

Sami Ventä

Sulanapidon tehonmitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinööriytyö

7.4.2014

Tekijä Otsikko	Sami Ventä Sulanapidon tehonmitoitus
Sivumäärä Aika	39 sivua + 4 liitettä 7.4.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	yliopettaja Aki Valkeapää osastonjohtaja, LVI Jukka Tyni
<p>Tämän insinööriyön tarkoituksena oli tuottaa talotekniikka-suunnittelutoimistolle helppokäyttöiset laskentakaavat ulkoalueen sulanapitojärjestelmän tehon mitoittamiseksi. Totuudenmukaisen sulanapitojärjestelmän tehon määrittämiseksi on työssä selvitetty lämpöhäviötehojen ja lumenominaisuuksien vaikutusta tehoon. Lisäksi on esitetty omat laskukaavat tehon laskemiseksi varsinaisen lumen sulatuksen jälkeen tapahtuvan sulaveden jäätyksen estämiseksi. Laskukaavojen tuloksien oikeellisuutta oli tarkoitus tarkastella kenttämittauksissa toteutetulla vesikiertoisella alueen sulanapitokohteella, josta mitattiin toteutunut teho sekä sulatetun ja sataneen lumen ominaisuudet.</p> <p>Insinööriyön teoriaosuus koostuu kolmesta osa-alueesta: Suomen sääolosuhteet, alueen sulanapito tehojen laskentakaavat ja yleisimmät alueen sulanapitojärjestelmän rakennetekniset ratkaisut, jotka perustuvat kirjallisiin lähteisiin. Kenttämittauksilla mitattiin toteutetun vesikiertoisen alueen sulanapitojärjestelmän hetkellisiä kokonaistehoja mittaamalla lämmönsiirtonesteen virtausnopeutta ja meno- sekä paluujohdon lämpötilaa. Samalla tehtiin mittauksia sulanapitopinnalla sekä sen välittömässä läheisyydessä lumen sulamisesta ja sateessa kerääntyneen lumen ominaisuuksista. Mitatuilla lumen ominaisuuksilla ja toteutetun järjestelmän häviöillä pystyttiin laskennallisesti ratkaisemaan järjestelmän kokonaisteho.</p> <p>Työn tuloksena syntyi helppokäyttöiset kansainvälisen yksikköjärjestelmän mukaiset tehon laskentakaavat lumen lämmittämiseksi, sulattamiseksi ja sulaveden jäätyksen estämiseksi sulanapidettävällä pinnalla, sekä järjestelmän alapuolisiin rakenteisiin suuntautuvien johtumislämpöhäviötehojen ratkaisemiseksi. Alueen sulanapitojärjestelmän hyöty ja häviötehoista muodostettiin taulukkomuotoiset esitykset, joista voidaan arvioida sulanapitojärjestelmän häviö- ja hyötytehoja yleisimmin käytetyissä rakenteissa ja sääolosuhteissa. Kenttämittauksissa todennetun toteutetun alueen sulanapitojärjestelmän kokonaisteho mitatuissa lumiolosuhteissa pystyttiin ratkaisemaan laskentakaavoilla lähes saman suuruisiksi, eroa mitattuun kokonaistehoon oli 11 %.</p>	
Avainsanat	alueen sulanapito, katulämmitys, tehon mitoitus

Author(s) Title	Sami Ventä Designing snow melting systems
Number of Pages Date	39 pages + 4 appendices 7 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design Orientation
Instructors	Aki Valkeapää, Principal Lecturer Jukka Tyni, M.Sc
<p>The purpose of this thesis was to produce calculation formulas to define the needed heat flux for a snow melting system. To define the substantial amount of heat flux required, heat loss and the characteristics of snow had to be taken into account. The functionality of the formulas was tested with existing snow melting systems and actual weather conditions.</p> <p>The tests were carried out in an existing site with a hydronic snow melting system, by measuring the total heat flux and the characteristics of the driven snow. The heat flux was measured by calculating the heat transfer fluid's flow rate and the temperature of the fluid in both the supply and return pipes. The characteristics of the snow gathered on and in the proximity of the heated surface were also observed. The tests provided the necessary information to calculate the total heat flux required.</p> <p>As a result, to define the total required amount of heat flux, calculation formulas were produced. Both the measured and the calculated heat flux were consistent, proving the functionality of the formulas. The calculation formulas therefore enable the sizing of the total heat flux required in a snow melting system. Also, when the total required amount of heat flux is known, the capacity of the snow melting system can be defined.</p>	
Keywords	Snow melting system, Calculation formulas

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Sulanapitojärjestelmät	2
2.1	Haluttujen olosuhteiden saavuttaminen sulanapidolla	2
2.2	Aluesulanapidon käyttökohteita	3
2.3	Sulanapidon käyttökohteita	3
2.4	Aluesulanapidon hyödyt ja haitat	4
2.5	Nestekiertoisen aluesulanapidon tekninen toteutus	5
3	Suomen talvisää	6
3.1	Termiset vuodenaajat	6
3.2	Tyypillinen talvi Suomessa	7
3.3	Lumisateen eri muodot	8
4	Alueen sulanapidon tehon laskenta	10
4.1	Sulatuksen laatutaso	10
4.2	Lähtöarvojen määrittäminen	11
4.3	Aluesulanapidon laskentakaavat	12
4.4	Esimerkkitaulukot	16
4.5	Kyselytutkimus asiantuntijayrityksiin	19
5	Kenttämittaukset	21
5.1	Mittausten tavoite	21
5.2	Tarkasteltavan sulanapitoalueen tekninen toteutus	21
5.3	Mittauslaitteet	24
5.4	Mittausten suoritus	28
5.5	Mittausten tulokset	31
6	Johtopäätökset	34
6.1	Laskentamallin toimivuus	34
6.2	Tutkimusongelman ratkaiseminen	35
6.3	Jatkotutkimusaiheet	35
	Lähteet	37

Liitteet

Liite 1. Kyselytutkimuksen kysymyspohja

Liite 2. Laskennassa käytettyjen sulanapitoalueiden rakenneratkaisut,
laskentatapaukset (case) 1–6

Liite 3. Laskelmia kenttämittausten lumensulatus- ja häviötehojen ratkaisemiseksi sekä
lumen ominaisuuksien selvittämiseksi

Liite 4. Laskentakaavoilla ratkaistut alueensulanapitotehot kenttämittauksissa
mitatuissa olosuhteissa

1 Johdanto

Alueen sulanapitojärjestelmiä on jo useita maamme suurimmissa kaupungeissa. Niillä luodaan sulanapidettävälle pinnoille turvallisia ja kuivia olosuhteita vuodenaikana, jolloin sataa lunta. Nyky-yhteiskuntamme liikkumisen lisääntyminen ja kaupunkien keskustojen entistä vilkkaammassa käytössä olevat alueet luovat tarpeita alueen sulanapitojärjestelmille. Kokonaisia urheilukenttiä voidaan pitää sulana, ja harjoituskausia jatkaa lähes vuoden ympäri. Kauppakeskusten ulkoalueiden, torien, kävelykatujen ym. vilkkaassa jalankulun käytössä olevien alueiden sulanapidolla poistetaan liukastumisen vaara ja kiinteistönhoitotöiden, kuten lumenluonnin ja hiekoitustöiden tarve. Liikerakennusten sulat ja kuivat ulkoalueet antavat ammattimaisen kuvan kiinteistönpidosta.

Alueen sulanapitojärjestelmän tarkoitus on sulattaa sulanapidettävälle pinnalle satanut tai kulkeutunut lumi. Kun lumi on sulanut, sulavesi johdetaan pinnan kallistuksilla pois sulanapidettävältä pinnalta ja lopuksi, pinnalle jäänyt kosteus haihdutetaan lämmön vaikutuksella. Suuret järjestelmät (yli 300 m²) tehdään yleisesti vesikiertoisina. Vesikiertoisessa järjestelmässä sulanapidettävän pinnan alapuolelle on rakennettu putkipiirien verkosto, joissa kierrätetään lämmintä lämmönsiirtoliuosta. Putkipiireistä lämpö siirtyy johtumalla sulanapidettävälle pinnalle, jossa sulaminen tapahtuu. Lämmönsiirtoliuoksen matalan lämpötilatason johdosta järjestelmällä pystytään hyödyntämään joustavasti erilaisia hukkalämpövirtoja.

Tämän insinööriyön aiheena on vesikiertoisen alueen sulanapidon tehon mitoitus. Päättökäsimusongelmana oli, miten alueen sulanapitojärjestelmän kokonaisteho ratkaistaan. Kokonaistehon ratkaisemiseksi tarvittavien lähtöarvojen määrittäminen oli toinen tutkimusongelma. Työn tavoite oli luoda helppokäyttöiset laskentakaavat sulanapitojärjestelmän hyötytehojen ja häviötehojen ratkaisemiseksi. Laskentakaavojen ohella luotiin taulukot, joista voidaan arvioida tarvittava järjestelmän kokonaisteho sitä laskematta, kun lähtötiedot tunnetaan. Lisäksi suoritettiin kenttämittauksia toteutetulla vesikiertoisella alueen sulanapitojärjestelmällä, jotta voitiin todeta laskentakaavojen toimivuus.

Insinööriyöni toimeksiantaja oli Granlund Oy, joka on monipuolinen talotekniikka-alan suunnittelutoimisto. Granlund Oy:llä on yli viidenkymmenen vuoden historia

talotekniikka-alan suunnittelutehtävistä. Yrityksen yleinen käytäntö on ollut mitoittaa alueen sulanapitojärjestelmiä neliöperusteisella vakioteholla 300 W/m^2 , joka on todettu aiemmissa projekteissa Etelä-Suomen alueella toimivaksi [Linko 2013]. Työssä esitetyillä laskentakaavoilla voidaan ratkaista tarvittava teho, kun lähtöarvot lumen sulattamiseksi ja häviötehojen voittamiseksi tunnetaan. Suunnittelutyön tilaajalle voidaan laskennallisesti näyttää toteen, millaisia olosuhteita valitulla teholla saadaan sulanapidettävällä pinnalla aikaan. Laskentakaavoilla voidaan siis ratkaista kohdekohtaisia sulanapitotehoja, mikä mahdollistaa tarkan mitoituksen myös ulkomaisissa kohteissa, kun sulanapitojärjestelmiä voidaan mitoittaa laskennallisesti ympäristön olosuhteiden mukaan.

2 Sulanapitojärjestelmät

2.1 Haluttujen olosuhteiden saavuttaminen sulanapidolla

Ulkoalueiden lämmittämiseksi eli alueiden sulanapidolla pyritään luomaan lumettomia ja kuivia olosuhteita kausilla jolloin sataa lunta. Näiden olosuhteiden saavuttamiseksi alueiden rakenteisiin on rakennettu järjestelmä, jolla lämpöenergiaa voidaan jakaa tätä tarvetta varten [Kaukolämmön käsikirja 2006: 486]. Alueiden sulanapitojärjestelmällä halutaan sulattaa satanut lumi ja kuivattaa sulaveden vesifilmikerros. Lumettomien ja kuivien olosuhteiden ylläpito vuoden kylminä aikoina on järjestelmän tärkein tehtävä. [Sipilä ym. 2001: 8, 45.]

Alueiden sulanapidolla halutaan saavuttaa etenkin turvallisia olosuhteita liukkauden torjumiseksi. Nyky-yhteiskuntamme kohonnut elintaso, liikkumisen lisääntyminen ja etenkin suureneva iäkkäiden ihmisten kansan osa kannustaa rakentamaan alueiden sulanapitojärjestelmiä. Useita urheilulajien harjoituskausia voidaan jatkaa ulkoalueilla mikäli ne ovat sulanapidettäviä. Tällaisia alueita ovat muun muassa tekonurmipohjaiset jalkapallokentät [Joukkuelajit 2013]. Alueiden sulanapidolla poistetaan myös hiekoituksen ja suolaamisen tarve mikä poistaa myös pölyävän hiekan keräämisen keväällä [Sipilä ym. 2001: 8–9].

Sulanapidolla tarkoitetaan laajaa asiakokonaisuutta: jäätyneen nesteen sulatusta tai nesteen jäätyneen estämistä. Tyypillisesti halutaan sulattaa jäätä tai estää veden jäätymistä, sulattaa satanut, kulkeutunut ja kerääntynyt lumi, aina kun siihen on

tarvetta. Tällaiset paikalliset sulanapitojärjestelmät ovat tyypillisesti murto-osan kokoisia ja tehoisia verrattuna alueiden sulanapitojärjestelmiin. Ne poikkeavat alueiden sulanapidosta myös käyttöaikojensa puitteissa. [Sulanapitoratkaisut 2013.]

2.2 Aluesulanapidon käyttökohteita

Alueiden sulanapitoa voidaan hyödyntää monissa eri paikoissa. Lämmitettävien ulkoalueiden kirjo on kasvanut ajoramppien sähkölämmityksistä kokonaisten katujen, torien ja urheilukenttien kesäolosuhteiden kaltaisten olosuhteiden ylläpitoon. Alueiden sulanapidon ensimmäisiä sovelluksia ovat olleet pienimuotoiset sähkölämmitetyt alueet. Tällaisia alueita olivat ja ovat nykyäänkin muun muassa ajoneuvorampit ja muut vaativat kohteet, jotka ovat esimerkiksi raskaan tai vilkkaan trukkilikenteen käytössä. [Katulämmityksellä kesäkeli keskelle talvea 2001.] Etenkin lastauslaitureille ja pakkasvarastojen ovien edustoille on tyypillistä maltillinen pinta-ala [Maisalmi 2013].

Ensimmäisiä suurehkoja sulanapitojärjestelmiä lumen sulattamiseksi alueelta rakennettiin Suomessa kaupunkien keskustojen kaduille. Ensimmäinen tällainen kohde oli Helsingin Etelä-Esplanadin kävelykatu. Hyvien käyttökokemusten myötä vastaavia järjestelmiä on rakennettu lähes kaikkiin maamme suurimpiin kaupunkiin. Kaupunkien keskustoissa katualueisiin liittyy usein myös tori-, aukio- ja porrassaluiden sulanapitoa. Näissä kohteissa käytetään yleisesti lämmönlähteenä kaukolämmön paluuvettä. [Katulämmityksellä kesäkeli keskelle talvea 2001.] Liukkauden torjunnassa myös tienristeyksiä voidaan pitää sulana [Sulanapito, valikoima ja käsikirja 2007].

