaalisen energiansäästön. Näiden esimerkkien avulla saatiin luotua lukijalle mielikuva siitä että kaikki energiatehokkuuteen tähtäävät toimenpiteet ovat taloudellisesti kannattamattomia. Finzeb-raportin lopputulema on että rakennusala saa edelleen tuottaa energiaa tarpeettomasti tuhlaavia rakennuksia jotka ovat halpoja rakentaa mutta kalliita käyttää.

ASUINKERROSTALOT: FinZEB-E-luku



Kuva 1 Finzeb-hankkeen ehdotus lähes nollaenergiatalon e-luvuksi asuinkerrostaloissa

Suomen rakennuskannan uusiutuessa 1-2 % vuosivauhtia marginaalisemmat energiansäästötavoitteet uusissa rakennuksissa eivät vaikuta kokonaisenergiankulutukseen.

2.1 Passiivitalot

Passiivitalo on Saksalaisen Passivhaus-standardin mukaisesti rakennus joka tarvitsee lämmittämiseen alle 15 kWh/m² vuodessa. Tämän lisäksi standardi tarkoittaa että rakennuksen koko ostoenergia saa olla enintään 60 kWh/m², että rakennuksen ilmanvuo-
toluku n50 pitää olla alle 0,6 ja että ilmanvaihdon lämmön talteenoton hyötysuhde ei saa olla alle 75%. Asumismukavuudesta mainitaan että asuintilojen lämpötila ei missään olo-
suhteissa saa ylittää 25 astetta (Passivhaus Institut).

Passiivitalo on saanut nimensä passiivisesta lämmittämisestä. Passiivinen lämmittämi-
nen tarkoittaa lämpöenergiaa joka syntyy rakennuksen normaalin käytön sivutuotteena. Passiivisia lämmönlähteitä ovat lämpökuormat esimerkiksi ihmisistä, auringosta ja ko-
dinkoneista. Monessa osassa Eurooppaa tällaiset lämmönlähteet riittävät lämmittämään rakennuksen myös vuoden kylmimpään aikaan. Suomessa tarvitaan kuitenkin lisäksi joku ulkoinen lämmönlähde jolla rakennus lämmitetään (Passivhaus Institut).

Suomessa on alle kymmenen Passivhaus-instituutin standardin mukaista ja sertifioitua passiivitaloa. Suomen ensimmäinen sertifioitu passiivitalo sijaitsee Littoisissa, Kaari-
nassa ja on rakennettu vuonna 2008. Rakennuksen koko toteutunut ostoenergian kulu-
tus on ensimmäisen viiden vuoden käytön aikana ollut alle 60 kWh/m²/a (Hänninen 2014).

2.2 Nollaenergiatalot

Nollaenergiatalon määritelmä ei ole yhtä standardisoitu kun passiivitalojen. Nollaener-
giataloille on maailmalla useita kymmeniä määritelmiä. Tästä syystä johtuen monenlaisia Suomeen rakennettuja rakennuksia on kutsuttu nollaenergiataloiksi. Suurinta osaa yh-
distää se että ne tuottavat kesällä enemmän energiaa kun tarvitsevat ja vastaavasti tal-
vella ostavat niin paljon sähköä että niiden talven sähkönkulutus vastaa mitä tahansa tavanomaista rakennusta.

Motiva kutsuu nollaenergiataloksi taloa, jossa tuotetaan vuositasona saman verran ener-
giaa kuin se käyttää huonetilojen ja käyttöveden lämmittämiseen sekä valaistukseen ja
laitteisiin (Motiva 2014). EU:n määritelmä lähes nollaenergiataloille on rakennus joka ku-
luttaa erittäin vähän ja se vähä energia minkä rakennus kuluttaa on uusiutuvaa energiaa
(ec.europa.eu). Suurin ero määritelmien välillä liittyy siihen vaaditaanko rakennukselta

kaikissa olosuhteissa nolla uusiutumaton energiankulutusta vai tyydytäänkö siihen että rakennus kuluttaa ajoittain paljon ja hyvittää sen myöhemmin tuottamallaan ylimääräisellä uusiutuvalla energialla (VTT). Nollaenergiatalolle jonka kulutus kaikissa olosuhteissa on nolla uusiutumaton energiaa on olemassa määritelmä. Se on passiivitalon määritelmän täyttävä, erittäin energiatehokas rakennus, jonka lämmitys ja lämmin käyttövesi toteutetaan paikallisesti tuotetulla uusiutuvalla energialla.

Suomen nollaenergiataloista Littoisten passiivitalo on lähimpänä todellista nollaenergiataloa sikäli että sen ostoenergiankulutus on kaikista Suomen omakotitaloista kaikista pienin. Lisäksi sähkönkulutus on vuoden jokaisena kuukautena saman suuruinen. Tämä johtuu siitä että Littoisten passiivitalon lämmönlähteet ovat sellaisia joiden sähkönkulutus on ainoastaan alle 1% lämmönlähteiden tuottamasta lämpöenergiasta. Tyypillinen tällainen lämmönlähde on aurinkokeräinjärjestelmä joka Littoisten passiivitalossa tuottaa 4.800 kWh lämpöenergiaa. Tästä ainoastaan 40 kWh kuluu lämpöenergian tuottamiseen. Littoisten passiivitalossa on lukuisia muita vastaavia lämmönlähteitä jotka yhdessä mahdollistavat talon lämpiämisen alle 1% ostoenergialla tuotetusta lämpöenergiasta (Hänninen 2014).

Littoisten passiivitalon olemattoman pieni ostoenergian kulutus olisi mahdollista saavuttaa lähes kaikissa savimaalle rakennettavissa uusissa rakennuksissa termisen energian kausivarastoa hyödyntämällä. Termisen energian kausivarastoon ladataan lämpöä silloin kun ilmaista lämpöä on tarjolla edullisesti ja hyödynnetään varastoitua lämpöä silloin kun sitä tarvitaan. Jos Suomessa oikeasti tahdotaan nollaenergiatalojen yleistyvän isossa mittakaavassa niin lämpövarastot ovat yksi taloudellisesti kannattava tapa jolla tämä on mahdollista.

3 RAKENNUSTEN LÄMMITYSJÄRJESTELMIEN LÄMMÖNLÄHTEET

Lämmönlähde tuottaa rakennuksen tarvitseman lämmön (ympäristöosaava 2020). Lämmönlähteet voi jakaa ryhmiin niiden ostoenergian kulutuksen perusteella suhteessa tuotettuun lämpöenergiaan. Ryhmittelyn pohjana on lämmönlähteiden energiankulutus niin että lämmönlähteet joiden energiankulutus suhteessa tuotettuun lämpöenergiaan on hyvin lähellä toisiaan kuuluvat samaan ryhmään. Lisäksi ne voi ryhmitellä lämmönlähteiden kronologisen kehityksen perusteella koska lämmönlähteiden energiankulutus suhteessa tuotettuun lämpöenergiaan on saman aikakauden lämmönlähteissä hyvin lähellä toisiaan. Energiankulutuksen mittarina tässä jaottelussa käytetään selkeyden vuoksi lämpöpumpuissa yleisesti käytössä olevaa COP-lukua (Coefficient of performance) joka kertoo kuinka monta kW lämpöenergiaa saadaan kun käytetään yksi kW polttoainetta tai sähköä (Wikipedia 2020).

3.1 Ensimmäisen sukupolven lämmönlähteet

Ensimmäisen sukupolven lämmönlähteet ovat lämmönlähteitä joissa käyttämällä yhden kW polttoainetta, saadaan hieman alle yksi kW lämpöenergiaa. Täten COP-luku on hieman alle 1. Tällaisia lämmönlähteitä ovat esimerkiksi sähkölämmitys jossa yhdellä kW sähköenergiaa saadaan yksi kW lämmitysenergiaa. Suomessa sähkölämmitystä on käytössä lähinnä pientaloissa. Toinen Suomessa yleinen ensimmäisen sukupolven lämmönlähde on öljylämmitys jossa yhdellä kW:lla öljyä (0,1 litraa) saadaan noin 0,95 kW lämpöenergiaa. Öljylämmitystä ei ole pelkästään pientaloissa vaan sitä löytyy kaikenlaisista käytössä olevista rakennuksista. Isoissa rakennuksissa kuten kerrostaloissa ja palvelurakennuksissa yleisin lämmönlähde on kaukolämpö. Kun kaukolämpöverkosta otetaan yksi kW energiaa, rakennus lämpiää hieman alle yhdellä kW:lla lämpöenergiaa. Kaukolämmön tuottamiseen käytetään suurimmaksi osaksi kivihiltä jota polttamalla yksi kW kivihiltä muuttuu yhdeksi kW:ksi lämpöenergiaa. Kaukolämpölaitosten energiatehokkuus ei muutu siitä että kivihillen polttaminen vaihdetaan ”uusiutuvaan energiaan” vaan aluksi se jopa kasvattaa hiilidioksidipäästöjä (Eronen et al 2019). Kaikki polttaminen on ensimmäisen sukupolven lämmitystä ja se ei ole kestävää (Eronen et al 2019). Jotkut kaukolämpöyhtiöt tuottavat pienen murto-osan lämmöntuotannostaan muulla kun polttamalla.

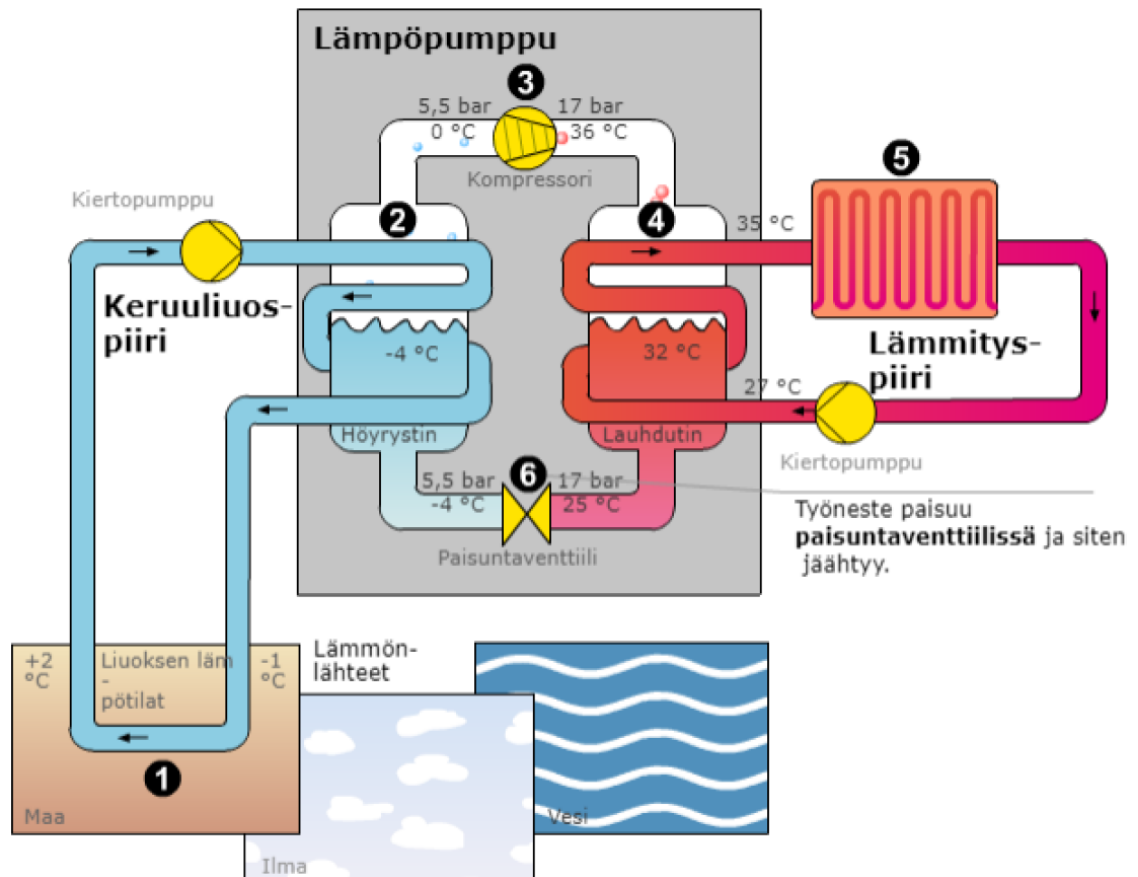
Kaikkia ensimmäisen sukupolven lämmönlähteitä yhdistää se että polttoaineesta ei missään olosuhteissa saada enempää kun sen lämpöarvon verran lämpöenergiaa. Joissakin tapauksissa, kuten vanhoissa öljy- tai puukattiloissa, COP-luku jää huonosta polton hyötysuhteesta johtuen jopa reilusti alle yhden (Motiva 2020).

3.2 Toisen sukupolven lämmönlähteet

1980-luvulla Suomessa otettiin käyttöön ensimmäiset lämpöpumput. Suomessa on kaiken kaikkiaan jo 900.000 lämpöpumppua (Sulpu 2020). Lämpöpumpuilla 1 kW sähköenergiaa tuottaa 1,5-6 kW lämpöenergiaa. Lämpöpumppujen toimintaperiaate perustuu kylmäprosessiin.

3.2.1 Kylmäprosessi

Lämmönlähteestä (ilma, vesi tai maahan upotettu tai porattu putkisto) kerätään ilmaa tai nestettä. Lämmönlähteen lämpö siirretään lämmönvaihtimella joko väliaineeseen (maalämpöpumpun etanoli) tai suoraan kylmäaineeseen. Tämän jälkeen kylmäaine etenee kompressoriin jossa kylmäaineen painetta nostetaan puristamalla se pienempään tilaan (höyrystys). Paineen nostamisen johdosta kylmäaine muuttuu nestemäisestä kaasuksi. Faasimuutoksessa kylmäaineen lämpötila nousee. Kylmäaine luovuttaa lämmönvaihtimella lämpönsä (lauhdutus) joko veteen (patteri- tai lattialämmitys) tai ilmaan (ilmalämpöpumput tai suoraan höyrysteiset ilmanvaihtopatterit). Kylmäaineen luovutettua lämpönsä, se jatkaa matkaansa paisuntaventtiilille jossa paine poistetaan ja kylmäaine muuttuu höyrystä takaisin nestemäiseksi. Luovutettuaan lämpönsä se jäähtyy paineen poistuessa kylmemmäksi kuin lämmönlähde ja voi taas kerätä itseensä lämpöä lämmönlähteestä. Tämän prosessin avulla saadaan kylmää jäähdytettyä kylmemmäksi (lämmönlähde) ja lämmintä lämmitettyä lämpöisemmäksi (lämmitys) niin että tuotettu lämpöenergia on enemmän kun käytetty energia (kompressorin, pumppujen ja puhaltimien yhteensä kuluttama sähkö).



Kuva 2 kylmäprosessi. Dimplex 2020

3.2.2 Ilmalämpöpumppu

Kaikista yleisin lämpöpumpputyyppejä Suomessa on ilmalämpöpumppu, joita löytyy pientaloihin asennettuna noin 800.000 kappaletta (Sulpu 2019). Ilmalämpöpumppu on split-järjestelmä joka kerää ulkoilmasta lämpöä viilentämällä ulkoilmaa ulkoyksikössä kiertävällä kylmäaineella. Sama kylmäaine lämmittää sisäyksikön kautta sisäilmaa. Järjestelmää kutsutaan split-järjestelmäksi koska sisä- ja ulkoilma eivät vaihdu keskenään vaan ainoastaan kylmäaine kulkee ulkoseinän läpi sisältä ulos ja ulkoa takaisin sisään. Ilmalämpöpumppu on edullinen ja usein taloudellisesti kannattava energiatehokkuustoimenpide pientalossa joka ennen sitä on lämmitetty ensimmäisen sukupolven lämmönlähteillä (Motiva 2020). Yleisesti luullaan että ilmalämpöpumppu esimerkiksi suoralla sähköllä lämmitettävissä rakennuksissa on ainoa taloudellisesti kannattava energiatehokkuustoimenpide. Ilmalämpöpumpun asentaminen on kevyt toimenpide ja ostohinnaltaan halpa.

Ilmalämpöpumppu ei kuitenkaan nosta rakennuksen arvoa eikä toimenpiteen mahdollistama energiansäästö ole kovin merkittävä muuta kuin erikoistapauksissa (Motiva 2016).

3.2.3 Poistoilmalämpöpumppu

Poistoilmalämpöpumppu on seuraavaksi yleisin lämmitysjärjestelmätyyppi pientaloissa. Poistoilmalämpöpumppu kerää lämpönsä ilmanvaihdon poistoilmasta. Poistoilmalämpöpumppu ei ole ainoastaan lämmönlähde vaan toteuttaa lisäksi kohteen ilmanvaihdon ja lämmönjaon. Poistoilmalämpöpumpun monista toiminnoista sekä sen vähäisestä tilantarpeesta johtuen siitä on muodostunut investointikustannuksiltaan halvin lämmitys-, ilmanvaihto- sekä lämmönjakojärjestelmä (Motiva 2020). Uudet pientalot voivat joissakin tapauksissa olla niin energiatehokkaita että poistoilmalämpöpumppu pystyy tuottamaan ison osan talon vuotuisesta lämpöenergian tarpeesta. Poistoilmalämpöpumpun heikoin osa-alue on lämmön riittävyys mitoitusolosuhteissa. Poistoilman (lämmönlähde) määrä on kaikissa rakennuksissa niin pieni suhteessa lämmöntarpeeseen ettei siitä ole mahdollista saada niin paljon lämpöä että lämpö riittäisi pitämään mitään taloa lämpimänä mitoitusolosuhteissa. Lisäksi poistoilmalämpöpumpuista iso osa on sellaisia että ne eivät mitoitusolosuhteissa lämmitä taloa tai lämmintä käyttöväettä ollenkaan sillä pienen kompressorin kaikki teho kuluu pelkästään ulkoilman lämmittämiseen. Tällainen poistoilmalämpöpumppu on esimerkiksi yksi Suomen myydyimmistä poistoilmalämpöpumpuista, Nibe F470. Kompressorin tuottama 2,18 kW lämpöteho hupenee kokonaisuudessaan siihen että ulkoilma lämmitetään -26 asteisesta +21-asteiseksi. Ilman lämmittämiseen tarvittava energia lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$\dot{E}_{ilma} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_1 - T_5)$$

$$T_1 = \text{Ulkoilman lämpötila (}^\circ\text{C)}$$

$$T_5 = \text{Tuloilman lämpötila (}^\circ\text{C)}$$

$$c_p = \text{Ilman ominaislämpökapasiteetti } \left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$$

$$\rho = \text{Tiheys } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$\dot{V} = \text{Ilman tilavuusvirta} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

Kaava 1: Ilman lämmittämiseen tarvittava energia

Ilman tilavuusvirta Nibe F470 poistoilmalämpöpumpulla on 200 m³/h, joka on yhtä kuin 55,5 litraa sekunnissa. Taulukosta 1 näemme että ilman tiheys 0 asteen lämpötilassa 1,29 kg/m³. Ilman massavirta on siten 0,072 kg/s.

