

Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tero Pikkarainen

Tekonurmen energiajärjestelmä Lämmönluovutusjärjestelmän mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

13.3.2019

Tekijä Otsikko	Tero Pikkarainen Tekonurmen energiajärjestelmä: lämmönluovutusjärjestelmän mitoitus
Sivumäärä Aika	70 sivua + 9 liitettä 13.3.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	diplomi-insinööri Mika Autiopelto yliopettaja Aki Valkeapää
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena on mitoittaa tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmä energiatehokkaasti. Tavoitteena on pienentää lämmityksen fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä korkeita kustannuksia, mahdollistaen näin ollen edulliset harjoitusvuorot tekonurmen käyttäjille.</p> <p>Projektissa päälämmitysjärjestelmäksi suunnitellaan maa- ja aurinkolämpöä hyödyntävä lämpöpumppujärjestelmä olemassa olevan kaukolämpöjärjestelmän sijalle. Insinööriyössä käsitellään tarvittavien lähtötietojen keräämistä ja valintaa kohteen dynaamisia simulointeja varten. Työssä lämmönluovutusjärjestelmän mitoitus perustuu simulointituloksiin, sekä tekonurmen uudistamisen jälkeen suoritettavan kuormituskokeen tuloksiin.</p> <p>Työn tuloksien perusteella, ilman lumen sulattamista ja maalämpöpumppu päälämmitysjärjestelmänä ostoenergian määrää voidaan vähentää vuositasolla 1 416 MWh:sta 317 MWh:iin. Suunnittelemalla kaukolämpö päälämmitysjärjestelmäksi ilman lumen sulattamista ostoenergian määrä saadaan vuositasolla 778 MWh:iin.</p> <p>Insinööriyö antaa yksittäisen suunnitteluratkaisun ja tietoa huomionarvoisista asioista suunniteltaessa energiatehokasta tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmää. Työ antaa myös arvokasta tietoa kuntien liikuntapalveluiden tuottajille huolellisella energiasuunnittelulla saavutettavista säästöistä.</p>	
Avainsanat	tekonurmi, lämmönluovutusjärjestelmä, maalämpö

Author Title Number of Pages Date	Tero Pikkarainen Energy System of Artificial Turf: Dimensioning of Heat Release System 70 pages + 9 appendices 13 March 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Mika Autiopolto, Master of Science (Technology) Aki Valkeapää, Principal Lecturer
<p>The purpose of this bachelor's thesis was to design an energy efficient heat release system for an artificial turf field, and to reduce both the use of fossil fuels and the heating costs of artificial turfs, thus providing end users with better exercise facilities during the winter.</p> <p>The primary heat source, district heat, was replaced with a heat pump with geothermal and solar heat as its main sources of energy. The thesis focused on choosing and gathering the information that is necessary for dynamic simulations of the studied facility. The heat release system was then dimensioned on the basis of the results of the simulations, and a proof test of the system.</p> <p>The results showed that the amount of delivered energy can be reduced from 1416 MWh to 317 MWh annually, providing that the main heat source is the heat pump and heat is not used to melt snow. With district heating as the main heat source and no snow melting, the annual amount of delivered energy can be reduced to 778 MWh.</p> <p>The thesis presents matters that need attention when designing an energy efficient heat release system for artificial turf. Furthermore, it provides information for producers of municipal sports-facilities about possible savings reachable with thorough energy design.</p>	
Keywords	artificial turf, heat release system, geothermal energy

Sisälllys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Olosuhteet	4
2.1	Tekonurmen koko	4
2.2	Säädata	4
2.3	Varjostukset	6
2.4	Tekonurmen hoitotapa	7
2.5	Mitoituslämpötilat	11
3	Lämmönluovutusjärjestelmä	11
3.1	Tekonurmialueen rakenne	11
3.2	Lämmönluovutusliuos	15
3.3	Lämmönluovutusputkisto	17
3.4	Putkiston lämmönsiirto	18
3.5	Putkiston painehäviöt	23
3.6	Putkiston ilmaaminen	26
3.7	Siirtoputket	29
3.8	Lämpölaajeneminen	32
3.9	Pumput	36
3.10	Kuormituskoe	37
4	Mitoitussimuloinnit	38
5	Tulokset	41
5.1	Säädata	41
5.2	Tekonurmialueen rakenne	43
5.3	Lämmönluovutusliuos	48
5.4	Putkisto	50
5.5	Jakotukit	51
5.6	Lauhduksen mitoitusaste	54

5.7	Pumput	55
5.8	Kuormituskoe	58
6	Pohdinnat	64
6.1	Energiankulutus	64
6.2	Simulointiohjelma	65
6.3	Tekonurmialueen rakenne	66
6.4	Lämmönluovutusliuos	66
6.5	Putkisto	67
6.6	Säätö ja ohjaus	68
6.7	Lämmönpumppausjärjestelmä	68
6.8	Lämmönkeruujärjestelmä	69
6.9	Itsearviointi	70
6.10	Eryitysmaininnat	70
	Lähteet	71

Liitteet

Liite 1. Moodyn diagrammi

Liite 2. Painehäviölaskentayhtälöiden vertailu: Blasius vs. Prandtl-Colebrook

Liite 3. Säädatan vertailu

Liite 4. TE2: pysyvyys ulkolämpötilan funktiona

Liite 5. Tehon pysyvyys ulkolämpötilan funktiona

Liite 6. Urajoustopuolisen murskekerroksen lämpötilan pysyvyys ulkolämpötilan funktiona

Liite 7. Järjestelmän kytkentäkaavio

Liite 8. Kuormituskoe: laskettu teho verrattuna Keravan energian mittaukseen

Liite 9. Kuormituskoe: menoliuoksen lämpötila ja liuoksen jäähtymä

Lyhenteet

DATSAV	Surface Climatic Database. Tuntimittausdata.
FCG	Finnish Consulting Group. Suomalaisessa omistuksessa oleva konsulttiyri- tys.
IDA ICE	Indoor Climate and Energy. Dynaaminen simulointiohjelma.
ISH	Integrated Surface Hourly. Tuntimittausdata.
IWEC	International Weather for Energy Calculations. Keskimääräistetty säätie- dosto.
NCDC	National Climatic Data Center. Amerikkalainen säädatakeskus, joka on liit- tynyt osaksi "National Centers for Environmental Information" yhtymää.
PE	polyeteeni
PU-jousto	Polyuretaanijousto. Tekonurmen alapuolella käytettävä joustokerros.
SDR	Standard Diameter Ratio. Suhdeluku, joka määrittää putken ulkohalkaisijan suhteen seinämävahvuuteen.
SWOT	SWOT-analyysi. Nelikenttäanalyysi, jonka avulla voidaan selvittää vaihto- ehtojen vahvuudet, heikkoudet, mahdollisuudet ja uhat.
TRY	Test Reference Year. Keskimääräistetty sää tiedosto.
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

1 Johdanto

Työn tilaaja on Mika Autiopelto FCG suunnittelu ja tekniikka Oy:stä. Insinööriyössä mitoitetaan tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmä Sipoon Söderkullan urheilukentälle. Hankkeessa kentän päälämmitysmuodoksi suunnitellaan ja toteutetaan maa- ja aurinkolämpöä hyödyntävä lämpöpumppujärjestelmä olemassa olevan fossiilisen kaukolämpöjärjestelmän sijalle.

Söderkullan urheilukentän kunto on heikentynyt viime vuosina, mikä on näkynyt vähentyneinä käyttötunteina. Kentän lämmitystä ei ole hyödynnetty täysimittaisena lämmityskauden 2012–2013 jälkeen. Taulukossa 1 on esitetty kentän toteutunut käyttö ja energiankulutus lämmityskausilta 2010–2013. Keskimääräinen energiankäyttö on ollut 1 416 MWh/a ja lämmityskustannukset 95 000 €/a. Laskenta perustuu Keravan energian 1.9.2017 ilmoittamaan kaukolämpöenergian hintaan 67 €/MWh, kaukolämmön perusmaksua ei ole huomioituna. [1.]

Taulukko 1. Söderkullan urheilukentän toteutunut energiankäyttö lämmityskausilta 2010–2013 [1].

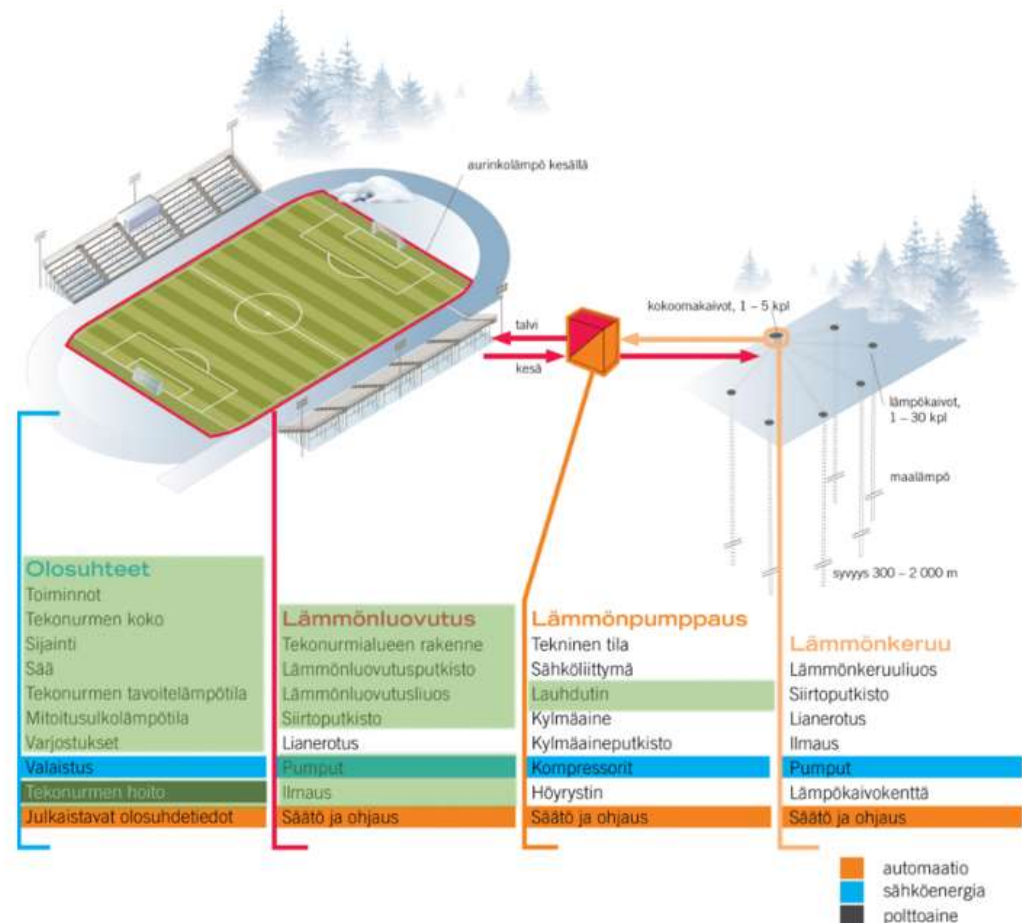
Alku pvm	Loppu pvm	Päivää [d]	Käyttö [h]	Käyttö/Päivä [h/d]	Lämmitysenergia [MWh]	Kustannus [€]
1.11.2010	15.4.2011	165	845	5,1	1417	94939
1.11.2011	15.4.2012	166	504	3,0	1319	88373
1.11.2012	15.4.2013	165	1026	6,2	1512	101304

Lämmityksessä käytettävien kahden siirtimen mitoitustehot ovat olleet 500 kW/kpl, kenttään menevän liuksen lämpötilalla 40 °C ja palaavan 25 °C. Kaukolämpömittarin datan perusteella huipputeho on ollut 1 165 kW. [1.]

Suomessa on Palloliiton tiedon mukaan noin 60 lämmitettyä tekonurmikenttää, joista lähes kaikkia lämmitetään kaukolämmöllä [2]. Jan Seiro tutki 2016 julkaistussa opinnäytetyössään [3] jalkapallokenttien energiankulutusta Suomessa. Korkeiden lämmityskustannuksien vuoksi kenttien käyttöaika on jouduttu supistamaan talvisin, mikä on rajoittanut entisestään ulkotekonurmilla pelattavien lajien harjoittelumahdollisuuksia [3, s. 30]. Matalat käyttökustannukset mahdollistavat edulliset harjoitusvuorot, mikä tukee näin ollen Suomen kansanterveyttä sekä joukkueiden mahdollisuutta menestyä lajeissaan.

Idea hankkeelle syntyi Sipoon kunnan tekniseltä johtajalta Ilari Myllyvirralta, tavoitteena leikata Söderkullan tekonurmen suuria käyttökustannuksia. Maalämpöjärjestelmän kannattavuuden optimoimiseksi sillä tuotettavan energian osuus täytyy olla mahdollisimman suuri. Tekonurmen lämmityksen tapauksessa tämä tarkoittaa huipputehojen leikkaamista mahdollisimman pieneksi ja huipun käyttöajan minimoimista. Tavoitteisiin pääseminen vaati tarkkoja simuloiteja, jotka laati Equa Simulations Finland Oy.

Insinööriyön tavoite on käsitellä ne osa-alueet tekonurmen energijärjestelmästä, jotka vaikuttavat lämmönluovutuspiiriin mitoitukseen. Työ kohdistuu kuntien liikuntapalveluiden tuottajille, sekä lähtötiedoksi kohteiden suunnittelijoille. Kuva 1 esittää tekonurmen energijärjestelmän osa-alueet, insinööriyön sisältö on rajattu vihreällä.



Kuva 1. Insinööriyön sisällön rajaus [4].

Kentän uudistushankkeen ensimmäinen vaihe sisälsi liikunta-alueen uudistuksen ja toinen huoltorakennuksen sekä sosiaalityöt. Kentän uudistus ja lämmönluovutuspiiriin asennukset sijoituivat 2018 kesälle (kuva 2), jolloin uusittu lämmönluovutuspiiri kytkettiin väliaikaisesti olemassa olevaan kaukolämpöjärjestelmään. Väliaikainen kytkentä kaukolämpöön mahdollisti simulointituloksien todentamisen kuormituskokeen avulla alkuvuodesta 2019.



Kuva 2. Söderkullan urheilukentän uudistuksen toteutusvaihe.

Kentän uudistuksen toisessa vaiheessa maalämpö asennetaan päälämmitysjärjestelmäksi, minkä jälkeen todennetaan vielä järjestelmän toiminta, sekä perehdytetään kenttähenkilökunta järjestelmän käyttöön.

Insinööriyön alussa kuvaillaan ulkoiset olosuhteet, joissa järjestelmän tulee pystyä pitämään tekonurmen peliolosuhteet hallittuina, sekä näiden asettamat vaatimukset kentän hoidon kannalta. Alussa esitetään myös säädatan valinnassa käytettävää menetelmää. Tämän jälkeen työssä käsitellään menetelmiä ja teoriaa lämmönluovutusjärjestelmän mitoittamiseen sekä kuormituskokeen suorittamiseen. Lisäksi esitetään mitoitussimuloinneissa käytettävää ohjelmaa ja sen eroavaisuuksia todellisuuteen verrattuna. Työn loppuosassa käsitellään työn tuloksia ja esitetään työn pohdinnat sekä lisätutkimusta vaativat asiat.

2 Olosuhteet

2.1 Tekonurmen koko

Tekonurmialueen toiminnot määrittävät vaaditun pinta-alan kentälle. Sipoon tekonurmikentällä pelataan pääasiassa jalkapalloa, mutta sitä käytetään myös muun muassa amerikkalaisen jalkapallon ja ultimatein pelaamiseen. Jalkapallokentän mitat ovat Palloliiton ohjeistuksen mukaan 105 m x 68 m [5]. Tämän perusteella lämmitettäväksi alueeksi sovittiin tilaajan kanssa 110 m x 70 m.

2.2 Säädata

Mitoitussimulointien kannalta oleellisia asioita on käytettävän säädatan valinta. Valintaa tehdessä tulee tarkastella säädatan vastaavuutta toteutuneisiin sääoloihin sekä pohtia tulevaisuuden näkymiä. [6.] Yleisimmin käytetyt säätiedostot ovat IWECC (International Weather for Energy Calculations), IWECC2 ja TRY2012 (Test Reference Year).

IWECC-säädata on kerätty yhdysvaltalaisen säämittausaseman NCDC (National Climatic Data Center) kokoamasta DATSAV3 (Surface Climatic Database) -tuntimittausdatasta. DATSAV3 data on kerätty maailmanlaajuisesti eri mittausasemilta. IWECC sisältää 227:n eri sijainnin datan USA:n ja Kanadan ulkopuolelta. [7.] IWECC-säätiedostoa varten kerätty data on vuosilta 1992–1999 [8].

IWECC2-säädata on myös kerätty NCDC:n koostamasta ISH (Integrated Surface Hourly) tuntimittausdatasta. IWECC2 sisältää 3 012 eri sijainnin datan USA:n ja Kanadan ulkopuolelta. [7.] IWECC2-säätiedostoa varten kerätty data on vuosilta 1983–2008 [8].

TRY2012-säädata on Ilmatieteen laitoksen 2011 julkaiseman raportin ”Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista” lopputulos. TRY2012 luotiin Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä vuosina 1980–2009 tehtyjen mittausten perusteella. Testivuoteen valittiin mittausväliltä kalenterikuukaudet, jotka vastasivat mahdollisimman hyvin ilmastollista keskimääräistä tilaa. Valinnassa tarkasteltiin lämpötilaa, kosteutta, auringon säteilyä ja tuulen nopeutta. Kullekin suurelle annettiin painoarvo sen mukaan, kuinka paljon ne vaikuttavat rakennusten lämmitys- ja jäähdytystehontarpeeseen Suomessa. [9.]

Analyysissä vertailtavina olevien toteutuneiden vuosien data ladattiin Ilmatieteen laitoksen latauspalvelusta. Tulevaisuuden ennusteet ilmastonmuutoksesta perustuvat Ilmatieteen laitoksen julkaisemaan raporttiin ”Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista”. Analyysi eri säätiedostoista tehtiin lokakuun alusta huhtikuun loppuun, jolloin tekonurmen lämmitystä oletettavasti tarvitaan. Havaintoasemana ladattavalle toteutuneelle säälle käytettiin Helsinki-Vantaan lentoasemaa, joka oli maantieteellisesti lähimpänä Sipoota oleva havaintoasema riittävällä mittauskustolla. Vertailtavat suureet analyysissä olivat lämpötila, suhteellinen kosteus, auringon hajasäteily vaakapinnalle ja pilvisuus.

Analyysissä auringon säteilyn vertailu toteutuneeseen säädään jouduttiin tekemään hajasäteilyn kautta, koska suoran säteilyn arvot eivät olleet vertailukelpoisia säätiedostojen ja Ilmatieteen laitoksen mitattujen arvojen välillä. Ilmatieteen laitoksen arvot ovat vaakapinnalle ilmoitettuja arvoja, jolloin kokonaissäteily saadaan summaamalla yhteen hajasäteily ja suorasäteily. Mittaus suoritetaan Kipp&Zonen CGR4-pyrgeolimetrillä (kuva 3). [10.]



Kuva 3. Kipp&Zone CGR4-säteilymittari [11].

IWEC, IWEC2 ja TRY2012 ilmoittavat säädätärapportissa auringon hajasäteilyn vaakapinnalle, mutta suoran säteilyn kohtisuoraan auringon sädettä kohden, jolloin kokonaissäteilyn selvityksessä arvoja ei voi summata yhteen [12]. Kohtisuoraan sädettä kohden saatavia arvoja varten säteilymittarilta vaaditaan ohjausjärjestelmä, joka seuraa aurinkoa [11]. Vertailu kohtisuoraan sädettä vasten tehtiin kuitenkin eri säätiedostojen välillä.

Koska säätiedostot eivät sisällä sadetietoja, joudutaan nämä lisäämään dataan erikseen. Projektissa hyödynnettiin Ilmatieteen laitoksen sadetietoja kuluneilta vuosilta. Käytettävän vuoden valintaa varten analysoitiin sadetiedot ja lämpötilat 15 vuoden ajalta, joiden perusteella tehtiin valinta käytettävästä vuodesta sateen osalta. Ilmatieteen laitos ilmoittaa sateen määrän vetenä, ja määrä muutettiin lumeksi käyttämällä vastasataneen lumen tiheyden yhtälöä 1 [13, s. 49].

$$\rho_l = 67,9 + 51,25 * e^{\frac{T_l}{2,59}} \quad (1)$$

ρ_l on lumen tiheys (kg/m^3)

T_l on lumen lämpötila ($^{\circ}\text{C}$).

2.3 Varjostukset

Mitoitussimuloinneissa kentän ympärillä olevat varjostukset tulee ottaa huomioon. Kentän lounais- sekä länsipuolella sijaitsee havu- ja lehtipuita (kuva 4), jotka varjostavat iltaurinkoa. Eteläpuoleisen laidan puuta jouduttiin urheilukentän urakkavaiheessa karsimaan kentän ympärille tulevan lenkipolun vuoksi. Tämä vähensi varjostuksia, sekä helpotti syksyisin tekonurmen puhtaanapitoa. Puiden karsimista ei huomioitu maalämpöpumpun mitoitussimuloinneissa, mikä jättää näin ollen lisävarmuutta tuloksiin [6].



Kuva 4. Kentän länsilaidan varjostukset.

2.4 Tekonurmen hoitotapa

Lämmityksen kannalta tärkein asia kentän hoidossa on lumen poisto. Tämä johtuu lumen sulatuksen vaatimasta suuresta energiamäärästä, johon ei järjestelmän investointi- ja käyttökustannuksien kannalta ole kannattavaa lähteä. [6.] Suomen Palloliiton toteuttaman jalkapallon olosuherakentamisen ohjeistuksen mukaan kentälle tulisi jättää 2–3 cm:n paksuinen lumikerros suojaamaan tekonurmea aurauksen aiheuttamilta mekaanisilta vaurioilta [14, s. 28].

Lumen sulatukseen vaadittu energiamäärä koostuu kolmesta komponentista, mikäli kentän alapuolisiin rakenteisiin johtuva lämpö jätetään tarkastelematta (yhtälö 2) [15, s. 45].

$$q = q_t + q_i + q_s \quad (2)$$

- q_t on lumen lämpötilan nostamisen vaatima energia sulamislämpöön
- q_i on kentän pinnasta siirtyvä energia ilmaan
- q_s on lumen sulatuksen vaatima energiamäärä.

Lumen lämpötilan nostamiseen vaadittava energia saadaan yhtälöstä 3 [15, s. 45].

$$q_t = v_l * (\rho_l * C_{p,l} * (T_l - T_y) + \rho_v * C_{p,v} * (T_f - T_l)) \quad (3)$$

- v_l on lumen tilavuus (m^3)
- ρ_l on lumen tiheys (kg/m^3)
- $C_{p,l}$ on lumen ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)
- ρ_v on veden tiheys (kg/m^3)
- $C_{p,v}$ on veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK)
- T_l on lumen lämpötila ($^{\circ}C$)
- T_y on ympäristön lämpötila ($^{\circ}C$)
- T_f on vesifilmikerroksen lämpötila ($0,55^{\circ}C$).

Lumen tiheys vastasataneelle lumelle saadaan Hedstromin ja Pomeroy'n luomasta yhtälöstä 1 [13, s. 49].

Lumen sulattamiseen tarvittava energia saadaan yhtälöstä 4.

$$q_s = v_l * \rho_l * l_s \quad (4)$$

l_s on lumen sulamislämpö (kJ/kgK).

Osa lämmöstä vapautuu taivaalle säteilemällä sekä konvektiolla kentän pinnasta. Tämä voidaan laskea yhtälön 5 avulla [15, s. 46].

$$q_i = \alpha_k * (T_f - T_y) + \sigma * \varepsilon * (T_{fa}^4 - T_{ym}^4) \quad (5)$$

α_k on konvektion lämmönsiirtokerroin (kJ/m²K)

σ on Stefan-Boltzmanin vakio (5,670 W/m²(100K)⁴)

ε on pinnan emissiokerroin (0,5–1,0)

T_{fa} on vesifilmikerroksen absoluuttinen lämpötila (K)

T_{ym} on ympäröivän ilman absoluuttinen keskilämpötila (K).

Ympäröivän ilman keskilämpötilaan vaikuttaa suhteellinen kosteus sekä pilvisyysaste, se voidaan määrittää yhtälöstä 6 [15, s. 46].

$$T_{ym} = \left(T_{yp}^4 * \psi + T_{yk}^4 * (1 - \psi) \right)^{1/4} \quad (6)$$

T_{yp} on pilvisen ilman lämpötila (K)

T_{yk} on kirkkaan ilman lämpötila (K)

ψ on pilvisyysaste (0–1,0).

Lämpötila kirkkaalle ilmalle saadaan yhtälön 7 avulla [15, s. 46].

$$T_{yk} = T_y - (1,1058 * 10^3 - 7,562 * T_y + 1,333 * 10^{-2} * T_y^2 - 31,292 * f + 14,58 * f^2) \quad (7)$$

T_y on ympäristön absoluuttinen lämpötila (K)

f on ilman suhteellinen kosteus (0,00–1,00).

Lämpötila pilviselle ilmalle saadaan yhtälön 8 avulla [15, s. 47].

$$T_{yp} = T_y - 19,4 \quad (8)$$

Konvektion lämmönsiirtokerroin voidaan laskea yhtälöstä 9 [15, s. 46].

$$a_k = 0,037 * \left(\frac{\lambda_i}{L}\right) * Re_L^{0,8} * Pr^{0,33} \quad (9)$$

λ_i on ilman lämmönjohtavuus (W/mK)

L on pinnan karakteristinen mitta poikittain tuulen suuntaan (m)

Re_L on Reynoldsin luku ($v \cdot L / \nu$)

v on tuulen nopeus (m/s)

ν on ilman kinemaattinen viskositeetti (m^2/s)

Pr on Prandtlin luku ($\sim 0,7$).

Oheisten yhtälöiden perusteella -5 °C :n ulkolämpötilassa 2 cm:n lumikerroksen sulatus aiheuttaa taulukon 2 mukaiset energiakustannukset kaukolämmitteisessä kentässä, kun ei huomioida samanaikaista maaperään johtunutta lämpöä. Laskenta perustuu Keravan energian 1.9.2017 ilmoittamaan kaukolämpöenergian hintaan 67 €/MWh. Myös sulatuksen vaatima aika riippuen järjestelmän huipputehosta tulee ongelmaksi. Esimerkiksi sulatusajan ollessa 2 tuntia vaatisi se järjestelmältä $\sim 1\ 700\text{ kW}$:n mitoitusastehon.

Taulukko 2. Lumen sulatuksen aiheuttamat energiakustannukset kaukolämmitteisessä järjestelmässä (Maaperään johtunutta energiaa ei huomioituna).

Kentän koko [m ²]	Lumikerros [m]	Tarvittava energiamäärä [MJ]	Tarvittava energia [MWh]	Kustannus [€]
7700	0,02	12401	3,4	231

Tekonurmen hoito-ohjeissa lumen auraukseen käytettävältä auralta vaaditaan korkeussäätö sekä auran tulee olla valmistettu polyeteenistä tai auran reunassa tulee olla kumi-
lista [16, s. 10]. Tikkurilan urheilupuiston henkilökunta oli ratkaissut auran aiheuttaman mekaanisen rasituksen tekonurmeen modifioimalla vanhasta jääkentän aurasta kuvan 5 mukaisen ratkaisun [17].



Kuva 5. Kumilevy auran alapinnassa.

Auran alapintaan on kiinnitetty jäykkä vähän kitkaa muodostava kumilevy, joka kulkee sulavasti kentän pintaa myöten aiheuttamatta siihen vaurioita. Auroja on saatavilla myös suoraan valmistajilta laadun vaihdellessa. [17.] Lumen poistoon on joillain kentillä käytetty myös sulatusaineita. Nämä aiheuttavat kuitenkin ongelmia, jotka esiintyvät kentän käyttäjien vaatetuksen ja jalkineiden hajuna suola- ja etikkasisällöstä johtuen. [3, s. 16.]

Kentän eliniän kannalta tärkein toimenpide on tekonurmen harjaus (kuva 6) [16, s. 4]. Toimenpiteellä kumirouheen määrä pidetään tasaisena koko kentän osalta, jolloin tekonurmen nukan elinikä pysyy mahdollisimman pitkänä. Varsinkin alueet, joissa kentän kulutus on kovinta, kuten maalinedusta, tulee tarkistaa säännöllisesti. [14, s. 27.] Ulkoilman suhteellisen kosteuden ollessa korkea ja taivaan pilvetön kentän pinta säteilee voimakkaasti lämpöä avaruuteen ja pintaan muodostuu huurretta. Huurre tekee kentän pinnasta liukkaan ja se tulee poistaa harjaamalla. [18.]



Kuva 6. Tekonurmen harjauskalusto [16, s. 5].

2.5 Mitoituslämpötilat

Koska lämmönluovutusjärjestelmällä ei ole tarkoituksena sulattaa lunta, järjestelmän tehtäväksi jää rakenteen pitäminen pelikuntoisena. Tekonurmen pelattavuuden kannalta kentän lämmönluovutusjärjestelmän yläpuolisten rakenteiden tulee pysyä 0 °C:n yläpuolella, jotta rakenne säilyttää joustavuutensa eikä pääse jäätymään [19]. Kuten kaikissa ulkona pelattavissa joukkuelajeissa, urheiluseurat usein määrittävät pakkasrajan, jota kylmemmissä olosuhteissa harjoitukset perutaan. Myös palveluntarjoaja voi määrittää pakkasrajan tapauskohtaisesti ja ilmoittaa kentän pelikunnon esimerkiksi kotisivuillaan.

3 Lämmönluovutusjärjestelmä

3.1 Tekonurmialueen rakenne

Kentän rakennetta voidaan lämmitysmielessä ajatella suurena lämmönsiirtimenä, jonka vuoksi eri kerroksien ominaisuuksilla on suuri merkitys vaadittuun tehontarpeeseen ja energiankulutukseen [6]. Rakennetta valittaessa tulee kuitenkin pitää mielessä, että tarkoituksena on luoda käyttäjälle miellyttävä pelikokemus. FIFA (The International Football Association) määrittelee tekonurmikenttien ominaisuudet ja niiden testausmenetelmät.

