

Opinnäytetyö (AMK)

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Talonrakennustekniikka

2018

Jussi Hämäläinen

**TURUN
AMMATTIKORKEAKOULUN
UUDEN KAMPUKSEN
ENERGIAPAALUKAIVOT**

TURKU AMK 
TURKU UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Rakennustekniikka | Talonrakennustekniikka

2018 | 38 sivua, 0 liitesivua

Ohjaaja: RI (yamk) Rauli Lautkankare

Jussi Hämäläinen

TURUN AMMATTIKORKEAKOULUN UUDEN KAMPUKSEN ENERGIAPAALUKAIVOT

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lämmön maaperävarastoinnin mahdollisuuksia, siihen vaikuttavia ominaisuuksia ja mitoittaa energiapaalujärjestelmä kuvitteelliseen esimerkkikohteeseen. Lisäksi työn tavoitteena oli käydä läpi Turun ammattikorkeakoulun uuden kampuksen hybridipaaluja. Opinnäytetyössä myös vertailtiin energiapaalukaivojen kustannuksia perinteisen porakaivon kustannuksiin.

Energiapaalut olivat tämän tapauksen perusteella kustannustehokkaampi vaihtoehto porakaivoon verrattuna, mikäli paalut tulisivat rakennukseen joka tapauksessa. Tämä korostuu paalupituuksien kasvaessa entisestään. Lämmön varastointi on myös mahdollista ja jossain määrin kannattavaa energiapaalua ympäröivään saveen. Tämä edellyttää kuitenkin energian olevan lähes ilmaista. Ilmaista energiaa ovat käytännössä hukkalämpö ja aurinkoenergia. Tässä työssä saveen ominaisuudet lämmön varastointiin olivat huonoimmat mahdolliset. Saveen ominaisuuksista johtuen lämmön varastointi ei ollut kannattavaa.

Valmis opinnäytetyö lisää ihmisten tietoisuutta lämmön maaperävarastoinnin mahdollisuuksista ja avaa sen kustannuksia.

ASIASANAT:

lämpökaivo, energiakaivo, energiapaalu, lämpöpaalu, kantava, lämmön lataus, porapaalu

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Civil Engineering | Structural Engineering

2018 | 38 pages

Instructor: (M.Eng) Rauli Lautkankare

Jussi Hämäläinen

ENERGYPILE HEATWELLS

The goal of this thesis was study the possibilities of energy piles and investigate seasonal storage of thermal energy using energy piles. The thesis analyzes the factors affecting thermal energy storages. The thesis also discusses the drill hole and energy pile cost differences. The work presents the hybrid piles of a new campus and their implementation.

On the basis of this case, energy piles were a more cost-effective alternative to the drilling well. This is emphasized as the pile lengths increase further. Heat storage is also possible and to some extent a profitable energy pile surrounding the clay. This, however, requires energy to be virtually free. Free energy is virtually waste heat and solar energy. In this work, the clay properties for heat storage were the worst possible. Because of the acid characteristics, heat storage was not profitable.

The final thesis adds people's awareness of the potential of heat storage and opens up the costs.

KEYWORDS:

Heat well, energy well, energypile, heatpile, drilled pile,

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
1.1 Tausta	6
1.2 Tavoitteet	6
2 ENERGIAPAALUN TOIMINTA	7
2.1 Energiapaalun rakenne	7
2.2 Energiapaalun toiminta	9
2.3 Energiapaalun hyödyntäminen	12
2.4 Lämmitysenergia	13
2.5 Viilennysenergia	14
2.6 Lämmön lataus ja varastointi	14
3 LÄMMÖNSIIRTYMINEN	16
3.1 Johtuminen	16
3.2 Konvektio	17
4 KAMPUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS	19
4.1 Lähtötiedot	19
4.2 Suunnittelu	20
4.3 Toteutus	21
4.4 Detaljit	22
5 KUSTANNUKSET	25
5.1 Teoreettinen energiansaanti	25
5.2 Kustannusvertailu energiapaalun ja porakaivon kesken	34
6 ENERGIAPAALUJEN MAHDOLLISET VASTUU JA VAKUUTUSONGELMAT	36
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO	37
LÄHTEET	38

KUVAT

Kuva 1. Betonipaalu varustettu putkella, johon lämmönkeruuputket voidaan asentaa. (R. Lautkankare, henkilökohtainen tiedonanto 11.5.2018)	8
Kuva 2. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät (Leppäharju 2008.)	10
Kuva 3. Energiapaalun toimintaperiaatekuva	11
Kuva 4. Ranskassa käytettävän Franki-energiapaalun työvaiheet. Keruuputket asennetaan raudoituksen mukana. (Franki Grondtechnieken BV, 2018)	12
Kuva 5. Franki-paalutuksella toteutettu betoninen energiapaalu Ranskassa. (Franki Grondtechnieken BV, 2018)	13
Kuva 6. Hienojakoisen maa-aineksen lämmönjohtavuus eri vesipitoisuuksilla ja kuivatiheyksillä (Andersland & Ladanyi 2004).	15
Kuva 7. Alkuperäinen energiapaalujen putkituskuva. Paaluja 700 kpl, joista energiapaaluja 68kpl.	21
Kuva 8. Maalämpökaivon tasokuva.	22
Kuva 9. Maalämpökaivon/energiapaalun yläpään detalji (R. Koskela henkilökohtainen tiedoksianto 2018).	23
Kuva 10. Lämpökaivo	24
Kuva 11. Lämpötilakuvaaja	31
Kuva 12. Paalujen ympärillä lämmennyt savi ei ole lämmennyt kokonaan. Lämpöhäviötä tapahtuu joka puolelle.	33
Kuva 13. Kokonaan lämmitetty savimassa jossa lämpöhäviötä tapahtuu vain ulkoreunoilla.	33

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Kasvaneet energiakustannukset ja kiristyneet ympäristösäädökset ovat lisänneet uusiutuvien energiaratkaisujen suosiota. EU, mukaan lukien Suomi, on asettanut tavoitteekseen lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja vähentää hiilidioksidipäästöjä. Lämmöntalteenoton ja varastoinnin kannalta maaperä on varteenotettava vaihtoehto, koska maaperän lämpö on käytännössä uusiutuvaa energiaa. Maaperään voidaan myös varastoida lämpiminä vuodenaikoina syntyvää hukkalämpöä. Tämä nostaa maaperän keskimääräistä lämpötilaa ja myös järjestelmän hyötysuhdetta. Edellä mainittuun lämmöntalteenottoon ja varastointiin onkin viisasta hyödyntää rakennuksen perustusten paaluja. Paaluihin asennetaan lämmönsiirtoputket. Paaluja voidaan myös hyödyntää energiakaivojen porauksessa. Paalujen pohjalta jatketaan kaivon porausta, jolloin säästytään maaporaukselta. Tätä menetelmää kutsutaan *hybridipaaluksi* tai *energiapaalukaivoksi*. Tässä opinnäytetyössä perehdytään energiapaaluihin ja lämmön varastointiin.

1.2 Tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tuoda tietoa energiapaaluista ja lämmönlataamisen mahdollisuuksista. Opinnäytetyössä perehdytään ensin energiapaalun toimintaan ja siitä saataviin hyötyihin. Lopussa lasketaan kuvitteellisen kohteen energiatuotto ja määritellään sen kustannukset. Opinnäytetyössä myös käsitellään Turun ammattikorkeakoulun uuden kampuksen hybridienergiapaaluja ja mahdollisia vastuu- ja vakuutuskykyjä.

2 ENERGIAPAALUN TOIMINTA

Paalutus on pehmeälle maaperälle rakennettaessa yleisimmin käytetty perustamistyyli. Paalut juntaataan tai porataan pehmeän maa-aineksen lävitse kovaan perusmaahan. Porrattavia RD-paaluja käytetään esimerkiksi, kun maaperässä on kiviä ja lohkareita, jotka vaikeuttavat asentamista lyömällä, tai kun maakerrokset ovat hyvin ohuita. Poraamalla on mahdollista tunkeutua suurtenkin lohkareiden läpi aina vaadittuun syvyyteen kallioon. RD-paalujen koot pientalojen perustamisessa vastaavat RR-paalujen kokoja. (SSAB AB 2018.)

2.1 Energiapaalun rakenne

Energiapaalussa yhdistyy maalämmön käyttö lämmityksessä ja rakennuksen perustus. Energiapaalu koostuu useimmiten teräsputkipaalusta ja sen sisälle asennettavasta lämmönkeruuputkesta, jonka sisällä virtaa lämmönkeruuneste. Energiapaaluksi soveltuvat 90 mm ja siitä suuremmat teräsputkipaalut. (Aurime Oy 2018.)

Myös betonipaalu on mahdollista varustaa lämmönkeräimillä. Silloin betonipaaluihin valetaan tehtaalla halutun reiän kokoinen putki. Tällaisia paaluja valmistaa esimerkiksi HTM yhtiöt Oy. (R. Lautkankare, henkilökohtainen tiedonanto 11.5.2018)

Energiapaalu varustetaan paaluhatulla perustuksilta tulevien kuormien siirtämisen mahdollistamiseksi. Paalut valetaan täyteen joko betonilla tai juotosmassalla paremman lämmönjohtavuuden aikaansaamiseksi. Maakerrosten läpi kantavaan maahan tai kallioon saakka ulottuvan energiapaalun minimipituus on yleensä 10-15 metriä. Tätä lyhyempiin paaluihin ei kannata lämmityskäyttöön suunniteltua keruuputkistoa asentaa. Tarvittaessa voidaan paalun pohjalta jatkaa energiakaivon poraamista. (Aurime Oy 2018.)



Kuva 1. Betonipaalu varustettu putkella, johon lämmönkeruuputket voidaan asentaa. (R. Lautkankare, henkilökohtainen tiedonanto 11.5.2018)

2.2 Energiapaalun toiminta

Maalämpö on peräisin pääosin auringosta. Osittain se on myös geotermistä energiaa, jota syntyy maan sisällä tapahtuvan radioaktiivisen hajoamisen seurauksena. Maalämpö, joka on peräisin auringon säteilystä, ulottuu Suomessa vain noin 15 metrin syvyyteen. Pintamaan lämpötila vaihtelee vuodenaikojen mukaan. 15 metrin syvyydestä lähtien se on vuodenaajoista riippumaton (kuva 2). Paikkakunnan vuosittainen ilman keskilämpötila määrää maankamaran lämpötilan. (Geologiantutkimuskeskus 2018.)