Taulukko 1 ilman tiheys eri lämpötiloissa

Lämpötila	Tiheys	Viskositeetti	Kinemaattinen viskositeetti
T [°C]	ρ [kg/m ³]	μ [Ns/m ²] x10 ⁻⁵	ν [m ² /s] x10 ⁻⁵
-40	1.52	1.51	0.99
0	1.29	1.71	1.33
20	1.2	1.8	1.5
50	1.09	1.95	1.79
100	0.946	2.17	2.3
150	0.835	2.38	2.85
200	0.746	2.57	3.45
250	0.675	2.75	4.08
300	0.616	2.93	4.75
400	0.525	3.25	6.2
500	0.457	3.55	7.77

Ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa on 1 kJ/(K·kg).

Lämmitettävän ilman lämpötilaero -26 asteesta +21 asteeseen on 47 astetta.

Pelkän ilman lämmittämiseen tarvitaan siten Etelä-Suomen mitoitusolosuhteissa lämpötehoa seuraavasti:

$$0,072 \text{ kg/s} * 1 \text{ kJ/(k*kg)} * 47 \text{ kelviniä} = 3.384 \text{ kW}$$

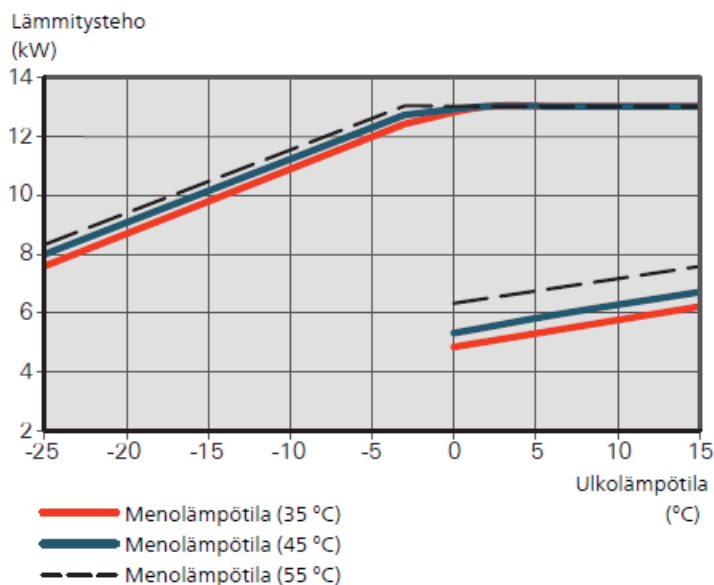
Kun Nibe F470 poistoilmalämpöpumpun kompressori pystyy poistoilmasta ottamallaan lämmöllä tuottamaan 2,18 kW, se tarkoittaa että tällä lämpöpumpulla ei lämmitetä lämmintä käyttövetä, ei lattialämmitystä eikä edes kokonaan sitä ilmaa joka

poistoilmalämpöpumpun läpi puhalletaan. Pelkästään ilman lämmittämiseen tarvitaan sähkövastukselta avuksi 1,2 kW.

Talon johtumislämpöhäviöt ja lämmin käyttövesi täytyy kokonaisuudessaan lämmittää jollakin muulla lämmönlähteellä. Poistoilmalämpöpumpussa se muu lämmönlähde on sähkövastus joka tuottaa tarvittavan lämmön olosuhteissa jolloin kompressorin teho ei riitä. Nibe F470 poistoilmalämpöpumpussa sähkövastuksen teho on 19 kW, eli 82% lämmityslaitteen kokonaistehosta. Passiivitaloissa jotka on energiaoptimoitu ja varustettu hybridilämmitysjärjestelmällä kaikki lämpö sekä lämmin käyttövesi myös mitoitusolosuhteissa pystytään tuottamaan pelkällä poistoilmalämpöpumpulla. Jotta tämä olisi mahdollista, rakennukset ovat kuitenkin käyneet läpi perusteellisen energiaoptimoinnin ja poistoilmalämpöpumppu on vain osa toimenpideyhdistelmää.

3.2.4 Ilma-vesilämpöpumppu

Ilma-vesilämpöpumppu on vahvassa kasvussa oleva lämmitysjärjestelmätyyppi. Sen toimintaperiaate on sama kun ilmalämpöpumpun sillä erolla että siinä missä ilmalämpöpumppu puhaltaa ulkoa ja kompressorin höyryttämän lämmön sisäilmaan, ilma-vesilämpöpumppu lämmittää vesikiertoista lämmönjakojärjestelmää. Uusissa rakennuksissa tämä tarkoittaa useimmiten lattialämmitystä. Vanhojen talojen radiaattorilämmönjakoon ilma-vesipumppu soveltuu huonosti koska ilma-vesipumpun lämpöteho laskee samassa suhteessa kun rakennuksen lämmöntarve kasvaa ulkoilman jäähtyessä. Tämä tarkoittaa että mitoitusolosuhteissa, kun rakennus tarvitsee kaikkein eniten lämpöä, ilma-vesilämpöpumppu pystyy tuottamaan vain osan nimellistehostaan. Lisäksi samaan aikaan kun ilma-vesilämpöpumppu pystyy tuottamaan vain osan tehostaan, radiaattorilämmityksellä toimivien vanhojen rakennusten lämpökäyrät ovat sellaisia että ne mitoitusolosuhteissa tarvitsevat niin kuumaa menovettä että ilma-vesilämpöpumput eivät pystyisi tuottamaan niin lämmintä menovettä edes tavallisella talvisäällä. Ilma-vesilämpöpumpulla on siten iso aukko toisaalta nousevan lämpökäyrän ja toisaalta laskevan lämpötehokäyrän välissä jota se ei pysty tuottamaan. Rakennus jossa on ilma-vesilämpöpumppu tarvitsee siten toisen lämmönlähteen josta saada lämpöä mitoitusolosuhteissa jolloin lämpöä tarvitaan eniten. Pientaloissa tämä lämmönlähde on usein sähkölämmitys tai takka. Kerrostaloja ei Suomessa juurikaan ole toteutettu ilma-vesilämpöpumpuilla.

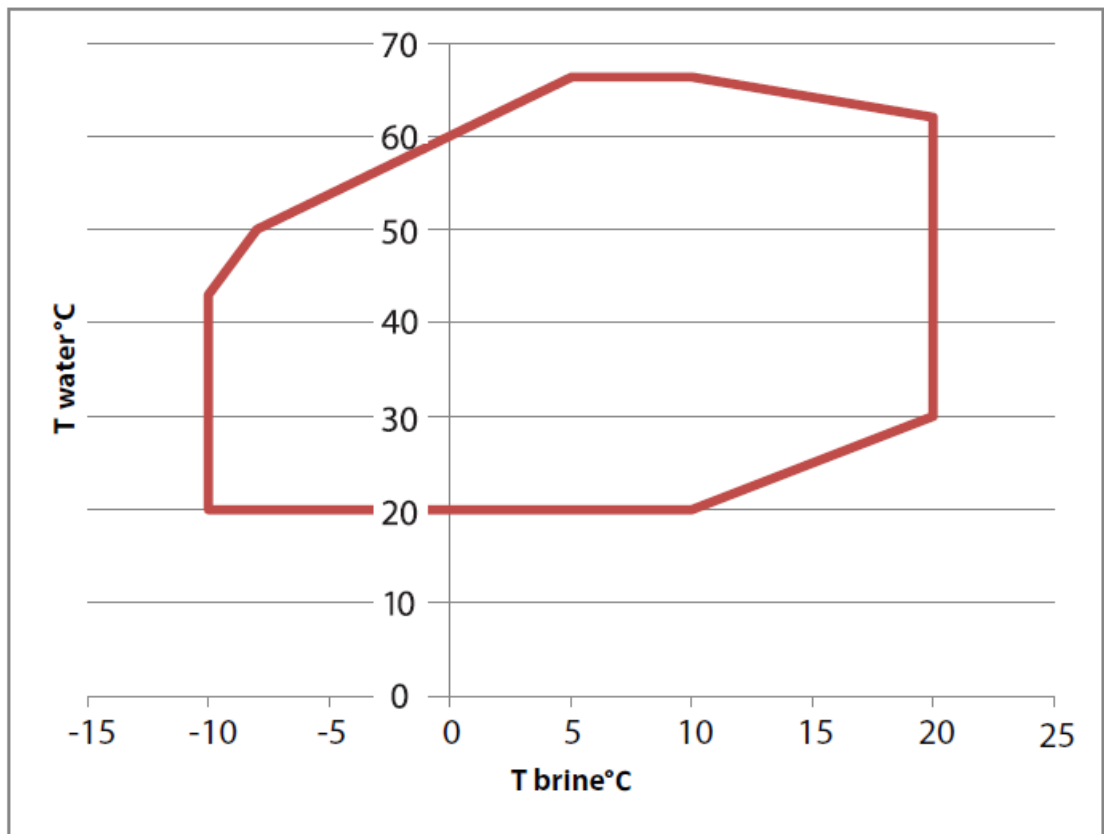


Kuva 3 Ilma-vesilämpöpumpun lämmöntuotto eri ulkolämpötiloilla (Kaukora 2020)

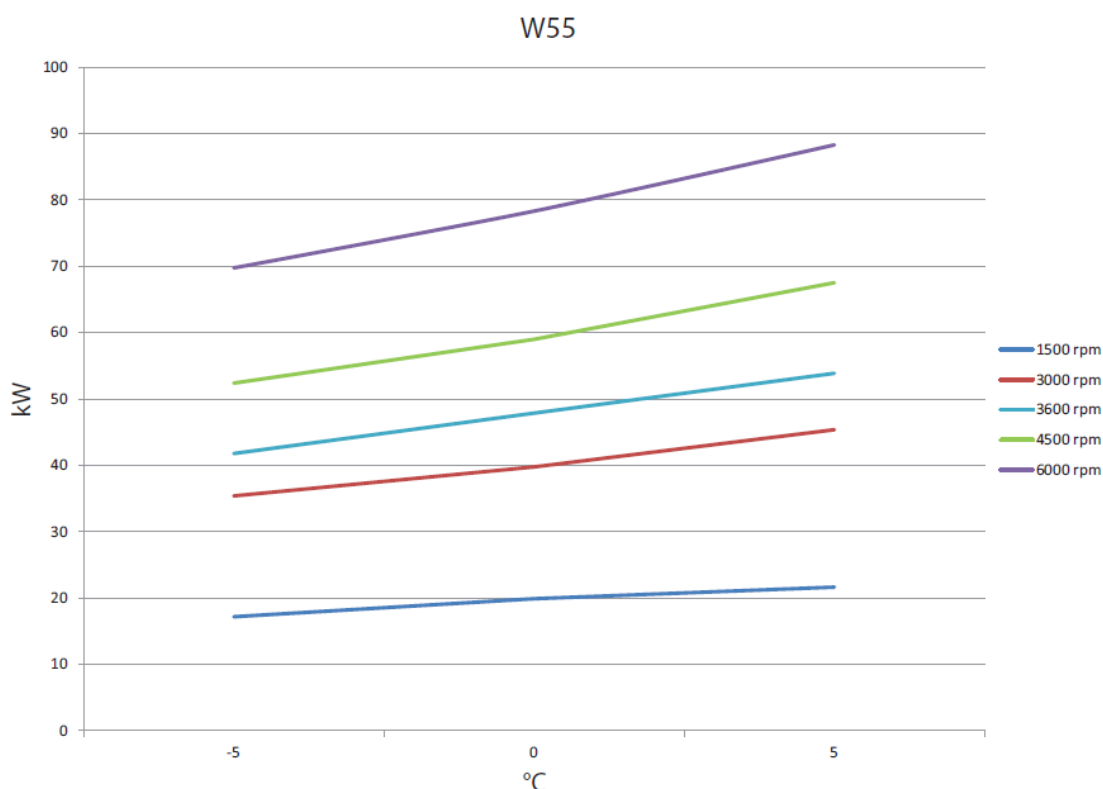
Kuvasta 3 nähdään että nimellisteholtaan 12 kW ilma-vesilämpöpumppu tuottaa -25 asteen pakkasella vain 8 kW. Lisäksi on huomioitava että tämä 12 kW ilma-vesilämpöpumppu ei tuota tätäkään 8 kW:n tehoa koko ajan vaan lämmöntuotto katkeaa sulatukseen ajaksi. Lopuksi radiaattoreilla lämmitetyissä vanhoissa rakennuksissa 55 °C menoveden lämpötila harvoin riittää -25 °C ulkolämpötilassa.

3.2.5 Maalämpöpumppu

Maalämpöpumppu on nopeimmin yleistyvä lämmönlähde sekä uusissa rakennuksissa että vanhojen rakennusten energiasaneerauksissa. Muista lämpöpumpuista poiketen maalämpöpumpun lämpöteho on kaikissa olosuhteissa sama, myös mitoitusolosuhteissa. Lämpöteho pysyy samana kaikissa olosuhteissa koska maalämpöpumppu ottaa lämpönsä maasta. Maassa lämpötila on suhteellisen tasainen jos porakaivokenttä on oikein mitoitettu. Yleisin maalämmön keruupiiri koostuu porakaivoista joihin on asennettu kollektoriputki. Kollektoriputkessa kiertää yleisimmin vesi-/etanoliliuos josta lämpö siirretään lämmönvaihtimella kylmäaineeseen. Kylmäaineesta lämpö siirtyy toisen lämmönvaihtimen kautta talon vesikiertoiseen lämmönjakojärjestelmään sekä lämpimään käyttöveteen. Lämmönvaihtimien välissä on kompressori joka puristaa lämpimälle puolelle menevän kylmäaineen kuumaksi ja jäädyttää keruupuolelle menevän kylmäaineen jääkylmäksi.



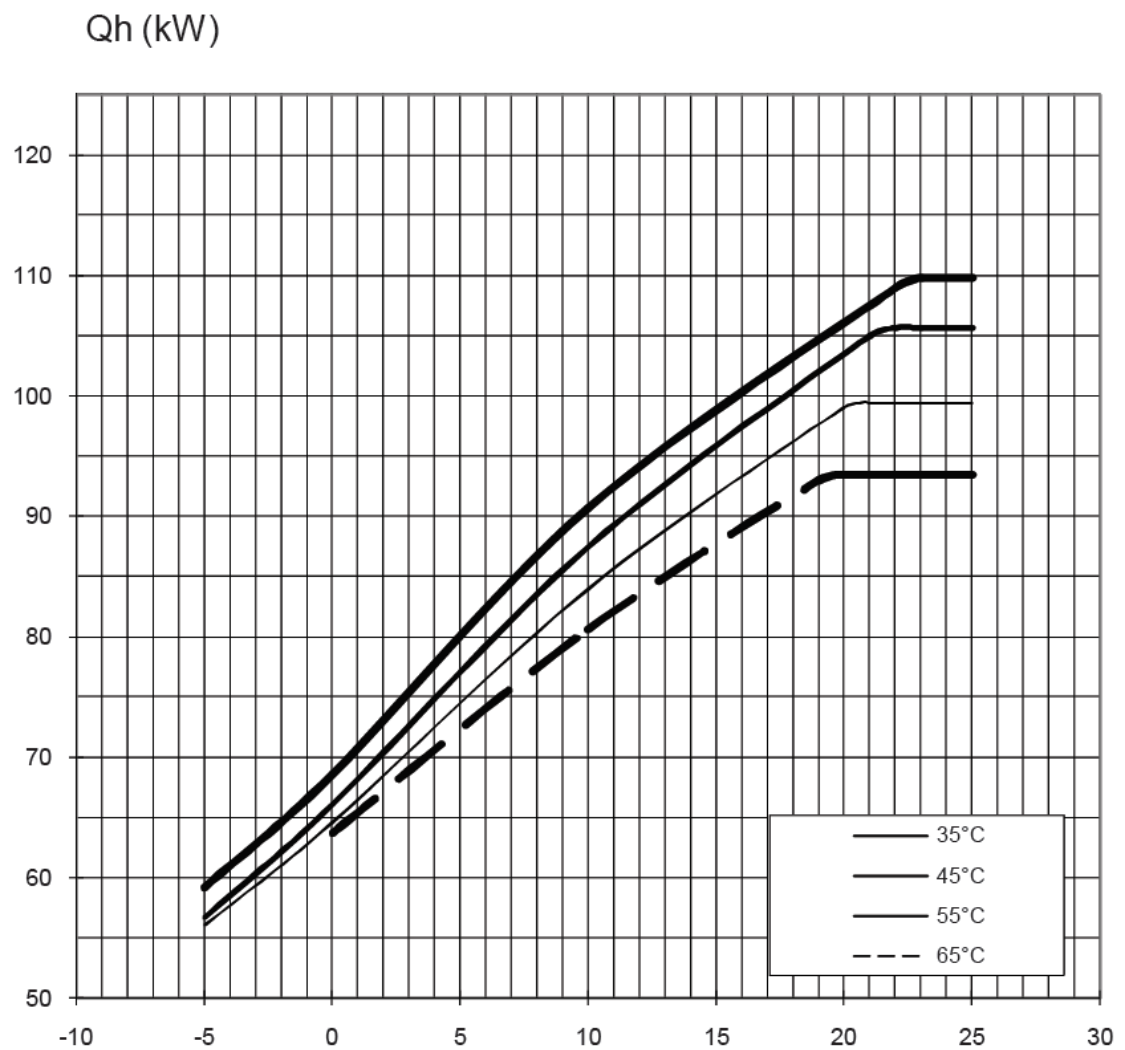
Kuva 4 Tekninen kuvaus DHP-M-XL maalämpöpumpun menoveden lämpötila eri keruupiirien lämpötiloilla (Danfoss 2018)



Kuva 5 Tekninen kuvaus DHP-M-XL, lämmitysteho eri keruupiirien lämpötiloilla (Danfoss 2018)

Vanhoissa rakennuksissa joissa lämmönjako on toteutettu radiaattoreilla, joidenkin maalämpöpumppujen teho laskee hieman mitoitusoloissa jolloin lämpökäyrän mukainen menoveden lämpötila on kuumimmillaan. Lisäksi kaikki maalämpöpumput eivät edes pysty tuottamaan riittävän kuumaa vettä mitoitusolosuhteissa kaikissa rakennuksissa. Esimerkiksi rakennuksissa joissa radiaattorit on mitoitettu toimimaan 80 asteisella menovedellä, osa lämmöstä joudutaan tuottamaan lisälämmönlähteellä. Yleisesti maalämpöpumput eivät pysty tuottamaan kuumempaa lämmityksen menovettä kun 70 astetta. Tätä kuumemmissa menoveden lämpötiloissa ongelmaksi muodostuu lämmön riittävyden lisäksi huono hyötysuhde. Maalämpöpumppujen lämpöteho ilmoitetaan B0/W35 EN14511 standardin mukaisesti joka tarkoittaa että porakaivoista saadaan 0 – asteista vesi-/etanoliliuosta ja menovesi on 35 asteista (Sulpu 2020). Vuonna 2019 markkinoilla olevilla maalämpöpumpuilla COP-luku on näissä olosuhteissa 5. Kun samalla maalämpöpumpulla tehdään 70-asteista menovettä, on COP enää hieman yli 1. Samassa suhteessa kun COP-luku laskee ja lämpöpumpun energiatehokkuus huononee, laskee myös maalämpöpumpun lämpöteho kuten kuvista 4, 5 ja 6 nähdään. Käytännössä on kyse siitä

että maalämpöpumpulle palaava vesi on niin kuumaa (esim. 60 asteista) ettei paluuvessällä ole mahdollista lauhduttaa kylmäainetta riittävästi.