Testien tarkoituksena on varmistaa, että läpäisseet rakenteet tarjoavat optimaaliset olosuhteet pelaajille. Tärkeimpiä testausominaisuuksia ovat pallon ja alustan välinen käyttäytyminen, sekä pelaajan jalkineen ja pelialustan välinen käyttäytyminen. [14, s. 9.]

Unisport-Saltex Oy on Pohjoismaissa toimiva tekonurmien valmistaja. Saltex toimittaa keskimäärin 45 tekonurmikenttää Suomeen vuodessa. Heidän valikoimastaan löytyy useita vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja. Saltexin tekonurmet saivat FIFA:n suosituksen vuonna 2011, ja Saltex on nyt yksi yhdeksästä FIFA:n suosittelemasta valmistajasta maailmassa. [19.] Saltexin tekonurmirakenteesta teetettiin U-arvon ja lämmönjohtavuuden kokeet vuonna 2011 Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY). Kokeissa mitattiin polyuretaanivaahtojouston, valetun jouston, hiekan sekä kumirouheen lämmönjohtavuudet. [20.]

Tekonurmen nukan sisään tuleva kumirouhe on yksi tärkeä tekijä luotaessa pelaajalle identtistä tunnetta luonnonnurmeen verrattuna. Kumirouheen ongelmana on sen kyky liikkua toistensa lomitse erittäin helposti. Tämän vuoksi kumirouheen alle laitetaan kerros hiekkaa, jota kutsutaan stabilointikerrokseksi. Stabilointikerroksen tarkoituksena on luoda alusta, jota vasten pelaaja pystyy tukeutumaan jarruttaessa kovasta vauhdista. Joustokerroksen tehtävänä on nimensä mukaisesti luoda kenttään luonnonnurmen tapaista joustavuutta ja myös säästää näin ollen tarvittavan kumirouheen määrässä. [19.] TTY:n tutkimuksen tuloksena saatiin U-arvo kolmelle eri rakenteelle; nurmi ilman joustoa (taulukko 3), nurmi valetulla joustolla (taulukko 4) ja nurmi polyuretaanivaahtojoustolla (taulukko 5) [20].

Taulukko 3. Rakenteen lämmönvastus- ja U-arvo, rakennetyyppi 1 [20, s. 16].

Rakenne 1: Nurmi ilman joustoa				
Rakennekerros	Kerroksen paksuus (m)	λ_u (W/mK)	R ((m²K)/W)	U = 1/R (W/(m²K))
Yläpinta			0,040	
Hiekka	0,01	2	0,005	
Kumirouhe	0,03	0,107	0,281	
Koko rakenne			0,33	

Taulukko 4. Rakenteen lämmönvastus- ja U-arvo, rakennetyyppi 2 [20, s. 16].

Rakenne 2: Nurmi valetulla joustolla				
Rakennekerros	Kerroksen paksuus (m)	λ_u (W/mK)	R ((m ² K)/W)	U = 1/R (W/(m ² K))
Yläpinta			0,040	
Hiekka	0,01	2	0,005	
Kumirouhe	0,015	0,107	0,140	
Valettu jousto	0,02	0,179	0,111	
Koko rakenne			0,30	3,37

Taulukko 5. Rakenteen lämmönvastus- ja U-arvo, rakennetyyppi 3 [20, s. 16].

Rakenne 3: Nurmi polyuretaanivaahtojoustolla				
Rakennekerros	Kerroksen paksuus (m)	λ_u (W/mK)	R ((m ² K)/W)	U = 1/R (W/(m ² K))
Yläpinta			0,040	
Hiekka	0,01	2	0,005	
Kumirouhe	0,015	0,107	0,140	
PU-jousto	0,014	0,152	0,092	
Koko rakenne			0,28	3,60

Testattavat materiaalit kasteltiin ennen koetta, koska lämmityskaudella kenttärakenne pysyy märkänä [19]. Kappaleiden painot mitattiin ennen ja jälkeen kastelun, jolloin voitiin määrittää niiden vesipitoisuus (taulukot 6 ja 7). Testeissä ei huomioitu mahdollista materiaalien kosteuspuutusta ennen koetta. [20, s. 6.]

Taulukko 6. Koekappaleiden vesiupotusajat, painot ennen vesiupotusta, painot vesiupotuksen jälkeen ja vesipitoisuudet. Valettu jousto. [20, s. 7.]

Koekappale	Upotusaika (vrk)	Paino ennen upotusta (g)	Paino upotuksen jälkeen (g)	Vesipitoisuus (kg/m ³)
Valettu jousto 1	34	1611,8	1794,2	83,2
Valettu jousto 2	35	1667,7	1857	83,9
Valettu jousto 3	35	1596,2	1784,8	88,5

Taulukko 7. Koekappaleiden vesipotusajat, painot ennen vesipotusta, painot vesipotuksen jälkeen ja vesipitoisuudet. Polyuretaanivaahtojousto. [20, s. 7.]

Koekappale	Upotusaika (vrk)	Paino ennen upotusta (g)	Paino upotuksen jälkeen (g)	Vesipitoisuus (kg/m ³)
PU-jousto 1	36	191,8	527,7	266,6
PU-jousto 2	37	197,2	537,2	265,3
PU-jousto 3	48	214,1	573,3	288,2

PU-joustopuun suuren vesipitoisuuden vuoksi, rakenteen 3 lämmönjohtavuus muodostuu korkeaksi. Joustokerroksen sisältämä suuri vesimäärä toimii myös lämpöpuskurina. Mikäli tekonurmea halutaan käyttää kesäaikaan maalämpöjärjestelmän lämpökaivokentän lataukseen, tulee käyttää jotain muuta rakenneratkaisua, sillä kuivana PU-jousto toimii ennemminkin lämmöneristeenä. [19.]

Lähteinä rakennekerrosten ominaisuuksille käytettiin TTY:n lämmönjohtavuuden koikeita, valmistajan tuote-esitteitä, Suomen rakentamismääräyskokoelman osaa C4 vuodelta 2013 ja sen luonnosta vuodelta 2012 [6]. Murskekerroksien vesipitoisuutena käytettiin samaa arvoa riippumatta murskeen kiviaineksen koosta, sillä hienoaineksen määrä murskeessa pysyy kutakuinkin vakiona [21].

Simulointeja varten vesipitoisuuksien vaikutus murskeen tiheyteen, ominaislämpökapasiteettiin ja lämmönjohtavuuteen laskettiin rakenneaineksen ja veden painojen suhteen painotetulla keskiarvolla. SBR-kumirouheen, hiekan ja polyuretaanivaahtojoustopuun tiheys ja ominaislämpökapasiteetti laskettiin vesipitoisuuden perusteella ja lämmönjohtavuus saatiin TTY:n raportista.

3.2 Lämmönluovutusliuos

Liuksella tarkoitetaan seosta, johon on sekoittunut kaksi tai useampi aine [22, s. 16]. Lämmönluovutusputkistossa käytettävän suuren virtaaman ja täytöksen vuoksi liuoksen valinnalla on suuret vaikutukset järjestelmän investointi- sekä käyttökustannuksiin. Liuosvalintaa tehtäessä joudutaan vaihtoehtoja tarkastelemaan kylmätekniikan, kemiantekniikan sekä LVI-tekniikan välimaastossa. Tarkasteltaessa vaihtoehtoja tulee seuraaviin liuoksen ominaisuuksiin kiinnittää huomioita [23]:

- jäätymispiste
- viskositeetti
- lämmönjohtavuus
- ominaislämpökapasiteetti
- pintajännitys
- vaahtoamistaipumus
- diffuusiotaipumus
- korroosio-ominaisuudet
- erottumiskyky
- kemiallinen stabiilius
- ympäristöystävällisyys
- saatavuus ja hinta.

Käyttöominaisuuksilla tarkoitetaan tärkeysjärjestyksessä viskositeettia, ominaislämpökapasiteettia, tiheyttä ja lämmönjohtavuutta. Taulukossa 8 on esitetty painehäviöön, lämmönkuljetuskykyyn ja lämmönsiirtoon vaikuttavat aineominaisuudet. [22, s. 22.]

Taulukko 8. Aineominaisuuksien vaikutus käytettävyyteen.

Vaikutusalue	Vaikuttavat tekijät
Painehäviö	Viskositeetti Tiheys
Lämmönkuljetuskyky	Ominaislämpökapasiteetti Tiheys
Lämmönsiirto	Viskositeetti Ominaislämpökapasiteetti Lämmönjohtavuus

Yksittäisten ominaisuuksien perusteella tehtävä vertailu muodostuu ongelmalliseksi, koska esimerkiksi tiheys vaikuttaa lämmönkuljetuskykyyn sekä painehäviöihin. Tehtäessä tarkempaa vertailua, tulee tarkastella yhtä aikaa vaadittua pumppaustehoa sekä lämmönsiirtoa. [22, s. 23.] Vertailussa haasteelliseksi osoittautui eri lähteiden eroavaisuudet aineominaisuuksissa. Tämä johtuu eroavaisuuksista inhibiittiseoksien ominaisuuksissa valmistajien välillä [22, s. 18].

Liuoksen käsittelyn tai mahdollisen vuodon yhteydessä tulee tietää myös sen terveydelliset, ympäristölliset ja ekologiset haittavaikutukset. Jotta haittavaikutuksia pystytään arvioimaan, pitää liuksesta tietää ainakin seuraavat asiat [22, s. 16]:

- toksisuus
- biologinen hajoavuus ja hajoamistuotteet
- kulkeutuminen ympäristössä
- kertyvyys eliöihin
- stabiilisuus ja reaktiivisuus.

Nämä ominaisuudet selviävät esimerkiksi työsuojeluhallinnon sivuilta löytyvistä käyttöturvallisuustiedotteista. Käyttöturvallisuustiedote sisältää tietoja ympäristöystävällisyyden lisäksi aineen ominaisuuksista ja sen tarkoitus on ihmisten turvallisuuden takaaminen ja ympäristön suojeleminen. Valmistajan, maahantuojan, jakelijan tai muun kemikaalin markkinoille saattamisesta vastaavan on laadittava käyttöturvallisuustiedote. [24.] Työssä tarkasteltiin neljää eri liuosta: propyleeniglykolia, etyleeniglykolia, kaliumformiaattia ja etyylialkoholia.

Propyleeniglykolin ($C_3H_8O_2$) haitallisuus ympäristölle ja ihmiselle on erittäin vähäistä, minkä vuoksi sitä käytetään usein varsinkin elintarviketeollisuudessa. Propyleeniglykoli on biologisesti helposti hajoava. Heikkoutena propyleeniglykolilla on sen korkea viskositeetti matalissa lämpötiloissa, joka heikentää lämmönsiirto-ominaisuuksia. [25.] Suomessa toteutetuissa tekonurmen lämmitysprojekteissa propyleeniglykoli on ollut hyvin yleinen vaihtoehto lämmönsiirtoaineena [21].

Etyleeniglykoli ($C_2H_6O_2$) on yleinen liuos järjestelmissä, joissa lämmönsiirtoliuoksen myrkyllisyydelle ei ole asetettu vaatimuksia [25]. Myös etyleeniglykoli on biologisesti helposti hajoavaa, mutta varsinkin nieltynä myrkyllistä, minkä vuoksi sen pääsemistä maaperään ja pohjaveteen tulee välttää [26].

Kaliumformiaatti (KHCO_2) eli muurahaishappo on yleinen lämmönsiirtoliuos kylmävarastojen jäädytysjärjestelmissä. Kaliumformiaatti on biologisesti helposti hajoava, mutta luokitellaan lievästi vesistöä vaarantavaksi ja sen pääsemistä pohjaveteen on vältettävä. [27.] Kaliumformiaatin etuna on sen matala viskositeetti sekä korkea lämmönjohtavuus myös matalissa käyttölämpötiloissa [28].

Etyylialkoholi ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$) eli etanoli on yleisimmin käytetty lämmönkeruuliuos lämpökaivoissa [29, s. 15]. Etanoli on biologisesti hajoava, mutta se on erittäin kulkeutuvaa ja päätyy maasta helposti pohjaveteen [30]. Etanolin matalan viskositeetin ja tiheyden vuoksi sen pumpattavuus on hyvä, mutta matala höyrynpaine tulee huomioida kavitoinnin välttämiseksi pumpuissa.

Yksi yleisesti yritysmaailmassa käytössä oleva tapa on tehdä SWOT-analyysi (nelikenttäanalyysi) eri vaihtoehtoista [31]. Tehtäessä SWOT-analyysi eri liuoksille, voidaan hyvin nopeasti karsia pois vaihtoehdot, jotka eivät tule kyseeseen. Työssä tehtiin SWOT-analyysi kolmelle eri liuokselle: propyleeniglykoli, kaliumformiaatti sekä etanoli. Etyleeniglykolia ei alettu tarkastelemaan vaihtoehtona sen ympäristöhaitallisuuden vuoksi. Liuoksien aineominaisuuksien vertailu tehtiin pitoisuuksilla, joilla saavutettiin jäätymispistevaatimus -25 °C .

3.3 Lämmönlvovutusputkisto

Lämmönlvovutusputkistolla tarkoitetaan tässä yhteydessä tekonurmen alapuolella kulkevia lämmitysputkia, joiden tehtävänä on pitää rakenteet sulana ja pelikuntoisena. Putkina käytetään yleisesti muovisia SDR11-luokan PE-paineputkia, jotka vastaavat paineenkestoltaan PN10-luokan putkea. SDR-luokituksella tarkoitetaan putken ulkohalkaisijan suhdetta seinämävahvuuteen. [21.]

Putkiston asentaminen maaperään tapahtuu traktorin perään kiinnitettävän auran avulla, josta muoviputkea syötetään kelalta laitteen tekemään uraan. Vaihtoehtoisesti asennus voidaan tehdä käyttäen kuvassa 7 näkyvää kappaa, jolloin asennusväli tulee automaattisesti tarkaksi. Mikäli asennus toteutetaan auraamalla, tulee laite olla kalibroitu tarkasti, jotta putkien asennussyvyys pysyy vakiona. Asennuksen jälkeen putkisto tulee paineistaa ilmalla 300 kPa:n paineeseen, jotta kentän tasaamisen yhteydessä putkisto ei pääse painumaan kasaan. [21.]



Kuva 7. Espoon urheilupuiston tekojääradan putkiston kampa.

3.4 Putkiston lämmönsiirto

Kuten lattialämmityksessä, myös tekonurmen lämmönluovutusputkistossa asennusvälin tulee olla sopiva, jotta lämmönjako on tasaista. Tämä taas riippuu putkien upotussyvyydestä sekä kentän rakenteista ja niiden aiheuttamista lämmönvastuksista. Yleisesti käytetty asennusväli on 200mm.

Toisin kuin tason läpi, putken läpi ja sen ympärillä tapahtuva lämmön johtuminen on logaritmista ja noudattaa yhtälöä 10. [32, s. 213.]

$$\Phi' = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{sp} \cdot \pi \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_n} \cdot \ln \frac{d_n}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{up} \cdot \pi \cdot d_n}} \cdot (t_1 - t_n) = U' \cdot (t_1 - t_n) \quad (10)$$

Φ' on putken lämmönsiirto (W/m)

α_{sp} on putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin (W/m²K)

λ_1 on putkimateriaalin lämmönjohtavuus (W/mK)

d_1 on putken sisähalkaisija (m)

d_2 on putken ulkohalkaisija (m)

d_n on rakenteen n ulkohalkaisija (m)

λ_n on rakenteen n lämmönjohtavuus (W/mK)

α_p on putken ulkopuolinen lämmönsiirtokerroin (W/m²K)

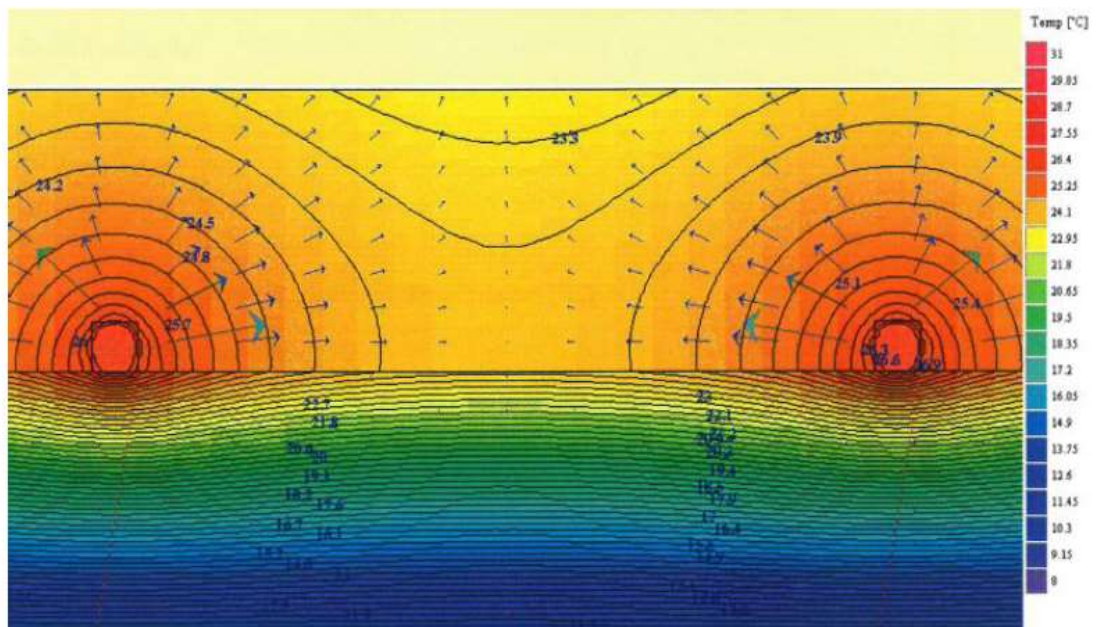
t_1 on liuoksen lämpötila (°C)

t_n on lämpötila kohdassa n (°C)

U' on putken ja ympäröivän aineksen U-arvo (W/mK).

Yhtälö pätee vain tilanteissa, joissa lämmönvastukset ovat symmetriset kaikkiin suuntiin. Maahan upotetuille putkille laskenta monimutkaistuu, koska lämmönvastukset eivät ole symmetriset, jolloin lämpötilakenttä on kuvan 8 mukaisesti kaksiuolotteinen ja noudattaa Laplace-yhtälöä (yhtälö 11). [32, s. 215.]

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (11)$$



Kuva 8. Lämpötilan jakautuminen eristeen yläpintaan asennetuista lämmitysputkista betonisessa lattiarakenteessa [33].

Maahan asennetuilla putkilla lämmön siirtymistä vastustaa putken- sekä maaperän lämmönvastukset. Määrittäessä putken lämmönvastusta joudutaan selvittämään putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin (α_s), joka on riippuvainen useasta tekijästä. Yksi suuresti vaikuttava asia on virtauksen luonne, joka määritetään Reynoldsin luvun perusteella (yhtälö 12 ja yhtälö 13).

$$Re = \frac{d_h * v}{\nu} \quad (12)$$

d_h on putken hydraulinen halkaisija (m)

v on virtausnopeus (m/s)

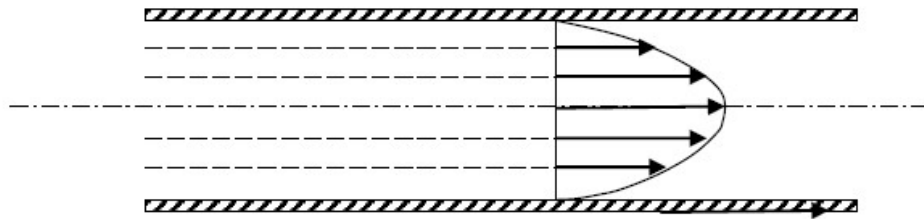
ν on liuoksen kinemaattinen viskositeetti (m^2/s).

$$v = \frac{\eta}{\rho} (13)$$

ρ on liuoksen tiheys (kg/m^3)

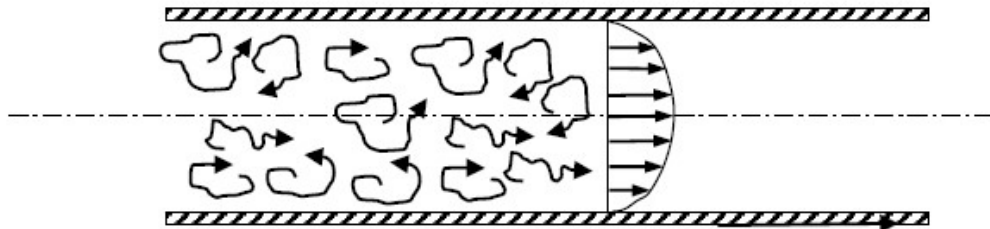
η on liuoksen dynaaminen viskositeetti ($Pa*s$).

Kuten yhtälöstä 12 nähdään, virtauksen luonteeseen voidaan vaikuttaa putkikoon valinnalla, virtausnopeudella sekä liuos valinnalla. Putkiston päävirtaustyyppiä on kahdenlaista; laminaarista ja turbulენტtista.



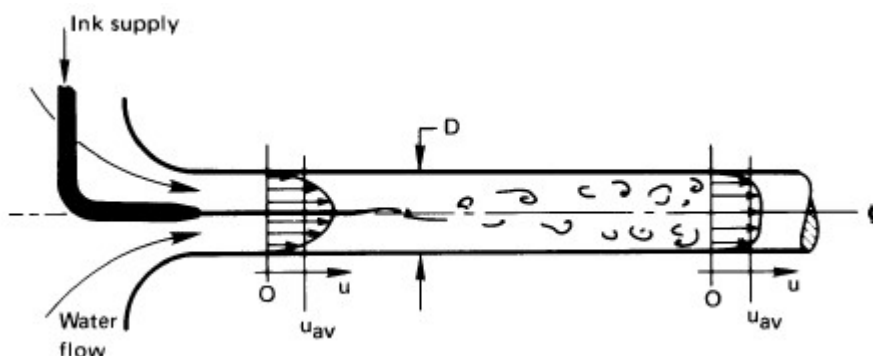
Kuva 9. Laminaarisen virtauksen nopeusprofiili [34].

Laminaarisessa virtauksessa partikkelit eivät törmäile keskenään vaan kulkevat virtaus-suunnassa kohtisuoria linjoja myöten kuvan 9 mukaisesti [34].



Kuva 10. Turbulenttisen virtauksen nopeusprofiili [34].

Turbulenttisisessa virtauksessa partikkelit liikkuvat satunnaisesti kuvan 10 mukaisesti törmäillen toisiinsa ja näin ollen sekoittuvat laminaarisesta virtausta paremmin [34].



Kuva 11. Testimenetelmä laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen siirtymäalueen määrittämiseen [35, s. 274].

Laminaarisen ja turbulenttisen virtauksen siirtymäalueen määrittänyt irlantilainen tiedemies Osborne Reynolds syöttämällä mustetta putkessa virtaavaan veteen kuvan 11 mukaisella menetelmällä. Reynolds huomasi, että tietyn virtausnopeuden saavuttamisen jälkeen mustetta sisältävä virtauselementti sekoittui muiden elementtien kanssa. [35, s. 274.] Ylin Reynoldsin luvun raja, jossa virtaus palautuu häiriöiden, esimerkiksi putken mutkan jälkeen takaisin laminaariseksi on 2 320. Riippuen lähteestä virtaus voidaan olettaa putkessa täysin turbulenttiseksi Reynoldsin luvun ollessa 3 000–4 000. Väliä 2 320–3 000 kutsutaan siirtymäalueeksi, jossa virtauksen käyttäytyminen on epämääräistä ja ei häiriöiden jälkeen palaudu enää laminaariseksi. [34.]

Lämpö siirtyy liuoksesta putken seinämään niiden välisessä rajapinnassa, joten tätä tulee tarkastella. Koska putken ja liuoksen välillä on kitkaa, virtausnopeus putken seinämän vieressä lähentelee nollaa ja vastaavasti tietyllä etäisyydellä seinämästä saavutetaan vapaan virtauksen nopeus. Lämmönsiirtotekniikassa näiden välistä etäisyyttä kutsutaan rajakerroksen paksuudeksi, jonka nimesi saksalainen insinööri Ludwig Prandtl. Mitä paksumpi tämä rajakerros on, sitä huonompi lämmönsiirtokerroin saavutetaan. [35, s. 272.]

Putken sisäpuoliseen lämmönsiirtokerroimeen pääsemiseksi joudutaan määrittämään Nusseltin luku. Luku on dimensioton ja sai nimensä Wilhelm Nusseltin mukaan. Nusseltin luku kuvastaa konvektio- ja johtumislämmönsiirron suhdetta. Luku on kääntäen ver-

rannollinen rajakerroksen paksuuteen. [35, s. 277.] Jotta tämä voidaan määrittää, tarvitaan tilanteeseen sopiva korrelaatioyhtälö, joita löytyy lämmönsiirtoa käsittelevistä oppikirjoista.

Putkessa tapahtuvan suunnanmuutoksen jälkeen virtaus pyörteilee myös Reynoldsin luvun ollessa alle 2320, jolloin rajakerroksen paksuus on pieni. Suunnanmuutoksen jälkeen virtaus alkaa tasaantua ja rajakerroksen paksuus kasvaa. Kun rajakerroksen paksuus ei enää kasva, kutsutaan virtausta täysin kehittyneeksi. [35, s. 348.] Tässä esitettävät Nusseltin luvun laskentayhtälöt pätevät täysin kehittyneelle putkivirtaukselle. Laminarisen virtauksen Nusseltin luku saadaan yhtälön 14 mukaisesti [35, s. 351].

$$Nu = \frac{48}{11} = 4,364 \quad (14)$$

Turbulenttisessa virtauksessa Nusseltin luvun laskentaan tarvitaan myös kitkakerroin sekä Prandtin luku, kitkakertoimen määrittäminen käsitellään luvussa 3.5. Prandtin luku riippuu vain aineominaisuuksista, ja se kuvastaa liuoksen diffuusio-ominaisuuksia; liuoksen liikkuvuuden ja termisen diffuusion suhdetta yhtälön 15 mukaisesti. [35, s. 301.]

$$Pr = \frac{\mu * Cp}{\lambda} \quad (15)$$

C_p on liuoksen ominaislämpökapasiteetti (J/kg°C)

μ on liuoksen dynaaminen viskositeetti (kg/ms)

λ on liuoksen lämmönjohtavuus (W/mK).

Reynoldsin luvun ollessa välillä $2300 - 5 \times 10^6$ voidaan Nusseltin luku laskea yhtälön 16 (Gnielinski) avulla sileissä putkissa [35, s. 362].

$$Nu = \frac{\frac{\lambda}{8} * (Re - 1000) * Pr}{1 + 12,7 * \sqrt{\frac{\lambda}{8} * (Pr - 1)}} \quad (16)$$

λ on putken kitkakerroin

Re on Reynoldsin luku

Pr on Prandtin luku.

Viimein voidaan määrittää putken sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin yhtälön 17 avulla.

$$as = \frac{\lambda}{d} * Nu \quad (17)$$

λ on liuoksen lämmönjohtavuus (W/mK)

d on putken sisähalkaisija (m).

Vaikka virtauksen laminaarisuudella putken lämmönsiirto kärsii hieman, ei se lämmönluovutusputkiston pituudesta johtuen ole välttämättä huono asia. Tasaisen lämmönjaon kannalta putkistoon menevän ja palaavan liuoksen lämpötilaeron tulee olla pieni. Mikäli putkisto luovuttaa lämpöä hyvin voimakkaasti, myös liuoksen lämpötila laskee nopeasti yhtälön 18 mukaisesti [36]. Yhtälö pätee vain tilanteissa, joissa lämmönvastukset ovat identtiset kaikkiin suuntiin. Kaukolämmiteisissä kentissä kyseinen ongelma on ratkaistu käyttämällä korkeita lämpötiloja, mutta tuotettaessa lämmitysenergia maalämpöpumpulla ei tämä ole kannattavaa [6].

$$tsl = tn + (tsa - tn) * e^{-\frac{U'}{C} * l} \quad (18)$$

tsl on liuoksen loppulämpötila (°C)

tn on lämpötila kohdassa n (°C)

tsa on liuoksen alkulämpötila (°C)

U' on putken ja ympäröivän aineksen U -arvo (W/mK)

C on kapasiteettivirta (J/s*K)

l on putken pituus (m).

Koska olosuhteet lämmitystilanteessa muuttuvat jatkuvasti, ei käsin laskenta tule kysymykseen tehontarpeen määrittämisessä, vaan joudutaan tukeutumaan dynaamiseen simulointiin.

3.5 Putkiston painehäviöt

Putkien halkaisijan valinta vaikuttaa suuresti painehäviöihin sekä lämmönsiirtoon. Virtausvastuksia on kahdenlaisia; kitkavastuksia ja kertavastuksia. Suoran putken kitkapainehäviö voidaan laskea yhtälön 19 mukaisesti [34].

$$\Delta p \lambda = \lambda * \frac{l}{ds} * \frac{1}{2} \rho v^2 = \lambda * \frac{l}{ds} * pd \quad (19)$$

Δp_λ on putken painehäviö (Pa)

λ on putken kitkakerroin

l on putken pituus (m)

d_s on putken sisähalkaisija (m)

ρ on virtaavan aineen tiheys (kg/m^3)

v on virtausnopeus (m/s)

p_d on dynaaminen paine (Pa).