Maaperän lämpötila voidaan laskea keskimääräisen ilmanlämpötilan perusteella:

$$T_{(\text{maa})} \approx 0,71 * T_{(\text{ilma(a)})} + 2,93 \text{ (Geologiantutkimuskeskus 2018)}$$

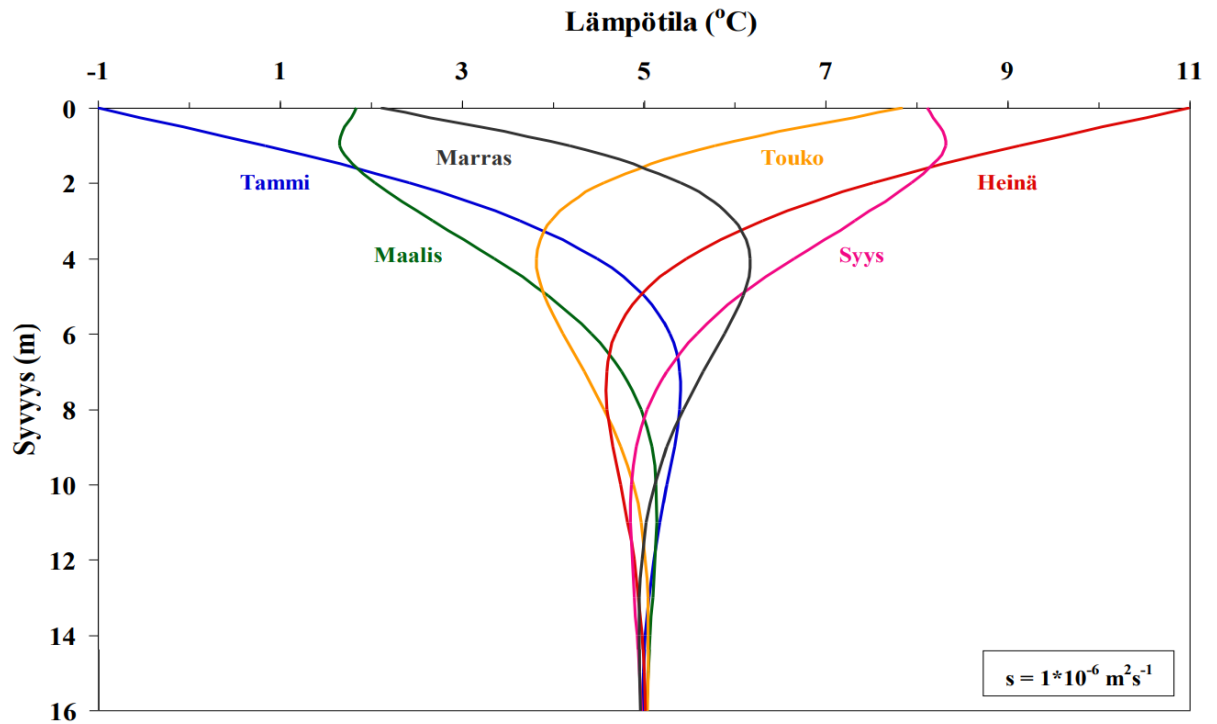
Kallioperän lämpötila Etelä-Suomessa 100 m syvyydessä on noin 7–8 °C. Kallioperään poratuista kaivoista saatava lämpö on alkuperältään pääsääntöisesti juuri geotermistä energiaa. Maalämpö ei ole hupeneva luonnonvara, joten sitä voidaan hyödyntää hyvällä omatunnolla. (Juvonen Janne, Lapinlampi Toivo, 2013.)

Energiapaalu toimii samalla periaatteella kuin maalämpökaivo. Järjestelmä sisältää paalun, keruupiirin, siirtoputkiston ja lämpöpumpun. Lämmityksessä hyödynnetään maahan varastoitunutta lämpöenergiaa ja jäädytyksessä maaperän matalaa lämpötilaa. Teräspaalun sisälle asennetut happidifфуusiosuojatut muoviputket eli keruupiiri sisältää jäätyvätöntä 28%:n etanoli-vesilämmönkeruunestettä. Muoviputket ovat yleisesti HDPE-muovia ja korkeissa lämpötiloissa PE-X-muovia. (Uponor Suomi Oy 2018.), (Juvonen Janne, Lapinlampi Toivo, 2013)

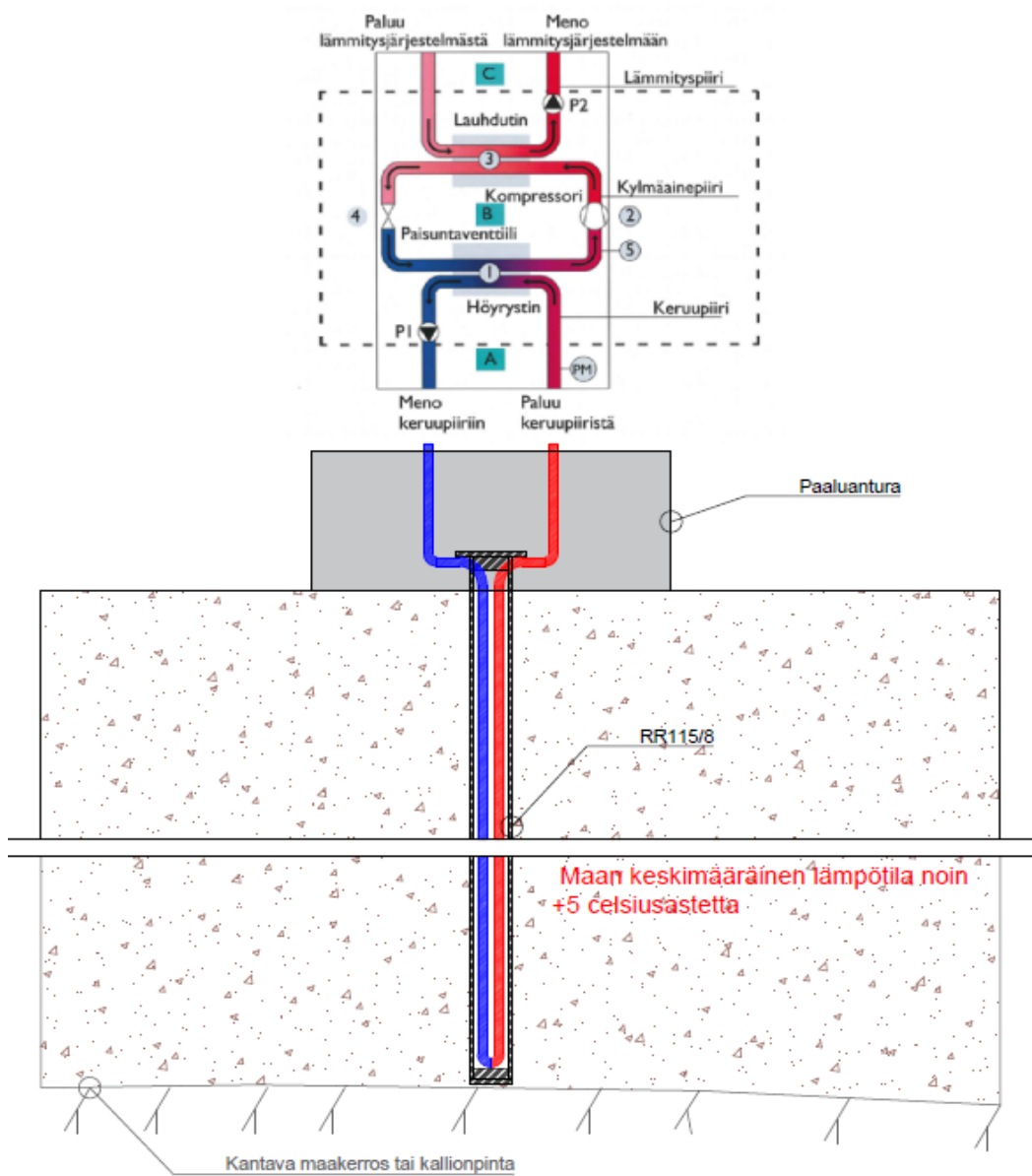
Etanolin tarkoitus on estää veden jäätyminen alle 0 celsiusasteen lämpötilassa. 28%:n etanoliliuos kestää noin -17 celsiusasteen lämpötilaa. Hyvän lämmönsiirtonesteen ominaisuuksia ovat mm. alhainen jäätymispiste, pieni viskositeetti, hyvä lämmönjohtavuus, korkea ominaislämpökapasiteetti ja ympäristöystävällisyys. (Altia Oyj, 2018.)

Kylmä lämmönkeruuneste kiertää keruupiirissä ensin paalun pohjalle ja sieltä jälleen ylös keräten maaperään sitoutunutta lämpöenergiaa. Maaperän ollessa 14–15 metrin syvyydessä Etelä-Suomessa noin 6 celsiusastetta keruuliuksen lämpötila nousee keruupiirissä. Keruupiirissä lämmönkeruunesteeseen sitoutunut energia siirretään keruupiiriin

pumpun avulla lämpöpumpun höyrystimeen. Höyrystimessä energia siirtyy keruupiiristä lämpöpumpun kylmäainepiiriin. Kylmäaine kierrätetään lämpöpumpun kompressorin avulla lauhduttimelle, jossa kylmäaine luovuttaa energian lämmityspiiriin. Energiapaalu soveltuu parhaiten matalan lämpötilan lämmönjakojärjestelmien energianlähteeksi, kuten vesikiertoiseen lattialämmitykseen tai ilmalämmitykseen. (Juvonen Janne, Lapinlampi Toivo, 2013.) Kuvassa 3 esitetty energiapaalun ja lämpöpumpun toimintaperiaate.



Kuva 2. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät (Leppäharju 2008.)