Kuva 6 Kiinteistölämpöpumppu, lämmöntuotto eri menoveden lämpötiloilla ja keruupiirin lämpötiloilla (Alpha Innotec 2018)

3.3 Kolmannen sukupolven lämmönlähteet

Kolmannen sukupolven lämmönlähteet ovat sellaisia joiden COP-luku on 35 tai enemmän. Niillä on korkean COP-luvun lisäksi muitakin yhteisiä ominaisuuksia. Kolmannen sukupolven lämmönlähteet eivät tee lämpöä vaan ne keräävät tai ottavat lämpöä talteen. Kolmannen sukupolven lämmönlähde ei yksinään pysty lämmittämään taloa vaan lämmönlähteitä tarvitaan useita ja ne muodostavat yhdessä hybridilämmitysjärjestelmän joka pystyy tuottamaan kaiken lämmön jonka rakennus tarvitsee. Kolmannen sukupolven lämmönlähteiden lämmöntuotto ei usein osu samaan ajankohtaan kun lämmön kulutus ja ne tarvitsevat siksi lämpövaraston jolla lämpö voidaan varastoida jotta lämmöntuotto ja lämmön käyttö saadaan kohtaamaan. Jos halutaan lämmitää rakennus ilman ulkopuolelta ostettua energiaa niin lämmitys täytyy toteuttaa yhdistelemällä kolmannen sukupolven lämmitysjärjestelmiä kokonaisuudeksi jossa toisiaan täydentävät lämmön- ja kylmän lähteet pitävät rakennuksen halutuissa sisäilmaolosuhteissa.

3.3.1 Aurinkolämpöjärjestelmät

Tunnetuin esimerkki kolmannen sukupolven lämmitysjärjestelmistä on aurinkolämpöjärjestelmä jossa aurinko lämmittää aurinkokeräimessä kiertävän vesi-glykolin ja sähköä kuluu ainoastaan kiertovesipumpun pyörittämiseen. Alla olevassa kuvassa esitetyssä aurinkolämpöjärjestelmässä kiertovesipumput kuluttavat 0-125 W. Samaan aikaan aurinkokeräinten lämmöntuotto on 0-12.000 W. Järjestelmän COP-luku on siten mitoitus- teholla 96 (Wagner Solar GMBH 2020).



Kuva 7 Aurinkolämpöjärjestelmän toimintaperiaate (Wagner Solar GmbH 2012)

Jos rakennus sekä lämmin käyttövesi olisi mahdollista lämmitellä aurinkolämpökeräimillä koko vuoden niin koko rakennuksen ostoenergian tarve olisi 96% pienempi kun saman rakennuksen ensimmäisen sukupolven lämmitysjärjestelmällä lämmitettynä. Suomessa aurinko ei kuitenkaan paista riittävästi marraskuussa, joulukuussa ja tammikuussa jotta aurinkolämpökeräimet olisivat riittävä lämmönlähde (Erat et al. 2001). Jotta aurinkolämpöjärjestelmällä voisi lämmitellä talon sekä lämpimän käyttöveden koko vuoden, se edellyttäisi että neljän kuukauden lämpöenergia otettaisiin talteen kesäkuukausina ja käytettäisiin niin kuukausina jolloin aurinkolämpöä ei ole tarjolla.

3.3.2 Kausilämpövarastot

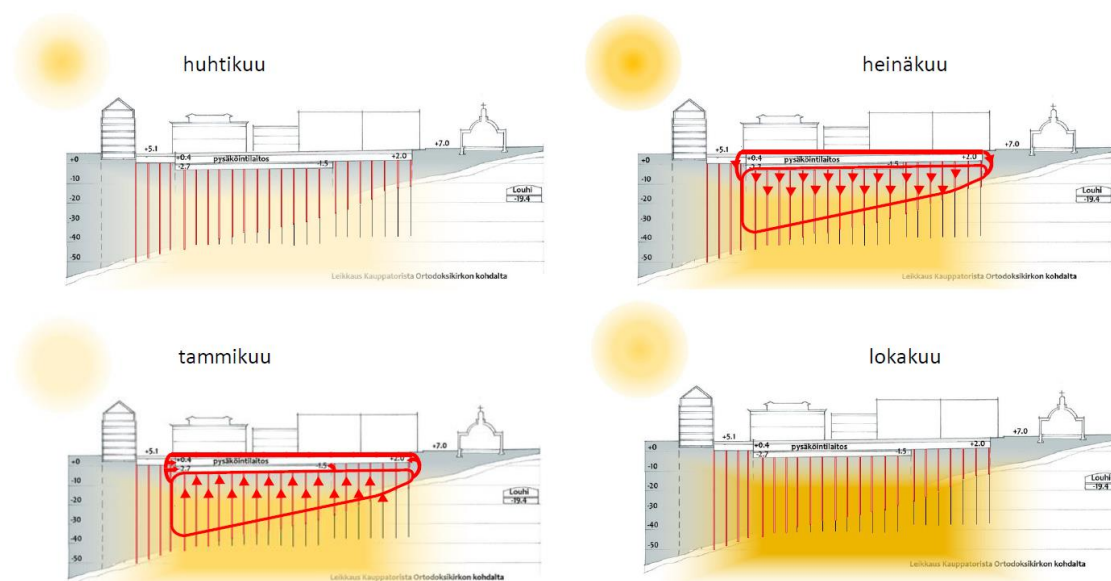
Lämpövarasto johon on kesällä ladattu niin paljon ylimääräistä lämpöenergiaa että se riittää marras- joulu- tammi-, helmikuussa pitämään talon sisäilmaolosuhteet halutulla tasolla voi toimia rakennuksen lämmönlähteenä. Tämä kuitenkin edellyttää monta oikein

suunniteltua sekä toteutettua yksityiskohtaa liittyen talon arkkitehtuuriin, rakennustekniikkaan, talotekniikkaan ja jopa kodinkoneisiin.

4 LÄMMÖN KAUSIVARASTOINTI MAAPERÄÄN

Useita kolmannen sukupolven lämmönlähteitä yhdistää se että ne eivät tuota lämpöä silloin kun lämpöä tarvitaan eniten vaan lämpöä on tarjolla jollakin ja lämpöä tarvitaan toisella hetkellä. Esimerkiksi aurinkolämpöjärjestelmä tuottaa eniten lämpöä silloin kun lämpöä vähiten tarvitaan, eli keskellä kesää. Vastaavasti lämpöä tarvitaan eniten talvella, jolloin aurinko paistaa hyvin vähän. Jotta lämpöä voitaisiin varastoida kesällä ja käyttää talvella tarvittaisiin jättimäinen lämpövaraaja. Sellaisen valmistaminen vesivaaraajana olisi erittäin kallista ja monimutkaista (Erat et al. 2001).

Lämmön kausivarastointi maaperään on järjestelmä jossa kesällä otetaan talteen ilmaista tai vaihtoehtoisesti hyvin edullista lämpöä ja varastoidaan lämpö maaperään. Seuraavana talvena maahan varastoitu lämpö voidaan hyödyntää matalalämpöisissä (menovesi max 35 °C) lämmönjakojärjestelmissä suoraan pelkän kiertovesipumpun avulla. Tavallisissa (ei matalalämpöisissä) lämmönjakojärjestelmissä tarvitaan lämpöpumppu nostamaan lämpövarastosta otettava lämpö sen lämpöiseksi että lämpö on hyödynnettävissä lämmitykseen. Lämmön varastointi maaperään on edullinen tapa varastoida isoja määriä lämpöä. Maaperään varastointi on niin edullista että se mahdollistaa kaiken rakennuksen talvella tarvitseman lämmön varastoinnin kesän aikana maahan (Bergdahl et al. 1997). Lämmön varastoinnin kiinnostavuutta ovat lisänneet useat tällä hetkellä vallitsevat olosuhteet joista energian hinta, yhteiskunnan kasvava ilmastotietoisuus sekä matalalämpöisten lämmönjakojärjestelmien yleistyminen voidaan erikseen mainita (Arola et al. 2017).



Kuva 8 Turun toriparkki lämpövaraston toimintaperiaate (nollaE 2019)

4.1 Lämpövarastotyypit savimaassa

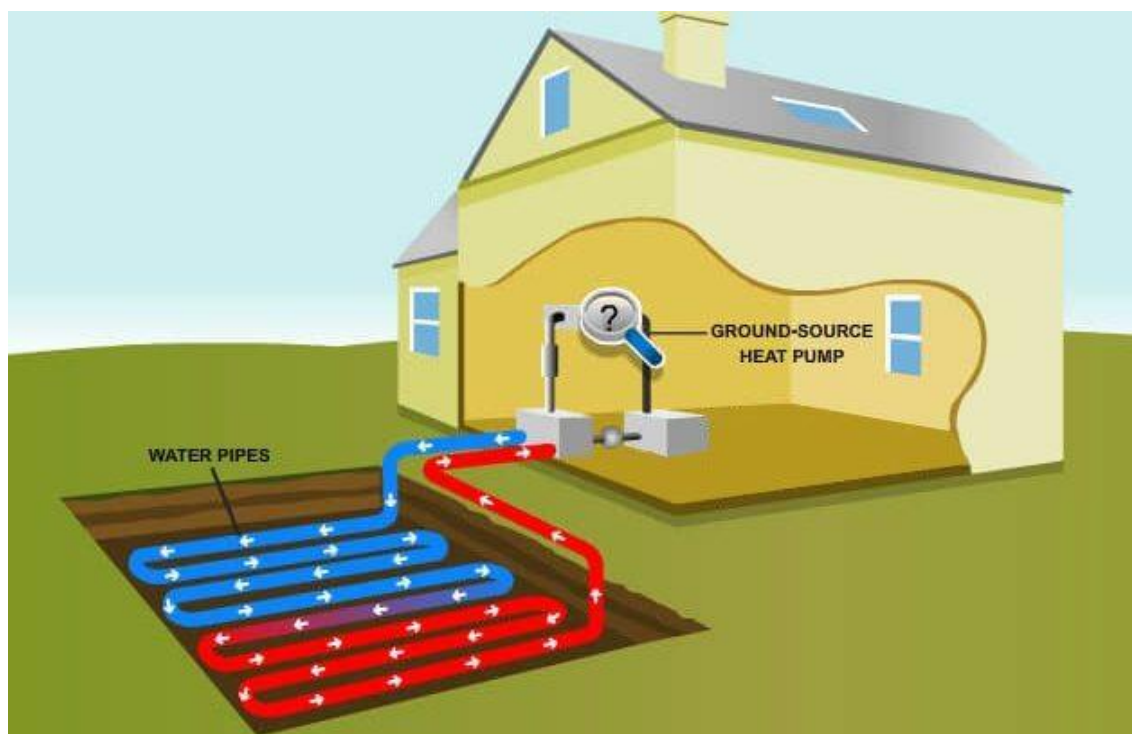
Savimaasta on mahdollista tehdä lämpövarasto sekä horisontaalisilla että vertikaalisilla kollektoreilla. Miten kollektorit kussakin kohteessa asennetaan saveen kustannustehokkaasti riippuu kohteen teknisistä yksityiskohdista kuten esimerkiksi tontin koko ja muoto, maanrakennustyöt joita kohteessa tehdään, mahdollinen paalutus sekä lämpöenergiämäärä ja lämmitysteho joka kohteessa tarvitaan (Arola et al. 2017).

4.1.1 Maapiiri savessa

Lämmönkeruuta savesta on hyödynnetty 1970-luvun lopulta lähtien jolloin ensimmäiset maalämpöpumput asennettiin Suomessa. Lämmönkeruu savesta tapahtuu tyypillisesti 40 mm polyeteenimuoviputkella joka upotetaan 0,8 – 1,2 metrin syvyyteen maahan. Useimmiten tällaiset maalämpöputkistot lämmittävät omakotitaloja ja putket asennetaan peltoon (Lauttamäki 2018).

2010-luvulla näitä maapiirejä aloitettiin hyödyntämään maalämpöpumppujen lisäksi ilmanvaihdon esilämmityksessä sekä kesäviilennyksessä. Kesän viilennyksessä saveen syötettyä lämpöä saatiin hyödynnettyä seuraavana talvena kun ilmanvaihtokoneelle menevä ulkoilma esilämmitettiin ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenottokennon huurtumisen estoa varten. Ilmanvaihdon esilämmityksessä sekä kesäviilennyksessä käytetyistä

maapiireistä tehdyt mittaukset osoittavat että kesän viilennyksen yhteydessä saveen pumpattua lämpöä on jäljellä vielä kevättalven paukkupakkasilla (Savumax 2012). Maapiiri on rakennuskustannuksiltaan edullisin tapa varastoida lämpöä saveen (Savumax 2012). Maapiirin haaste on kuitenkin tilan riittävyys varsinkin enemmän energiaa tarvitsevien rakennusten osalta. Lisäksi maapiirin haasteena ovat, varsinkin Etelä-suomessa, lumettomat pakkaset jotka jäädyttävät lämpövarastoa rajusti juuri silloin kun lämpöä tarvitaan eniten (Savumax 2012).



Kuva 9 Maapiiri savessa (Bandera County Courier 2020)

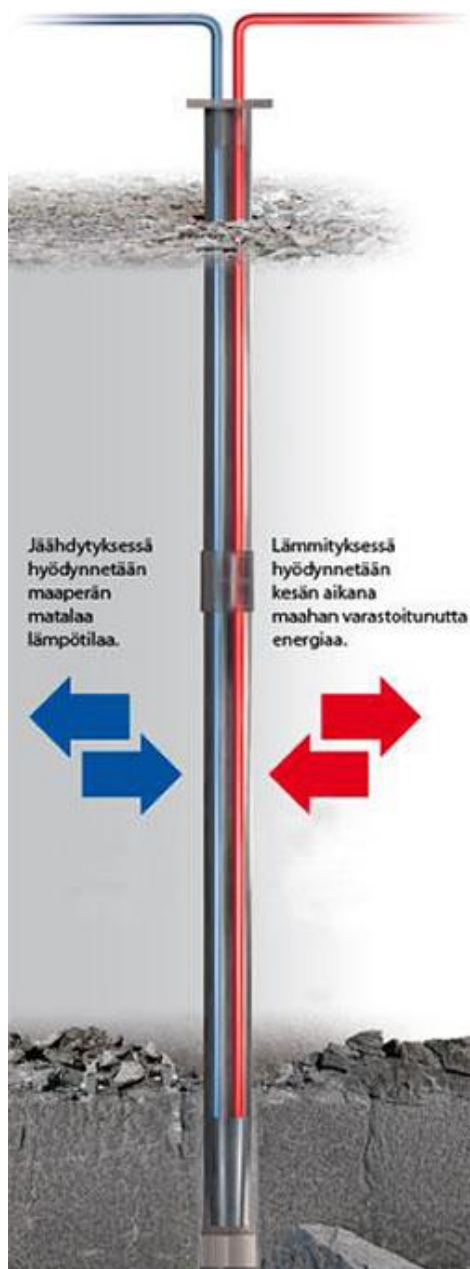
4.1.2 Energiapaalut

Suuri osa Suomeen rakennettavista uusista rakennuksista rakennetaan tonteille joissa ne täytyy rakennusteknisistä syistä paaluttaa. Talon kannatteleminen lisäksi paalut lävistävät saven ja mahdollistavat savipatjan muuttamisen lämpöakuksi jonka lämpöenergiaa pystytään hyödyntämään asentamalla paalujen sisään kollektoriputket. Energiapaalujen yläpuolella sijaitseva rakennus estää pintalämpötiloja lämmittämästä tai jäädyttämästä lämpövarastoa. Energiapaaluja ei voi käyttää perinteisinä yhteen suuntaan toimivina maalämpökaivoina joista vuodesta toiseen aina vain otetaan lämpöä ilman että lämpöä ladataan maahan. Energiapaaluja ympäröivän saven jäätyminen muuttaa saven

koostumusta, heikentäen paalujen kantavuutta. Saven huokosten sisältämän veden jäätyminen saa saven laajenemaan sekä erittelee savesta veden (Gabrielsson et al 1997). Energiapaaluissa on siten aina ensisijaisen tärkeää mitoittaa ja suunnitella järjestelmä siten että paalujen ympärillä oleva savi ei koskaan, missään olosuhteissa, jäädy.

4.1.3 Teräslyöntipaalut

Teräslyöntipaalut on teräsbetonipaalun jälkeen yleisin paalutyyppi Suomessa. Teräslyöntipaalu on kaikista paalutyypeistä helpoiten hyödynnettävissä energiapaaluna. Teräslyöntipaalun hyödyntäminen energiapaaluna ei vaikuta teräspaalun rakennustekniiseen suunnitteluun ja mitoitukseen. Paalutuksen ja paalun katkaisun jälkeen paaluun asennetaan kollektoriputki jonka avulla saven termistä energiaa päästään hyödyntämään (SSAB). Kollektoriputken asennuksen jälkeen paalut täytetään aineella joka mahdollistaa lämmön siirtymisen. Ilman täyttöä energiapaalu sisältää ilmaa jonka lämmönjohtavuus on $0,026 \text{ W/(K}\cdot\text{m)}$ joka tarkoittaa että lämpöä ei siirry käytännössä ollenkaan.



Hyvin lämpöä siirtävä täyteaine voi kasvattaa kollektorin lämmönsiirron pinta-alaa jopa niin että parhaimmillaan koko paalu toimii yhtenä ison kollektorina. Energiapaaluja on täytetty vedellä jolloin energiapaalu toimii kuten tavallinen maalämpökaivo. Veden lämmönjohtavuus, $0,6 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ on kuitenkin huono verrattuna esimerkiksi betonin $1,2 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ josta johtuen energiapaaluja on täytetty myös betonilla. Suomen suurimmissa, nollaE Oy:n suunnittelemisissa, energiapaalukohteissa on kuitenkin käytetty ainetta jonka lämmönjohtavuus on $2,2 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ joka tarkoittaa että lämmönjohtavuus on tavalliseen maalämpökaivoon verrattuna merkittävästi parempi. Isoissa projekteissa täyteaineen valinnassa täytyy huomioida myös täyteaineen hinta sekä paalun täyttämistä aiheutuvat kustannukset. Isoihin paaluihin menee merkittäviä määriä täyteainetta jolloin täyteaineen ja sen asentamisen hinta vaikuttavat koko projektin kannattavuuteen. Isoissa rakennushankkeissa myös nopea aikataulu vaikuttaa täyteaineen valintaan (Brandt 2020).

Kuva 10 Teräsputkipaalu energiaputkistolla (Uponor 2012)

4.1.4 Teräsbetonipaalu

Teräsbetonipaalu ei suoraan käy energiapaaluksi. Teräsbetonipaalusta saadaan kuitenkin energiapaalu asentamalla paaluun paalutehtaalla ilmastointiputki. Ilmastointiputki muuttaa tavallisen teräsbetonipaalun energiapaaluksi kun maahan lyötyyn paaluun asennetaan kollektoriputki.



Teräsbetonipaalu johon on valuvaiheessa asennettu ilmastointiputki on kollektorin asennuksen, täyteaineen ja muiden yksityiskohtien osalta samankaltainen kun teräslöytipaalu.

Teräsbetonipaalujen markkinoille on myös tulossa uusi teräsbetonipaalu johon on jo tehtaalla valmistusvaiheessa asennettu kollektoriputki. Tuote ei vielä ole CE-merkitty. Paalujen käyttö edellyttää CE-merkintää joten kollektorin sisältävän betonipaalun käytöstä ei vielä löydy tutkittua tietoa.