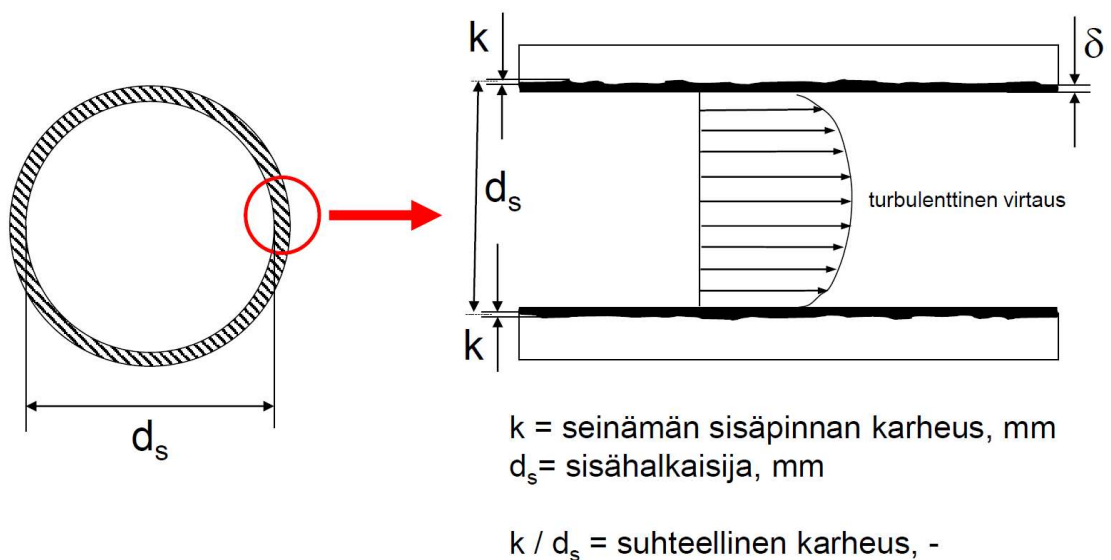
Kitkakerroin voidaan määrittää Moodyn diagrammin avulla (liite 1) tai laskemalla.

Laminaarisen virtauksen kitkakerroin saadaan yhtälöstä 20 [34].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (20)$$

Turbulentissa virtauksessa putken kitkakertoimeen vaikuttava tekijä Reynoldsin luvun lisäksi on suhteellinen karheus (kuva 12). Kitkavastuskertoimen kaavat jaetaan kolmen eri karheustyyppin perusteella. [34.]

- Hydraulisesti sileä ($Re \cdot k/d_s < 65$)
- Hydraulisesti karhea ($Re \cdot k/d_s > 1\,300$)
- Karhean ja sileän välillä ($65 < Re \cdot k/d_s < 1\,300$).



Kuva 12. Putken suhteellisen karheuden määrittäminen [34].

Taulukossa 9 yleisesti käytettyjä putkien karheuskertoimia. Muoviteollisuus RY:n julkaisemassa Paineputkijärjestelmät Polyeteenistä-teoksessa muoviputken karheuskertoimiksi on ohjeistettu käyttämään arvoa 0,01 mm, kun putken halkaisija ≤ 200 mm, ja arvoa 0,05, kun halkaisija > 200 mm [37, s. 9].

Taulukko 9. Putkien karheuksia [34].

Putkityyppi	Karheus
Vedetty kupariputki	0,0015–0,01
Teräsputki, valssattu	0,01–0,05
Teräsputki, sinkitty	0,1–0,16
Muoviputket	0,0015–0,007
Betoniputket	0,1–3,0

Hydraulisesti sileällä alueella kitkakertoimen määrittämiseen pätee kolme yhtälöä, riippuen Reynoldsin luvusta [34].

- Blasius ($2320 < Re < 10^5$)
- Nikuradse ($10^5 < Re < 10^6$)
- Prandtl-Karman ($Re > 10^6$).

Lämmitysjärjestelmissä joissa käytetään sileäpintaista putkea, pärjätään yleensä saksalaisen Paul Richard Heinrich Blasiuksen luomalla yhtälöllä kitkakertoimen määrittämisessä (yhtälö 21) [34].

$$\lambda = 0,3164 * Re^{-0,25} \quad (21)$$

Laskennassa voidaan käyttää myös usein LVI-tekniikassa esiintyvää Prandtl-Colebrookin yhtälöä 22, joka ottaa huomioon putken suhteellisen karheuden [34]. Kaavojen välillä ei käytettäessä muoviputkea saavuteta juurikaan eroja laskentatuloksessa. Putken suhteellisen karheuden noustessa Prandtl-Colebrookin yhtälö antaa suurempia kitkakertoimen arvoja kuin Blasiuksen yhtälö. Liitteessä 2 vertailu painehäviölaskennasta laskentayhtälöiden välillä eri virtaamilla ja putken karheuksilla. Laskennassa putken sisähalkaisijat ovat 176 mm ja 20,4 mm, ja käytettävä liuos on 41 painoprosentin propyleeniglykolia +20 °C:n lämpötilassa.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \lg \left[\frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{\frac{k}{d_s}}{3,71} \right] \quad (22)$$

Kitkahäviöiden lisäksi putkistoissa tapahtuu kertavastushäviöitä suunnanmuutoksista ja komponenteista johtuen. Kertavastushäviöt lasketaan yhtälön 23 mukaisesti. [34.]

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta * \frac{1}{2} \rho v^2 = \zeta * p_d \quad (23)$$

Δp_{ζ} on kertavastuksen aiheuttama painehäviö (Pa)

ζ on kertavastuskerroin.

Kertavastuskertoimen arvoja eri komponenteille löytyy käsikirjoista. Lämmitysjärjestelmissä kertavastuksien aiheuttamat painehäviöt putken suunnan muutoksissa ja haaroissa eivät ole kovinkaan merkittävässä roolissa järjestelmän kokonaispainehäviöitä määritettäessä. Tämä johtuu matalasta virtausnopeudesta, jolloin myös dynaaminen paine on matala. [34.] Lämmönluovutusputkiston minimivirtausnopeutena on syytä pitää kuitenkin 0,3 m/s, jolloin putkistossa olevat kaasukuplat liikkuvat virtauksen mukana [32, s. 147]. Luvussa 3.6 käsitellään tarkemmin kaasun käyttäytymistä putkistoissa. Kertavastuksien aiheuttamat häviöt tulee huomioida suuremmissa jakojohdoissa ja lämmönjakohuoneen putkistoissa sekä venttiileissä, joissa dynaaminen paine kasvaa suuremmaksi.

3.6 Putkiston ilmaaminen

Tekonurmen lämmityksissä on havaittu ongelmia tasaisen lämmönjaon saavuttamisessa. Yhtenä syynä on ollut kiertopiireihin jäänyt ilma, jota ei ole saatu järjestelmästä pois. [21.] Järjestelmään jäänyt ilma aiheuttaa heikentyneen lämmönjaon lisäksi korroosiota sekä järjestelmän likaantumista [38, s. 17].

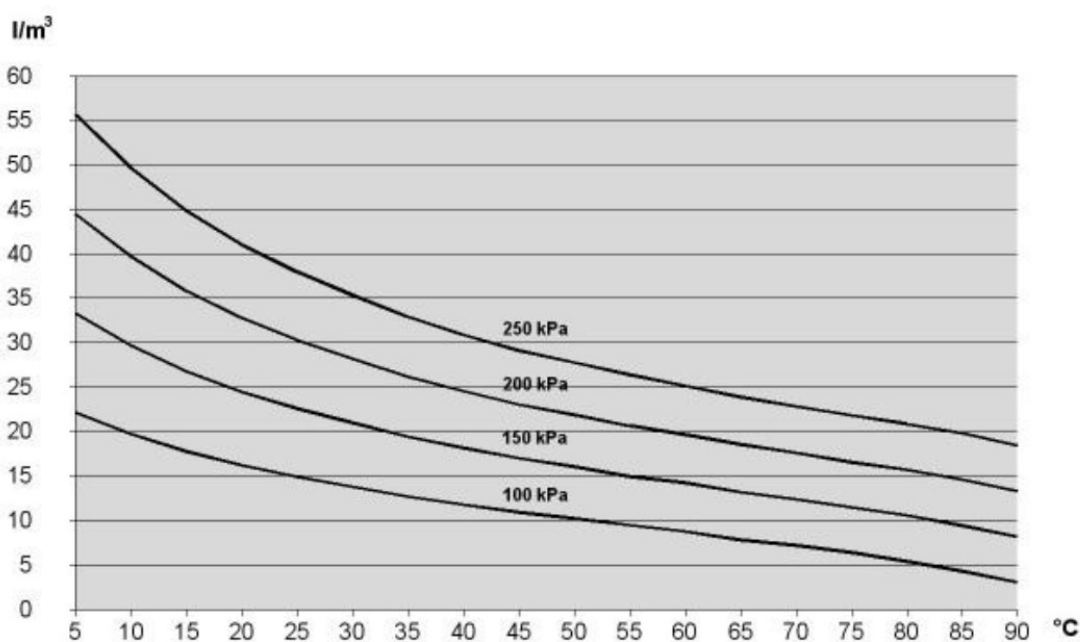
Ilmakehässä on noin 78 % typpeä (N₂) ja 21 % happea (O₂). Näiden kertyminen veteen noudattaa Henryn lakia, yhtälö 24 [39, s.17].

$$x = p_d/H \quad (24)$$

x on liuenneen kaasun mooliosuus

p_d on nesteen pinnalla olevan kaasun paine (Pa)

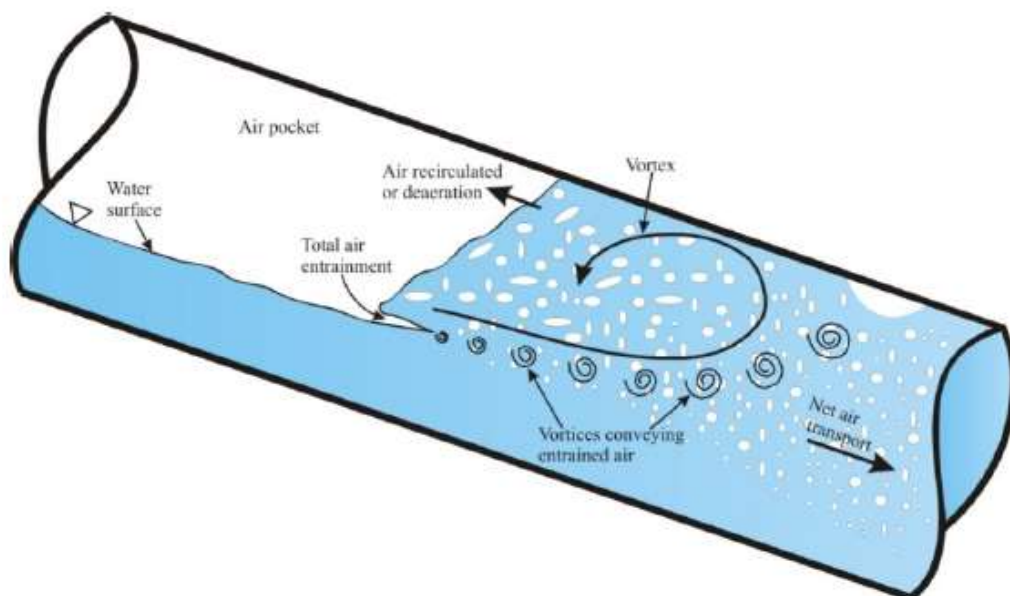
H on Henryn vakio (Pa).



Kuva 13. Veden typpipitoisuus eri lämpötiloissa ja paineissa [39, s. 30].

Kuten kuvasta 13 nähdään, verkostoissa joissa käyttölämpötilat ovat matalat, voi kaasujen määrä nesteessä olla korkeampi. Paineita laskiessa ja/tai lämpötilaa nostaessa kaasupitoisuus laskee, johon alipaineilmanpoistimien toiminta perustuu [40, s. 10].

Verkostoissa oleva kaasu voi jäädä putkistoon kaasutaskuksi ja näin muodostaa kierto-ongelmia. Kaasutaskujen poistaminen voi tapahtua kahdella tavalla, joko tasku tai kupla liikkuu kokonaisuina virtauksen mukana, tai taskun jälkeinen turbulenttinen virtausosio indusoi kaasuja pienempinä kuplina mukaansa kuvan 14 mukaisesti. [41, s. 1.]



Kuva 14. Kaasujen indusoituminen kaasutaskun jälkeiseen virtaukseen [41, s. 2].

Tutkimukset ovat osoittaneet, että kaasukuplien ja -taskujen liikuttamiseen putkistoissa vaikuttaa liuksen pintajännitys, Reynoldsin luku, putken asennuskulma vaakatasoon nähden sekä Frouden luku [42, s. 69]. Frouden luku (yhtälö 25) kuvastaa virtauksen inertiaivoiman ja painovoiman suhdetta [43, s.28].

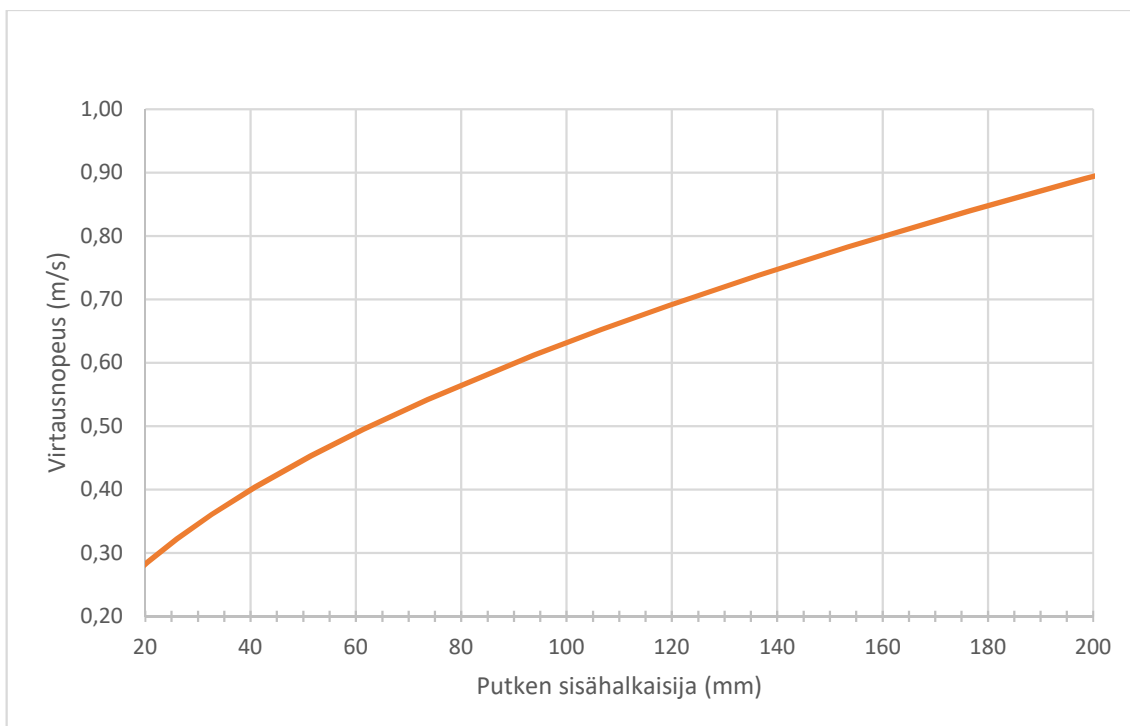
$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (25)$$

v on virtausnopeus (m/s)

g on gravitaatiovakio (9,81m/s²)

D on putken sisähalkaisija (m).

Frouden luvun ollessa $>0,638$ kaasujen on tutkittu liikkuvan vesijohtoverkoissa virtauksen mukana myös putkien ollessa laskulla virtaussuuntaan [42, s. 45]. Myös Richard A. Beierin koostamassa kaaviossa vaaditusta Frouden luvusta putken kaltevuuden funktiona oli päädytty suuruusluokaltaan samanlaisiin arvoihin [44, s. 15]. Kuva 15 esittää virtausnopeudet putken sisähalkaisijan funktiona Frouden luvun ollessa 0,638.



Kuva 15. Vaadittu virtausnopeus kaasujen liikuttamiseksi virtaussuuntaan laskevissa putkistoissa.

Mikäli tekonurmen lämmitystä ajetaan osatehoilla, tulee selvittää minimivirtausnopeudet kyseisissä olosuhteissa kierto-ongelmien välttämiseksi [45].

3.7 Siirtoputket

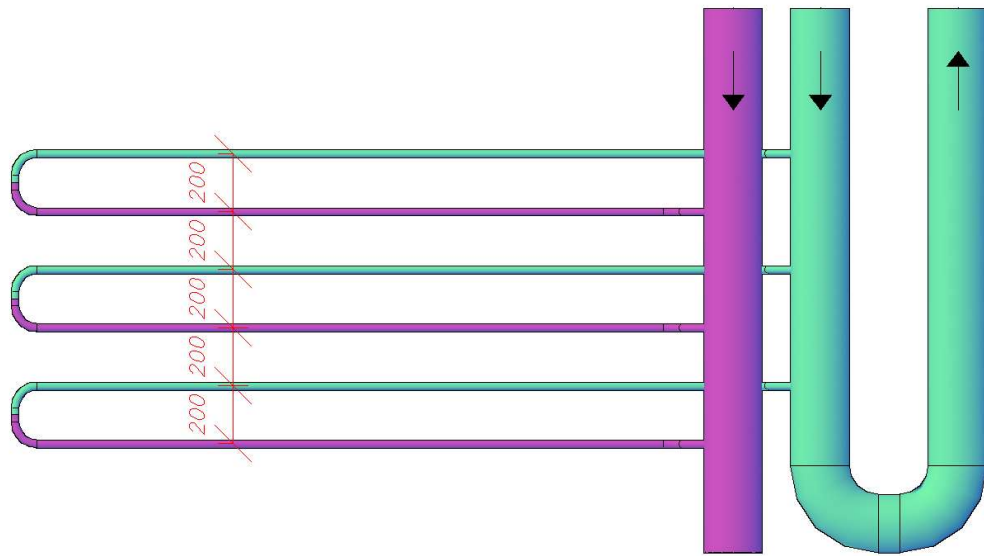
Siirtoputkilla tarkoitetaan tässä yhteydessä lämmönjakokeskukselta tulevia syöttöputkia sekä jakotukkeja. Putkina käytetään kenttälämmitys ja -jäädytysjärjestelmissä tyypillisesti muovisia esieristettyjä PEH-putkia (kuva 16). [6.] Siirtoputken koon valintaa ohjaa osittain virtausnopeus eroosiokorroosion vuoksi. Riippuen liitintyyppistä, muoviputkissa ei tulisi ylittää virtausnopeutta 3 m/s. [32, s. 147.] Siirtoputkien painehäviöt lasketaan, kuten luvussa 3.5 esitetty.



Kuva 16. Kiinnivaahdotettu PEH-siirtoputki Söderkullan urheilukentällä.

Siirtoputkien paineluokka määräytyy yleensä putkistossa virtaavan liuoksen käyttöpaineen perusteella. Mikäli putkia asennetaan liikennealueille, tulee tämä ottaa huomioon paineluokkaa valittaessa sekä myös putkien minimipeitesyvyys 1 m. [46, s. 31–32.] Urheilukentän alueella peitesyvyyden ollessa vähintään 400 mm voidaan käyttää SDR17 luokan siirtoputkea [47].

Kuten lattialämmityksessä, myös tekonurmen lämmityksessä käytetään jakotukkeja. Toisin kuin lattialämmitysjärjestelmässä, tekonurmen lämmityksessä kiertopiirien määrä on huomattavasti suurempi; Söderkullan kentässä 175 kiertopiiriä. Jotta vältetään suurelta määrältä säätölaitteita, joudutaan lämmityspotkisto tekemään itsestään tasapainottavaksi hyödyntäen käännettyä paluuta (kuva 17). [6.] Tekonurmen lämmitysjärjestelmien lisäksi käännettyä paluuta hyödynnetään muun muassa aurinkokeräimissä ja patteriverkostoissa. Jakotukkien materiaalina käytetään yleensä muovia, jolloin kaikki liitokset voidaan tehdä hitsaamalla mukaan lukien haaroitukset [21].



Kuva 17. Käännetyn paluun periaate tekconurmen lämmityksessä, virtaus nuolien suuntaisesti.

Perinteisen kaksiputkijärjestelmän sijaan käännettyä paluuta käytettäessä asennetaan kaksi paluuputkea, jolloin jokaiselle kiertopiirille saadaan yhtä vaikea virtausreitti ja näin ollen ne tasapainottuvat keskenään. Haittapuolena kytkentätavassa on, että runkojohtojen koko kasvaa perinteistä kaksiputkijärjestelmää suuremmaksi. [32, s. 122.]

Jakotukkien sijoitusperiaate tulee miettiä tarkoin ja hyvissä ajoin, jotta niiden tilantarve pystytään huomioimaan muussa suunnittelussa. Sijoituksen osalta tulee miettiä, sijoitetaanko jakotukit kentän pitkälle sivulle, kentän pätyyn vai kenties kentän molempiin pätyihin. Taulukossa 10 esitetään vaihtoehtojen vahvuudet ja heikkoudet.

Taulukko 10. Sijoitusvaihtoehtojen vahvuudet ja heikkoudet.

Jakotukit kentän pitkällä sivulla	Jakotukit kentän toisessa päässä	Jakotukit kentän molemmissa päissä
Vahvuudet		
Painehäviöt	Materiaalikustannukset	Painehäviöt
Tasaisempi lämmönjako		Tasaisempi lämmönjako
		Mahdollisuus lämmitää 1/2 kenttää
Heikkoudet		
Materiaalikustannukset	Painehäviöt	Materiaalikustannukset

Toinen ratkaistava asia sijoituksessa on jakotukkien korkeusasema, tämä myös osittain ohjaa taulukon 10 vaihtoehtoja. Yleinen tapa jakotukkien sijoituksessa on ollut niiden upottaminen kentän rakenteisiin kuvan 18 mukaisesti.



Kuva 18. Espoon urheilupuiston tekojääradan jakotukkiratkaisu.

Jakotukkien upottamisella kentän pinnan alapuolelle saavutetaan kustannuksiltaan edullisempi ratkaisu, mutta tämä voi johtaa ilmausongelmiin lämmönluovutusputkiston ollessa ylimmällä kohtaa.

Jotta putkisto tasapainottuisi ilman ongelmia, on jakotukin putkikoko yksinkertaista pitää kauttaaltaan saman kokoisena. Jakotukin putkikoko on mahdollista myös supistaa, mutta supistuksien tulee tapahtua virtaaman perusteella identtisissä kohtaa meno- ja paluuputkessa. Tämä aiheuttaa tarpeettoman riskin asennusvirheelle suhteessa materiaalikuluista saatavaan säästöön. [6.]

3.8 Lämpölaajeneminen

Järjestelmissä joissa syntyy suurta lämpötilojen vaihtelua, tulee putkiston lämpölaajeneminen ottaa huomioon. Erityisesti muoviputkea käytettäessä tämä on tärkeää muovin suuren lämpölaajenemiskertoimen vuoksi. PE-putkille lämpölaajenemiskertoimena voidaan laskennassa käyttää arvoa 0,16–0,18 mm/m°C. [37, s. 23.]

Asennettaessa putket maahan ympäröivän maa-aineksen kitka riittää tavallisesti kattamaan lämpölaajenemisen voimat. Suurilla putkilla kulmakohdat tulee kuitenkin ankkuroida tiiviisti pakatulla kitkamateriaalilla. Tiivistämisaste tulee kulma- ja haarakohdissa olla > 90 % modifioitu proctor, tiivistämisasteen mittausmenetelmä on kuvattu standardissa SFS-EN 13286-2. [37, s. 22.]

Kun putkistot asennetaan maanpintaan, on kannattavaa suunnitella ne hyödyntämällä luonnollista kompensointia lämpölaajenemisessa, kuten suunnanmuutoksia riittävän tiheästi. Suunnanmuutoksien ja paisuntakaarien käyttö vaatii kuitenkin suuren tilavarauksen riippuen putkien koosta ja lämpölaajenemisen suuruudesta. Muoviputkille voidaan käyttää yhtälöä 26 [48, s. 2].

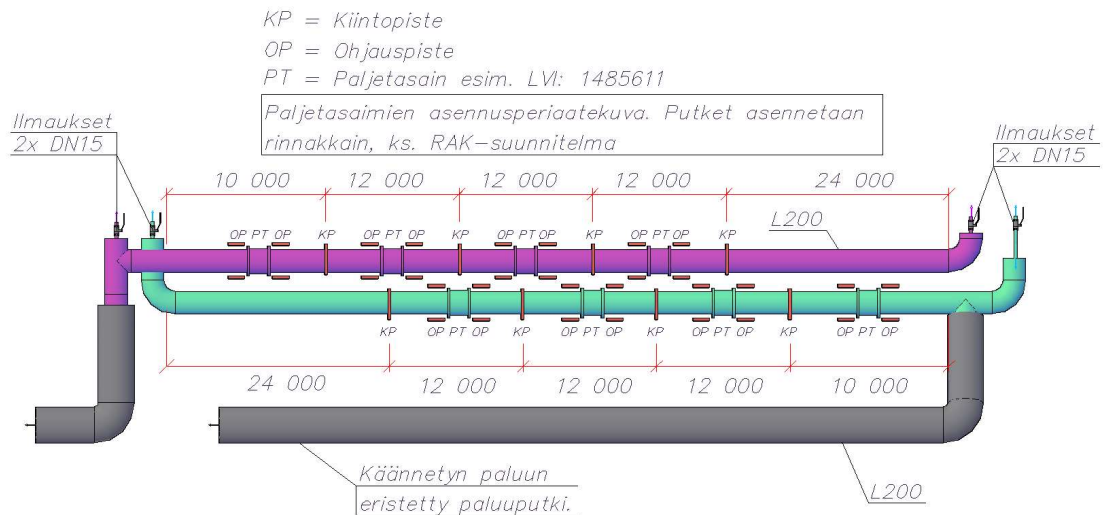
$$b = 32 * \sqrt{\Delta l * D} \quad (26)$$

- b on paisunnan vastaanottavan varren pituus (mm)
- Δl on lämpölaajeneminen (mm)
- D on putken ulkohalkaisija (mm).

Vaihtoehtoisiksi jää usein vapaan varren hyödyntäminen [49, s. 78], paljetasaimien käyttö tai näiden yhdistelmä. Söderkullan kentässä hyödynnettiin paljetasaimia riittävällä jaolla, jolloin jakotukista kenttään lähtevien lämmönluovutusputkien vapaan varren mitta riitti kattamaan jakotukissa tapahtuvan lämpölaajenemisen. Kuvassa 19 on esitetty paljetasain ja kuvassa 20 jakotukin lämpölaajenemisen kompensointiperiaate.

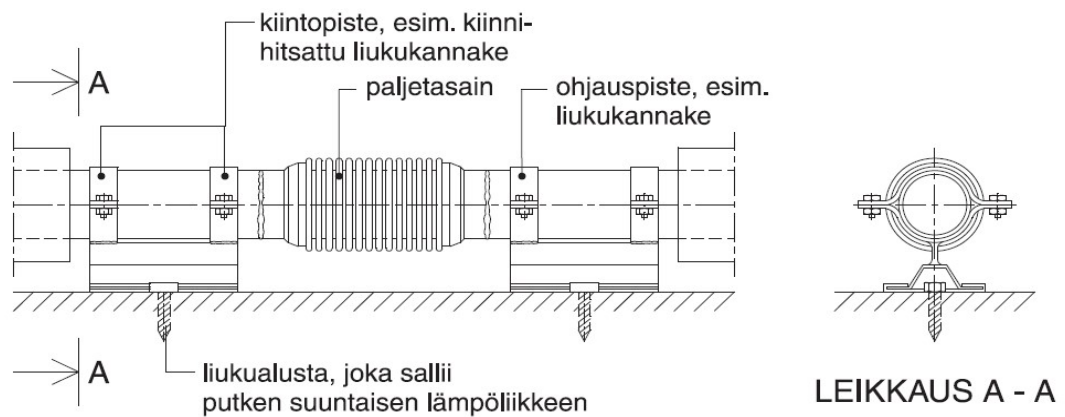


Kuva 19. Kumipaljetasain [50].



Kuva 20. Lämpölaajenemisen kompensoinnin periaatekuva Söderkullan urheilukentässä.

Jakotukin kannakointi tulee tehdä ohjauspisteiden avulla, jotta lämpölaajenemisen voimat saadaan kohdistumaan paljetasaimen suuntaisesti. Kannakointi voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvan 21 mukaisesti.



Kuva 21. Ohjaus- ja kiintopistekannakkeiden toteutusperiaate [48, s. 4].

Putken lämpölaajeneminen voidaan laskea yhtälön 27 avulla [48, s. 1].

$$\Delta l = \Delta T * \alpha * L \quad (27)$$

Δl on lämpölaajeneminen (m)

ΔT on lämpötilaero (°C)

α on putkimateriaalin lämpölaajenemiskerroin (m/m°C)

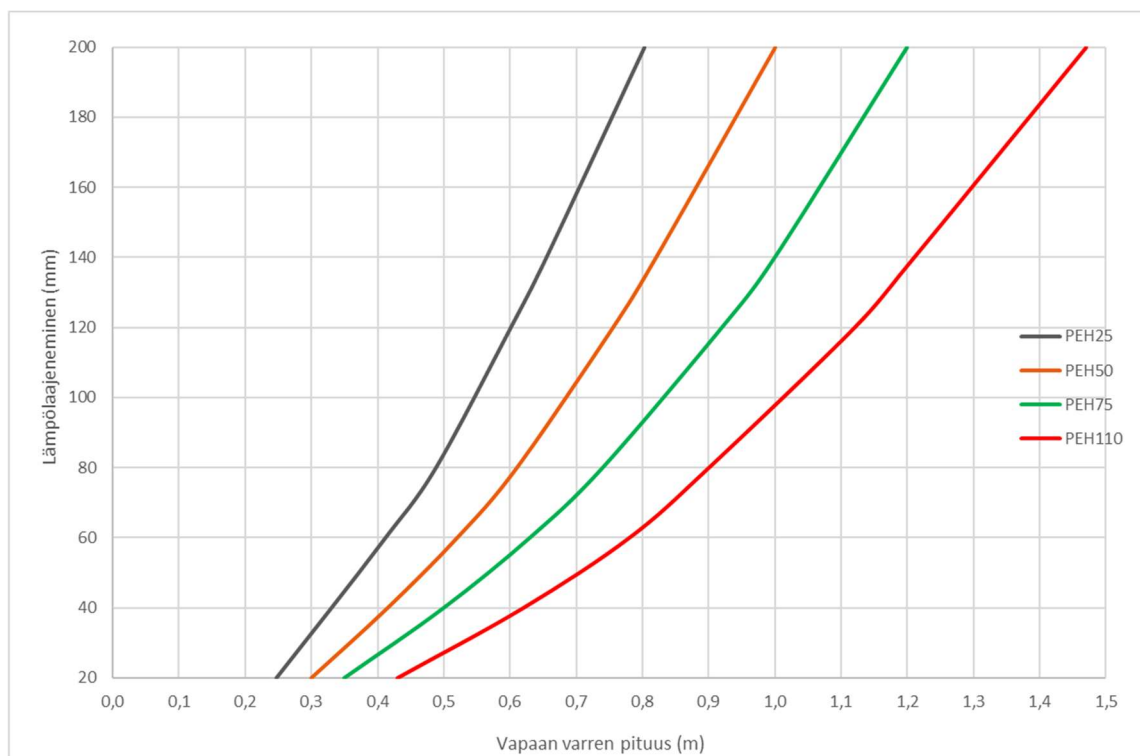
L on putkipituus (m).