2.3 Sulanapidon käyttökohteita

Sulanapidolla eli jäätymisen estämisellä on lukuisia käyttökohteita. Talotekniikassa törmätään usein viemäreiden ja vesiputkien saattolämmitykseen, kun putket ovat rakennuksen ulkopuolella ja routarajan yläpuolella. Tällaisissa soveluksissa käytetään usein hyväksi itsesäätyvää tai termostaattiohjattua vastuslankaa. Rakennuksiin liittyy myös suuri joukko muunlaisia sulanapitotarpeita, näistä yleisin on huleveden tai sulamisveden jäätymisen estäminen. Räystäskouruja ja syöksytorvia lämmitetään jääpuikkojen muodostumisen ja katon rakenteiden vioittumisen estämiseksi. Kattovesikaivojen sulanapidolla pyritään estämään jäätyneen kaivon sula- tai

sadeveden padottuminen tasakatolle ja kaivon sekä katon rakenteiden rikkoontuminen. [Sulanapitoratkaisut 2013.] Lisäksi kokonaisia vesikattopintoja voidaan lämmittää rakenteiden rikkoutumisen estämiseksi ja lumikuorman poistamiseksi [Ulkoalueiden sulanapito lisää turvallisuutta talvisina aikoina 2013].

2.4 Aluesulanapidon hyödyt ja haitat

Aluesulanapitojärjestelmillä on paljon myönteisiä puolia. Ihanteellisia paikkoja ovat kaupunkien keskustat, liikepaikkojen edustat sekä muut vilkkaassa käytössä olevat alueet, jossa käyttöä on paljon ja käyttöaste on korkea. Aluesulanapito helpottaa kadun- ja alueenpitoa huomattavasti, kun lumitöiden tarve poistuu, ja liukkautta ei synny. Ei ole tarvetta myöskään hiekoittaa, suolata tai keväällä kerätä hiekoitushiekkoja. Kiinteistöhuollon tekemä lumenpoisto rikkoo toisinaan kadun reunakiviä, istutuksia, penkkejä, roskiksia ym., myös nämä ongelmat poistuvat [Putkessa 2006]. Näiden toimien välttäminen hyödyntää myös alueen kiinteistöjen kunnossapitoa, kun sisälle ei kulkeudu esimerkiksi hiekoitushiekkaa. Jalankulkijoiden tapaturmariskit, varsinkin kaatumiset vähenevät, kun alueet eivät ole liukkaita jäädästä ja lumesta. Tapaturmariskin minimointi on kiinteistön omistajille hyvin tärkeää, sillä he ovat vastuussa tapaturman syntymisestä mikäli kiinteistön hoitoa on laiminlyöty [Sulanapito 2013]. Kaiken kaikkiaan alueen käyttömukavuus kasvaa ja sula, siisti alue antaa ammattimaisen kuvan kohteen kiinteistönhoidosta. [Kaukolämmön käsikirja 2006: 486.]

Rankat lumisateet, joiden aikana lumenkertymä on suuri, ovat ongelmallisia aluesulanapitojärjestelmän käyttömukavuudelle. Alueelle voi tällöin muodostua sohjoa, ja sulavesi saattaa lammikoitua. Sulana pidettävän alueen reunat, joilta siirrytään lämmittämättömälle alueelle, ovat myös usein ongelmallisia, koska siirryttäessä akkia liukkaalle pinnalle liukastumisen riski on suuri. Kadun tai alueen pintarakenteiden alla kulkevan tekniikan huolto vaikeutuu, kun sulanapitojärjestelmän putket ovat kaivamisen tiellä. Järjestelmän huoltotyöt ja käyttöhäiriöt ovat epämiellyttäviä alueen käyttäjille. [Kaukolämmön käsikirja 2006: 489.]

2.5 Nestekiertoisen aluesulanapidon tekninen toteutus

Nestekiertoisen aluesulanapidon putkipiirit asennetaan alueen pintarakenteen alle, tällaisia pintarakenteita voi olla esimerkiksi kadulla asfaltti tai torilla betonilaatat. Putkipiirit ovat omassa kerroksessaan pintarakenteen alla. Lämpövirran kulkua voidaan ohjata haluttuun suuntaan rakentamalla putkipiirin alle eristävä kerros, jolloin häviötehot alaspäin pienenevät. Putkipiirissä kierrätetään lämmintä nestettä, josta lämpö siirtyy johtumalla kadun pintaan ja sulattaa lunta sekä kuivaa pinnan.

Nestekiertoisissa aluesulanapitojärjestelmissä voidaan käyttää hyväksi monenlaisia lämmönlähteitä, kuten kaukolämmön paluuvettä, prosessissa syntyvää jätelämpöä tai lämpöpumppuja [Sipilä ym. 2001: 11]. Eri valmistajat suosittelevat hieman erilaisia menoveden lämpötiloja, mutta yleisesti menoveden lämpötila on 30–45 °C ja jäähtymä putkipiirissä noin 15 °C. Matala lämpötilataso tekee lämmönlähteen valinnan hyvin joustavaksi. Mikäli putkipiirit tehdään materiaalista, joka on happea läpäisevää, on järjestelmässä käytettävä osia ja putkia, jotka eivät ole alttiita korroosiolle. Lisäksi tällöin energia on tuotava järjestelmään lämmönsiirtimellä. [Lumensulatusjärjestelmä käsikirja 2007; Sulanapito, valikoima ja käsikirja 2007.]

Jakotukeilta lähtevät putkipiirit ovat samankokoista putkea, ja piirit tehdään samanpituiseksi, jotta jokaisessa piirissä on sama painehäviö eikä säätöventtiileille tai muille virtausta vastustaville komponenteille ole tarvetta [Lumensulatusjärjestelmä käsikirja 2007]. Putkien peittosyvyys vaihtelee alueen rakenteen ja alueen kantavuuden mukaan. Lämmönsiirrolle edullisin paikka on mahdollisimman pinnassa. Yleisesti putkipiirit sijaitsevat pintamateriaalin alla olevassa hiekka-, maakosteaa betoni-, valubetoni-, kivituhka- tai muussa sellaisessa kerroksessa noin 50–200 millimetrin syvyydessä sulatettavasta pinnasta [Sulanapito, valikoima ja käsikirja 2007; Sipilä ym. 2001: 11]. Putkipiirit asennetaan sulanapidettävälle alueelle niin, että lämmönjako on mahdollisimman tasaista. Putkipiirien putkien välinen etäisyys määräytyy tarvittavan tehon mukaan mitä isompi teho, sitä tiheämpi putkitus. Putkien väli on tyypillisesti 200...300 millimetriä keskeltä keskelle [Lämpöä laadukkaasti 2013.]

Järjestelmässä kiertävän lämmönsiirtonesteen tulee olla pakkasta kestävä, sillä järjestelmän kiertonesteen pysähtyessä, varsinkin kun ulkolämpötila on reilusti pakkasella, jäähtyvät alueen rakenne ja putkipiirit nopeasti. Kiertonesteen jähmettyminen vaurioittaa putkistoa, ja pahimmillaan koko järjestelmä turmeltuu

kerralla. Kiertonesteen tulee olla propyleeniglykolin ja veden seos tai muuta luonnolle vaaratonta lämmönsiirtoliuosta tai nestettä. Sopivan kiertonesteen valinta on tärkeää, sillä täyttömäärät ovat suuria. [Sipilä ym. 2001: 11]

Aluesulanapitojärjestelmää voidaan ohjata manuaalisesti päälle–pois-tyyppisesti tai rakennusautomaation avulla, esimerkiksi DDC (digital direct control) -pohjaisella säätöautomaatiikalla. Käytettäessä automaattista säätöä järjestelmä havainnoi ympäristön olosuhteita sadeanturilla ja alueen pintalämpötila-antureilla. Olosuhdemittausten perusteella järjestelmä käynnistyy ja ohjaa menevän liuoksen lämpötilaa. Pintalämpötila-anturi asennetaan alueen rakenteen pinnan alapuolelle. Myös sadeanturi on syytä asentaa alueen rakenteeseen, tällöin se voi havaita myös kulkeutuneen kosteuden (lumen). Sääpalveluista saatavalla datalla voidaan ennakoida säätöä ja nostaa teho sulatusteholle jo ennen suurta lumikuormaa, näin päästään eroon alueen rakenteen massan aiheuttamasta viiveestä sulatusjakson alussa. [ASHRAE Handbook 2011: 51.10; Sulanapito, valikoima ja käsikirja 2007]

3 Suomen talvisää

3.1 Termiset vuodenaajat

Suomessa neljä vuodenaikaa on alettu erottaa toisistaan jo 1800-luvun lopulla niin sanottuina termisinä vuodenaikoina. Suomessa termiset vuodenaajat on määritelty seuraavasti:

- Terminen talvi. Vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi alle 0 °C. Talvi kestää yleisesti joulukuusta helmikuuhun.
- Terminen kevät. Vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi +10...0 °C:n välissä. Kevät kestää yleisesti maaliskuusta toukokuuhun.
- Terminen kesä. Vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi yli +10 °C. Kesä kestää yleisesti kesäkuusta elokuuhun.

- Terminen syksy. Vuorokauden keskilämpötila on pysyvästi +10...0 °C:n välissä. Syksy kestää yleisesti syyskuusta marraskuuhun.

Määritelmällä ”pysyvästi” tarkoitetaan viittä vuorokautta, kun jokaisen vuorokauden keskilämpötila pysyy jatkuvasti mainittujen arvojen rajoissa. Lisäksi on määritelty terminen kasvukausi; tämä kausi alkaa, kun vuorokauden keskilämpötila on yli +5 °C ja loppuu, kun vuorokauden keskilämpötila putoaa alle +5 °C:n. Poikkeuksena termisiin vuodenaikoihin terminen kasvukausi alkaa ja päättyy, kun lämpötila on ollut kymmenen päivää mainituissa rajoissa. Rannikkoseuduilla termiset vuodenaajat voivat poiketa mainitusta, ja tästä syystä vuodenaajat sidotaan usein kalenterikuukausien mukaisiin vuodenaikoihin. [Saukkonen 2008: 28–29; Karttunen ym. 2008: 358–359.]

3.2 Tyypillinen talvi Suomessa

Suomi kuuluu lähes kokonaan niin sanottuun kosteaan ja kylmätalviseen ilmastoon, jonka tunnusmerkkejä ovat seuraavat tiedot: lämpimimmän kuukauden keskilämpötila on yli +10 °C ja kylmimmän kuukauden alle –3 °C sekä sateita esiintyy melko runsaasti kaikkina kuukausina [Mustonen 1986: 27]. Kuulumme pohjoisten kylmien ja eteläisten ilmassojen raja-alueeseen. Nämä ilmassat tuovat usein Suomeen matalapaineita ja lämmintä ilmaa. Tämän vuoksi maassamme on edullisemmat lämpöolot kuin muualla samoilla leveysasteilla. Matalapaineet luovat hyvin vaihtelevia sääolosuhteita, juuri nämä matalapaineet tuovat sateita Suomeen tasaisesti vuoden ympäri. Talvella pitkät pakkaskaudet johtuvat Euraasian mantereen kylmenemisestä. [Lappalainen 2010: 18.]

Talven aikana Suomen eteläosissa on yleisesti pakkasta 0...–12 °C, ja pohjoisosissa pakkasta on yleisesti –6...–20 °C [Saukkonen 2008: 29]. Suomen kylmimmät alueet ovat vuoden keskilämpötilojen mukaan (Keskilämpötilat 1971–2000) maamme luoteisosat [Lappalainen Markku 2010: 19]. Suomen kylmin lämpötila on mitattu Kittilässä, jolloin lämpötila oli –51,5 °C alkuvuodesta 1999. Tällaiset lämpötilat ovat hyvin harvinaisia, ja esimerkiksi Sodankylässä on kerran viidessäsadassa vuodessa pakkasta –43 °C. [Saukkonen 2008: 30.]

Suomessa vasta sataneen lumen kertymien summa vuodessa on noin 2–2,5 metriä, Etelä-Suomessa yksi kolmas osa vuoden sadannasta eli sademäärien yhteenlasketusta summasta sataa lumena, kun Pohjois-Suomessa puolet vuoden

sadannasta sataa lumena [Ahvenisto ym. 2002: 74]. Vaikka maamme pohjoisosissa vuotuinen sadanta on pienempi kuin Etelä-Suomessa, ovat hanget huomattavasti paksumpia pohjoisessa. Tämä johtuu siitä, että lämpötila pysyy maamme pohjoisosissa pääasissa koko talven pakkasella ja sadanta talviaikaan on pää asissa lunta. Etelä-Suomessa talviaikaan sataa myös runsaasti vettä, ja lämpötila käy usein päivä aikaan plussan puolella, mikä pienentää lumikertymää. [Saukkonen 2008: 76.]