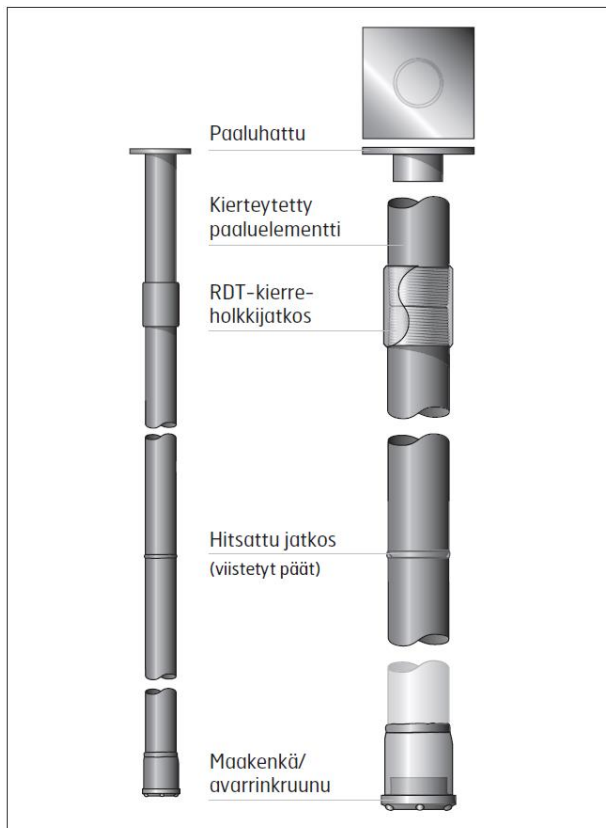
Kuva 11 Teräsbetonipaalu energiapaaluna (Brandt)

4.1.5 Ruuvipaalu



Ruuvipaalu ruuvataan pehmeään maan läpi kallioon asti mutta sen kärki ei tunkeudu kallioon kuten muut paalutyypit. Asennuslaitteisto eroaa muiden paalutyypin asennuslaitteistosta ollen hieman kevyempi. Pienemmissä paalutuskohteissa ruuvipaalun voi jopa ruuvata maahan käsin. Ruuvipaalu on ontto teräsputki kuten teräslyöntipaalukin joten se muuttuu sellaisenaan energiapaaluksi kun siihen asennetaan paalutuksen jälkeen kollektoriputki. Sellaisissa kohteissa joissa paalujen yhteenlaskettu pituus ei riitä kohteen simulointituloksen mukaiseen geotermisen energian keräämiseen ja varastointiin, ruuvipaalujen läpi voidaan porata reikä kallioon. Energiapaaluun asennettava kollektoriputki läpäisee paalun ja jatkaa matkaansa kallioon. Etu tavalliseen maalämpöporaukseen verrattuna on pehmeään maan poraamiskustannusten minimointi. Ruuvipaalu on edullisempi tapa läpäistä pehmeää maa kun tavanomainen suojaputki jota käytetään maalämpöporauksissa (Paalupiste 2020). Suomalainen start-up yritys Thermadrill on erikoistunut savimaan läpäiseviin energiaporauksiin ja he hyödyntävät porauksissa nimenomaan ruuvipaaluja (Thermadrill 2020).

Kuva 12 Ruuvipaalu (Paalupiste)



Kuva 13 Porapaalu (SSAB 2019)

4.1.6 Porapaalu

Porapaalu on teräsputkipaalu joka tavallisen lyöntiasennuksen sijaan porataan ensin pehmeään maan läpi ja sen jälkeen sisälle kallioon. Porapaalusta saa energiapaalun asentamalla siihen kollektoriputki. Kuten ruuvipaaluun, myös porapaalun kollektoriputkelle on mahdollista saada lisää pituutta poraamalla paalun läpi kallioon. Porapaalujen kantavuudet eroavat lyöntipaaluista niin että niillä on merkittävästi parempi kantavuus kun saman kokoisilla lyöntipaaluilla (SSAB 2019).

5 SAVIMAA

Maalajien luokittelu perustuu näytteen raekokojen määrittämisen ja näiden prosentuaaliseen osuuteen koko näytteen painosta. Hienoainespitoinen maa määritetään areometrillä. Kaikista hienojakoisin maa-aines, jonka raekoko on 0,002 mm tai pienempi, luokitellaan sekä geoteknisesti että SFS-EN ISO-standardin mukaisesti Saveksi (lyhennettynä Sa) (MaaRYL 2010). Savi on routivaa maa-ainesta ja saven kapillaarisuus on joissakin mittauksissa ollut jopa 50 metriä (Ronkainen 2012).

Taulukko 2 Maalajien luokittelu ja raekoko (MaaRYL 2010)

Päälajite Nimi	Lyhennys		Alalajite	Rakeiden läpimitta, mm	
	GEO	SFS-EN ISO		GEO	SFS-EN ISO
Savi	Sa	CI		≤ 0,002	< 0,002
Siilti	Si	Si		> 0,002...0,06	> 0,002...0,063
		FSi	Hienosiilti	> 0,002...0,006	> 0,002...0,0063
		MSi	Keskisiilti	> 0,006...0,02	> 0,0063...0,02
		CSi	Karkeasiilti	> 0,02...0,06	> 0,02...0,063
Hiekka	Hk	Sa		> 0,06...2,0	> 0,063...2,0
		FSa	Hienohiekka	> 0,06...0,2	> 0,063...0,2
		MSa	Keskihiekka	> 0,2...0,6	> 2,0...0,63
		CSa	Karkeahiekka	> 0,6...2,0	> 0,63...2,0
Sora	Sr	Gr		> 2,0...60,0	> 2,0...63
		FGr	Hienosora	> 2,0...6,0	> 2,0...6,3
		MGr	Keskisora	> 6,0...20,0	> 6,3...20,0
		CGr	Karkeasora	> 20,0...60,0	> 20,0...63,0
Kivet	Ki	Co		> 60...600	> 63...200
			Pienet kivet	> 60...200	
			Suuret kivet	> 200...600	
Lohkareet	Lo	Bo		> 600	> 200...630
Suuret lohkarit		LBo			> 630

5.1 Saven termiset ominaisuudet

Yhteen kuutioon savea voi, kuten taulukosta 3 nähdään, varastoida lähes sama määrä lämpöä kuin kuutioon vettä. Saven lämmönjohtavuus (keskimäärin 0,85-1,1) on matalampi kuin kalliolla (Suomessa usein 3,0) mutta korkeampi kuin veden (0,62) (Alanen et al.).

Taulukko 3 Maalajien termiset ominaisuudet (Alanen et al. 2003)

Väliaine	Lämmönjohtavuus W/m K	Lämpökapasiteetti kJ/kg °C	Tilavuuden lämpökapasiteetti kWh/m ³ °C
Graniitti	2,9–4,2	830	0,62
Hiekkakivi	3,0–5,0	730	0,55
Saviliuske	1,7–3,5	850	0,66
Kalkkikivi	1,7–3,0	840	0,63
Kvartsiitti	5,0–7,0	790	0,58
Hiekka, sora ¹	1,6–2,0		0,81
Hiekka, sora ²	0,7–0,9		0,39
Savi	0,85–1,1		0,83–1,0
Lieju ¹	1,5–2,5		0,61–0,83
Hiekkainen lieju ¹	0,6–1,8		0,36–0,53
Turve ¹	0,6		1,11
Turve ²	0,2–0,5		0,19–0,89
Vesi	0,62	4180	1,18

¹ pohjavedenpinnan alla, ² pohjavedenpinnan yllä

Saven laskennallinen lämmönjohtavuus on vaikeasti mallinnettava yhtälö. Lämmön siirtyminen on saven kaikissa ainesosissa erilaista. Maa-ainespertikkeleissa, saven sisältämässä ilmassa sekä saven sisältämässä vedessä lämpö siirtyy johtumalla. Maa-ainespertikkelista toiseen lämpö siirtyy johtumisen lisäksi myös säteilemällä. Höyrydiffuusio siirtää lämpöä saven sisältämän vesihöyryn mukana. Saven sisältämässä ilmahuokosissa lämpö siirtyy ilman mukana kuljettumalla (Johansen 1975).

Maa-ainespertikkeleiden lämmönjohtavuus vaihtelee suuresti partikkeleista riippuen. Kiivaineksissa lämmönjohtavuus paranee kylmemmissä lämpötiloissa. Vastaavasti ilmahuokosissa oleva ilma siirtää lämpöä paremmin korkeammissa lämpötiloissa. Maa-ainespertikkeleista mineraaleista paras lämmönjohtavuus on Kvartsilla (SiO₂) jonka lämmönjohtavuus +20 asteen lämpötilassa on 7,7 W/mk. Kvartsin kanssa yhdessä usein esiintyvä mineraali on maasälpä-ryhmään kuuluvat mineraalit joiden keskimääräinen lämmönjohtavuus +20 asteen lämpötilassa on 2,0 W/mk (Hytönen 1999). Vastaavasti huonoin lämmönjohtavuus on saven joukossa mahdollisesti sijaitsevilla orgaanisilla aineksilla joiden lämmönjohtavuus on 0,45 W/mk (Johansen 1975). Savi on mannerjäätiköltä sulamisvesien mukana kulkeutuneen mineraaliaineksen hienorakeisin osa joka kerrostui kauempana jäätikön reunalta (Geologia 2020). Saven minerologinen koostumus on eri kuin sen alla olevan kallion sekä samalta alueelta löytyvä isomman raekoon

omaava aines. Tämä juontaa juurensa saven syntyyn jossa jäävuoret ovat jauhaneet hienommaksi pehmeämmät mineraalit kuten maasälpä ja jättäneet isommiksi partikkeleiksi tai jopa kallioksi kovemmat mineraalit kuten kvartsi (Johansen 1975). Hienojakoinen maasälpä on toisaalta altis kemialliselle muutokselle jonka ansiosta syntyy uusia alumiinipitoisia mineraaleja. Tällaisia mineraaleja ovat esimerkiksi Illiitti jossa on merkittävästi vähemmän Ca ja Na:ta ja toisaalta kaoliniitti ja montmorrilloniitti joissa Ca:ta ja Na:ta ei ole ollenkaan (Johansen 1975).

Norjassa on infrarakentamista varten tehty iso-otantaisia analyysyjä saven lämmönjohtavuudesta. Näiden tutkimusten tilastollinen keskiarvo saven lämmönjohtavuudelle on ollut 1.15 W/mK ja keskihajonta tutkimuksesta riippuen 0,17-0,43. Saven kuivatiheyden keskiarvo on näissä otannoissa ollut 1400 kg/m³ ja keskihajonta 0-140 kg (Johansen 1975). Toisessa tutkimuksessa kuivan saven tiheys vaihteli 1800 ja 2000 kilon välillä ja kostean 2000 ja 2200 kilon välillä (Uponor 2012). Kolmannessa, Suomessa 2012 tehdystä 117 näytteen tutkimuksessa saven kuivatiheyden keskiarvo asettui 2550 ja 2650 kiloon kuutiolle (Ronkainen 2012).

Uponorin julkaisun mukaan kuivan saven lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0,4-1,1 W/mK ja kostean saven 1,1 ja 3,1 W/mK välillä. Kuivalle savelle suositetaan käyttämään arvoa 0,5 W/K ja kostealle savelle arvoa 1,8 W/mK (Uponor 2012). Saven vesipitoisuus on veden massa suhteessa maa-aineksen massaan (Ronkainen 2012).

$$W = \frac{m_w}{m_d} * 100 \%$$

m_w on veden massa (%)

m_d on kuivan aineksen massa näytteessä (%)

Kaava 2: Saven vesipitoisuus (Ronkainen 2012)

Saven lämmönjohtavuus voidaan saven ominaisuuksien perusteella laskea kaavalla:

$$\lambda = (((0,57^n \cdot \lambda_2^{(1-n)} - \lambda^0) \cdot (\log Sr + 1,0))) + 0,137_{\rho d} + 64,7$$

$$2700 - 0,947_{\rho d}$$

jossa:

S_r on saven kylläisyysaste (saturaatio) prosentteina (%)

ρ_d on saven kuivatiheys (kg/m³)

λ^o on kuivan saven lämmönjohtavuus (w/mk)

Kaava 3: Saven lämmönjohtavuus (Johansen 1975)

Saven kyllästysaste lasketaan kaavalla

$$S_r = \frac{V_w}{V_h} * 100\%$$

Jossa

V_w on veden tilavuus näytteessä (%)

V_h on veden huokostilavuus (vesi + ilma) (%)

Kaava 4: Saven kyllästymisaste (saturaatio) (Johansen 1975)

Saven kuivatiheys lasketaan kaavalla:

$$\gamma_s = \frac{W_k}{V_k}$$

jossa

γ_s on tiheys (t/m³)

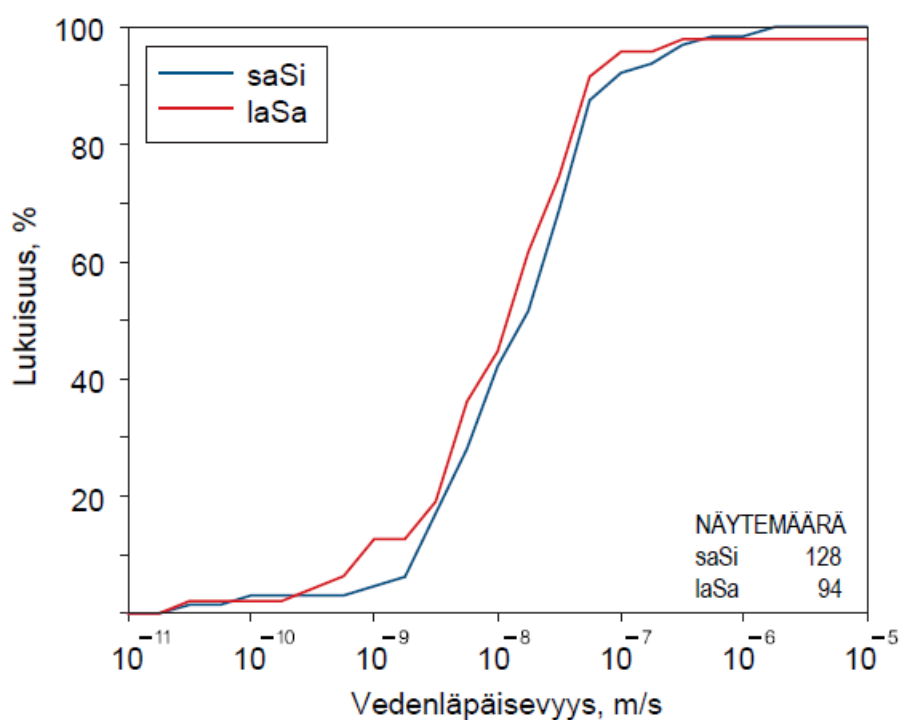
W_k kiinteän aineksen massa (t)

V_k kiinteän aineksen tilavuus (m³)

Kaava 5: Saven kuivatiheys (Ronkainen 2012)

5.2 Pohjavesivirtaamat

Lämpövarastoon ladataan kesällä lämpöä ja talvella lämpöä käytetään. Kun lämpövarastoa ryhdytään suunnittelemaan täytyy aikaisessa vaiheessa tehdä kartoitus pohjaveden liikkeistä koska runsaat pohjaveden virtaukset voivat kuljettaa varastoidun lämmön mukanaan (Arola et al 2017). Saven ja silttisen saven permeabiliteetti on alle 10^{-8} m/s (Uponor 2012).



Kuva 14 Saven vedenläpäisevyys (Ronkainen 2012)

Usein maaperä on muutakin kuin savea. Tällaisissa kohteissa pohjaveden liikkeet täytyy kartoittaa ja simuloida pohjaveden vaikutus lämpövarastoon (Arola et al. 2017).

5.3 Ääriämpötilojen vaikutus saven ominaisuuksiin

Kun savi lämmitetään 70°C lämpötilaan, maa-ainepartikkelit sekä saven huokosissa oleva vesi lämpölaajenevat. Tämä lämpölaajeneminen sekä ympäröivän maan vaakasuuntaisen laajenemisen vastustus johtaa ylipaineeseen savessa. Kuinka paljon saven

huokospaine kasvaa riippuu lämpötila-erosta sekä lämmön määrästä. Vaikutukset saven huokospaineeseen vähenevät jokaisella lämmitys/jäähdytysyklillä.

Raepaine (σ') on yksittäisten rakeiden välinen paine, joka siirtyy rakeelta toiselle niiden kosketuskohdassa. Huokosvedenpaine (u) on rakeiden välisissä huokosissa oleva vedenpaine, joka on saman suuruinen joka suuntaan.

Maassa vallitseva kokonaisjännitys on raepaineen ja huokosvedenpaineen summa

$$\sigma = \sigma' + u$$

σ on kokonaisjännitys (kPa)

σ' raepaine eli tehokas jännitys (kPa)

u huokosvedenpaine (kPa)

$$\sigma' = \sigma - u$$

Kaava 6: Saven huokosylipaine (Bergdahl et al 1997).

Huokosylipaineen seurauksena maassa käynnistyy konsolidaatioprosessi joka kestää niin kauan kun huokosylipainetta on. Konsolidaation määrä riippuu maan viemärointi-mahdollisuuksista, esikonsolidaatiosta sekä lämpötilavaihtelujen koosta sekä määrästä.

Esikonsolidaatio syntyy kuormituksen aiheuttamista leikkausmuutoksista. Esikonsolidaatiossa maa-alkion kokonaistilavuus pysyy muuttumattomana joten se on kimmoista kokoonpuristumista. Tyypillisesti esikonsolidaatio tehdään rakennusaikana.

Konsolidaatiopainuma tarkoittaa hienorakeisen maapohjan tiivistymisestä, eli maapohjan tilavuuden pienenemisestä johtuvaa painumaa. Tiivistymisen seurauksena maan huokostilavuus ja vesipitoisuus pienenevät. Konsolidaatiopainumassa kuormituksen alainen maaperä tiivistyy veden poistuessa maaraosta. Hienojakoisen maan painuma on pääosin konsolidaatiopainumaa. Tilanteessa jossa huokosylipaine pysyy, on oletettavaa ettei painumista tapahdu. Lämpövarastosta lämpöä otettaessa lämpötilan lasku aiheuttaa saven sisältämien maapartikkeleiden sekä huokosveden supistumisen joka johtaa painumiin. Painumisen määrä riippuu siitä miten jäähtyvä savi pystyy imemään huokosvettä ympäriltään (Bergdahl et al. 1997)

Konsolidaatiopainuman jälkeen voi tapahtua sekundääripainumaa joka on konsolidaatiopainuman jälkeen tapahtuvaa hidasta painumista. Tätä sekundääripainumaa

kuvataan termillä viruminen joka tarkoittaa maapartikkeleiden hidasta järjestäytymistä. Viruminen on prosessina niin hidas ettei sillä ole vaikutusta painesuhteisiin. Virumista tapahtuu yleisesti kun paine on 80% esikonsolidoinnin paineesta (Bergdahl et al. 1997). Paineen laskeminen alle 80% esikonsolidoinnin paineesta on mahdollista jos savi lämmitetään yli 80 °c lämpötilaan (Bergdahl et al. 1997)

Kokonaispainuma (S) lasketaan kaavalla:

$$S = S_i + S_p + S_T + S_s$$

jossa

S_i = esikonsolidointi (mm)

S_p = konsolidaatiopainuma (mm)

S_T = leikkausjännityksen aiheuttama painuma (mm)

S_s = sekundääripainuma eli jälkipainuma (mm)

Kaava 7: Kokonaispainuma (Bergdahl et al 1997)

Kokoonpuristuvuusindeksi C_c on kansainvälisesti käytetyin hienojakoisen maan painumaominaisuuksia kuvaava parametri.