Lämpölaajenemisen laskennassa käytetty lämpötilaero oli 20 °C, vaihteluvälin ollessa –5 °C...+15 °C, jolloin kokonaislaajeneminen on taulukon 11 mukainen.

Taulukko 11. Jakotukin lämpölaajeneminen.

Selite		Yksikkö
PE-muovin lämpölaajenemiskerroin	0,00018	m/m°C
Jakotukin pituus	70	m
ΔT	20	°C
Jakotukin lämpölaajeneminen	0,252	m

Jakotukin sijoituksen johdosta lämmönluovutusputkien vapaa varsi saatiin 0,5 metriä pitkäksi, jonka avulla voitiin selvittää, kuinka paljon jakotukin lämpölaajeneminen kyseisellä liikkumavaralla voi olla. Kuva 22 on luotu ”Ledningsbyggande med plaströrssystem” opista [49, s. 78] lineaarisesti ekstrapoloimalla PEH25-putken arvot.



Kuva 22. Vaaditun vapaan varren pituus lämpölaajenemisen perusteella.

Kuvan 22 perusteella 0,5 m vapaalla varrella PEH25-putkessa jakotukin lämpölaajeneminen voi olla noin 90 mm. 20 °C:n lämpötilan vaihtelulla ensimmäinen kiintopiste voitiin sijoittaa 24 metrin etäisyydelle jakotukin päästä. Jäljelle jäävä 46 m hoidettiin paljetasaimilla.

Kohteeseen suunniteltujen paljetasaimien kokonaisvenymä DN200-kokoluokassa oli 40 mm, puristuksen ollessa 25 mm ja venytyksen 15 mm. Urakoitsijaa veloitettiin ajamaan putkisto +7 °C:n lämpötilaan ennen kiintopisteiden lukitsemista, jolloin tasaimien kokonaisvenymä pystyttiin hyödyntämään.

3.9 Pumput

Tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmässä pumput ovat merkittäviä sähköenergian kuluttajia suurien virtaamien johdosta. Pumpun sähköverkosta ottama teho voidaan laskea yhtälön 28 avulla [51].

$$P_o = \frac{\Delta p * qv}{\eta} \quad (28)$$

P on pumpun sähköverkosta ottama teho (kW)

Δp on kokonaispaine (kPa)

qv on virtaama (m³/s)

η on pumpun kokonaishyötysuhde (-).

Tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmät varustetaan yleensä kahdella pumpulla; kaksoispumpun valinta voidaan toteuttaa neljällä eri tavalla. Mikäli järjestelmän toiminnan turvaus on tärkeää, voidaan molemmat pumput mitoittaa samaan toimintapisteeseen ja käyttöä vuorotella, jotta käyttötunnit saadaan tasaisiksi. [22, s. 76.] Yleinen tapa kaukolämmitteisissä tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmissä on ollut mitoittaa toinen pumppuista huipputehon aikaiseen toimintapisteeseen ja toisella on hoidettu pienemmät virtaamatarpeet. Tällä menetelmällä saadaan säästöjä pumppujen käyttökustannuksissa.

Pumput voidaan myös mitoittaa toimimaan yhtä aikaa mitoitusasteessa ja pienemmillä tarpeilla vain toinen käy. Mitoituksessa molempien pumppujen tulee olla samanlaisia, ja toimintapiste pitää olla tarkasti selvillä. Vaihtoehtona on myös taajuusmuuttajapumppujen käyttö, jolloin pumppuja voidaan vuorotella tämän avulla. [22, s. 76.]

3.10 Kuormituskoe

Söderkullan urheilukentän toteutuksessa pystyttiin poikkeuksellisesti suorittamaan kentän kuormituskoe, jonka avulla voitiin tarkastella simulointimallin parametreja todellisen lämmitystilanteen mittauksien avulla. Kuormituskokeen avulla saatavat tiedot todellisesta lämmitystehon tarpeesta mahdollistivat lähtötietojen todentamisen kohteen lämpökaivokentän simuloinneille sekä järjestelmän komponenttien mitoitukselle.

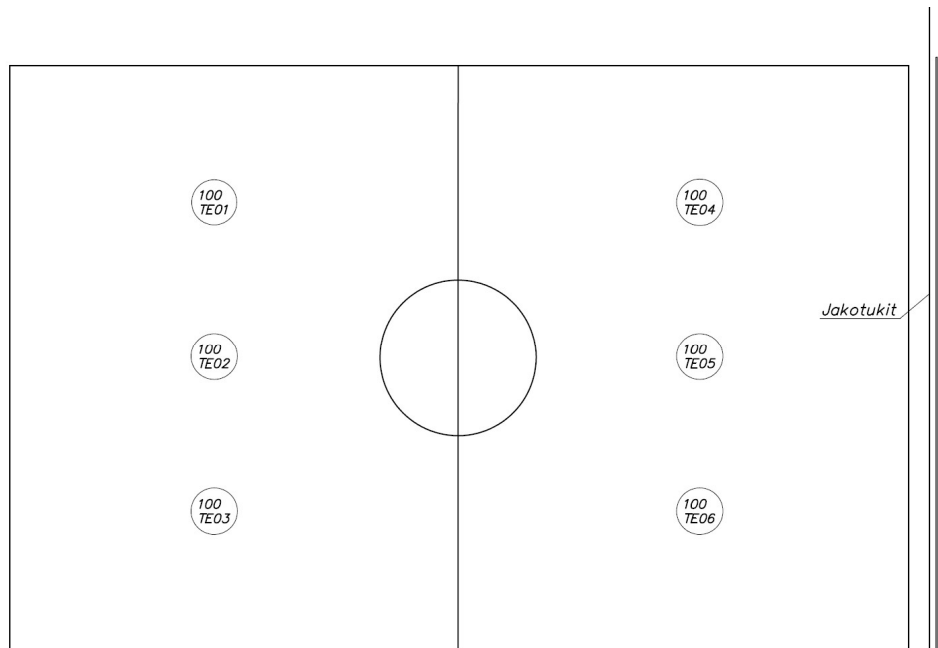
Kuormituskokeen mittausjakson pituudeksi määritettiin kaksi viikkoa ajankohtaan, jolloin ulkoilman lämpötilataso pysyy yleensä alle 0...+5 °C:n. Kaukolämpösiirtimistä vain toinen otettiin käyttöön, mikä riitti tuottamaan 500 kW:n tehon tarpeen tullen. Jatkuvien mittausten keruuväliksi asetettiin 10 minuuttia. Kuormituskokeessa mitattavia suureita olivat

- siirtoputkiston virtaama
- tekonurmen lämmityksen meno- ja paluuliuoksen lämpötilat
- kaukolämmön tuntikohtainen keskiteho
- kaukolämmön meno- ja paluuveden lämpötilat
- ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus
- ulkovalaisuus
- sademäärä
- joustokerroksen yläpuolisen murskeen lämpötila kuudesta sijainnista.

Siirtoputkiston virtaama mitattiin kertaluontoisena kentästä palaavasta paluuputken kertasäätöventtiilistä. Virtaama pyrittiin asettamaan olemassa olevilla pumpuilla vähintään arvoon 24 dm³/s, minkä jälkeen venttiilin säätöasento lukittiin kuormituskokeen ajaksi. Tekonurmen lämmityksen sekä kaukolämmön meno- ja paluulämpötilat mitattiin olemassa olevien antureiden avulla. Kaukolämmön tuntikohtainen keskiteho pyydettiin Keravan energialta. Ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus mitattiin yhdistelmäanturin avulla, joka sijoitettiin lämmönjakuhuoneen pohjoisseinälle.

Ulkovalaisuusanturin mittauksilla saadaan tieto auringon säteilytehosta, anturin mittausalueen yläraja tulee tätä varten olla kuitenkin korkea. Valaisuuden yksikkönä käytetään luxia, jonka muuntaminen wateiksi on riippuvainen säteilyn aallon pituudesta ja valon väristä [52, s. 4]. Auringon säteilylle voidaan kuitenkin käyttää likimääräisarvona 0,0079 W/m² per lux [52, s. 4].

Kuormituskokeen aikainen vesi- ja lumisademäärä mitattiin kerran päivässä kentän huoltohenkilökunnan toimesta. Kalibroitaessa simulointimallia kuormituskokeen perusteella, myös lumisateen vaikutus otetaan huomioon, jotta sen eristävyys saadaan huomioitua. Joustokerroksen yläpuolisen murskeen lämpötila mitattiin kuvan 23 mukaisesti kuudesta eri sijainnista. Kiinteiden antureiden lisäksi, samoihin sijainteihin lisättiin irtoanturit lisävarmuudeksi. Anturit olivat sijoitettuna meno- ja paluuputkien väliin.



Kuva 23. Kentän lämpötila-antureiden sijoittelu.

4 Mitoitussimuloinnit

Mitoitussimuloinnit laadittiin käyttäen IDA ICE Rinks and Pools-sovellusta. IDA ICE on luotu alun perin rakennusten energiatehokkuuden tarkasteluun. Ohjelman avulla voidaan mallintaa rakennus sekä sen järjestelmät käyttäjän valitsemaan sijaintiin ja laskea dynaamisesti sen lämpöasetta sekä energiankulutusta. IDA ICE Rinks and Pools on ohjelman lisäosa, jonka avulla myös veden jäätymiseen ja sulamiseen vaadittu faasimuutosenergia saadaan laskettua. [54.] Simulointimallissa on eroja todellisuuteen verrattuna, minkä vuoksi käyttäjän täytyy olla hyvin perillä mallin toiminnasta sekä todellisuudessa tapahtuvista fysikaalisista ilmiöistä [45].

Tekonurmen simuloinneissa käytettiin IDA ICE Rinks and Pools-lisäosaa ja lämmityskauden aikana tapahtuvat faasimuutokset huomioitiin vain tekonurmen pinnalla lisäämällä vesi ja lumi malliin manuaalisesti. Ohjelman kaupallisessa versiossa ei ole tätä ominaisuutta vielä saatavilla. [45.]

Kentän rakenteen osalta simuloinneissa tulee ottaa huomioon taulukossa 12 olevat eroavaisuudet. Malliin annetut vesipitoisuuden arvot ovat saturaatioarvoja, eli rakenne on kyläinen vedestä. Vesipitoisuus kasvattaa rakenteen lämmönjohtavuutta sekä ominaislämpökapasiteettia, eli mallissa rakenne luovuttaa sekä sitoo enemmän lämpöä suuren osan ajasta todellisuuteen verrattuna. [45.]

Taulukko 12. Rakenteen ominaisuuksien eroavuudet todellisuuden ja mallin välillä.

Suure	Todellisuus	Malli
Vesipitoisuus [%]	Vaihtelee	Staattinen
Lämmönjohtavuus [W/mK]	Vaihtelee	Staattinen
Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]	Vaihtelee	Staattinen

Mallissa lämmönluovutusputki ei esiinny putkenä vaan lämpövirtalevynä rakenteen seassa. Todellisuudessa lämmönluovutus tapahtuu 3-ulotteisesti, mutta simulointimalli laskee sen 1-ulotteisesti yhtälön 29 avulla. [45.]

$$\Phi = h * A * \Delta t_{ln} = h * A * \frac{(T_M - T_R) - (T_P - T_R)}{\ln \frac{T_M - T_R}{T_P - T_R}} \quad (29)$$

Φ on lämmönluovutusjärjestelmän teho (W)

h on lämpövirtalevyn lämmönsiirtokerroin (W/m²K)

A on kentän pinta-ala (m²)

Δt_{ln} on logaritminen lämpötilaero (°C)

T_M on menoliuoksen lämpötila (°C)

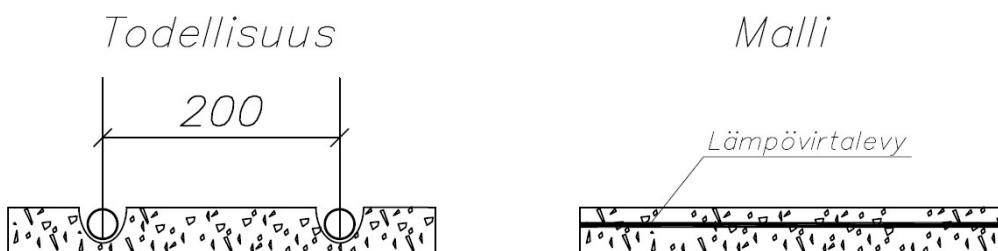
T_R on lämpövirtalevyä ympäröivän rakenteen lämpötila (°C)

T_P on paluuliuoksen lämpötila (°C).

Tämä tarkoittaa, että vaadittu teho ja liuoksen lämpötilaero joudutaan antamaan käyttäjän toimesta, minkä jälkeen malli arvioi lämpövirtalevyn lämmönsiirtokertoimen. Läm-

mönsiirtokerroin on vakiona pysyvä suure simuloinneissa. Borehole mallissa voidaan simuloida 3-ulotteista lämmönsiirtoa putkesta, mutta sen käyttö rajoittuu toistaiseksi lämpökaivokenttien simulointiin. [45.]

Proplay-jouston osalta myös lämmönluovuttimen sijoittuminen mallissa eroaa hieman todellisuuteen verrattuna (kuva 24). Mallissa lämpövirtalevy on osana joustokerrosta, mutta todellisuudessa putki on yläpinnastaan kosketuksissa murskeeseen, jolloin joustokerroksen aiheuttama lämmönvastus ei vaikuta siihen yhtä suuresti. [6.]



Kuva 24. Proplay-jousto, lämmönluovuttimen sijoittuminen todellisuuden ja mallin välillä.

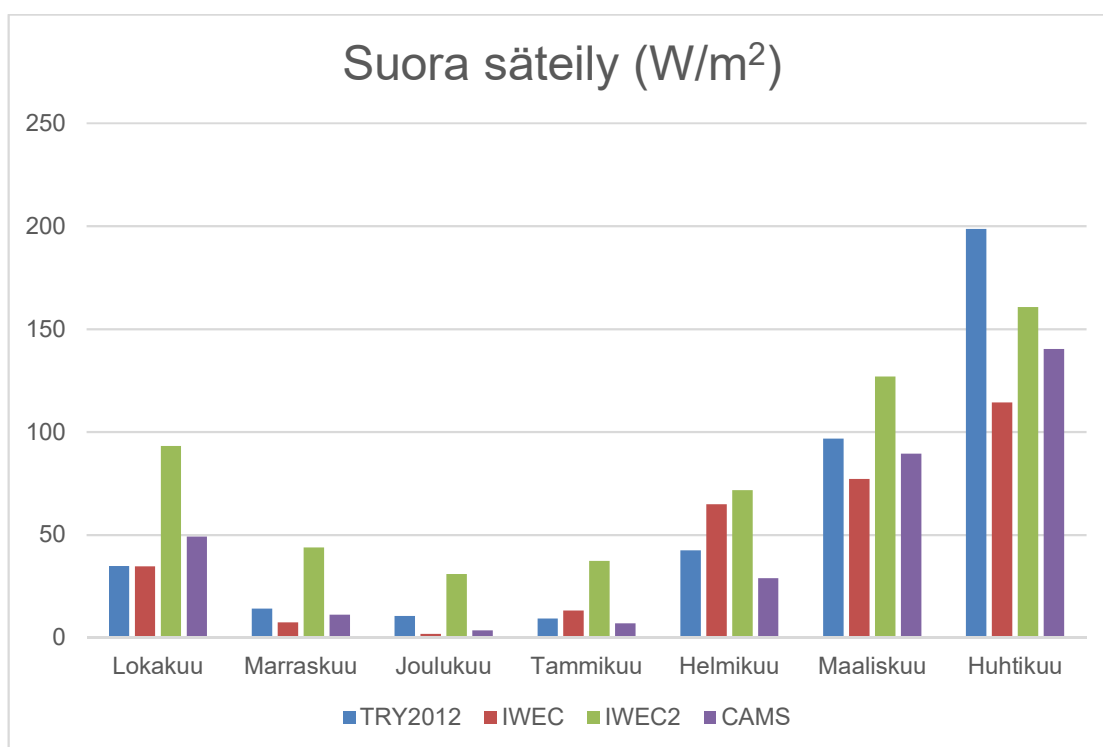
Simulointimalli käyttää liuoksen lämpötilana meno- ja paluuliuoksen keskiarvoa. Simuloinneissa liuoksen ominaisuudet muuttuvat dynaamisesti lämpötilan mukaan, kuten todellisuudessaakin. [45.]

Putkiston painehäviöt malli laskee dynaamisesti liuoksen lämpötilan ja virtaaman vaihdellessa, minkä perusteella saadaan vuotuinen pumppausenergiankulutus selville. Malliin annetut arvot putkipituudesta joudutaan kuitenkin rajoittamaan lämmönjakohuoneen liitoskohtaan, jotta siirtoputkiston vuotuiset lämpöhäviöt tulee oikein lasketuksi. Lämmönjakohuoneen putkien ja venttiilien vaikutus painehäviöihin annetaan malliin korjauskertoimen avulla. Korjauskertoimen suuruus tulee määrittää tapauskohtaisesti. [45.]

5 Tulokset

5.1 Säädata

Alkuun vertailussa huomio kiinnittyi kohtisuoraan auringon säteen suuntaisiin arvoihin tiedostojen välillä. IWECC2:n suoran säteilyn arvot olivat huomattavasti IWECC- ja TRY2012-dataa korkeammat (kuva 25).



Kuva 25. Suoran säteilyn kuukausikeskiarvot eri säätiedostoissa ja toteutuneella säällä.

Asian selvityksessä ilmeni, että IWECC- ja IWECC2-kokonaissäteilydatan luonnissa on käytetty toisistaan eroavia empiirisiä malleja. Kokonaissäteilyn luonnissa on käytetty apuna muun muassa toteutunutta pilvisyystietoa sekä IWECC2:n kohdalla myös lämpötilan muutosta kolmen tunnin aikavälillä. Kokonaissäteily hajautetaan suoraan- ja hajasäteilyyn käyttämällä erinäisiä algoritmeja, ja näiden suuruus on suuresti riippuvainen maanpintaan tulevan ja takaisin avaruuteen heijastuvan säteilyn suhteesta. [53.]

Viime vuosilta on julkisesti saatavilla olevaa satelliiteista johdettua dataa, esimerkiksi CAMS (Copernicus Atmospheric Measuring System), joka on EU:n ylläpitämä tutkimuslaitos. Kuvassa 25 oleva CAMS:n mukainen suoran säteilyn data on luotu Joe Huangin

toimesta keräämällä Helsingin kokonaissäteilydata vuosilta 2004–2017. Tulokset viittaavat siihen, että IWEC2- suoran säteilyn data on liian korkea toteutuneisiin arvoihin verrattuna. [53.] IWEC2-säätiedoston osalta suoran säteilyn korkeiden arvojen vaikutusta tulee arvioida, mikäli käyttö ei rajoitu vaakasuorien pintojen simulointiin kuten tekonurmikentissä.

Taulukossa 13 yhteenveto vertailtavan säädatan keskiarvoista kentän lämmityskauden ajalta. Liitteessä 3 diagrammit vertailtavista suureista. Säätiedostot TRY2012 ja IWEC eivät sisällä tietoja pilvisyydestä. Tulevaisuuden näkymät perustuvat kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten arvioitujen päästöjen kehitykseen [9, s. 42]. Arviot vuotuisen keskilämpötilan kohoamisesta ovat vuosisadan alkupuolella noin 0,3–0,4 °C vuosikymmenessä. Lämpötilan kohoaminen on voimakkainta joulukuun ja helmikuun välisellä ajalla, kesäaikaan kohoamisen on arvioitu jäävän puoleen talvikuukausista. [9, s. 46–47.] Suhteellisen kosteuden vuosikeskiarvon arvioidaan myös nousevan talvisin. Sadan vuoden päähän ennuste noususta on 4–8 prosenttia. Pilvisyyden arvioidaan lisääntyvän, joka laskee auringon suoraa säteilyä hajasäteilyn kasvaessa. Talvisin säteilymäärät ovat kuitenkin niin pieniä, että suurikaan prosentuaalinen muutos ei vaikuta absoluuttisiin säteilymääriin merkittävästi. [9, s. 48.]

Taulukko 13. Lämmityskauden keskiarvot eri sääsuureille säädatapaketeissa sekä toteutuneelle säälle ja tulevaisuuden ennusteet muutoksista.

	TRY2012	IWEC	IWEC2	2017-2018	2016-2017	2015-2016	Tulevaisuus
Lämpötila (°C)	-0,3	-0,7	0,2	-0,3	-0,1	0,9	↑
Suhteellinen kosteus (%)	83,9	84,3	82,9	87,1	86,0	86,7	↑
Hajasäteily (W/m ²)	27,4	31,8	32,0	25,6	25,7	24,3	↑
Pilvisyys (%)	-	-	69,1	70,6	70,2	67,8	↑

Suurimpana vaikuttavana tekijänä käytettävän säätiedoston valinnassa oli lämpötilan vastaavuus toteutuneeseen sekä pilvisyystietojen puuttuminen TRY2012- ja IWEC-tiedoista. Pilvisyystietojen avulla tiedostoon voitiin lisätä sadetiedot oikeisiin ajankohtiin ja näin vältettiin simuloinneissa yhtäaikainen auringonpaiste ja sade. Pilvisyyden avulla malliin saadaan myös taivaankannen lämpötilatiedot, joiden perusteella simulointiohjelma pystyy selvittämään säteilyn lämmönsiirtokertoimen kentän pinnasta taivaalle. [6.] Analyysin perusteella päädyttiin käyttämään IWEC2-säätiedostoa.

Lumen osalta ensimmäiset simuloinnit osoittivat, että sillä on pääasiassa energiankäyttöä vähentävä vaikutus, kun lumi on kiinteää ja lämpötilat ovat nollan alapuolella. Tämä

johtuu järjestelmän kykenemättömyydestä sulattaa lunta. Kun lumi on vesimäistä, se voi lisätä energiankulutusta tämä vaatii kuitenkin sen käsittelyä simuloinneissa vetenä. Lumikerroksena ei numeerisista syistä voitu käyttää niin pientä paksuutta, ettei se olisi vaikuttanut lämmönvastuksena. Koska kentän huollossa lumen poistaminen edellytetään tehtävän huolellisesti, päätettiin lumisade jättää simuloinneista pois, jotta välttyttäisiin todellisuutta positiivisemmilta tuloksilta. Vesisateen vaikutus pidettiin simuloinneissa kuitenkin mukana. [55.]

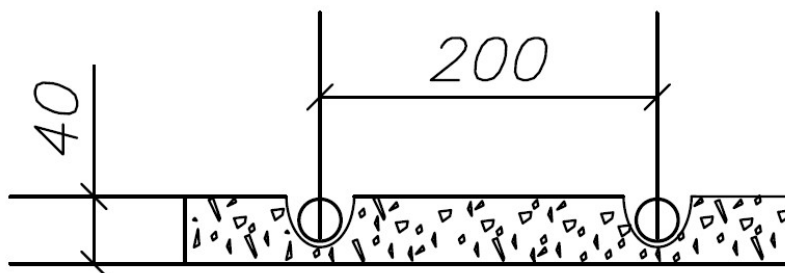
5.2 Tekonurmialueen rakenne

Lämmönluovutuspiirin urakkalaskentaa varten kentän simuloinnit toteutettiin taulukon 14 mukaisilla kerroksilla.

Taulukko 14. Suunnitellun rakenteen paksuudet ja ominaisuudet.

Kerros	Rakennekerros	Mittaus	Kerros- paksuus [mm]	Tiheys [kg/m ³]	Ominais- lämpö- kapasiteetti [J/(kg K)]	Lämmön- johtavuus [W/(m K)]	Vesi- pitoisuus [paino-%]
1	Kumirouhe nukan sisässä		16,0	513	1 940	0,11	2,6
1.1	SBR-kumirouhe			500	1 880		
1.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
2	Hiekka nukan sisässä	TE1	12,0	1 601	1 202	1,91	6,3
2.1	Kvartsihiekkä			1 500	1 000	2,00	
2.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
3	Joustokerros		10	1 494	2 121	0,26	23,0
3.1	Polyuretaanivaahtojousto			1 150	1 500	0,15	
3.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
4	Tasauskerros	TE2	20	2 234	1 192	1,92	6,0
4.1	Murske			2 100	1 000	2,00	
4.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
5	Murske lämmitysputkistolla		130	2 234	1 192	1,92	6,0
5.1	Murske			2 100	1 000	2,00	
5.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
6	Kantava kerros		400	2 234	1 192	1,92	6,0
6.1	Murske			2 100	1 000	2,00	
6.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
7	Pohjamaa moreenia			2 100	1 000	2,00	

Kohteeseen valikoitunut urakoitsija ehdotti rakenteeksi proplay-joustoa, jossa lämmönluovutusputket asennetaan valmiiseen uraan rakenteessa (kuva 26 ja kuva 27; taulukko 15).



Kuva 26. Proplay-jouston mittakuva.



Kuva 27. Proplay-jousto.

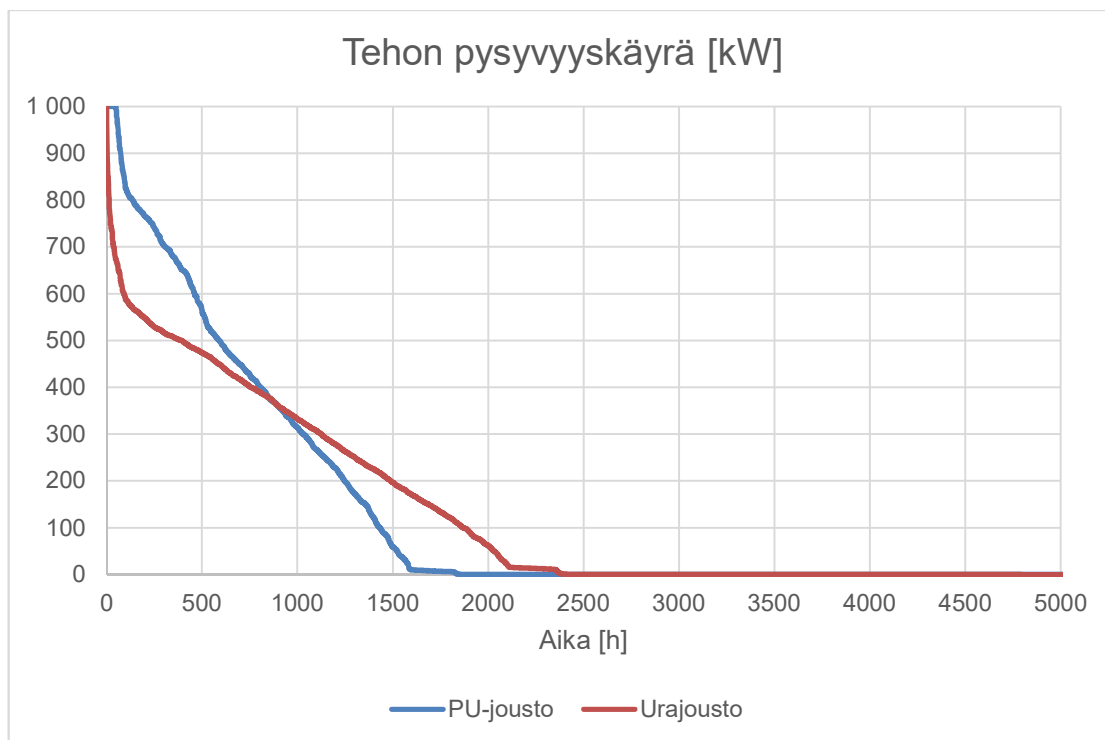
Proplay-jouston etuna on korkeampi lämmönvastus alaspäin, jolloin suurempi osa lämmitysenergiasta suuntautuu kohti kentän pintaa. Myös putkien asennettavuus helpottuu, ja näin voidaan varmistua, että asennussyvyys ja putkiväli pysyvät kauttaaltaan vakiona. [6.] Valmistajan tietojen mukaan proplay-joustolla on suuri tyhjiötilavuus, jonka vuoksi vesipitoisuus on hyvin pieni, joten tämä jätettiin simuloinneissa huomiotta [56]. Myöhemmin puhuttaessa urajoustopa tällä tarkoitetaan proplay-joustopa.

Taulukko 15. Proplay-joustorakenteen paksuudet ja ominaisuudet.

Kerros	Rakennekerros	Mittaus	Kerros- paksuus [mm]	Tiheys [kg/m ³]	Ominais- lämpö- kapasiteetti [J/(kg K)]	Lämmön- johtavuus [W/(m K)]	Vesi- pitoisuus [paino-%]
1	Kumirouhe nukan sisässä		16,0	513	1 940	0,11	2,6
1.1	SBR-kumirouhe			500	1 880		
1.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
2	Hiekka nukan sisässä	TE1	12,0	1 601	1 202	1,91	6,3
2.1	Kvartsihiekkakerros			1 500	1 000	2,00	
2.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
3	Tasauskerros		30,0	2 234	1 192	1,92	6,0
3.1	Murske	TE2		2 100	1 000	2,00	
3.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
4	Urajousto lämmitysputkistolla		12,5	180	1 200	0,05	
	Lämmönlouvutusputkisto						
5	Urajousto lämmitysputkistolla		27,5	180	1 200	0,05	
6	Kantavakerros		550,0	2 234	1 192	1,92	6,0
6.1	Murske		550,0	2 100	1 000	2,00	
6.2	Vesi		0,0	1 000	4 200	0,60	
7	Pohjamaa moreenia			2 100	1 000	2,00	

Vertailua varten simuloitiin suunniteltu rakenne sekä urakoitsijan ehdotus. Simulointien lähtökohtana oli kentän pelattavuuden säilyttäminen, kun ulkoilman lämpötila on yli -12 °C . Tämä toteutettiin simuloimalla kumirouheen alapuolella olevan kvartsihiekkakerroksen lämpötilaa, pitäen sen lämpötila yli 0 °C :n (TE1, taulukko 14 ja taulukko 15), jonka perusteella säädettiin kenttään menevän liuksen lämpötilaa. Koska lämpötila-anturia ei todellisuudessa voida asentaa suoraan kumirouheen alapuolelle sen vaurioitumisvaaran vuoksi, simuloitiin myös todellisen anturin sijainnin lämpötila (TE2, taulukko 14 ja taulukko 15). [45.]

