



Ulkotekojään energiajärjestelmä

Lämmönkeruujärjestelmän mitoitus

Otto Väänänen

OPINNÄYTETYÖ

Toukokuu 2019

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-tekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
LVI-tekniikka

VÄÄNÄNEN, OTTO:
Ulkotekojään energiajärjestelmä
Lämmönkeruujärjestelmän mitoitus

Opinnäytetyö 59 sivua, joista liitteitä 6 sivua
Toukokuu 2019

Opinnäytetyön taustana on ulkoliikuntapaikkojen energiatehokas rakentaminen. Työn aiheena on ulkotekojään lämmönkeruujärjestelmän mitoitus. Työn tarkoituksena oli selvittää ulkotekojään mitoittavat olosuhteet ja sitä kautta järjestelmän teho.

Ulkotekojään höyrystintehoa määrittäessä on aiemmin turvauduttu kokemusperäisiin tunnuslukuihin. Työssä tutkittiin vaihtoehtoja mitoitustapaa, jonka avulla järjestelmä voidaan mitoittaa todellista tehontarvetta vastaavaksi.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytettiin dynaamista simulointia, joka suoritettiin IDA ICE – Ice Rinks And Pools sovellusta hyväksi käyttäen. Teoriaosuus työhön koostettiin kirjallisuuslähteiden ja asiantuntijakeskusteluiden avulla. Esimerkkikohteena käytettiin Kuopion Lippumäkeen rakenteilla olevaa ulkotekojäätä.

Simulointien tuloksena saatiin 150 W/m^2 jäähdytysteho, kun tyypillisesti käytetty tunnusluku oli 200 W/m^2 . Simuloinnista saatiin lisäksi huomattava määrä tuloksia komponenttien käyntiajoista ja tehoprofiileista, joita voidaan hyödyntää järjestelmän suunnittelussa.

Tuloksista huomattiin, että jään ylläpitovaiheen tehontarve on huomattavasti pienempi kuin jäädytysvaiheessa vaadittu teho. Jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää, onko mahdollista pienentää jäädytysvaiheen aiheuttamaa tehopiikkiä. Näin ollen jäähdytysjärjestelmän investointikustannus saataisiin vieläkin edullisemmaksi.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
HVAC Building Services Engineering

VÄÄNÄNEN, OTTO:
Energy System of Outdoor Ice Rink
Refrigeration System in Outdoor Ice Rinks

Bachelor's thesis 59 pages, appendices 6 pages
May 2019

The subject of the thesis was inspired by the construction of energy efficient outdoor sports facilities. The main target of the thesis was to measure the cooling power on outdoor ice rinks. The purpose of this work was to create a guide to help design similar systems.

Previous measuring methods were based on estimates of those with experience. In the thesis, an alternative method was used to measure the system to meet the required cooling power. Dynamic simulation was used as a research method, which was carried out using the IDA ICE-Ice Rinks and Pools application. The theoretical part of the work was conducted through literature sources and expert discussions.

The outdoor ice rink that is under construction in Kuopio was used as an example. As a result of the simulations, a cooling power of 150 W/m^2 was obtained, while the typical value was 200 W/m^2 . In addition, more information about the running times of the components and the power profile was researched. It can be helpful for designing the refrigeration systems.

The results shows that the power requirement for maintaining the ice after freezing is much lower than the power required for the actual freezing period. Further study could tell whether it is possible to reduce the power peak even more. Dynamic simulation proved that there is a great potential to cut the investment cost of refrigeration system.

Key words: outdoor ice rink, energy-efficiency

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
1.1	Opinnäytetyön rakenne	9
2	OLOSUHTEET	10
2.1	Toiminnot.....	10
2.2	Tekojään koko.....	11
2.3	Sää.....	12
2.4	Varjostukset	14
2.5	Jään tavoitelämpötila	15
2.6	Jäänhoitovesi.....	17
2.7	Jäänhoitotapa	18
3	LÄMMÖNKERUUJÄRJESTELMÄ.....	19
3.1	Tekojääalueen rakenne.....	19
3.2	Lämmönkeruuputkisto	22
3.3	Lämmönkeruuliuos	24
3.4	Siirtoputkisto.....	28
3.5	Pumput	30
3.6	Säätö ja ohjaus	33
3.7	Lianerotus ja verkoston ilmaus	34
4	MITOITUSSIMULOINNIT.....	37
4.1	CASE Lippumäki.....	37
5	TULOKSET	39
5.1	Ulkolämpötila ja maan lämpötila.....	39
5.2	Sää.....	39
5.3	Jään lämpötila	42
5.4	Höyrystinteho.....	44
5.5	Tehoprofiili	46
5.6	Tekojääalueen rakenne.....	47
5.7	Verkosto.....	48
5.8	Lämmönkeruuliuos	49
5.9	Pumput	51
6	POHDINTA.....	53
	LÄHTEET.....	56
	LIITTEET	60
	Liite 1. Painehäviölaskelmat	60
	Liite 2. Höyrystinteho 1.11.2017-31.3.2018	61
	Liite 3. Pumppujen tehonlaskenta	62

Liite 4. Putkiston mitoitus	63
Liite 5. Höyrystinteho ulkolämpötilan funktiona	64
Liite 6. Lämmönvastukset maahan asennetuissa putkissa.....	65

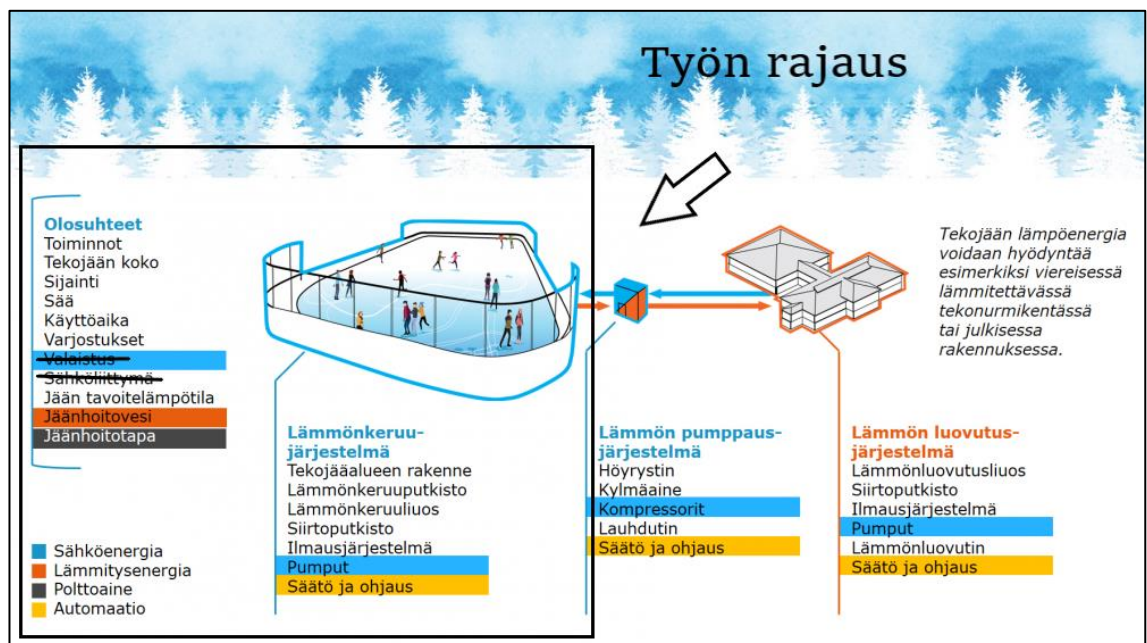
ERITYISSANASTO

ulkotekojää	ulkoalueen keinotekoisesti tehty jääalue
lämmönkeruujärjestelmä	paremmin tunnettu ”jäähdytysjärjestelmänä”, termillä tarkoitetaan kokonaisuutta joka sisältää kentän rakenteen, putkiston, liuoksen ja muut komponentit. Myös höyrystimen toisiopuoli on ajateltu kuuluvan lämmönkeruun piiriin.
lämmönkeruuputkisto	tekojään alle sijoitettu putkisto, jonka avulla kenttään kohdistuva lämpöenergia kerätään.
lämmönkeruuliuos	lämmönkeruuputkistossa kiertävä liuos, ”kylmäliuos”
siirtoputkisto	putkisto kylmäkoneikolta jakotukille

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheena on ulkotekojään lämmönkeruujärjestelmän mitoitus. Aihe opinnäytetyöhön syntyi FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n energiajärjestelmien johtavalta asiantuntijalta. Työssä käytetään esimerkikohteena Kuopion kaupungin Lippumäen ulkotekojäätä. Suunnittelutyössä on huomattu, että urheilu- ja liikunta-alueiden energiatehokkuudessa on mahdollisia parannuskohteita. Työn tavoitteena on luoda ohje energiatehokkaan ulkotekojään suunnitteluun. Ohje on tarkoitettu suunnitteluprosessiin, jossa hyödynnetään dynaamista simulointiohjelmistoa.

Ulkotekojäitä on rakennettu Suomessa pitkään, mutta kirjallisuutta aiheesta on tehty hyvin vähän. Suurin osa mitoistavoista on perustunut aiemmin kokemusperäisiin tunnuslukuihin ja asiantuntijoiden arvioihin. Ulkotekojäiden suunnittelu on ollut vahvasti urakoitsijoiden vastuulla. Työssä on tarkoitus selvittää lämmönkeruujärjestelmän kokoonpano ja mitoisteho, joiden avulla saadaan kustannustehokas järjestelmä. Ulkotekojään energiajärjestelmä on kokonaisuutena laaja opinnäytetyön aiheeksi, joten työn aluetta on rajattu jättämällä lämmönpumppaus- ja lämmönluovutusjärjestelmä seuraavia opinnäyteitä varten. Työn rajaus on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Ulkotekojään energiajärjestelmän visuaalinen esitys ja työn rajaus (FCG suunnittelu ja tekniikka Oy)

Ulkotekojäihin liittyy tiettyjä ominaispiirteitä kuten muuttuvat sääolosuhteet, joita on ollut aiemmin haastava ottaa huomioon laskennassa. Nykyisten simulointiohjelmien avulla pystytään kuitenkin huomioimaan vallitsevat olosuhteet ja tätä kautta suunnittelemaan elinkaarikustannustehokkaat järjestelmät. Simulointien avulla selviää järjestelmän toiminta eri tilanteissa.

Suomessa jääurheilulla ja luistelulla on pitkät perinteet. Ensimmäinen ulkotekojää rakennettiin Tampereen Koulukadulle vuonna 1956 (Aittomäki, A. 2012, 313). Leutojen talvien vuoksi luonnonjäiden kausi on lyhentynyt, eivätkä ne pysty enää tarjoamaan laadukkaita alustoja luistelulle kuin muutamana kuukautena vuodessa. Ulkotekojäät eivät ole yhtä herkkiä leudoille olosuhteille ja niillä mahdollistetaan pidempi käyttöaika. Nykyinen tilanne on verkosta kerätyn tiedon mukaan seuraava: Suomessa on 35 ulkotekojäätä, joista 17 sijaitsee pääkaupunkiseudulla.

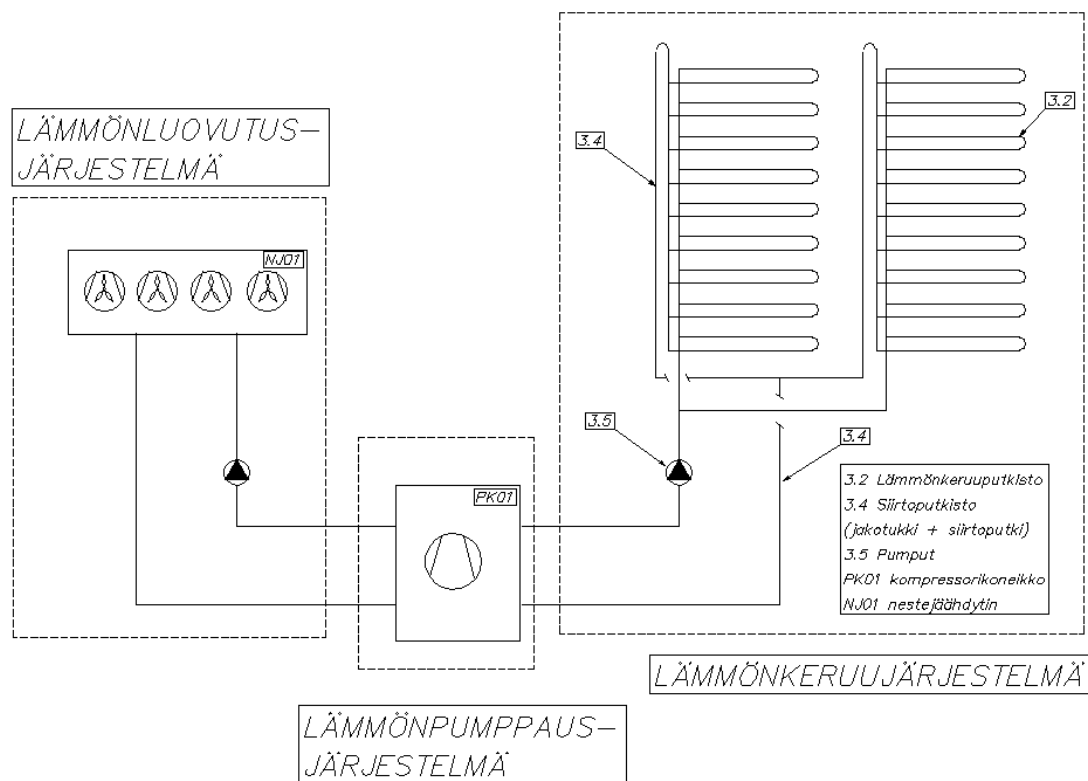
Ulkotekojäille on kysyntää. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä Kuopioon on rakenteilla yli 11000 m² ulkotekojäätä. Aamulehti uutisoi 22.11.2018, että Tampereen kaupungin valtuusto on varannut 3 miljoonaa euroa Sorsapuiston uuden ulkotekojään rakentamiseen (Aamulehti. 2018. Näin Tampereen suosittu liikuntapaikat muuttuvat.) Kentän jäädytys on tarkoitus aloittaa marraskuussa 2019. Ulkotekojäät ovat herättäneet mielenkiintoa ja keskustelua muissakin kaupungeissa.

On hyvin mahdollista, että tulevaisuudessa ulkotekojäiden osuus jääkentistä kasvaa. Markkinapotentiaali saattaa kuulostaa pieneltä, mutta jääkiekkoliiton olosuhdevaliokunnan julkaisemassa raportissa 2018 pelkästään jäähallien käyttäjäkunnan suuruuden arvioitiin olevan noin 350 000 ihmistä (Jääkiekkoliitto 2018, 2.) Tästä lukemasta siis puuttuu kaikki ne ihmiset, jotka käyttävät luonnonjäitä tai tekojäitä liikuntatyypiseen luisteluun ja harrasteluun omalla ajallaan. Lukema on luultavasti moninkertainen.

Jäähalleja Suomessa on lähes 280, mutta ne ovat pääosin varattu urheiluseurojen käyttöön (Finhockey, Jäähallien osoitteisto 2018.) Harrastelu- ja liikuntatoimintaan olevia jääkenttiä on jo nyt huonosti saatavilla. Tulevaisuudessa ilmaston lämmetessä tilanne voi olla luonnonjäiden kannalta vieläkin huonompi.

1.1 Opinnäytetyön rakenne

Opinnäytetyössä tarkastellaan ulkotekojään lämmönkeruujärjestelmän mitoitusta ja siihen liittyviä komponentteja. Lukijalle, joka ei ole tekemisissä kyseisen tekniikan kanssa tekstissä esiintyvä termistö saattaa aiheuttaa sekaannuksia. Järjestelmä voidaan ajatella koostuvan kolmesta osasta: lämmönkeruusta, lämpöpumppauksesta ja lämmönluovutuksesta. Kuvassa 2 on esitetty ulkotekojään energiajärjestelmä kokonaisuutena. Lämpöpumppausjärjestelmästä on kirjoitushetkellä tekeillä insinööritoimisto FCG suunnittelu ja tekniikka Oy:ssä.



KUVA 2. Yksinkertaistettu järjestelmäkaavio ulkotekojään energiajärjestelmästä.

Kappaleessa 2 käsitellään olosuhteita jotka vaikuttavat ulkotekojään mitoitukseen ja toimintaan. Kappaleessa 2 on myös avattu jäähän ja jääntekoon liittyvää teoriaa. Kappaleessa 3 käsitellään kaikki tekniset komponentit jotka liittyvät lämmönkeruujärjestelmään. Kappaleessa 3 on lisäksi esitetty lämmönsiirtoon liittyvää fysiikkaa ja lämmönkeruuliuosten aineominaisuuksia. Kappaleessa 4 on selvitetty, kuinka mitoituslaskelmat tehtiin esimerkkikohteeseen. Viidennessä kappaleessa on esitetty työstä saadut tulokset. Viimeisessä kappaleessa on työn tuloksien pohdinta.

2 OLOSUHTEET

2.1 Toiminnot

Ulkotekojääalueella harrastetaan erilaisia jääurheilulajeja. Tyypillisesti ulkotekojäää suunnitellaan liikuntatyypiseen luisteluun ja peleihin. Jos alueella on tarkoitus järjestää eri lajien virallisia kilpailuja tai pelejä kannattaa se huomioida kaukaloiden ja luisteluratojen mitoituksessa. Suurikokoiset tekojääalueet tarjoavat tyypillisesti mahdollisuudet jääkiekkoiluun, taitoluisteluun, pikaluisteluun, ringetteen ja mahdollisesti jääpalloon. Ulkotekojäällä on pelattu Suomessa muun muassa jääkiekon pääsarjan Liigan otteluita (Liiga 2016.) Kuvassa 3 on NHL:n järjestämä Winter Classic tapahtuma vuodelta 2019, joka pelattiin siirrettävällä ulkotekojäällä (NHL, 2019 Winter Classic.)



KUVA 3. Ulkoilmaottelu Notre Damen jalkapallostadionilla 2019 tammikuussa (NHL 2019)

Esimerkkikohteessa Kuopion Lippumäessä yleissuunnitelmavaiheessa on varauduttu seuraaviin toimintoihin:

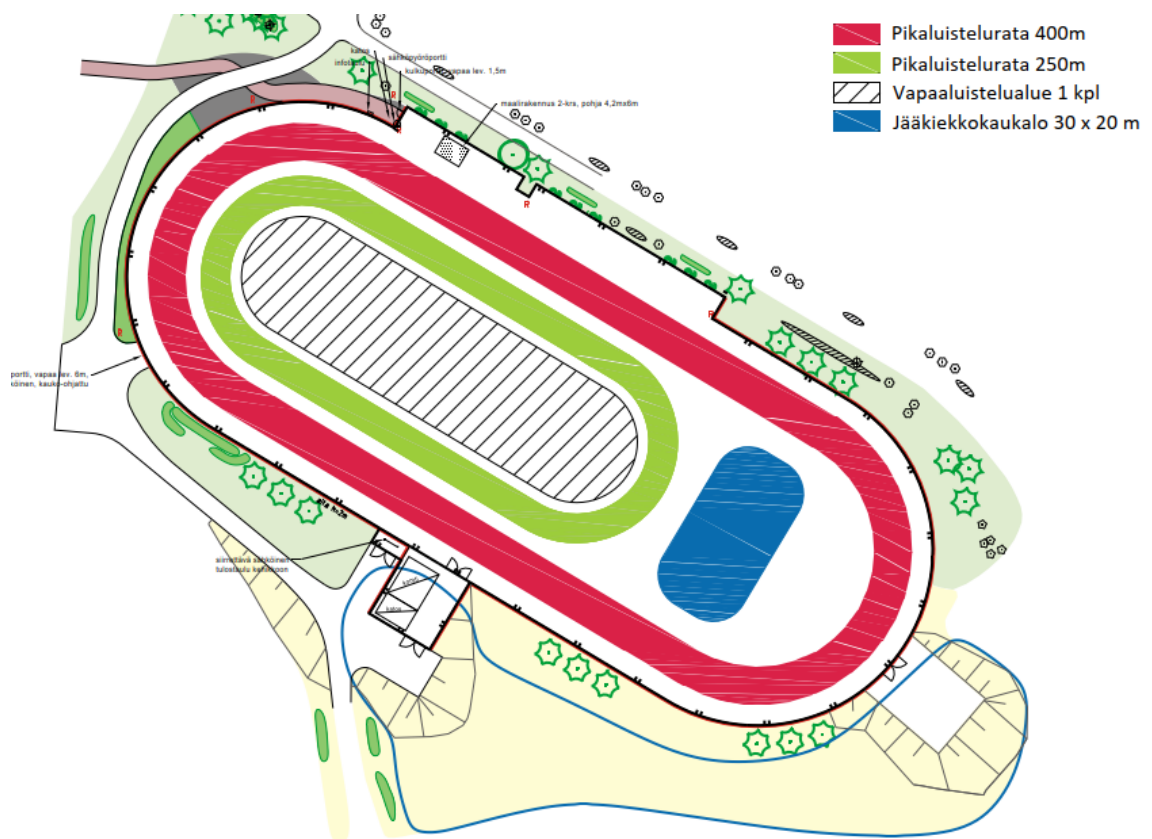
- Jääkiekko, vapaa luistelu ja pikaluistelu.

2.2 Tekojään koko

Ulkotekojääalueen pinta-ala määräytyy alueelle suunniteltujen toimintojen mukaan. Eri jääurheilulajit vaativat eri kokoisia ja muotoisia jääratoja. Tyypillisiä pinta-aloja eri lajeille ovat:

- Jääkiekkokaukalo – 30 m x 60 m (IIHF, 2016. Ice Rink Guide, 31)
- Täysi pitkä pikaluistelurata – 400 m pituus, radan leveys vähintään 4 m (ISU, 39)

Tekojään koko määrittää hyvin pitkälti järjestelmän tekniset ratkaisut. Suuremmat ulkotekojääalueet vaativat teknisiltä tiloilta jo merkittäviä tilantarpeita. Työssä käytetty esimerkkikohde Kuopion Lippumäessä on pinta-alaltaan 11800 m². Kuvassa 4 on Kuopion yleissuunnitteluvaiheen käyttötarkoitusvaihtoehto.