3.3 Lumisateen eri muodot

Suomessa satava vesi tihkusadetta lukuun ottamatta on syntynyt sulaneista lumikiteistä. Kesäaikaan tai kun ilmanlämpötila on maanpinnan läheisyydessä lämmin, lumikiteet sulavat matkallaan alas ja sataa vettä. Tihkusade muodostuu pilvessä, kun pienet pilvipisarot törmäilevät ja yhtyvät toisiinsa niin kauan, että pisarat ovat tarpeeksi painavia pudotakseen alas. Kaikissa muissa sateen muodoissa kosteus muuttuu kiinteäksi aineeksi eli lumikiteiksi, jotka keräävät itseensä niin paljon massaa ja muita lumikiteitä, että ovat tarpeeksi painavia pudotakseen. Tällaisia lumikiteiden yhteenliittymiä kutsutaan lumihutaleiksi, niistä on vaikea erottaa enää yksittäisiä lumikiteitä. Kaikki lumikiteet eivät putoa maahan asti, vaan kulkevat ilmapyörteiden mukana ja voivat leijaila pilven eri osissa. Tyypillisesti nämä kiteet sulavat, jäätyvät ja kasvavat muista lumikiteistä sekä tiivistyvistä kosteudesta useita kertoja, jolloin niistä muodostuu rakeita. Lunta sataa silloin kun ilman lämpötila on tasaisesti niin kylmä, että hutaleet eivät pääse sulamaan matkallaan pilvestä maahan. Mikäli lumihutaleet sulavat osittain, sataa räntää. [Karttunen ym. 2008: 365–366.] Lumikiteet ovat jäätyneen kosteuden ja ilman hauraita yksilöllisiä muodostelmia. Erilaisissa olosuhteissa syntyy erilaisia lumikiteitä. Lumikiteiden erilaisia muotoja on LaChepellen lumiluokituksen mukaan seitsemää päätyyppiä: levy-, tähti-, pylväs-, pensas- ja epäsäännöllinen kide sekä jääneulanan ja pylväs, jossa on päätylevy. Muita kidetyyppejä ovat erilaiset rakeet ja räntä. Myös maahan sataneen lumen olomuoto muuttuu; tätä muodonmuutosta kutsutaan metamorfoosiksi. Tähän ilmiöön vaikuttavat uuden lumen paino, tuuli ja esimerkiksi alustan lämpötila. Hangen ominaisuudet, kuten kovuus ja tiheys, muuttuvat ympäristön olosuhteiden muuttuessa. [Ahvenisto ym. 2002: 72–73; Hartonen 2008: 26–27.] Satanut lumi on erityisen liukasta liikenteelle, mikäli sateen aikana lämpötila on ollut lämpimämpi kuin -5 °C [Karttunen ym. 2008: 223].

Suomi voidaan jakaa kahdeksaan erilaiseen lumivyöhykkeeseen. Esimerkiksi Kaakkois-Suomi on ohuen merellisen lumen aluetta ja Lapissa sataa taiga- sekä tundralunta, ja näiden alueiden rajat vaihtelevat paljon vuosittain. Lumityypeistä käyttämämme nimitykset perustuvat kansainvälisiin lumiluokituksiin. [Ahvenisto ym. 2002: 74–75.] Lumen syvyyttä maastossa mitataan lumilinjalla; linjalla on kahdeksankymmentä mittauspistettä viidenkymmenen metrin välein, joissa jokaisella mitataan lumen syvyys ja joka viidennellä pisteellä lumen tiheys. Mittausten keskiarvo on luotettava tulos alueen lumen- syvyydestä ja tiheydestä. Näistä arvoista ratkaistaan myös lumen vesiarvo. Vesiarvo ratkaistaan sulattamalla lunta vedeksi tunnetulta pinta-alalta; näin saadaan selville sulaneen lumen vesipatsaan korkeus. [Mustonen 1986: 49.] Tällaisia lumilinjoja on Suomessa satakuusikymmentä, ja niitä hoitaa ympäristökeskus [Karttunen ym. 2008: 207]. Lumen tiheys lasketaan kaavalla 1.

$$\rho_{\text{lumi}} = \frac{m_{\text{lumi}}}{h_{\text{lumi}} \cdot 1\text{m}^2} \quad (1)$$

ρ_{lumi}	on lumen tiheys [kg/m ³]
m_{lumi}	on lumen massa [kg]
h_{lumi}	on lumi kertymän syvyys [m]

Lumisateen määrä ilmoitetaan aina lumen vesisisältönä. Karkeasti yksi millimetri vettä vastaa kymmentä millimetriä vasta satanutta lunta, mutta tässä on suuria vaihteluita kiderakenteen ominaisuuksien mukaan [Karttunen ym. 2008: 207]. Lumen tiheys vaihtelee kiderakenteiden erilaisuuden vuoksi suuresti; vastasataneen uuden kostean lumen tiheys on 100–200 kg/m³ ja kuivan lumen tiheys on yleisesti noin 50–70 kg/m³, mutta jos lumi sataa tynellä pakkassäällä tiheys voi olla joskus jopa vain 20 kg/m³. [Ahvenisto ym. 2002: 73–74; Mustonen 1986: 48.] Eniten sadepäiviä on marras- ja tammikuun välisenä aikana, jolloin vähintään puolet on sadepäiviä. Talvella lumisateet kestävät kauan, mutta vesiarvot ovat pieniä verrattuna kesään. Suurin riski suurelle lumikertymälle lyhyessä ajassa on Uudellamaalla. [Saukkonen 2008: 76; Karttunen ym. 2008: 365.]

Talvikuukausista keskiarvoltaan joulukuussa sataa eniten, 58 mm, kun keskilämpötila oli –3,8 °C (mittausjakso Helsinki, 1971–2000). Mikäli sateet jakautuvat tasaisesti ja joka toinen päivä sataa, on sadepäivän jälkeen satanut 3,8 mm vettä eli lumena noin 40 mm. [Lappalainen 2010: 19.] Kuten aiemmin olen todennut, varsinkin Etelä-Suomessa ei ole poikkeuksellista, että talven aikana sataa vettä, joten ei voida olettaa, että kaikki nämä sateet olisivat lunta. Toisinaan kovalla tuulella voi myös tuiskuttaa.

Tällä tarkoitetaan, että tuuli tempaa maasta mukaansa lunta, joka sitten näyttää satavan. Tuiskussa todellisuudessa ei sada mitään, lumi vain vaihtaa paikkaa maastossa. Pyryttäessä tuulee kovaa sekä sataa lunta, usein näyttää siltä, että lunta sataisi hyvin paljon, kun tuuli kuljettaa samoja hiutaleita ylös ja alas monta kertaa. [Hartonen 2008: 30–31.]

4 Alueen sulanapidon tehon laskenta

4.1 Sulatuksen laatutaso

Alueen sulanapidon tehon laskenta tulee aloittaa määrittämällä haluttu pinnan olosuhde lumisateen aikana. Lumi voidaan sulattaa välittömästi, kun se sataa pinnalle, sen voidaan antaa kerääntyä tai voidaan sulattaa osa sataneesta lumesta heti ja antaa osan kerääntyä. Nämä tavat voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

- Luokka 1. Lumisateen aikana koko pinta peittyy kerääntyneeseen lumeen. Sulatus aloitetaan, kun pinta on lumen peitossa.
- Luokka 2. Lumisateen aikana kerääntynyttä lunta sulatetaan jatkuvasti, lumisateen päätyttyä kerääntynyt lumi sulatetaan. Määriteltävä sulatusaste (lumettoman alueen suhde) eli suhde, paljonko lumesta lumisateen aikana sulaa pinnalle osuessaan ja kuinka suuren osuuden sateesta annetaan kerääntyä pinnalle. Lumisateen loputtua sulatus jatkuu niin pitkään, että kaikki kerääntynyt lumi on sulatettu.
- Luokka 3. Lumisateen aikana koko pinta pysyy vapaana lumesta. Sataanut lumi sulatetaan välittömästi eikä kertymää ehdi syntyä sulatettavalle pinnalle. Kertymää voidaan sallia, mikäli lumikertymä on kertynyt poikkeuksellisen rankassa lumi sateessa.

Luokituksessa ei oteta huomioon lumituiskua tai tilannetta, jossa lunta kulkeutuu pinnalle muuten kuin sateena. Luokan 1 kaltaisia olosuhteita pystytään toteuttamaan huomattavasti pienemmillä energiamäärillä ja tehoilla kuin luokkien 2 ja 3 olosuhteita, koska luokassa 1 ei synny häviöitä ympäröivään ilmaan ja avaruuteen (konvektio- ja

säteily teho), vaan oletetaan, että kerääntynyt lumi kerros toimii eristeenä. [Kilkis 1994: 423–424.]

4.2 Lähtöarvojen määrittäminen

Kun sulatuksen laatutaso on päätetty, voidaan aloittaa muiden laskennassa tarvittavien lähtöarvojen määrittäminen. Lähtöarvojen määrittäminen vaikuttaa suurelta osin tarvittavaan lumensulatustehoon ja energian kulutukseen. Suoraan verrannollinen tehoon on sulatusjakson pituus. Mitä nopeammin halutaan lumikertymä alueelta sulattaa sitä, suurempi teho vaaditaan. Hyötytehoon eli tehoon, joka kulutetaan lumen lämmittämiseen ja sulattamiseen, vaikuttavat käytännössä vain lumen ominaisuudet, mikäli oletetaan, että lumikertymän pinnasta ei siirry lämpöä ympäristöön. Lumen sekä ympäristön ominaisuuksien määrittäminen voi olla hankalaa. Alueen paikallinen säädata pitkältä ajanjaksolta on paras lähtötieto alettaessa määrittää lumen ominaisuuksia.

Johtumishäviötehon suuruus sulanapidettävän alueen alapuoliseen rakenteeseen määräytyy pääosin alapuolisen rakenteen lämmönjohtavuudesta ja maan lämpötilasta tai rakenteen alapuolella olevan tilan lämpötilasta sekä sulanapitopiirin lämmönsiirtonesteen lämpötilasta. Nämä johtumishäviötehot vaihtelevat 2–50%:n välillä, suurimmillaan silloin kun sulanapidettävän pinnan alapuolinen eristämätön rakenne rajoittuu ulkoilmaan. Ulkoilmaan rajoittuvia rakenteita voivat olla esimerkiksi siltojen kannet, ajorampit tai pysäköintitasot. [Ramsey ym. 1999]. Mikäli alapuolinen maahan rajoittuva rakenne on eristävä, alaspäin suuntautuva johtumishäviöteho on vain joitain prosentteja kokonaistehosta 2–5%. Ilman eristävää kerrosta alueen sulanapitopiirien alapuolella häviötehojen merkitys kasvaa merkittävästi. Alaspäin suuntautuvia johtumishäviötehoja lisää tilanne, jolloin järjestelmän sulatuskuorma on päällä vain jaksoittain. Tällaisessa tilanteessa häviötehot eristämättömässä, maahan rajoittuvassa sulanapitojärjestelmässä sulatusjakson alussa, voivat olla lähes kaksikymmentä prosenttia. [Sipilä ym. 2001: 51.]

Häviöteho sulatettavasta pinnasta ympäristöön koostuu konvektio ja säteilyhäviötehoista, jotka koostuvat monesta määräävästä tekijästä. Konvektiolämmönsiirtokertoimen laskentaan tulee tuntea sulanapidettävän alueen geometria sekä tuulen nopeus lähellä sulanapidettävää pintaa. Tuulen nopeus

sulanapidettävän alueen pinnassa poikkeaa sääpalveluiden tuulidatassa mainittuun arvoon huomattavasti ottaen huomioon sulanapidettävän alueen peitteellisen sijainnin rakennusten keskellä. Lisäksi Suomen ilmatieteenlaitos mittaa tuulen nopeuden kymmenen metrin korkeudesta maan pinnasta [Tuulimittaukset Suomessa 2009]. SäteilYTEHOON vaikuttaa pinnan emissiokerroin sekä lämpötilat. Lämpötilojen laskennassa tulee tuntea pilvisyysaste sekä ilman suhteellinen kosteus, näillä on kuitenkin marginaalinen vaikutus ympäristöön hukatun tehon määrässä.

4.3 Aluesulanapidon laskentakaavat

Alla esitetyillä laskenta kaavoillalasketaan lämmönjohtumista alueen sulanapidon rakenteessa sekä alueen pinnasta ilmaan siirtyvää säteily- ja konvektiotehoa. Laskentakaavoissa oletetaan, että kaikki lämpötilat pysyvät muuttumattomina sekä tarkastellaan lämpövirtoja vain yksiulotteisesti. Laskentakaavat eivät siis ota huomioon esimerkiksi sulanapitoalueen reunalla tapahtuvia johtumishäviöitä alueen muuhun rakenteeseen. [Mills 1999: 58.] Lisäksi laskentaa on yksinkertaistettu olettamalla, että pinta on tasainen, rakenne on samanlainen ja lumikertymä on tasainen koko alueella ja että rakennukset tai rakenteet eivät vaikuta säteilylämmönsiirtoon ympäristöön. Edellä kuvattu vakaa yksiulotteinen lämmönjohtuminen on yleisesti insinöörien käyttämä laskentamenetelmä suunniteltaessa lämmitysjärjestelmiä [Mills 1999: 134].

Kaavoilla voidaan ratkaista lumensulatuksen laatutason 1 mukaisia tilanteita, lisäksi kaavalla 9 voidaan ratkaista häviöteho ympäristöön, kun lumikertymä on sulatettu. Lumisateen tai -tuiskun jälkeen tai sen aikana, kun pinnalle on jo kerääntynyt lunta, voidaan olettaa lumen pinnasta ympäristöön siirtyvät häviöt nollassi, lumikertymän toimiessa eristeenä [Kilkis 1994: 423]. Kerääntyneen lumen lämpötilan nosto sulamispiste lämpötilaan ratkaistaan kaavalla 2.

$$q_{lumi} = \frac{h_{lumi} \cdot \rho_{lumi} \cdot c_{p,jää} \cdot (0 - T_{lumi})}{t_{sulatus}} \quad (2)$$

q_{lumi}	on lumikertymän lämmittäminen sulamispiste lämpötilaan tarvittava teho sulatusjakson aikana [W/m^2]
ρ_{lumi}	on lumen tiheys [kg/m^3]
$c_{p,jää}$	on jään ominaislämpökapasiteetti [$J/kg \cdot ^\circ C$] (2090 $J/kg \cdot ^\circ C$ [Tekniikan kaavasto 2010, 177])
T_{lumi}	on lumikertymän lämpötila [$^\circ C$]
$t_{sulatus}$	on sulatusjakson pituus [s]

Teho, joka tarvitaan lumen lämpötilan nostamiseksi sulamispistelämpötilaan (0 °C), ratkaistaan kaavalla 3. Huomaa, että kaavoissa 2 ja 3 täytyy sulatusjakson pituuden olla sama.

$$q_{sulatus} = \frac{h_{lumi} \cdot \rho_{lumi} \cdot S_{jää}}{t_{sulatus}} \quad (3)$$

$q_{sulatus}$ on jään (lumen) sulattaminen vedeksi [W/m²]
 $S_{jää}$ on jään sulamislämpö [J/kg]
 (333000 J/kg [Tekniikan kaavasto 2010, 177])

Sulanapitojärjestelmän johtumishäviöteho sulanapitopiirin alapuolisten rakenteiden alle ratkaistaan kaavalla 4.

$$q_{maa} = \frac{T_{putkikerros} - T_{maa,kuukausi}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_r}{\lambda_r}} \quad (4)$$

q_{maa} on häviöteho lämmönluovutus piirin alapuolelle [W/m²]
 $T_{putkikerros}$ on putkikerroksen keskilämpötila [°C]
 $T_{maa, kuukausi}$ on maan kuukautinen keskilämpötila [°C]
 s_r on rakennekerroksen paksuus [m]
 λ_r on rakennekerroksen lämmönjohtavuus [W/°C*m]

[Seppänen 2001: 60]

Putken keskimääräinen lämpötila saadaan kaavasta 5.

$$T_{putki} = \frac{T_m + T_p}{2} \quad (5)$$

T_m on lämmönsiirtonesteen menolämpötila [°C]
 T_p on lämmönsiirtonesteen paluulämpötila [°C]

[Seppänen 2001: 184]

Sulanapitoalueen rakenteen alapuolisen maan lämpötila ratkaistaan Suomen rakentamismääräyskokoelman (SRMK) osan D5 (kaavojen 4.3 ja 4.4) mukaan. Laskennassa oletetaan, että sulanapitoalueen alapuolisen maan lämpötila on rinnastettavissa lämpöoloihin, jotka vallitsevat rakennuksen maahan rajoittuvan alapohjan alla. Taulukossa 1 on ratkaistu sulanapitojärjestelmän alapuolisen maan lämpötiloja eri säävyöhykkeillä.