Tulevan ulkoilman lämpötilan kuuden tunnin liukuvan keskiarvon alittaessa -12 °C tai ylittäessä $+0\text{ °C}$ lämmitys ajettiin alas. Vastaavasti kuuden tunnin liukuman ylittäessä -12 °C kenttään ajettiin sen vaatima teho. Ensimmäisellä simulointikierröksellä testattiin myös ajaa kenttää 12 tunnin liukuvan keskilämpötilan perusteella, mutta kentän vaste-aika tällä todettiin liian pitkäksi. [45.]



Kuva 28. Tehon pysyvyyskäyrät polyuretaanivaahdo- ja urajoustoille.

Tulosten perusteella voitiin todeta, että urajousto soveltuu mainiosti kohteisiin, joissa energia halutaan tuottaa pääasiallisesti maalämmöllä ja kentän lämmitykselle tehdään alasajoa. Syynä tälle on urajouston pienempi vasteaika, jolloin järjestelmän alasajon jälkeiselle lämmitykselle ei tarvita yhtä suuria tehoja. Energian kokonaiskäyttö on miltei identtinen molemmilla rakenneratkaisuilla. [6.]

Maalämpöpumpun mitoitus-tehoa valittaessa tulee myös tarkastella järjestelmän hankintakustannusten vaikutus elinkaarikustannuksiin. Alustava järjestelmän kannattavuuslaskelma osoitti, että maalämmön kattaessa ~80 % käytetystä energiasta saadaan takaisinmaksuaika optimoitua. Laskelma perustui toteutuneiden maalämpökohteiden investointikustannuksiin. Taulukon 16 tiedoilla saatiin arvio optimaalisesta maalämpöpumpun mitoitus-tehosta, minkä perusteella voitiin kartoittaa valmistajia. [6.]

Taulukko 16. Energiajakauma kaukolämmön ja maalämmön välillä eri maalämpöjärjestelmän mitoitustehoille käytettäessä polyuretaanivahto- tai urajoustoa.

ML = Maalämpö KL = Kaukolämpö	200 kW		300 kW		350 kW		400 kW	
	ML	KL	ML	KL	ML	KL	ML	KL
Energia PU-jousto [MWh]	289	405	403	291	452	242	495	199
ML-osuus PU-jousto [%]	42		58		65		71	
Energia urajousto [MWh]	374	313	504	183	556	131	599	88
ML-osuus urajousto [%]	54		73		81		87	

Kohteeseen valikoituneen urajouston toteutuneet rakenteet päivitettiin kerrosten ja ominaisuuksien osalta simulointimalliin taulukon 17 mukaisesti.

Taulukko 17. Söderkullan urheilukentän toteutuneet rakenteet.

Kerros	Rakennekerros	Mittaus	Kerros- paksuus [mm]	Tiheys [kg/m ³]	Ominais- lämpö- kapasiteetti [J/(kg K)]	Lämmön- johtavuus [W/(m K)]	Vesi- pitoisuus [paino-%]
1	Kumirouhe nukan sisässä		16,0	513	1 940	0,11	2,6
1.1	SBR-kumirouhe			500	1 880		
1.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
2	Hiekka nukan sisässä	TE1	12,0	1 601	1 202	1,91	6,3
2.1	Kvartsihiekkä			1 500	1 000	2,00	
2.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
3	Tasauskerros	TE2	30,0	2 234	1 192	1,92	6,0
3.1	Murske			2 100	1 000	2,00	
3.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
4	Urajousto		12,5	185	1 278	0,06	2,6
4.1	Urajousto			180	1 200	0,05	
4.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
	Lämmönluovutusputkisto						
5	Urajousto		27,5	185	1 278	0,06	2,6
5.1	Urajousto			180	1 200	0,05	
5.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
6	Kantakerros		150,0	2 234	1 192	1,92	6,0
6.1	Murske			2 100	1 000	2,00	
6.2	Vesi			1 000	4 200	0,60	
7	Tukikerros		400,0	2 234	1 192	1,92	6,0
7.1	Murske			2 100	1 000	2,00	
7.2	Vesi		24,0	1 000	4 200	0,60	
Yhteensä			648				

Urajouston tyhjiötilavuuden vuoksi sen vesipitoisuuden määrittäminen simulointeja varten osoittautui vaikeaksi. Korkeiden tehontarpeiden aikaan rakenne on oletettavasti hyvin kuiva, koska vesisateiden ja pakkasjaksojen välissä rakenteella on yleensä aikaa kuivua. Lisäksi järjestelmän kykenemättömyys sulattaa lunta ei myöskään pysty kastelemaan rakennetta suuressa määrin. Jotta tuloksiin saatiin lisävarmuutta, päädyttiin urajoustoille antamaan sama vesipitoisuus kuin SBR-kumirouheelle. [6.]

Ennen kuormituskokeiden aloitusta urajoustolle suoritettiin TTY:n lämmönjohtavuuskokeessa esiintyvän mukainen vesipitoisuustesti. Kokeessa 45 cm x 45 cm koekappale punnittiin kuivana ja 23 vuorokautta kestävä vesiupotuksen jälkeen sitä valutettiin ensin 60 sekuntia pystyasennossa ja tämän jälkeen 14 minuuttia vaaka-asennossa. Valutuksen jälkeen kappale punnittiin uudelleen, jolloin voitiin määrittää vesipitoisuus. (Taulukko 18.)

Taulukko 18. Urajoustop vesipitoisuustestin tulokset.

Kuivapaino [g]	Märkäpaino [g]	Vesi-pitoisuus [paino-%]	Vesi-pitoisuus [tilavuus-%]
1231,5	1944,3	36,7	8,8

Testitulokset osoittivat menetelmän virheelliseksi ja asiasta informoitiin tuotteen valmistajaa sekä pyydettiin suorittamaan materiaalille lämmönjohtavuuskokeet tulevia kohteita varten.

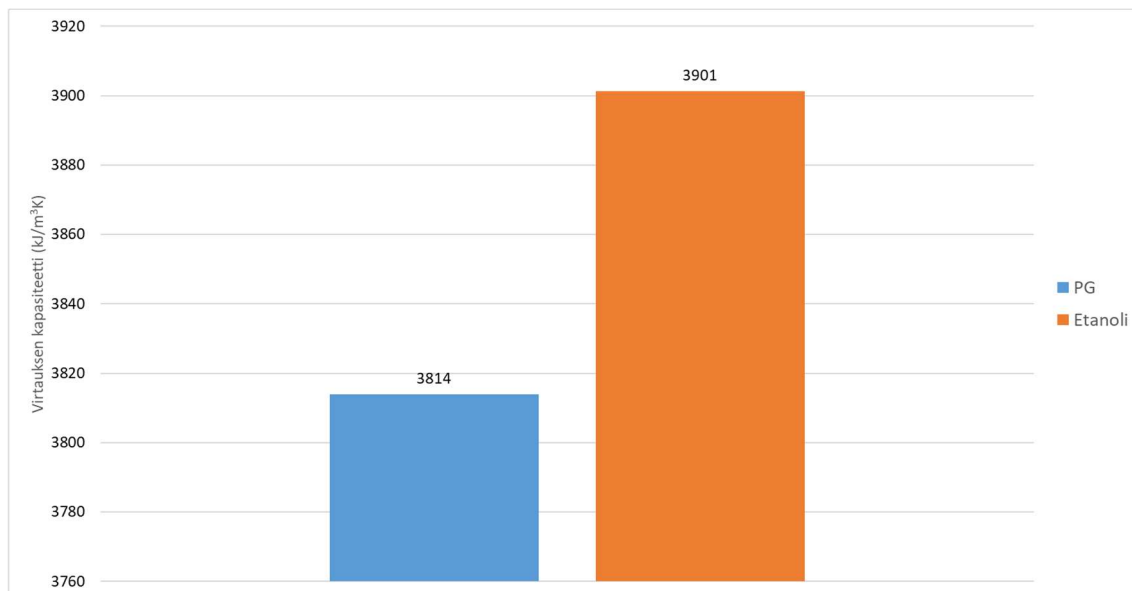
5.3 Lämmönluovutusliuos

Kaliumformiaatin osalta kustannuksien nousu suuren täytöksen (~23 000 dm³) ja materiaalivaatimusten johdosta karsi sen SWOT-analyysin (taulukko 19) perusteella pois.

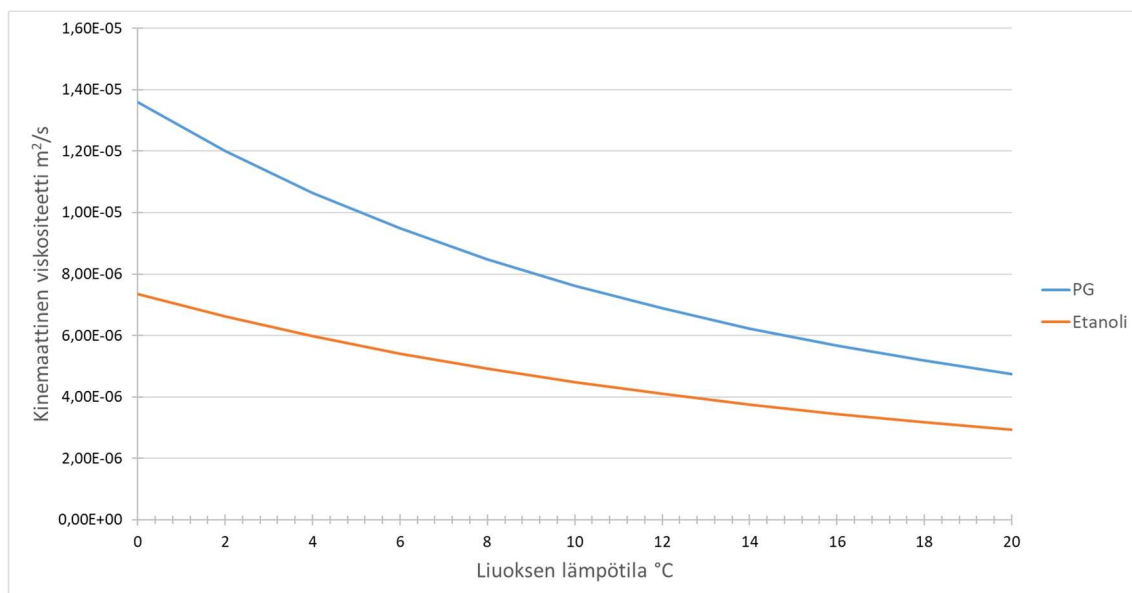
Taulukko 19. SWOT-analyysi liuosvaihtoehdoista.

Propyleeniglykoli	Kaliumformiaatti	Etanoli
Vahvuudet		
Ympäristöystävällisyys	Ympäristöystävällisyys	Ympäristöystävällisyys
Kokemus	Viskositeetti	Kapasiteettivirtaama Halvin €/m ³
Heikkoudet		
Viskositeetti	Ominaislämpökapasiteetti	Matala leimahduspiste
Painehäviöt	Kallein €/m ³	
Mahdollisuudet		
Olemassa olevan liuoksen uudelleenkäyttö	Säästö pumppauskustannuksissa	Säästö pumppauskustannuksissa
Uhat		
Putken sisäpuolisen lämmönsiirtokertoimen romahdus	Vuotoherkkyys Kavitointi pumpussa Materiaalivaatimukset	Vuotoherkkyys Kavitointi pumpussa

Etanolia pohdittiin vaihtoehtona sen propyleeniglykolia korkeamman kapasiteettivirtaaman (kuva 29) ja matalamman viskositeetin (kuva 30) sekä hinnan vuoksi. Aineominaisuuksien arvot laskettu Tampereen teknillisen korkeakoulun tuottamasta ”Välilliset kylmälaitokset” oppaasta löytyvillä aineominaisuussovitteilla [22, s. 217 ja 221].



Kuva 29. Propyleeniglykolin ja etanolin kapasiteettivirtaamat lämpötilassa +20 °C.



Kuva 30. Propyleeniglykolin ja etanolin kinemaattinen viskositeetti liuoksen lämpötilan funktiona.

Etanolista kokemukset olivat kuitenkin vain lämpökaivojen kiertoliuksena ja sen käyttämiseen lämmityspuolella liittyi muutamia epävarmuuksia [6]. Järjestelmän matalan jäätymispistevaatimuksen vuoksi (-25 °C) liuosten pitoisuudet nousivat suuriksi, mikä etanolin kohdalla tarkoitti matalaa leimahduspistettä (28 °C , closed cup) [57, s. 9]. Riskiksi tämän osalta muodostui kaukolämmönsiirrin, jossa kyseinen leimahduspiste lämpötila voitaisiin saavuttaa. Etanolin kohdalla myös aineominaisuuksissa oli suuria eroja riippuen lähteestä. Analyysin perusteella päädyttiin propyleeniglykoliin pitoisuudella, jolla saavutettiin -25 °C :n jäätymispiste, joka vastasi noin 44 painoprosentin pitoisuutta. Ura-koitsijan kohteeseen toimittama liuos oli 41 painoprosentin propyleeniglykolia.

5.4 Putkisto

Lämmönluovutus- ja siirtoputkiston koon määrittäminen simulointimallia varten suoritettiin taulukon 20 mukaisilla virtaamilla. Laskenta suoritettu $+20\text{ °C}$:n liuoksen ominaisuuksilla. Tulosten perusteella päädyttiin valitsemaan lämmönluovutusputkistoksi PE25 SDR11 ja siirtoputkistoksi PE200 SDR17. Dimensioiden pienentäminen yhdellä olisi johtanut kohtuuttoman suuriin painehäviöihin.

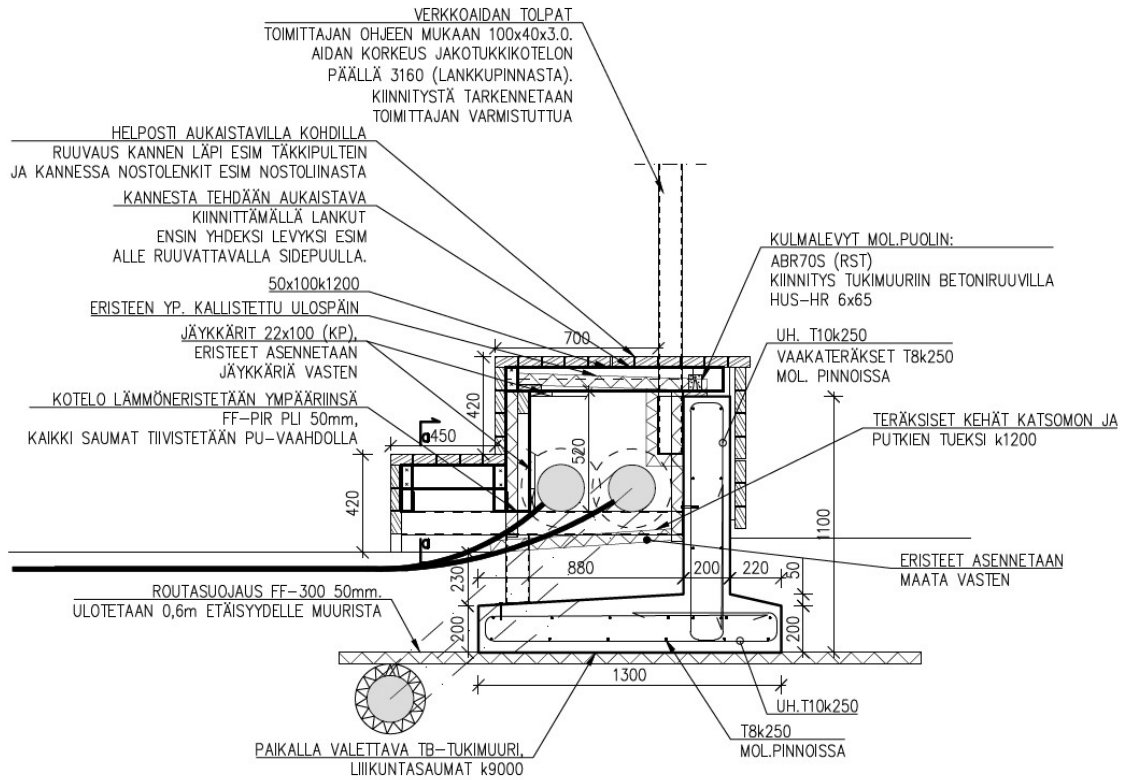
Taulukko 20. Lämmönluovutus- ja siirtoputkiston koon määrittäminen.

	Selite	Lämmönluovutusputkisto PE25, siirtoputkisto PE200	Lämmönluovutusputkisto PE20, siirtoputkisto PE160	Yksikkö
Liuos	Pitoisuus	44 %	44 %	Paino %
	Jäätymispiste	-25,00	-25,00	°C
	Ominaislämpökapasiteetti	3,69	3,69	kJ/kgK
	Tiheys	1034	1034	kg/m ³
	Kinemaattinen viskositeetti	4,75E-06	4,75E-06	m ² /s
	Lämmönjohtavuus	0,384	0,384	W/mK
	Prandtin luku	47,17	47,17	
Lämmönluovutusputkisto	Tilavuusvirta	0,200	0,200	dm ³ /s
	Massavirta	0,207	0,207	kg/s
	Virtausnopeus	0,611	0,994	m/s
	Reynoldsin luku	2624	3346	
	Kitkakerroin	0,044	0,042	
	Painehäviö	92,1	292,0	kPa
	Painehäviö	419	1327	Pa/m
	Nusseltin luku	229	320	
Sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin	4319	7692	W/m ² K	
Siirtoputkisto	Tilavuusvirta	35,0	35,0	dm ³ /s
	Massavirta	36,16	36,16	kg/s
	Virtausnopeus	1,43	2,24	m/s
	Reynoldsin luku	53166	66439	
	Kitkakerroin	0,0208	0,0197	
	Painehäviö	31,6	90,9	kPa
	Painehäviö	125,7	362,3	Pa/m

Ennen kuormituskokeiden tuloksia jouduttiin lämpövirtalevyn lämmönsiirtokerroin asettamaan malliin vertailemalla rakennetta betoniin, jossa lämmönsiirtokerroin on todettu olevan luokkaa 30 W/m²K. Tämän perusteella liuksen ja maan väliseksi lämmönsiirtokerroimeksi asetettiin 25 W/m²K. Mallissa tehtiin myös erillisesti, jossa lämmönsiirtokerroimeksi asetettiin 15 W/m²K, mutta tuloksissa ei havaittu merkittävää eroa kentän lämpötilojen pysyvyydessä. [45.]

5.5 Jakotukit

Söderkullan kentällä jakotukit suunniteltiin maanpinnan yläpuolelle kentän pätyyn kuvan 31 mukaisesti. Kentän layoutin vuoksi jakotukkikotelo ei voitu sijoittaa pitkälle sivulle ja länsilaidalla sijaitsevan lumenajoreitin johdosta ainoaksi vaihtoehdoksi jäi kentän itäpääty. Ratkaisulla mahdollinen lämmönluovutusputkistoon päässyt ilma kulkeutuu jakotukeille niiden ollessa ylimmällä kohtaa mahdollistaen manuaalisen ilmauksen.



Kuva 31. Suunnitellun jakotukkikotelo rakenteet.

Toteutusvaiheessa ratkaisua hieman kevennettiin urakoitsijan toimesta (kuva 32). Jakotukkikotelo sijaan päädyttiin myös eristämään putket 32 mm solukumieristeellä asennettavuuden helpottamiseksi. Muutoksesta tehtiin kustannuslaskelma, joka osoitti, että eristämällä putket kotelo sijaan saavutetaan miltei identtiset energiahäviöt vuotuisesti. Tämä edellytti kuitenkin jakotukista lähtevien lämmönluovutusputkien eristämistä kentän rakenteisiin asti. [6.]



Kuva 32. Toteutunut jakotukkirkatkaisu ennen verhoilua ja liitosten eristämistä.

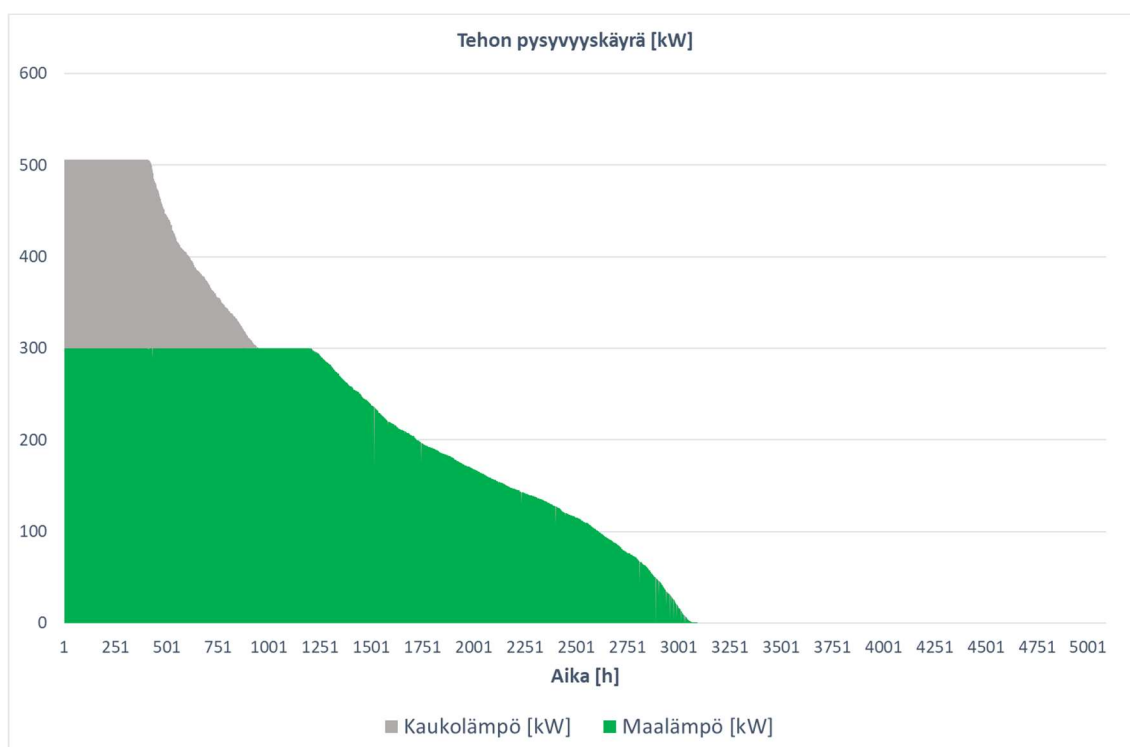
Kuvassa 33 näkyy jakotukkikotelo verhoiltuna.



Kuva 33. Toteutunut jakotukkikotelo verhoiltuna.

5.6 Lauhduksen mitoitus

Maalämpöpumpun mitoituslaskelmissa lämmityksen ohjausta optimoitiin ja päädyttiin ratkaisuun, jossa järjestelmää ei ajeta kovilla pakkasilla alas. Tämän johdosta kentän rakenteiden lämpötilamuutokset pysyivät hitaampina, ja ulkolämpötilan noustessa tapahtuvan ylösajon aikaan vaadittua tehoa saatiin alennettua. Rakenteen hitaat lämpötilamuutokset ovat myös toivottuja routavaurioiden riskien vähentämisessä. [6.] Urajoustopuolisen murskekerroksen lämpötilavaatimukseksi asetettiin malliin +3 °C (taulukko 17, TE2). Simulointien perusteella 500 kW:n teho riitti pitämään kerroksen asetusarvoon vaadituissa olosuhteissa (liite 4).



Kuva 34. Tehon pysyvyyskäyrä päivitetyllä rakenteella ja ohjauksella.

Maalämpöpumpun energiapiittovaatimukseksi valittiin 80 % järjestelmän kannattavuuden optimoimiseksi. Aiempien simulointien perusteella vaadittu teho tämän saavuttamiseksi oli 350 kW. Ohjaustavan muutos, jossa kenttään ajetaan maalämpöpumpun tuottama teho kokonaisuudessaan aina kun ulkoilman lämpötila on alle -10 °C mahdollisti maalämpöpumpun lauhdutustehon pudottamisen 300 kW:iin. Kuvan 34 tehon pysyvyyskäyrän mukaan maalämmön käyttämä energiaosuus saatiin 83 prosenttiin lämmi-

tyskauden kokonaisenergiankäytön ollessa 778 MWh. Liitteessä 5 on esitetty tehon pysyvyys ja liitteessä 6 urajoustopuolisen murskekerroksen lämpötilan pysyvyys ulkolämpötilan funktiona. Liitteestä 6 nähdään, että lämpötila urajoustopuolilla pysyy hyvin tasaisena läpi lämmityskauden, mikä edesauttaa suuresti järjestelmän ylös ajoa kovien pakkasjaksojen jälkeen. Erillistestin perusteella valitulla ohjaustavalla kentän ylösajo viikon kestäneen -26 °C :n pakkasjakson jälkeen kesti 9 tuntia. [45.]

5.7 Pumput

Putkiston painehäviöiden kannalta tulee tarkastella epäedullisin tilanne eri mitoituspisteissä. Maalämpöpumpun mitoituslaskelmoitusten perusteella määritettiin järjestelmän mitoitusvirtaama. Mitoitusvirtaama oli tehontarpeen ollessa 500 kW menevän ja palaavan liuoksen lämpötilaerolla 5 °C , joka vastasi kokonaisvirtaamaa $25,9\text{ dm}^3/\text{s}$. Virtaama päädyttiin pitämään vakiona myös osatehotilanteissa järjestelmän mitoituksen yksinkertaistamiseksi. [6.] Taulukossa 21 on esitetty virtaustekninen tarkastelu lämmönluovutus- ja siirtoputkistossa ulkoilman lämpötilassa -10 °C . Jakotukin painehäviöt huomioituna ekvivalenttisenä siirtoputkiston pituutena.

Taulukko 21. Painehäviöt lämmönluovutus- ja siirtoputkistossa ulkoilman lämpötilassa -10 °C .

	Selite	PG	Yksikkö
Liuos	Liuoksen keskimääräinen lämpötila	15	°C
	Ominaislämpökapasiteetti	3,73	kJ/kgK
	Tiheys	1035	kg/m^3
	Kinemaattinen viskositeetti	5,27E-06	m^2/s
	Lämmönjohtavuus	0,393	W/mK
	Prandtlin luku	52	
Lämmönluovutusputkisto	Tilavuusvirta	0,148	dm^3/s
	Massavirta	0,153	kg/s
	Virtausnopeus	0,45	m/s
	Reynoldsin luku	1753	
	Kitkakerroin	0,037	
	Painehäviö	41,8	kPa
	Painehäviö	190	Pa/m
	Nusseltin luku	4,364	
	Sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin	84	$\text{W/m}^2\text{K}$
Siirtoputkisto	Tilavuusvirta	25,9	dm^3/s
	Massavirta	26,82	kg/s
	Virtausnopeus	1,06	m/s
	Reynoldsin luku	35512	
	Kitkakerroin	0,0230	
	Painehäviö	19,2	kPa
	Painehäviö	76,4	Pa/m

Lämmönluovutusputkiston virtaaman laminaarisuuden vuoksi liuoksen lämpötilalla ja tätä kautta sen viskositeetilla on suuri merkitys painehäviöihin. Ulkoilman lämpötilan ollessa -26 °C tekonurmeen ajetaan ainoastaan maalämpöpumpun tuottama teho, minkä vuoksi menoliuoksen lämpötila on keskimäärin $+2\text{ °C}$ ja paluuliuos -1 °C . Taulukossa 22 on virtaustekninen tarkastelu lämmönluovutus- ja siirtoputkistossa ulkoilman lämpötilassa -26 °C .

Taulukko 22. Painehäviöt lämmönluovutus- ja siirtoputkistossa ulkoilman lämpötilassa -26 °C .

	Selite	PG	Yksikkö
Liuos	Liuoksen keskimääräinen lämpötila	0,5	$^{\circ}\text{C}$
	Ominaislämpökapasiteetti	3,71	kJ/kgK
	Tiheys	1042	kg/m^3
	Kinemaattinen viskositeetti	1,14E-05	m^2/s
	Lämmönjohtavuus	0,384	W/mK
	Prandtlin luku	115	
Lämmönluovutusputkisto	Tilavuusvirta	0,148	dm^3/s
	Massavirta	0,154	kg/s
	Virtausnopeus	0,45	m/s
	Reynoldsin luku	808	
	Kitkakerroin	0,079	
	Painehäviö	91,2	kPa
	Painehäviö	414	Pa/m
	Nusseltin luku	4,364	
	Sisäpuolinen lämmönsiirtokerroin	82	$\text{W/m}^2\text{K}$
Siirtoputkisto	Tilavuusvirta	25,9	dm^3/s
	Massavirta	26,98	kg/s
	Virtausnopeus	1,06	m/s
	Reynoldsin luku	16370	
	Kitkakerroin	0,0280	
	Painehäviö	23,4	kPa
	Painehäviö	93,2	Pa/m

Riittävän säätöventtiilien auktoriteetin takaamiseksi niiden painehäviöt mitoitetaan auki asennossa järjestelmän huipputehopisteessä. Liitteessä 7 on esitetty järjestelmän kyt-kentäkaavio huipputehon aikaisessa mitoituspisteessä, jolloin osa kentästä palaavasta liuoksesta voidaan ajaa suoraan maalämpöpumpun lauhduttimelle. Säätöventtiilien painehäviöt kasvavat tilanteessa, jolloin kenttää ajetaan osatehoilla, joka liitteen 7 kytkenässä osoittautui pumpun nostokorkeuden mitoittavaksi pisteeksi niiden osalta.