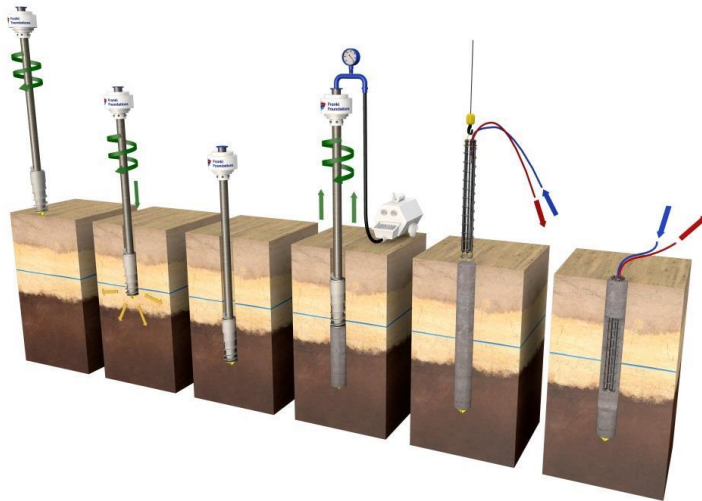


Kuva 3. Energiapaalun toimintaperiaatekuva

2.3 Energiapaalun hyödyntäminen

Energiapaalujen hyödyntäminen kasvattaa suosiotaan maailmanlaajuisesti. Energiapaalujen periaate on sama kaikkialla maailmassa, mutta toteutustavat poikkeavat geologisista olosuhteista ja määräyksistä johtuen. Myös maan peruslämpötila ja lämmönjohtavuus vaihtelevat suuresti. Peruslämpötila on Etelä-Suomessa yleensä noin 7–8 astetta, kun Rovaniemen korkeudella se on enää 4–5 astetta. Kallion lämmönjohtavuuden arvo on Suomessa keskimäärin noin 3,0 W/Km. Vaihteluväli on kuitenkin 2–5 W/Km. Lämpötilalla ja lämmönjohtavuudella on suuri merkitys kallioperästä otettavissa olevaan energiaan. Isoimmissa kentissä lämmönjohtavuus voidaan selvittää koereiästä tai paalusta termisellä vastetestillä, TRT-mittauksella. (Thermal Response Test). (Lapon Oy, 2018.)

Pohjoismaiden ulkopuolella esimerkiksi energiapaalut eivät ulotu kallioon asti paksujen maakerrosten vuoksi. Paalutustavat ovat myös erilaisia. Esimerkiksi erilaisten kitka- ja koheesiobetonipaalujen käyttö energiapaaluina on paljon yleisempää kuin teräspaalujen käyttö. Kuvassa 4 on esitetty Franki-paalun työvaiheet. (Franki Grondtechnieken BV, 2018)



Kuva 4. Ranskassa käytettävän Franki-energiapaalun työvaiheet. Keruuputket asennetaan raudoituksen mukana. (Franki Grondtechnieken BV, 2018)



Kuva 5. Franki-paalutuksella toteutettu betoninen energiapaalu Ranskassa. (Franki Grondtechnieken BV, 2018)

2.4 Lämmitysenergia

Maasta voidaan kerätä energiaa, tunnetummin maalämpöä. Maalämpö on veteen tai maahan varastoitunutta energiaa. Maaperän lämmönluovutuskapasiteettia ei pidä ylittää. Liian suuri negatiivinen energiavirta johtaa pitkällä aikavälillä lämmönkeruuputkien ympäristön hitaaseen jäähtymiseen ja lopulta jäätymiseen. Optimaalista mitoittamista varten on tehtävä mittauksia, jotta energialähteen käyttäytyminen tunnetaan riittävällä tarkkuudella. Käytetty mittausmenetelmä on suhteellisen lyhytaikainen (4–5 päivää) termien vastetesti. Mittaukset ovat aika kalliita toteuttaa, joten niitä käytetään lähinnä laajempien porakaivokenttien mitoittamiseen tai tutkimukselliseen tarkoitukseen. (Tapio Syrjälä, 2013.)

TRT-mittaus maksaa Rototec Oy:ltä 4500 euroa. Hintaan sisältyy myös ED-simulointi. Reiän syvyys ei vaikuta hintaan. (Rototec Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.4.2018)

Yksittäisen energiapaalun tehokkuus arvioidaankin alueellisesti tunnettujen parametrien perusteella. (Tapio Syrjälä, 2013).

2.5 Viilennysenergia

Kesällä huoneilmaa joudutaan jäädyttämään, jotta sisäilmasto olisi viihtyisä. Rakennukseen tulee lämpökuormia muun muassa valaistuksesta, käytöstä, ihmisistä sekä ikkunoista tulevasta auringon säteilystä. Tästä syntynyt hukkalämpö otetaan talteen ja tällä tavoin viilennetään sisäilmaa. Sisäilmasta saadulla lämpöenergialla voidaan lämmittää käyttövettä ja varastoida loput energiapaalujen kautta maahan. Viilennyksessä voidaan myös hyödyntää maan alhaisempaa lämpötilaa. Näin voidaan nostaa maaperän lämpötilaa ja sitä kautta järjestelmän tehoa ja hyötysuhdetta. (Nilan Oy, 2018.)

2.6 Lämmön lataus ja varastointi

Varastoitaessa lämpöä maahan maa lämmitetään latausvaiheessa ja viilennetään purkuvaiheessa. Lämpöä voidaan varastoida joko kallioon tai maaperään. Energiapaalussa se varastoidaan saveen ja porakaivoissa kallioon. Pohjaveden liike on savessa hyvin hidasta, joten se sopii usein lämmönvarastointiin. Lämmön maaperävarastointiin vaikuttaa pääasiassa kolme parametria:

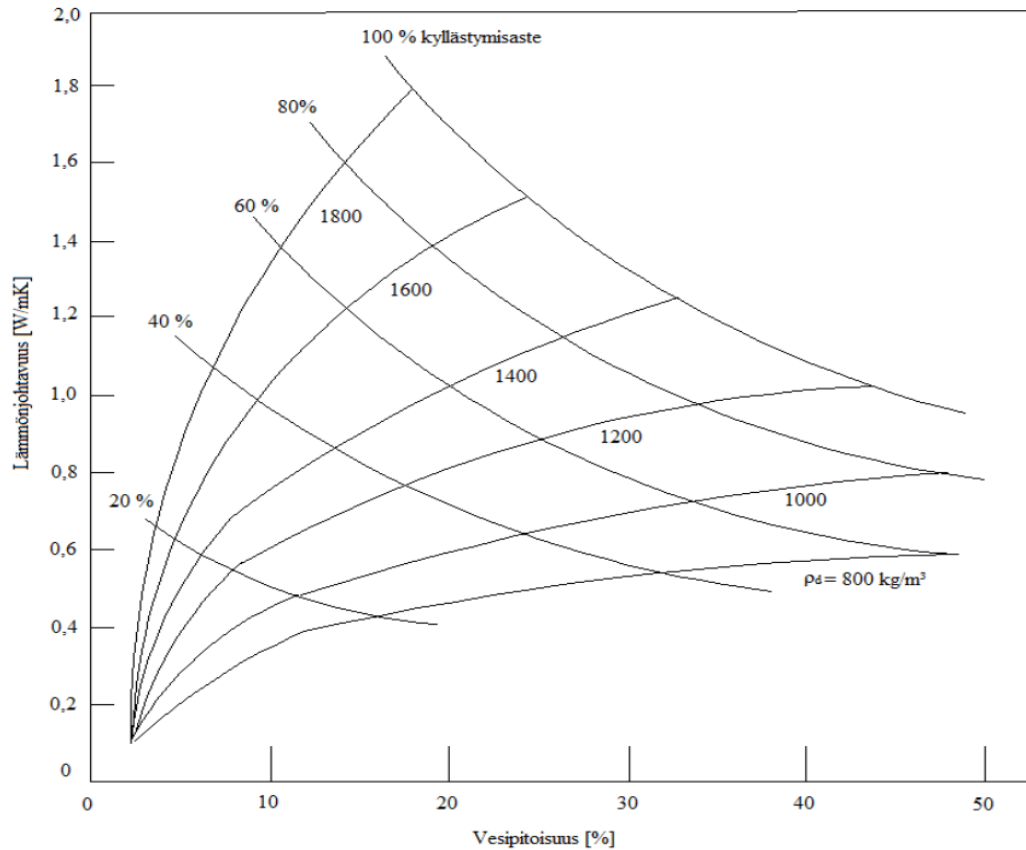
Q_m [J] maahan ladattava lämpöenergia

k [W/mK] maan lämmönjohtavuus

C_v [J/m³K] maan lämpökapasiteetti tilavuuden suhteen (Mikko Ojala,2014)

Lisäksi varastointiin vaikuttavat lämmönvaihtimen osien lämmönjohto-ominaisuudet. Lämmönjohtavuutta voidaan energiapaaluissa parantaa täyttämällä paalu esimerkiksi jollain betonia lämpöä johtavammalla materiaalilla. Betoniin voi myös sekoittaa hyvin lämpöä johtavia lisäaineita. Alhaisemmat purkulämpötilat mahdollistaisivat energiapaaluarastoon ladatun energian tehokkaamman purkamisen. Toisaalta varastojen kapasiteetti kasvaa varastointilämpötilan noustessa. (Mikko Ojala,2014)

Kuvassa 6 on esitetty hienojakoisten maa-ainesten lämmönjohtavuuksia.



Kuva 6. Hienojakoisen maa-aineksen lämmönjohtavuus eri vesipitoisuuksilla ja kuivatiheyksillä (Andersland & Ladanyi 2004).

Yleisesti saven lämmönjohtavuus on välillä 1,1–2,5 W/mK. (Uponor Suomi Oy 2018).

Yleensä keruuputkistoina käytetään polyeteenistä valmistettuja muoviputkia. Polyeteenin lämmönjohtavuus on noin 0,42 W/mK. Muita harvemmin käytettyjä putkistomateriaaleja ovat ruostumaton teräs, kupari, polyvinyylikloridi (PVC) sekä muut muoviseokset. (Uponor Suomi Oy 2018.)