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta(\log_{10}\sigma)}$$

Normaalisti konsolidoituneet postglasiaaliset pehmeät savet eivät kuitenkaan käyttäydy kuten C_c -malli edellyttää. Konsolidoituneita postglasiaalisia pehmeitä savia ovat esimerkiksi suomalaiset rannikkosavet. Suomen savissa kokoonpuristuvuusindeksin C_c :n ja vesipitoisuuden $W\%$ välille on löydetty likimääräinen yhteys:

$$C_c = 0,85\sqrt{w^3}$$

$$e_0 = 2,65w$$

$$\Delta h = \frac{0,85\sqrt{w}}{2,65 + \frac{1}{w}} \text{Log} \frac{\sigma_c + \Delta\sigma}{\sigma_c} h$$

Konsolidaatiojännityksen (σ_c) ylittävät kuormitukset aiheuttavat painumaa.

Painumat voidaan tällaisissa korkean lämpötilan lämpövarastoissa minimoida kohdistamalla painoa saveen ennen korkealämpöisen lämpövaraston putkitusta. Tätä esikonsolidointia on kokeiltu korkealämpöisen lämpövaraston rakentamisessa ruotsissa. Esikonsolidoitava lämpövarasto myös viemäroitiin vertikaalisilla reijitetyillä viemäriputkilla jotta esikonsolidoinnin aikana savesta poistuva vesi pääsisi purkautumaan ulos savesta (Gabrielsson 2000).

Jos lämpövarastosta otettaisiin niin paljon lämpöä että saven huokosissa oleva vesi jäätyisi, se johtaisi jälleen veden laajenemiseen. Saven huokosissa olevan veden jäätyminen aiheuttaa, painumisen lisäksi, epämuodostumia jotka voivat esimerkiksi energiapaa-luja käytettäessä vaikuttaa paalujen kantavuuteen. Jäätyminen aiheuttamat ongelmat koskevat niin matala- kuin korkealämpötilaisia lämpövarastoja.

Ruotsalaisessa 1980-luvulla toteutetussa matalalämpöisessä (32 °c) lämpövarastossa saven painaumiksi mitattiin, kahden vuoden lataus ja purkusyklien jälkeen, lämpövaraston keskipisteessä 120 mm ja reunamilla 40 mm. Lämpövaraston vaikutusalueen ulkopuolella olevan maan alueelliseksi painaumaksi mitattiin samaan aikaan 30 mm (Bergensstahl et al. 1990). Näiden mittausten perusteella matalalämpöisten lämpövarastojen painumat ovat mahdollisia mutta marginaalisia. Kohteessa lämmönsiirtonesteen korkein lämpötila oli rajoitettu 40 °c asteeseen (Dahlöf et. al 1986).

Lämmön siirtyminen savesta tapahtuu vielä 30 °C lämpötilassa johtumalla. Sitä korkeammilla lämpötiloilla lämmönsiirtoa alkaa tapahtumaan myös höyrydiffuusiolla jonka seurauksena lämpövaraston ylemmät osat saattavat kuivua. Saven mahdollinen kuivuminen heikentää saven lämmönjohtavuutta ja voi siten haitata lämpövaraston toimintaa (Bergdahl et al 1997).

6 LÄMPÖVARASTON MUOTOILU

Lämpövaraston muotoiluun vaikuttavat jokaisen kohteen ainutlaatuiset tekniset sekä taloudelliset yksityiskohdat kuten maaperätyyppi, paalujen rakennustekninen mitoitus ja sijoittelu, lämpövarastoa hyödyntävän rakennuksen lämpötase jne. Kun näiden parametrien oletetaan olevan vakioita, jäljelle jää edelleen optimaalisen lämpövaraston muotoilun sääntöjä joiden yhteensovittaminen on matemaattinen yhtälö (Nordell 1994).

6.1 Lämpövaraston geometrinen malli

Lämpövaraston optimaalinen muoto on pallo jonka keskellä on kuuma ja joka kylmenee ulospäin. Käytännössä pallon muotoon ei päästä joten lämpövarastot toteutetaan muodoissa jotka ovat lähimpänä pallon muotoa. Suurin osa olemassa olevista lämpövarastoista on toteutettu kuusikulmioina. Lämpövaraston optimaaliseen geometriseen malliin vaikuttavat kohdekohtaisesti maaperän ominaisuudet, putkistojen virtaamat sekä lämpötilat (Nordell 1994).

Maan lämpötila (T) lämpövaraston ulkopuolella voidaan laskea kaavasta (Bergdahl et al 1997):

$$T(x, t) = T_1 * e^{-\frac{x}{dp}} * \sin\left(\frac{2\pi}{tp} - \frac{x}{dp}\right)$$

$$dp = \sqrt{a * tp / \pi}$$

T_1 = lämpövaraston lämpötilan vaihteluväli (k)

t = aika (h)

dp = termisen vaikutuksen syvyys (m)

a = terminen diffusiviteetti (w/mk)

x = etäisyys metreissä (m)

Kaava 8: Maan lämpötila lämpövaraston ulkopuolella (Bergdahl et al. 1997).

6.2 Kollektoreiden etäisyys toisistaan

Kohteissa joissa kollektorit porataan maahan ja kollektoreiden asettelu on vapaa, kollektoreiden keskinäinen etäisyys määritetään niin että lämpövarastosta hyötykäyttöön otettava lämpö saadaan riittävän lämpimänä silloin kun lämpö tarvitaan (Bergdahl et al 1997). Usein lämpövarasto rakennetaan kuitenkin energiapaaluilla, jolloin paalut on aseteltu rakennusteknisistä syistä johonkin muotoon ja lämpövaraston suunnittelun yksi reunaehto on että paalut ovat käytettävissä mutta paalupiirustuksen mukaisesti sijoitettuna (Brandt 2020). Kun kollektoreiden keskinäiseen etäisyyteen ei voida vaikuttaa, työkaluiksi jäävät energiapaalujen virtausjärjestys, virtaamat sekä lämpötilat (Nordell 1994).

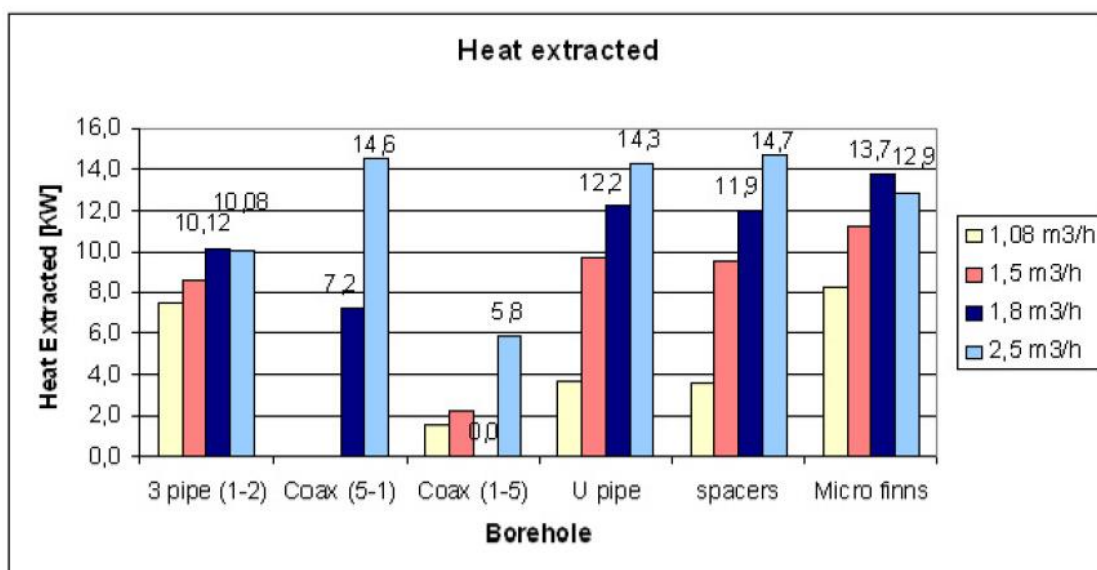
6.3 Lämpövaraston etäisyys maanpinnasta

Lämpövaraston sijaitessa paaluperustuksissa, rakennuksen alla, etäisyydellä maan pintaan ei ole merkitystä koska lämpövaraston yläpuolella sijaitsevan rakennuksen alapohja on eristetty ja rakennuksen lämpötila on tasainen (Arola et al. 2017). Lämpövaraston sijaitessa muualla kun rakennuksen alla, lämpövaraston etäisyys maan pinnasta on merkityksellinen sikäli kun lämpövarastoa ei ole mahdollista eristää yläpuolelta (Nordell 1994).

6.4 Lämpövaraston nestevirtaamat

Maalämpöputkien muodon ja virtaaman vaikutusta lämmönsiirron tehoon on tutkittu Ruotsin Kungliga Tekniska Högskolanissa. Tutkimusten tulos on että eri tyyppiset putket eroavat toisistaan lämmöntuotossa. Virtaamalla on myös merkittävä vaikutus putkien lämmöntuottoon. Lisäksi eri tyyppisten putkien lämmöntuotto reagoi eri tavalla muutoksiin virtaamassa. Kungliga Tekniska Högskolanin tekemässä mittauksessa verrattiin eri muotoisia 40 mm kollektoriputkia eri virtaamilla samanlaisessa 260 metriä syvässä porakaivossa.

Heat Extracted from Boreholes



Kuva 15 Erityyppisten kollektoriputkien lämmöntuottoja eri virtaamilla (Acuna et al. 2008)

6.5 Tavallinen U-putki

Putken sisäpinnasta sileällä U-kollektorilla paras tuotto (55 W/m) saavutettiin 0,7 litran virtaamalla. Virtaaman laskiessa 0,5 litraan tuotto laski 15%:lla (47 W/m). Kyseisen putken virtaama on selvästi turbulenttisella alueella ($Re > 3600$) maalämpöalalla käytännöksi muodostuneella 0,7 litran virtaamalla. Kun virtaama lasketaan alle 0,5 litraan, Reynoldsin luku on enää 2572 ja ollaan todella lähellä laminaarista virtaamaa (Acuna et al. 2008).

6.6 Kierteitetty putki

Putki jonka sisäpuolisessa pinnassa on muoviiin muotoillut kierteet jotka pakottavat fluidin pyörteilemään turbulenttisesti pienemmillä virtaamilla. Kungliga Tekniska Högskolanin mittauksessa kierteitetty kollektoriputki saavutti parhaimman lämmöntuoton (53 W/m) virtaamalla 0,5 litraa sekunnissa. Toisin kuin tavallisella U-kollektorilla, virtaaman kasvattaminen 0,5 litrasta sekunnissa pienensi lämmöntuottoa. Kierteitetty kollektoriputki

mahdollistaa saman lämmöntuoton pienemmällä virtaamalla ja säästää siksi pumppauskustannuksissa (Acuna et al. 2008).

6.7 Spacer-putki

Geopipe Oy valmistaa maalämpöputkea jossa meno- ja paluuputkien välissä on 7 mm muovikaistale joka pitää putket erillään. Näin vältetään ”oikosulkuvirtaus” joka syntyy kun meno- ja paluuputki siirtävät lämpöä suoraan toisiinsa. Lisäksi Geopipen ovaali maalämpöputki maksimoi maalämpöputken pinta-alan porakaivossa. Lämmön siirtyminen tapahtuu suhteessa lämmönsiirron pinta-alaan ja maksimoimalla pinta-ala maksimoidaan myös lämmönsiirto. Kun porakaivo on täytetty maalämpöputkella, kaivoon ei enää mahdu kovin paljon muuta. Putki on täten hyvin lähellä kalliota, jonka lämmönjohtavuus on 3,4 W/mK. Veden lämmönjohtavuus on 0,6 W/mK ja tavanomainen U-putki on tavanomaisessa porakaivossa nimenomaan vedessä. Putkien sijainnista porakaivossa riippuen kollektorin ympärillä voi olla hyvinkin paljon vettä. Pahimmillaan kollektoriputket ovat toisiinsa kietoutuneina keskellä isoa, vedellä täyttynyttä, porakaivoa. Tällaisessa tilanteessa iso osa lämmöstä siirtyy putkesta putkeen, putkien välissä sijaitsevan ohuen vesivaipan välityksellä. Selvästi vähemmän lämpöä siirtyy paksumman vesivaipan takana olevasta kalliosta (Geopipe 2020).

6.8 Muut putket

Uponor on käyttänyt energiapaaluissa 25 mm ristosillotettua polyeteeniputkea (PEX-putkea). PEX-putki kestää pitkäaikaisesti 343 kelvinin lämpötilaa ja lyhyellä aikavälillä jopa 368 kelviniä. Materiaalina PEX-putki ei ole optimaalinen sikäli että sen lämmönvastus on korkeampi kun tavallisen polyeteeniputken lämmönvastus. PEX-putki on myös hinnaltaan kalliimpaa kun PE-RT-putki.

7 LÄMPÖVARASTON MITOITUS

Lämpövaraston mitoitus on kolmen muuttujan summa: maahan siirretty lämpöenergia Q_m (Joulea), maan lämmönjohtavuus k (W/mK) sekä maa-aineksen lämpökapasiteetti suhteessa tilavuuteen C_v (Joulea/m³K) (Nordell 1994).

7.1 Konvektio

Lämmön siirtyminen kollektoriputken pinnasta virtaavaan nesteeseen tapahtuu pakotettuna konvektiona. Kollektoriputki on muodoltaan lieriö jonka lämpöä johtava pinta-ala lasketaan

$$A = 2\pi rL$$

Putken sisäpuolinen pinta-ala on pienempi kuin putken ulkopuolinen ja siksi lieriön seinämän läpi kulkeva lämpöteho lasketaan logaritmisesti kaavalla

$$\phi = \frac{2\lambda\pi L}{\ln(r_2/r_1)} (T_1 - T_2)$$

Jossa

ϕ = Lieriön seinämän läpi kulkeva lämpöteho (W)

r^1 = säde putken keskipisteestä putken sisäpintaan (m)

r^2 = säde putken keskipisteestä putken ulkopintaan (m)

λ = Putkimateriaalin lämmönjohtavuus (w/mk)

L = Lieriön pituus (m)

Kaava 9: Lieriön seinämän läpi kulkeva lämpöteho. (Kotiaho et al. 2014).

Lämmön siirtyminen savesta kollektoriputken seinämään ja seinämän läpi kollektoriputken sisällä virtaavaan nesteeseen laskemiseen käytetään dimensiottomia suureita kuten Reynoldsin, Nusseltin sekä Prandtlin luku (Hokajärvi 1987).

Reynoldsin luvusta riippuen virtaus on joko laminaarinen tai turbulentti. Laminaarisessa virtauksessa lämmön siirtyminen tapahtuu ainoastaan johtumisena joka ei ole kovin tehokasta. Turbulenttisessa virtauksessa lämpö siirtyy kuljettumalla, eli konvektiolla. Rajarvona laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen välillä voidaan käyttää Reynoldsin lukua 2300 jota alemmat virtaamat ovat laminaarisia. Reynoldsin luvun ollessa lukujen 2300 ja 4000 välillä voi virtaus olla laminaarinen tai turbulenttinen. Reynoldsin luvun ollessa yli 4000 virtaus on aina turbulenttinen (Hokajärvi 1987).

Reynoldsin luku lasketaan kaavalla:

$$Re = \frac{dv\rho}{\eta}$$

Jossa

d on putken halkaisija (m)

v on virtauksen nopeus (m/s)

ρ on fluidin tiheys (kg/m³)

η on fluidin dynaaminen viskositeetti (Pa*s)

Kaava 10: Reynoldsin luku (Kotiaho et al. 2014).

Turbulenttisen virtauksen lämmönsiirtokerroimen laskemiseksi käytetään Nusseltin lukua jonka kaava on

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 0,037 (Re^{0,75} - 180) Pr^{0,42}$$

Jossa

α on lämmönsiirtokerroin W/(k*m)

d virtauskanavan halkaisija (m)

λ fluidin lämmönjohtavuus (W/mk)

Kaava 11: Nusseltin luku (Hokajärvi 1987).

Nusseltin lukua käytetään kuvaamaan lämpöä siirtävän pinnan lämmönsiirtoa suhteessa tilanteeseen, jossa tapahtuisi vain lämmön johtumista (Hokajärvi 1987).

Prandtlin lukua käytetään laskemaan kinemaattisen viskositeetin suhdetta lämpötilanjohtavuuteen (Hokajärvi 1987).

$$Pr = \frac{\eta C_p}{\lambda}$$

Jossa

η = dynaaminen viskositeetti (Pa*s)

C_p = fluidin lämpökapasiteetti (j/kgk)

λ = fluidin lämmönjohtavuus (W/mk)

Kaava 12: Prandtlin luku (Hokajärvi 1987).

7.2 Epästationääri lämmönsiirto

Lämmön siirtyminen kollektoriputken pinnasta saveen tapahtuu johtumalla. Lämmönjohtuminen savessa lasketaan Fourierin termisen diffusiviteetin yhtälön avulla (Lienhard et al. 2015).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$$

α on termien diffusiviteetti (m²/s)

λ on lämmönjohtavuus (W/mk)

ρ on kappaleen tiheys (kg/m³)

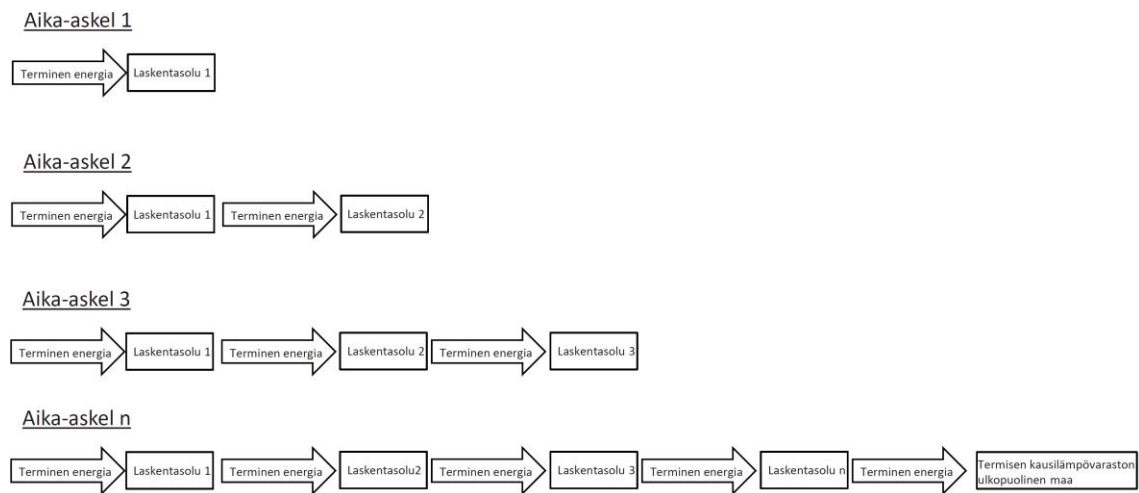
C_p on kappaleen ominaislämpökapasiteetti (J/kgk)

Kaava 13: Fourierin yhtälö (Lienhard et al. 2015).