Lämpökaivokentän mitoitussimuloinneissa ilmeni, että ilman kesäaikaista kaivojen lataamista on vaarana ajautua kaivojen jäätymiseen 30 vuoden aikana. Maaperän lämpötilojen pysyvyyden turvaamiseksi päädyttiin ratkaisuun, jossa lämpökaivokenttää ladataan

kesäisin tekonurmen avulla. Simulointien perusteella kesähelteiden aikaan maahan saadaan parhaimmillaan siirrettyä 260 kW:n teho tekonurmesta, mutta 220 kW osoittautui järkeväksi mitoitustehoksi pysyvyytensä puolesta. Mitoituspisteessä tekonurmen pumppujen virtaamaa ei ollut kannattavaa mitoittaa talvitilannetta vastaavaksi, vaan optimaalinen virtaama oli lämpötilaeron ollessa 4 °C. Kenttään menevän liuoksen lämpötila on tällöin +11 °C ja palaava +15 °C, mikä vastasi virtaamaa 14,5 dm³/s. [45.]

Pumppujen mitoituksessa tarkasteltiin vaihtoehtoa, jossa lämmönluovutuspiiri varustettaisiin kahdella taajuusmuuttajapumpulla, joista toinen mitoitetaan talvitilanteen ja toinen kesätilanteen mukaan. Pumppujen sähkömoottorit mitoitetaan ratkaisussa kuitenkin identtisiksi, jolloin myös rungoltaan pienempi pumpuista pystyy vikatilanteessa hoitamaan talvitilanteen mitoituspisteen. Ohjauksessa tulee huomioida pumppujen vuorottelu, jolla pidennetään niiden käyttöikää. Vuorottelu voidaan toteuttaa esimerkiksi käyttämällä seisonnassa olevaa pumppua yksi vuorokausi viikossa. [58.] Taulukossa 23 näkyvät pumppujen mitoituspisteet talvi- ja kesätilanteessa.

Taulukko 23. Tekonurmen lämmönluovutuspiirin pumppujen mitoituspisteet talvi- ja kesätilanteessa.

220PU01 & PU02	TALVI [25,9 dm³/s]	KESÄ [14,5 dm³/s]
Putkiston osio	Painehäviö [kPa]	Painehäviö [kPa]
Lämmönluovutusputkisto	91	26
Siirtoputkisto	23	7
Siirtoputkiston kertavastukset	8	3
Lianerotin	5	2
LJH-putkisto	5	2
Säätöventtiilit	60	25
Lataussiirrin	-	35
Yhteensä	192	99

Ratkaisulla saavutettaisiin pienemmät hankintakustannukset, mutta säästö käyttökustannuksissa jää hyvin pieneksi, kuten taulukko 24 osoittaa. Taulukossa 24 on vaihtoehdon 1 pumput mitoitettu, kuten edellä käsiteltiin. Vaihtoehdossa 2 on molemmat pumput mitoitettu lämmityksen toimintapisteeseen laskemalla pumpun kierroksia kesäaikaisessa lataustilanteessa. Pumpun ottoteho on laskettu lämmitystilanteessa järjestelmän huipputehon aikaisessa mitoituspisteessä. Lämmityksen käyttötunnit laskettu lokakuun alusta huhtikuun loppuun, latauksen käyttötunnit perustuvat ulkoilman lämpötilan pysyvyyteen yli +12 °C:n vuonna 2016 ja sähkön hinnaksi on oletettu 90 €/MWh.

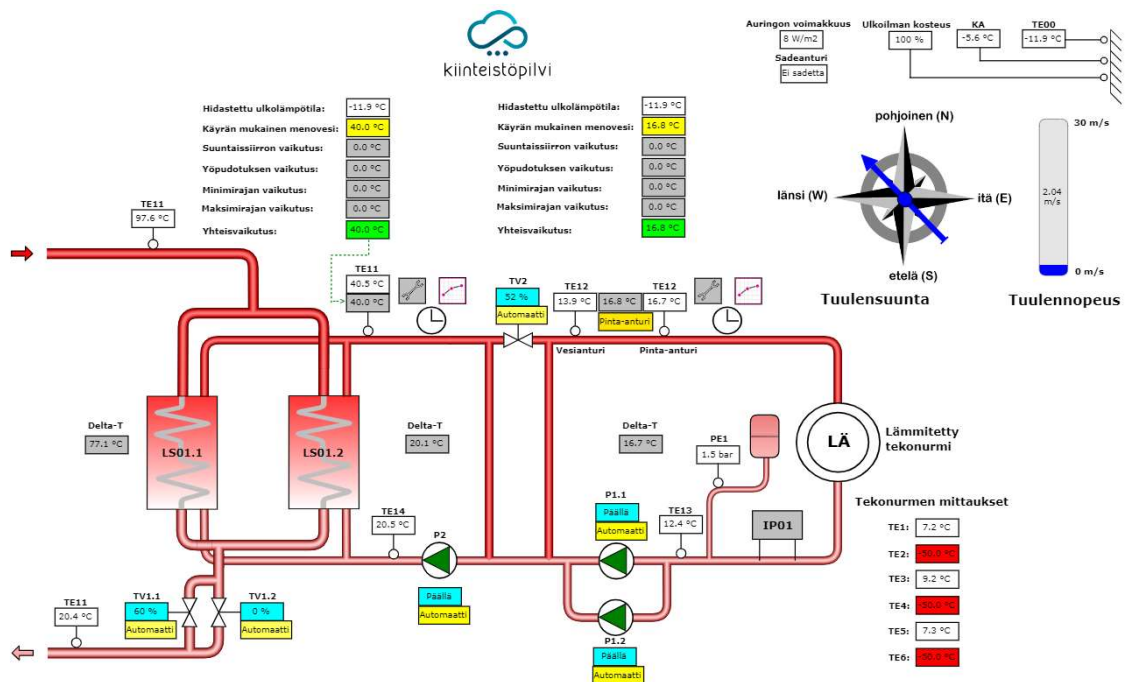
Taulukko 24. Pumpujen käyttökustannukset eri mitoitusvaihtoehdoilla.

	Käyttötunnit [h]	Ottoteho [kW]	Energia [MWh]	Kustannus [€/a]	Yhteensä [€/a]
Lataus, vaihtoehto 1	2875	3	8,6	776	4211
Lämmitys, vaihtoehto 1	5088	7,5	38,2	3434	
Lataus, vaihtoehto 2	2875	3,5	10,0	896	4330
Lämmitys, vaihtoehto 2	5088	7,5	38,2	3434	

Tarkastelun tuloksena molemmat pumput mitoitettiin identtisiksi integroiduin taajuusmuuttajin, jolloin käyttötunnit saadaan tasaiseksi läpi vuoden. Vuorotteluväliksi pumpuille asetettiin 21 vuorokautta [6].

5.8 Kuormituskoee

Kentän kuormituskoee tehtiin tammikuun 2019 aikana, kuormituskoeken analyysissä käytettävä mittausdata kerättiin aikaväliltä 7.1. – 21.1. Kentän käyttöliittymä saatiin pilvipalveluun (kuva 35), johon tallentui suurin osa tarvittavasta mittausdatasta.



Kuva 35. Söderkullan urheilukentän käyttöliittymä kuormituskoeeissa.

Virtausmittaus ja venttiilien säätö suoritettiin 7.1.2019, jota ennen kentän lämmitys oli ollut päällä kaksi vuorokautta. Ensimmäisen vuorokauden jälkeen paluupuolen lianerotin tyhjennettiin mahdollisien rakennusaikaisten epäpuhtauksien vuoksi. Tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmän virtaamaksi mitattiin 20,5 dm³/s käytettäessä yhtä pumppua ja 25,5 dm³/s molempien pumppujen ollessa käynnissä. Mittauksen aikana säätöventtiili TV2 pidettiin täysin auki. Virtaama mitattiin myös ajamalla säätöventtiiliä TV2 välillä 0–100 %, mittaustulokset taulukossa 25. Tulosten perusteella molemmat pumput päätettiin pitämään päällä koko mittausjakson ajan.

Taulukko 25. Virtausmittausten tulokset.

TV2 [%]	Tekonurmi virtaama [l/s]
0	24,0
20	24,3
40	24,6
60	24,9
80	25,2
100	25,5

Kytettäessä kentän lämpötila-anturit järjestelmään havaittiin, että kaksi anturia oli mennyt rikki virheellisen asennustavan johdosta ja kolmas rikkoutui kesken kuormituskokeen. Kolme toimivaa anturia olivat kuitenkin sijoittuneet symmetrisesti kenttään nähden ja antoivat näin ollen riittävän tarkan keskiarvon kentän lämpötiloista. [6.]

Kuormituskoe toteutettiin olemassa olevan ohjauskeskuksen avulla, minkä vuoksi menoliuoksen lämpötilan ohjausta ei voitu kompensoida simulointimallin tavoin kentän lämpötilan perusteella. Menoliuoksen lämpötilaa ohjattiin ulkolämpötilan mukaan, mikä aiheutti merkittävää nousua rakenteiden lämpötiloissa, kun kentällä oli lumipeite. [6.]

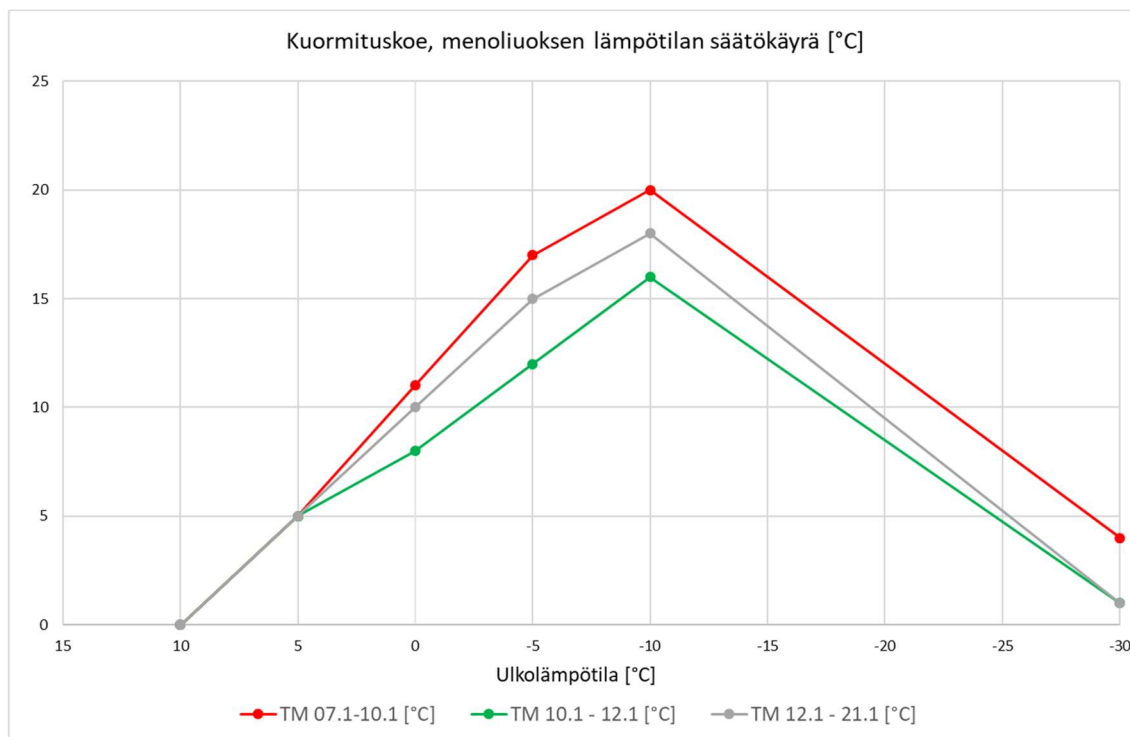
Ohjaavaksi lämpötila-anturiksi jouduttiin valitsemaan pintalämpötila-anturi, koska olemassa oleva vesianturi oli asennettu kentästä palaavan ja kaukolämmönsiirtimeltä tulevan liuoksen sekoituspisteeseen ilman suojaetäisyyttä kuvan 36 mukaisesti. Pinta-anturi eristettiin huolellisesti, jotta ympäröivällä ilmalla olisi mahdollisimman pieni vaikutus mitaustulokseen.



Kuva 36. TE12-vesianturin sijoitus.

Tekonurmen käyttämän tehon selvityksessä, pilvipalvelusta ladattiin säätöventtiilin TV2 asentotiedot kuormituskokeen ajalta ja taulukon 25 tulosten perusteella laskettiin lämmitysteho lineaarisesti interpoloimalla väliarvot. Tuloksissa havaittiin, että laskettu teho johtaa keskiarvallisesti 17% suurempaan tulokseen kuin Keravan energian mittauksista saatava teho liitteessä 8 on esitetty tulokset kuvaajana. Syyksi epäiltiin pinta-anturiin kohdistuvaa häiriötä menoliuosta lämpimämmästä huoneilmasta johtuen. Analyysi päätettiin tekemään Keravan energian mittautustietojen perusteella.

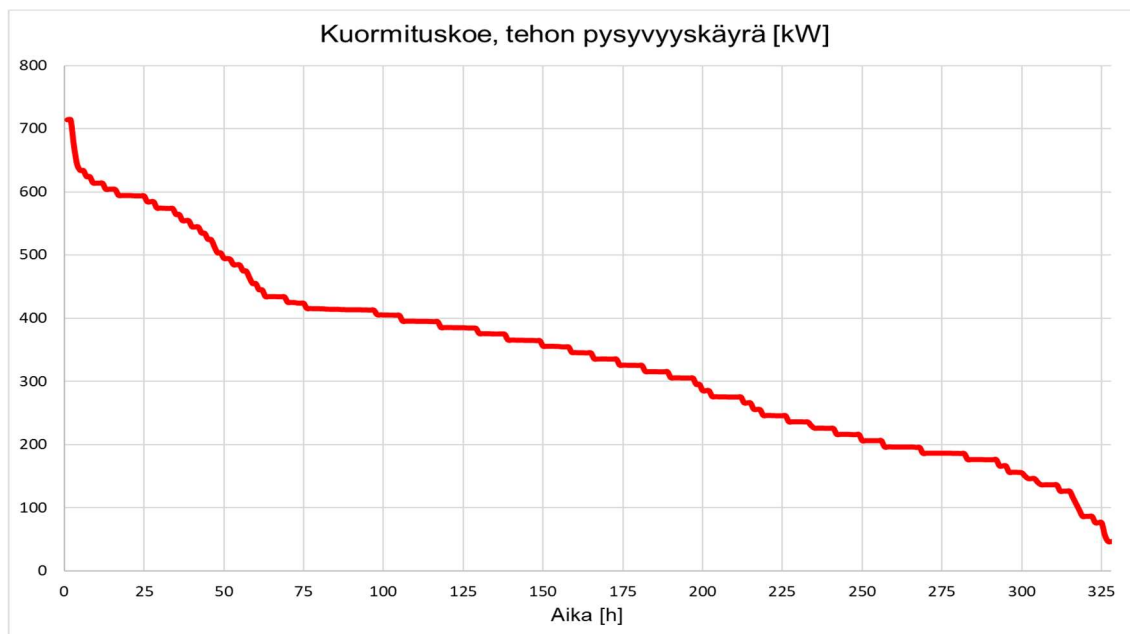
Tekonurmen lämmitysjärjestelmän lisäksi energiamittarin takana oli huoltorakennuksen lämmityksen ja käyttöveden lämmönsiirrin. Mittausjakson aikana huoltorakennuksessa ei käytetty lämmintä käyttövettä. Huoltorakennuksen käyttämä lämmitysteho vähennettiin mittaustuloksista ulkolämpötilan ja huoltorakennuksen lasketun konduktanssin perusteella.



Kuva 37. Kuormituskokeen säätökäyrän muutokset.

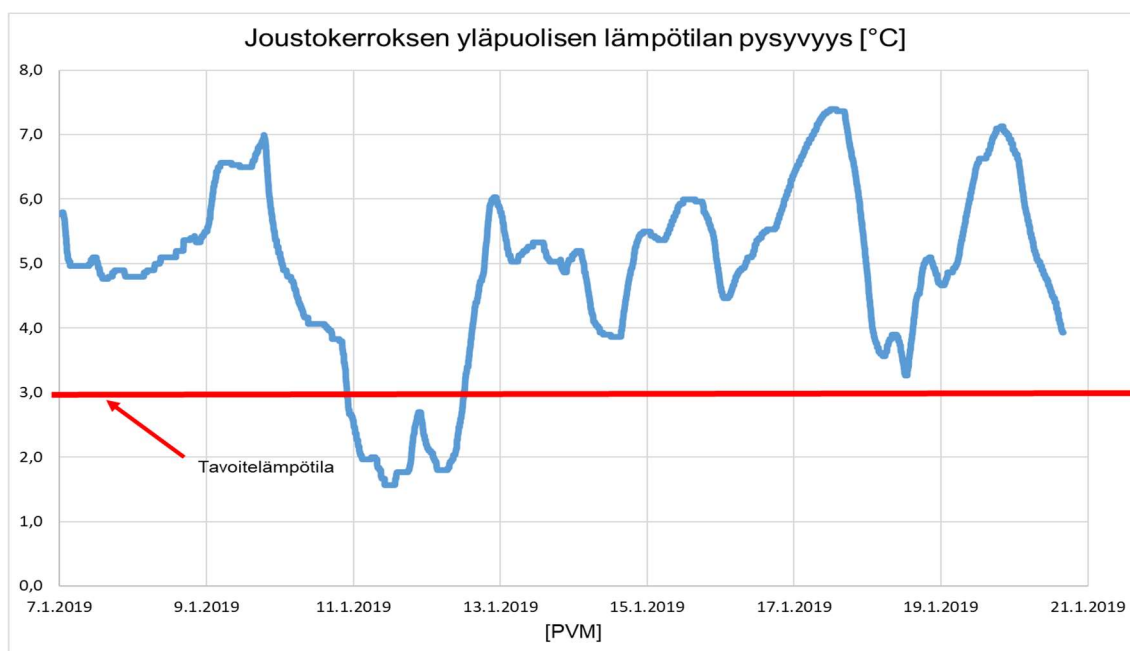
Kuvassa 37 näkyvät kuormituskokeen aikana käytetyt säätökäyrät menoliuoksen lämpötilalle. Mittausjakson ensimmäiset neljä vuorokautta ajettiin simulointimallin mukaisilla arvoilla. Neljän vuorokauden jälkeen käyrää loivennettiin kahdeksi vuorokaudeksi, koska kentän lämpötilat nousivat tarpeettoman korkeiksi osittain lumipeitteestä johtuen.

Säätökäyrän muutos oli kuitenkin liian suuri, ja ulkolämpötilan laskiessa kentän lämpötilat pääsivät laskemaan hieman alle +2 °C:n. Säätökäyrää aseteltiin uudelleen 12.1. illasta, jolloin ulkoilman lämpötila alkoi lähennellä mitoitussulkoilämpötilaa. Koska kentän lämpötila oli päässyt laskemaan, johti käyrän muutos huomattavasti simulointituloksia suurempaan tehonkäyttöön ja lämpötilaeroon meno- ja paluuliuoksen välillä hieman yli vuorokauden ajaksi, mikä näkyy kuvan 38 tehon pysyvyyssäyrässä ja liitteestä 9. [6.]



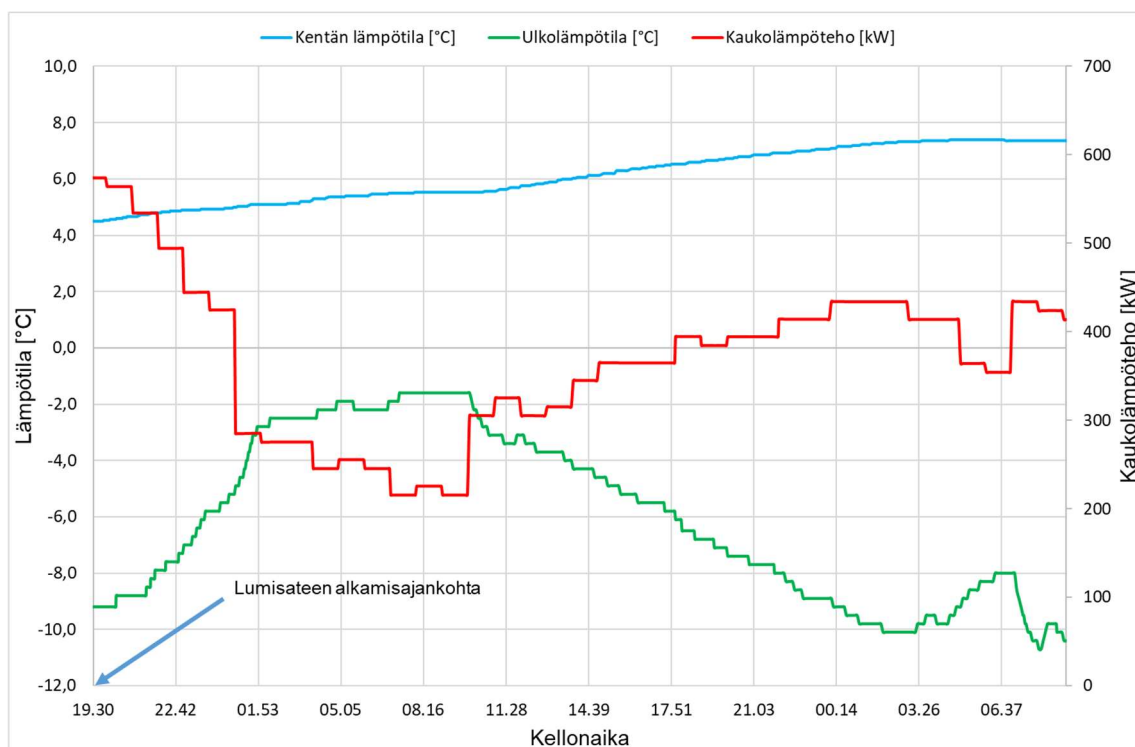
Kuva 38. Kuormituskokeen tehon pysyvyyskäyrä.

Joustokerroksen yläpuolinen lämpötila pysyi koko mittausjakson ajan yli $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$:n ja suurimman osan ajasta huomattavasti yli tavoitelämpötilan kuten kuvasta 39 voidaan havaita, lämpötila laskettuna kolmen toimivan anturin keskiarvosta. Kentän pelikuntoa tunnusteltiin myös murskekerroksen ollessa alle simuloineissa asetetun tavoitelämpötilan $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja sen joustavuudessa ei havaittu lämpötilasta johtuvia eroavaisuuksia. [6.]



Kuva 39. Joustokerroksen yläpuolisen lämpötilan pysyvyys.

Lumen eristävä vaikutus oli suuri, kuten myös simuloinnit osoittivat, ja sitä tulee hyödyntää kentän ohjauksessa sekä kunnossapidossa. Mikäli kentällä ei ole käyttäjiä, johtuen esimerkiksi kovista pakkasista, tulee kentän aurausta välttää, jolloin lumen eristävyydellä saavutetaan merkittäviä säästöjä lämmityskustannuksissa. Kuvassa 40 näkyy lumen eristävyuden vaikutus kentän lämpötiloihin kuormituskokeen viimeisiltä päiviltä, kun kentän aurausta ei suoritettu kahteen vuorokautteen aurauskaluston rikkoontumisen vuoksi.



Kuva 40. Lumen vaikutus kentän lämpötilaan.

Kuormituskokeen tulokset antoivat lisävarmuuden simulointimallin tuloksista sekä arvokasta lisätietoa lämmityksen ohjaukselta varten. Simulointimallia ei nähty tarpeelliseksi kalibroida kuormituskokeen tuloksilla, vaan lämpökaivokentän simuloinnit toteutettiin olemassa olevan mallin avulla. Liitteen 9 perusteella päädyttiin luomaan tarkennettu lämmitysjärjestelmän säätökäyrä kohteen urakkalaskentaa varten. Säädon toimintaa tullaan testaamaan ja optimoimaan järjestelmän valmistuttua. [6.]

6 Pohdinnat

Pohdintojen luvussa 6.1 esitetään yhteenveto oikeanlaisella suunnittelulla saavutettavista säästöistä tekonurmen energijärjestelmissä. Luvuissa 6.2...6.5 käsitellään insinööryön aihealueesta syntyneet pohdinnat sekä lisätutkimusta vaativat asiat. Luvuissa 6.6...6.8 esitetään tekonurmen energijärjestelmän kannalta oleellisia aihealueita, joista tulee mielestäni tehdä vähintään insinööryön laajuutta vastaava tutkimus. Lopuksi luvussa 6.9 on oma arvio työn onnistumisesta sekä työn aikana opituista asioista ja luvussa 6.10 erityismaininnat hankkeen ja insinööryön mahdollistaneista henkilöistä.

6.1 Energiankulutus

Tulosten perusteella lämmitettävien tekonurmien energiankulutusta ja siitä aiheutuvia kustannuksia sekä hiilidioksidipäästöjä voidaan pienentää merkittävästi. Matalien käyttölämpötilojen vuoksi valtaosa lämmityskauden aikaisesta lämmitysenergiasta voidaan tuottaa maalämpöpumpun avulla todistetusti jopa yli 7:n lämpökertoimella.

Taulukossa 26 on yhteenveto vuotuisesta ostoenergian määrästä eri toteutusvaihtoehdoilla. Maalämpöpumpun käyttämä sähköenergia on laskettu lämpökertoimella 6, joka saavutetaan myös huipputehon aikaan tuotetuilla lämpötiloilla käytettäessä markkinoilla olevia alun perin vedenjäähdytyskoneiksi tarkoitettuja koneikkoja.

Taulukko 26. Yhteenveto vuotuisesta ostoenergian määrästä eri vaihtoehdoilla.

Ostoenergiat [MWh/a]	Kaukolämpö lumen sulatuksella	Kaukolämpö lumen aurauksella ja harjauksella	Maalämpö lumen aurauksella ja harjauksella
Kaukolämpö [MWh/a]	1416	778	130
Lämpöpumppusähkö [MWh/a]	-	-	108
Pumppaussähkö [MWh/a]	15	32	79
Sähkö [MWh/a]	15	32	187
Säästö alkuperäiseen [MWh/a]	-	620	1113

Taulukossa 27 on yhteenveto vuotuisista ostoenergian kustannuksista eri vaihtoehdoilla. Laskennassa ei ole otettu huomioon kaukolämmön perusmaksua. Kaukolämmön hintana on käytetty arvoa 67 €/MWh ja sähkön hintana 90 €/MWh.

Taulukko 27. Yhteenveto vuotuisista ostoenergian kustannuksista eri vaihtoehdoilla.

Ostoenergiat [€/a]	Kaukolämpö lumen sulatuksella	Kaukolämpö lumen aurauksella ja harjauksella	Maalämpö lumen aurauksella ja harjauksella
Kaukolämpö [€/a]	94872	52126	8710
Lämpöpumpussähkö [€/a]	-	-	9720
Pumppaussähkö [€/a]	1308	2891	7140
Kustannus [€/a]	96180	55017	25570
Säästö alkuperäiseen [€/a]	-	41163	70610

6.2 Simulointiohjelma

Simulointiohjelman haasteet liittyvät sen asettamiin suuriin vaatimuksiin käyttäjän kyvystä arvioida lähtötietoja. IDA ICE Rinks and Pools-sovelluksen kykenemättömyys laskea 3-ulotteista lämmönsiirtoa on toivottava kehitysosa-alue. Ohjelman Boreholes-lisäosan käytettävyyttä lämmitettyjen tekonurmien simuloimiseen kannattaisi tämän vuoksi tutkia, jolloin erilaisten rakenne- sekä putkitusratkaisujen vertailu helpottuisi.

Ohjelman sisäinen kirjasto eri rakenneaineista ja niiden ominaisuuksista nopeuttaisi lähtötietojen keräämistä. Ominaisuuksien osalta myös aineksen veden läpäisevyys ja tämän kautta vaihtelevan vesipitoisuuden vaikutus rakenteiden aineominaisuuksiin on toivottava lisä simulointeihin.

Simulointimallin käytettävyyttä järjestelmän ohjaukseen kannattaisi myös tutkia. Kohteen valmistuttua malli voitaisiin kalibroida todellisten mittauksien avulla, minkä jälkeen se pystyisi ennustamaan tulevia vaihteluita kentän lämpötilassa ja ohjaamaan järjestelmää tiedon perusteella.

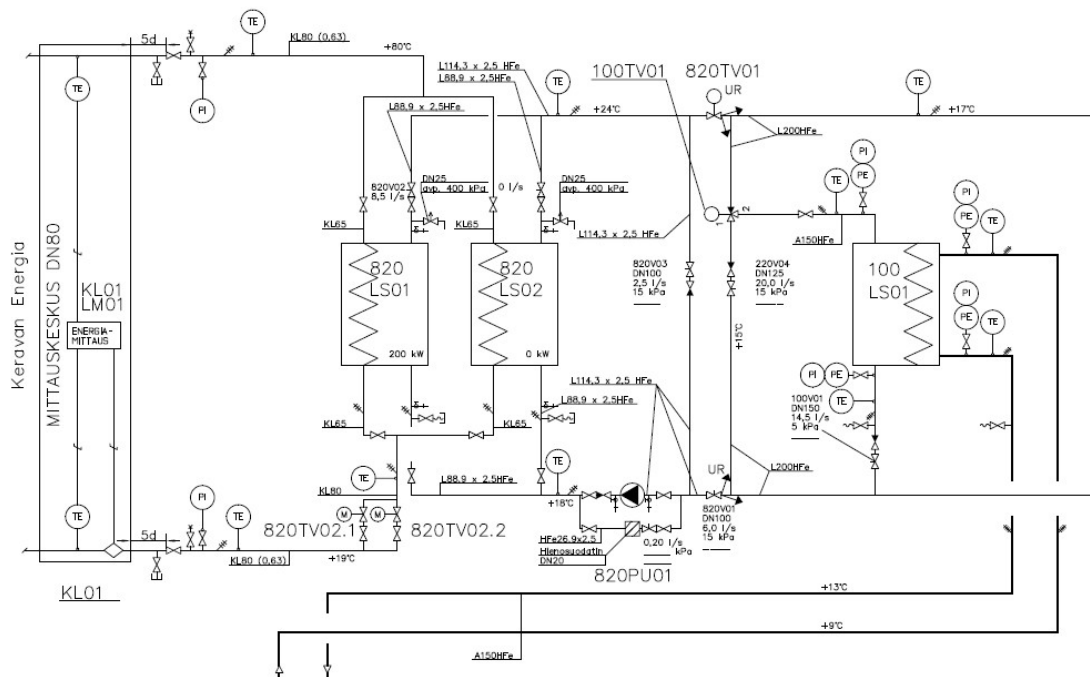
6.3 Tekonurmialueen rakenne

Aiemmin toteutettujen järjestelmien toiminta on perustunut suuriin tehoihin ja nopeaan lämmönluovutukseen lumen sulattamiseksi. Tämän johdosta olemassa olevat rakenneratkaisut perustuvat hyvin pitkälti samaan ajattelumalliin. Rakennemallin optimointiin kannattaa mielestäni käyttää tutkimusresursseja lisäsäästöjen löytämiseksi järjestelmän energia- ja hankintakustannuksissa. Esimerkiksi kasvattamalla lämmönluovutusputkiston alapuolisten rakenteiden lämmönvarauskykyä saataisiin aikaan suurempi lämpöpuskuri, joka leikkaisi huipun käyttöaikaa entisestään.