KUVA 4. Yleissuunnitelman mukainen käyttötarkoitus Kuopion Lippumäessä

2.3 Sää

Ulkotekojään toiminta ja käytettävyys ovat täysin riippuvaisia ulko-olosuhteista, koska yleensä tekojääaluetta ei ole katettu. Toteutuneilla olosuhteilla on merkittävä vaikutus kentän käyttöaikaan ja jään laatuun.

Ulkotekojään lämmönkeruujärjestelmän teho ts. höyrystinteho määritetään työssä dynaamisen simuloinnin avulla. Esimerkkikohteessa Kuopion Lippumäessä tehosimuloinnissa käytettiin staattista sääolosuhdetta koko simulointiperiodin ajan. Energiasimuloinneissa voidaan käyttää ajan funktiona muuttuvia säätiedostoja. Kyseisiä säätiedostoja käytetään myös rakennusten energialaskennassa (Ympäristöministeriö 2018.) Simulointien perusteella tehdään mitoituksia ja suunnitteluratkaisuja, jolloin käytettävän säädatan tulee edustaa mahdollisimman tarkasti todellista säätä. Seuraavien vuosien sääolosuhteita on mahdoton ennustaa, mutta mitoituksessa voidaan varautua ilmaston muuttumiseen.

Tyypillisesti talotekniikassa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien teho määritetään epäedullisimman tilanteen mukaan ajanhetkellä t . Prosessi on ajasta riippumaton, jolloin tilannetta kutsutaan stationaariseksi tai ”jatkuvuustilaksi” (Puranen, J. 2015. Lämpö- ja virtausoppi, 38.) Tällöin laskennassa ei huomioida mm. lämmön varautumista ja järjestelmän teho määräytyy mitoittavien lämpötilojen mukaan (Seppänen, O. 2001, 105.)

Ulkotekojäissä järjestelmän teho määritetään kuitenkin toisin. Kylmäkoneikon mitoittava tilanne koostuu jäädytysvaiheesta, jolloin lämpökuormien lisäksi energiaa kuluu myös veden faasimuutokseen eli jäädyttämiseen (VTT 2010, 75.) Jään tekoon kuluva aika voi olla useita vuorokausia, jolloin simuloinnissa käytettävän keskilämpötilan merkitys korostuu. Tehon suuruuteen vaikuttaa myös kentän ympäristö, luonto ja jäädytyksen nopeus.

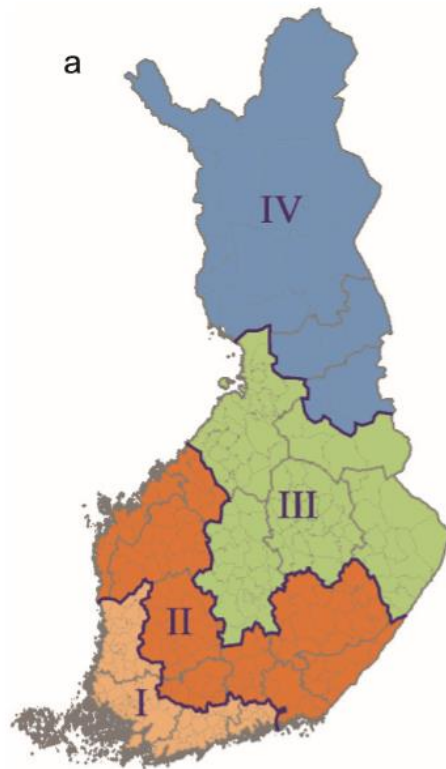
Energiasimulointiin on saatavilla useita sääpaketteja. Joitakin sääolosuhdepaketteja on saatavilla useille eri paikkakunnille Suomessa (ASHRAE, IWEC2 Weather Files.) Saatavilla olevia sääpaketteja käytetään yleensä rakennusten energialaskentaan. Sääpaketit eivät sisällä tietoa mm. vesisateesta tai lumisateesta. Rakennusten energialaskennassa näillä ei ole juurikaan merkitystä, mutta ulkotekojäiden suunnittelussa näiden olosuhteiden vaikutus tulee tutkia.

Verkossa on saatavilla mm. seuraavia sääpaketteja:

- TRY2012

- ASHRAE IWEC
- ASHRAE IWEC 2

TRY2012 eli Test Reference Year on ilmatieteenlaitoksen tekemä testivuosi rakennusten energialaskentaa varten. Aineisto säädataan on kerätty vuosina 1980-2009. Tuntikohtainen säädata on luotu Vantaan, Jyväskylän ja Sodankylän säähavaintojen avulla. Suomi on jaettu pituussuunnassa neljään vyöhykkeeseen I, II, III ja IV. Vantaan testivuotta käytetään kahdessa eteläisimmässä vyöhykkeessä I ja II. On siis huomionarvoista, että TRY2012 edustaa joko Vantaan, Jyväskylän tai Sodankylän säätä. Esimerkiksi vyöhykkeessä III suurin osa vyöhykkeen pinta-alasta on keskilämpötilaltaan kylmempi, kuin käytetty Jyväskylän säädata (Ilmatieteen laitos. 2011. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista).



KUVA 5. Säävyöhykkeiden jako (Ilmatieteen laitos, 2011)

TRY2012 sisältää tuntikohtaisen datan ilman lämpötilasta, suhteellisesta kosteudesta, auringon kokonaissäteilystä, hajasäteilystä, tuulen nopeudesta ja suunnasta. Ilmatieteenlaitoksen tutkimuksessa luotiin myös testivuosi 2030 vuodelle. Jääratiojen mitoituksen kannalta merkittävin tulos oli, että vuonna 2030 keskilämpötila on 1,2-1,5 astetta korkeampi,

kuin TRY2012 datassa. Arvioiden mukaan keskilämpötila nousee talvella noin 2 astetta (Ilmatieteen laitos, 2011.)

IWEC eli International Weather for Energy Calculations on ASHRAEN kokoama säähavaintoaineisto. Säähavainnot on kerätty DATSAV3 aineistosta, jonne säätietoja on koottu maailmanlaajuisesti useilta eri havaintoasemilta (EQUA. Climate Data Download Center). DATSAV3 on NCDC:n eli National Climatic Data Centerin kokoama sääaineisto. IWEC säähavainnot on koottu vuosilta 1992-1999 (Pikkarainen, T. 2019, 4) IWEC sääpaketteja Suomeen on saatavilla Helsinkiin ja Tampereelle.

IWEC 2 on koottu NCDC:n aineistosta ISH Integrated Surface Hourly (EQUA. Climate Data Download Center). IWEC 2 on ainoa näistä kolmesta sääaineistoista, joka sisältää myös pilvisyystiedot. Metropolian ammattikorkeakoulussa tehdyn insinööriyön yhteydessä huomattiin muun muassa, että IWEC 2 säädata antoi oleellisesti suurempia suoran säteilyn arvoja, kuin TRY2012 ja IWEC (Pikkarainen, T. 2019, 4.) IWEC 2 sääpaketteja Suomeen on tehty yhteensä neljäänkymmeneen (40) kaupunkiin (ASHRAE, IWEC2.)

2.4 Varjostukset

Yksi osa kentän lämpökuormasta tulee auringon säteilemästä lämpötehosta. Suojaamaton ulkotekojääalue on auringon paistaessa jatkuvasti altis lämpösäteilylle. Mitoitussimuloinnissa simulointiohjelmaan voidaan tarvittaessa mallintaa kentän ympärillä oleva kasvillisuus tai muut rakennukset. Esimerkkikohteessa Kuopion Lippumäessä kentän ympärillä olevaa kasvillisuutta ei huomioitu. Ulkotekojään toiminnan kannalta varjostavat rakennukset ja kasvillisuus ovat positiivinen asia.

Uusimmissa rakennusalan tutkimuksissa on herätty viherkasvillisuuden hyötyihin. Varjostuksella voidaan saada merkittäviä säästöjä jäähdytystarpeen pienennyttyä (Combi, 2018. Powerpoint esitys: Passiivisten suunnitteluratkaisujen vaikutus energiatehokkuuteen ja hiilijalanjälkeen).



KUVA 6. Lippumäen kentän varjostava kasvillisuus

2.5 Jään tavoitelämpötila

Jään lämpötilaa määrittäessä tulee ottaa huomioon seuraavat asiat: jään laatu ja energiatehokkuus. Jääkentän ensisijainen tarkoitus on tuottaa miellyttävä alusta luistelua varten. Erilaiset jääurheilulajit vaativat hieman toisistaan poikkeavia lämpötiloja jään pinnalle. Suomen jääkiekkoliitto yhdessä muiden lajiliittojen kanssa on julkaissut jään laatuun vaikuttavista tekijöistä tutkimuksen 2018 keväällä. Tutkimuksessa jääkiekkoilulle suositellaan lämpötilaa välillä $-4,2\text{ °C}$ - ($-4,8\text{ °C}$), mitattuna jään pinnasta. Taitoluistelussa jään lämpötilasuositus on hieman korkeampi noin -3 °C (Jääkiekkoliitto 2018, 3.) Näin tarkat arvot ovat kuitenkin tarkoitettu jäähalleihin, joissa jään laadulle asetetaan korkeampia vaatimuksia kuin ulkokentille. Saman suuntaisia suositusarvoja jään lämpötilalle löytyy muistakin kylmätekniikan kirjallisuuslähteistä (VTT 2010, 49.)

Energiatehokkuuden näkökulmasta jään lämpötilan tulisi olla mahdollisimman korkea, kuitenkin niin että jään laatu ei kärsi. Kylmempi jään lämpötila tarkoittaa matalampaa höyrystymislämpötilaa. Tämä taas huonontaa järjestelmän kylmäkerrointa ja lisää kompressorin sähkönkulutusta. Höyrystymislämpötilan laskiessa yhden (1) $^{\circ}\text{C}$ asteen kylmäkerroin putoaa lähes 3 % (Hakala, P & Kaappola, E. 2011, 249).

Jään laatuun vaikuttaa ulko-olosuhteissa useat muut tekijät kuten ilman suhteellinen kosteus, lämpötila, lumisade tai vaikkapa auringonpaiste. Tällöin jään lämpötilalla ei ole niin suurta vaikutusta jään laatuun ulkotekojäissä, kuin esimerkiksi jäähalleissa.

Käytännössä jään lämpötilaa mitataan kuitenkin jääalueen rakennekerroksen sisältä. Ulkokentissä tämä tarkoittaa, että anturi sijaitsee asfalttikerroksessa. Jäähalleissa jään lämpötilaa mitataan tyypillisesti betonirakenteen pinnasta (VTT 2010, 49.) Näin ollen mitattu lämpötila ei edusta jään pintalämpötilaa, vaan rakennekerroksen lämpötilaa joka on hie- man alhaisempi kuin jään pintalämpötila. Jääkerros toimii lämpötila-anturin ja jäänpin- nan välillä eristeenä ja näiden kahden pisteen väliseen lämpötilaeroon vaikuttaa mm. jään paksuus ja jäähän kohdistuva lämpöteho. Tämä täytyy huomioida ulkotekojään suunnit- telussa, jotta jään lämpötila saadaan pidettyä tavoitearvossaan. Ulkokentillä on vaarana, että auringon paistaessa jään lämpötila on korkeampi, kuin mitattava lämpötila rakenne- kerroksen sisältä. Lämpötila-anturi tulisi siis asentaa mahdollisuuksien mukaan jääker- roksen sisälle tai jopa pinnalle.

Kuvassa 7 on esitetty jäähallin betonirakenteen pinnan ja jään pinnan välistä lämpötila- eroa, kun jään paksuus on 30mm.

Jään lämpökuorma W/m²	Lämpötilaero jään pinnan ja betonin pinnan välillä °C
20	0,29
40	0,57
60	0,86
80	1,14
100	1,43
120	1,71
140	2,00
160	2,29

KUVA 7. Jään pintalämpötilan ja betonin pintalämpötilan erotus, jään lämpökuorman muuttuessa (VTT 2010, Jäähallin kylmäkoneistojen hankintaopas, 49)

2.6 Jäänhoitovesi

Jäänhoitoveden lämpötilaa määrittäessä korostuvat täysin samat asiat kuin jään lämpötilan valinnassa: jään laatu, sekä energiatehokkuus. Jäädytysveden lämpötilalla on merkittävä vaikutus jään laatuun. Kuumalla vedellä jäädyttäminen tuottaa paremman ja kovemman pelialustan. Tässä on taustalla se, että lämmin vesi sisältää vähemmän ilmaa kuin kylmä vesi. Myös veden viskositeetti pienenee lämpötilan kasvaessa, jolloin lämmin vesi levittäytyy kentän pinnalle nopeammin. Hyvät jään ominaisuudet saavutetaan, kun jäädytysveden lämpötilana pidetään 40 °C tai yli (Jääkiekkoliitto 2018, 3.)

Jään laatuun vaikuttaa myös jäänhoitoveden ominaisuudet. Vesilaitoksen toimittama talousvesi sisältää aina jonkin verran epäpuhtauksia ja metalleja, kuten kalsiumia ja rautaa (Helsingin kaupunki 2018). Veden muuttaessa faasia nestemäisestä kiinteäksi, nämä aineet pyrkivät nousemaan ylöspäin jään pinnalle. Tämä ilmiö heikentää huomattavasti jään laatua. Ihanteellisena jäänhoitovetenä voidaan pitää puhdasta sadevettä (Jääkiekkoliitto 2018, 3). Jäänhoitoveden lähteeksi voi soveltua esimerkiksi kentän päältä aurattu lumi. Jäänhoitokoneen keräämä lumi on mahdollista sulattaa vedeksi esimerkiksi kylmäkoneikon lauhdelämmön avulla.

Jäänhoitovesi aiheuttaa jäähän myös lämpökuormaa ja näin kasvattaa järjestelmän energiankulutusta. Ensin jäänhoitoveden lämpötila laskee 0 °C asteeseen, jonka jälkeen energia kuluu veden faasimuutokseen (jäädytykseen). Tämän jälkeen jään lämpötila laskeaan tavoitelämpötilaan esim. -5 °C asteeseen. Lämpökuorma riippuu siis jäänhoitoveden lämpötilasta, määrästä ja jään tavoitelämpötilasta (VTT 2010, 52).

Esimerkkikohteessa Kuopion Lippumäessä kentän pinnalle levitetään 35 °C:sta vettä noin 1,5 m³. Jäänhoitovettä syntyvä lämpökuorma voidaan laskea kaavalla 1 (Aittomäki, A. 2012, 315.)

$$\Phi = \frac{V * p * c * (T_1 - T_2) + Q}{t} \quad (1)$$

Φ = jäädytykseen tarvittava teho [kW]

V = veden määrä [m³]

p = veden tiheys [kg/m³]

c = ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]

$Q = \text{veden sulamislämpö [kJ/kg]}$

$t = \text{jäädytykseen kuluva aika [s]}$

$T_1 = \text{veden alkulämpötila [°C]}$

$T_2 = \text{veden loppulämpötila [°C]}$

Lippumäen kohteessa tämä tarkoittaa 600 kW:n tehoa, kun oletetaan että vesi levitetään kokonaisuudessaan kerralla kentän pinnalle ja jäädytyksen kesto on 20 min. Laskennassa ei kuitenkaan huomioida jo olemassa olevan jääkerroksen vaikutusta. Olemassa olevalla jääkerroksella on jäänhoitovettä jäähdyttävä vaikutus, joka luultavasti pienentää jäänhoitoveden aiheuttamaa hetkellistä tehontarvetta. Todellisuudessa vesi levitetään kentän pinnalle jäänhoitokoneen avulla joka tarkoittaa, että kentän eri osat jäähtyvät hieman eri tahtiin. Tyypillisen Zamboni 710 jäänhoitokoneen telan leveys on 2,6 m, jonka avulla vettä levitetään kentän pintaan, jolloin jääkiekkokaukalon kokoisen alueen jäädytykseen kuluu noin 10 minuuttia (Prorink Oy, Zamboni tuote-esite).

2.7 Jäänhoitotapa

Kentän kunnossapidolla ja hoidolla on oleellinen vaikutus jään laatuun ja energiakustannuksiin. Vaikka jäähalleja on Suomessa lähes 280 kpl, ei jäänhoidolle ole selvää ohjeistusta. Esimerkiksi uimahalleille on luotu yksityiskohtainen huolto-ohje (Jääkiekkoliitto 2018, 18). Jäähallien ja ulkotekojäiden huolto ja kunnossapito työllistävät tyypillisesti vähintään yhden huoltohenkilön täysipäiväisesti. Jäänhoidon suunnittelussa tulee huomioida kentän käyttöaste, resurssit ja käyttäjien vaatimukset jäälle.

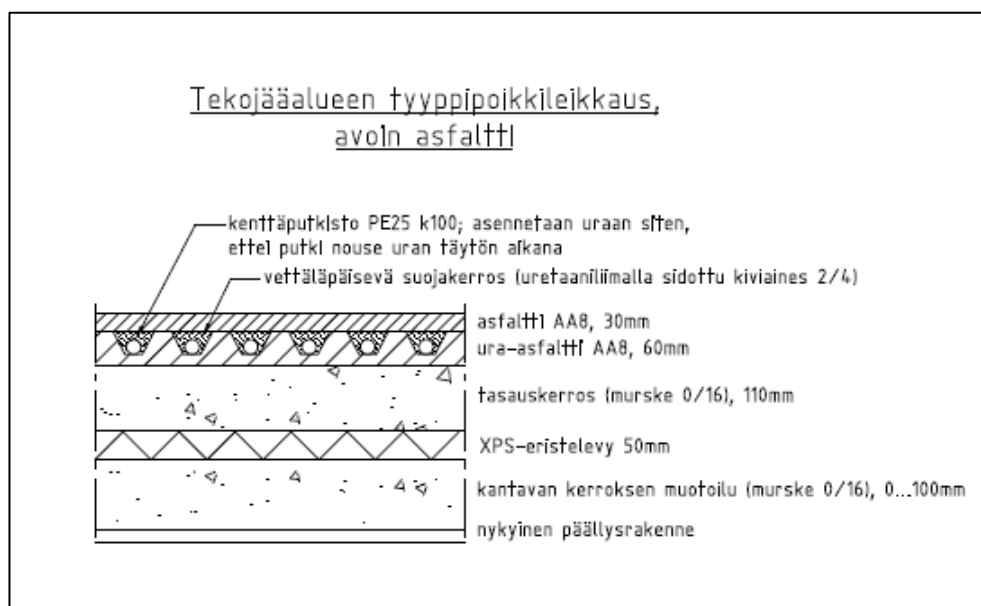
Jään laadun lisäksi jäänhoidolla hallitaan jään paksuutta. Jään höyläys tulee aloittaa, kun jään keskipaksuus on saavuttanut tavoitearvon. Yksi jäänhoidon työkaluista on Zambonityyppinen päältä ajettava jäänhoitokone. Zambonilla pystytään höyläämään ja puhdistamaan jään pinta. Samanaikaisesti koneella voidaan levittää jäänhoitovesi jään pinnalle (Zamboni 2018). Ulkotekojäiden hoidossa on suositeltavaa käyttää jäänhoitokoneita. Suurien kenttien hoito on lähes mahdoton toteuttaa ilman jäänhoitokonetta, kun tavoitellaan hyvää lopputulosta. Myös jäänhoitoon kuluva aika kasvaa kohtuuttomasti. Tekojääalueen suunnitteluvaiheessa kannattaa varautua Zambonin suhteellisen korkeaan investointikustannukseen. Zamboni voi maksaa käytettynäkin 60 000 euroa (Yle uutiset, 2016). Vanhemmat Zambonit toimivat yleensä dieselmoottorin avulla. Uusissa malleissa on sähkömoottori (Zamboni, 2018).

3 LÄMMÖNKERUUJÄRJESTELMÄ

3.1 Tekojääalueen rakenne

Tässä kappaleessa käsitellään ulkotekojääalueen rakennekerroksien tyypillisiä rakenneratkaisuja kylmätekniikan suunnittelijan näkökulmasta. Rakennetta ja lämmönsiirtymisen teoriaa on tarkasteltu alan kirjallisuuden, toteutuneiden kohteiden ja asiantuntijoiden keskustelujen perusteella.

Ulkotekojääalueen rakennekerrosten suunnittelu kuuluu yleensä geosuunnittelijalle. Putket asennetaan asfalttiin, betoniin tai kivituhka/murske kerrokseen (Aittomäki, A. 2012, 319.) Ulkotekojäissä käytännöllisin ja yleisin vaihtoehto on asfalttipinnoite, jolla luodaan kestävä kenttä myös käyttäjän ulkopuolelle. Kuvassa 8 on esitetty tyypillinen asfalttikentän poikkileikkaus.



KUVA 8. Tekojääalueen poikkileikkaus Kuopion kentässä (FCG, Lippumäki)

Pintarakenteen valinta vaikuttaa merkittävästi kentän käyttötarkoitukseen kesäaikana. Ulkotekojääalueiden pintamateriaalina voidaan käyttää myös tekonurmea, jolloin kesällä kentällä voidaan harrastaa muun muassa jalkapalloa.

Kylmätekniikan suunnittelija on kuitenkin enemmän kiinnostunut kentän termisistä ominaisuuksista. Lieriömäisen kappaleen lämmönsiirtoa on käsitelty useassa LVI-tekniikan oppikirjassa ja alan kirjallisuudessa puhutaan usein tilanteesta, jossa putki on kuumempi

kuin putken ympäristö. Jäädystilanteessa jääradan alla oleva lämmönkeruuputkisto on kuitenkin kylmempi kuin putken ympäristö jolloin lämpöenergian suunta on päinvastainen. Tällöin kaavan 2 tehosta tulee miinusmerkkinen, jolloin puhutaan yleensä ”jäähdytystehosta”.