Lataus- ja purkukausina keruunesteen meno- ja paluulämpötilaeron ΔT [K] perusteella voidaan määrittellä lämmönvaihtimen lämpöteho W [W]. Tähän lämpötilaeroon perustuu myös TRT-mittaus. (Tapio Syrjälä, 2013)

3 LÄMMÖNSIIRTYMINEN

Lämpö voi siirtyä johtumalla, säteilemällä tai konvektiona. Energiapaalussa lämpöenergia siirtyy maahan ja maasta konvektiolla ja johtumalla. (Ylähirsilä 2004)

3.1 Johtuminen

Johtumisessa (konduktiossa) molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen. Siirtymisen vuoksi voidaan puhua *lämmön virtauksesta*. Lämpö pyrkii tasoittumaan väliaineissa eli virtaamaan lämpimästä kylmempään päin. Lämmön johtumista esiintyy kiinteissä aineissa ja nesteissä. Energiapaalussa johtumalla siirtyvä lämpöenergia eli lämpövirta voidaan laskea. Lämpövirta riippuu maan sekä lämmönkeruunesteen lämpötilaeroista. (Ylähirsilä 2004)

$P[W] = k[W/mK] * \Delta T[K]$, missä

P [W] =lämmönsiirtimen teho

k [W/mK] =maan lämmönjohtavuus

ΔT [K] =lämpötilaero (Ylähirsilä 2004)

Kun maahan ladataan lämpöenergiaa, maan lämpötila nousee. Tämä kasvattaa sinne menevän keruunesteen ja maan välistä lämpötilaeroa. Lämpötilaeron kasvaessa kasvaa myös järjestelmästä saatu teho. Tämä johtaa siihen, että järjestelmän voi toteuttaa pienemmällä määrällä aktivoitavia paaluja. Näin päästään pienempiin investointikustannuksiin. (Mikko Ojala, 2014.)

3.2 Konvektio

Konvektio on pääasiallinen lämmönsiirtomekanismi varsinkin hienojakoisessa maassa. Konvektiossa (virtauksessa) lämpö siirtyy kaasun tai nesteen virtauksen mukana. Konvektio voi olla joko pakotettua tai luonnollista. Pakotetussa konvektiossa kaasu tai neste liikkuu jonkin ulkopuolisen voiman vaikutuksesta. Luonnollisessa konvektiossa taas lämpötilojen aiheuttama tiheysero saa aikaan liikkeen. Lämpöä siirtyy lisäksi aineen olomuodon muutoksissa (sulamis- ja höyrystymislämpö) lämpötilan muuttumatta. Tätä lämmön muotoa kutsutaan *latentiksi* eli *piileväksi*. (Ylähirsilä 2004)

Energiapaalussa energia siirtyy pakotetun konvektion avulla kiertovesipumpulla, joka kierrättää nestettä paalujen ja lämpöpumpun välillä. (Mikko Ojala, 2014).

Lämmönvaihtimen lämpöteho W [W], joka virtaa nesteen liikkumisessa, voidaan laskea kaavalla

$$W = c * \rho * \Delta T * V, \text{ missä}$$

W = lämmönvaihtimen lämpöteho [W]

c = keruunesteen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]

ρ = keruunesteen tiheys [kg/m³]

ΔT = lämpötilaero [K]

V = tilavuusvirta [m³/s] (Mikko Ojala, 2014).

Lämmön vaihtimesta saatava lämpömäärä Q lasketaan kaavasta

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} W dt,$$

missä t_1, t_2 on aika [s]. (Mikko Ojala, 2014).

Tehokkainta konvektio on silloin, kun virtaus on turbulenttista. Virtausteknisinä mitoitusperusteina ovat putken sisähalkaisija ja virtauksen turbulentsuus. Turbulenttisessa virtauksessa putken sisäpinnassa ei ole lähes seisovaa lämmönvastuksena toimivaa kerrosta, vaan se joutuu kosketuksiin jatkuvasti uusien virtaavan aineen osasten kanssa, joiden lämpötila poikkeaa huomattavasti pinnan lämpötilasta. Virtausprofiili on sitä tasaisempi, mitä suuremman arvon Reynoldsin luku saa ja mitä pienempi on pinnankarheuden arvo. (Tapio Syrjälä, 2013.)

Putkivirtaus on varmasti turbulenttista, kun Reynoldsin luku on 10 000. On järkevää käyttää mitoitusperusteena turbulentsuuden alarajaa $Re = 2300$ virtausmäärää laskettaessa. Putkivirtauksen mitoituksessa on myös huomioitava liuoksen viskositeetti ja tiheys. Näiden perusteella voidaan laskea vaadittava virtausnopeus ja sen perusteella edelleen virtauksen määrä putkistossa. Silloin kun virtausmäärä ja siitä riippuvat kokonaisvastukset tunnetaan, valitaan pumppukäyrän perusteella mittausjärjestelmään virtausteknisesti parhaiten soveltuva pumppu. (Tapio Syrjälä, 2013.)

Vesietanoliliuoksen virtausnopeus voidaan määrittää lämmönsiirto-putkistossa:

$$v = \frac{\mu Re}{\rho D}, \text{ missä}$$

v = virtausnopeus [m/s]

Re = Reynoldsin luku

μ = keruunesteen viskositeetti

D = putken sisähalkaisija [m]

ρ = lämmönsiirtonesteen tiheys [kg/m^3] (Tapio Syrjälä, 2013).

4 KAMPUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

4.1 Lähtötiedot

Tilaajana hankkeessa toimii Turun teknologiakiinteistöt Oy ja sen toteuttaa YIT Oyj. Kampusrakennus tulee Kupittaaalle Joukahaisenkadulle.

Maaperän kerrosrakennetta on tutkittu paino- ja porakonekairauksin. Lisäksi on käytetty hyväksi alueella aikaisemmin tehtyjä maaperätutkimuksia ja naapureiden paalupöytäkirjoja.

Kampusrakennus on suunniteltu vanhoille teollisuustonteille ja sen kansirakenne on suunniteltu kahden rakennuksen väliin. Pintatäyttöjen paksuus vaihtelee 1...2 metriin. Paikoin täyttöä voi olla enemmänkin. Täytön alla on kiilamainen savikerros. Joukahaisenkadun puolella savea on noin 2...3 metriä. Savikerros syvenee Lemminkäisenkadun suuntaan ollen enimmillään noin 7 metriä. Savi on pääosin pehmeää ja vesipitoisuudeltaan 50...70%. Saven lujuus on enimmillään noin 10 kPa. Savikerrostuman alla on kerrosellinen hiekka-sorakerrostuma. Kairauksista pääteltynä sorakerrostuman paksuus on 4...7 metriä koko rakennuspohjalla.

Sorakerrostuman pohjalla on kivistä moreenia ennen peruskalliota. Pohjatutkimuksista on arvioitavissa, että maapeitteen paksuus alueella on 8...13 metriä. Viereisen asemakeskuksen paalut ovat tunkeutuneet rajan tuntumassa noin tasovälille +7...+9 eli ovat pituudeltaan alle 10 metriä. Pohjavesi on lähialueen pohjavesiputkista ja viereisestä kaivannosta pääteltynä noin tasolla +17. Vaihteluväli keskimäärin $\pm 0,5$ metriä. Sorakerrostuman pohjalla on kivistä moreenia ennen peruskalliota. Pohjatutkimuksista on arvioitavissa, että maapeitteen paksuus alueella on 8...13 metriä. (Henkilökohtainen tiedonanto).

Kohteessa on tarkoitus ladata porakaivoihin energiaa, jota saadaan moottorilaboratorion jäähdtyksestä. Moottorien jäähdtyksnesteen lämpötila on noin 80°C. Kaivot on instrumentoitu Geologian tutkimuskeskuksen toimesta ja niistä saadaan tutkimustietoa lämmönvarastoisesta kalliosta.

4.2 Suunnittelu

Suunniteltu Kampusrakennus ja kansirakenne perustetaan kokonaisuudessaan lyötävillä tukipaaluilla kovaan pohjaan. Kohteen geotekninen luokka on GL3 ja paalutustyöluokka PTL3.

Pohjatutkijan suosittelemia paalutyypivaihtoehtoja:

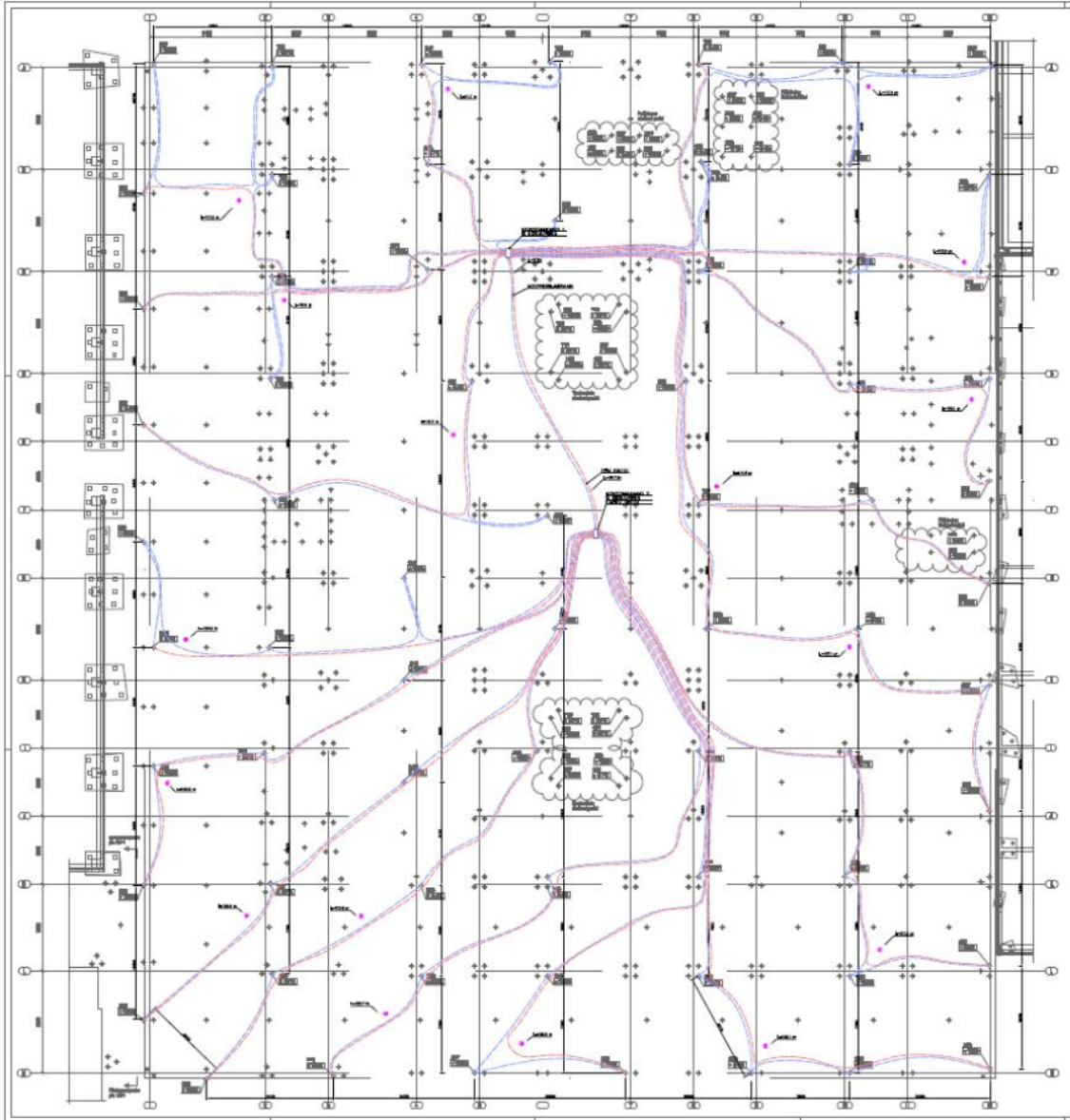
- RRs 170 x 10 Rd = 1 100 kN/paalu
- RRs 220 x 10 Rd = 2 200 kN/paalu.