6.4 Lämmönluovutusliuos

Lämmönluovutusliuoksen osalta voidaan saavuttaa merkittäviä eroja varsinkin hankintakustannuksissa, joten vaihtoehtoja kannattaa tutkia laajemmin ja syvällisemmin. Etanolin kohdalla pelko leimahduspisteen saavuttamisesta voitaisiin välttää esimerkiksi lisäämällä järjestelmään lämmönsiirrin, joka toimisi samalla kuvassa 41 olevan kaukolämpösiirtimen suojauspiirinä kentästä palaavalle kylmälle liuokselle.

Nykyinen LjH



Kuva 41. Kaukolämmön suojauspiiri.

6.5 Putkisto

Lämmönluovutusputkiston osalta kannattaisi tutkia sisältä rihlattujen putkistojen (kuva 42) käyttöä korkeamman sisäpuolisen lämmönsiirtokertoimen saavuttamiseksi. Lämmitystilanteessa tästä ei luultavasti saavuteta hyötyä, kuten työssä tehdyn kuormituskokeen tulokset osoittivat, mutta käytettäessä tekonurmea kesäaikaiseen lämpökaivojen lataukseen hyöty voisi olla merkittävä.



Kuva 42. Turbocollector, leikkauskuva [59].

Jakotukkien sijoittamisella kentän pitkälle sivulle saavutettaisiin entistä tasaisempi lämmönjako ja pienemmät painehäviöt lämmönluovutusputkistossa. Lämmönluovutuspiirin kokonaisvirtaamaa jouduttaisiin kuitenkin luultavasti kasvattamaan vaaditun tehon saavuttamiseksi. Putkiston materiaalikustannukset ja liitosten määrä nousevat ratkaisussa hieman.

Jakotukkien sijoittamiseen voitaisiin usein käyttää kentän laidalla olevia katsomorakenteita, mikä säästäisi koteloinnin kustannuksissa. Vaihtoehdossa myös kentän lämmityspiirin jakaminen kahteen osaan on helpompaa, mikä mahdollistaa kentän lämmittämisen kahdessa lohossa tarpeen mukaan. Erillisten piirien ohjauksella kentästä voidaan aurata vähäisen käytön aikana vain puolet, jolloin lumen suojassa olevan puolikkaan tehoa voidaan laskea energian säästämiseksi.

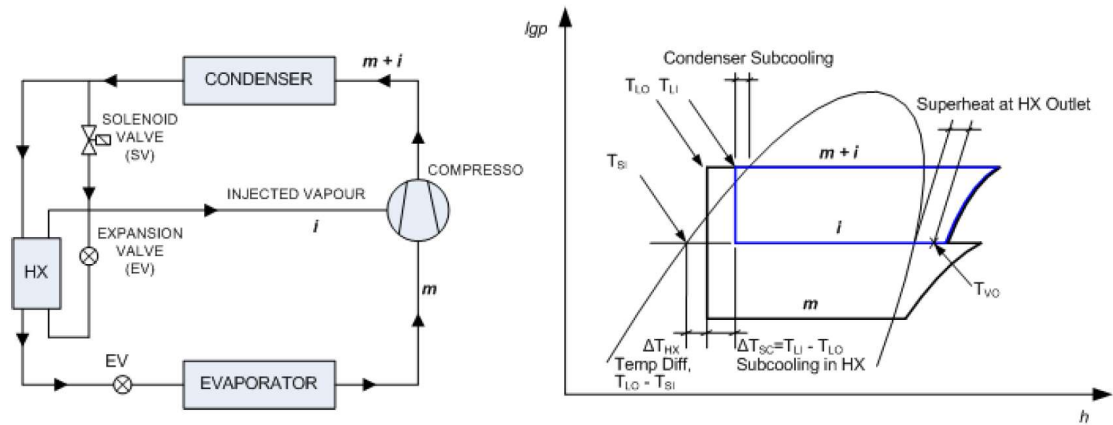
6.6 Sääto ja ohjaus

Järjestelmän sääto ja ohjaus olivat rajattuna työstä pois sen laajuuden vuoksi. Kuten tuloksista voidaan todeta, järjestelmän ohjauksella voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä energian kulutuksessa. Järjestelmän valmistuttua ohjausta tullaan optimoimaan Söderkullan kentällä FCG:n toimesta, ja aiheesta tulee mielestäni tehdä laajamittainen tutkimus.

6.7 Lämmöpumppausjärjestelmä

Tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmä on ideaalinen lämpöpumpun kannalta stabiiliuden ja matalien käyttölämpötilojen vuoksi. Lämpöpumpulta vaadittavat matalat lauhtumislämpötilat tuottavat kuitenkin omat haasteensa, koska liikutaan kompressoreiden toiminta-alueen rajoilla. F-kaasuasetus tulee myös asettamaan rajauksia nykyisellään käytössä oleville kylmäaineille lähivuosina. Uusia kylmäaineita on tulossa markkinoille suuria määriä, mutta komponenttien saatavuuden vuoksi järjestelmien toimittajat eivät ole pystyneet vastaamaan kysyntään.

Suomalainen, muun muassa lämpöpumppuihin erikoistunut Oilon Technology Oy, rakensi ja testasi Lahden tehtaallaan omakustanteisesti tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmälle sopivan lämpöpumpun. Koneikossa hyödynnettiin kuvassa 43 esitettyä ekonomaiserkytöntä, jossa osa lauhttimelta alijäähtyneestä kylmäaineesta paisutetaan erillisen paisuntaventtiin kautta ristivirtalämmönsiirtimelle. Ristivirtalämmönsiirtimellä paisuntaventtiin läpi tullut kylmäaine höyrystetään kylläiseksi sekä tulistetaan lauhttimen päävirtauksesta saatavalla energialla. Tulistunut kylmäaine johdetaan kierukkakompressoriin kesken puristuksen, jolloin saavutetaan pienempi painesuhde ja tätä kautta korkeampi lämpökerroin.



Kuva 43. Ekonomaiserkytkennän toimintaperiaate [61].

Ratkaisulla saavutetaan laskennallisesti jopa 8,68:n lämpökerroin 47,7 kW:n lämpötehon tuottavalla kompressorilla, höyrystyslämpötilan ollessa $-5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lauhtumislämpötilan $+12,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. [60]

Lämmöpumppausjärjestelmästä kannattaa tämän vuoksi tehdä tutkimus, jossa mitoitetaan ja optimoidaan järjestelmän toiminta eri pisteissä korkeimman lämpökertoimen saavuttamiseksi. Tutkimuksessa tulee myös käsitellä uusia kylmäaineita, joilla on nykyiset ja lähitulevaisuuden lainsäädännön täyttävät ominaisuudet.

6.8 Lämmönkeruujärjestelmä

Lämpökaivokentän energiatasapainon saavuttamiseksi sinne tulee palauttaa mahdollisimman lähelle sieltä otettua vastaava energiamäärä. Lämmönkeruujärjestelmänä toimii kesäaikaan myös tekonurmi, joten tutkimuksessa tulee tehdä ristiin tarkastelua lämmönluovutusjärjestelmän kanssa. Lämpökaivojen poraussyvyyttä ollaan näillä näkymin kasvattamassa, ja myös keruuteknikka tulee eroamaan nykyisestä. Syvemmät kaivot mahdollistavat järjestelmän hyödyntämisen myös tontin ollessa pienempi. Keruujärjestelmän optimoinnista tulee mielestäni tehdä tutkimus, koska kaivokenttien kustannukset ovat merkittävät ja vaikuttavat näin ollen suuresti takaisinmaksuaikaan.

6.9 Itsearviointi

Insinööriyön tarkoituksena on ollut käydä tekonurmen lämmönluovutusjärjestelmän mitoitus läpi sekä osoittaa kuntien liikuntapalveluiden tuottajille, kuinka suuri säästöpotentiaali energiankulutuksessa on saavutettavissa oikeanlaisella mitoituksella. Työn laajuudesta johtuen monen osa-alueen tutkinta jäi vähäiseksi, mutta työ antaa yksittäisen toteutusvaihtoehdon ja hyvät lähtötiedot huomion arvoisista asioista tulevien kohteiden suunnittelijoille. Järjestelmän mitoituksen kannalta tulee muistaa kohteen sijainnin ja yksittäisten eroavaisuuksien vaikutus kokonaisuuteen. Tämän vuoksi lämmönluovutusjärjestelmä tulee simuloida tapauskohtaisesti.

Insinööriyötä tehdessäni olen oppinut laajasti tekonurmen energiajärjestelmästä, mutta ennen kaikkea prosessien pilkkomisen tärkeydestä ajatustasolla, kun optimoidaan energiatehokkuutta. Hyvin pieneltä vaikuttava yksityiskohta voi tarkemmin tarkasteltuna olla kriittinen prosessin toiminnan kannalta, kun poistetaan tarpeeton ylimitoitus.

6.10 Erityismaininnat

Lopuksi haluan kiittää seuraavia henkilöitä hankkeen onnistumisesta sekä insinööriyön mahdollistamisesta toiminnallaan:

Ilari Myllyvirta	Sipoon kunta
Jukka Haakana	Sipoon kunta
Piritta Forsell	Sipoon kunta
Antti Nousiainen	Sipoon kunta
Mika Autiapelto	FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy
Aki Valkeapää	Metropolia AMK
Jouko Niemelä	Equa Simulations Finland Oy

Lähteet

- 1 Autiopelto, Mika. 2017. Selvitysraportti: Energiatlehokkuuden parantaminen, Söderkullan lämmitetty urheilukenttä. Sipoon kunta.
- 2 Auvinen, Tero. 2018. Suomen Palloliitto. Sähköpostikeskustelu 07.11.2018
- 3 Seiro, Jan. 2016. Insinööriyö. Jalkapallokentän lämmityksen energiankulutus suomessa. Kymeenlaakson ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 4 Finnish Consulting Group. 2018. Energiajärjestelmät. Verkkoaineisto. <<http://www.fcg.fi/fin/palvelut/energiajarjestelmat/>>. Luettu 20.12.2018.
- 5 Kenttien merkinnät ja ohjeistuksia. 2018. Verkkoaineisto. Suomen Palloliitto. <<https://www.palloliitto.fi/jalkapalloperhe/saannot-ja-maaraykset/kilpailutoiminta/kenttien-merkinnat-ja-ohjeistuksia>> Luettu 05.10.2018.
- 6 Autiopelto, Mika. 2018. Diplomi-insinööri. FCG Oy. Helsinki. Keskustelut 2018–2019.
- 7 Climate Data Download Center. 2018. Verkkoaineisto. Equa. <http://www.equaonline.com/ice4user/new_index.html> Luettu 09.08.2018.
- 8 Karjalainen, Erkki. 2018. Diplomi-insinööri. Equa Simulation Finland Oy. Helsinki. Sähköpostikeskustelu 28.08.2018.
- 9 Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. 2011. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/energiatlehokkuuden-testivuodet-nyky>> Luettu 09.08.2018.
- 10 Huuskonen, Minna. 2018. Ilmatieteen laitos, Havaintopalvelut. Helsinki. Sähköpostikeskustelu 07.03.2018.
- 11 CGR4 Pyrgeometer. 2018. Verkkoaineisto. Kipp&Zonen. <<http://www.kippzonen.com/Product/17/CGR4-Pyrgeometer#.W-m3gjoUktw>> Luettu. 07.09.2018.
- 12 Vuolle, Mika. 2018. Diplomi-insinööri. Equa Simulation Finland Oy, Helsinki. Sähköpostikeskustelu 29.08.2018.
- 13 Pomeroy, J. W., Brun, E. 2012. Physical Properties of Snow. Verkkoaineisto. <<https://www.utah.edu/>> Luettu 12.12.2018.

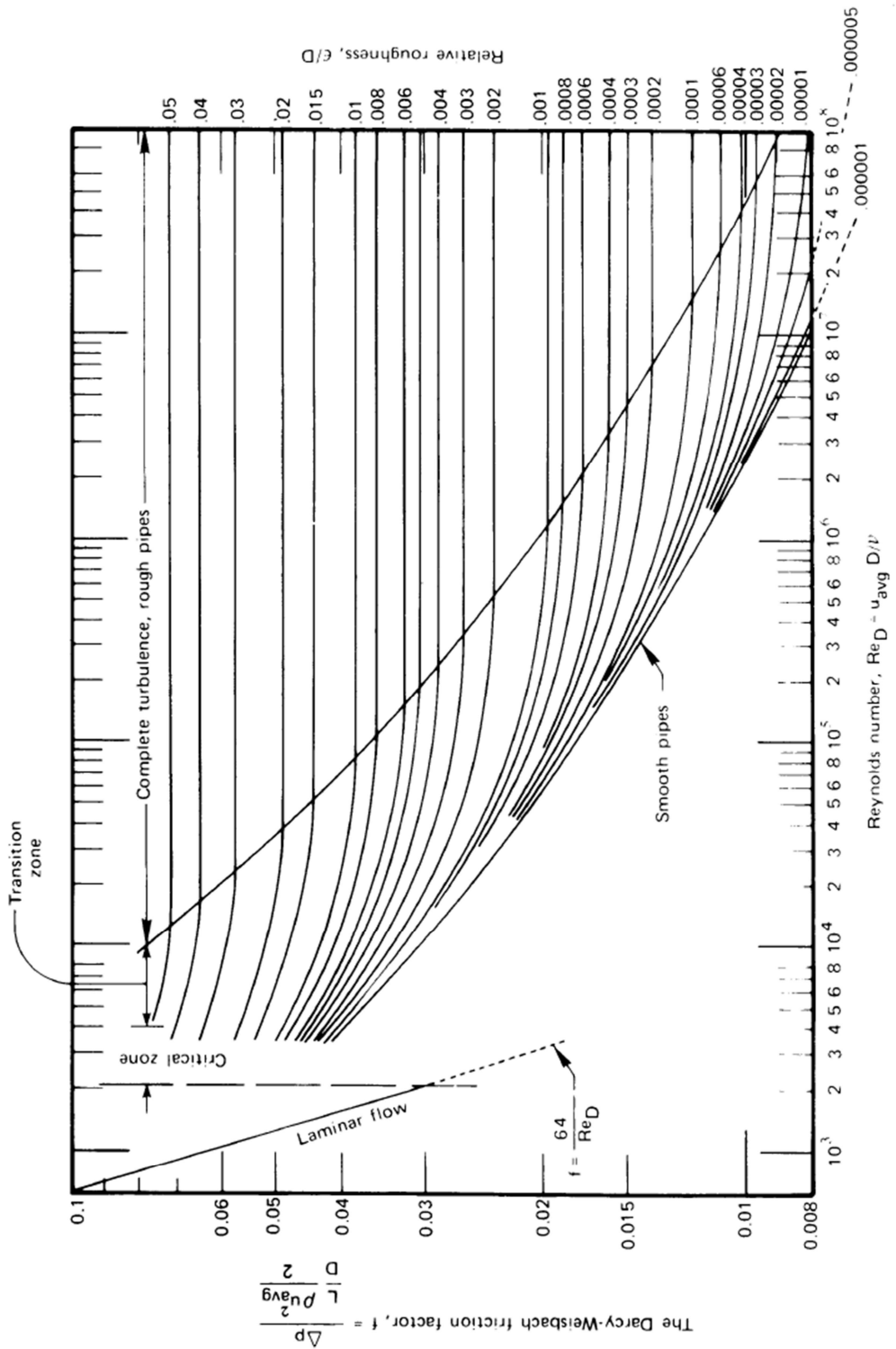
- 14 Tekonurmiopas. 2011. Verkkoaineisto. Suomen Palloliitto Ry. <<http://seuraohjelma.fi/seuranhallinto/olosuhteidenkehittaminen/tekonurmiopas>>. Luettu 30.03.2018.
- 15 Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. 2001. Verkkoaineisto. VTT <<https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2113.pdf>>. Luettu 16.05.2018.
- 16 Tekonurmen hoito ja kunnossapito sekä takuuehdot. 2016. Saltex.
- 17 Sykkö, Tomi. 2018. Tikkurilan urheilupuiston kentänhoitaja. Vantaa. Haastattelu. 15.1.2018. Haastattelijana Tero Pikkarainen.
- 18 Nousiainen, Antti. 2018. Söderkullan urheilukentän kentänhoitaja. Sipoo. Keskustelut 2018.
- 19 Niskanen, Jari-Pekka. 2018. Unisport Saltex, myyntipäällikkö. Haastattelu. 1.3.2018. Haastattelijana Tero Pikkarainen ja Mika Autiopelto.
- 20 Tekonurmirakenteen lämmönjohtavuuskokeet ja U-arvon määrittäminen. 2011. Tutkimusselostus. TTY.
- 21 Linkola, Kalle. 2018. Insinööri. FCG Oy. Lappeenranta. Keskustelut 2018.
- 22 Tampereen teknillinen korkeakoulu. 2001. Välilliset kylmälaitokset. Tampere.
- 23 Innanen, Seppo. 2016. Lämmöntuotanto- ja jäähdytysjärjestelmät, kylmäliuoksen valinta. Opetusmateriaali. Metropolia.
- 24 Käyttöturvallisuustiedote. 2015. Verkkoaineisto. Työsuojeluhallinto. <<http://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/kemialliset-tekijat/kayttoturvallisuustiedote>> Luettu 25.07.2018.
- 25 Katlyn, Terburg. 2015. 10 Glycol Tips for Water Chiller Operators. Verkkoaineisto. Smith Onandia Communications LCC. <<https://www.coolingbestpractices.com/technology/measurement/10-glycol-tips-water-chiller-operators>> Luettu 24.07.2018.
- 26 Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet – turvallisuusohjeet. 2017. Verkkoaineisto. TTL. <<http://www.ttl.fi/ova/etyleeniglykoli.html>> Luettu. 24.07.2018.
- 27 Käyttöturvallisuustiedote. 2006. Verkkoaineisto. PanReac Applichem. <https://www.applichem.com/fileadmin/datenblaetter/A2587_fi_F1.pdf> Luettu 24.07.2018.
- 28 Coolpack Version 1.50. 2012. IPU & Department of Mechanical Engineering Technical University of Denmark.

- 29 Lappi, Joni. Insinööriyö. 2013. Maalämpöpumpun lämmönkeräysjärjestelmän kehittäminen pientalokohteessa ja maalämpöjärjestelmien teknistaloudellinen vertailu. Lahden ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 30 Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet – turvallisuusohjeet. 2017. Verkkoaineisto. TTL. <<http://www.ttl.fi/ova/etanoli.html>> Luettu 24.07.2018.
- 31 Nelikenttäanalyysi – SWOT. Verkkoaineisto. Suomen Riskienhallintayhdistys. <<https://www.pk-rh.fi/tools/swot.html>> Luettu. 25.07.2018.
- 32 Seppänen, Olli. 2001. Rakennusten lämmitys. Helsinki. Suomen LVI-liitto.
- 33 Kosteiden tilojen vesikiertoisien lattialämmityksen suunnittelu kaukolämmitetyssä rakennuksessa – malleja ja hyviä käytäntöjä. 2016. Verkkoaineisto. Energiateollisuus Ry. <https://energia.fi/files/1328/KosteidenTilojenLattialammitus_suunnittelu_20161202.pdf> Luettu 25.07.2018.
- 34 Valkeapää, Aki. 2016. LVI-tekniikan mitoitusperusteet, putkiverkon painehäviöt. Opetusmateriaali. Metropolia.
- 35 Lienhard, John H. IV, Lienhard, John H. V. 1981. A Heat Transfer Textbook 4th edition. 2017: Cambridge, Massachusetts, U.S.A. Phlogiston Press.
- 36 Yrjöjä, Jukka. 2016. LVI-tekniikan mitoitusperusteet, putken lämmönsiirto. Opetusmateriaali. Metropolia.
- 37 Paineputkijärjestelmät polyeteenistä (PE). 2012. Verkkoaineisto. Muoviteollisuus RY. <https://www.plastics.fi/fin/muovitieto/julkaisukirjasto/muoviteollisuus_ryn_julkaisut/>. Luettu 01.03.2018.
- 38 Energiatehokas lämmönsiirto. 2016. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/files/11106/Energiatehokas_lammonsiirto.pdf> Luettu. 25.6.2018.
- 39 Kärkkäinen, Aatos. 2010. Gasfri påfyllning av värme- och kylsystem samt injustering av radiatorsystem. Väitöskirja. Aalto university. Aaltodoc.
- 40 Juselius, Juha. Kandidaatintyö. 2015. PPOOLEX-Laboratoriokoelaitteiston kaasunpoisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 41 Pozos, O., Gonzalez, C.A., Pedrozo, A., Sanchez, A., Rodal, E. 2014. Boundary between Air Entrainment and Air Transport Downstream of a Hydraulic Jump in Circular Conduits. 2014: Brisbane. Institute of Engineering.
- 42 Air in Pipelines – A Literature Review. 2005. Verkkoaineisto. HR Wallingford. <<http://eprints.hrwallingford.co.uk/1477/>>. Luettu 02.11.2018.

- 43 Lubbers, Christof L. Väitöskirja. 2007. On gas pockets in wastewater pressure mains and their effect on hydraulic performance.
- 44 Beier, Richard A. 2009. Purging and Air Removal. Verkkoaineisto. <<https://studylib.net/doc/18287356/purging-and-air-removal---igshpa>>. Luettu 02.11.2018.
- 45 Niemelä, Jouko. 2018. Diplomi-insinööri. Equa Simulation Finland Oy. Helsinki. Keskustelut 2018–2019.
- 46 Maahan ja veteen asennettavat kestumuoviputket. 2013. RIL 77. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- 47 Löppönen, Jyrki. 2018. Tuotepäällikkö. Uponor Infra Oy. Nastola. Sähköpostikeskustelu 06.09.2018.
- 48 Putkistojen lämpölaajeneminen. 2001. Verkkoaineisto. Rakennustieto. <<https://www.rakennustieto.fi/kortistot/tuotteet/LVI8335.html.stx>> Luettu 07.09.2018.
- 49 Ledningsbyggande med plaströsystem. 1999. Verkkoaineisto. NPG. <http://www.pipelife.fi/media/se/ladda-ner/Installationsanvisningar/NPG-Ledningsbyggande-med-plastrorsystem-mars-1999_1.pdf> Luettu 21.05.2018.
- 50 Paljetasain laipoin EPDM. 2018. Verkkoaineisto. Ahlsell. <<https://www.ahlsell.fi/34/lv/venttiilit/paljetasaimet-rst/paljetasaimet-hst-kytkentaletkut/1485611/>> Luettu 07.09.2018.
- 51 Valkeapää, Aki. 2016. LVI-tekniikan mitoituspäätökset, keskipakopumput. Opetusmateriaali. Metropolia.
- 52 Hossain, M. A., Islam, M. S., Chowdhury, M. M. H., Sabuj, M. N. H., Bari, M. S. 2011. Performance Evaluation Of 1.68 kWp DC Operated Solar Pump With Auto Tracker Using Microcontroller Based Data Acquisition System. International Conference on Mechanical Engineering 2011, ICME2011, Bangladesh.
- 53 Huang, Joe. 2018. President at White Box Technologies. San Francisco. White Box Technologies. Sähköpostikeskustelu 14.09.2018.
- 54 IDA Indoor Climate and Energy. 2018. Verkkoaineisto. Equa. <<https://www.equa.se/fi/ida-ice>>. Luettu 17.11.2018.
- 55 Niemelä, Jouko. 2018. Diplomi-insinööri. Equa Simulation Finland Oy. Helsinki. Sähköpostikeskustelu 07.09.2018.
- 56 Niskanen, Jari-Pekka. 2018. Myyntipäällikkö, Unisport Saltex. Sähköpostikeskustelu. 14.11.2018.

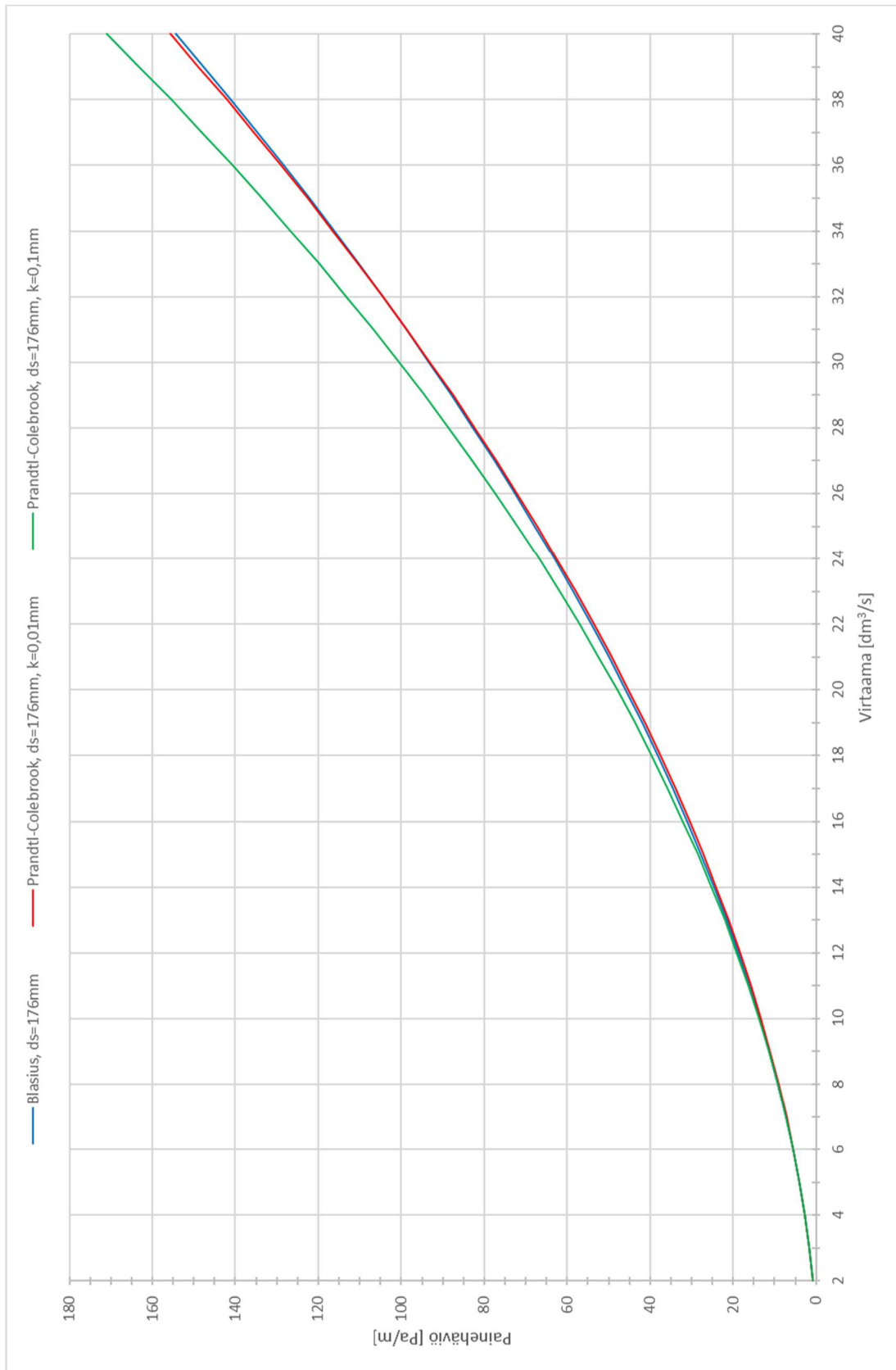
- 57 Teollisuusetanolit – yleistietoa etanolista. 2013. Verkkoaineisto. Altia. <<https://docplayer.fi/178676-Teollisuusetanolit-yleistietoa-etanolista-tuotetiedot.html>> Luettu 26.07.2018.
- 58 Pakarinen, Mauno. 2019. Diplomi-insinööri. Kolmeks Oy, Turenki. Sähköpostikeskustelu 30.1.2019.
- 59 Turbocollector. 2019. Verkkoaineisto. MuoviTech. <<https://www.muovitech.fi/default.asp?page=turbo2>> Luettu 30.1.2019.
- 60 Keto, Matias. 2019. Tutkimus- ja kehityspäällikkö. Oilon Technology Oy. Lahti. Sähköpostikeskustelu 07.02.2019.
- 61 Technical Information, Enhanced Vapour Injection (EVI) For ZH Copeland™ Scroll Compressors. 2014. Verkkoaineisto. Copeland. <<https://climate.emerson.com/en-gb/shop/1/copeland-copeland-scroll-zhi05-23k1p-compressors-en-gb>> Luettu 07.02.2019.