Kaavassa 2 on esitetty eristämättömän putkijohdon ns. täydelliset yhtälöt (Laiho, E. 2010, 51.)

$$\phi' = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_s d_s} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_u}{d_s} + \frac{1}{\alpha_u d_u}} * (t_s - t_u) \quad (2)$$

ϕ' = eristämättömän putkijohdon lämpöhäviö pituutta kohti [W/m]

α_s = lämmönsiirtokerroin (yhdistetty konvektio ja säteily) johdon sisäpinnalla [W/m²K]

α_u = lämmönsiirtokerroin (yhdistetty konvektio ja säteily) johdon ulkopinnalla [W/m²K]

t_s = putkessa virtaavan aineen lämpötila [°C]

t_u = ympäristön lämpötila putken ulkopuolella [°C]

d_s = johdon sisähalkaisija [m]

d_u = johdon ulkohalkaisija [m]

λ = putken seinämän lämmönjohtavuus [W/mK]

Yhtälö esittää lämpötehon putken seinämän yli, kun lämpövastus on jokaiseen suuntaan sama. Maahan asennetuissa putkissa lämpövastus ei kuitenkaan ole joka suuntaan sama, jolloin laskenta hieman muuttuu. Maahan asennettavien putkien lämpöhäviö on esitetty kirjallisuudessa seuraavassa muodossa (Seppänen, O. 2001, 215)

$$\phi' = \frac{T_P - T_M}{R_T} \quad (3)$$

T_P = putken pintalämpötila, [°C]

T_M = maanpinnan lämpötila, [°C]

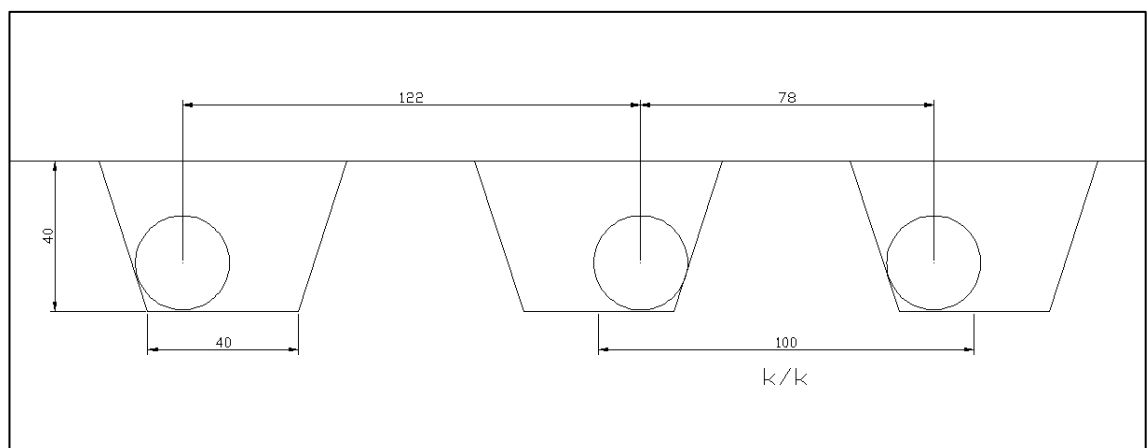
R_T = maa-aineoksen ja putken lämpövastus, [W/m²K]

Lämpöenergian siirtyessä kentän pinnasta lämmönkeruuliukseen, sen nopeutta hidastavat siis maa-aineoksen lämpövastus ja putken lämpövastus. Maa-aineoksen lämpövastuksen suuruus riippuu aineen lämmönjohtavuudesta, putken asennussyvyydestä ja putken halkaisijasta (Seppänen, O. 2001, 215). Kaavan 3 termi R_T sisältää putken lämpövastuksen,

joka on kokonaisuudessaan esitetty kaavan 2 nimittäjässä. Kaavan 2 nimittäjän viimeinen termi kuvaa putken ulkopinnan vastusta. Ulkopinnan vastus on maahan asennetuissa putkissa melko pieni, koska maa-aines on kiinni putken pinnassa (Mäkinen, A. Luentomateriaali 2019). Hienojakoisemmalla kiviaineksella ympäröidyn putken lämmönsiirto on teoriassa tehokkaampaa, koska lämmönvastus putken pinnan ja kiviaineksen välillä pienee.

Teoriassa rakennekerroksen tulisi olla mahdollisimman korkea lämmönjohtavuudeltaan. (IIHF Ice Rink Guide, 37). Tällöin rakennekerros ei toimi eristeenä jään pinnan ja lämmönkeruuputken välillä. Käytännössä on kuitenkin huomattu, että suurin vaikutus lämmönsiirtotehoon syntyy asfalttikentissä urien epätarkkuudesta. Asennusväli tehdään asfalttiin perässä vedettävällä laitteella, joka tekee asfalttiin urat kuvan 9 mukaisesti. Kuvassa näkyy urien poikkileikkauksien mitat. Urin välinen mitta k/k on oltava mahdollisimman tarkka.

Jos mitta poikkeaa suunnitellusta arvosta se vähentää huomattavasti lämmönkeruuputkiston kokonaispituutta kentässä. Tätä on käsitelty tarkemmin luvussa 3.2. Toisaalta myös itse urien mitoilla on vaikutusta putkien väliseen mittaan, vaikka se ei vähennä kentässä olevaa putkipituutta. Kun urien leveys on 40 mm ja uran seinämät kaltevuudella 1/3, taipuisa muoviputki voi hieman ”elää” urassa asennuksen aikana. Teoriassa putkien asennusväli voi olla tällöin välillä 78-122 mm. Tällainen poikkeama putkien välillä voi aiheuttaa epätasaisen lämpötilajakauman jään pintaan ja näin ollen tuloksena on mahdollisesti heikkolaatuinen jää.



KUVA 9. Putkien todellinen asennusväli asfaltti-urissa. Seinämien kaltevuus 1/3.

3.2 Lämmönkeruuputkisto

Lämmönkeruuputkiston tehtävä on ”kerätä” kenttään kohdistuva lämpökuorma lämmönkeruuliukseen, josta lämpöenergia johdetaan kylmäkoneikolle. Putkisto muistuttaa hie-man lattialämmitysverkostoa. Alalla puhutaan usein rataputkistosta. Putkiston onnistunut suunnittelu ja asennus ovat kriittisiä työn vaiheita, kun tavoitellaan tasaisesti jäätynyttä tekojäätä. Tässä kappaleessa käydään läpi tyypillisiä lämmönkeruuputkistoon liittyviä käsitteitä ja ominaispiirteitä.

Kun jäähdytystä on ympäri vuoden kuten jäähalleissa, routasuojaus huomioidaan erillisellä lämmitysputkistolla (Aittomäki, A. 2012, 314). Tätä ei kuitenkaan tarvitse huomioida ulkotekojäiden suunnittelussa, koska käyttöajat ovat lyhyemmät ja maaperä ehtii ke-säisin sulaa. Ulkotekojäissä routimisen esto toteutetaan eristekerroksen avulla (Sähköpostikeskustelu, FCG 2019.)

Tyypillisesti tekojäitä mitoitetaan hyvin pienillä lämpötilaeroilla. Tämä johtuu siitä, että jään tulee olla tasaisesti samassa lämpötilassa, joten suuria lämpötilaeroja ei voida käyttää. Pieni lämpötilaero meno- ja paluuliuksen välillä johtaa tietysti suurempiin tilavuusvirtoihin ja tätä kautta suurempiin painehäviöihin.



KUVA 10. Lämmönkeruuputkisto asennettuna urattuun asfalttiin Kuopion Lippumäessä.

Putkisto siis koostuu yksittäisistä ”putkilenkeistä”, jotka liittyvät jakotukkiin kuvan 11 mukaisesti. Usein käytetty putki on polyeteenistä valmistettu diffuusiosuojattu muoviputki, jonka ulkohalkaisija on 25 mm. Kuvassa 6 näkyy myös käännetty paluu, jota käsitellään paremmin kappaleessa 3.4.



KUVA 11. Lämmönkeruuputkiston liittyminen jakotukkiin.

Lämmönkeruuputken halkaisijalla on myös vaikutusta lämmönsiirtopinta-alaan, kun asennusväli pidetään vakiona. 100 mm:n asennusväli on todettu käytännössä hyväksi ja sillä on saatu tasaisesti jäädytetty kenttä (IIHF. Ice Rink Guide, 37.) Asennusvälin määrittäminen laskennallisesti on hankalaa, koska määrittävänä tekijänä on jään lämpötila putkien välillä. Voidaan kuitenkin todeta, että asennusvälillä 100 mm putkien välinen etäisyys on tyypillisillä liuoksen lämpötiloilla riittävän lyhyt, jolloin jään lämpötila ei pääse nousemaan putkien välissä. Suurempi putkijako lyhentää lämmönkeruuputkiston pituutta, mutta silloin on käytettävä kylmempää lämmönkeruuliuosta, joka tarkoittaa myös epätasaisempaa jään lämpötilajakaumaa (Aittomäki, A. 2012, 320.)

Lämmönkeruuputkiston suunnittelussa suurin huomio tulee kiinnittää siihen, miten suunniteltuun asennusväliin päästään. Tämä korostuu asfalttikenttien suunnittelussa. Taulukossa 1 on esitetty asennusvälin poikkeaman vaikutukset lämmönkeruuputkistoon.

TAULUKKO 1. Asennusvälin poikkeaman vaikutus lämmönkeruuputkistoon

Jäädettävä ala	m ²	1000	1000	1000
putkien asennusväli	mm	100	+10%	+20%
putkipituus neliometriä kohden	m/ m ²	10	9	8
putkipituus yhteensä	m	10000	9091	8333
lämmönsiirtopinta-ala	m ²	785	714	654

10 millimetrin poikkeama asennusvälissä tarkoittaa 1000 m² alueella lähes kilometrin vähemmän putkea. Käytännössä tämä tarkoittaa, että yhdelle putkipiirille muodostuva teho on suurempi kuin suunniteltu. Vaihtoehtoiksi tällöin jää joko pudottaa liuoksen lämpötilaa tai kasvattaa lämmönkeruuputkiston virtaamaa.

3.3 Lämmönkeruuliuos

Välillisiin kylmälaitoksiin on tarjolla useita erilaisia lämmönkeruuliukuksia. Putkiston kokonaispituus voi suurissa jääradoissa olla jopa 120 km (FCG, 2019. Lippumäen tekojäärata.) Tällöin putkiston nestetilavuus on lähes 60 m³, jolloin lämmönkeruuliuoksen valinnalla on huomattava vaikutus investointi- ja käyttökustannuksiin. Vesipohjaisia liukuksia lämmönsiirtonesteenä on tutkittu laajasti Tukholman kuninkaallisessa teknillisessä yliopistossa. Aiheesta on julkaistu väitöskirja Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids (Melinder, Å. 2007.)

Yleisimpiä lämmönkeruuliukuksia tekojäissä ovat juurikin veden eri liuokset kuten propyleeniglykoli-vesi, etanoli-vesi, kalsiumkloridi-vesi, kaliumformiaatti-vesi, ja ammoniakivesi (VTT 2010, 21). Veteen lisättävän komponentin tehtävä on laskea nesteen jäätympistettä. Ulkotekojään liuoksen valinnassa tulee huomioida riittävän alhainen jäätympiste, jotta neste ei jäädy putkistossa talviolosuhteissa.

Lämmönkeruuliuoksen valinnassa tulee ottaa huomioon ainakin seuraavat asiat (Aittomäki, A. 2012, 273).

- jäätymispiste
- tiheys
- viskositeetti
- ominaislämpökapasiteetti
- lämmönjohtavuus
- höyrynpaine
- yhteensopivuus materiaalien kanssa

- ympäristöystävällisyys
- saatavuus ja hinta

Tarkastellaan seuraavaksi kalsiumkloridi-veden, etyylialkoholi-veden ja ammoniakki-veden liuosten ominaisuuksia tyypillisissä ulkotekojäiden toimintalämpötiloissa. Nämä kolme lämmönkeruuliuosta valittiin tarkasteluun, niiden potentiaalisten aineominaisuuksien perusteella. Valinnassa ensisijainen kriteeri painottuu ympäristön ja ihmisten turvallisuuteen. Kappaleessa 5.8 on perusteltu miksi muut lämmönsiirtonesteet jätettiin tarkastelematta. Liuosten ominaisuuksia tarkasteltaessa kannattaa kiinnittää erityistä huomiota siihen, puhutaanko paino- vai tilavuusprosentista. Tässä tekstissä puhutaan aina painoprosentista.

Kalsiumkloridi-vesi

Kalsiumkloridin vesiliuosta ei ole luokiteltu vaaralliseksi ympäristölle. Aine liukenee veteen hyvin, eikä kalsiumkloridi-vesi ole syttyvä tai räjähdysaltis yhdiste (Tetra Chemicals, käyttöturvallisuustiedote 2018.) Kalsiumkloridi-vesiliuokselle on ominaista, että suhteellisen pienellä pitoisuudella päästään jo ulkotekojäissä vaadittavaan jäätymispisteeseen. Tämä tekee kalsiumkloridista potentiaalisen kylmäliuoksen jääratoihin.

Kalsiumkloridi aiheuttaa useissa metalleissa korroosiota. Oikealla inhibiitillä on mahdollista käyttää kalsiumkloridia kuparin, titaanin, hiiliteräksen ja valuraudan kanssa. Ainetta ei voida käyttää ruostumattoman teräksen kanssa (TKK. 2001. Välilliset kylmälaitokset, 162). Taulukossa 2 on esitetty kalsiumkloridi-veden ominaisuudet eri toimintalämpötiloissa. Aineominaisuudet on kerätty Tampereen teknillisen korkeakoulun julkaisusta: Välilliset kylmälaitokset 2001,

TAULUKKO 2. Kalsiumkloridi-vesiliuoksen aineominaisuudet ulkotekojään toimintalämpötiloissa.

CaCl ₂ + H ₂ O	Jäätymispiste -35 °C / paino-% 28			
	<i>ominaislämpökapasiteetti</i>	<i>tiheys</i>	<i>lämmönjohtavuus</i>	<i>viskositeetti</i>
Liuoksen lämpötila [°C]	<i>c</i> [kJ/(kgK)]	<i>p</i> [kg/m ³]	<i>λ</i> [W/mK]	<i>ν</i> [mm ² /s]
-5	2,787	1 261	0,53	4,33
-10	2,775	1 263	0,523	5
-15	2,760	1 265	0,516	6,05

Taulukosta nähdään, että kalsiumkloridi-liuos toimii ulkotekojäiden käyttölämpötiloissa melko huonosti. Nesteellä on hyvin alhainen viskositeetti, mutta sillä on suhteellisen suuri

tiheys. Tämä tarkoittaa suurempaa dynaamista painetta ja tätä kautta suurempaa painehäviötä. Kalsiumkloridi-vedellä ei ole myöskään erityisen hyvät lämmönkuljetusominaisuudet. Aineella on vertailtavista liuoksista paras lämmönjohtavuus, joka vaikuttaa lopulta putken sisäpuoliseen lämmönsiirtokerrotimeen. Lämmönsiirtokerroin on kuitenkin riippuvainen useasta eri muuttujasta, joten tässä tapauksessa paras lämmönjohtavuus ei tee kalsiumkloridi-vedestä hyvää lämmönsiirtonestettä (Mäkinen, A. Luentomateriaali 2019)

Etyylialkoholi-vesi

Etyylialkoholi eli etanoli on kirkas ja pistävän hajuinen alkoholeihin kuuluva neste (Altia. Teollisuusetanolit). Etanoli liukenee veteen hyvin ja esimerkiksi maalämpökaivoissa käytetään laajasti etanolipohjaisia lämmönkeruuliuoksia. Etanoli ei sitoudu maa-ainekseen, vaan se kulkeutuu helposti maakerrosten läpi. Tällöin etanoli voi päästä pohjavesiin. Etanoli kuitenkin hajoaa biologisesti aerobisissa ja anaerobisissa olosuhteissa suhteellisen nopeasti. Hajotessaan aerobisesti etanoli muodostaa vettä ja hiilidioksidia (Vahanen Environment Oy, 2014). Etanoli soveltuu hyvin muovimateriaaleille ja oikean inhibiitin avulla sitä voidaan käyttää myös useiden metallien kanssa. Etanoli on helposti syttyvä ja palava neste, mutta sitä ei ole määritelty ympäristölle haitalliseksi (OVA käyttöturvallisuustiedote, 2017).

TAULUKKO 3. Etyylialkoholi-vesiliuoksen aineominaisuudet ulkotekojäiden toimintalämpötiloissa.

C ₂ H ₅ OH+H ₂ O	Jäätymispiste -35°C / paino-% 46,8			
	<i>ominaislämpökapasiteetti</i>	<i>tiheys</i>	<i>lämmönjohtavuus</i>	<i>viskositeetti</i>
Liuoksen lämpötila [°C]	<i>c</i> [kJ/(kgK)]	<i>p</i> [kg/m ³]	<i>λ</i> [W/mK]	<i>ν</i> [mm ² /s]
-5	3,705	940	0,323	9,71
-10	3,680	943	0,321	12,20
-15	3,655	947	0,320	17,60

Etanolin pitoisuusprosentti joudutaan nostamaan huomattavasti korkeammalle kuin kalsiumkloridi-liuoksessa. -35 °C asteen jäätymispistettä tavoitellessa etanolin osuus on oltava lähes 50 %. Etanoli-liuos säilyttää kuitenkin erinomaisesti ominaislämpökapasiteettinsa käyttölämpötiloissa. Liuoksen kinemaattinen viskositeetti on valitulla lämpötila-alueella noin kaksinkertainen verrattuna kalsiumkloridi-vesiliuokseen, mutta sillä on huomattavasti pienempi tiheys. Etanolin vahvuutena voidaan pitää sen suhteellisen halpaa hankintahintaa (Asiantuntijakeskustelu Rototec Oy, 2018.)

Ammoniakki-vesi

Ammoniakki-veden termofysikaalisten ominaisuuksien löytäminen osoittautui hankalaksi. Liuoksen aineominaisuuksia löytyi eri kirjallisuuslähteistä, mutta varsinaista taulukkoa eri lämpötiloissa ei työn aikana löydetty. Ammoniakki-veden aineominaisuudet on kerätty ruotsalaisen lämmönsiirrin valmistajan SWEP:n mitoitusohjelmasta SSP-G8, joista löytyy laaja kirjasto liuoksien aineominaisuuksia. Ainetta käytetään tekojäissä ja siitä on hyviä käyttökokemuksia lämmönkeruuliuoksena (Sähköpostikeskustelu 2018, Prorink Oy.)

Ammoniakki on ensimmäisen luokan palava neste ja ensimmäisen luokan myrkkä (Hakala, P & Kaappola, E. 2011, 26). Ammoniakkia on kuitenkin käytetty kylmäkoneikkojen kylmäaineena yli 120 vuoden ajan (Aittomäki, A. 2012, 116). Nestemäisessä muodossa oleva ammoniakki aiheuttaa iholla ja silmissä voimakasta ärsytystä. Ammoniakki on erittäin haitallinen vesieliöille, joten se on luokiteltu ympäristölle vaaralliseksi. Ammoniakin vesiliuoksen vesivaarallisuusluokka on WGK 2 joka tarkoittaa, että se on vettä vaarantava (VWR Chemicals käyttöturvallisuustiedote, 2015.) Vesiliuoksena ammoniakki syövyttää voimakkaasti kuparia, alumiinia, hopeaa ja sinkkiä sen emäksisyyden vuoksi. Ammoniakkiliuoksen käsittely ja kuljetus vaativat erityistä tarkkuutta ja suojavälineiden käyttöä. Ulko-olosuhteissa ammoniakkipitoisuus on yleensä syttymisrajan alla, jolloin räjähdyksen syntyminen on hyvin epätodennäköistä (OVA käyttöturvallisuustiedote, 2017).

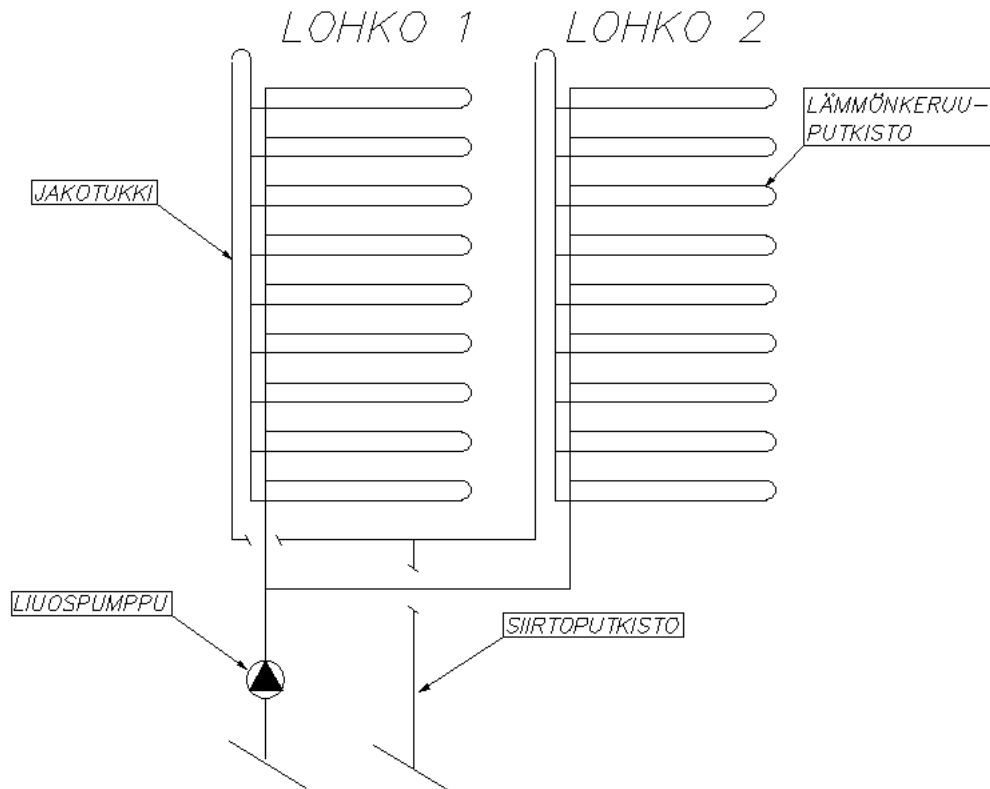
Taulukosta 4 nähdään, että ammoniakkivedellä on erittäin hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet. Nesteellä on jopa vettä parempi ominaislämpökapasiteetti. Tiheys ja kinemaattinen viskositeetti ovat erittäin alhaisia. Myös nesteen lämmönjohtavuus on korkea. Erittäin mielenkiintoinen ominaisuus ammoniakkivedellä on sen hyvin pieni paino-pitoisuus %, jolla saavutetaan jo -35 °C jäätympiste.