Paalut varustetaan kalliokärjillä ja korroosiovaraksi on otettu 2 mm. Paalupituudet on arvioitu tutkimuspiirustuksissa.

Hybridipaalut toteutetaan RD 170/10 paalutyypillä, jotta niiden sisältä voidaan jatkaa kaivonpوراusta. Hybridipaaluja tulee yhteensä 3 kpl. Ne porataan kallioon yleensä vähintään 0,5-1 metriä. Tästä eteenpäin jatketaan paalun sisästä kaivon poraamista.

Alun perin oli tarkoitus toteuttaa useita energiapaaluja, mutta työmaan aikataulun ja jo aloitettujen töiden vuoksi tätä ei ehditty enää tehdä. Tästä syystä päädyttiin poraamaan 3 kpl porakaivoja opetus- ja tutkimuskäyttöön. Kaivojen syvyydet ovat 150 m, 200 m ja 250 m. Kaivoihin ladataan kesäaikana moottorilaboratorion jäädytyksessä syntynyttä hukkalämpöä. Lämmityskaudella kallioon varastoitunutta lämpöä puretaan ja hyödynnetään mm. ilmanvaihdon esilämmitykseen. Järjestelmän suunnittelusta vastaa Sweco Oy.

Urakoitsija ei halunnut energiapaaluja, koska jokaiselta energiapaalulta lämmönjakohuoneeseen menevät putket olisivat mahdollisesti häirinneet työmaan arkea suuresti. Tämä olisi kuitenkin voitu välttää hyvällä suunnittelulla. Kohteessa oli jo aloitettu paalutustyöt ennen kuin energiapaaluja alettiin miettiä. Tästä johtuen suunnitteluun ei ollut riittävästi aikaa.



Kuva 7. Alkuperäinen energiapaalujen putkituskuva. Paaluja 700 kpl, joista energiapaaluja 68kpl.

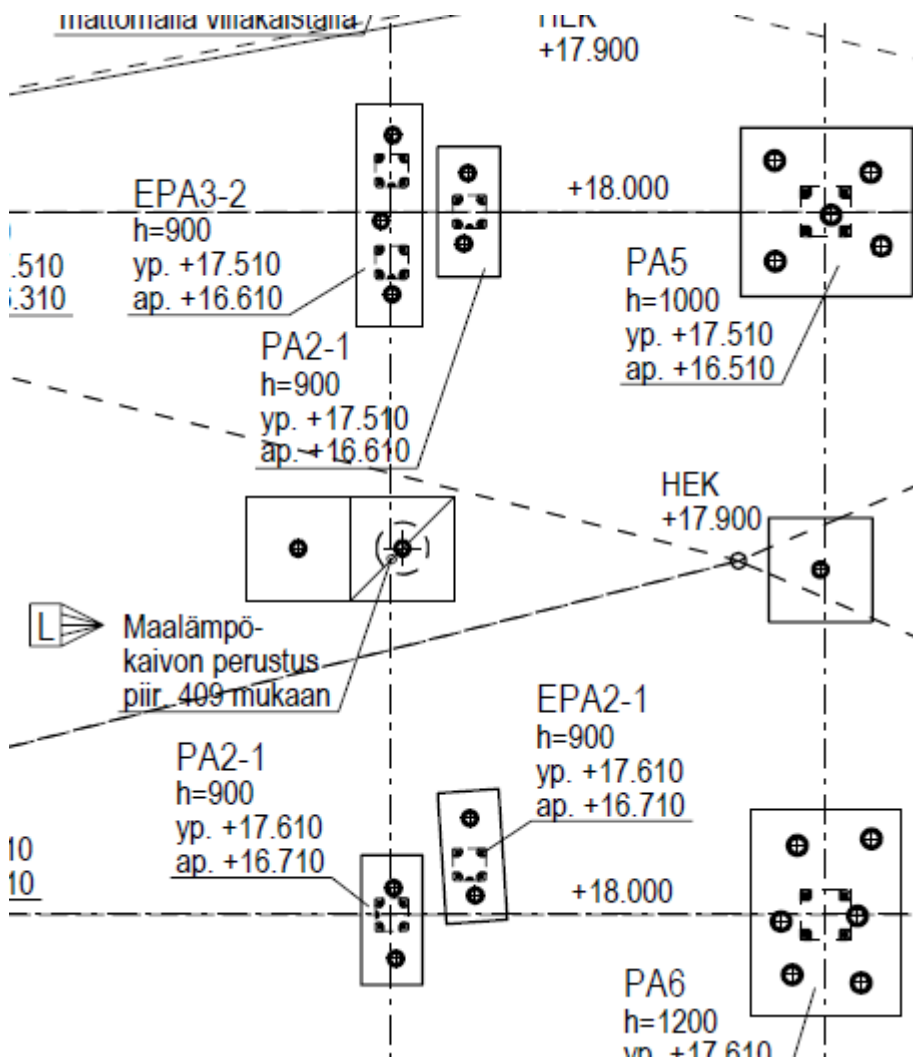
4.3 Toteutus

Kampuksen porakaivot toteutettiin hybridiratkaisuna, jossa porakaivon suojaputki korvataan kantavalla porapaalulla. Paalut porattiin 1,7-3,1 m kalliin ja niille tulee 40 tn kuorma. Yhteensä kaivoja tuli kolme. Paalun sisäpuolelta jatkettiin kaivon poraamista. Syvin kaivo oli 250 m. Kaivon porareian halkaisija oli 115 mm. Kalliokaivo Oy toteutti porapaalutuksen ja porauksen.

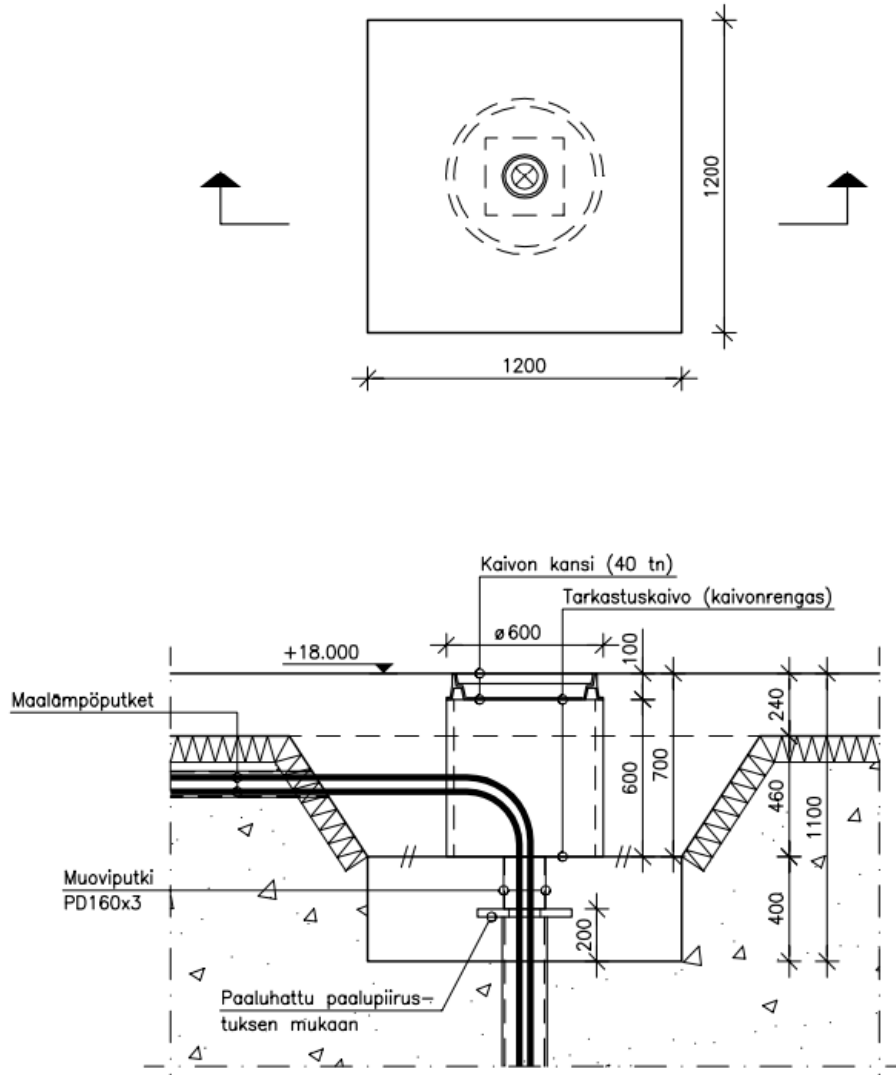
Kampuksen lämmönsiirtonesteeksi valittiin Altia Oy:n valmistama Naturet-lämmönsiirtoneste. Käyttövalmiin Naturet-lämmönsiirtonesteen jäätymispiste on -17 °C , kun etanoli-pitoisuus on noin 28 %. Nesteen tiheys $+20\text{ °C}$:n lämpötilassa on $0,96\text{ kg/l}$, lämmönjohtavuus $0,44\text{ W/mK}$, ominaislämpökapasiteetti $0,425\text{ kJ/kgK}$ ja viskositeetti $0,0076\text{ kg/ms}$. (Altia Oyj, 2018.)