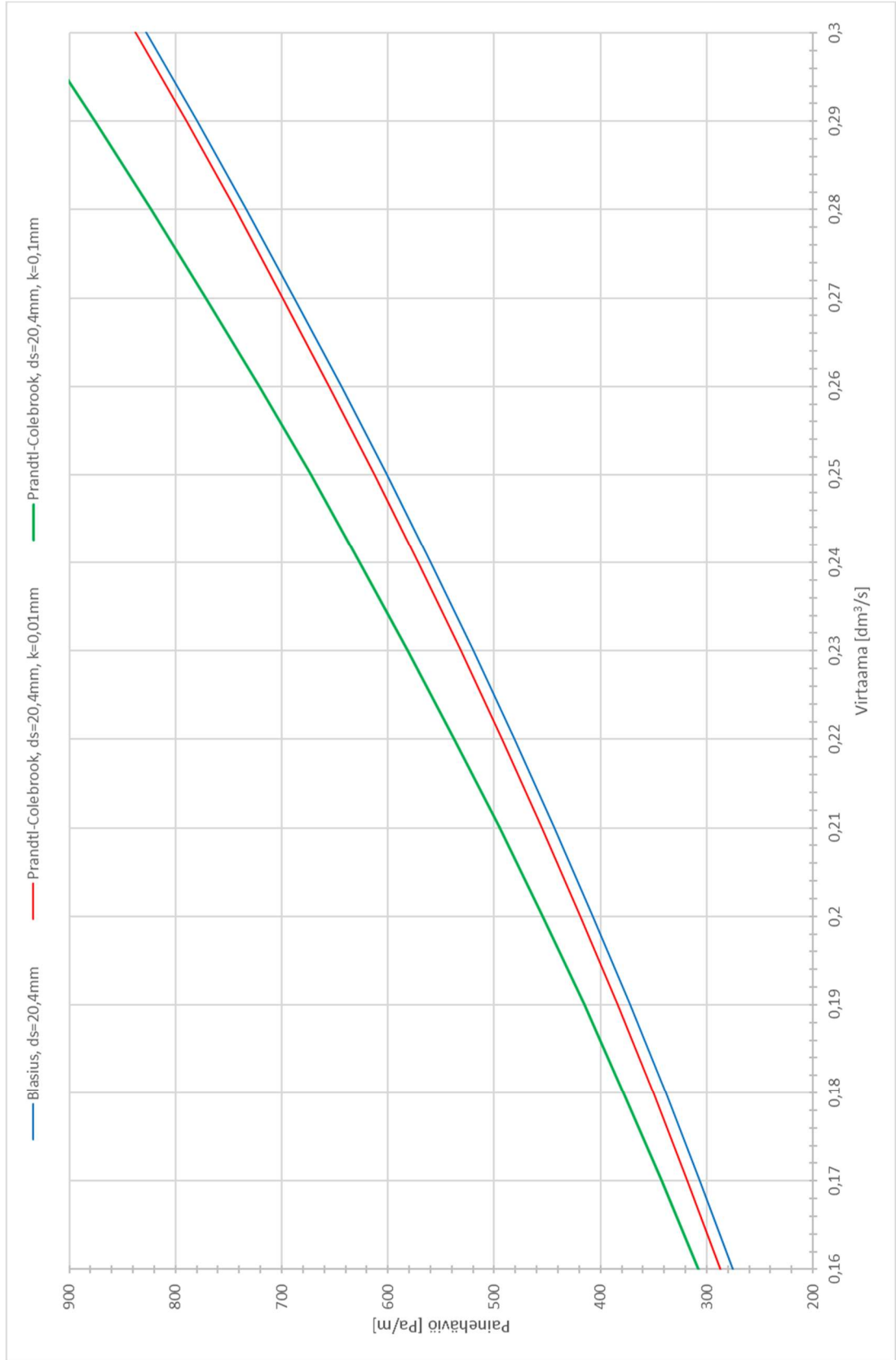
Moodyn diagrammi



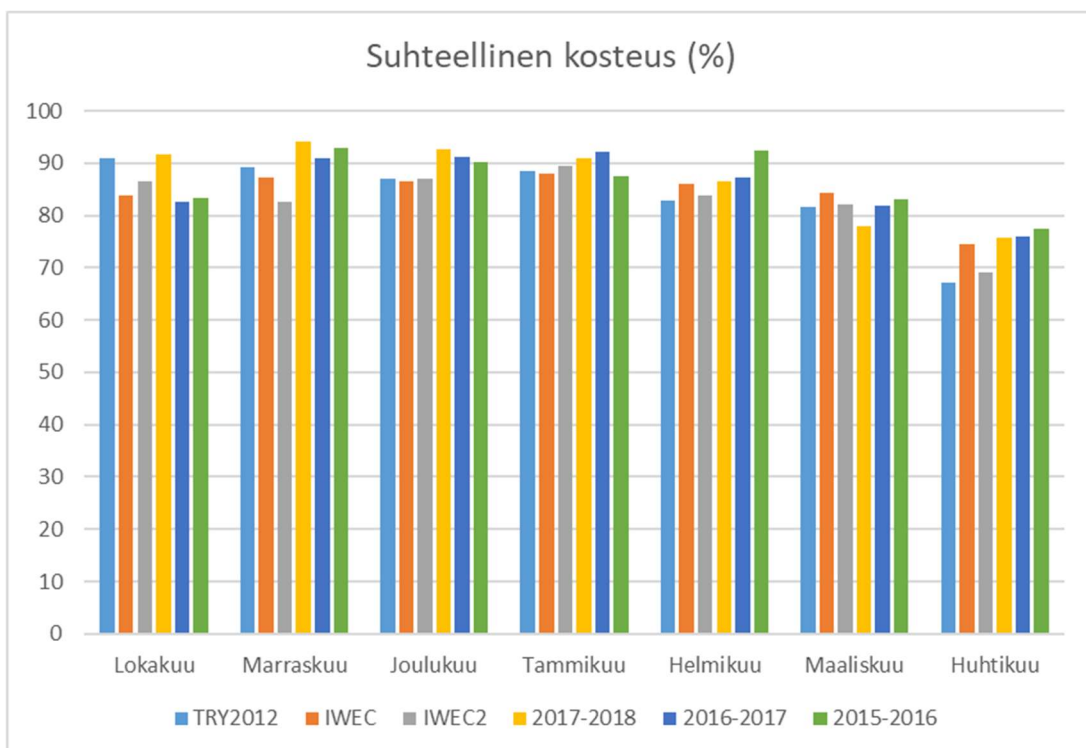
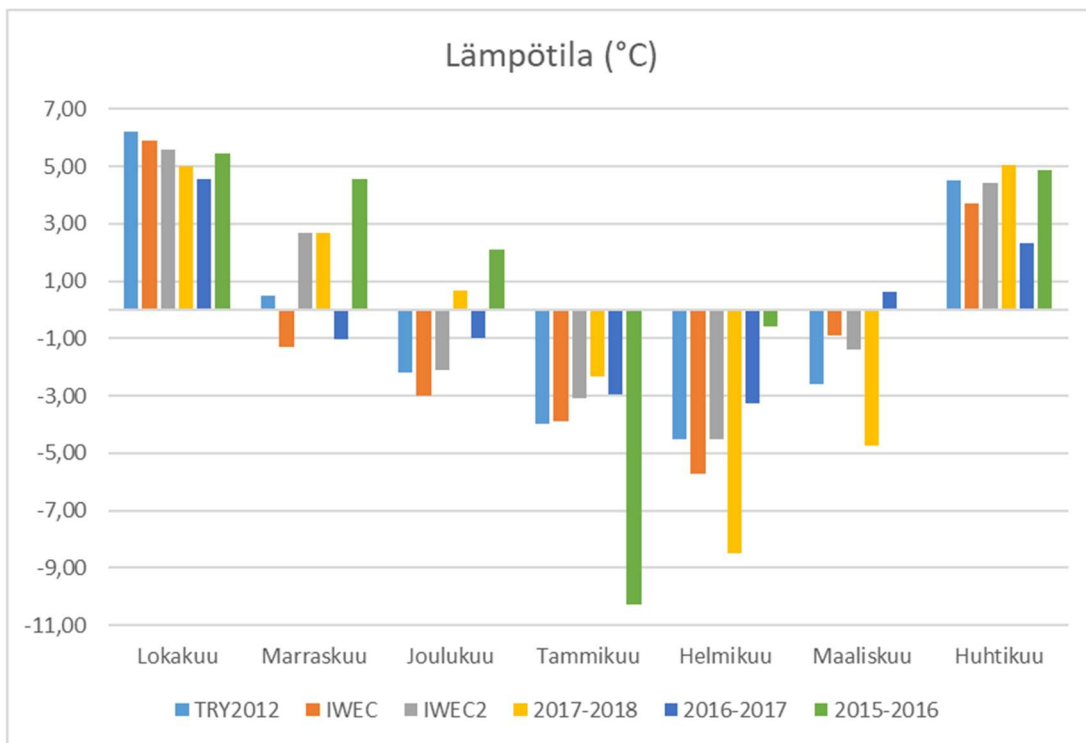
[35, s. 361]

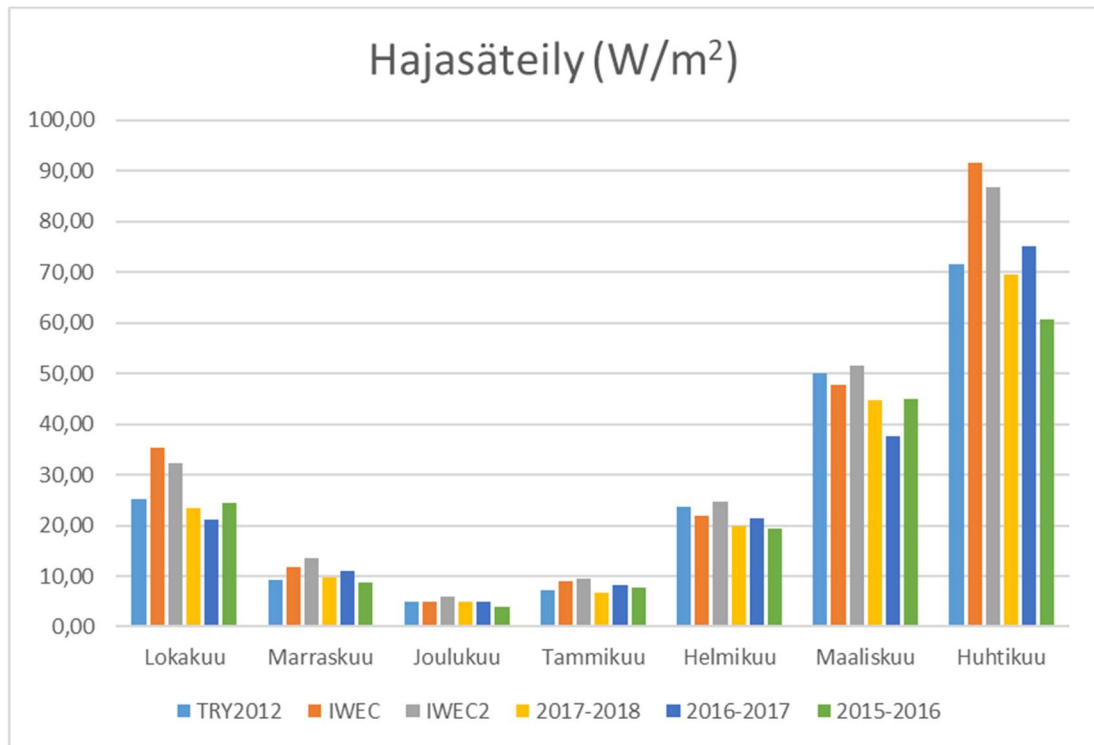
Painehäviölaskentayhtälöiden vertailu: Blasius vs. Prandtl-Colebrook



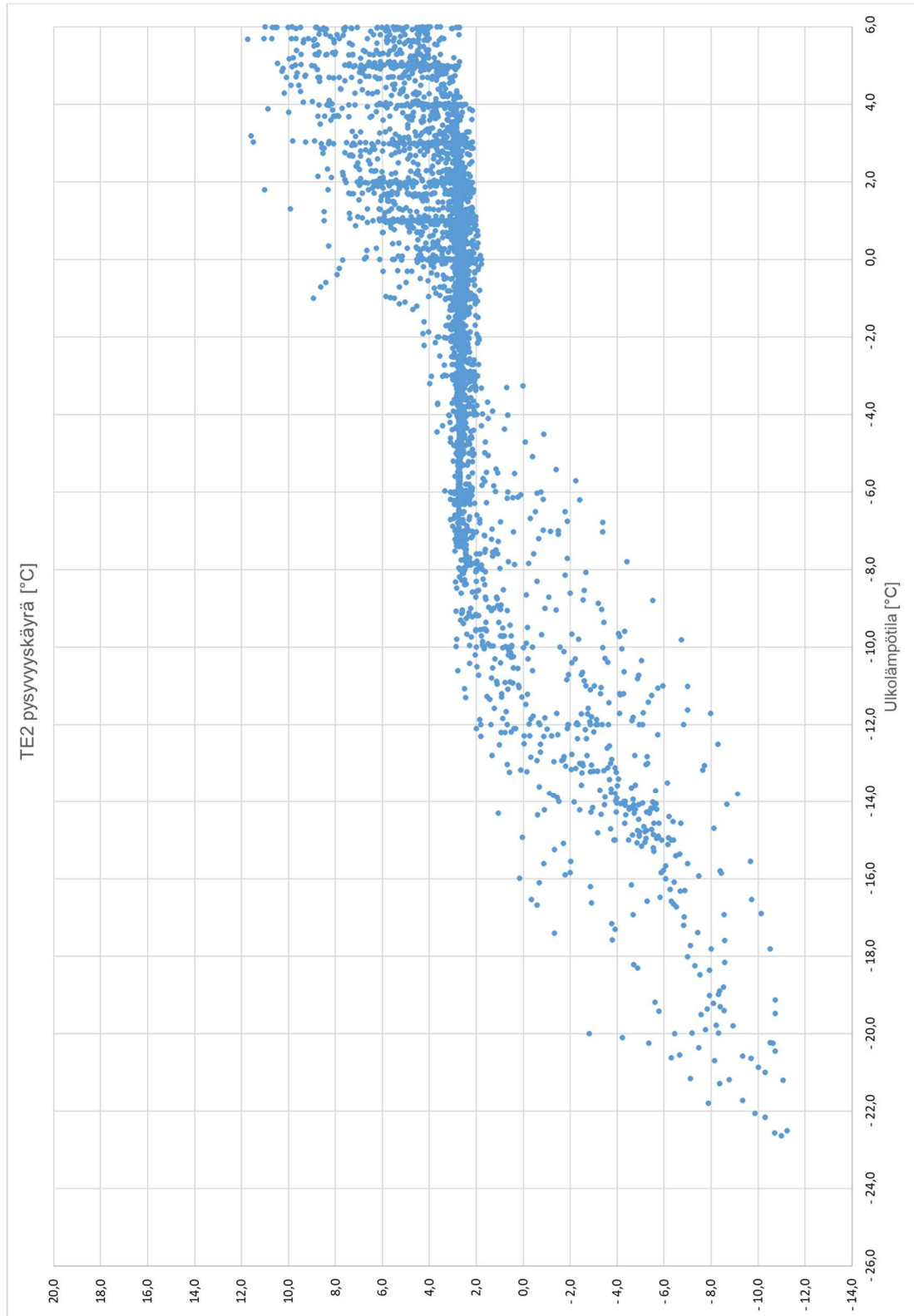


Säädatan vertailu

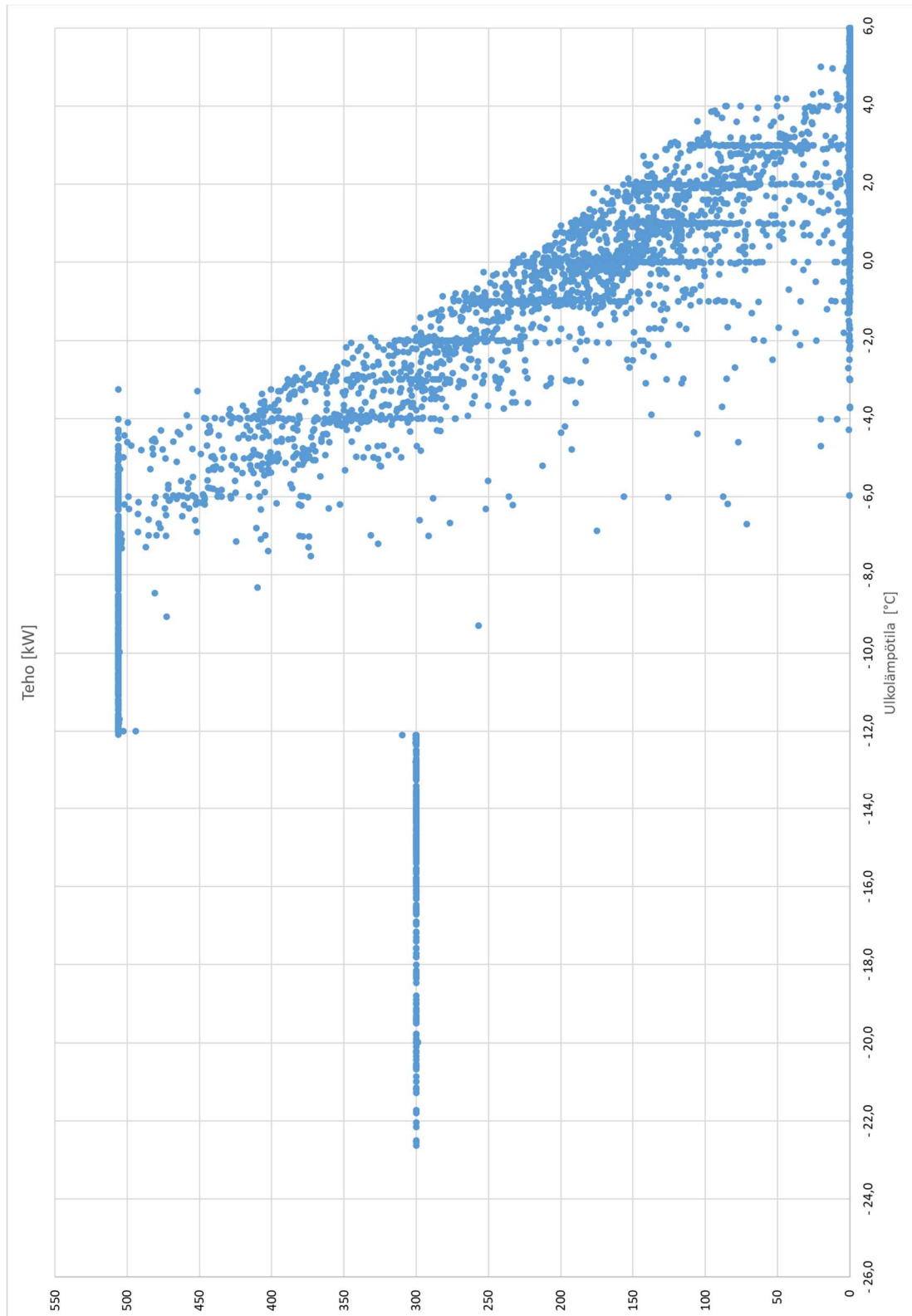




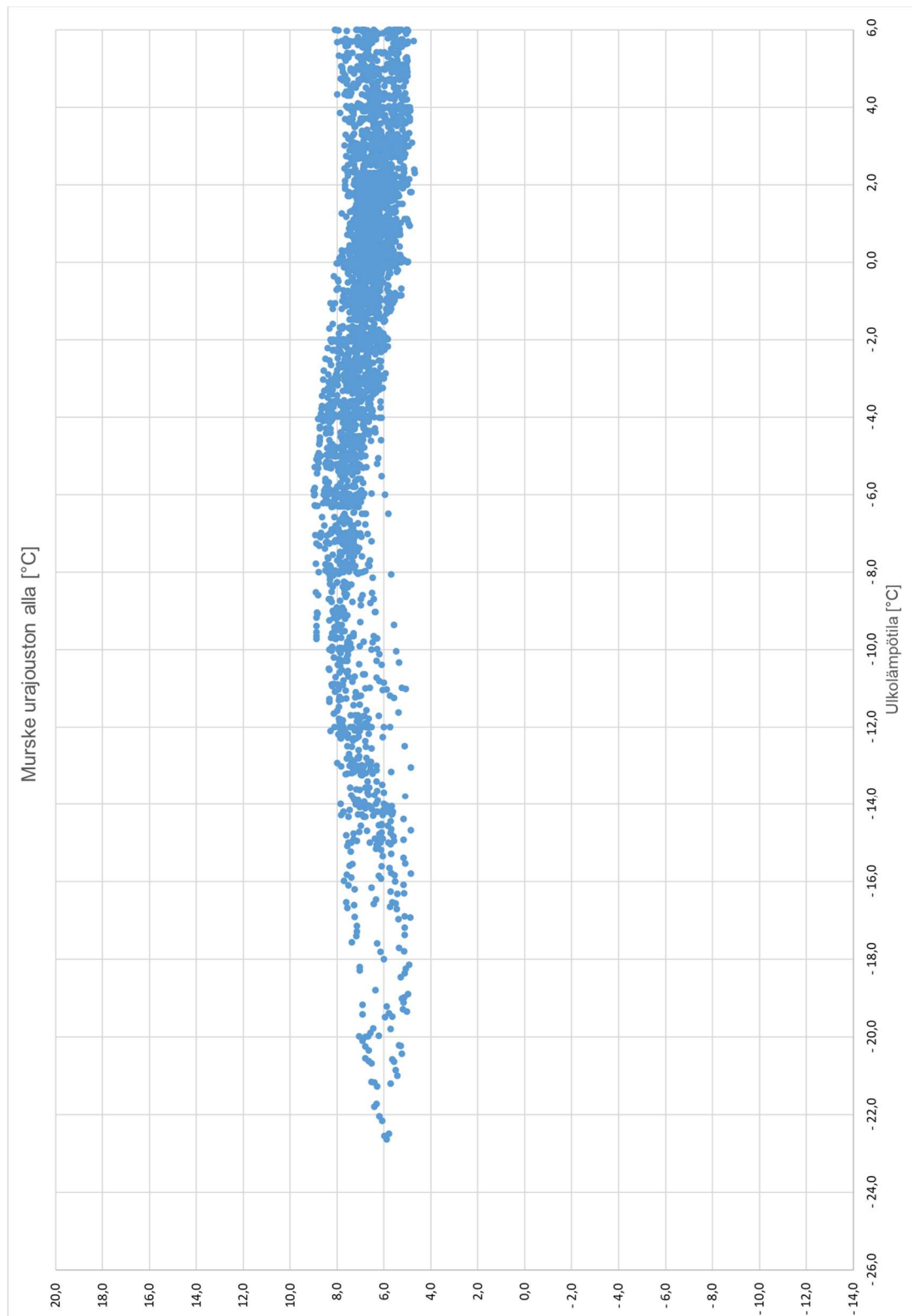
TE2: pysyvyys ulkolämpötilan funktiona



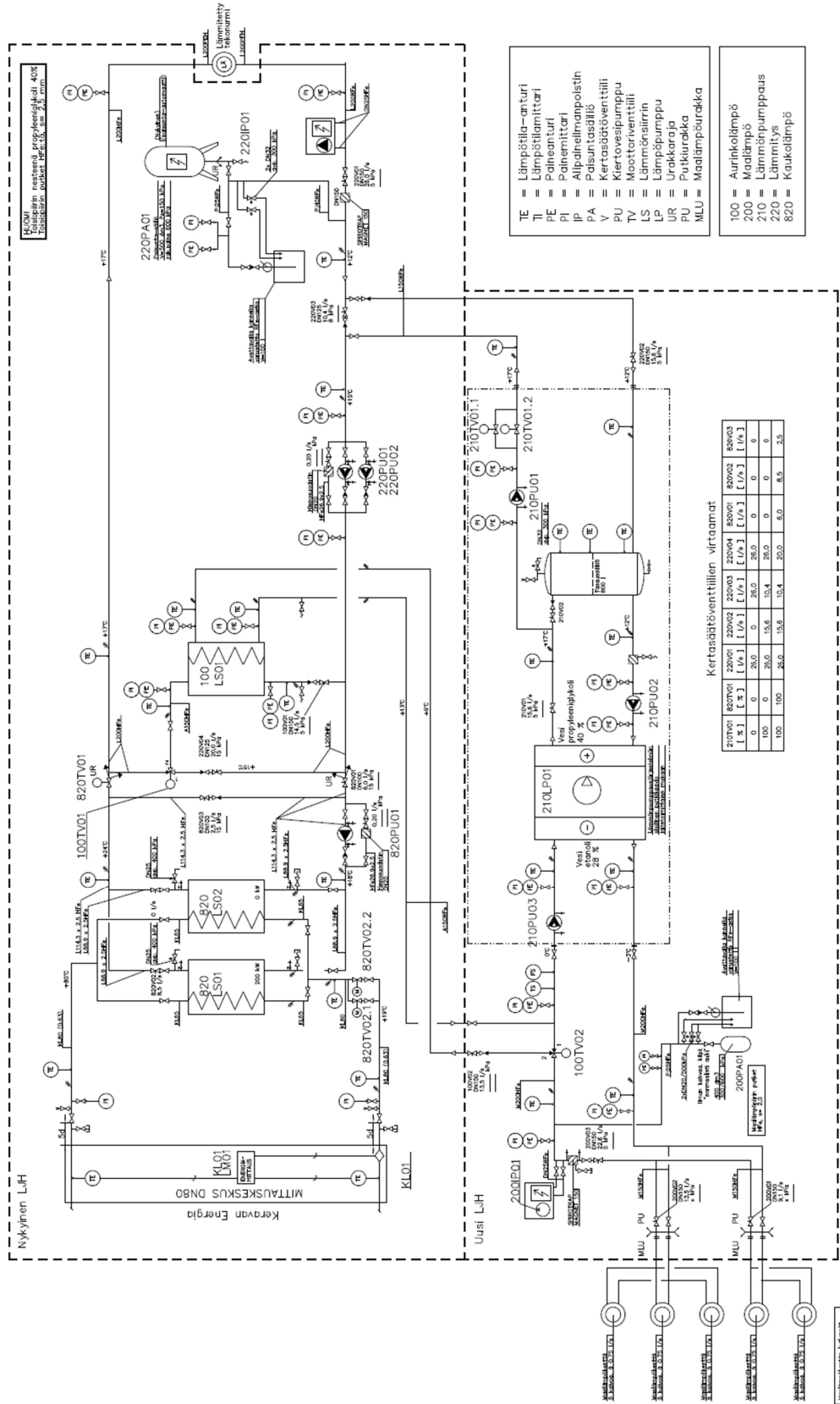
Tehon pysyvyys ulkolämpötilan funktiona



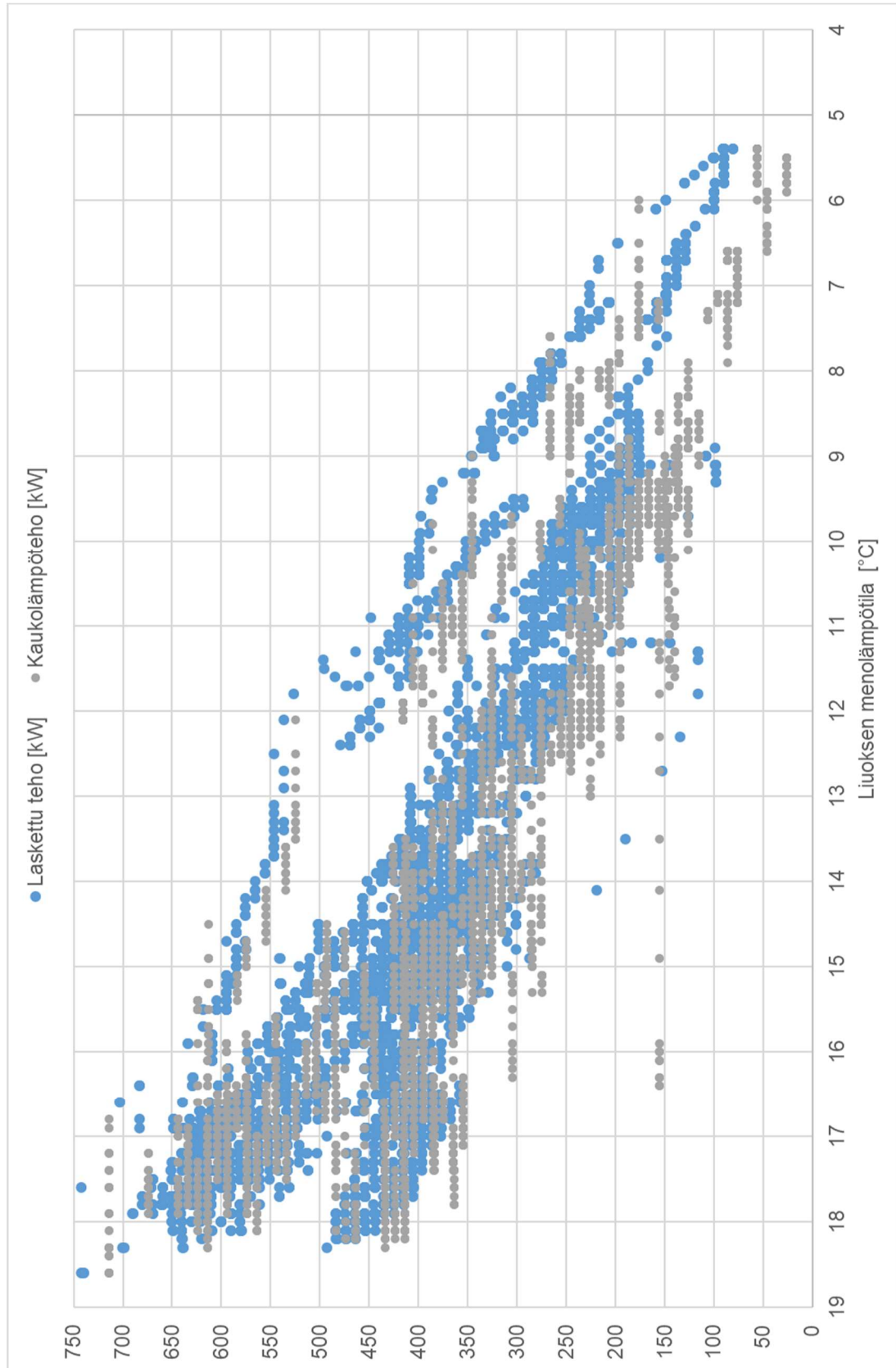
Urajouston alapuolisen murskekerroksen lämpötilan pysyvyys ulkolämpötilan funktiona



Järjestelmän kytkentäkaavio



Kuormituskoe: laskettu teho verrattuna Keravan energian mittaukseen



Kuormituskoe: menoliuoksen lämpötila ja liuoksen jäähtymä