TAULUKKO 4. Ammoniakkiveden aineominaisuudet ulkotekojäiden toiminta-lämpötiloissa.

NH ₄ OH tai NH ₅ O	Jäätympiste -35 °C / paino-% 20			
	<i>ominaislämpökapasiteetti</i>	<i>tiheys</i>	<i>lämmönjohtavuus</i>	<i>viskositeetti</i>
Liuoksen lämpötila [°C]	<i>c</i> [kJ/(kgK)]	<i>p</i> [kg/m ³]	<i>λ</i> [W/mK]	<i>v</i> [mm ² /s]
-5	4,23	935	0,440	2,36
-10	4,24	937	0,441	2,83
-15	4,25	938	0,420	3,37

3.4 Siirtoputkisto

Siirtoputkisto on nimensä mukaisesti verkoston osa, jonka tehtävä on kuljettaa lämmönkeruuliuos lämmönkeruuputkistoon ja takaisin höyrystimeen. Siirtoputkisto koostuu jakotukista ja itse ”siirtoputkesta”. Siirtoputkella tarkoitetaan putkea, joka on höyrystimen ja jakotukin välissä. Kuvassa 12 on esitetty yksinkertaistettu periaatekuva putkistosta.



KUVA 13. Tekojään lämmönkeruujärjestelmän putkisto

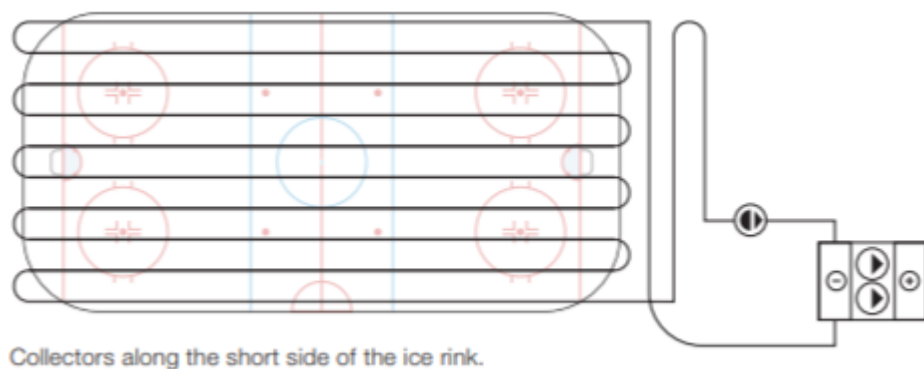
Jakotukki tehdään tyypillisesti PE putkesta. Verkoston geometriassa hyödynnetään käännettyä paluuta. Käännettyssä paluussa jokaiselle putkireitille tulee saman verran pituutta, jolloin verkosto tasapainottuu ilman säätöventtiileitä. Kuvassa 13 jakotukki on asennettuna eristettyyn putkikanaaliin Kuopion Lippumäessä.



KUVA 14. PE200 jakotukki putkikanaaliin asennettuna

Tyypillisesti kentän pinta-ala jaetaan lohkoihin, jolloin yhdelle jakotukille muodostuva virtaama pienenee. Tällöin voidaan käyttää pienempää putkikokoa jakotukissa ilman, että painehäviöt kasvavat kohtuuttomaksi.

Jakotukit sijoitetaan tilanteesta riippuen kentän pitkälle tai lyhyelle sivulle. Jakotukin sijoituksella on merkittävä vaikutus siirtoputkiston investointikustannuksiin ja verkoston virtaustekniseen toimintaan. Kentän pitkälle sivulle sijoitettu jakotukki aiheuttaa suuremman investointikustannuksen, mutta on virtausteknisesti parempi ratkaisu. Lyhyelle sivulle sijoitettu jakotukki on investoinniltaan edullisempi (Pikkarainen, T. 2019). Kuvassa 15 on esitetty kansainvälisen jääkiekkoliiton suosittama toteutustapa jääkiekkokaukalon kokoiseen tekojääalueeseen.



KUVA 15. IIHF:n suosittama jakotukin sijoitus (IIHF, Ice Rink Guide 39)

Siirtoputkisto toimii ainoastaan nestevirtaa kuljettavana verkoston osana, jolloin lämmönsiirto ei ole toivottavaa. Tämän vuoksi siirtoputket lämpöeristetään. Siirtoputkina voidaan käyttää esimerkiksi kiinnivaahdotettua PE-putkea. Siirtoputkiston mitoitus tehdään painehäviön perusteella. Muoviputkia käytettäessä virtausnopeuden tulisi olla alle 3 m/s (Pikkarainen, T. 2019).

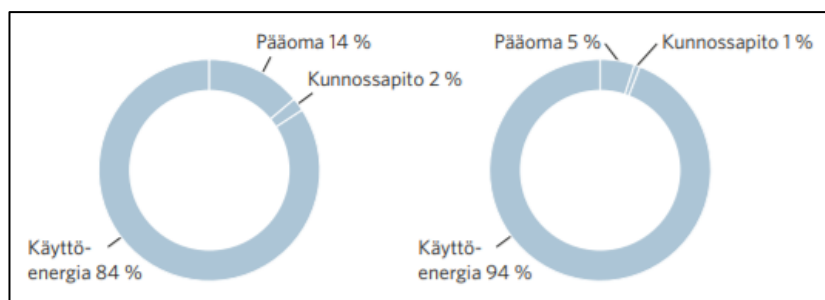
3.5 Pumput

Tässä yhteydessä pumpuilla tarkoitetaan lämmönkeruuputkiston liuospumppuja, joiden tehtävä on kierrättää verkostossa haluttua tilavuusvirtaa. Pumppujen valinta ja mitoitus ovat tärkeä osa ulkotekojään energijärjestelmää ja pumppujen toimiessa väärin voidaan pilata muuten energiatehokkaaksi suunniteltu järjestelmä. Oinaista ulkotekojäiden liuospumppuille on, että niiltä vaaditaan suhteellisen suuri tuotto (m^3/h) ja hieman säätötavasta riippuen järjestelmän tehoa ohjataan pumppujen pyörimisnopeutta muuttamalla eli pumppujen tuotto vaihtelee. Kappaleessa on esitetty pumppujen toimintaan liittyviä käsitteitä.

Tärkeimmät tekijät pumpun valinnassa ovat:

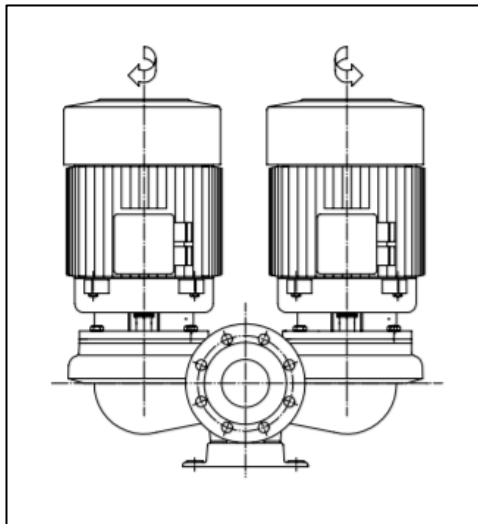
- tilavuusvirta ja käyttöalue q_v (m^3/h)
- nostokorkeus H (m)
- pumpattava liuos
- hyötysuhde käyttöalueella (%)
- säätötapa
- kytkentätapa (esim. rinnan tai sarjankytkentä)
- materiaalin yhteensopivuus liuoksen kanssa
- NPSH-luku

Suurin kustannus pumpuissa muodostuu käytön aikaisista energiakustannuksista (Kuva 16). Investointikustannuksessa ei siis kannata lähtökohtaisesti säästää.



KUVA 16. 16 kW ja 238 kW pumpun elinkaarikustannukset (Motiva, energiatehokkaat pumput. 17)

Pumpun tyyppi riippuu aina vaadittavasta toimintapisteestä. Ulkotekojäiden järjestelmissä virtaamat ovat yleensä suuria verrattuna pumpun nostokorkeuteen. Tyypillisiä pumppuja ulkotekojäissä ovat kuivamoottori in-line keskipakopumput. Kuivamoottori-pumpuissa pumpun moottori ja hydraulikka on erotettu toisistaan tiivisteellä (TKK. 2001. Välilliset kylmälaitokset, 55). In-line termi tarkoittaa, että neste kulkee pumpun läpi suoraan eli imuputki ja poistoputki ovat samassa tasossa (Grundfos 2016. Pump Handbook, 12). Pumppujen käyttövarmuutta voidaan lisätä käyttämällä kaksoispumppuja (KUVA 17).



KUVA 17. In-line kaksoispumppu (Kolmeks Oy. Suunnitteluohje, 16)

Pumppujen kirjallisuudessa puhutaan tyypillisesti kolmesta (3) eri tehosta, joilla kaikilla on eri tarkoitus. Terminologiassa tulee olla tarkkana, eikä tehoja tule sekoittaa. Tehojen matemaattiset kaavat on esitetty liitteessä 3.

1. Hydraulinen teho: teoreettinen pumpun tehontarve, jossa ei ole huomioitu pumpun virtaus, vuoto tai kitkahäviöitä (Seppänen, O. 2001, 233.)

2. Akseliteho: pumpun todellinen akseliteho, jossa on huomioitu pumpun virtaus, vuoto ja kitkahäviöt hyötysuhteen avulla (Seppänen, O. 200, 234.) Akseliteho on aina suurempi, kuin hydraulinen teho. Pumppuvalmistajien dokumenteissa akseliteho merkitään tunnuksella P_2 .

3. Ottoteho: Pumpun sähkönverkosta ottama teho. Tehossa on huomioitu akselitehon häviöt sekä pumpun moottorin häviöt. Kun hyötysuhteet lasketaan, yhteen puhutaan kokonaisyötysuhteesta (Seppänen, O. 2001, 234.)

Tekojäiden osalta suunnittelija joutuu usein pohtimaan pumpun toimintaa osatehoilla. Kun virtaus oletetaan täysin turbulenttiseksi, eikä verkostossa ole säätyviä venttiileitä voidaan osateho-tilanteen nostokorkeus, pyörimisnopeus tai ottoteho laskea kaavojen 4, 5 ja 6 avulla. Yhtälöitä kutsutaan affiniteettilaeiksi (Seppänen, O. 2001, 234.)

$$\frac{q_v}{q_{v_0}} = \frac{n}{n_0} \quad (4)$$

$$\frac{H}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3 \quad (6)$$

$q_v =$ virtaama [l/s]

$n =$ pyörimisnopeus [rpm]

$H =$ nostokorkeus [kPa]

$P =$ teho [kW]

Jos virtaus on täysin turbulenttista eikä verkostossa ole säätyviä venttiileitä, painehäviön ja virtaaman välillä pätee tällöin kaavan 7 mukainen yhteys (Laiho, E. 2010. Putkijohtojen virtausteknisen mitoituksen perusteita, 61.)

$$\Delta p = K * q_v^2 \quad (7)$$

$\Delta p =$ putkiston kokonaispainehäviö [kPa]

$K =$ laitoskerroin [kPa/(l/s)²]

$q_v =$ virtaama [l/s]

Kun verkostosta tunnetaan yhdessä toimintapisteessä virtaama ja painehäviö, voidaan laskea kaavalla 7 laskea muiden virtaamien aiheuttama painehäviö.

Ominaista ulkotekojäiden pumpuille on se, että käytettävä liuos usein aineominaisuuksiltaan erilainen kuin vesi. Pumppuvalmistajien ominaiskäyrät ovat tehty yleensä 20 °C vedelle, mutta valmistajien mitoitusohjelmilla on yleensä mahdollista tyypittää käytettävä neste ja lämpötila. On myös mahdollista laskea erilaisen viskositeetin omaaville nesteille vettä vastaava nostokorkeus, kun tunnetaan liuoksen toimintapiste (Grundfos 2016. Pump Handbook. 55.) Kaava 8.

$$H_{vesi} = K_H * H_{liuos} \quad (8)$$

H = nostokorkeus [m]

K = korjauskerroin nostokorkeudelle [-]

Nesteen tiheyden vaikutus pumpun akselitehoon on suoraan verrannollinen (Kolmeks Oy. Suunnitteluohje, 8). Tällöin moottorin teho on suurempi tiheämmillä nesteillä. Todellisen akselitehon erilaisille liuoksille voidaan laskea kaavalla 9.

$$P_{liuos} = K_P * P_{vesi} * \left(\frac{\rho_{liuos}}{\rho_{vesi}} \right) \quad (9)$$

P = akseliteho [kW]

K = korjauskerroin akseliteholle [-]

ρ = tiheys [kg/m³]

Korjauskertoimet voidaan katsoa esim. Grundfosin diagrammista (Grundfos 2016. Pump Handbook, 54). Diagrammia voi käyttää suuntaa antavana. Piirroksista ei kuitenkaan löydy virtaamia kuin 140 m³/h asti. Tekojääradoissa virtaamat ovat yleensä suurempia. Nykyaikaisissa pumppujen mitoitusohjelmistoissa on mahdollista syöttää pumpattava aine ja määrittää aineelle aineominaisuudet (Kolmeks Oy, Pumpselector.)

3.6 Sääto ja ohjaus

Ulkoalueen tekojääalue on järjestelmän ohjaamisen kannalta haastava. Sääolojen muuttuessa lämpökuormien vaihtelu on nopeaa, joka aiheuttaa omat haasteensa järjestelmän

säädölle. Useimmiten jäädytysvaiheessa kylmäkoneikon teho on huipussaan ja jään ylläpitoaikana tehon tarve voi olla vain 50 % huipputehosta (Aittomäki 2012, 318). Tässä kappaleessa käsitellään lämmönkeruujärjestelmän säätöä ja ohjausta periaatetasolla. Tekojääalueen tehoa voidaan säätää ainakin neljän lämpötilan avulla

- menoliuos
- paluuliuos
- kenttä (anturi upotettu rakenteeseen)
- jään pinta

Hyvin yleinen tapa on säätää lämmönkeruupiirin kiertovesipumppujen pyörimisnopeutta niin, että paluulioksen lämpötila pysyy asetusarvossaan. Kompressoreiden pyörimisnopeutta säädetään vasta sen jälkeen, kun paluulioksen lämpötilaa ei saavuteta kiertovesipumppujen avulla. Säättämällä menoliuksen lämpötilaa jään lämpötila vaihtelee, jolloin saavutetaan epätasaisempi jään pintalämpötila kenttään. Järjestelmän säätö jään pintalämpötilan mukaan on teoriassa tarkin ja voidaan toteuttaa esimerkiksi infrapunamittarilla (Aittomäki, 2012, 318)

3.7 Lianerotus ja verkoston ilmaus

Suljetuissa nestekiertoisissa putkistoissa nesteeseen sitoutunut ilma aiheuttaa usein ongelmia. Tyypillisesti ilma aiheuttaa verkostossa korroosio, lämmönsiirto ja virtausteknisiä haittoja. Henryn lain mukaisesti liukenevan kaasun määrä riippuu Henryn vakioista ja nesteen kanssa kosketuksessa olevan kaasun osapaineesta kaavan 10 mukaisesti (Kärkkäinen, 2010.)

$$p_d = x_d * H \quad (10)$$

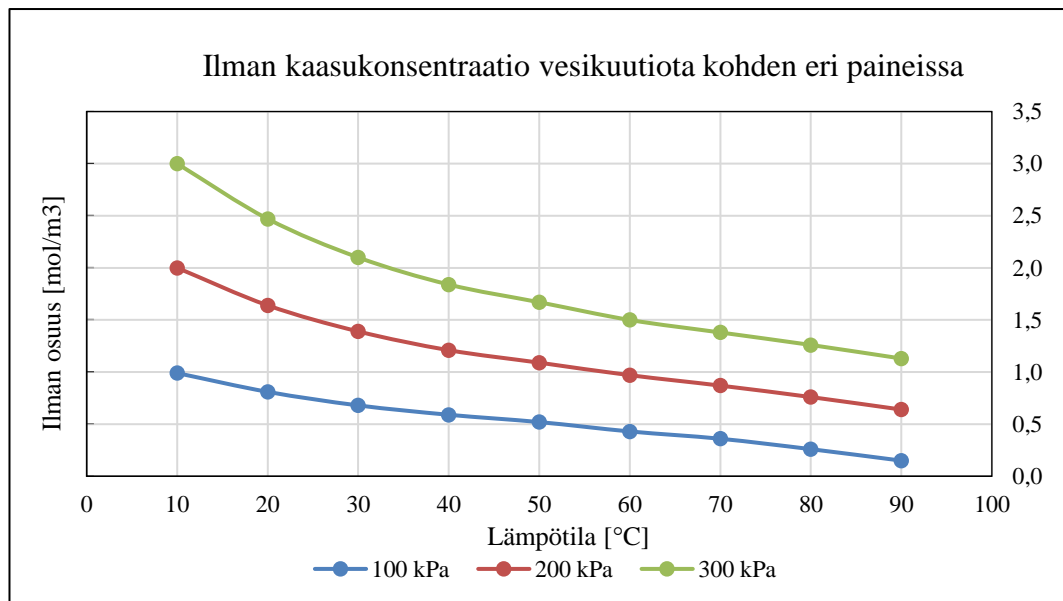
x_d = liuenneen kaasun mooliosuus, [-] p_d = kaasun osapaine, [Pa]. H = Henryn vakio, [Pa].

Kaavasta 10 voidaan johtaa vedelle kaava 11 (Kärkkäinen, 2010.)

$$c_{eq} = 55,51 \frac{\text{mol}}{\text{kg}} * \frac{p * p_d}{H} \quad (11)$$

c_{eq} = veteen liunneen kaasun konsentraatio, [mol/m³] p = veden tiheys, [kg/m³]

Taulukoitujen Henryn vakioiden ja kaavojen 10 ja 11 avulla voidaan laskea kaasukonsentraatiot eri lämpötiloissa ja paineissa. Kuvio 1.



KUVIO 1. Ilman (O₂+N₂) osuus vesitilavuudesta eri lämpötiloissa ja paineissa (Muokattu lähteestä Juselius, J. 2015. LUT. Kandidaatintyö.)

Kuviossa 1 ilman on ajateltu koostuvan vain hapesta ja typestä. Kuvioista nähdään, että mitä alhaisempi on veden lämpötila, sitä suurempi on ilman osuus nesteessä. Tämä on tärkeä huomio matalalämpöisten verkostojen suunnittelussa. Ulkotekojäissä tulee siis kiinnittää erityishuomiota ilman poistamiseen verkostosta.

Tekojäissä lämmönkeruuputkiston virtaus on suhteellisen hidasta, jolloin ongelmaksi voi muodostua tilanne jossa ilma ei enää liiku virtauksen mukana. Frouden luku kuvaa nesteeseen kohdistuvan hitausvoiman ja painovoiman suhdetta (Lubbers, C.L. 2007.) Vaakasuuralle putkivirtaukselle dimensioton Frouden luku määritellään seuraavasti.

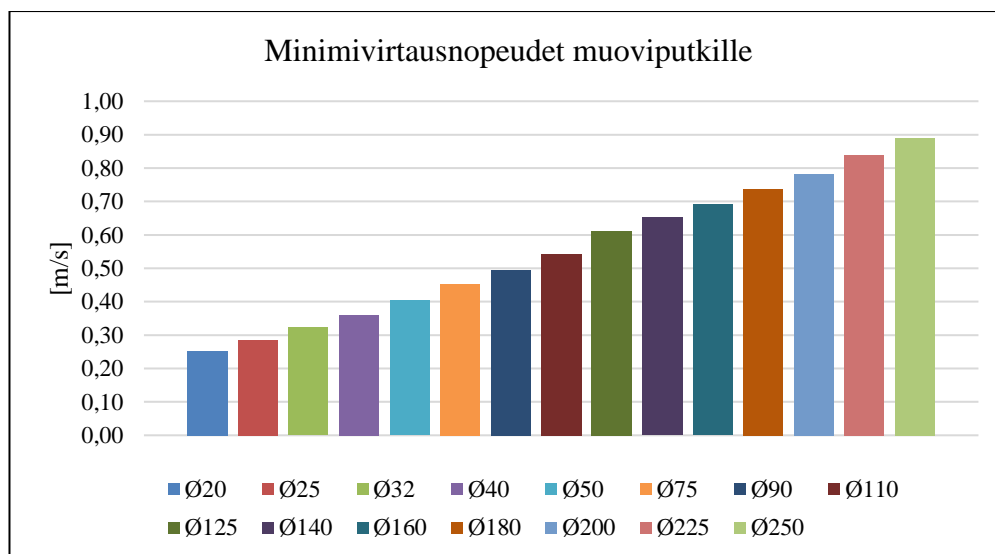
$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * D}} \quad (6)$$

V = virtaavan nesteen nopeus, m/s

g = putoamiskiihtyvyyys m/s^2

D = putken sisähalkaisija m

Iso-Britannialainen insinööritoimisto tutki asiakastyössään Frouden luvun vaikutusta ilman liikkumiseen veden mukana. (HR Wallingford. 2005. Air problems in pipelines) Vaakasuoraan asennetulle putkelle saatiin minimiarvo Frouden luvulle. Kun $Fr > 0,638$ niin ilma liikkuu vielä vaakasuorassa putkessa nesteen mukana. Vuonna 2019 julkaistussa insinööriyössä esiteltiin Frouden luvun avulla minimivirtausnopeudet putken sisähalkaisijan funktiona (Pikkarainen, T. 2019, 29.) Kuviossa 2 on esitetty miniminopeus tyyppisille muoviputkille, joita käytetään ulkotekojäissä.