Taulukko 1. SRMK:n osan D5 määrittämille säävyöhykkeille lasketut sulanapitoalueen rakenteen alapuolisen maan keskilämpötilat marraskuusta...maaliskuuhun. Sulanapitorakenteen alapuolinen maa oletettiin hiesu-, moreeni-, hieta- ja salaojittamaton hiekka- ja soratyypiseksi, sekä rakenteen U-arvoksi 0,2–0,3 W/m²K.

Säävyöhyke	I	II	III	IV
Tmaa, kuukausi marraskuu [°C]	13	12	10	8
Tmaa, kuukausi joulukuu [°C]	12	11	9	7
Tmaa, kuukausi tammikuu [°C]	10	9	7	5
Tmaa, kuukausi helmikuu [°C]	9	8	6	4
Tmaa, kuukausi maaliskuu [°C]	8	7	5	3

Tarvittava kokonaissulatusteho lasketaan kaavalla 8.

$$q_{kok} = q_{lumi} + q_{sulatus} + q_{maa} \quad (8)$$

q_{kok}	on tarvittava kokonaissulatusteho [W/m ²]
q_{lumi}	on lumikertymän lämmittäminen sulamispistelämpötilaan tarvittava teho sulatusjakson aikana [W/m ²]
$q_{sulatus}$	on jään (lumen) vedeksi sulattamiseen tarvittava teho sulatusjakson aikana [W/m ²]
q_{maa}	on häviöteho lämmönluovutuspiirin alapuolelle [W/m ²]

Kun sulatettavalta pinnalta on sulatettu lumikertymä ja jäljellä on kuiva pinta tai vesifilmikerros, voidaan lämpöhäviöt ympäristöön ratkaista kaavalla 9. Jos $q_{ymp} > q_{lumi} + q_{sulatus}$ vesifilmikerros jäätyy.

$$q_{ymp} = \alpha_k * (T_{vf} - T_y) + \delta * \epsilon_p * (T_{vf}^4 - T_{ym}^4) \quad (9)$$

q_{ymp}	on häviöteho pinnasta ympäristöön [W/m ²]
α_k	on konvektion lämmönsiirtokerroin [W/m ² *K]
T_{vf}	on vesifilmikerroksen lämpötila [K] (273,7 K [ASHRAE Handbook 2011: 51.2])
T_y	on ympäristön lämpötila [K]
δ	on Stefan-Boltzmanin vakio [W/m ² *K ⁴] (5,6705*10 ⁻⁸ W/m ² *K [Tekniikan kaavasto 2010, 111])
ϵ_p	on pinnan emissiokerroin
T_{ym}	on ympäristön keskilämpötila [K]

[ASHRAE Handbook 2011: 51.2]

Pinnan konvektion lämmönsiirtokerroin ratkaistaan kaavalla 10.

$$\alpha_k = 0,037 * \left(\frac{\lambda_i}{L}\right) * Re_L^{0,8} * Pr^{1/3} \quad (10)$$

λ_i	on ilman lämmönjohtavuus [W/m*K] (0,0243 W/m*K [Seppänen 2001, 430])
L	on pinnan karakteristinen mitta tuulen suunnassa [m]
Re_L	on Reynoldsin luku
Pr	on Prantlin luku (0,7 [ASHRAE Handbook 2011, 51,2])

[ASHRAE Handbook 2011: 51.2]

Reynoldsin luku pinnassa ratkaistaan kaavalla 11.

$$Re_L = \frac{v_t * L}{\nu_{ilma}} \quad (11)$$

v_t	on tuulen nopeus lähellä pintaa [m/s]
ν_{ilma}	on ilman kinemaattinen viskositeetti [N*s/m ²] (0,133*10 ⁻⁴ N*s/m ² [Seppänen 2001, 430])
L	on pinnan karakteristinen mitta tuulen suunnassa [m]

[ASHRAE Handbook 2011: 51.2]

Ympäristön keskilämpötila voidaan laskea kaavalla 12. Pilvisyysaste on arvioitava, 0...1, kun taivas on täysin pilvinen pilvisyysaste on 1.

$$T_{ym} = [T_p^4 * F_{pa} + T_k^4 * (1 - F_{pa})]^{1/4} \quad (12)$$

T_p^4	on pilvisen ilman lämpötila [K]
F_{pa}	on pilvisyysaste
T_k^4	on kirkkaan ilman lämpötila [K]

[ASHRAE Handbook 2011: 51.2]

Kirkkaan pilvettömän ilman lämpötila ratkaistaan kaavalla 13.

$$T_k = T_y - (1,1058 * 10^3 - 7,562 * T_y + 1,333 * 10^{-2} * T_y^2 - 31,292 * RH + 14,58 * RH^2) \quad (13)$$

RH on ilman suhteellinen kosteus (murtolukuna) (0...1)

[ASHRAE Handbook 2011: 51.2]

Pilvisen ilman lämpötila ratkaistaan kaavalla 14. (T = Kelvin)

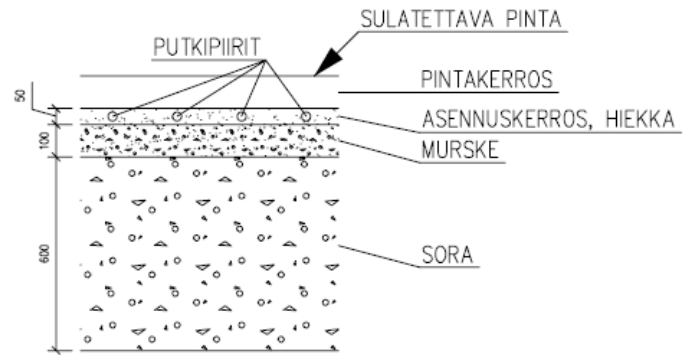
$$T_p = T_y - 19,4 \quad (14)$$

[ASHRAE Handbook 2011: 51.2]

4.4 Esimerkkitaulukot

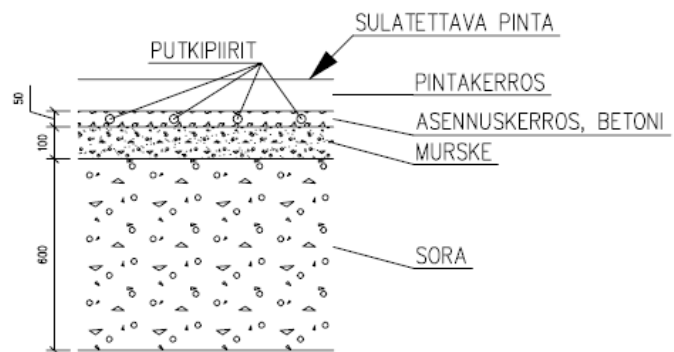
Taulukoissa 2–3 on esitetty ratkaisuja kaavoille 2–14. Taulukoista saa helposti yleiskäsityksen, mitkä lähtöarvot vaikuttavat tarvittavaan sulatustehoon. Taulukoita tutkimalla päästään myös hyvään arvioon tarvittavasta tehosta, kun lähtöarvot tiedetään. Taulukoiden 1–3 laskentatapauksissa (case) 1–6 on käytetty lähtöarvoja, jotka kuvaavat yleisesti Suomen sääolosuhteita sekä sulanapitoalueilla käytettyjä rakenne ratkaisuja. Kuvassa 1 on esitetty laskentatapauksessa (case) 1 käytetty sulanapitoalueen rakenne sekä kuvassa 2 laskentatapauksen (case) 4 laskennassa käytetty rakenne. Kaikkien laskentatapausten (case) 1–6 rakennepiirokset ovat liitteessä 2.

CASE 1



Kuva 1. Taulukon 3 laskennassa, laskentatapauksessa (case) 1 käytetty rakenneratkaisu.

CASE 4



Kuva 2. Taulukon 3 laskennassa, laskentatapauksessa (case) 4 käytetty rakenneratkaisu.

Taulukko 2. Hyötyteho lumensulattamiseksi kuudella erilaisella lumen ominaisuudella, kun sulatusjakson pituus on yksi tunti.

Hyötyteho lumensulattamiseksi

Suure	Yksikkö	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
q_{lumi}	W/m ²	5	9	6	5	5	2
q_{sulatus}	W/m ²	56	139	194	278	416	555
h_{lumi}	m	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
ρ_{lumi}	kg/m ³	20	50	70	100	150	200
T_{lumi}	°C	-15	-10	-5	-3	-2	-0,5

Taulukko 3. Lumensulatusjärjestelmän lämpöhäviötehot johtumalla verkoston alapuolisiin rakenteisiin kuudella erilaisella piirin alapuolisella rakenteella. Sulanapidettävän alueen alapuolisen rakenteen lämpötila laskettiin, kun lähtöarvot valittiin SRMK:n osan D5 taulukoista 4.1 ja 4.2 niin, että saatiin mahdollisimman matala alapuolisen rakenteen lämpötila [Kalliomäki 2007]. Säävyöhykkeeksi valittiin vyöhyke 1.

Lämpöhäviötehot johtumalla alapuolisiin rakenteisiin

Suure	Yksikkö	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
q_{maa}	W/m ²	64	15	6	62	13	5
T_{putki}	°C	33	33	33	33	33	33
$T_{\text{maa,kk}}$	°C	8	8	8	8	8	8
T_m	°C	40	40	40	40	40	40
T_p	°C	25	25	25	25	25	25
S_r	m	0,025	0,05	0,075	0,025	0,05	0,075
$\Lambda_{r,\text{hiekkä}}$	W/K*m	2	2	2			
$\Lambda_{r,\text{betoni}}$					1,2	1,2	1,2
S_r	m	0	0,05	0,15	0	0,05	0,15
$\Lambda_{r,\text{EPS}}$	W/K*m	0,041	0,041	0,041			
$\Lambda_{r,\text{XPS}}$					0,036	0,036	0,036
S_r	m	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1
$\Lambda_{r,\text{murske}}$	W/K*m	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
S_r	m	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$\Lambda_{r,\text{sora}}$	W/K*m	2	2	2	2	2	2

Taulukko 4. Lämpöhäviötehot ympäristöön säteilemällä ja konvektiona, kun lumikertymä on sulatettu pinnalta, kuudessa erilaisessa sääolosuhteessa.

Lämpöhäviötehot ympäristöön lumettomalta pinnalta

Suure	Yksikkö	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
q_{ymp}	W/m ²	71	101	136	305	492	1023
α_k	kJ/m ² *K	3,7	6,4	8,9	13,4	23,4	32,3
T_{vf}	°C	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
T_y	°C	-1	-3	-5	-13	-15	-26
ϵ_p		0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1
T_{ym}	°C	-20	-23	-25	-36	-35	-45
L	m	15	15	15	15	15	15
Re_L		$1,1 \cdot 10^6$	$2,2 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^6$	$5,6 \cdot 10^6$	$11,2 \cdot 10^6$	$16,9 \cdot 10^6$
V_{tuuli}	m/s	1	2	3	5	10	15
T_p	°C	-20	-22	-24	-32	-34	-45
F_{pa}		1	0,1	0,8	0,5	0,9	1
T_k	°C	-19	-23	-26	-39	-41	-60
RH		0,99	0,75	0,8	0,7	0,9	0,99

Taulukko 5. Taulukon 3 laskennassa tarvittavien rakenteiden lämmönjohtumiskykyjen lähteet.

Muut laskennassa tarvittavat suureet

$\lambda_{r,hiekka}$	2	W/K*m	[SRMK C4 2003, 15]
$\lambda_{r,betoni}$	1,2	W/K*m	[SRMK C4 2003, 14]
$\lambda_{r,EPS}$	0,041	W/K*m	[RT 37808 2009]
$\lambda_{r,XPS}$	0,036	W/K*m	[Styrofoam 300 SL-AN 2013]
$\lambda_{r,murske}$	1,4	W/K*m	[Sipilä ym. 2001, 49]
$\lambda_{r,sora}$	2	W/K*m	[SRMK C4 2003, 15]

4.5 Kyselytutkimus asiantuntijayrityksiin

Koska alueen sulanapidosta on vähän Suomessa julkaistu materiaalia ja asiaa ei ole paljon maassamme tutkittu, toteutin kyselytutkimuksen alan asiantuntijayrityksiin. Alueen sulanapidosta on tehty tutkimusta enemmän Yhdysvalloissa, ASHRAE:n sekä yksittäisten tutkijoiden toimesta. Kyselytutkimuksella pyrin selvittämään, miten asiantuntijayritykset ovat määrittäneet alueen sulanapitotehon suunniteltaviin kohteisiin Suomessa sekä mitä lähtöarvoja laskennassa on otettu huomioon. Kysely lähetettiin 36 vastaanottajalle ja tutkimusta palvelevia vastauksia saatiin 12 kappaletta. Vastaajista

valtaosa edusti LVI-suunnittelua, mutta mukana oli myös kaksi laitetoimittajan edustajaa ja yksi RAU-suunnittelija. Kyselyyn vastanneet työskentelivät pääasiassa Uudellamaalla ja suunnittelukohteet painoittuivat Etelä-Suomeen. Kyselytutkimuksen kyselypohja on liitteenä 1.