4.4 Detaljit

Kuvissa 8, 9 ja 10 esitetään yksi kolmesta kaivosta. Kaivon päälle tehtiin kansi, jotta muovisen keruuputken liitos on tarkastettavissa. Kaivo sijaitsee parkkihallissa, joten sen on kestävä yli ajoa autolla.



Kuva 8. Maalämpökaivon tasokuva.



Kuva 9. Maalämpökaivon/energiapaalun yläpään detali (R. Koskela henkilökohtainen tiedoksianto 2018).



Kuva 10. Lämpökaivo

5 KUSTANNUKSET

5.1 Teoreettinen energiansaanti

Oikein suoritettu mitoitus on energiapaalujärjestelmän hankinnan tärkeimpiä kriteerejä. Laskennalla saadaan selville energiapaaluinvestoinnin kannattavuus.

Maalämpöjärjestelmän hankinnassa on erittäin tärkeää huolehtia mitoituksen onnistumisesta. Muutoin on mahdollista, että maalämpöpumppu tuottaa liian suuren osan lämmöntarpeesta lisävastuksilla, mikä kuluttaa kallista sähköenergiaa. Vaihtoehtoisesti on myös mahdollista, että liian suuren tehon takia maalämpöpumppu kävisi pätkäkäyntiä, joka mm. lyhentää maalämpöpumpun elinikää sekä heikentää sen hyötysuhdetta merkittävästi. Maalämpöjärjestelmän mitoitus perustuu talon lämmityksen ja lämpimän käyttöveden tarvitsemaan, todelliseen energiamäärään. (ST1 Oy, 2018)

Tarvittava paalumäärä voidaan laskea seuraavasti:

Tarvittava teho [W], eli rakennuksen energiankulutus, saadaan esimerkiksi tasauslaskennasta 155,6 W/K. Lämpötila voi talvella olla 21 °C sisällä ja -26 °C ulkona. Tästä syntyy lämpötilaeroa 47 Kelviniä. (D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma 2013)

Tarvittava pumpun teho (P_p) on näin ollen

$$P_p = 47 \text{ K} * 155,6 \text{ W/K} = 7,3 \text{ kW}.$$

Pumpun COP (*Coefficient Of Performance*) kertoo, kuinka tehokkaasti kulutettu sähköenergia saadaan muutettua lämpöenergiaksi. Esim. merkintä COP 4 tarkoittaa, että 1 kilowatilla sähköenergiaa saadaan tuotettua 4 kilowattia lämpöenergiaa. (Nilan Oy, 2018).

$$\text{Sähköteho} = 1,82 \text{ kW} = \frac{7,3 \text{ kW}}{\text{COP}=4}$$

Näin ollen maasta tulisi saada 5,48 kW ja sähköä tarvitaan 1,82 kW.

Tarvittava paalun metrimäärä [L] voidaan nyt laskea. Saven lämmönjohtavuus on 2,5 W/mK. Maaperän lämpötila on 6 astetta.

$$L = \frac{5480W}{2,5 \frac{W}{mK} * 6 K} = 365m$$

Todellisuudessa aktivoituja paaluja ei tarvitse olla näin paljoa koska -26 °C pakkasia ei ole kovin montaa päivää vuodessa. Näin ollen järjestelmä voidaan alimitoitaa ja kovimmilla pakkasilla korvata sähkövastuksella. Tätä kutsutaan *osatehoiseksi järjestelmäksi*. Osatehoinen järjestelmä voidaan esimerkiksi mitoitaa 60-80 % mitoituspakkasesta. Niinä päivinä, jolloin pakkanen on huipussaan, erotus tuotetaan sähkövastuksella. Tällä tavalla saavutetaan korkeampi lämpöpumpun hyötysuhde ja pidennetään kompressorin elinikää. (ST1 Oy 2018)

Energiapaalujärjestelmässä ensimmäiset kilowatit ovat selvästi tuottavimmat. Jos tavoitteena on parhaiten suhteellisesti tuottava maalämpöinvestointi, silloin päästään osateholla parempaan lopputulokseen. Osatehoisella järjestelmällä voidaan valita pienempi tehoinen pumppu, joka pienentää investointikustannuksia.

Jos järjestelmä kuitenkin mitoitetaan kokotehoiseksi, paalumääräksi saadaan 21 m pitkillä paaluilla 17 kpl, sillä 21 m*17 kpl=357 m.

Putkiston koko voidaan määrittää seuraavasti:

Putkiston koko on verrannollinen putken hintaan. Pienempi putki on yleensä aina halvempi.

Käyttövalmiin Naturet-lämmönsiirtonesteen jäätympiste on -17 °C, kun etanolipitoisuus on noin 28 %. Nesteen tiheys +20 °C:n lämpötilassa on 0,96 kg/l, lämmönjohtavuus 0,44 W/mK, ominaislämpökapasiteetti 0,425 kJ/kgK ja viskositeetti 0,00266 Pa*s. (Altia Oyj, 2018.)

Yhden paalun teho on (P) paalujen pituuksien ollessa samoja. Paaluja on yhteensä 17 kpl.

$$P = \frac{5480W}{17kpl} = 322W$$

Tehon vaatima vähimmäisvirtaus [\dot{m}] on:

$$\text{Virtaus putkistossa } \dot{m} = \frac{322\text{W}}{4250 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 6 \text{ K}} = 0,013 \text{ kg/s}$$

Nesteen tiheys vaikuttaa tilavuuteen:

$$0,013\text{kg/s} * 0,96\text{kg/l} = 0,012 \text{ l/s.}$$

Virtausnopeudella (V) voidaan määrittää tarvittava putkikoko. Vesietanoliliuoksen virtausnopeuden alaraja lämmönsiirtoputkistossa:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{0,013}{960 * 0,0003268513} = 0,041 \text{ m/s}$$

D = 0,0204 [m] putken sisähalkaisija

$\rho = 960 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ lämmönsiirtonesteen tiheys

A = 0,0003268513 [m²] virtaus poikkipinta-ala

$\dot{m} = 0,013 \text{ [kg/s]}$ syöttöveden massavirta

$\mu = 0,00266 \text{ [Pa *s]}$ dynaaminen viskositeetti

Tämän jälkeen lasketaan virtauksen Reynolds-luku [Re] kaavalla

$$Re = \frac{V * D * \rho}{\mu}$$

$$Re = \frac{0,041 * 0,0204 * 960}{0,00266} = 305.$$

Ei ole turbulენტista, koska $Re < 2300$.

Jotta lämmön siirtyminen toimisi parhaiten, nostetaan virtausnopeutta niin paljon, että Reynolds-luvuksi tulee yli 2 300:

$$Re = \frac{0,31 \left[\frac{m}{s}\right] * 0,0204[m] * 960[kg/m^3]}{0.00266[Pa*s]} = 2315.$$

Tarvittava virtausnopeus on siis 0,31 m/s.

Energiapaaluista saatava lämpömäärä [Q] vuodessa lasketaan kaavasta. Maaperän lämpötila on +6C.

$$L = \frac{5480W}{2,5 \frac{W}{mK} * 6 K} = 365m.$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} W dt, \text{ missä } t_1, t_2 \text{ on aika [s].}$$

$$W = 5480 [W]$$

$$t_1 = 0 [s]$$

$$t_2 = 31536000 [s] \text{ (Sekunteja vuodessa)}$$

$$\text{Vuodessa maasta saatava maksimilämpömäärä } Q = 172817,28 [MJ]$$

Järjestelmän tehoa voidaan nostaa lataamalla saveen lämpöä esimerkiksi aurinkokeräimillä tai kesällä ylimääräisellä hukkalämmöllä. Esimerkiksi 7 kpl tyhjiöputkikeräimiä voi tuottaa seuraavasti lämpöenergiaa (Q):

toukokuussa 919 kWh

kesäkuussa 827 kWh

heinäkuussa 864 kWh

elokuussa 644 kWh.

Yhteensä neljän kuukauden aikana järjestelmästä saadaan siis lämpöenergiaa (Q_{aurinko})

$$Q_{\text{aurinko}} = (919[kWh] + 827[kWh] + 864[kWh] + 644[kWh]) * 3,6 = 11\,714,4 [MJ].$$

Yhteenlaskettu lämpömäärä on siis $Q_{\text{aurinko}} = 11\,714,4 [MJ]$.

Lämmöntarve ei ole kuitenkaan koko ajan huipussaan, vaan se vaihtelee ulkolämpötilan mukaan. Vuodessa tarvittava lämpöenergia voidaankin laskea vuoden keskilämpötilan

perusteella. Vuoden keskilämpötila on 4,29 °C pääkaupunkiseudulla. Tästä voidaan laskea rakennuksen sisä- ja ulkolämpötilaero. Rakennuksen sisälämpötila on 21 °C, joten lämpötilaero on 16,71 K.

Talon vuotuinen energiantarve voidaan laskea seuraavasti:

$$155[W/K] * 16,71[K] * 31536000[s] = 81679,8168 [MJ]$$

$$\left(\frac{11714,4[MJ]}{81679,8168[MJ]} \right) * 100 = 14,3\%.$$

Aurinkokeräimillä voidaan siis tässä esimerkissä tuottaa 14,3 % talon tarvitsemasta lämpöenergiasta, jos se ladataan saveen. Lisäksi jäähdytyskaudella voidaan hukkalämpöä ladata myös maahan, jolloin maahan ladattavan energian määrä kasvaa entisestään.

$$\frac{11714,4[MJ]}{1812 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 1[K] * 1845 \left[\frac{J}{kg} * K \right]} = 3504[m^3]$$

Aurinkokeräinjärjestelmästä saatavalla lämpöenergialla voidaan nostaa 3504 m³ savimassan lämpötilaa yhdellä asteella.

$$Q[J] = V[m^3] * c \left[\frac{J}{kg} * K \right] * \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right], \text{ missä}$$

Q = aurinkokeräimistä saatu lämpöenergia [J]

V = saveen tilavuus [m³]

c = saveen ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]

ρ = saveen tiheys [kg/m³]

Paaluja on 17 kpl, joten yhtä paalua kohden savea on 206,3 m³. Jos maaperän lämpötila on normaalisti 6 astetta, voidaan se siis lämmittää 7-asteiseksi.