Epästationääriksi lämmönsiirroksi kutsutaan lämmönsiirtoa missä lämpövoa tai lämpötilat muuttuvat ajan suhteessa missä tahansa systeemin pisteessä. Lämmön siirtyminen

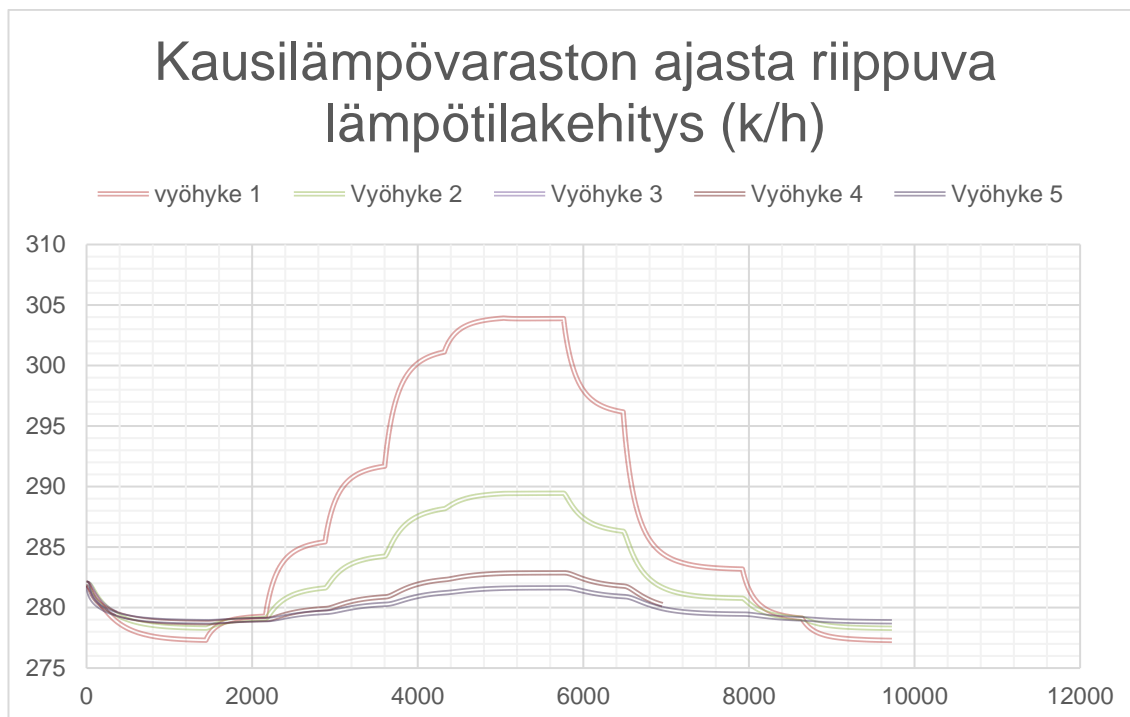
riippuu lämpötilasta jolla lämpöä siirretään sekä lämmönsiirron kohteen lämpötilasta hetkenä jona lämpöä siirretään (Lienhard et al. 2015).

Laskentaa varten lämmön siirron kohde jaetaan laskentasuoihin joissa lämpötilakehitys jokaisella aika-askeleella lasketaan erikseen. Laskenta tehdään numeerisesti ratkaisemalla kullekin solulle kunkin aika-askeleen mukainen energiatase alla olevan kaavion mukaisesti. Solut linkittyvät toisiinsa solujen välissä olevan pinnan energiavirtojen avulla. Solujen aika-askeleiden laskentakaavat eroavat sijaintinsa perusteella toisistaan (Sandberg 2016).



Kaavio: Epästationääri lämmönsiirto

Saven lämmönjohtavuudesta ja ajan hetkestä riippuen solut lähimpänä lämmönlähdettä lämpenevät ja jäähtyvät enemmän kuin solut kauempana lämmönlähteestä.



Kuva 16 Kausilämpövaraston eri vyöhykkeiden lämpötilat (k) tuntitasolla vähän yli vuoden ajalta. Kaavio opinnäytetyön osana tehdystä Excel-työkalusta.

Lähimpänä lämmönlähdettä sijaitsevien laskentasuojien johtumislämpö lämmönlähteen pinnasta lämmönsiirron kohteeseen lataustilanteessa lasketaan epästationääriin lämmönsiirron laskentakaavalla

$$\dot{q}^1 = \left((\alpha A \cdot (T^0 - T^1)) * \Delta t \right) - \left(\frac{\lambda}{L} A (T^1 - T^2) * \Delta t \right)$$

jossa

$$\dot{q}^1 = \text{Johtumislämpövirta lämmönlähteestä ensimmäisiin laskentasuoihin (W)}$$

$$\alpha = \text{Lämmönsiirtokerroin } \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

$$A = \text{Laskentasuojen ja lämmönlähteen välinen lämmönsiirron pinta - ala (m}^2\text{)}$$

$$T^0 = \text{Laskentasuojen lämpötila ennen lämmönsiirtoa (k)}$$

$$T^1 = \text{Laskentasuojen lämpötila aika - askeleella yksi (k)}$$

$$\Delta t = \text{Aika askel sekunneissa (s)}$$

$$\lambda = \text{Lämmönjohtavuus } \left(\frac{W}{mk}\right)$$

$L = \text{Laskentasolun lämpövirran suuntainen pituus (m)}$

$T^2 = \text{Toisen laskentasolun lämpötila aika – askeleella 1}$

Kaava 14: Epästationääri lämmönsiirto (Lienhard et al. 2015).

Solun lämpötilan muutos aika-askeleessa lasketaan jokaiselle solulle jokaisella aika-askeleella solun ominaisuuksien perusteella käyttäen kaavaa

$$\Delta T = \frac{\dot{q}}{V\rho C_p}$$

Jossa

$\Delta T = \text{muutos laskentasolun lämpötilassa (K)}$

$\dot{q} = \text{netto lämpövirta laskentasoluun aika – askeleessa (W)}$

$V = \text{Laskentasolun tilavuus (m}^3\text{)}$

$\rho = \text{Laskentasolun aineen tiheys (kg/m}^3\text{)}$

$C_p = \text{Laskentasolun aineen ominaislämpökapasiteetti (J/kgK)}$

Kaava 15 Laskentasolun lämpötilanmuutos aika-askeleessa (Lienhard et al. 2015)



Kuva 17 Saven lämpötilakehitys 1 metrin etäisyydellä 1,5 vuoden ajalta pisteessä 5 metrin syvyydessä. Opinnäytetyön osana tehdyn excelin kaavio.

Lämmönlähteestä etäännyvässä suunnassa seuraavan laskentasolun lämmönsiirto aika-
askeleessa lasketaan kaavalla

$$\dot{q}^1 = \left(\frac{\lambda}{L} A(T^1 - T^2) * \Delta t \right) - \left(\frac{\lambda}{L} A(T^2 - T^3) * \Delta t \right)$$

$\dot{q}^1 =$ Johtumislämpövirta ensimmäisistä laskentasoluista toisiin

laskentasoluihin aika – askeleessa

$A =$ Laskentasolujen välinen lämmönsiirron pinta – ala (m²)

$T^1 =$ Ensimmäisen laskentasolun lämpötila aika – askeleessa (k)

$T^2 =$ Toisen laskentasolun lämpötila aika – askeleessa (k)

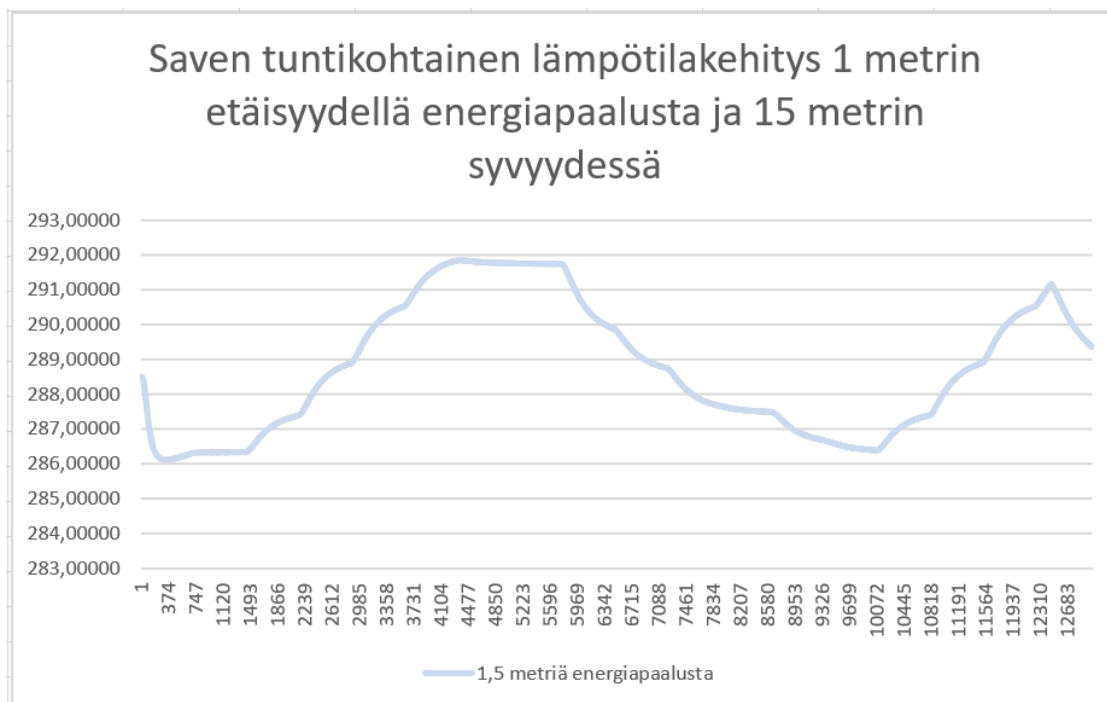
$\Delta t =$ Aika askel sekunneissa (s)

$\lambda =$ Lämmönjohtavuus ($\frac{W}{mk}$)

$L =$ Laskentasolun lämpövirran suuntainen pituus (m)

$T^3 =$ Kolmannen laskentasolun lämpötila aika – askeleessa (k)

Kaava 16 Seuraavan laskentasolun lämmönsiirto aika-askeleessa (Lienhard et al. 2015)



Kuva 18 Saven lämpötila 15 metrin syvyydessä, pisteessä 1,5 metrin päässä energiapaalusta. Opinnäytetyön osana tehdyn excelin kaavio.

Ajasta riippuvassa lämmönsiirrossa laskennan tulokset ovat sitä tarkempia mitä tiheämpi on laskentaverkko, joka on yksinkertaistus tilan geometriasta. Aika-askel jolla lämmönsiirtoa lasketaan vaikuttaa myös tulosten tarkkuuteen. Mitä pienempiä soluja ja mitä pienemmällä aika-askelilla lämmönsiirto lasketaan, sitä isompi laskentateho tarvitaan lämmönsiirron laskemiseen (Sandberg, 2016).

7.3 Tehomitoitus

Kollektoriputket pystyvät siirtämään maahan/ottamaan maasta tietyn määrän energiaa. Lämmön siirtymiseen vaikuttavat kollektoriputken ominaisuuksien ja maaperän ominaisuuksien lisäksi lämpötilasuhteet sekä nestevirtaamat. Lämpövarastoja suunniteltaessa ja mitoitettaessa on tärkeää laskea maan lämpötilat dynaamisesti jotta maaperän

lämpötilat mitoitusolosuhteissa ovat tiedossa. Maalämpöjärjestelmien mitoituksessa yleisesti käytettävät 40 W/m lämpöteho-oletukset ovat lämpövaraston mitoituksessa huono lähtötieto koska lämpövarastosta ei oteta maasta peräisin olevaa geotermistä lämpöä vaan sinne kesällä jostakin lämmönlähteestä samalla järjestelmällä ladattua lämpöä.

7.4 Vuosikulutus pohjainen mitoitus

Maalämpöjärjestelmien mitoituksessa vuositasolla maasta otettavissa olevan lämpöenergian määrään on olemassa lukuisia nyrkkisääntöjä, joista yleisin on 100 kWh/m. Joissakin olosuhteissa tämä nyrkkisääntö pitää paikkansa. Suurimmassa osassa kohteita se on kuitenkin huono mitoitusperuste. Vuosikulutus pohjainen mitoitus ainoana mitoitusperusteena johtaa maalämpöjärjestelmissä usein siihen että porakaivot eivät mitoitusolosuhteissa pysty tuottamaan sitä määrää lämpöä mitä kohde tarvitsee. Pahimmillaan vuosikulutukseen perustuva mitoitus voi aiheuttaa porakaivojen jäätyksen joka vanhanaikaisissa yhteen suuntaan toimivissa maalämpöjärjestelmissä on todellinen ongelma.

Lämpövaraston mitoituksessa edellä mainituilla maalämpöjärjestelmien nyrkkisäännöillä on vielä vähemmän relevanssia. Lämpövaraston mitoitus lähtee aina dynaamisesta laskennasta. Lämpövaraston mitoitusvaiheessa on oltava tiedossa paljonko lämpövarastosta otetaan lämpöä ja koska. Sen lisäksi on oltava tiedossa paljonko lämpöä varastoon ladataan ja koska se tapahtuu. Näiden tietojen perusteella on mahdollista tehdä lämpövarastosta simulointi josta pystytään näkemään lämpövaraston lämpötilat eri olosuhteissa, samoin kun lämpövarastosta kullakin hetkellä saatavilla olevan lämpöenergian lämpötila. Lämpötilojen tarkka laskenta korostuu järjestelmissä joissa ei ole lämpöpumpuja nostamassa lämpövarastosta tulevan nesteen lämpötilaa.

8 LÄMPÖVARASTON RAKENNUSKUSTANNUKSET

Energiatehokkuusdirektiivillä EU:n komissio ohjaa jäsenvaltioita löytämään taloudellisesti kannattavia tapoja toteuttaa rakennusten syviä energiakorjauksia (EU komissio 2012/27). Syvät energiakorjaukset tarkoittavat perinteisiä sekä innovatiivisia toimenpiteitä joita yhdistelemällä vanhoja rakennuksia voidaan muuttaa nollaenergiarakennuksiksi (EU komissio 2010). Yksi innovatiivinen ja kustannustehokas toimenpide jolla vanhoja rakennuksia voidaan muuttaa nollaenergiarakennuksiksi on ottaa talteen isoja määriä uusiutuvaa lämpöenergiaa kesällä ja varastoida se talvea varten (Arola et al. 2018). Lämpövarasto voi kuitenkin olla rakennuskustannuksiltaan myös kallis investointi jos rakennusta ei optimoida kokonaisuutena. Ilman taloudellista rakennuskustannusten optimointia, tavallisen lvi-suunnittelun ohessa tehtävänä suunnitteluna lämpövaraston rakennuskustannukset voivat olla jopa kaksinkertaiset optimoituun verrattuna. Korkeampi hinta ei edes näy parempana hyötysuhteena vaan väärin mitoitettu lämpövarasto jää teholtaan jopa 60%:iin siitä miten optimoitu järjestelmä suoriutuu. Tähän on useita syitä, joista vähäisin ei ole se että lämpövarasto on erikoissuunnittelua jota tavalliselta lvi-suunnittelijalta ei voida vaatia ilman asianmukaista koulutusta sekä tarvittavaa ohjelmistoa (Brandt 2020).

8.1 Lämmön käyttökohteen simulointi ja optimointi

EU komissio suosittaa että ennen kuin uusiutuvaan energiaan perustuvat järjestelmät mitoitetaan lämmittämään rakennusta, energian tarve minimoidaan energiatehokkuuden avulla (EU komissio 244/2012). Suunnittelija määrittää kustannustehokkaimman tavan muuttaa rakennus nollaenergiarakennukseksi käyttämällä apunaan energiatehokkuustoimenpiteitä. Tällaisia energiatehokkuustoimenpiteitä voivat olla perinteiset energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet kuten lisäeristys tai ikkunaremontti mutta myös innovatiivisia kuten esimerkiksi kausilämpövarasto (EU komissio 2010). Energiatehokkuustoimenpiteiden määrä jotka optimoinnissa otetaan huomioon ratkaisee onko kyseessä rakennuksen todellinen kustannustehokkuuden optimointi vai pelkkä osa-optimointi (Penna et al. 2015). Mitä isompi määrä energiatehokkuustoimenpiteitä otetaan huomioon laskennassa, sitä enemmän työaikaa tarvitaan laskelmien tekemiseen ja tilanne jossa rakennuksen kaikki energiatehokkuustoimenpiteet oikeasti optimoidaan, työmäärä on mahdoton (Penna et al. 2015).

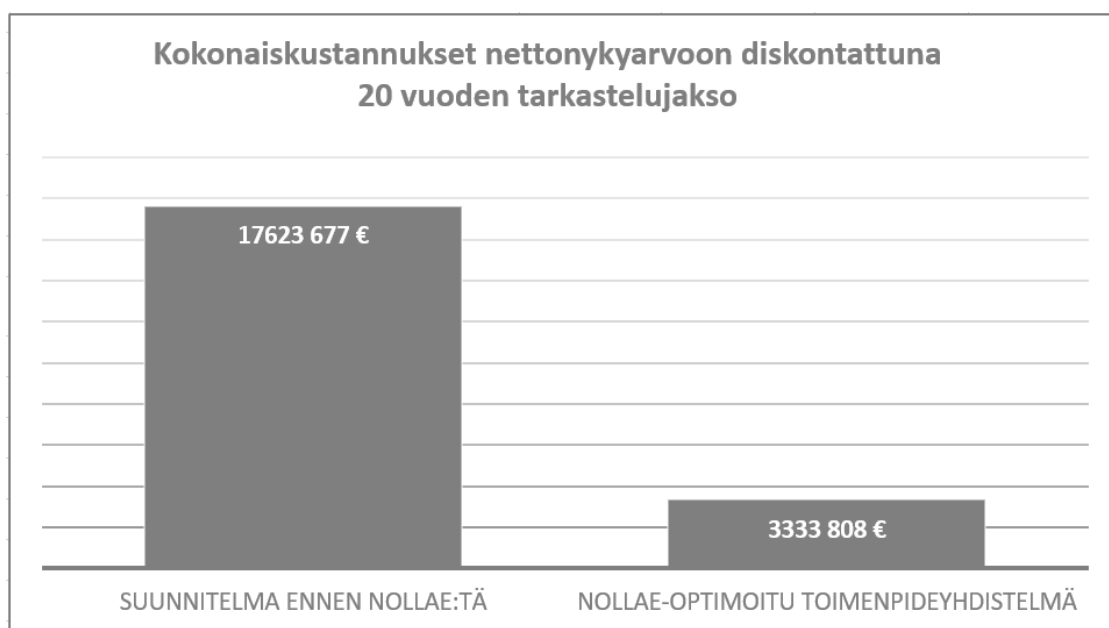
8.1.1 Monitavoiteoptimointi

Taloudellisesti kannattavimman toimenpideyhdistelmän löytämisessä kohdataan optimointi-ongelma joka johtuu useista keskenään ristiriitaisista tavoitteista (Diakaki et al. 2008). Yksinkertaisimmillaan on kyse pareto-optimoinnista jossa yritetään löytää optimaalisin tasapaino investointikustannuksen ja toisaalta energiakustannusten välillä (Costa-Carrapico et al. 2019). Muita optimoinnissa keskenään ristiriitaisia tavoitteita ovat vähähiilisyys, sisäilmaolosuhteet, rakennuksen käytettävyys, rakennuksen viihtyisyys sekä rakennusfysikaalinen toimivuus (Penna et al 2015). Monien, keskenään ristiriitaisien tavoitteiden samanaikaista optimointia kutsutaan monitavoiteoptimoinniksi (Diakaki et al. 2008). Monitavoiteoptimoinnin dilemma on että tarkkuus jolla saadaan päätöksentekoa varten riittävän todellisuutta vastaava tulos aiheuttaisi kohtuuttoman määrän työtä. Toisaalta yksinertaistamalla työmäärä vähenee mutta toisaalta tulokset ovat niin teoreettiset että niillä ei ole lisäarvoa todellisen maailman monimutkaisessa ongelmanratkaisussa. Geneettiset algoritmit ovat avain sellaisiin optimointituloksiin joilla on riittävä relevanssi päätöksenteon tukena mutta joissa työmäärä silti pysyy kohtuullisena (Costa-Carrapico et al. 2019).