Kyselytutkimuksen mukaan asiantuntija yritysten suunnittelemat järjestelmät ovat valtaosin olleet laatuluokan 1 järjestelmiä. Järjestelmien tärkeimpänä tehtävänä on lumikertymän sulatus ja pinnan jäätyminen estäminen. Laskennassa huomioituja lähtöarvoja on käytetty vaihtelevasti, puolet vastaajista perustaa laskennan oletetulle vakioteholle W/m^2 , toinen puoli huomioi laskennassa sääolosuhteet, alueen rakenteen ja maantieteellisen sijainnin. Mikäli lähtöarvot otetaan huomioon laskennassa, ne tyypillisesti toimittaa tilaaja, rakennuttaja tai pääsuunnittelija, ja kohteen rakennetiedot toimittaa rakennesuunnittelija. Vain muutama vastaaja kertoo käyttävänsä Excel-pohjaa laskentaa tehdessä. Lähes puolet vaatii laskennan suorittamista järjestelmän toimittajalta tai asennuksesta vastaavalta taholta. Tehon laskennan lähteiksi mainitaan ASHRAE:n julkaisuja, Suomen rakentamismääräyskokoelma sekä valmistajien ohjeita. Kaikilla vastaajilla on suuruusluokka-arvio tarvittavasta tehosta, 250–350 W/m^2 on aikaisemmissa projekteissa todettu sopivaksi. Palautetta asiakkaalta on pääosin saatu alueen sulanapitojärjestelmän automatiikan toimivuudesta, tähän ovat suuresti vaikuttaneet järjestelmän antureiden paikat.

Kyselytutkimusta voidaan pitää onnistuneena, kun siihen osallistui alalla toimivia johtavia organisaatioita ja vastaajat olivat pitkän linjan ammattilaisia. Tosin suurin osa vastaajista perusti vastauksensa kokemuksiin Etelä-Suomessa suunniteltuihin alueen sulanapitojärjestelmiin. Tästä syystä vastauksia voidaan pitää valideina vain tällä alueella. Vaikka laskennan lähtötietojen ja -suorituksen osalla oli suurta vaihtelua, oli kaikkien vastaajien antama mitoitusteho hyvin lähellä toistaan. [Hirsjärvi ym. 1997: 231–232.]

5 Kenttämittaukset

5.1 Mittausten tavoite

Kenttämittausten tavoitteena oli tarkastella teoreettisen laskentamallin paikkansapitävyyttä, kun vertailukohteena on toteutettu nestekiertoinen alueen sulanapitojärjestelmä sekä todelliset sääolosuhteet. Laskentakaavoilla pystytään ratkaisemaan alueen sulanapitojärjestelmän kokonaisteho, joten kenttämittausten tavoitteena oli mitata kokonaisteho toteutetun järjestelmän lämmönsiirtonesteen virtausnopeudesta sekä meno- ja paluujohdon lämpötilaerosta. Lisäksi laskentaan tarvitaan tietoa sulanapidettävälle pinnalle vastasataneen lumen ominaisuuksista, joita tarkasteltiin sulanapidettävältä pinnalta sekä sen välittömästä läheisyydestä lämmittämättömältä pinnalta.

5.2 Tarkasteltavan sulanapitoalueen tekninen toteutus

Kenttämittaukset suoritettiin Espoossa, Tapiolan kaupunginosassa, osoitteessa Länsituulentie 12 sijaitsevalla kiinteistöosakeyhtiö Biensin sulanapidettävillä ulkoalueilla. Kiinteistö valmistui 1970-luvun lopussa Suomen Osuuskauppojen keskuskunnan rakennusosaston rakennuttamana, ja se palveli Sokos Tapiola -tavaratalona vuoteen 2011, jonka jälkeen rakennus peruskorjattiin ja laajennettiin [Myllymäki 2014a]. Kunnostustöiden aikana myös lähes kaikki rakennusta ympäröivät katualueet kunnostettiin. Uudistunut kiinteistö avasi ovensa kauppakeskus Ainoana, lokakuussa 2013. Kiinteistön ja sen ulkoalueiden perusteellinen kunnostaminen liittyy suurempaan, Tapiolan keskuksen uudistamisprojektiin. [Kaavoitus ja rakentaminen 2014.]

Valtaosaan kiint.oy Biensin ulkoalueista asennettiin vesikiertoinen lumensulatusjärjestelmä. Kaikki sulanapidettävät pinnat on päällystetty kivi- tai betonilaatoilla, alueella on katualueiden lisäksi myös useita portaita sekä luiskia, jotka ovat aluesulanapidolla lämmitettyjä. Putkipiirit on asennettu katupinnan pintakerroksen alle hiekkaan tai betoniin [RAK195-0251-9001/V 2012]. Putkipiirien putket ovat happidiffuusiosuojaamatonta PE-RT-tyyppistä muoviputkea, jonka ulkohalkaisija on 25 mm sekä seinämän paksuus 2,3 mm [Myllymäki 2013b]. Piirien jakotukit sekä jakojohdot on valmistettu haponkestävästä teräsputkesta.

Jakotukkikohtaiset virtaamat säädetään jakotukin kertosäätöventtiilistä [LVI 1411 2013]. Putkipiirit eivät ole samanpituiset, vaan jokaiselle piirille on asennettu vielä oma kertosäätöventtiili, jolla haluttu virtaama voidaan asetella piirikohtaisesti [Myllymäki 2013b]. Lämmönsiirtonesteenä järjestelmässä on 40 %:n etyleeniglykolin ja veden liuos [Haapio 2014]. Lämpöenergia sulanapitojärjestelmään saadaan kiinteistön käyttämän kaukolämmön paluuveden virtaamasta lämmönsiirtimen kautta. Mikäli kaukolämmön paluuveden virtaama on tarpeeseen nähden liian pieni, johdetaan lämmönsiirtimeen kaukolämmön menovettä [RAU 6101 2013].

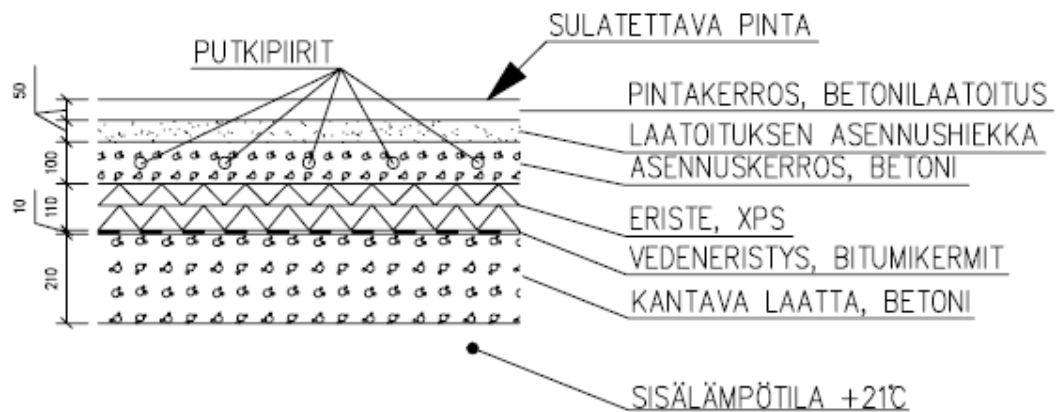
Kiint.oy Biensin alueen sulanapitojärjestelmää ohjataan automaattisesti rakennusautomaatiolla. Järjestelmällä on kaksi toimintatilaa: valmius- ja sulatustoimintatilat. Lämmityskaudella järjestelmä on jatkuvasti valmiustilassa ja mikäli sulatuskuormaa ei havaita, valmiustilassa menoveden lämpötila on +5 °C. Sulatustoimintatila alkaa, kun sulanapidettävällä pinnalla olevat anturit havaitsevat kosteutta ja ulkoilman lämpötila on alle asetusarvon. Silloin järjestelmä nostaa menoveden lämpötilan +40 °C:seen, kunnes sulanapitoalueella olevat anturit kuivuvat. [Turunen 2014; Solakuja 2014.]

Aluesulanapitojärjestelmän kenttämittausten suorituspaikaksi valittiin kapea käytävämäinen alue koy Biensin (rakennuksen) itäpuolella, joka on esitetty kuvassa 3. Tämän alueen alalle alueen sulanapitojärjestelmä jakaa sulanapitotehoa jakotukin 2 putkipiireillä ja sulanapidettävän alueen koko on 269,1 m² [Myllymäki 2014]. Alue rajoittuu pitkiltä sivuiltaan rakennuksen vaippaan sekä metalli ja lasi rakenteiseen kaiteeseen. Sulanapidettävän pinnan alapuolella on liiketiloja, joissa vallitsee normaali huonelämpötila. Kenttämittausten suorituksen aikana osa kiinteistön ulkoalueista oli vielä työmaa-aluetta, mikä osaltaan hillitsi ihmisvirtaa tarkasteltavalla alueella. Tästä syystä alue soveltui hyvin mittausten suorituspaikaksi.



Kuva 3. Kenttämittauksissa tarkasteltava sulanapitoalue

Tarkasteltavan sulanapidettävän alueen rakenne koostuu useasta kerroksesta, rakenteen yksinkertaistettu leikkauspiirros on esitetty kuvassa 4. Sulanapidettävä pinta (kadun pinta) on betonilaatoitettu, laatoituksen alla on laatoituksen tasaiseen asennukseen tarvittava asennushiekka. Sulanapitojärjestelmän jakoputkisto on valettu betoniin, joka sijaitsee hiekkakerroksen alla. Sulanapitojärjestelmän jakoputkien betonisen asennuskerroksen alla on kaksi kerrosta muovista lämpöeristettä sekä veden eriste. Veden eristeen alla on rakenteen kantava osa, betonilaatta jonka päälle on vielä valettu betonista tarvittavat kallistukset sulanapidettävän pinnan sula- ja sadevesien pois johtamiseksi. Kantavan betonilaatan alapuolella on liiketiloja, joissa vallitsee normaali huonelämpötila. Rakenteen keskimääräinen lämmönläpäisykerroin $0,22 \text{ W/m}^2\text{°C}$. [RAK195-0251-9001/V 2012.]



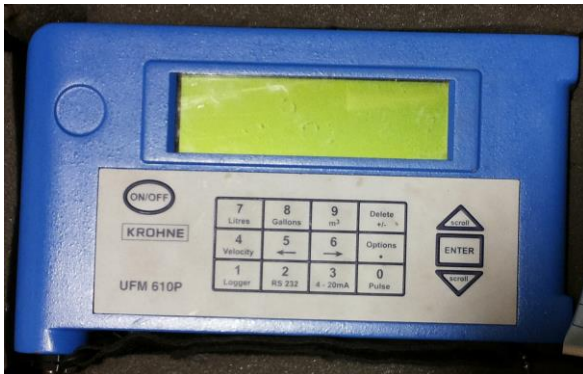
Kuva 4. Yksinkertaistettu leikkauspiirros tarkasteltavan sulanapitoalueen rakenteesta. [RAK195-0251-9001/V 2012.]

5.3 Mittauslaitteet

Kenttämittauksissa tarvittiin useita mittalaitteita. Mittaustuloksia automaattisesti keräviä mittalaitteita käytettiin alueen sulanapitojärjestelmän kokonaistehon määrittämiseen jakojohdon nesteliuoksen virtaamanopeuden mittaamisella sekä lämpötilaeron määrittämiseen todentamalla jakojohdon meno- ja paluujohdon lämpötila. Lämmönsiirtoliuoksen virtaamanopeudesta sekä lämpötilaerosta ratkaistiin siis teho, jonka sulanapitojärjestelmä käyttää alueen sulanapitoon sekä häviöiden kattamiseen. Sulatusjakson, eli lumisateen aikana käytettiin lämpötilamittaria määrittämään lumikertymän lämpötilaa lämmittämättömällä pinnalla. Lumisateen aikana määritettiin myös lumikertymän korkeutta ja massaa lämmittämättömällä pinnalla suorakulman ja vaa'an avulla sekä sulamattoman lumikertymän massaa sulanapidettävällä pinnalla.

Alueen sulanapitojärjestelmän jakoputken lämmönsiirtoliuoksen virtausnopeusmittaustuloksia mitattiin ja kerättiin Krohne UFM 610P -ultraäänivirtaamamittarilla. Mittari- ja anturikokoonpano on esitetty kuvissa 5 ja 6. Mittarin toiminta perustuu äänisykintään, joka voidaan digitaalisesti muuntaa putken sisällä virtaavan nesteen virtausnopeudeksi, kun tunnetaan putken materiaali, ulkohalkaisija ja seinämän paksuus sekä äänennopeus putken sisällä virtaavassa nesteessä. UFM 610P -mittalaite koostuu kahdesta pääkomponentista: anturikokoonpanosta (transducer set) sekä elektronisesta instrumentista (electronic

instrument). Mittalaitteen tarkkuus on $\pm 0,02$ m/s, kun virtausnopeus on alle 1 m/s. [Datasheet, UFM 610P. 2000; Manual, UFM 610P. 1999.]



Kuva 5. Krohne UFM 610P -ultraäänivirtausmittarin elektroninen instrumentti (electronic instrument), jolla voidaan lukea ja kerätä anturisetin mittaamaa virtausnopeutta.



Kuva 6. Krohne UFM 610P -ultraäänivirtausmittarin anturikokoonpano (transducer set) asennettuna putkeen mittaamaan virtausnopeutta putken sisällä.

Alueen sulanapitojärjestelmän jakoputken lämmönsiirtoliuoksen lämpötilaa meno- ja paluujohtossa mitattiin ja kerättiin Eltekin 1000 series Squirrel meter/logger -mittarilla, joka on esitetty kuvassa 7. Mittariin kytkettiin kaksi T-mallista lämpöparianturia (thermocouple temperature), joiden mittaustarkkuus on $\pm 0,2$ °C mittausalueella $-50...+350$ °C. [1000 series manual. 2006.]