Todellisuudessa maaperän lämpötila on paalun lähellä sinne syötettävän nesteen lämpötilassa esim. 15-astetta. Tästä kauemmas mentäessä saveen lämpötila tasoittuu takaisin 6 °C:een. Lämpötilaero on siis 9 °C. Savi ei ole kuitenkaan kokonaan lämmennyt tämän verran. Keskimääräinen lämpötilan nousu on 4,5 °C. Tällä lämpötilan nousulla voidaan laskea lämmenneen saveen tilavuus.

$$Q[J] = V[m^3] * c \left[\frac{J}{kg} * K \right] * \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] * [K], \text{ missä}$$

Q = aurinkokeräimistä saatu lämpöenergia [J]

V = saven tilavuus [m³]

c = saven ominaislämpökapasiteetti [J/(kgK)]

ρ = saven tiheys [kg/m³]

Ladattava lämpöenergia yhtä paalua kohden on

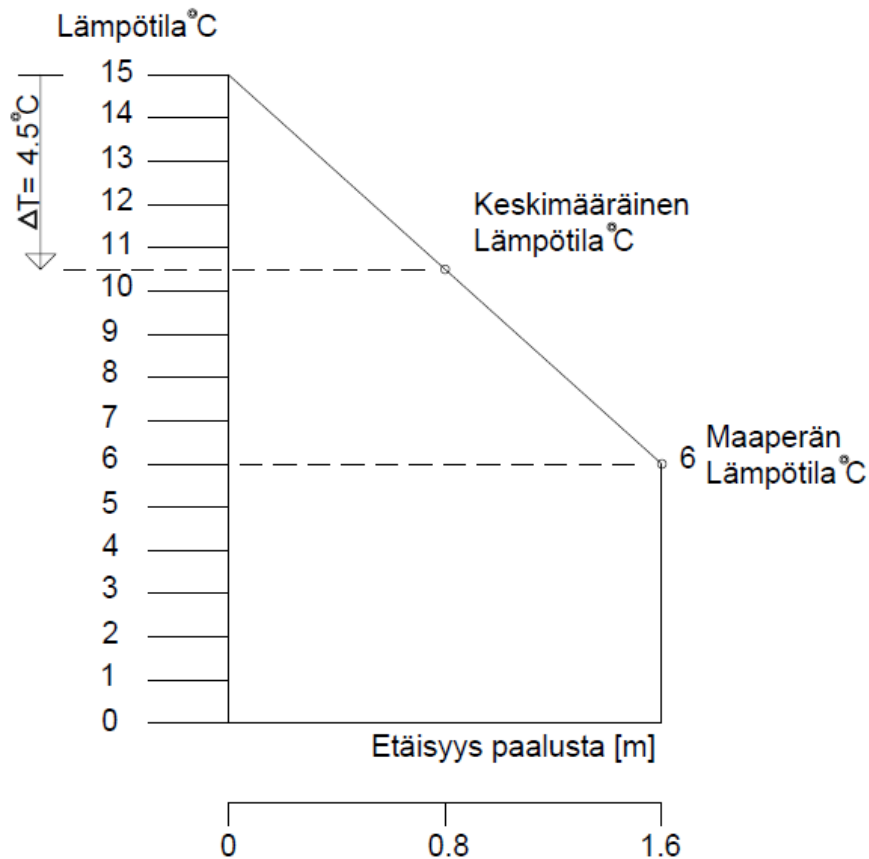
$$\frac{11714,4[MJ]}{17kpl} = 689,082[MJ].$$

Yhden paalun lämmitetyn saven tilavuus on

$$(\pi * r^2[m] * 21[m]) * 1845 \left[\frac{J}{kg} * K \right] * 1812 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 4,5[K] = 689,082[MJ].$$

Lämmitetyn saven tilavuus on näin ollen 717,8 m³. Paalua kohden savea on 42,23 m³.

Nyt lämmitetyn saven etäisyys (r) on paalusta 0,8 m. Tästä kauempana savi on taas normaalilämpötilassa.



Kuva 11. Lämpötilakuvaaja

Lämpöenergia ei tietenkään pysy savessa täydellisesti siihen asti, kunnes sitä tarvitaan. Tähän vaikuttaa saven lämmönjohtavuus ja savessa olevan veden virtaus. Savessa oleva vesi liikkuu äärimmäisen hitaasti. Veden liikkumisnopeus voi olla jopa 1 m / 70 vuodessa. Jos savipatjaa kuormitetaan, vesi alkaa paineen kasvun vaikutuksesta liikkumaan. Liikkeet ovat näissäkin tapauksissa niin hitaita, että niitä on tarpeetonta huomioida. Saven painumalaskelmissakin ajat ovat todella pitkiä. Veden liikkuminen on saven pinnassa nopeampaa kuin syvällä. Veden liike savessa on siis käytännössä olematon.

Saven lämmönjohtavuudesta johtuva lämpöhäviö on sitä suurempi, mitä suurempia lämpötilaerot ovat.

Lämpöenergiahäviö savessa kuukaudessa 4,5 Kelvinin lämpötilaerolla. Paalua on yhteensä 365 m.

$$Q[J] = 2,5 \left[\frac{W}{mK} \right] * 365[m] * 4,5[K] * 2592000[s] = 10\,643,4 [MJ]$$

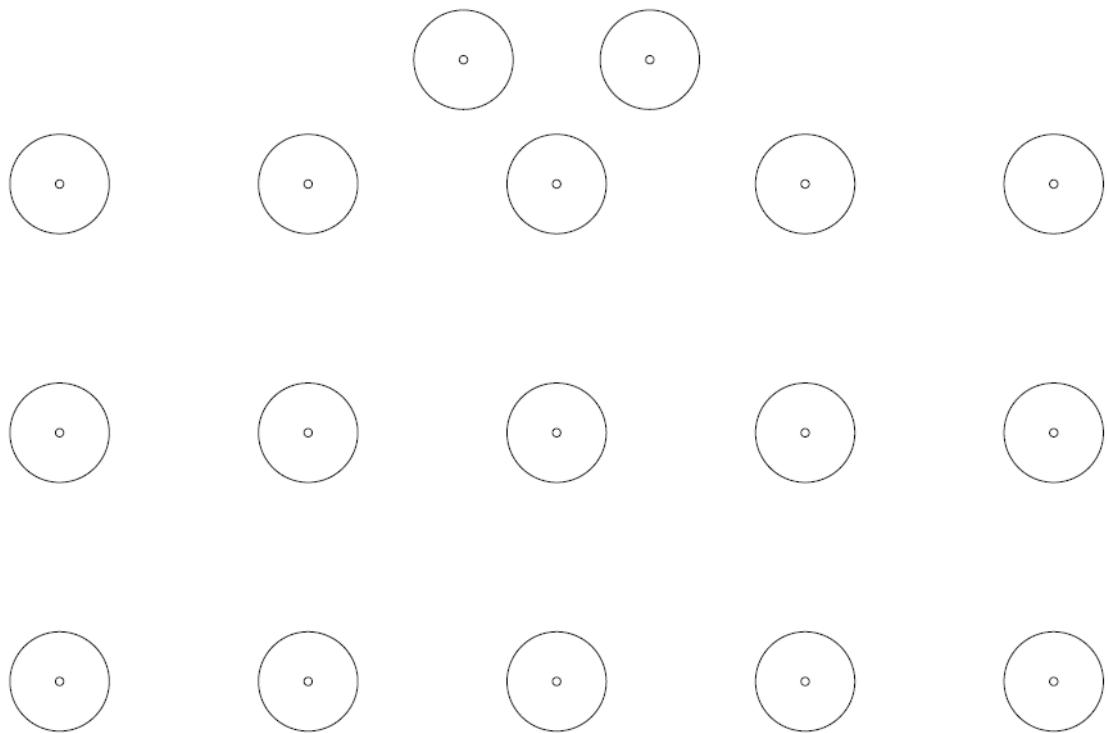
Auringosta saatu energia oli esimerkiksi 11 714,4 [MJ]. Hieman yli kuukaudessa kaikki auringosta ladattu energia on siis mennyt hukkaan. Tämä johtuu siitä, että savimassa ei ole kauttaaltaan lämmin, vaan lämpöä on ainoastaan noin 0,8 m:n säteellä paalusta. Tästä syntyy lämpöhäviö koko paalun kehälle. (Kuva 12.)

Havainnollistavassa kuvassa koko savimassa on lämmitetty (kuva 13). Tällöin keskimäisillä paaluilla ei ole lämpöhäviötä ollenkaan ja reunimmaisilla paaluilla se on noin puolet kehästä. Näin ollen voidaan pienentää lämpöhäviötä aiheuttavaa metrimäärää.