KUVIO 2. Virtausnopeus, jolla ilma liikkuu virtauksen mukana. (Palkin sisään jäävä pinta-ala edustaa nopeutta, jolla ilma ei enää liiku)

4 MITOITUSSIMULOINNIT

Simuloinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä laskentamallia, jossa todellisuudesta on tehty virtuaalinen kopio. Simulointeja hyödynnetään laskelmissa, joissa laskenta käsin tai taulukko-ohjelmilla muodostuu kohtuuttomaksi tai jopa mahdottomaksi. Esimerkiksi rakennusten vuotuisen energiankulutuksen laskenta dynaamisesti on käsin lähes mahdotonta. Esimerkkikohteessa Kuopiossa ulkotekojääalueen energiasimuloinnin pituudeksi tuli 5 kuukautta ja aika-askeleena käytettiin tuntia.

Lippumäessä simulointi tehtiin IDA ICE Ice Rinks And Pools ohjelmistolla. IDA ICE:en on mallinnettu tekojääalueen energiajärjestelmä sisältäen mm. kylmäkoneikon, lauhdepiirin ja lämmönkeruujärjestelmän kokonaisuudessaan. IDA ICE:en on mallinnettu lämmönsiirron ja faasimuutosten matemaattiset yhtälöt, joita ohjelmisto laskee ajan funktiona (EQUA, 2019. Ice Rinks and Pools). Simuloinnin tavoitteena on määrittää tarkasti suureita, joita on ennen voitu vain arvioida.

4.1 CASE Lippumäki

Kuopion Lippumäen tekojääaluetta simuloitiin kahdella eri tavalla. Simuloinnit tehtiin yhteistyössä Equa Simulation AB:n kanssa. Simulointi suoritettiin IDA ICE 4.8 versiolla.

1. Tehosimulointi. Simuloinnin tavoitteena on määrittää kustannustehokkain höyrystimen teho, joka määrittää kylmäkoneikon koon. Tehosimulointi tehtiin ajalle 1.11.2017-31.12.2017. Simuloinnissa käytettiin staattista lämpötilaa ja taivas oletettiin 100 % pilviseksi. Simuloinnin tarkoituksena on seurata aikaa, joka kuluu jään syntymiseen. Simulointeja suoritettiin eri kokoisilla kylmäkoneikoilla.

2. Energiasimulointi. Simuloinnin tavoitteena on määrittää käyttöajan energiankulutus ja siihen vaikuttavat parametrit. Energiasimuloinnilla voidaan vertailla mm. erilaisten säätötapojen vaikutusta energiankulutukseen. Energiasimulointi eroaa tehosimuloinnista siten, että simuloinnissa käytettiin dynaamisesti muuttuvaa säädataa. Simulointijaksona käytettiin kentän suunniteltua käyttöaikaa eli 1.11.2017-31.3.2018 välistä aikaa. Energiasimuloinnissa kentän oletettiin olevan jäässä, eikä jäädytysvaihetta huomioitu. Lumi ja

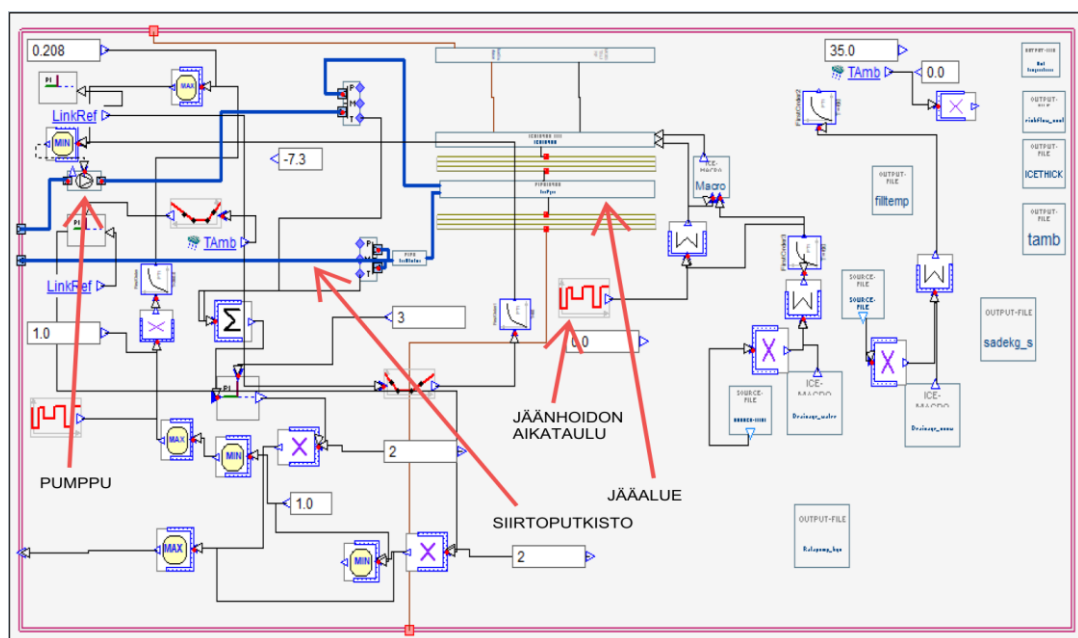
vesisade mallinnettiin mitattujen sääolosuhteiden mukaisesti. Vertailua varten energia-simulointi suoritettiin myös tyypilliselle 2,4 MW:n laitokselle, jotta voitiin tarkastella mm. energiankulutuksen eroja.

Tyypillisesti simulointi ei vastaa täysin todellisuutta. Mallia luodessa joudutaan tekemään joitakin arvioita lähtöarvoihin, jotka voivat vääristää lopputulosta. Mallin luominen edellyttää IDA ICE ohjelmiston edistynyttä käyttöä. Tuloksien arvioinnissa tekijän täytyy ymmärtää, miten järjestelmä on mallinnettu ja mitä se ei mahdollisesti huomioi.

Esimerkkikohteessa malliin tehtiin joitakin yksinkertaistuksia, kuten: lämmönkeruuputkisto mallinnettiin 2 dimensioisena tasona, eikä erillisinä 3 dimensioisina putkina. Lämmönsiirto tapahtuu siis tason läpi, toisin kuin todellisessa tilanteessa. Muita poikkeamia todelliseen järjestelmään ovat muun muassa:

- Putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin on vakio koko simulointiperiodin
- Lämmönkeruujärjestelmässä on vain yksi pumppu
- Kentän päällä ei ole yhtään lunta klo 9-21 välisenä aikana

Kuvassa 18. on esitetty ”kentän” puolen ohjaus ja mallinnus IDA ICE:en. Kuvassa suora-
rakulmiot, jotka sisältävät punaisen viivan tarkoittavat erilaisia ohjauksia.



KUVA 18. IDA ICE:en mallinnettu tekojääalue

5 TULOKSET

5.1 Ulkolämpötila ja maan lämpötila

Tehosimuloinneissa vertailtiin 5 °C staattista lämpötilaa 0 °C lämpötilaan. 0 °C simuloinnissa ulkolämpötila pudotettiin lokakuun 29. päivä lähelle nollaa astetta ja kentän jäädytys aloitettiin ensimmäinen päivä marraskuuta. Tuloksena saatiin, että ulkolämpötilalla on merkittävä vaikutus kentän jäädytys nopeuteen. 5 °C lämpötilassa 1,8 MW:n laitoksella jäädytys kesti 139 tuntia ja 0 °C lämpötilassa ainoastaan 60 tuntia.

Lämmönkeruuputkiston ympärillä oleva maa-aines jäähtyy nopeasti. Rakennekerrosten alla syvällä maaperässä lämpötila on asetettu simuloinnissa vakioksi 4,3 °C. Jäädytystilanteessa maassa oleva vastalämpötila ei vaikuta merkittävästi lopputulokseen, vaan suurin energia kuluu kentän pinnassa olevan vesikerroksen jäähdyttämiseen (Sähköpostikeskustelu, EQUA). Voidaan siis päätellä, että jäädytysvaiheessa maa-aineksen pintakerrosten lämpötilalla ei ole niin suurta merkitystä jäädytystehontarpeeseen. Vertailun vuoksi mainittakoon, että tyypillisillä tehoilla jäähalleissa betonilaatta jäähtyy noin 1 °C tunnissa, eli jäähtyminen on verrattain nopeaa (VTT 2010, 75)

5.2 Sää

Esimerkkikohteessa Kuopion Lippumäessä suunniteltu käyttöaika kentälle on 1.11-31.3. Kentän jäädytys aloitetaan marraskuun ensimmäisenä päivänä. Lippumäen simuloinneissa säädatan suhteen tehtiin kaksi valintaa. Dynaamisessa energiasimuloinnissa päädyttiin käyttämään IWEC 2 säätiedostoa. Tehosimuloinnissa käytettiin 5 °C staattista keskilämpötilaa ja 100 % pilvisyyttä. Taulukossa 5 on esitetty vuosien 2014-2018 jäädytysvaiheen keskilämpötilat.

TAULUKKO 5. Jäädytysvaiheen keskilämpötilat Kuopiossa (Ilmatieteen laitos 2019)

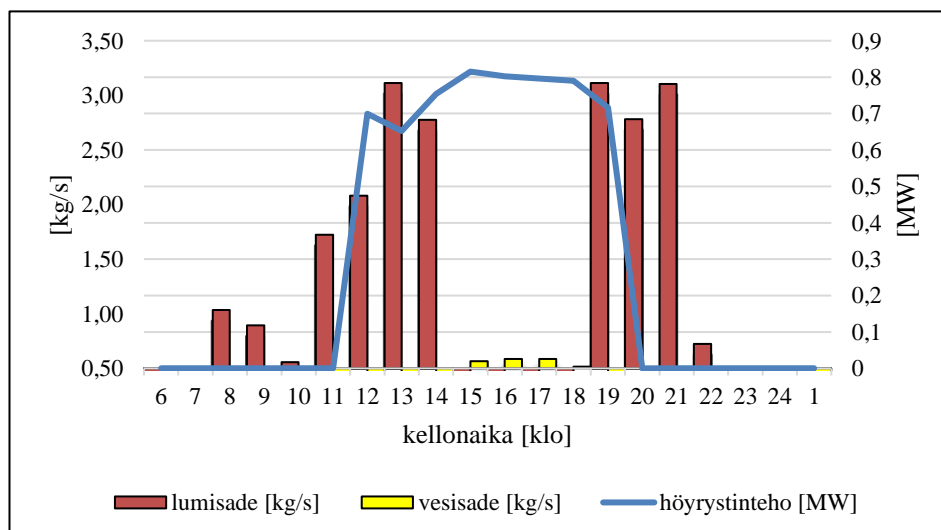
Marraskuun ensimmäinen viikko 1.11-30.11					
vuosi	2014	2015	2016	2017	2018
keskilämpötila [°C]	-2,5	6,3	-1,3	-10	3,6

Energiasimulointien osalta toteutuneiden olosuhteiden vertailu käytettyyn IWEC 2 sää-tiedostoon on esitetty taulukossa 6.

TAULUKKO 6. Sää-tiedostojen vertailu (Ilmatieteen laitos 2019)

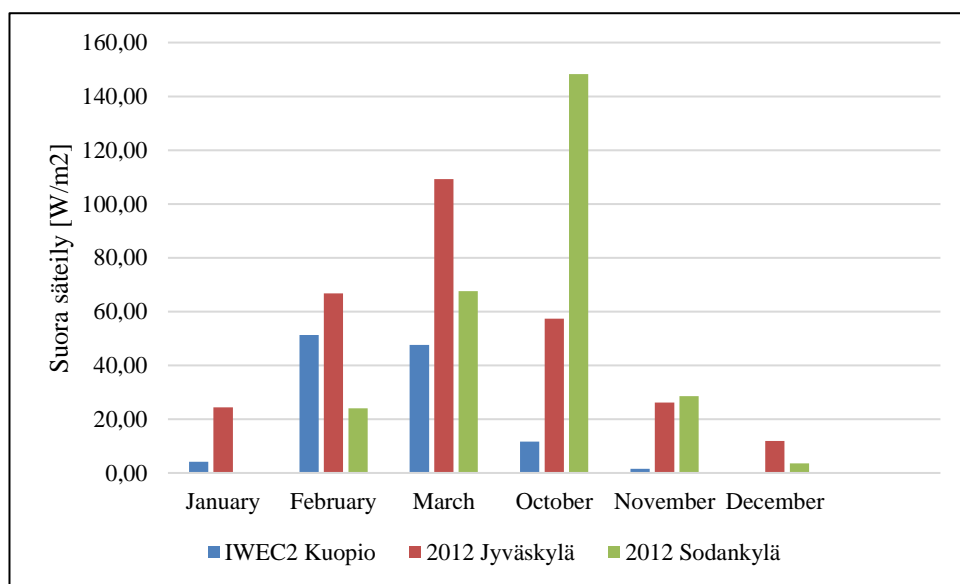
	KESKILÄMPÖTILAT [°C]				
	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	IWEC2 KUOPIO
Marraskuu	0	2,5	-3,2	0,5	-0,9
Joulukuu	-3,6	-0,6	-3,5	-1,8	-4,1
Tammikuu	-7,6	-14,6	-5,7	-5,4	-6,8
Helmikuu	-2,1	-3	-6,8	-11,9	-7,4
Maaliskuu	-0,1	-1,7	-1,8	-7,7	-3,8
Keskiarvo	-2,68	-3,48	-4,2	-5,26	-4,6
	SUHTEELLINEN KOSTEUS [%]				
	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	IWEC2 KUOPIO
Marraskuu	92,9	92,9	91,2	92,9	92,7
Joulukuu	91,2	91,2	92,5	93,2	91,2
Tammikuu	89,4	83,6	89,5	91,5	90,9
Helmikuu	85,2	91,8	88,8	85,9	86,3
Maaliskuu	77,7	81,6	83,3	78,2	79,1
Keskiarvo	87,3	88,2	89,1	88,4	88,04

Lumisade ei aiheuta lämpökuormaa, niin kauan kuin lumen lämpötila pysyy pakkasen puolella. Kun ulkolämpötila on lähellä nollaa tai yli, lumi alkaa muuttua vedeksi ja aiheuttaa näin lämpökuormaa. Vesisade taas aiheuttaa huomattavan lämpökuorman. Kuvi-ossa 3 on esitetty joulukuun 9. päivä. Kuvaajassa on tilanne, jossa ulkolämpötila nousee ja lähenee nollaa astetta. Tällöin lumi muuttuu vedeksi. Kuvaajasta näkee hyvin, miten pienikin vesisade aiheuttaa huomattavan lämpökuorman



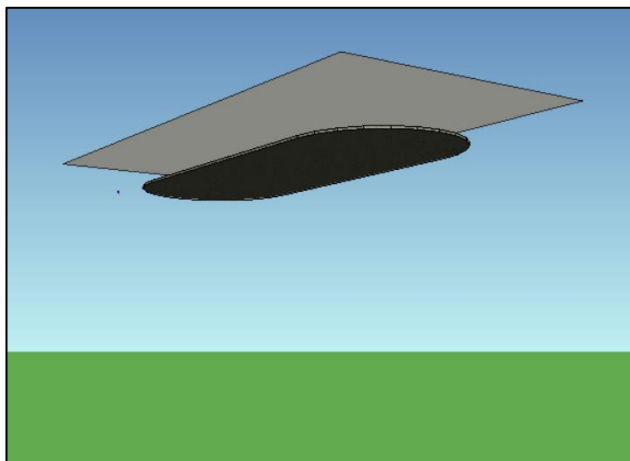
KUVIO 3. Lumi- ja vesisateen vaikutus höyrystintehoon.

Säädatassa on huomioituna myös auringon säteily. Kuviossa 4 on esitetty kolmen eri sää-tiedoston auringon suoran säteilyn arvot. IWEC2 ja TRY2012 tiedostojen suoran säteilyn arvot ovat ilmoitettu kohtisuoraan auringon sädetä kohti jolloin tuloksia ei voi suoraan verrata mitattuun suoraan säteilyyn (Pikkarainen, T. 2019, 41.) Kuopio kuuluu sijaintinsa vuoksi Jyväskylän alueelle testivuoden osalta (kts. kappale 2.3). Vertailun vuoksi kaavi-ossa on esitetty myös Sodankylän testivuoden säteilyarvot. Kuopion sääasemilla ei ole saatavilla auringon säteilyarvoja, jolloin vertailua ei voitu tehdä (Ilmatieteen laitos. 2019. Havaintojen lataus)



KUVIO 4. Suoran säteilyn arvot eri säätiedostoilla

Työn yhteydessä tarkasteltiin auringon säteilyn tuottamaa lämpökuorman vaikutusta. Kuvassa 19 on esitetty tekojääalueen IDA malli, johon on tehty varjostava elementti. Lämpökuormat käyttöaikana vähentyivät ainoastaan 4 %.

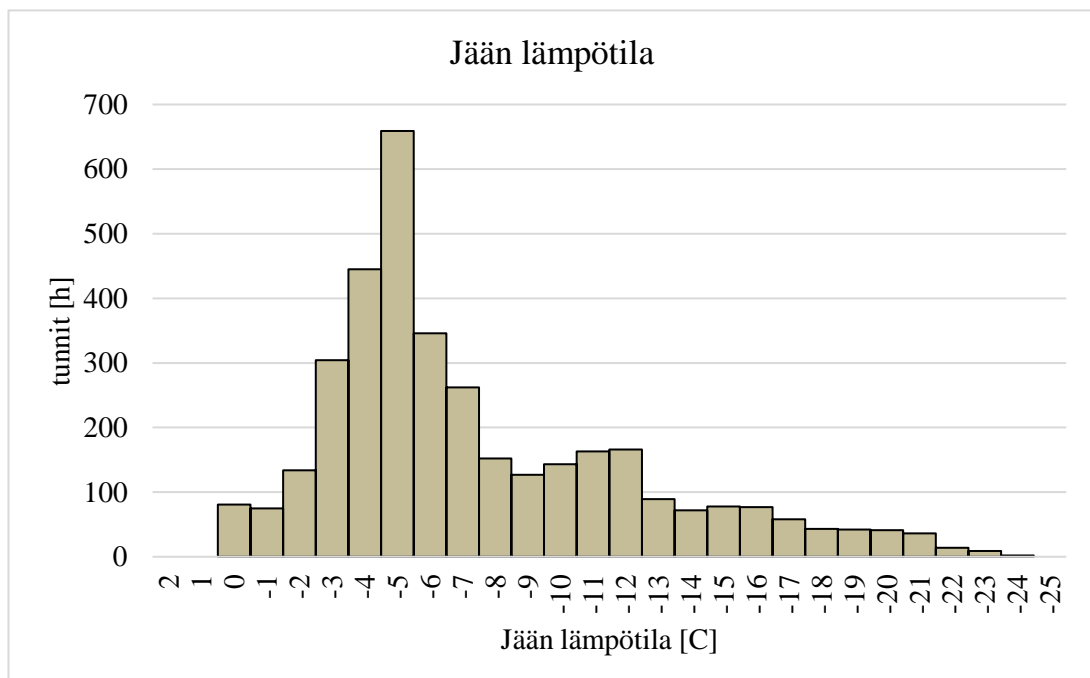


KUVA 19. Varjostettu ulkotekojääalue

Kuten kirjallisuuslähteissä todetaan, suurin vaikutus jään lämpökuormaan on tyypillisesti ilman lämpötilalla ja tuulen aiheuttamalla konvektiolla (Aittomäki, A. 2012, 313). Tuulen vaikutusta on vaikea vertailla toteutuneeseen, koska IWEC 2 tiedostossa tuulen nopeudet on annettu vaaka- ja pystysuunnassa ja TRY2012 tiedostossa ainoastaan vaakasuunnassa. Kuopion havaintoasemilla ei ole saatavilla tuulen nopeuksia, jolloin vertailu jäi tässä työssä tekemättä. On kuitenkin huomionarvoista, että tuulisilla alueilla esimerkiksi merenrantakaupungeissa tuulen vaikutukseen tulee kiinnittää erityistä huomiota.

5.3 Jään lämpötila

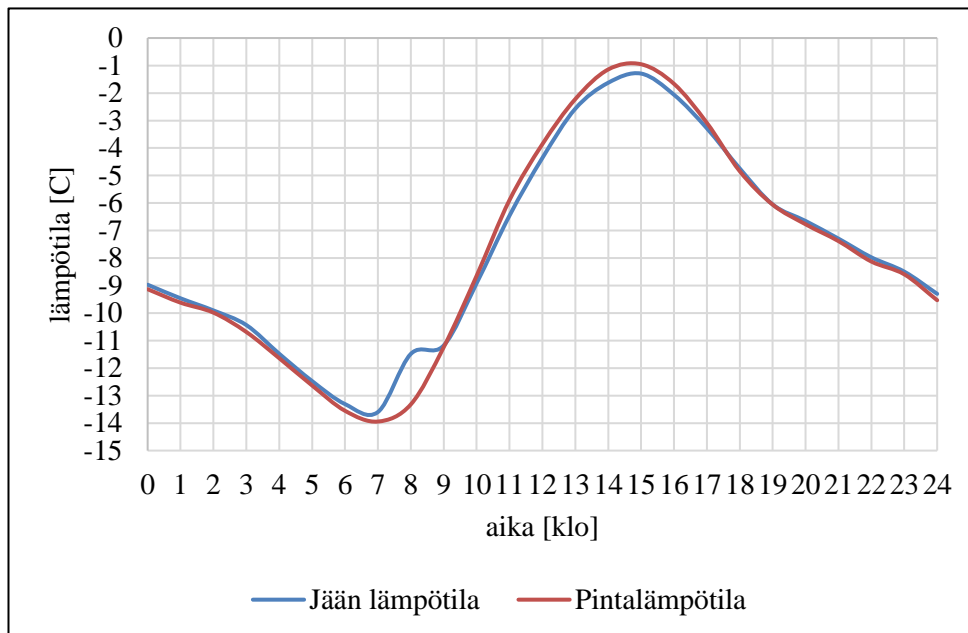
Jään tavoitelämpötilaksi asetettiin $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jään lämpötila pysyy 1.11-31.3 välisenä aikana alle $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteisena 97 % kentän suunnitellusta käyttöajasta. Jään lämpötila edustaa simuloinnissa jään lämpötilaa rakennekerroksen sisällä. Simulointien mukaan jään lämpötila on yli $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 156 tuntia, joka on noin 4 % kentän käyttöajasta. Kentän lämpötila pysyy alle $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ noin 83 % kentän käyttöajasta, jolloin kenttää voidaan pitää hyvänä luistelulle.