Kuva 7. Eltekin 1000 series Squirrel meter/logger -mittari, jolla kerättiin sulanapitojärjestelmän jakoputkessa virtaavan lämmönsiirtonesteen meno- ja paluujohtoon lämpötila.

Vastataneen lumikertymän ominaisuuksia tutkittiin lämmittämättömältä pinnalta ja kertymän korkeus ja massa mitattiin, jotta voitiin ratkaista kertymän tiheys. Lumen lämpötila mitattiin lämmittämättömältä pinnalta lumisateen päätyttyä korkeussuunnassa lumikertymän keskeltä. Lumen lämpötilan mittaukseen käytettiin Tecpel DTM 305B -lämpötilamittaria ja TPK-03 K-tyypin termopariuikkoanturia, mittari on esitetty kuvassa 8. Lumikertymän korkeus mitattiin metallista suorakulmaa käyttäen. Lämmittämättömältä pinnalta lumen massa sekä sulanapidettävältä alueelta sulattamattoman jäännöskertymän massa punnittiin käyttäen Mettler PE 3600 -vaakaa, joka on esitetty kuvassa 9.



Kuva 8. Lumikertymän lämpötilan mittaamiseen käytetty lämpötilamittari Tecpel DTM 305B.



Kuva 9. Lumi- ja jäännöskertymän massan punnitsemiseen käytettiin Mettler PE 3600 -vaakaa.

5.4 Mittausten suoritus

Alueen sulanapitojärjestelmää tarkastelevat mittaukset kiint.oy Biensissä toteutettiin kaksivaiheisesti. Ensimmäisessä vaiheessa asennettiin automaattisesti mittaustuloksia keräävät mittarit, jotta järjestelmän hetkellinen teho voitaisiin ratkaista. Toisessa vaiheessa lumen ominaisuuksia tarkasteltiin lumisateen aikana lämmittämättömällä pinnalla sekä sulanapidettävällä pinnalla. Mittausten ensimmäisen vaiheen automaattisesti mittaustuloksia tallentavina mittareina käytettiin Krohne UFM 610 P -ultraäänivirtaamamittaria tallentamaan lämmönsiirtonesteen virtausnopeutta ja Eltek 1000 series Squirrel meter/logger -mittaria mittaamaan lämpötilaa meno- ja paluujohdossa. Mittarit sijoitettiin lämmönjakuhuoneen viereiseen huoneeseen (SPR 2043), jossa oli sopivasti suoraa putkiosuutta ultraäänivirtaamamittarin luotettavan mittaustuloksen saavuttamiseksi. Mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 10. Ultraäänivirtaamamittarin sijoitus suoralle putkiosuudelle varmistaa luotettavan mittaustuloksen, kun putkessa virtaavan nesteen virtausprofiili on tasainen. Valitussa mittauspisteessä, alueensulanapitojärjestelmän johdon osassa virtasi jakotukkien 1, 2 ja 5 yhteisvirtaama. Ennen virtaama- ja lämpötilamittarin asennusta virtausputkien päältä poistettiin tarvittavilta osin liimaamalla asennettu 13 mm paksu solukumimatto (Armaflex) -eriste. Lämpötilamittarin anturit asetettiin tiiviisti virtausputkien ulkopinnalle meno- ja paluujohtoon eristekerroksen alle. Virtaamamittarin anturikokoonpano asennettiin virtaamaputken ulkopinnalle menoputkeen. Mittarit asetettiin tallentamaan mittaustulosta 30 sekunnin välein ja näistä mittaustuloksista ratkaistiin mittauspisteen kautta virtaava alueen sulanapitojärjestelmän kokonaisteho.



Kuva 10. Ultraäänivirtausmittari ja lämpötilamittari asennettuna alueensulanapitojärjestelmän jakojohdossa tallentamaan automaattisesti mittaustuloksia.

Kenttämittausten suorituksen sekä varsinkin toisen vaiheen onnistumisen edellytys oli rankka lumisade, jolloin sataa suuri lumikertymä lyhyessä ajassa. Kun kertymän kasvu on suurempi kuin järjestelmä ehtii sulattaa, lunta alkaa kerääntymään sulanapidettävälle pinnalle. Tällaisissa olosuhteissa on helpointa tarkastella lumen sulamisnopeutta sulanapidettävällä pinnalla, kun kaikki sulanapitojärjestelmän teho käytetään alaspäinsuuntautuvien lämpöhäviötehojen voittamiseen sekä pinnalle kerääntyneen lumen lämmittämiseen ja sulattamiseen, eli hyötytehoon. Mittauksille sopivat olosuhteet alkoivat kehittyä 31.1.2014, kun iltapäivän ja illan aikana satoi heikkoa lumisadetta, joka ei kerääntynyt pinnalle, mutta ohjasi sulanapitoautomaation pitämään sulatustoimintotilaa yllä kello 14 eteenpäin. Varsinainen rankka lumisade, josta alkoi heti muodostua kertymää sulanapitopinnalle, alkoi 1.2.2014 kello 0.00. Ennen lumenkertymisen alkamista sulanapitopinnalle heikko lumisade oli ylläpitänyt sulanapitotehoa jo niin pitkään, että sulanapidettävän alueen rakenne oli täysin lämmennyt. Tästä syystä sulanapitojärjestelmässä ei ollut viivettä sulamisen alkamiseksi, kun lumisade josta alkoi kerääntymään lunta sulanapidettävälle pinnalle alkoi.

Lumisade josta lumikertymä alkoi kerääntyä pinnalle, alkoi 1.2.2014 kello 0.00. Sateen voimakkuus oli suurimmillaan kello 02.00, ja tästä hetkestä eteenpäin lumisateen voimakkuus alkoi hiljalleen laantua. Lumen ominaisuuksien tarkastelua suoritettiin 1.2.2014 kello 04.35, kun lumisade oli jatkunut taukoamatta ja sulanapidettävä pinta oli ollut koko ajan lumikertymän peitossa, neljän tunnin ja 35 minuutin ajan. Tällöin kerättiin samanaikaisesti luminäyte myöhempää punnitusta varten sulanapidettävältä pinnalta sekä lämmittämättömältä pinnalta. Lisäksi mitattiin kello 0.00–04.35 sataneen lumikertymän korkeus lämmittämättömältä pinnalta. Luminäytteet kerättiin samankokoiselta pinta-alalta (0,1 m²) kummaltakin pinnalta muovipusseihin, jotka suljettiin tiiviisti massan muuttumisen estämiseksi.

Onnistuneiden mittausten toisen vaiheen jälkeen voitiin aloittaa ensimmäisen vaiheen mittausjärjestelyjen purkaminen ja lopettaa virtaama- sekä lämpötilatiedon tallentaminen. Mittausjärjestelyiden purkamisen jälkeen virtaama- sekä lämpötilamittauspisteiden eristeet asennettiin takaisin. Automaattisesti mittaustuloksia tallentavien mittareiden mittaustulokset siirrettiin PC:lle käyttäen mittalaitteiden valmistajien omia liitosohjelmia sekä Excel-taulukkolaskentaohjelmaa. Kerätyt luminäytteet punnittiin käyttäen Mettler PE 3600 -vaakaa.

5.5 Mittausten tulokset

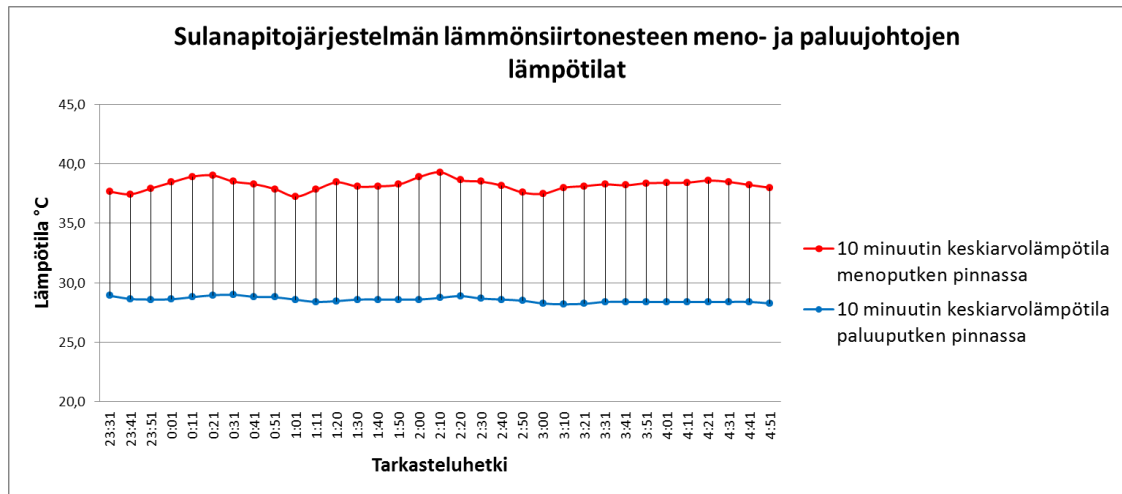
Kenttämittauksissa tarkasteltiin kiint.oy Biensin alueen sulanapitojärjestelmän, jakotukin 2 sulanapitopiirien alueella tapahtuvaa lumen sulamista. Mittauspiste, josta kerättiin mittaustuloksia lämmönsiirtonesteen virtausnopeudesta ja lämpötilasta meno- ja paluujohdossa automaattisesti tallentavilla mittalaitteilla, oli jakojohdossa, joka palveli jakotukkeja 1, 2 ja 5. Alueen sulanapitojärjestelmän jakotukit on perussäädetty halutuille virtaamille kertasäätöventtiileillä. Koska virtausreitti pysyy virtausteknisesti vakiona, myös virtaamat jakotukeille pysyvät suhteellisesti samoina, vaikka tilavuusvirtaama vaihtelisi. Alueen sulanapitojärjestelmän jakotukkien kertasäätöventtiileistä mitatuista tilavuusvirtaamista pystyttiin ratkaisemaan kenttämittauspisteen kautta virtaavan jakotukki 2:n tilavuusvirtaamaosuus.

Taulukko 6. Kiint.oy Biensin alueen sulanapitojärjestelmän mitatut jakotukkikohtaiset virtaamat [Haapio 2014].

	Mitattu virtaama (l/s)
Jakotukki 1	3,43
Jakotukki 2	1,01
Jakotukki 3	1,85
Jakotukki 4	1
Jakotukki 5	2,66

Jakotukille 2 virtaa mittauspisteen kautta mitatusta kokonaisvirtaamasta 14,23 %, kun virtausreitti säilyy koko ajan hydraulisesti samanlaisena. Kenttämittauksissa kerättyjen mittaustulosten mukaan ultraäänivirtaamamittarin 30 sekunnin välein tallentaman virtausnopeuden keskiarvo 1.2.2014 kello 0.00–04.35 oli 0,59 m/s. Mittauspisteessä alueen sulanapitojärjestelmän menoputki, josta virtausnopeutta mitattiin, oli haponkestävä teräsputki DN125, jonka seinämän paksuus oli 2 mm. Tilavuusvirta jakotukin 2 kautta oli 1,214 l/s. Kenttämittauksissa kerättyjen mittaustulosten mukaan lämpötilamittarin 30 sekunnin välein tallentaman lämpötilan keskiarvo 1.2.2014 kello 0.00–04.35 oli menoputken pinnassa +38,3 °C ja paluuputken pinnassa +28,6 °C. Taulukossa 7 on esitetty mittauspisteessä automaattisesti mittaustuloksia tallentavalla lämpötilamittarilla kerätyt meno- ja paluujohdon pintalämpötilat kymmenen minuutin keskiarvoina 31.01.2014–1.2.2014 kello 23.31–04.51. Kun oletetaan, että jäähtymä tapahtuu tasaisesti kaikkien kolmen jakotukin alueella samalla lailla, jäähtymän keskiarvo mittauspisteen yli oli 9,7 °C (katso laskenta, liite 3).

Taulukko 7. Lämpötilamittarin automaattisesti tallentamien mittaustulosten kymmenen minuutin keskiarvolämpötilat meno- ja paluujohdon pinnassa 31.01.2014–1.2.2014 kello 23.31–04.51.



Kiint.oy Biensin alueen sulanapitoverkoston lämmönsiirtoliuoksena käytettiin 40 %:n etyleeniglykoliliuosta, jonka tiheys oli 1050 kg/m^3 ja ominaislämpökapasiteetti $3,55 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ [Haapio 2014; Rintakoski 2014]. Alueen sulanapitojärjestelmän jakotukin 2 keskiarvokokonaisteho 1.2.2014 kello 0.00–04.35 oli $43,89 \text{ kW}$. Jakotukin 2 sulanapitopiirit palvelivat yhteensä $269,1 \text{ m}^2$ alaa kiinteistön ulkoalueista, keskiarvokokonaisteho neliölle oli tällöin $163,1 \text{ W/m}^2$ [Myllymäki 2014b]. Taulukossa 8 on esitetty jakotukin 2 kokonaisteho kymmenen minuutin keskiarvoina 31.01.2014–1.2.2014 kello 23.31–04.51. Osa lumensulatusjärjestelmän jakotukin 2 käyttämästä kokonaistehosta kului alaspäin suuntautuvien lämpöhäviötehojen voittamiseen, koska sulanapitoalueen alapuolisen tilan lämpötila oli normaali huonelämpötila, $+21 \text{ }^\circ\text{C}$. Koko rakenteen lämmönläpäisykerroin (U-arvo) oli keskimäärin $0,22 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Tässä laskennassa käytetään alaspäin suuntautuvien lämpöhäviötehojen määrittämiseen koko rakenteen keskimääräistä lämmönläpäisykerrointa laskennan yksinkertaistamiseksi [RAK195-0251-9001/V. 24.01.2012]. Lämpöhäviötehot jakotukin 2 alueella olivat keskimäärin $2,74 \text{ W/m}^2$ ja hyötyteho $160,4 \text{ W/m}^2$. Laskenta on esitetty liitteessä 3.