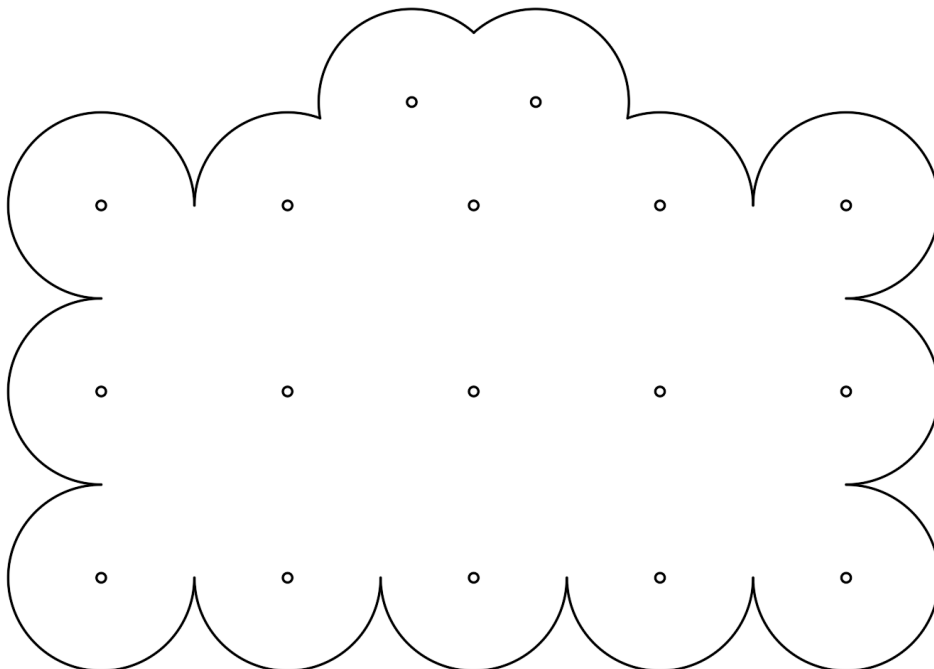
Lämpöenergiähäviö [Q] kuukauden aikana 4,5 Kelvinin lämpötilaerolla kuvan 13 tapauksessa lasketaan seuraavasti:

$$Q[J] = 2,5 \left[\frac{W}{mK} \right] * 136.5[m] * 4,5[K] * 2592000[s] = 3980340000 [J]$$

Nyt lämpöenergiähäviö on 37 % edellisestä. Auringosta ladattu lämpö on hävinnyt noin kolmessa kuukaudessa. Kenttä on siis tehokkaampi, mitä suurempi ja tiheämpi se on. Paaluväliä pienentämällä päästään kuvassa olevaan tasalämpöiseen savimassaan helpommin, koska silloin paalujen välissä on vähemmän savea. Tämä mahdollistaa matalamman lämpötilan, jolloin lämpöhäviöt pienenevät entisestään.



Kuva 12. Paalujen ympärillä lämmennyt savi ei ole lämmennyt kokonaan. Lämpöhäviötä tapahtuu joka puolelle.



Kuva 13. Kokonaan lämmitetty savimassa jossa lämpöhäviötä tapahtuu vain ulkoreunoilla.

5.2 Kustannusvertailu energiapaalun ja porakaivon kesken

Energiapaalutuksessa syntyvät ylimääräiset kustannukset ovat suurin piirtein kaivon porauksen verran pienemmät kuin perinteisessä porakaivo-maalämpöjärjestelmässä. Esimerkkikohteessa aktivoitavien paalujen lukumäärä on 17 kpl ja pituus 21 m. Keruuputki tekee lenkin, joten yhteen paaluun keruuputkea tarvitaan noin 42 m. Paalut ovat RR115/6.3, jonka sisälle mahtuu betonia 0,17 m³ paalun ollessa 21 m pitkä. Lisäksi jokaiselta paalulta menee jakotukille putki, joka on 10 metriä.

Keruuputki paalun sisälle PEX 25 mm	2,81 €/m
Vaakaputki jakotukille PEX 25 mm	2,81 €/m
Pumppaus 300 € + betoni	150 €/m ³
Paalun yläpään loveus tai reiällisen paaluhatun tuoma lisäkustannus	15 €

Yhden paalun lisäkustannukset

Betoni	25,5 €
Putket	174,22 €
Paalun yläpään loveus tai reiällisen paaluhatun tuoma lisä	15 €

Muut järjestelmän kustannukset

Betonin pumppaus	300 €
Jakotukki	1 500 €
Järjestelmän hinnaksi tulee näin ollen	5 450 €
Työn hinnaksi voidaan arvioida	9 €/m

Kokonaismateriaali ja työkustannukset ovat siis 8 663 €

Hinnat ovat kuluttajahintoja, joten materiaalien todellinen hinta on alhaisempi.

Vastaavan tehoisen porakaivon hinta

$300 \text{ m} * 28 \text{ €/m} + 21 \text{ m} * 60 \text{ €/m} = 9\ 660 \text{ €}$

Vaakaputkituksen hinta on 600 €

Porakaivon hinta on siis yhteensä 10 260 €

Porakaivo voidaan myös täyttää esimerkiksi kvartsihiekalla, josta tulee lisäkustannuksia. Kaivo voidaan myös joutua räjäyttämään veden virtauksen lisäämiseksi. Nämä aiheuttavat lisäkustannuksia porakaivolle.

Kallioporauksen hinnat ovat tippuneet viime aikoina paljon, koska kilpailu on kasvanut ja kaluston tehokkuus on parantunut.

6 ENERGIAPAALUJEN MAHDOLLISET VASTUU- JA VAKUUTUSONGELMAT

Teräspaalujen hyödyntäminen energiapaaluina ei edellytä erityisiä erillislupia, kuten porakaivojen poraaminen, jolloin tämä säästää myös kustannuksia rakennuslupavaiheessa.

”Keruuputkistossa käytettävä laimennettu etanoliliuos on pääsääntöisesti vahvuudeltaan 28 % (jäätymispiste -17 °C), joka luokitellaan syttyväksi. Syttyvillä kemikaaleilla ilmoitusvelvollisuuden raja on 5 tonnia ja lupavelvollisuuden raja 100 tonnia.” (Juvonen Janne, Lapinlampi Toivo, 2013.)

Lämpöenergian varastoinnin lisääntyessä tulee tutkia maan lämpötilan nousun vaikutuksia mm. mikrobeihin ja saven painumiin. Koska maaperä on normaalisti kostea, se tarjoaa otollisen kasvualustan mikrobeille. Maaperän ollessa tavanomaisen viileä, se tarjoaa tietynlaiset kasvuolosuhteet mikrobeille, jos maaperää lämmitetään. Jos maaperää lämmitetään talon alla, voi tästä aiheutua kasvuston lisääntymistä. Tästä voi syntyä mahdollisia haju- ja sisäilmaongelmia, jos asiaa ei oteta suunnittelussa huomioon. Sisäilmaongelmat voidaan ratkaista riittävällä alapohjan tuuletuksella.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Työssä esiteltiin aluksi energiapaalun toimintaperiaatetta. Tämän jälkeen esiteltiin energiapaalun mitoituksen kulkua, lämmön siirtymistä ja siihen vaikuttavia asioita. Työssä esiteltiin myös Turun ammattikorkeakoulun uuden kampuksen hybridipaalut. Laskettiin lämmön varastoinnin mitoitus esimerkki kuvitteellisesta kohteesta. Laskelmien lisäksi tehtiin kustannusvertailu porakaivon ja paalun välillä.

Opinnäytetyön tärkein ja suurin osa oli lämmön latauksen laskelmat ja kustannusvertailu paalun ja porakaivon välillä.

Energiapaalut ovat tämän tapauksen perusteella kustannustehokkaampi vaihtoehto porakaivoon verrattuna, mikäli paalut tulisivat rakennukseen joka tapauksessa. Tämä korostuu paalupituuksien kasvaessa entisestään. Lämmön varastointi on myös mahdollista ja jossain määrin kannattavaa energiapaalua ympäröivään saveen. Tämä edellyttää kuitenkin energian olevan lähes ilmaista. Ilmaista energiaa ovat käytännössä hukkalämpö ja aurinkoenergia. Aurinkokeräimillä on tosin alkuinvestointinsa. Maa-akun lämpöhäviöön vaikuttavat saveen ominaisuudet, ladattava lämpöteho ja paalujen etäisyys toisistaan.

Esimerkilaskelmissa saveen lämmönjohtavuus oli suurin mahdollinen. Tällöin savesta saadaan eniten maalämpöä, mutta sen varastointikyky on huonompi, koska lämpö häviää nopeammin. Maa-akun kannattavuus paranee, jos savi on huonosti lämpöä johtavaa. Tyhjiöputkikeräinten hyötysuhteen voidaan olettaa nousevan tulevaisuudessa tekniikan kehittyessä. Tämä tekee lämmön maaperävarastoinnin kannattavammaksi tulevaisuudessa.

LÄHTEET

SSAB AB 2018 Suunnittelu- ja asennusohjeet. Viitattu 10.4.2018
<https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastruktuuri/tuotteet/steel-piles-micropiles>

Leppäharju, Nina, 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät <https://www.sulpu.fi/documents/184029/2220831/11-%20Nina%20Lepp%C3%A4harju%20-%20Energiakaivojen%20mitoitukseen%20vaikuttavat%20tekij%C3%A4t.pdf>

Mitoitus. GTK (geologian tutkimuskeskus) viitattu 10.4.2018

<http://www.gtk.fi/export/sites/fi/ajankohtaista/painotuotteet/esitteet/MessuEsite.pdf>

Atlas Foundations, Business units and products > Pile foundations > Energy pile, viitattu 10.4.2018, <http://www.ffgb.be/Business-Units/Piles/Energiepaal.aspx>

Juvonen Janne, Lapinlampi Toivo, 2013, Energiakaivo, http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Julkaisut/YO_2013_Energiakaivo%2824946%29

Uponor Oy, 2015, Energiapaalut tuotekortti <https://www.uponor.fi/-/media/country.../17004-energiapaalut-tuotekortti-2015.pdf>

Altia Industrial Oy, Naturet- maalämpöneste, viitattu 10.4.2018, <https://www.altiaindustrial.com/fi/node/76>

Lapon Oy, 2018, Maalämpökentän mitoitus, viitattu 10.4.2018 <https://www.lapon.fi/maalampokentan-mitoitus>

Tapio Syrjä, 2013, Geoenergiälähteen termisten ominaisuuksien mittaamiseen soveltuvan laitteiston suunnittelu ja toteutus

Nilan Oy, henkilökohtainen tiedonanto 15.4.2018

ST1 Oy, Osa- vai täystehomitoitus, viitattu 10.4.2018 <http://st1maalampo.fi/maalampo/maalampopumppu-toiminta/>

Mikko Ojala, 2014, Aurinkolämmön varastointi Östersundomin aluerakennuskohteessa

Andersland, O.;& Ladanyi, B. 2004. Frozen ground engineering 2. painos. John Wiley and Sons.

Ylähirsilä, 2004, Rafnet-oppimateriaalin teoriaosio L (Lämpö)

Rototec Oy, henkilökohtainen tiedonanto 10.4.2018

Aurime Oy, Aurime Elli energiapaalu, viitattu 10.4.2018, <http://www.energiapaalu.fi/>

Lautkankare Rauli, henkilökohtainen tiedonanto 11.5.2018