8.1.2 Sijoitetun pääoman tuotto

Taloudellisesti kannattavin yhdistelmä pitkällä aikavälillä ei ole se toimenpideyhdistelmä jolla on paras sijoitetun pääoman tuotto, koska se joissakin tapauksissa voisi johtaa lyhytnäköisiin ratkaisuihin (Diakaki et al. 2008). Tyypillinen lyhytnäköinen ratkaisu on tehdä vain pieni muutos isoon rakennukseen, jolloin vaikutus kokonaisenergiankulutukseen on marginaalinen, mutta sijoitetun pääoman tuotto hyvinkin korkea, usein yli 100%. Tarkasteluvälin pituus ohjaa päätöksentekoa pois lyhytnäköisistä ratkaisuista (Diakaki et al. 2008). Taloudellisesti kannattavin toimenpide ei ole myöskään se yhdistelmä jolla saadaan pienimmät kokonaiskustannukset laskentajaksolle, koska se suosisi vastavasti toimenpideyhdistelmiä jotka ovat investointikustannuksiltaan niin isoja että rakennuttajissa harvoin löytyy investointihalukkuutta niin mittaviin taloudellisiin ponnistuksiin (Wahlström 2017). Optimointilaskennassa käytetty sisäinen korkokanta rajaa tällaiset toimenpideyhdistelmät pois pienentämällä kaukana tulevaisuudessa siintävien tuottojen arvoa suhteessa lähitulevaisuudessa syntyihin tuottoihin (Wahlström 2017). Siltä osin

kun energiatehokkuuteen tehdyillä investoinneilla on teknistä käyttöikää jäljellä tarkastelujakson jälkeen, siitä otetaan huomioon vain nettonykyarvo (Wahlström 2017).



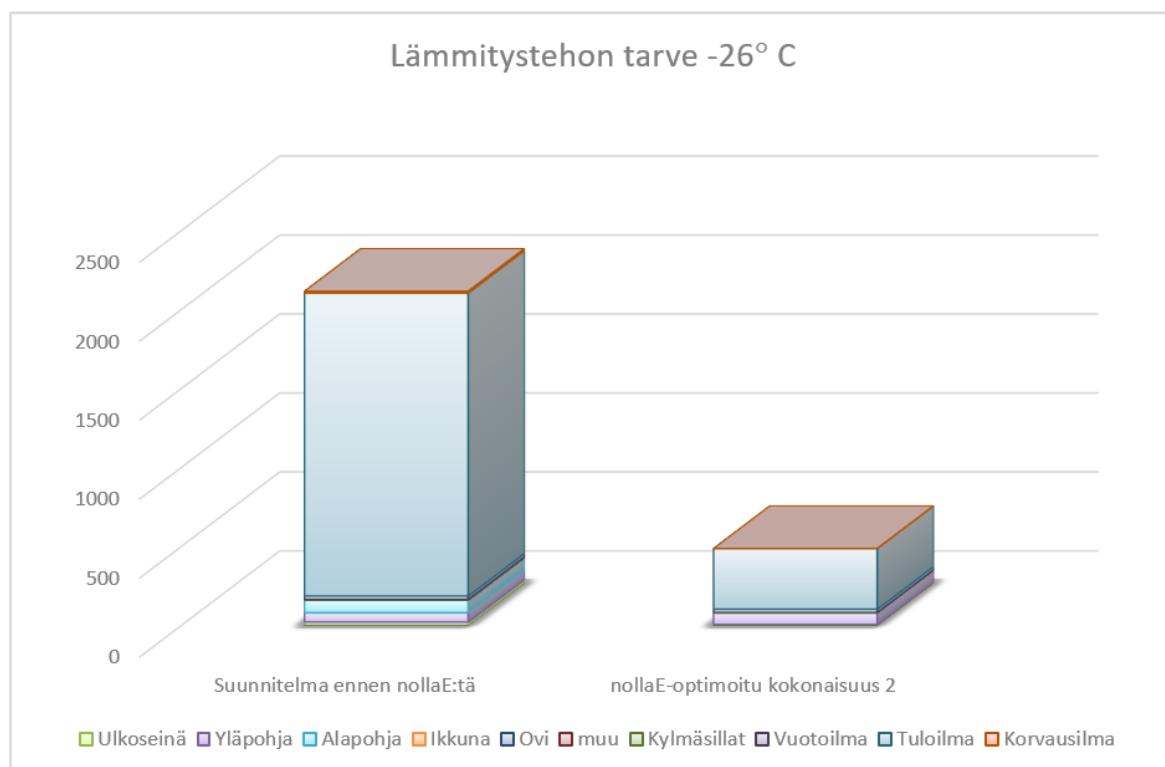
Kuva 19: Kokonaiskustannukset nettonykyarvoon diskontattuna, nollaE-ohjelmisto 2020

Nettonykyarvoon diskontattu	suunnitelma ennen nollaE:tä	nollaE-optimoitu toimenpideyhdistelmä
Investointikustannus	4 195 000 €	5 970 000 €
Kustannukset vuosi 1	839 243 €	189 366 €
Kustannukset vuosi 2	842 917 €	186 627 €
Kustannukset vuosi 3	846 716 €	183 951 €
Kustannukset vuosi 4	850 640 €	181 338 €
Kustannukset vuosi 5	854 689 €	178 785 €
Kustannukset vuosi 6	858 861 €	176 292 €
Kustannukset vuosi 7	863 156 €	173 858 €
Kustannukset vuosi 8	867 575 €	171 482 €
Kustannukset vuosi 9	872 116 €	169 162 €
Kustannukset vuosi 10	876 780 €	166 899 €
Kustannukset vuosi 11	881 565 €	164 689 €
Kustannukset vuosi 12	886 472 €	162 534 €
Kustannukset vuosi 13	891 500 €	160 432 €
Kustannukset vuosi 14	896 650 €	158 381 €
Kustannukset vuosi 15	901 920 €	156 381 €
Kustannukset vuosi 16	907 311 €	154 431 €
Kustannukset vuosi 17	912 823 €	152 531 €
Kustannukset vuosi 18	918 455 €	150 678 €
Kustannukset vuosi 19	924 207 €	148 874 €
Kustannukset vuosi 20	930 079 €	147 116 €
Yhteensä	17 623 677 €	3 333 808 €
Ostoenergia, kWh/a	11 070 311	413 954

Kuva 20: Vuosittaiset kokonaiskustannukset nettohyötyarvoon diskontattuna, nollaE-ohjelmisto 2020

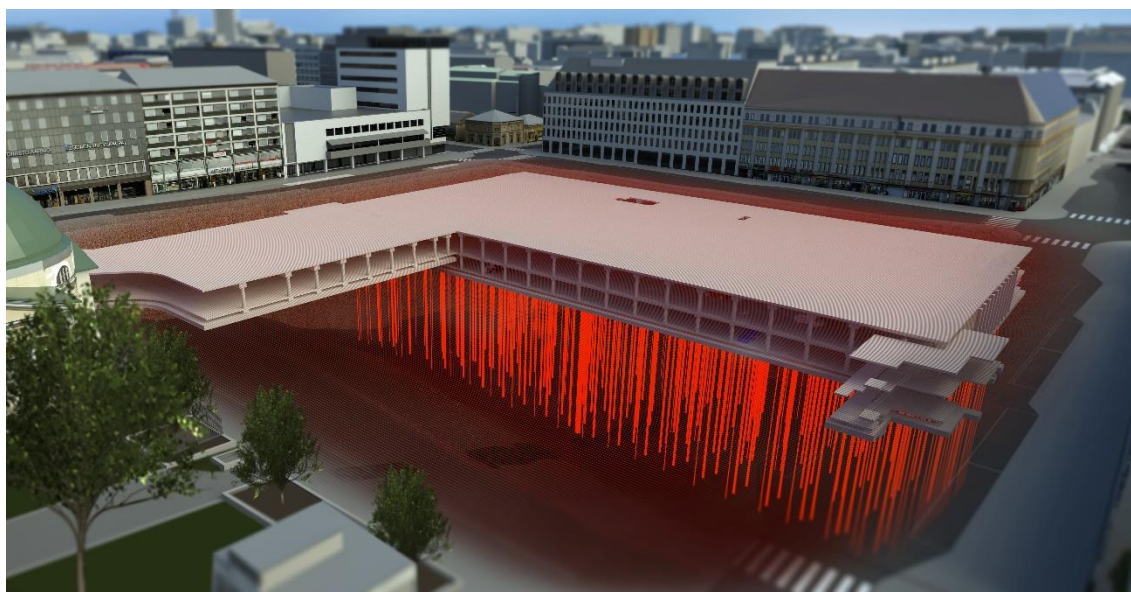
8.1.3 Maanalaisen pysäköintilaitoksen monitavoiteoptimointi

Kausilämpövaraston mitoituksessa lähtökohtana pitää olla lämmitettävien rakennusten tuntikohtainen lämmöntarve kullakin ajanhetkellä. Kausilämpövaraston kustannusten optimoinnissa on ensisijaisesti kyse siitä että se rakennetaan oikean kokoiseksi ja tehoiseksi kullakin ajanhetkellä tuottamaan lämmitettävien rakennusten tarvitsema lämpöenergia ja jäähdytysenergia (Wahström 2017). Siten kausilämpövaraston mitoitusta edeltävä vaihe suunnitteluprosessissa on optimoida lämmitettävien rakennusten lämmityksen ja jäähdytyksen tarve. Tämä tehtiin ohjelmistolla joka aloittaa laskemalla rakennusten lähtötilanteen energiankulutuksen ja tuntikohtaisen tehon tarpeen. Energiankulutus ja tuntikohtainen tarve lasketaan standardien SFS-ISO 13370, SFS-EN 13790, SFS 5139, SFS-EN 308:1997, SFS-EN 13141-7, SFS-EN 12464-1, SFS-EN-ISO 13786, SFS-EN ISO 13790, SFS-EN 14511-2:2007, SFS-EN 16147 ja SFS-EN 14511-3 mukaisesti.



Kuva 21: Maanalaisen pysäköintilaitoksen lämmitystehon tarve mitoituslämpötilassa, nollaE-ohjelmisto 2020

Pysäköintihallin lämmitystehon tarve lähtötilanteessa olisi ollut 2,1 MW ja optimoinnin jälkeen lämmitystehon tarve oli enää 480 kW. Ohjelmisto löysi useita toimenpiteitä joiden yhteisvaikutuksesta lämmitystehon tarvetta saatiin tiputettua niin että asiakkaan tuotto-vaatimukset toteutuivat tai ylittyivät. Suurin yksittäinen toimenpide on sulanapitoputkiston käyttäminen kesällä lämmön keräämiseen. Lämpö kerätään sulanapitoputkistossa kiertävällä vesi-glykolinesteellä ja tilanteessa jossa torin pinnan alla kiertävä neste on lämpoisempää kuin pysäköintihallin alla oleva savipatja, lämmin neste jatkaa matkaansa savipatjaan asennettuihin energiapaaluihin. Lämmin neste kulkee energiapaaluissa ja lämmittää paaluja ympäröivää savea niin että saveen jää lämpöä talveksi. Putkitettu alue torin pinnalla on yli 24.000 neliötä joten aurinkolämpökeräimen iso pinta-ala kompensoi sitä että lämmön kerääminen katukivetyksen alta ei ole tehokkain tapa ottaa talteen aurinkolämpöä. Toinen merkittävä toimenpide oli ilmanvaihdon lämmöntalteenotto jonka vaikutus lämmityksen huipputehon tarpeeseen on 1,5 MW.

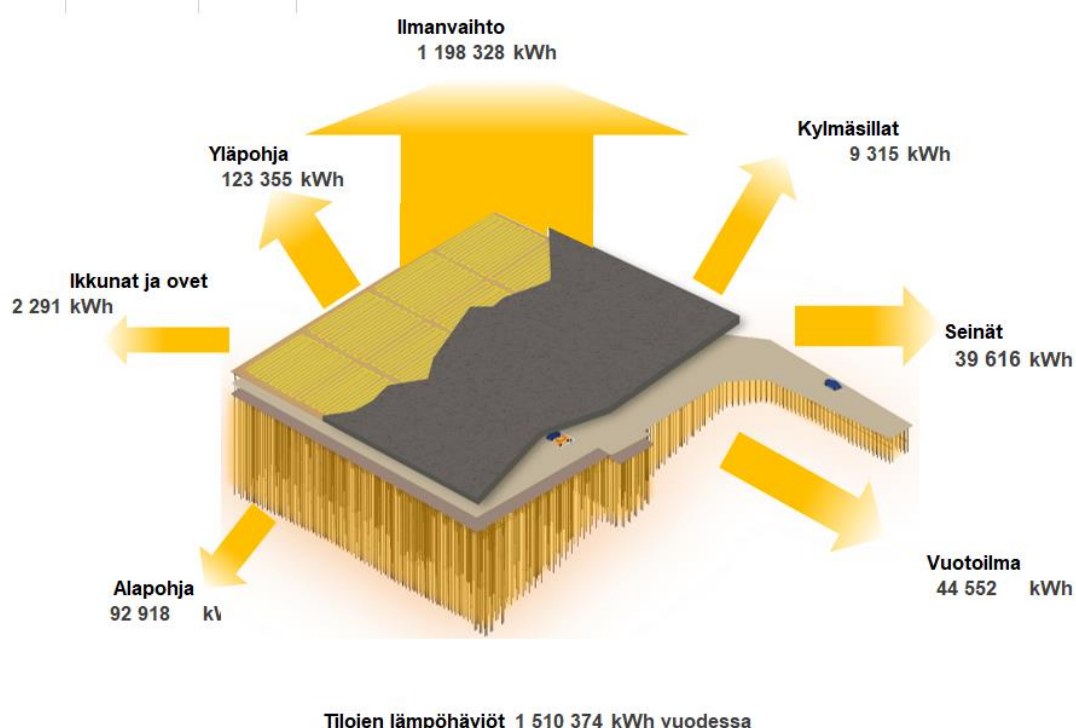


Kuva 22: Toriparkin energiajärjestelmä, nollaE 2020

Pysäköintihallin lisäksi kausilämpövarastoon varastoidulla lämmöllä on tarkoitus toteuttaa pysäköintihallin päällä olevan torin liukkaudenesto. Liukkaudeneston huippulämmitystehon tarve on 7,4 MW. Liukkaudeneston ja pysäköintihallin huipputehon tarpeet

osuvat kuitenkin eri ajankohtiin sillä liukkaudenestoa käytetään ainoastaan -15 asteen ulkolämpötilaan asti. Sen jälkeen liukkaudenesto ei ole käytössä. Suurin lämmitysenergian tarve on lumisateen aikana, jolloin pinnan lämpimänä pitämisen lisäksi lumi täytyy sulattaa. Faasimuutos vaatii paljon enemmän lämpöenergiaa (334 Kj/kg) kuin torin pinnan lämpimänä pitäminen. Torin pinnan lämpimänä pitämisen tarvitsema lämpöteho riippuu tuulen nopeudesta sekä ulkoilman lämpötilasta sekä öisin taivaan pilvisyydestä. Pilvettömältä taivaalta torin pintaa jäähdyttää lämpösäteily avaruuteen.

Kun lähtötilanteen tuntikohtainen tehontarve on laskettu normaalille vuodelle, ohjelmisto alkaa tekemään vaihtoehtoisia ajoja joissa se muuttaa rakennusten teknisiä yksityiskoh-
tia, saaden sitä kautta myös muuttuneita lämmön- ja jäähdytystehon tarpeita. Kun ohjel-
misto on laskenut normaalivuoden kaikilla olemassa olevilla mahdollisilla muutoksilla
joita rakennuksiin voidaan tehdä, se alkaa yhdistelemään muutoksia muutosyhdistel-
miksi. Kausilämpövarasto on yksi toimenpide, osana erilaisia toimenpideyhdistelmiä. Lo-
puksi ohjelmisto esittelee kaikista kymmenistä tuhansista toimenpideyhdistelmistä ne toi-
menpideyhdistelmät jotka ovat taloudellisesti kannattavimpia toteuttaa.



Kuva 23: Maanalaisen pysäköintilaitoksen vuosittaiset lämpöhäviöt, nollaE-ohjelmisto 2020

Ohjelmiston perusoletus on että kausilämpövarasto suunnitellaan tuottamaan juuri sen verran lämpöä ja kylmää mitä rakennus vuoden aikana tarvitsee. Ennen varsinaista detailisuunnittelun aloittamista rakennuksesta tehdään taloudellisesti kannattavimmalla toimenpideyhdistelmällä vielä tarkentavia ajoja eri vuosien lämpötilatiedoilla, jotta voidaan varmistua siitä että rakennusta palvelevat järjestelmät kuten esimerkiksi kausilämpövarasto ovat kaikissa olosuhteissa rakennuksen tarpeisiin nähden riittävät (Heikura 2020).

8.2 Kollektoriputket

Kollektoriputken valintaan vaikuttavat maaperän, lämpötilojen ja virtaamien lisäksi lämpövaraston muoto. Usein rakennustekninen suunnittelu sanelee reunaehdot joiden puitteissa lämpövarasto suunnitellaan. Näiden reunaehtojen jälkeenkin kollektoriputkia jää valittavaksi noin 40 erilaista. Vain yksi putki on optimaalinen jokaiseen kohteeseen. Valitsemalla väärä putki pienin vahinko on että putkesta maksetaan ylihintaa. Kollektoriputken väärän valinnan kustannukset eivät rajoitu putken hintaan vaan putkien virtaamien kautta myös järjestelmän tehoon ja sitä kautta rakennuskustannuksiin joita voidaan tarkastella euroina jotka ovat jaollisia kausilämpövaraston lämpö- ja jäähdytysteholla. Huonommalla kollektoriputkivalinnalla järjestelmä on täysin käyttökelvoton ja koko lämpövarastohanke epäonnistuu (Brandt 2020).