Taulukko 8. Ultraäänivirtaama- ja lämpötilamittarin automaattisesti tallentamista mittaustuloksista laskettu kokonaistehon vaihtelu mittaustulosten kymmenen minuutin keskiarvona 31.01.2014–1.2.2014 kello 23.31–04.51.



Sulanapidettävälle pinnalle 1.2.2014 0.00–04.35 lumisateesta kerääntyneestä lumesta kerättiin näyte muovipussiin 0,1*0,1 m alalta kello 04.35, kun lumenkerääntyminen pinnalle oli jatkunut 4 tuntia ja 35 minuuttia. Sulattamaton jäännöskertymä painoi 44 grammaa. Sulanapitopinnan välittömässä läheisyydessä, lämmittämättömältä pinnalta, paikassa jossa lumen kerääntymiselle oli vastaavat olosuhteet, kerättiin luminäyte samalta alalta ja samalta lumen kertymisajalta kuin sulanapidettävältä pinnalta. Lämmittämättömältä pinnalta kerätty luminäyte painoi 128,5 grammaa, ja kertymän korkeudeksi mitattiin 87 mm. Lumikertymän keskeltä mitattiin lumen lämpötilaksi lämpötilaukoanturilla ja lämpötilamittarilla lämpötila $-7,7$ °C. Lämmittämättömälle pinnalle sataneen lumen tiheys oli $147,7$ kg/m³. Sulanapidettävältä pinnalta oli sulanut lunta 84,5 g tai 57,2 mm lunta, jonka tiheys oli $147,7$ kg/m³. Laskenta on esitetty liitteessä 3.

6 Johtopäätökset

6.1 Laskentamallin toimivuus

Kenttämittauksissa mitatuilla sataneen lumen ominaisuuksilla ja sulanapitoalueella sulaneen sadannan määrällä sekä sulamisajalla ratkaistaan laskukaavoilla kerääntyneen lumen lämmittämiseksi tarvittavaksi tehoksi $8,2 \text{ W/m}^2$ ja sulattamiseen tarvittavaksi tehoksi $170,5 \text{ W/m}^2$. Lämpöhäviötehot alueen sulanapitojärjestelmän alapuolelle huomioituna tarvittava kokonaisteho jakotukin 2 alueella on $181,5 \text{ W/m}^2$. Kenttämittauksissa mitattu kokonaisteho oli siis laskettua tehoa $18,4 \text{ W/m}^2$ pienempi eli suhteellisesti 11,3 %. Laskenta selviää liitteestä 4.

Kenttämittauksissa mitattu sulanapitojärjestelmän kokonaistehon ja lasketun kokonaistehon eroa voidaan selittää muun muassa mittareiden epätarkkuudella, jakotukin 2 kautta kulkevan virtaaman epävarmalla ratkaisemisella, luminäytteiden epätarkalla keräämisellä ja lämmönsiirtonesteen jäähtymän epätasaisella jakaantumisella jakotukkien kesken. Kenttämittauksissa tarkempia tuloksia olisi voitu saavuttaa mittaamalla lämpötilaa ja virtaamaa vain tarkasteltavan jakotukin kautta, pidemmällä tarkasteltavalla sulatusjaksolla sekä suuremmalla lumenkertymällä ja lumen ominaisuuksien tarkemmalla tutkimisella.

Laskettu sekä mitattu sulanapitoteho ovat hyvin samansuuruisia, joten voidaan todeta, että kenttämittaukset ovat onnistuneet. Se että laskettu kokonaisteho oli suurempi, saattaa osaksi selittyä sillä, että kenttämittauksia edeltävät kymmenen tuntia, sulanapitojärjestelmä oli ylläpitänyt sulatustehoa vaikka lumisadanta oli ollut vain nimellistä. Tänä aikana sulanapitojärjestelmän rakenne saattoi varata massaansa niin paljon lämpöenergiaa, että sillä tasattiin tarvittavaa sulanapitotehoa sulatusjakson alussa. Kenttämittausten lumentarkastelusta saatiin odotettuja tuloksia, ja vaikka satanut lumi oli reilusti kylmää pakkaslunta, ei lumen tiheys ollut yllätyksellisen suuri. Tämä johtuu siitä, että koko 1.2.2014 kello 0.00–04.35 kestäneen lumisateen ajan tuuli oli kohtalaista, mikä aiheutti lumen pakkaantumista pinnalle, jolle sadanta kerääntyi.

6.2 Tutkimusongelman ratkaiseminen

Työssä päästiin tavoitteeseen, kun insinööryö tuotti LVI-suunnittelijan käyttöön tarkoitetut helppokäyttöiset kansainvälisen mittayksikköjärjestelmän muotoiset laskentamallit alueen sulanapitojärjestelmän tehon mitoittamiseksi, joiden toimivuus todennettiin onnistuneesti kenttämittauksilla. Lisäksi työssä avattiin Suomen lumiolosuhteita ja vastasataneen lumen ominaisuuksia, joiden pohjalta pystytään päättämään suuruusluokka millaista lumikuormaa alueen sulanapitojärjestelmällä halutaan sulattaa. Työssä näytettiin myös toteen, miten suuri merkitys alueensulanapitojärjestelmän alapuolisella lämpöeristeellä on alaspäin suuntautuviin lämpöhäviötehoihin. Esille tuotiin lähtöarvoja, jotka vaikuttavat muita määräävämmiin järjestelmän tehon mitoitukseen. Näiden lähtötietojen tiedostaminen järjestelmän suunnitteluvaiheessa varmentaa järjestelmän halutun toiminnan käytön aikana. Ilman laskennan suorittamista, on taulukoilla 2–4 helppo haarukoida tarvittua sulanapitotehoa ja todeta, missä olosuhteissa valitulla teholla kosteus ei jäädy sulanapidettävälle pinnalle. Kyselytutkimukseen vastanneista puolet käyttää tehon määrittämisessä kokemukseräistä vakiotehoa, eikä huomioi lähtöarvoja millään lailla. Työssä esitetyillä laskukaavoilla sekä taulukoilla on helppo näyttää suunnittelutyön tilaajalle, mitä valitulla kokemukseräisellä teholla saadaan aikaan sulanapitopinnalla.

6.3 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimusaiheita ja uusia tutkimusongelmia syntyi työn edetessä runsaasti, etenkin lumisadekohtaisia lumenkertymiä ei löydetty käytettäväksi työn lähteenä. Vastasataneen lumen tutkiminen ja sen ominaisuuksien ymmärtäminen parantaisi alueen sulanapitojärjestelmän tehon laskentaa, kun voitaisiin määrittää, millaisista lumisateista halutaan sallia runsasta lumen kerääntymistä ja mitkä sulattaa, sallimalla kerääntyminen vain hetkellisesti. Lisäksi tarkalla lumisäädätällä voitaisiin arvioida järjestelmän kuluttamaa energian määrää talven aikana.

Alueen sulanapitojärjestelmän hitautta voitaisiin myös tutkia. Kun rakenteiden aiheuttama hitaus lumensulamisen alkamiseen tunnettaisiin, voitaisiin järjestelmä ohjata sulatuskuormalle jo ennen lumisateen alkua. Tällöin muutoin luokan 3 järjestelmästä tulisi luokan 1 järjestelmä. Rakenteiden aiheuttaman hitauden

tappamiseksi tarvittaisiin rakennusautomaatiolta älyä lukea säädataa esimerkiksi sääennusteen palvelutuottajalta, mikä on myös uusi tutkimusongelma.

Mielenkiintoisin tutkimusongelma olisi kuitenkin järjestelmän hyötykäyttö kesätilanteessa, kun sulanapitoa ei tarvita. Voitaisiinko järjestelmää käyttää silloin lämmönkeräämiseen? Suuren absorptiokertoimen omaava sulanapidettävä pinta voisi lämmityskauden ulkopuolella kerätä auringon säteilyenergiasta matalalämpötilaista energiaa, jota voitaisiin hyötykäyttää, vaikka uima-altaan lämmittämiseen.

Lähteet

1000 series manual. 2006. Verkkodokumentti. Eltek As.
<http://www.eltekdataloggers.co.uk/pdf/manuals/TM1033_1000_Manual.pdf> Luettu 12.02.2014

Ahvenisto, Ursula & Boren, Esa & Hjelt, Sven-Erik & Karjalainen, Tuija & Sirviö, Jarmo. 2002. Geofysiikka, Tunne maapallosi. WSOY, Porvoo.

ASHRAE Handbook, HVAC Applications, SI Edition, Chapter 51.10. 2011.

Datasheet, UFM 610P. 2000. Verkkodokumentti. Krohne messtechnik gmbh & co.
<http://www.krohne-downloadcenter.com/dlc/TD_UFM600T_610P_e_72.pdf> Luettu 12.02.2014

Energiatohokkaat ratkaisut kerrostalon saneeraukseen. 2013. Verkkodokumentti. Ensto Oy.
<http://www.enervent.fi/data/fi/brochures/Energiatohokkaat_ratkaisut_kerrostalon_saneeraukseen.pdf>. Luettu 02.10.2013.

Haapio, Petri. 2014. Projektinjohtaja. Sähkö Peko Oy; Tampere. Keskustelu 06.02.2014.

Hirsjärvi, Sirkka & Remes, Pirkko & Sajavaara, Paula. 1997. Tutki ja kirjoita. Kustannusosakeyhtiö Tammi. Helsinki.

Joukkuelajit. 2013.. Verkkodokumentti Vaasanseudun Areenat Kuntayhtymä.
<http://www.botniarenas.fi/tmp_urheilu_site_0.asp?sua=4&lang=1&s=29>. Luettu 08.10.2013.

Kaavoitus ja rakentaminen. 2014. Verkkodokumentti. Tapiola toimii ry.
<<http://www.tapiolankeskus.fi/tietoa-projektista/kaavoitus-ja-rakentaminen/>> Luettu 12.02.2014

Kalliomäki, Pekka. 2003. Lämmöneristys, Suomen rakentamismääräys kokoelma C4. Helsinki. Ympäristöministeriö.

Kalliomäki, Pekka. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Suomen rakentamismääräys kokoelma D5. Helsinki. Ympäristöministeriö.

Karttunen, Hannu & Koistinen, Jarmo & Saltikoff, Elena & Manner, Olli. 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto, Ursan julkaisuja 107. Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry, Helsinki.

Katulämmityksellä kesäkeli keskelle talvea. 2001. Verkkodokumentti. VTT.
<<http://www.vtt.fi/newsarchive/uutiset2001/uutinen342.htm>>. Päivitetty 27.11.2001.
Luettu 02.10.2013.

Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki. Energiateollisuus ry.

Kilkis, I. Birol. 1994. Design of embedded snow-melting systems, part 1: Heat requirements -an overall assessment and recommendations. Atlanta. ASHRAE.

Lappalainen, Markku. 2010. Energia ja ekologia käsikirja. Helsinki. Rakennustieto Oy.

Linko, Harri. 2014. Projektipäällikkö, Granlund Oy, Helsinki. Keskustelu 10.02.2014.

Lumensulatusjärjestelmä käsikirja. 2007. Verkkodokumentti. Uponor Oy.
<http://www.uponor.fi/~media/Files/Uponor/Finland/Snow%20and%20ice%20melting/4012_02_07_MEL_kasik.pdf> Luettu 11.11.2013.

LVI 1411. 14.05.2013. Granlund Oy. Sulanapidon jakotukkien periaatepiirustus.

Lämpöä laadukkaasti. 2013. Verkkodokumentti. Warmia Oy.
<http://www.warmia.fi/media/uploads/esitteet/174_isot_kohteet_esite_pieni.pdf> Luettu 12.11.2013.

Maisalmi, Jouni. 2013. Aluepäällikkö, Stravent Oy. Helsinki. Tuote-esittely. 20.09.2013.

Manual, UFM 610P. 1999. Verkkodokumentti. Krohne messtechnik gmbh & co.
<http://www.krohne-downloadcenter.com/dlc/MA_UFM610P_e_72.pdf> Luettu 12.02.2014

Mills, Anthony. 1999. Basic heat & mass transfer. New Jersey. Prentice hall.

Mustonen, Seppo. 1986. Sovellettu hydrologia. Helsinki. Vesiyhdistys ry.

Myllymäki, Ossi. 2014a. Ryhmäpäällikkö, Granlund Oy, Helsinki. Keskustelu 10.02.2014.

Myllymäki, Ossi. 2014b. Ryhmäpäällikkö, Granlund Oy, Helsinki. Sähköposti 10.02.2014.

Putkessa 1/2006. 2006. KWH Pipe Oy. Asiakaslehti.
<www.kwhpipe.fi/Link.aspx?id=442220> Luettu 08.10.2013.

RAK195-0251-9001/V. 24.01.2012. Aaro Kohonen Oy. Työpiirustus, Rakennepiirustus.

Ramsey, James & Hewett, Martha & Kuehn, Thomas & Petersen, Sean. 1999. Updated design guidelines for snow melting systems. Atlanta. ASHRAE Transactions.

RAU 6101. 20.12.2013. Granlund Oy. Säättökaavio 101, lämmönjakolaitteet.

Rintakoski, Marjo. 2014. Myyntiassistentti. KL-Lämpö Oy; Pirkkala. Sähköposti 06.02.2014.

Saukkonen, Lea. 2008. Suomalainen sää. Helsinki. Minerva Kustannus Oy.

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

Sipilä, Kari & Kirjavainen, Miikka & Ritola, Jouko & Kivikoski, Harri. 2001. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Verkkodokumentti. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2113.pdf>>. Luettu 21.10.2013.

Solakuja, Joni. 2014. Suunnittelija. Granlund Oy, Helsinki. Keskustelu 17.02.2014.

Styrofoam 300 SL-AN. 2013. Verkkodokumentti. Isover Oy.
<<http://www.isover.fi/tuotteet/rakennuseristeet/styrofoam-eristeet/2599/styrofoam-300-sl-an>> Luettu 15.09.2013

Sulanapito. 2013. Verkkodokumentti. Pistesarjat Oy.
<http://www.sulanapito.fi/images/pdf/sulanapito_esite.pdf> Luettu 08.10.2013.

Sulanapito, valikoima ja käsikirja. 2007. Verkkodokumentti. Thermotec Scandinavia Finland.
<http://www.thermofloor.fi/download/18.652320e711efef616d28000135/Sulanapito+A4_FIN_0709.pdf> Luettu 08.10.2013.