KUVIO 5. Jään pintalämpötilan jakauma kentän käyttöaikana

Jään pintalämpötila on hieman korkeampi kuin mitattu lämpötila rakennekerroksen sisältä. Jään pintalämpötilan nousu ja jopa sulaminen sallitaan yleensä keskipäivällä (Aittomäki, A. 2012, 313).

Tilaajan ja kentän käyttäjän kannalta on mielenkiintoisempaa tietää, kuinka jään lämpötila käyttäytyy kello 8-20 välisenä aikana, koska tällöin kenttää todennäköisesti käytetään. Simulointidataa tarkasteltua huomataan, että kenttä pysyy päiväsaikaan pelikuntoisena marraskuun alusta maaliskuun puoliväliin. Maaliskuun puolessa välissä jään lämpötila alkaa nousta keskipäivän lähestyessä, mutta ei todennäköisesti mene pelikunnottomaksi. Kuviossa 6 on esitetty jään lämpötilan ja jään pintalämpötilan käyttäytyminen maaliskuun 15. päivänä.



KUVIO 6. Jään lämpötila keväisenä päivänä 15.3.2018

Kuvaajasta näkee hyvin, miten jään lämpötila laskee yöllä ja päivän edetessä lämpötila nousee jyrkästi ja saavuttaa huippunsa klo 14-15 välisenä aikana. Kello 18.00 mennessä jään lämpötila on laskenut jo $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen.

5.4 Höyrystinteho

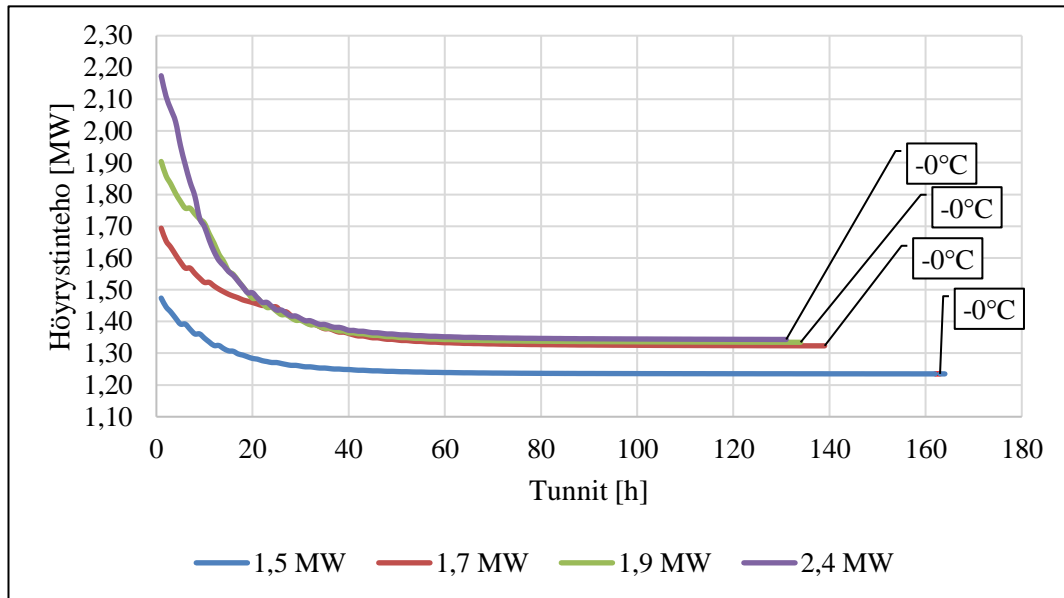
Tässä kappaleessa on esitetty höyrystintehon määrittäminen Kuopion Lippumäen tekojäähän. Höyrystintehoa simuloitiin IDA ICE-Ice Rinks and Pools ohjelmistolla. Sopivaa tehoa tarkasteltiin yhteensä seitsemällä erilaisella vaihtoehdolla. Tarkasteluun valittiin lopulta 4 eritehoista kylmäkoneikkoa.

TAULUKKO 7. Lähtötiedot simulointiin

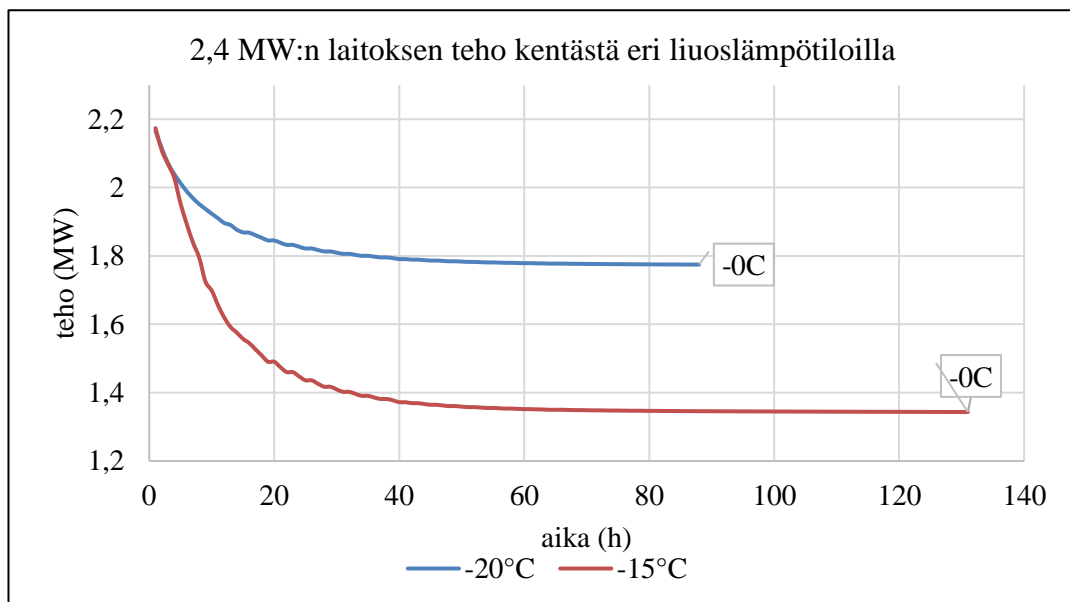
Jäädytyksen mitoitusarvot	Yksikkö	VE1	VE2	VE3	VE4
Sää					
Staattinen ulkolämpötila	[°C]		5		
Pilvisuus	[%]		100		
Lämmönkeruujärjestelmä					
Pinta-ala	[m ²]		11 800		
Eristyspaksuus	[mm]		50		
Jäädytettävän vesikerroksen paksuus	[mm]		61		
Jäädytettävän veden lämpötila	[°C]		4,6		
Maakerrosten lämpötila alussa	[°C]		4,5		
Jään tavoitelämpötila	[°C]		-3		
Liuoksen lämpötilatasot	[°C]		-15/-12		
Kylmälaitos					
Mitoitushöyrystinteho	[W/m ²]	200	161	143	125
Mitoitushöyrystinteho	[MW]	2,4	1,9	1,7	1,5

Simulointituloksista huomataan, että kokemusperäinen 200 W/ m² on tarpeettoman suuri. 2,4 Megawatin tehoa ei saada irti kentästä -15 °C liuoksen menolämpötilalla. Lähes identtiseen lopputulokseen päästään versioilla VE2 ja VE3 (KUVIO 7). 125 W/ m² teholla jäädytykseen kuluva aika kasvoi lähes seitsemään vuorokauteen, kun muilla vaihtoehdoilla aika pysyi noin 5,5 vuorokaudessa. Tämä on siis aika, kun veden lämpötila on laskenut 0°C alapuolelle. Simuloinnit osoittivat, että kun liuoksen menolämpötilana käytetään maksimissaan -15 °C ei kentästä saada enempää tehoa jäätyksen jälkeen kuin 1,3 MW jolloin suurempi kylmäkoneikko on hyödytön. Tavoitelämpötila saavutetaan lähes samassa ajassa 1,9 ja 1,7 MW:n tehoilla, kuin 2,4 MW:n laitoksella. Simuloinnissa tarkasteltiin myös järjestelmää, jossa liuoksen menolämpötilaa laskettiin -15 °C asteesta -20

°C asteeseen. Kuviosta 8 nähdään, että kylmemmällä liuoksen menolämpötilalla saavutetaan nopeammin kentän jäätyminen. Liuoksen lämpötilan laskeminen tarkoittaa kuitenkin höyrystyslämpötilan laskua ja aiheuttaa tätä kautta merkittävän hyötysuhteen putoamisen. Simuloinnissa kokeiltiin myös -10 °C menoliuosta, mutta jäädytyksen pituus kasvoi huomattavasti, eikä liuokseen saatu kuin 2 °C lämpötila-ero.



KUVIO 7. Jäädytysvaiheen kesto eri tehoisilla laitoksilla.

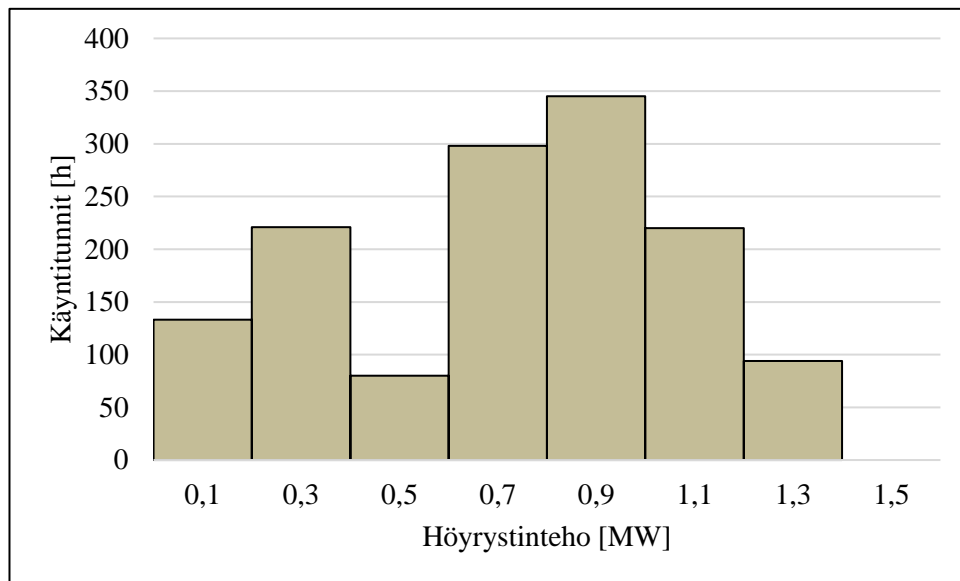


KUVIO 8. Liuoksen lämpötilojen vaikutus höyrystintehoon jäädytysvaiheessa.

Kustannustehokkaimmaksi höyrystintehoksi valittiin 1,7 MW:n VE3. Mitoituksessa kuitenkin varauduttiin 5 % ylimitoitukseen. Kylmäkoneikon tehoksi valittiin 1,8 MW.

5.5 Tehoprofiili

Energiasimuloinneista saatiin tuntidatana höyrystimen teho kentän suunnitellulta käyttöajalta 1.11.2017-31.3.2018. Kuviossa 9 on esitetty höyrystintehon jakauma käyttöaikana. Simuloinnin mukaan kylmäkoneikko käy huomattavan osan käyttötunneista selvillä osatehoilla. Kylmäkoneikko käy yli 100 kW:n teholla noin 1400 tuntia 1.11-31.3 välisenä aikana. Tämä vastaa noin 40 % kentän käyttöajasta. Kun huomioidaan vain yli 100 kW tehot koneikon höyrystinteho on 62 % ajasta välillä 700-1300 kW.



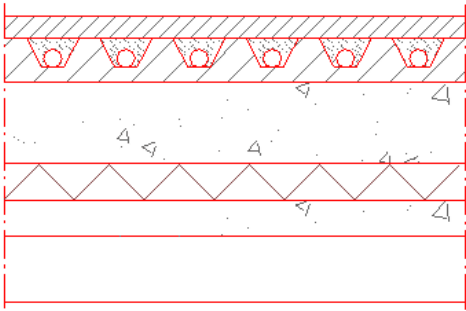
Kuvio 9. Kylmäkoneikon tehoprofiili käyttöaikana, kun jäädytysvaihetta ei huomioida 1.11.2017-31.3.2018.

Huomionarvoista on, ettei yli 1,3 MW:n tehoa enää jäädytyskauden jälkeen tarvita. (LIITE 2). Kylmäkoneikon investointikustannus on voimakkaasti riippuvainen laitoksen koosta. Höyrystintehon pienentäminen aiheuttaa huomattavat säästöt investoinnissa. Kuopion Lippumäessä vanhaan tunnuslukuun (200 W/ m^2) perustuva mitoitus olisi tarkoittanut 2,4 MW:n laitosta. Simulointien perusteella höyrystintehoa saatiin pienennettyä 0,6 MW.

5.6 Tekojääalueen rakenne

Kuopion Lippumäkeen rakenne toteutettiin kuvan 21 mukaisesti. Simuloinneissa tarkasteltiin rakenteen eristepaksuuden vaikutusta energiankulutukseen. Energiasimulointi tehtiin 50 mm ja 100 mm eristepaksuudella. Eristepaksuutta kaksinkertaistamalla saavutettiin ainoastaan 2 % pienempi energiankulutus. Eristepaksuudeksi valittiin 50 mm.

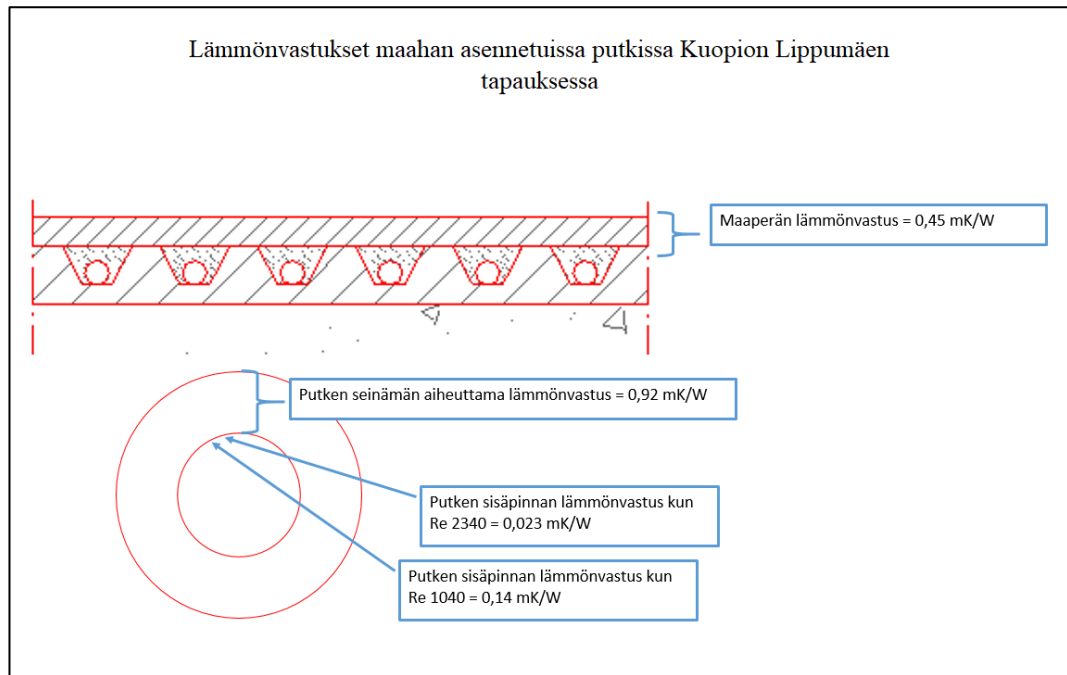
Kerros	Rakennekerrokset	Kerros- paksuus [mm]
Pintakerros	Jää	30
	Avoim asfaltti AA8 + jää	30
	Vettä läpäisevä suojakerros	
	Uretaaniliimalla sidottu kiviaines 2/4	
Kantava kerros	PE25 putket urissa	
	Ura-asfaltti AA8	60
	Murske 0/32	175
Eristys+tasauskerros	Suulakepuristettu solumuovilevy XPS	50
	Tasauskerros, murske 0/32	50
	Kantava kerros, murske 0/32	200
	Suodatinkangas	
	Kiilauskerros, murske 0/90	200
	Routimaton täyttö, louhe 0/600	240
	Pohjamaa moreenia	



KUVA 21. Lippumäen tekojääalueen rakenne

Jotta suunniteltuun asennusväliin päästään riittävällä tarkkuudella, on suunnitteluvaiheessa määriteltävä tarkasti urien välinen mitta sekä itse urien mitat. On myös syytä miettiä, onko mahdollista toteuttaa urat niin, että niiden leveys on kapeampi esim. 30 mm. Tällöin putket eivät pääse ”elämään” urissa niin paljoa. Myös itse urauslaitteelle on määriteltävä tarkat mitat. Laitteen puuttuessa työselostuksessa tulee lukea esimerkiksi: ”Mikäli urakoitsijalla ei ole kuvatus laista takalaitetta, urakoitsija rakentaa urakkaan sisältyen mitat täyttävän takalaitteen”. Tämä idea tuli esille geosuunnittelijan kanssa käydyssä keskustelussa marraskuussa 2018 (FCG Oy, Asiantuntijakeskustelu 2018.)

Kentän pinnasta alaspäin lämmönsiirtoa hidastavat maa-aineksen lämmönvastus sekä putken aiheuttamat lämmönvastukset. Kuvassa 22 on esitetty lämmönvastukset Kuopion Lippumäessä. Laskenta on esitetty liitteessä 6. Laskennasta nähdään, että putken sisäpuolisella lämmönvastuksella ei ole merkittävää vaikutusta lämmön siirtymiseen, kun virtauksen luonne pysyy turbulenttisella alueella. Putken sisäpuolinen lämmönvastus kasvaa, kun virtauksen luonne muuttuu laminaariseksi.



KUVA 22. Lämmönvastukset maahan asennetuissa putkissa.

5.7 Verkosto

Tässä kappaleessa esitetään lämmönkeruuputkiston, jakotukin ja siirtoputkiston mitoitus ja suunnitteluratkaisut. Taulukossa 8 on esitetty Kuopioon mitoitettu lämmönkeruuputkisto.

Lämmönkeruuputkisto

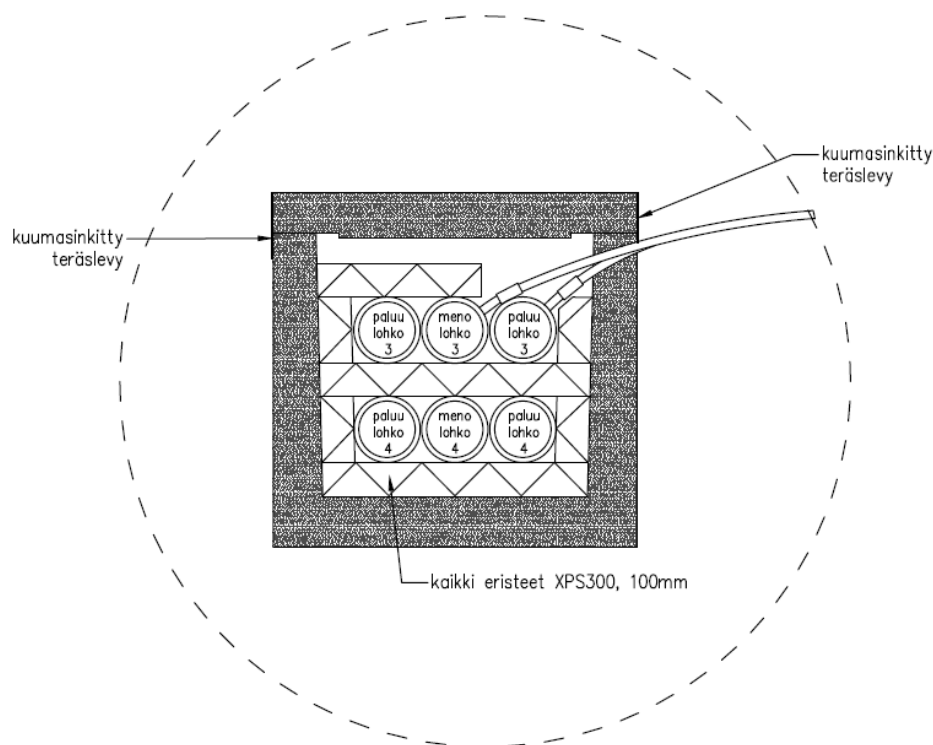
TAULUKKO 8. Lippumäen lämmönkeruuputkisto kahdella eri virtaamalla.