Yksi esimerkki putkivalinnasta jossa isokin suunnittelutoimisto voi valita väärän vaihtoehdon. Lämpövarastoissa joiden lämpötila on korkeimmillaan 298 kelviniä voidaan käyttää maalämmössä yleisesti käytettävää polyeteenimuovista valmistettua kollektoriputkea. Isoista valmistusmääristä johtuen putki on edullista ja sitä on saatavilla nopeisiin toimituksiin useilta valmistajilta. Kun lämpövaraston lämpötilat ylittävät 298 kelviniä joudutaan siirtymään PE-RT putkeen. PE-RT (Raised Temperature) lämpöputkissa käytetään erityisesti muokattua keskitason tiheää polyeteeniä, jonka molekyylien sidotut ketjut takaavat erittäin lämpövakaan ja mekaanisesti vahvan putken, joka kestää hetkellisesti jopa 90°C lämpötiloja. Sitovat ketjut sitovat yhteen kristallisoituneet rakenteet polymeerissä (plasticpipe.org). Putki valmistetaan samoilla työkaluilla kuin tavallinen polyeteenimuoviputki joten putkivalmistaja joutuu vain vaihtamaan raaka-aineen josta putki valmistetaan. PERT-muovista valmistettu kollektori on hintavampi kuin tavallinen maalämpöputki mutta korkean lämpötilan lämpövarastossa tavallinen maalämpöputki vanhenee muutamassa vuodessa käyttökelttomaksi.

8.3 Paalujen optimointi

Kaikilla eri paalutyypeillä on oma hintansa ja kantavuutensa. Ensisijaisesti paalut valitaan rakennukseen geoteknisten ominaisuuksiensa perusteella. Tästä huolimatta paalujen optimoinnille jää tilaa hankkeissa joissa paaluja ei vielä ole tilattu. Lähtökohtaisesti isoissakaan rakennushankkeissa ei optimoida paaluja edes rakennusteknisistä lähtökohdista. Tyypillisesti rakennesuunnittelijat ovat tottuneet suunnittelemaan kohteensa tietyn tyyppisillä paaluilla ja peruste ei ole taloudellinen vaan se mihin rakennesuunnittelija on työssään tottunut. Joissakin tapauksissa energiapaalujen optimointi on johtanut myös pienempiin paalutuskustannuksiin koska paalujen vaihtoehtoja on ensimmäistä kertaa tarkasteltu taloudellisista lähtökohdista (Brandt 2020).

Esimerkki paalujen optimoinnista on isojen kohteiden paalutuksissa yleinen 300 x 300 C teräsbetonipaalu josta tulee energiapaalu kun siihen valmistusvaiheessa asennetaan 80 mm tai 100 mm ilmastointiputki. Tästä paalutehtaalla tehtävästä työstä paalulle tulee lisäkustannus. Paalun geotekninen puristuslujuus laskee kun betonia on vähemmän. Tämä on mahdollista kompensoida vaihtamalla betonilaatu josta teräsbetonipaalu on valmistettu tai vahventamalla paalun raudoituksia. Teräspaalut soveltuvat sinällään energiapaaluiksi ilman muutoksia itse paaluun. Ainoastaan paaluhatussa täytyy olla oikeankokoinen reikä jotta kollektoriputkesta kerätty lämpö saadaan yhdistettyä järjestelmään. Teräspaalun hinta suhteessa teräsbetonipaaluun riippuu paalujen kantavuudesta, paalujen pituudesta sekä kohteen sijainnista (Brandt 2020).

Eri paalutyyppeiden hinnat koostuvat eri kokoisista yksityiskohdista kuten esimerkiksi kalliokärki tai jatkos. Hinnat ovat isoissa hankkeissa markkinahintoja sikäli että isot rakennusliikkeet maksavat näistä yksityiskohdista saman verran kohteesta riippumatta. Näistä hinnoitteluteknisistä yksityiskohdista, kohteen geoteknisistä yksityiskohdista, paalujen maaperätutkimuksen mukaisista pituuksista sekä rakennuksen paaluille asettamista kantavuusvaatimuksista muodostuu kokonaishinta jonka rakennusliike maksaa paalutuksesta. Tämän hinnan rakennusliike muodossa tai toisessa laskuttaa rakennuttajalta. Kustannusten optimointi tarkoittaa tässä tapauksessa sitä että ohjelmisto laskee automaattisesti minkä tyyppisellä paaluratkaisulla päästään edullisimpaan kokonaiskustannukseen niin että yllä mainitut kohteelle tyypilliset paaluja koskevat vaatimukset silti täyttyvät (Heikura 2020).

8.4 Rakennuttamistekniset kustannukset

Kausilämpövaraston rakentamisen kustannuksiin eivät kuitenkaan vaikuta ainoastaan kaikki tekniset yksityiskohdat vaan lisäksi rakennuttamiseen liittyvät asiat kuten se rakennetaanko energiapaalut osana alkuperäistä urakkaa, lisätyönä vai erillisenä urakana. Välillisiä kustannuksia voi myös syntyä kohtuuttoman paljon suhteessa alkuperäisiin rakennuskustannuksiin. Ohjelmistolla voidaan teknisesti minimoida ylimääräiset kustannukset mutta lisäkustannuksia voi syntyä silti johtuen siitä että lisätöiden kehittäminen ja laskuttaminen on monen rakennusalalla toimivan yrityksen ensisijainen ansaintalogiikka (Brandt 2020). Ohjelmisto pystyy optimoimaan tekniset asennuskustannukset mutta kaikkia rakennuttamiseen liittyviä, urakkamuotoon liittyviä kustannuksia ei vielä pystytä ohjelmistolla optimoimaan (Brandt 2020).

Tyypillinen rakennuttamistekninen kustannus rakennushankkeessa on KVR-hanke jossa urakoitsija on sitoutunut kokonaishintaan. Urakoitsija pidättää itsellään oikeuden toteuttaa rakennus parhaaksi näkemällään tavalla, kunhan sopimuksessa esitetyt rakennuksen minimivaatimukset sekä tietenkin rakennusmääräysten mukaiset minimivaatimukset täyttyvät. KVR-urakoitsija tahtoo tyypillisesti toteuttaa hankkeen ”perustuotantona” joka tarkoittaa että hankkeeseen ei tehdä mitään edellisistä saman tyyppisistä hankkeista poikkeavaa. Rakennuttaja, joka joissakin tapauksissa jää pitkäaikaiseksi omistajaksi rakennukselle, ja maksaa rakennuksen käyttökustannukset, voi olla kiinnostunut toteuttamaan hankkeessa kaikki taloudellisesti kannattavat toimenpiteet joilla käyttökustannukset voidaan minimoida. Kokemus osoittaa että vaikka rakennukseen tehtävät muutokset kaikkine kustannuksineen teknisesti pienentäisivät rakennuskustannuksia, lopputulos voi siitä huolimatta olla että rakennuttaja joutuu maksamaan muutoksista lisähintaa. Tyypillisesti muutoksessa pois jäävistä tuotteista hyvitetään rakennuttajalle ainoastaan hinta joka on pienin mahdollinen omakustannehintana ja samaan aikaan alkuperäiseen suunnitelmaan nähden lisättävistä tuotteista laskutetaan hinta joka sisältää poikkeuksellisen hyvän myyntikatteen.

Esimerkki hankkeesta jossa rakennuttamistekniset kustannukset saivat kohtuuttomat mittasuhteet on kerrostalo jossa rakennuttaja kertoi ennen KVR-hankkeen suunnittelun aloitusta että hankkeeseen tehdään energiasimulointi ja optimointi sekä kausilämpövarasto. Rakennusliike osallistui kokouksiin jossa toimenpideyhdistelmän asennuksen aikataulut sovittiin rakennushankkeen aikatauluihin. Näiden kokousten jälkeen rakennusliike tilasi LVI-suunnittelun tavanomaisena lvi-suunnitteluna joka ei sisältänyt

energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä jotka kuitenkin siinä vaiheessa jo olivat tiedossa. Kerrostalon koko LVI-järjestelmä suunniteltiin kahteen kertaan, ensin tavanomaisella tavalla toteutettuna ja sen jälkeen energiatehokkuutta parantavilla toimenpiteillä. Rakennusliikkeen muutossuunnittelusta laskuttamalla katteella LVI-suunnittelun hinta nousi korkeammaksi kun energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden lisäkustannukset yhteensä. Koko kustannus olisi ollut vältettävissä jos rakennusliike olisi ottanut huomioon jo tiedossa olevat muutokset ennen lvi-suunnittelun tilaamista. Hankkeen energiataloudellisen optimoinnin toimenpiteet olivat niin kannattavia että toimenpideyhdistelmän sijoitetun pääoman tuotto oli 40% näistä ylimääräisistä rakennuttamisteknisistä kustannuksista huolimatta. Ylimääräiset kustannukset olivat kuitenkin tarpeeton lisäkustannus joka aiheutti konfliktitilanteita sekä mielipahaa kaikissa osapuolissa. LVI-suunnittelija sai hankkeesta paljon isomman laskutuksen mutta vastaavasti myös moninkertaisen määrän työtä joka ei keskellä rakentamisen suurinta noususuhdannetta välttämättä ollut kannattavin tapa kasvattaa yrityksen liikevaihtoa (Brandt 2020).

Monet hankkeet osoittavat että KVR-hankkeissakin on mahdollista toteuttaa alkuperäisestä suunnitelmasta poikkeavia energiataloudellisesti kannattavia muutoksia ilman tarpeettomia lisäkustannuksia. Se edellyttää kuitenkin että urakoitsija on sitoutunut muutoksiin ja halukas löytämään uusia, tehokkaampia ja taloudellisesti kannattavampia toimintatapoja. Optimoinnilla pystytään minimoimaan rakennuttamisteknisiä kustannuksia mutta niitä ei kaikissa hankkeissa ja rakennuttamisen vaiheissa pystytä kokonaan poistamaan (Brandt 2020).

9 LÄMMÖN KAUSIVARASTOINNIN TULEVAISUUS

Opinnäytetyön tavoite oli luoda laskentamalli lämpöenergian kausivaraston rakentamisen kustannusoptimoinnille. Laskentamalli on tehty ja se liitetään kesällä 2020 osaksi nollaE Oy:n tekoälyllä toimivaa energiasimulointi- ja optimointiohjelmistoa. Laskentamalli laskee kollektoreita ympäröivän saven lämpötilat tuntitasolla rakennuksen lämpöhäviöiden, jäähdystarpeen sekä mahdollisen ylimääräisen hukkalämmönlähteen funktiona.

Lämmön kausivarastointi maaperään on kymmen vuoden aikana yleistynyt Suomessa. Ensimmäiset lämmön kausivarastot Suomessa on kirjoittajan toimesta suunniteltu ja otettu käyttöön vuonna 2008. Kymmenen vuotta myöhemmin, kun kirjoittaja oli suunnitellut noin 300 lämpövarastoa ympäri Suomea, toinenkin yritys alkoi suunnittelemaan niitä. Nyt vuonna 2020 lämmön kausivarastoja suunnittelevat useat toimijat ja se on yksi varteen otettava vaihtoehto rakennushankkeissa joissa kausivarastointi on mahdollista. Lämmön kausivarastointi on erittäin kustannustehokas tapa varastoida isoja määriä ilmaista tai lähes ilmaista lämpöenergiaa. Isoissa rakennuksissa lämmön kausivarastointi on ainakin optimoidusti rakennettuna taloudellisesti erittäin kannattavaa. Lämmön kausivarastointi ei yksinään pelasta energiasyöppöä rakennusta mutta se on yksi tärkeä toimenpide muiden toimenpiteiden joukossa kun Suomen rakennuksia muutetaan hiilineutraaliksi.

Vuonna 2025 lähes kaikkien rakennusten yhteyteen rakennetaan lämmön kausivarastot. Kausilämpövarastojen rakennuttaja ei välttämättä ole kiinteistön omistaja vaan uudenlainen energiayrittäjä. Tulevaisuudessa yksittäiselle rakennukselle tai esim. korttelille rakennetaan lämpöenergian kausivarasto ulkopuolisen yrityksen toimesta ja ulkopuolinen yritys hallinnoi sekä myy kausilämpövarastosta kerätyn energian rakennuksien käyttäjille. Tällainen yritys voi olla yksityinen mutta usein se on kaupungin oma energiayhtiö joka tiedostaa että maailma muuttuu ja muuttaa omaa liiketoimintaansa niin että pysyy kilpailussa myös tulevaisuudessa.

10 LÄHTEET

Acuna j, Palm B (2008) EXPERIMENTAL COMPARISON OF FOUR BOREHOLE HEAT EXCHANGERS. Kungliga Tekniska Högskolan. Tukholma 2008.

Alanen Raili, Koljonen Tiina, Hukari Sirpa, Saari Pekka (2003). Energian varastoinnin nykytila. VTT, Espoo.

Arola Teppo, Lehtonen Jouko, Lautkankare Rauli, Salomaa Nikolas (2017). Thermal energy storages below the building helping to reach the 0-energy targets by 2020. Holistic approach through the energy simulations. Two case histories.

Bergdahl Ulf, Gabrielsson Anna, Marthi Lehtmet, Moritz Lovisa (1997). Heat storage in soft clay, Field tests with heating (70°C) and freezing of the soil. Statens Geotekniska Institut, SGI.

Bergensståhl Lovisa, Magnusson Caroline, Rydell Bengt, Dahlöf Peder, (1990) Värmepumpanläggning med värmelager i lera och skola och sporthall i Söderköping – mätning och utvärdering. Statens Geoteknisk Institut, SGI Varia 265.

Brandt Jerker, projektipäällikkö, nollaE Oy haastattelu 15.1.2020 kello 09.00-11.30

Cameron, Patel 2020: Global Geothermal Heat Pumps System Market Growth and Share with Developed Economies 2020 – 2024 | Bosch Thermotechnology, Carrier, Vaillant. Bander County Courier 6.3.2020.

Costa-Carrapico Ines, Rokia Raslan, Javier Neila Gonzalez (2020). A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy and Buildings* 210 (2020) 109690.

Dahlöf Peder, Palmgren-Magnusson Caroline, Rydell Bengt (1986) Värmepumpanläggning med värmelager i lera och skola och sporthall i Söderköping – Projektering, Statens Geotekniska Institut SGI Varia 186.

Diakaki Christina, Grigoroudis Evangelos, Kolokotsa Dionyssia (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and buildings* 40 (2008) 1747-1754.

Dimplex 2020, Kylmäprosessi. <http://www.dimplex.de/animationen/kreislauf.php?lang=fi>
(Haettu 5.4.2020)

Erat B, Erkkilä V, Löfgren T, Nyman C, Peltola S, Suokivi H. Aurinko-opas. Aurinkoenergiaa rakennuksiin. Kustantajat Sarmala, Helsinki. 2001.

Eronen J.T., Hakala E., Järvensivu P., Toivanen T., Majava A., Vadén T. To continue to burn something? Technological, economic and political path dependencies in district heating in Helsinki, Finland. *Energy Research & Social Science* 58 (2019).

Esch, D. (2004). Temperature effects on consolidation properties of sulphide clays. ASCE Technical Council on Cold Regions Engineering.

Eurooppa-neuvosto (2014). Päätelmät – 23. ja 24. lokakuuta 2014. http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/fi/ec/145409.pdf (haettu 22.9.2018)

Euroopan Unionin komissio, direktiivi 2010/31/EU. EU:n virallinen tiedonanto, L153/13, 18/06/2010, 2010.

Euroopan Unionin komissio 2012/27/EU direktiivi energiatehokkuudesta.

Euroopan Unionin komissio, komission delegoitu regulaatio 244/2012 annettu 16 tammi-kuuta 2012 täydentämään direktiiviä 2010/31/EU, 2012.

<http://www.geologia.fi/index.php/2018/06/03/savi-ja-siltti/> (Haettu 2.5.2020)

Hytönen, Kai (1999). Suomen mineraalit. Geologian tutkimuskeskus. Erillisjulkaisu. Jyväskylä 1999.

Johansen, O (1975). Varmeledningsevne av jordarter. Trondheim, Group for Thermal Analysis of frost in the ground, Institute for Kjoleteknikk, 1975, 231 p.

Kaukora 2020. 331842-5 Jäspi Nordic asentajan käsikirja.

Kotiaho V, Lampinen M. Johdatusta lämmönsiirto-oppiin. ENY-C2001 Termondynamiikka ja lämmönsiirto 2014.

Lienhard J, Lienhard J. A Heat Transfer Text Book. Phlogiston Press. Houston, USA. 2015.

Loisa Lassi, Reinikainen Erja, Tyni Anni (2015). FinZEB-hanke lähes nollaenergiarakennuksen käsitteet, tavoitteet ja suuntaviivat kansallisella tasolla, Loppuraportti, hankkeen sisältö ja tulokset.

Lylykangas, K., Andersson, A., Kiuru, J., Nieminen, J. & Päätaalo, J. (2016). Rakenteellinen energiatehokkuus. RTT eristeteollisuus ja ympäristöministeriö.

MaaRYL. Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset, talonrakennuksen maatyöt. Rakennustieto, 2010.

Mattinen Maija, Heljo Juhani, Savolahti Mikko. 2016. Rakennusten energiankulutuksen perusskenaario Suomessa 2015-2050. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35/2016.

Motiva (2012) Lämpöä omasta maasta, opas maalämmöstä. http://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/lammitysjarjestelmat/lampoa_omasta_maasta_maalampopumput.10752.shtml (haettu 5.6.2018)

Motiva (2015) Jälkiasennetun ilmalämpöpumpun vaikutus energiankäyttöön.

https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm

Penna Paola, Prada Alessandro, Cappelletti Francesca, Gasparella Andrea (2015). Multi-objectives optimization of Energy Efficiency Measures in existing buildings. Energy and Buildings 95 (2015) 57-69.

<https://plasticpipe.org/building-construction/bcd-pe-rt.html> haettu 18.12.2019

Reuss, M., Beck, M. & Muller, JP. (1997). Design of a seasonal thermal energy storage in the ground. Solar Energy Vol. 59, Nos. 4-6, pp. 247-257.

Ronkainen, Nanna. Suomen maalajien ominaisuudet. Suomen ympäristökeskus 2012.

Sandberg, E. Ilmastointilaitoksen mitoitus – Ilmastointitekniikka osa 2. Talotekniikka-Julkaisut, Forssa 2016.

Savumax. (2013): Ilmanvaihdon esilämmitys ja kesäviilennys maapiirillä, porakaivolla tai energiapaaluilla – Suunnittelu- ja mitoitusohje. Kirjoittaja Nikolas Salomaa.

SULPU (2019): Suomen lämpöpumpputilastot, Vuosi 2019. <https://www.sulpu.fi/tilastot>

SULPU (2020): COP Tosi on, Uutiset https://www.sulpu.fi/uutiset/-/asset_publisher/WD1ExS3CMra3/content/cop-cop-tosi-o-1

UPONOR (2012) Ground energy technical information. 05/2012

Wagner Solar GMBH (2020). wagner-solar.com

Wahlström, Åsa (2017). Total Concept-menetelmä; toteutus ja laadunvarmistusopas. Versio 1.6, helmikuu 2017. CIT (Chalmers Industri Teknik) Energy Management. www.energy-management.se

https://en.wikipedia.org/wiki/Coefficient_of_performance

<https://www.ymparistoosaava.fi/kiinteistonhoitoala/index.php?k=22532>