Sulanapitoratkaisut. 2013. Verkkodokumentti. Ensto Oy.
<http://www.ensto.com/download/18993_frost_protection_solutions_fin.pdf>. Luettu 15.09.2013

Tekniikan kaavasto. 2010. Tammertekniikka. Tampere. Amk-kustannus Oy.

RT 37808. 2009. Verkkodokumentti. Thermisol Oy.
<http://www.thermisol.fi/assets/files/Eriste_Esitteet/RT-Routaeristysratkaisut.pdf> Luettu 15.09.2013

Turunen, Jarkko. 2014. Tekninen johtaja. Arealtec Oy, Vantaa. Keskustelu 18.02.2014.

Tuulimittaukset Suomessa. 2009. Verkkodokumentti. Suomen tuuliatlas.
<http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/tuulisuus_1.html> Luettu 01.09.2013

Ulkoalueiden sulanapito lisää turvallisuutta talvisina aikoina. 2013. Verkkodokumentti. Oy Danfoss Ab Danfoss Lämpö.
<<http://devi.danfoss.com/Finland/Consumer/FloorHeatingForHome/Outdoor+Heating/>>. Luettu 02.10.2013.

Kyselytutkimuksen kysymyspohja

Seuraavat kysymykset koskevat tehonmitoitusta katu-, tori-, aukio tai niihin rinnastettavilla ulkoalueilla joita pidetään vapaana lumesta ja jäädä vesikiertoisella tai sähkölämmitetyllä sulanapitojärjestelmällä joka on rakennettu alueen rakenteen pinnan alapuolelle.

Käytättekö tehon määrittämiseen ns. nyrkkiarvoa joka on todettu aiempien projektien pohjalta riittäväksi ja sopivaksi?

Hyödynnättekö tehon määrittämiseen jonkun muun organisaation tuottamaa dataa tai laskenta kaavaa yms.?

Hankittekö laskennan ulkopuoliselta yritykseltä, kuten laitetoimittajalta tai asennuksesta vastaavalta taholta?

Määritättekö tehon kohdekohtaisesti hyödyntäen valmista excel-pohjaa tai Comsol tai Temp/W kaltaisia lämmönmallinnus ohjelmia?

Mikä on suunnitteleminen järjestelmien tavoite? (sulattaa satanutta tai kulkeutunutta lunta x mm/h ja kuivata pinta sulavesifilmikerroksesta)

Minkälaisia lähtöarvoja otatte huomioon tehoa määriteltäessä? (maantieteellinen sijainti, rakennekerrokset, paikallinen säädata)

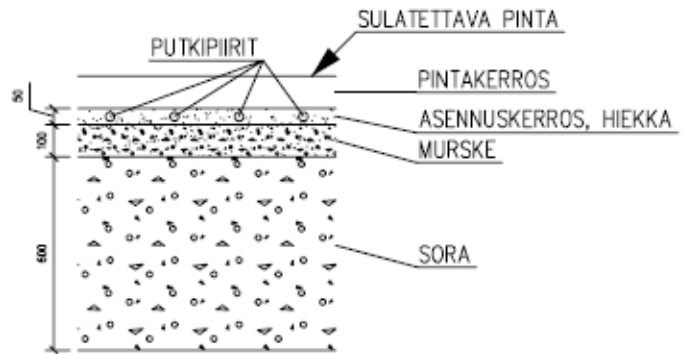
Kuka toimittaa tai mistä hankitte lähtöarvot?

Oletteko saaneet palautetta sulanapidon toimivuudesta kohteista joita olette suunnitelleet?

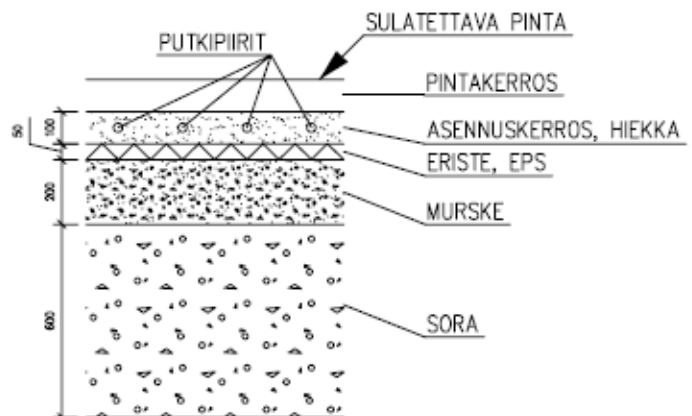
Muita huomioita joita haluatte tuoda julki?

Laskennassa käytettyjen sulanapitoalueiden rakenneratkaisut,
laskentatapaukset (case) 1–6

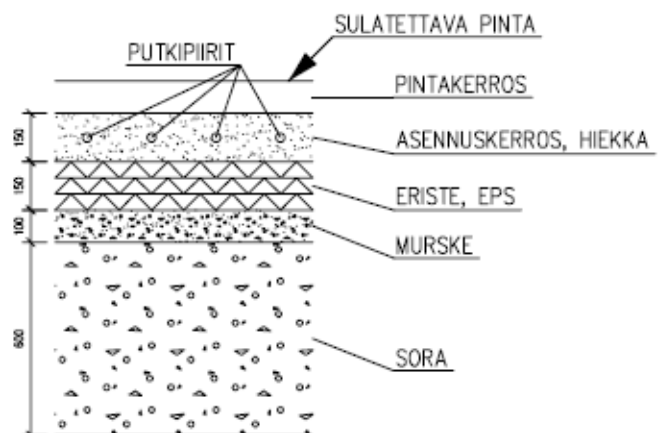
CASE 1



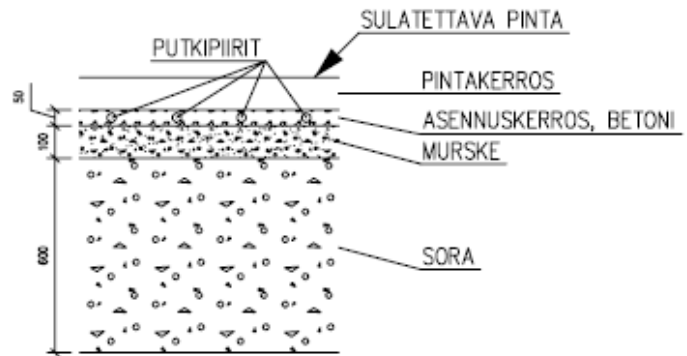
CASE 2



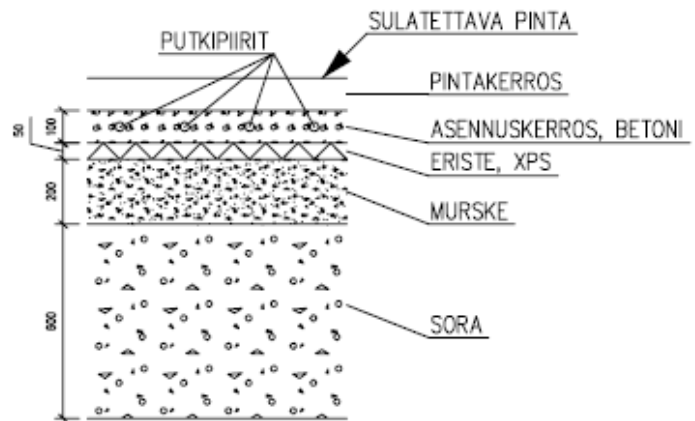
CASE 3



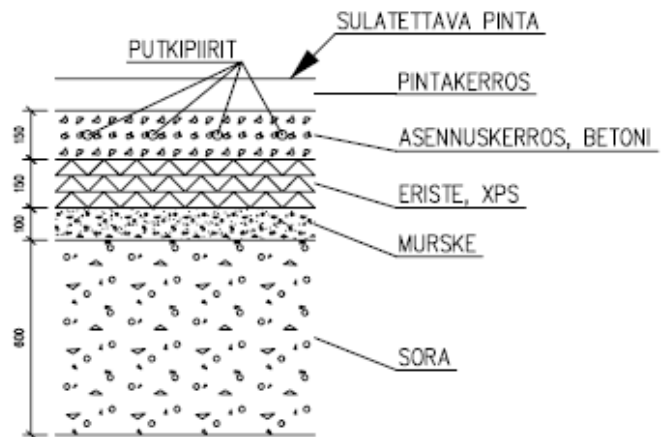
CASE 4



CASE 5



CASE 6



Laskelmia kenttämittausten lumensulatus- ja häviötehojen ratkaisemiseksi sekä lumen ominaisuuksien selvittämiseksi

Ratkaistaan virtaamaosuus, joka virtaa jakotukin 2 kautta, kun virtaamareitti säilyy hydraulisesti vakiona

$$\left(\frac{1,01}{3,43+1,01+2,66}\right) * 100 = 14,23\%$$

1,01 on jakotukin 2 virtaama

3,43 on jakotukin 1 virtaama

2,66 on jakotukin 5 virtaama

100 on muuntokerroin

Ratkaistaan tilavuusvirta jakotukin 2 kautta

$$\left[\frac{((0,4389 \text{ m}/\pi) - 0,002 * 2)}{2}\right]^2 * \pi * 0,59 \text{ m/s} * 0,1423 = 0,001214 \text{ m}^3/\text{s}$$

0,4389 m on mitattu putken ulkohalkaisija

0,002 m on putken seinämän paksuus

0,59 m/s on mittauspisteen kautta virtaavan nesteen keskiarvonopeus ajan hetkellä 1.2.2014 kello 0.00–04.00

0,1423 on osuus joka virtaa jakotukin 2 kautta

Ratkaistaan jäähtymä meno- ja paluujohdon välillä

$$+38,3 \text{ }^\circ\text{C} - +28,6 \text{ }^\circ\text{C} = 9,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

+38,3 on mitattu menopotken lämpötilan keskiarvo mittauspisteessä putken pinnasta 1.2.2014 kello 0.00–04.00

+28,6 on mitattu paluuputken lämpötilan keskiarvo mittauspisteessä putken pinnasta 1.2.2014 kello 0.00–04.00

Ratkaistaan teho jakotukin 2 alueella

$$0,001214 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 3,55 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * 9,7 \text{ }^\circ\text{C} = 43,89 \text{ kW}$$

1050 kg/m³ on lämmönsiirtonesteen tiheys

3,55 kJ/kg*°C on lämmönsiirtonesteen ominaislämpökapasiteetti

Ratkaistaan kokonaisteho sulatettavalle pinta-alalle

$$\frac{43,89 \text{ kW}}{269,1 \text{ m}^2} * 1000 = 163,1 \text{ W/m}^2$$

269,1 m² on jakotukin 2 sulanapitopinta-ala

1000 on muutoskerroin

Ratkaistaan lämmityspiirien lämmönsiirtonesteen keskilämpötila käyttöön kaavaa viisi

$$\frac{38,3+28,6 \text{ }^\circ\text{C}}{2} = 33,45 \text{ }^\circ\text{C}$$

Ratkaistaan sulanapitojärjestelmän jakotukin 2 lämpöhäviötehot alaspäin

$$0,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{ }^\circ\text{C}} * (33,45 - 21 \text{ }^\circ\text{C}) = 2,74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

0,22 W/m²*°C Sulanapitorakenteen keskimääräinen

lämmönläpäisykerroin

21 °C on sulanapitoalueen alapuolisen huonetilan ilman lämpötila

Ratkaistaan hyötyteho lumen lämmittämiseksi ja sulattamiseksi

$$163,1 - 2,74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 160,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Ratkaistaan lumen tiheys lämmittämättömällä pinnalle kaavalla 1

$$\frac{0,1285 \text{ kg}}{0,087\text{m}*0,1\text{m}*0,1\text{m}} = 147,7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

0,1285 kg on luminäytteen massa lämmittämättömällä pinnalla

0,087m on lumikertymän korkeus lämmittämättömällä pinnalla

0,1m*0,1m on ala jolta luminäyte kerättiin

Ratkaistaan sulaneen lumen massa sulanapidettävältä pinnalta

$$0,1285\text{kg} - 0,044\text{kg} = 0,0845\text{kg}$$

0,044 kg on jäännöskertymä sulanapidettävälle pinnalle

Ratkaistaan sulanapidettävällä pinnalla sulatetun lumikertymän korkeus

$$\frac{0,087\text{m}*0,0845\text{kg}}{0,1285\text{kg}} = 0,0572\text{m}$$

Laskentakaavoilla ratkaistut alueensulanapitotehot kenttämittauksissa mitatuissa olosuhteissa

Ratkaistaan teoreettinen lumen lämmittämiseksi tarvittava teho sulatusjakson aikana kenttämittauksissa mitattuihin olosuhteisiin kaavalla kaksi

$$\frac{0,0572m \cdot 147,7 \frac{kg}{m^3} \cdot 2090 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (0 - -7,7^\circ C)}{(4 \cdot 3600s + 35 \cdot 60s)} = 8,24 \frac{W}{m^2}$$

4*3600s+35*60 on sulatusaika

Ratkaistaan teoreettinen lumen sulattamiseksi tarvittava teho sulatusjakson aikana kenttämittauksissa mitattuihin olosuhteisiin kaavalla kolme

$$\frac{0,0572m \cdot 147,7 \frac{kg}{m^3} \cdot 333000 \frac{J}{kg}}{(4 \cdot 3600s + 35s \cdot 60)} = 170,5 \frac{W}{m^2}$$

Ratkaistaan teoreettinen alueen sulanapitojärjestelmän kokonaisteho kenttämittauksissa mitattuihin olosuhteisiin kaavalla kahdeksan

$$8,24 \frac{W}{m^2} + 170,5 \frac{W}{m^2} + 2,74 \frac{W}{m^2} = 181,48 \frac{W}{m^2}$$

Kenttämittauksissa mitatun keskiarvokokonaistehon ja kenttämittauksissa mitatuilla olosuhteilla ratkaistun kokonaistehon suhteellinen ero

$$\left[\left(\frac{181,48 \frac{W}{m^2}}{163,1 \frac{W}{m^2}} \right) - 1 \right] * 100 = 11,27\%$$