Lämmönkeruuputkisto		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 25, PN 12,5	PE 25, PN 12,5
Putken sisähalkaisija	[mm]	20,4	20,4
Putken karheus	[mm]	0,01	0,01
Asennusväli	[mm]	100	100
Lohkojen määrä	[1]	4	4
Lohkon pinta-ala	[m ²]	2950	2950
Rataputkilenkkien lukumäärä lohkoa kohden	[1]	210	210
Yhden rataputkilenkin pituus	[m]	143	143
Yhden rataputkilenkin virtaama	[dm ³ /s]	0,205	0,100
Yhden rataputkilenkin painehäviö	[kPa]	53	26
Virtausnopeus	[m/s]	0,69	0,3
Reynoldsin luku	[-]	2340	1040

Aiemmin mitoitustehona käytetty 200 W/ m² aiheuttaisi yhdelle lämmönkeruuputkelle 0,274 dm³/s virtaaman jolloin yhden lenkin painehäviöksi tulee 135 kPa. Simuloidulla tuloksessa painehäviö on ainoastaan 53 kPa. Painehäviöiden matemaattinen laskenta on esitetty liitteessä 1. Kenttään asennettiin yhteensä noin 120 kilometriä PE25 putkea.

Siirtoputkisto

Kuopiossa kenttä jaettiin neljään lohkokoon, jolloin yhden lohkon pinta-alaksi tuli 2950 m². Kenttään tuli yhteensä neljä samankokoista jakotukkia, jotka sijoitettiin kentän laidalle eristettyyn putkikanaaliin. Putket kulkevat kanaalissa päällekkäin kuvan 23 mukaisesti.



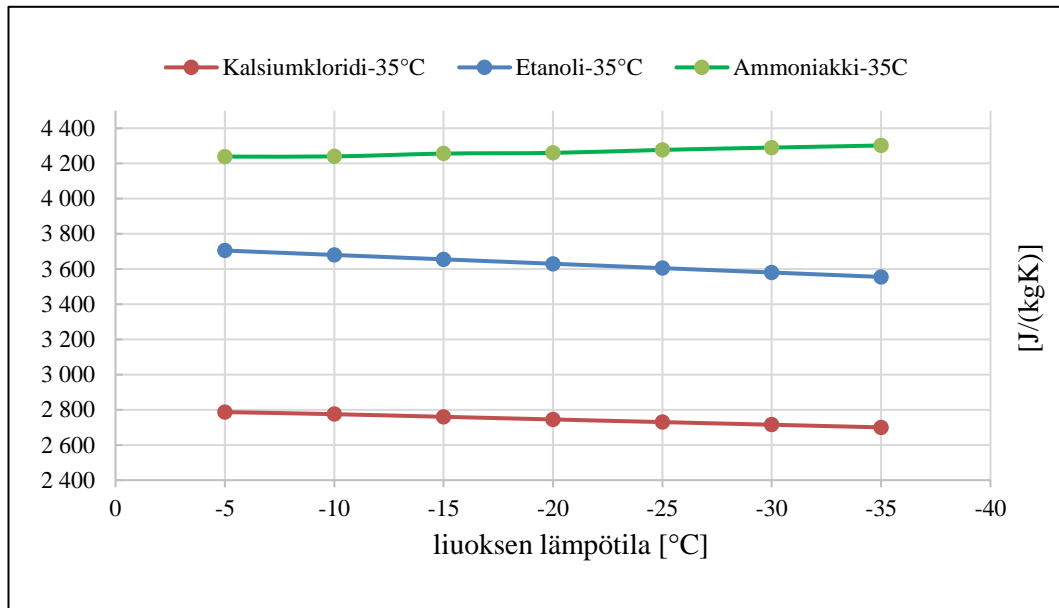
KUVA 23. Putkikanaalin poikkileikkaus (FCG, Lippumäki 2019)

Lopullinen siirtoputkisto toteutettiin PE200, PE250 ja PE315 putkista. Putkistojen mitoitussarvot ja osatehoarvot on esitetty liitteessä 4.

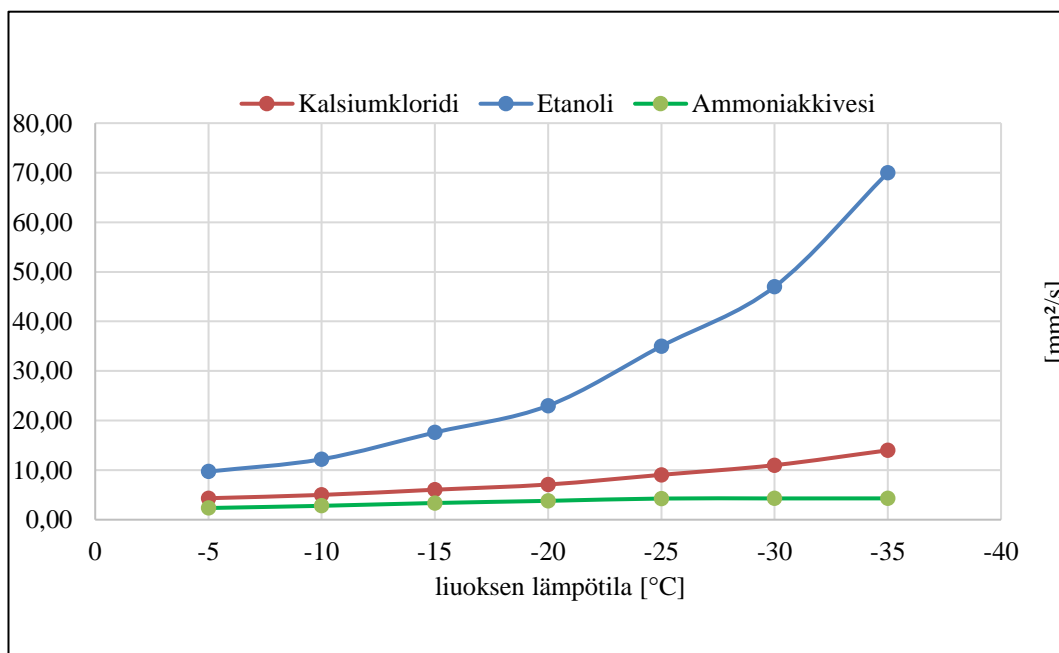
5.8 Lämmönkeruuliuos

Vertailusta jätettiin pois propyleeniglykoli-vesi, Freezium, DOWCAL ja Hycool. Kaupallisista tuotteista Freezium (kaliumformiaatti-vesi) on lämmönsiirto-ominaisuuksiltaan

hyvä. Tuote on myrkytön, palamaton ja ympäristölle haitaton. (VesiTekno Oy, Freezium) Freezium jätettiin pois tarkastelusta sen korkean hankintahinnan vuoksi. Tuote tunnetaan myös siitä, että se on reagoi vahvasti useiden materiaalien kanssa. (TKK. 2001. Välilliset kylmälaitokset, 149). Glykolipohjaisista nesteistä propyleeni-glykoli jätettiin tarkastelematta, koska nesteen viskositeetti nousee voimakkaasti lämpötilan laskiessa. Etyleeni-glykoli taas jätettiin pois tarkastelusta sen myrkyllisyyden vuoksi. Kuvioissa 10 ja 11 on vertailtu kalsiumkloridin, etanolin ja ammoniakkin vesiliuosten aineominaisuuksia.



KUVIO 10. Lämmönkeruuliuosten ominaislämpökapasiteetit lämpötilan funktiona.

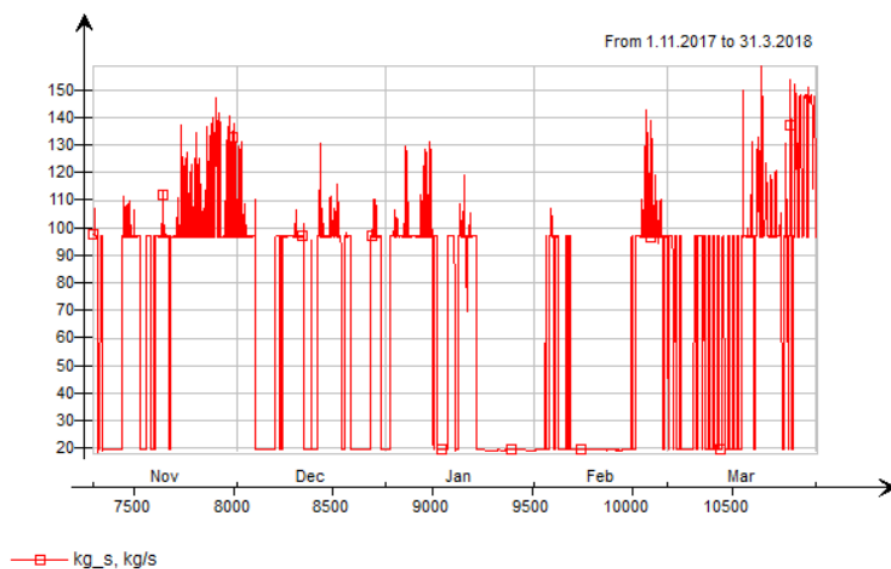


KUVIO 11. Lämmönkeruuliuosten viskositeetti lämpötilan funktiona

Lämmönsiirto ja pumppausominaisuuksiltaan paras lämmönkeruuliuos on ylivoimaisesti ammoniakkivesi. Ammoniakki on kuitenkin myrkyllinen aine ja on yleisesti huonossa maineessa. Lämmönkeruuputkiston vuotaessa ammoniakkivesi aiheuttaa erittäin voimakkaan hajun, jonka vuoksi esimerkiksi Keski-Espoon tekojäähentällä pelastuslaitos on joutunut käymään useasti paikalla (Asiantuntijakeskustelu, Findri Oy 2019.) Kuopion Lippumäkeen valittiin 28 p-% kalsiumkloridivesi eli suolaliuos. Kalsiumkloridi on ympäristöystävällinen ja turvallinen aine. Investointikustannusten kannalta kalsiumkloridi on edullinen (Asiantuntijakeskustelu, Findri Oy 2019.) Lämmönsiirto ja pumppausominaisuuksiltaan suolaliuos on suhteellisen huono verrattuna muihin liuoksiin.

5.9 Pumput

Pumput mitoitetaan suurimman hetkellisen höyrystintehon mukaan. Lippumäessä mitoitusteho on 1800 kW, joka tarkoittaa kalsiumkloridin aineominaisuuksilla ja kolmen (3) asteen lämpötilaerolla 43 dm³/s virtaamaa yhtä pumppua kohden. Mitoitustilanteen nostokorkeus on 200 kPa. Kenttä jaettiin neljään samankokoiseen lohkokon, joten pumppuja on yhteensä 4 kpl. Energiasimuloinneista saatiin liuospumppujen virtaamat tuntidatana koko käyttöajalta. Tuloksista nähdään, että pumput käyvät suurimman osan ajasta selvällä osateholla (KUVIO 12). Kuviossa 20 kg/s virtaama tarkoittaa, ettei pumppu käy. Pohjavirtaama on noin 100 kg/s, joka on määritetty simulointiohjelmaan Frouden luvun avulla.



KUVIO 12. Lämmönkeruujärjestelmän kokonaisvirtaama energiasimuloinnissa.

Taulukossa 9 on esitetty pumppujen toimintapiste, joihin kohdistuu eniten käyntitunteja. Pumput käyvät yhteensä noin 2000 tuntia. Taulukko on tehty Excelin taajuus-funktiolla, joten taulukkoa tulee tulkita niin, että virtaama 20,2 l/s tarkoittaa virtaamaa välillä 18,8-20,2 l/s ja 21,5 l/s tarkoittaa virtaamaa välillä 20,2-21,5 l/s. Taulukossa on oletettu pumppun kokonaishyötysuhteeksi 0,6.

TAULUKKO 9. Yksittäisen pumppun toimintapisteet energiasimuloinnin perusteella.

YHDEN PUMPUN TOIMINTAPISTEET KÄYTTÖAIKANA 1.11-31.3					
virtaama mitoitusvirtaamasta [%]	virtaama [l/s]	nostokorkeus [kPa]	käyntiaika [tunnit]	ottoteho [kW]	energiankulutus [kWh]
44	18,8	43	10	1,33	13
47	20,2	49	1571	1,65	2586
50	21,5	56	114	2,01	229
53	22,9	63	53	2,42	128
57	24,3	71	59	2,89	170
60	25,7	80	77	3,41	262
63	27,1	88	53	3,99	211
66	28,5	98	20	4,63	93
69	29,8	107	53	5,34	283
73	31,2	118	6	6,12	37
76	32,6	128	1	6,97	7

Energiasimuloinneissa ei huomioida jäädytystilannetta, jolloin pumput eivät käy hetkeäkään mitoituspisteessä. Taulukossa 10 on esitetty pumppujen todellinen mitoituspiste, joka aiheutuu jäädytysvaiheen tehosta. Samassa taulukossa on esitetty litran tarkkuudella pumppun toimintapiste osateholla, jolla pumppu käy vuodessa huomattavan ajan.

TAULUKKO 10. Yksittäisen pumppun osateho ja mitoitus tilanne

	Osatehotilanne	Mitoitus tilanne
massavirta [kg/s]	24,25	54,5
tilavuusvirta [l/s]	19,2	43,1
käyntitunnit [h]	1507	jäädytystilanne
nostokorkeus [kPa]	49	200
hydraulinen teho [kW]	0,94	8,62
kokonaishyötysuhde [-]	0,6	0,6
ottoteho [kW]	1,57	14,36

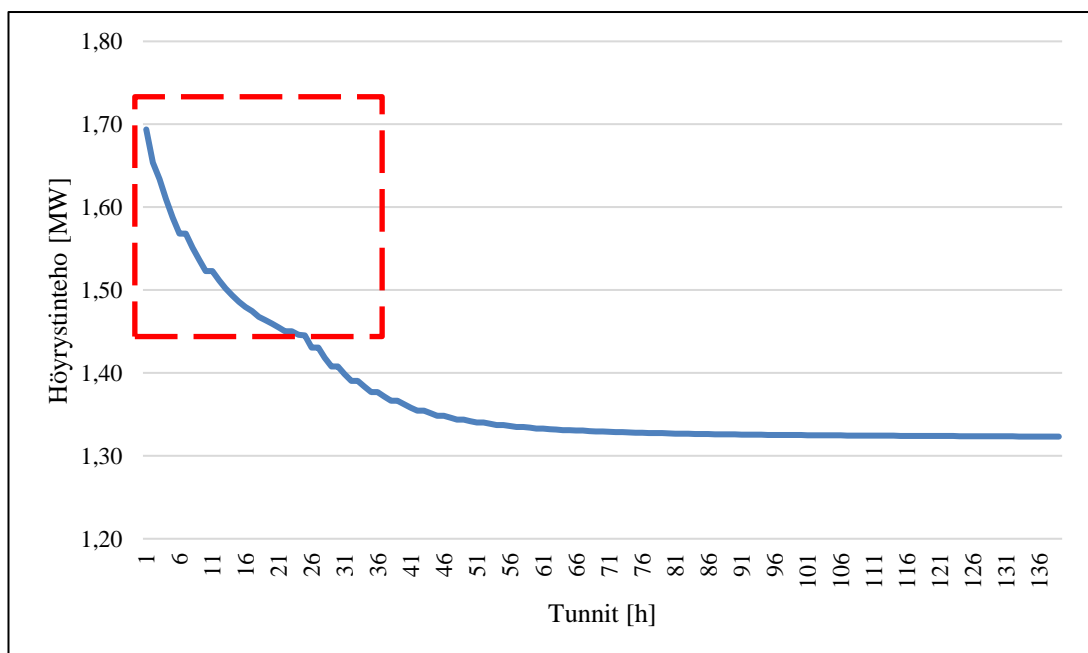
Pumppun kokonaishyötysuhde on oletettu samaksi koko laskennan ajan. Hyötysuhde riippuu pumppun rakenteesta. Pumppun mitoituspiste on 200 kPa ja 43,1 l/s.

6 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli määrittää ulkotekojään mitoittavat olosuhteet ja tätä kautta järjestelmän todellinen tehontarve. Opinnäytetyön alussa tehtiin selkeä työn rajaus ja rakenne, jonka ansiosta työ on helposti luettavissa ja looginen. Tämä työ oli kirjallisuuskatsaus ulkotekojään energiajärjestelmän komponentteihin. Lisäarvoa työhön saatiin dynaamisen simuloinnin kautta, sekä useiden eri alojen asiantuntijoiden ansiosta.

Työssä annettiin kattava katsaus ulkotekojään mitoittaviin olosuhteisiin ja komponentteihin. Työ osoitti, että ulkotekojäiden suunnittelussa kannattaa hyödyntää dynaamista simulointia. Ilman lämpötilan, tuulen, auringon ja useiden muiden muuttujien arviointi on haastavaa, jolloin dynaamisesta simuloinnista on selvää hyötyä. Simuloinnit osoittivat, että aiemmat arviot lämpökuormista ovat ylimitoitettuja. Tekniikan, mitoituksen ja simuloinnin osalta työstä jäi joitakin mielenkiintoisia jatkotutkimuksen kohteita.

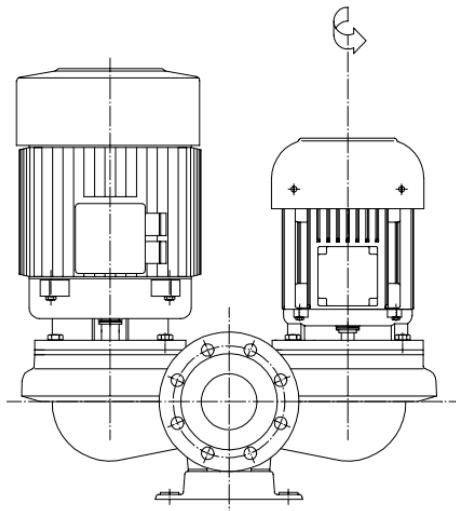
Työn yhteydessä huomattiin, ettei mitoistehoa enää jäädytyskauden jälkeen tarvita. Tehopiikkiä pienentämällä saavutetaan huomattavat säästöt kompressorikoneikon investoinnissa. Jatkotutkimuksessa voitaisiin tutkia, kuinka kyseisen tehopiikki saadaan tasaisemmaksi, niin että kentän käyttöaika ei lyhene. Kuviossa 13 on esitetty tehoalue, jota pienentämällä säästö tapahtuu.



KUVIO 13. Mitoittava kompressorikoneikon höyrystinteho

Simuloinnista saatiin arvokasta tietoa kompressorikoneikon käyntiprofiilista. Jään ylläpito vaatii huomattavasti vähemmän tehoa kuin jäädytysvaihe. Kompressorikoneikko käy selvillä osatehoilla suurimman osan ajasta. Simuloinnista saatua dataa voidaan näyttää esimerkiksi laitetoimittajalle, joka hankkii kylmäkoneikon. Tällöin laitetoimittaja pystyy valitsemaan kompressorikoneikon tyyppin ja mallin tietojen pohjalta.

Myös pumppujen osalta saatiin mielenkiintoisia tuloksia. Pumput käyvät suurimman osan ajasta noin 50 % virtaamalla. Tietoa tulee ehdottomasti hyödyntää pumppujen valinnassa. Mahdollisessa jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää energiatehokkain ratkaisu pumpun valintaan. Yksi mahdollinen ratkaisu on kuvan 24 mukainen kytkentä, jossa suurempi pumppu hoitaa huippukuorman aiheuttaman virtaaman ja pienempi osatehotilanteen. Kytkennällä on mahdollista saada säästöä energiankulutukseen.



KUVA 24. Kaksoispumppu (Kolmeks Oy. Suunnitteluohje, 16)

Kompressorikoneikon ja pumppujen käyntiprofiili pitää paikkaansa vain silloin kun järjestelmää ohjataan, niin kuin se on mallinnettu simulointiohjelmistoon. Kun ohjaus tehdään niin kuin se on mallinnettu, on mahdollista hyödyntää dataa myös suunnittelussa. Simulointidatan perusteella voidaan piirtää esimerkiksi verkoston säätökäyrä, josta selviää liuoksen meno ja paluulämpötila ulkolämpötilan funktiona. Säädöllä voidaan saada merkittävä säästö, kun liuoksen lämpötilaa ohjataan simulointidataan perustuen.

Työn tarkoitus ei ollut luoda tai mallintaa ulkotekojäätä IDA ICE:en, vaan analysoida simuloinnista saatua dataa. Työn yhteydessä huomattiin kuitenkin joitakin huomioita,

joissa malli poikkeaa todellisuudesta. Jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää putken sisäpuolisen lämmönsiirtokertoimen sekä putken materiaalin vaikutus lämmönsiirtoon maahan asennetuissa putkissa. Tällä hetkellä IDA ICE laskee koko simulointiperiodin samalla lämmönsiirtokertoimella, eikä näin ollen huomioi virtauksen luonnetta. Tekojään virtaus muuttuu voimakkaasti laminaariseksi osatehoilla. Vallitseva teoreettinen näkemys on, että laminaarisella virtaamalla lämmönsiirto on heikompaa.

Kentän alla sijaitseva lämmönkeruuputkisto on mallinnettu IDA ICE:en 2 dimensioisena objektina, eli tasona. Näin ollen lämmönsiirto tapahtuu tason läpi, kun taas todellisudessa lämmönsiirto tapahtuu 3 dimensioisena putken läpi. Malli olettaa, että lämmönkeruuputkisto on kauttaaltaan samassa lämpötilassa. Jatkotutkimuksessa voitaisiin selvittää, onko edellä mainituilla asioilla merkitystä lämmönsiirtoon ja kentän toimintaan.

LÄHTEET

Aittomäki, A. 2012. Kylmätekniikka. 4.painos. Helsinki: Suomen kylmäyhdistys ry

Jäähallien jään laatu. 2018. Jääkiekkoliiton olosuhde- ja ympäristövaliokunnan tutkimusraportti. Helsinki.

Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. 2011. Ilmatieteenlaitos.

EQUA. 2018. IDA Indoor Climate and Energy. Luettu 20.11.2018

<https://www.equa.se/en/>

Jäähallin kylmäkoneistojen hankintaopas. 2010. Teknologian tutkimuskeskus VTT:n raportti. Espoo. VTT Tiedotteita 2548.

Hakala, P & Kaappola, E. 2011. Kylmälaitoksen suunnittelu. 1.painos. Helsinki: Opetushallitus.

Laiho, E. 2010. Lämmön siirtymisen perusteita. Mikkelin ammattikorkeakoulu: opetusmateriaali

Laiho, E. 2010. Putkijohtojen virtausteknisen mitoituksen perusteita. Mikkelin ammattikorkeakoulu: opetusmateriaali

Zamboni. 2018. How it works. Luettu 20.11.2018.

<https://zamboni.com/about/how-it-works/>

Seppänen, O. 2001. Rakennusten lämmitys. Helsinki: Suomen LVI-liitto ry

Tetrachemicals. 2018. Käyttöturvallisuustiedote kalsiumkloridiliuos. PDF. 1.6.2018. Tulostettu 20.11.2018.

Tampereen teknillinen korkeakoulu. 2001. Välilliset kylmälaitokset.

Altia. n.d. Teollisuusetanolit. PDF. Tulostettu 15.11.2018

Vahanen Oy. 2014. Lausunto Naturet maalämpönesteen pohjavesivaikutuksista. PDF. 31.3.2014. Tulostettu 10.11.2018

Työterveyslaitos. 2017. Etyylialkoholin käyttöturvallisuustiedote / OVA-ohje. PDF. 6.11.2017. Tulostettu 21.11.2018.

Työterveyslaitos. 2017. Ammoniakin käyttöturvallisuustiedote / OVA-ohje. PDF. 6.11.2017. Tulostettu 21.11.2018.

NHL. 1.1.2019. Gallery, photos. Luettu 19.2.2019.

<http://www.nhl.com/ice/gallerylanding.htm?gid=2018020612>

NHL. 31.12.2018. Winter Classic Time Laps

<https://www.nhl.com/rangers/video/2019-winter-classic-time-lapse/t-283566556/c-64059403>

IIHF. 2016. ICE RINK GUIDE. PDF. 4/2016. Tulostettu 19.2.2019

ISU. 2018. SPECIAL REGULATIONS & TECHNICAL RULES SPEED SKATING. PDF. 6/2018. Tulostettu 19.2.2019

Pikkarainen, T. 2019. Tekonurmen energiajärjestelmä. Talotekniikan koulutusohjelma. Metropolian ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

Lubbers, Christof .L. Väitöskirja. 2007. On gas pockets in wastewater pressure mains and their effect on hydraulic performance.

Combi. 2018. Powerpoint esitys: Passiivisten suunnitteluratkaisujen vaikutus energiatehokkuuteen ja hiilijalanjälkeen. PDF. Tulostettu 19.2.2019

Finnish Consulting Group. 2019. Tiedostokansiot. Lippumäen tekojäärata.

Melinder, Å. 2007. Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids. Royal Institute of Technology. Väitöskirja.

Motiva. nd. Energiatehokkaat pumput. PDF. Tulostettu 19.2.2019.

Grundfos Industry. 2016. Pump Handbook. PDF. Tulostettu 19.2.2019

Kolmeks Oy. nd. Suunnittelijan opas. Tulostettu 19.2.2019

Kärkkäinen, A. 2010. Gasfri påfyllning av värme- och kylsystem samt injustering av radiatorsystem. Aalto yliopisto. Väitöskirja.

Juselius, J. 2015. PPOOLEX laboratorionkoelaitteiston kaasunpoisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Energiatekniikan kandidaatintyö.

HR. Wallingfor Ltd. 2015. Air in pipelines- a literature review. PDF. Tulostettu 20.1.2019

Finhockey, Suomen jääkiekkoliitto. 2018. Excel-tiedosto. Tulostettu 24.2.2019
<https://www.finhockey.fi/index.php/info/jaeahallit>

ASHRAE. Complete Listing of the 3012 IWEC2 Weather Files. PDF. Tulostettu 28.2.2019

Kolmeks Oy. 2019. Pumpun mitoitusohjelma Pump selector.
<https://www.kolmeks.fi/en/pumpselector>

Vesitekno Oy. nd. Freezium opas. PDF. Tulostettu 6.3.2019

Asiantuntijakeskustelu. Findri yleiskylmä Oy. Jarno Harju. Toimitusjohtaja. 1/2019.

Sähköpostikeskustelu. FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy. Kalle Linkola. Geosuunnittelija. 11/2018.

Sähköpostikeskustelu. FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy. Kalle Linkola. Geosuunnittelija. 3/2019.

Asiantuntijakeskustelu. Rototec Oy. Niko Pihlanen. Suunnittelija. 10/2018

Sähköpostikeskustelut. EQUA Simulation AB. Jouko Niemelä. 3/2019.

Sähköpostikeskustelu. Prorink Oy. Ari Penttilä. Toimitusjohtaja. 29.10.2018

Liiga. 24.11.2016. Uutiset. Luettu 10.3.2019

<https://liiga.fi/fi/uutiset/2016/11/24/ulkojaat-2016-muistatko-edelliset-liigan-ulkoilmapelit>

Helsingin kaupunki. 18.10.2018. Talousveden laatu. Luettu 10.3.2019

<https://www.hel.fi/helsinki/fi/asuminen-ja-ymparisto/elintarvikevalvonta-ja-ymparisto-terveys/terveydensuojelu/talousvesi/laatu>

Puranen, J. 2015. Lämpö- ja virtausoppi. Talotekniikan koulutusohjelma. Opetusmateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Mäkinen, A. 2019. Lämmönsiirron ja virtausopin sovellukset talotekniikassa. Luentomateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Ympäristöministeriö 2018. Energiatodistusopas. PDF. Tulostettu 21.3.2019

Yleisradio. 2016. Uutinen: ” Jääkone käytettynäkin 60 000 euroa – hallit isojen investointien edessä”. Luettu 21.3.2019. <https://yle.fi/urheilu/3-8718977>

Prorink Oy. nd. Zamboni tuote-esite. PDF. Tulostettu 21.3.2019.

Ilmatieteenlaitos. Verkkosivu: havaintojen laitos. Luettu 15.2.2019. Kuopio Maaninka mittausasema. <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

LIITTEET

Liite 1. Painehäviölaskelmat

Suoran putken painehäviöt ovat laskettu Darcy Weisbachin kaavalla.

$$\Delta p = \lambda * \frac{l}{d} * p_a = \lambda * \frac{l}{d} * \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

λ = kitkavastuskerroin

l = putken pituus, m

d = putken sisähalkaisija, m

p_a = putkessa virtaavan aineen dynaaminen paine, Pa

ρ = tiheys kg/m³

v = nopeus m/s

Oletuksena on pidetty, että virtaus on:

Laminaarista, kun $Re < 2300$

Turbulenttista kun $Re > 2300$

(Todellisuudessa virtaus on laminaarista, kun $Re < 2000$ epämääräistä kun Re on välillä 2000-4000 ja turbulenttista kun $Re > 4000$ (Laiho, E. 2010. 28)

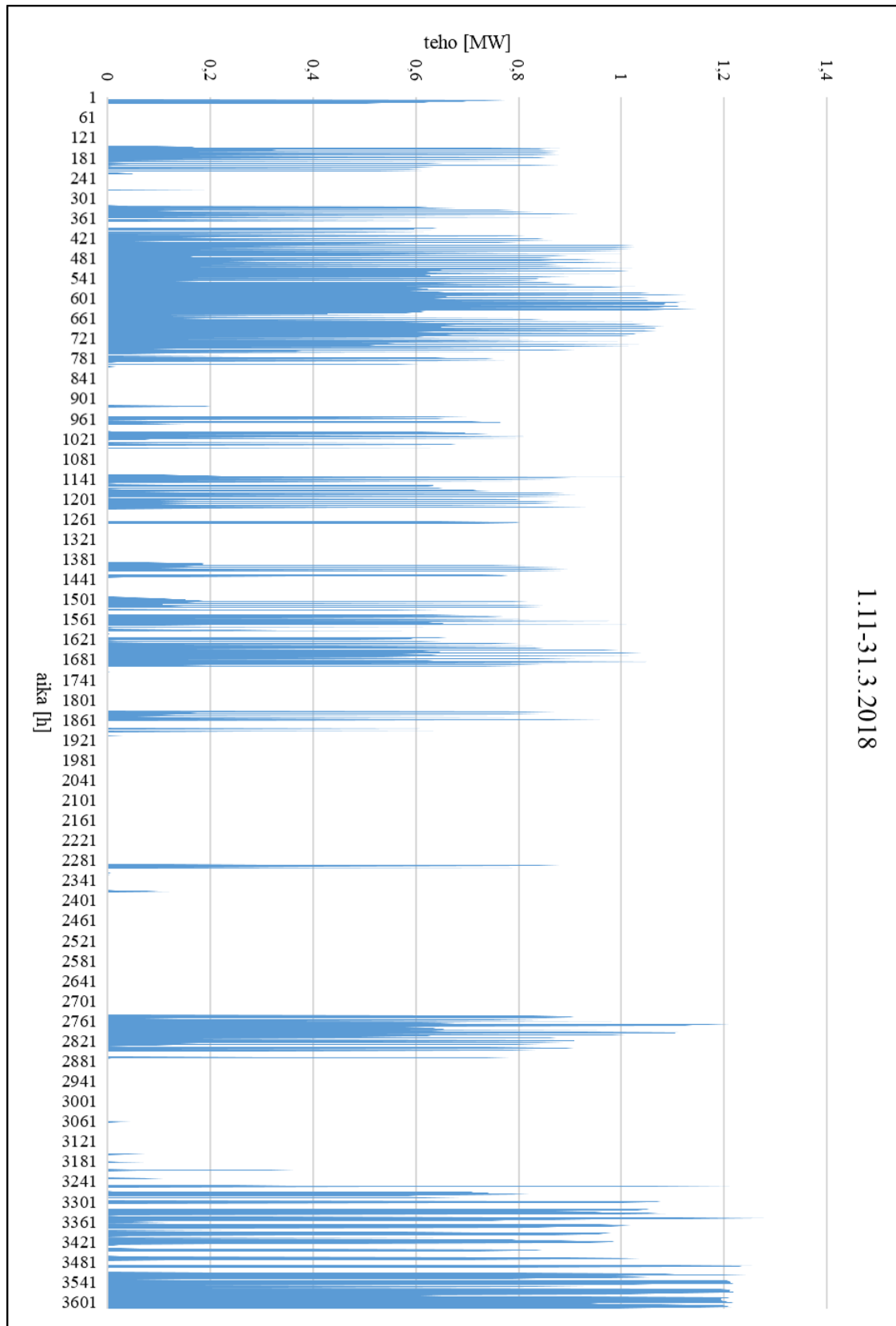
Kitkakerroin on laskettu seuraavasti. Kitkakertoimen määrittäminen on tehty TKK:n julkaiseman välilliset kylmälaitokset teoksen mukaisesti.

Laminaarinen virtaus $\lambda = 64/Re$ (Hagen-Poiseillen yhtälö)

Turbulenttinen virtaus

$$\lambda = (1,84 * \log(Re) - 1,64)^2$$

Liite 2. Höyrystinteho 1.11.2017-31.3.2018



Liite 3. Pumppujen tehonlaskenta

hydraulinen teho kaava

$$Ph = \Delta p * Q$$

Ph: hydraulinen teho, kW. Δp : tarvittava kokonaispaine, kPa. Q: virtaama, m³/h

akseliteho kaava

$$P_2 = \frac{\Delta p * Q}{n_1}$$

P₂: akseliteho, kW. Δp : tarvittava kokonaispaine, kPa. Q: virtaama, m³/h,. n₁: pumpun hyötysuhde

ottoteho kaava

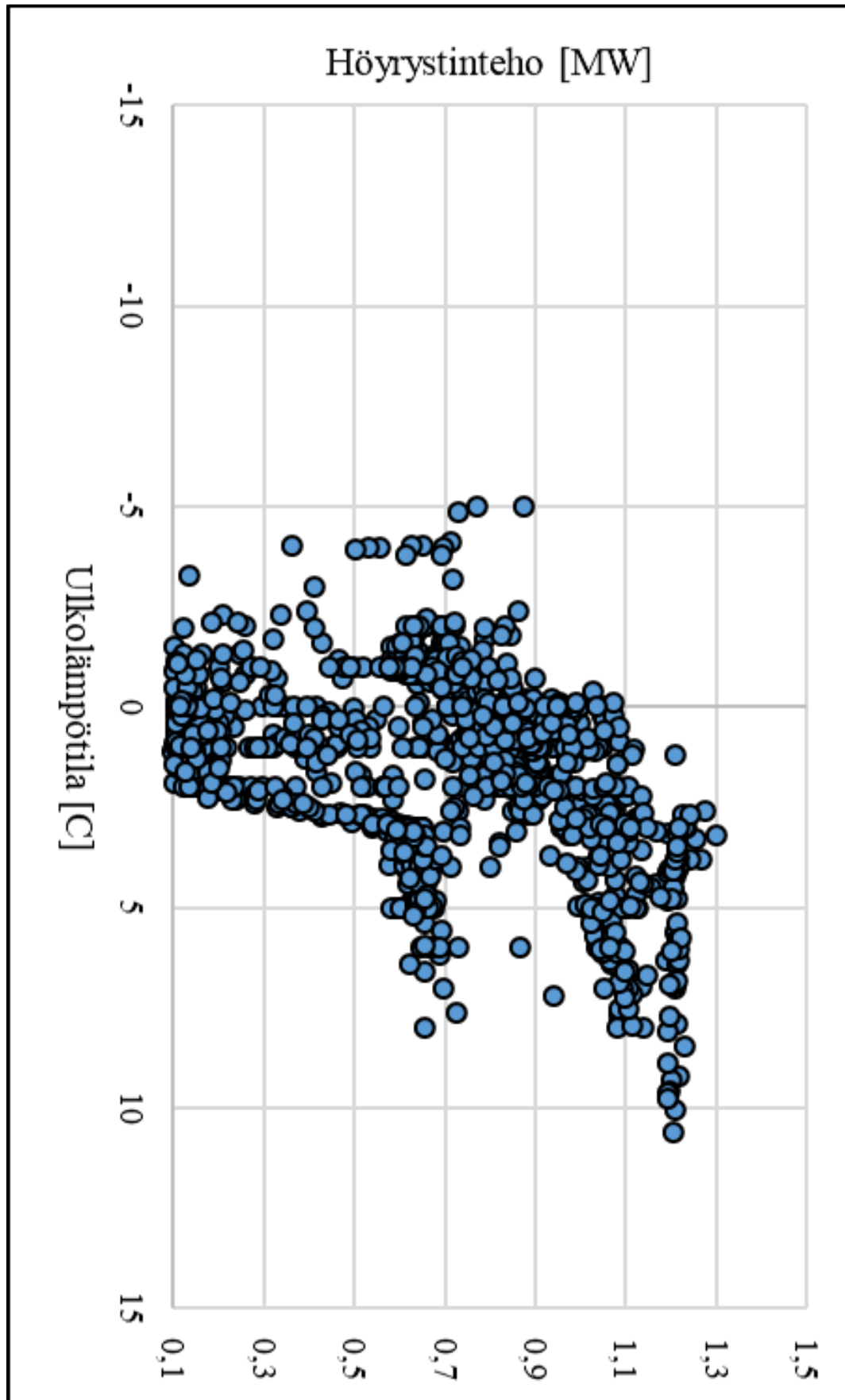
$$P_0 = \frac{P_2}{n_2}$$

P₀: ottoteho, kW. P₂: akseliteho, kW. n₂: moottorin hyötysuhde

Liite 4. Putkiston mitoitus

Lämmönkeruuputkisto		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 25, PN 12,5	PE 25, PN 12,5
Putken sisähalkaisija	[mm]	20,4	20,4
Putken karheus	[mm]	0,01	0,01
Asennusväli	[mm]	100	100
Lohkojen määrä	[1]	4	4
Lohkon pinta-ala	[m ²]	2950	2950
Rataputkilenkkien lukumäärä			
lohkoa kohden	[1]	210	210
Yhden rataputkilenkin pituus	[m]	143	143
Yhden rataputkilenkin virtaama	[dm ³ /s]	0,205	0,100
Yhden rataputkilenkin painehäviö	[kPa]	53	26
Virtausnopeus	[m/s]	0,69	0,3
Reynoldsin luku	[-]	2340	1040
Jakotukki 1 lohko		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 200, PN 6	PE 200, PN 6
Putken sisähalkaisija	[mm]	220,4	220,4
Putken karheus	[mm]	0,05	0,05
Jakotukin pituus	[m]	44	44
Virtaama	[dm ³ /s]	0,205-43,1	0,100-19,2
Putkiston painehäviö	[kPa]	15	3
Virtausnopeus	[m/s]	2,26	1,01
Siirtoputkisto 1 lohkoa		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 200, PN 6	PE 200, PN 6
Putken sisähalkaisija	[mm]	176,2	176,2
Putken karheus	[mm]	0,05	0,05
Siirtoputkiston pituus	[m]	44	44
Virtaama	[dm ³ /s]	43,1	19,200
Putkiston painehäviö	[kPa]	11	2,5
Virtausnopeus	[m/s]	1,77	0,79
Siirtoputkisto 2 lohkoa		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 250, PN 6	PE 250, PN 6
Putken sisähalkaisija	[mm]	220,4	220,4
Putken karheus	[mm]	0,05	0,05
Siirtoputkiston pituus	[m]	44	44
Virtaama	[dm ³ /s]	86,2	38,4
Putkiston painehäviö	[kPa]	12	2,9
Virtausnopeus	[m/s]	2,26	1,01
Siirtoputkisto 4 lohkoa		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 315, PN 6	PE 315, PN 6
Putken sisähalkaisija	[mm]	277,6	277,6
Putken karheus	[mm]	0,05	0,05
Siirtoputkiston pituus	[m]	20	20
Virtaama	[dm ³ /s]	172,4	76,8
Putkiston painehäviö	[kPa]	6,8	1,35
Virtausnopeus	[m/s]	2,84	1,27
Kontti + Höyrystin		mitoitustilanne	osatehotilanne
Putkiston tyyppi		PE 315, PN 6	PE 315, PN 6
Putken sisähalkaisija	[mm]	277,6	277,6
Virtaama	[dm ³ /s]	172,4	76,8
Höyrystin	[kPa]	41,0	8,14
Putkiston kertavastukset kontissa	[kPa]	25	4,96
Virtausnopeus	[m/s]	2,84	1,27
PAINEHÄVIÖT YHT.		mitoitustilanne	osatehotilanne
verkosto yhteensä	[l/s]	172,4	76,8
verkosto yhteensä	[kPa]	163,8	48,8

Liite 5. Höyrystinteho ulkolämpötilan funktiona



Liite 6. Lämmönvastukset maahan asennetuissa putkissa

Putken sisäpuolinen lämmönvastus

Reynoldsin luku virtauksessa = 2341

$$\text{Prandltin luku} = P_R = \frac{c_p \cdot n}{\lambda} = \frac{2750 \frac{J}{kgK} * 1265 \frac{kg}{m^3} * 6,05 * 10^{-6} m^2/s}{0,516 W/mK} = 40,8$$

$$\text{Nusseltin luku kun Re on } > 2300 = Nu = \frac{\frac{\lambda}{8} * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \sqrt{\frac{\lambda}{8}} * (Pr^{2/3} - 1)} = \frac{0,045}{8} * (2341 - 1000) * 40,8 = 27,14$$

Lähde kaavalle: A Heath Transfer Textbook, John. H Lienhard s, 362

$$\text{Putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin} = a_s = \frac{\lambda}{d} * Nu = \frac{0,516 \frac{W}{mK}}{0,0204 m} * 27,14 = 686 W/m^2K$$

$$\text{Putken sisäpuolinen lämmönvastus} = R_S = \frac{1}{\pi * d_s * a_s} = \frac{1}{\pi * 0,0204 m * 686 W/m^2K} = 0,023 mK/W$$

Osatehotilanne: Reynoldsin luku 1040

$$\text{Nusseltin luku kun Re on } < 2300 = \frac{48}{11} = 4,364$$

Lähde kaavalle: A Heath Transfer Textbook, John. H Lienhard, s 351

$$\text{Putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin} = a_s = \frac{\lambda}{d} * Nu = \frac{0,516 \frac{W}{mK}}{0,0204 m} * 4,364 = 110,4 W/m^2K$$

$$\text{Putken sisäpuolinen lämmönvastus} = R_S = \frac{1}{\pi * d_s * a_s} = \frac{1}{\pi * 0,0204 m * 110,4 W/m^2K} = 0,14 mK/W$$

Lähde kaavalle: Luentomateriaali. Mäkinen, A. TAMK.

Putken seinämän lämmönvastus

$$\text{Putken seinämän aiheuttama lämpövastus} R_P = \frac{\ln\left(\frac{d_U}{d_S}\right)}{\pi * 2 * \lambda} = \frac{\ln\left(\frac{0,025 m}{0,0204 m}\right)}{\pi * 2 * 0,035 W/mK} = 0,92 mK/W$$

Materiaali = muovi PE

Lämmönjohtavuus $\lambda = 0,035 W/mK$

Ulkohalkaisija $d_U = 0,025 m$

Sisähalkaisija $d_S = 0,0204 m$

Lähde kaavalle: Luentomateriaali. Mäkinen, A. TAMK.

Putken ulkopuolinen pintavastus ajateltu nollassa, koska maa-aines on putken ulkokuoressa kiinni.

Maaperän lämmönvastus putkesta ylöspäin

Maaperän lämmönvastus putken yläpuolella olevassa maa-aineksessa

$$R_M = \frac{1}{2 * \pi * \lambda} * \ln\left(\frac{s}{r} + \sqrt{\left(\frac{s}{r}\right)^2 - 1}\right) = \frac{1}{2 * \pi * 1 \frac{W}{mK}} * \ln\left(\frac{0,09 m}{\left(\frac{0,0204}{2}\right) m} + \sqrt{\left(\frac{0,09}{\frac{0,0204}{2}}\right)^2 - 1}\right) = 0,45 mK/W$$

$\lambda =$ maa-aineksen lämmönjohtavuus, $1,0 W/mK$

$s =$ putken keskiviivan etäisyys maanpinnasta, $0,1 m$

$r =$ putken säde, $0,0102 m$

Lähde kaavalle: Seppänen, Rakennusten lämmitys, 215