



Asko Saarinen

Lumensulatusjärjestelmän mitoitus portaisiin

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

25.4.2024

Tiivistelmä

Tekijä:	Asko Saarinen
Otsikko:	Lumensulatusjärjestelmän mitoitus portaisiin
Sivumäärä:	49 sivua + 1 liitettä
Aika:	25.4.2024
Tutkinto:	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	Talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	Yliopettaja Rauno Holopainen Erikoisasiantuntija Mikko Keinänen

Liukkauden torjunta on keskeinen osa piha-alueiden ja ulkoportaiden talvikunnossapitoa. Lumensulatusjärjestelmiä käytetään liukkauden torjuntaan piha-alueella paikoissa, joissa halutaan varmistaa pintojen jatkuva sulana pysyminen. Tämän insinöörityön tavoitteena oli laatia Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy:n käyttöön mitoitusohjelma, jolla voidaan mitoittaa ulkona sijaitsevien portaiden lumensulatusjärjestelmän tehontarve.

Opinnäytetyössä tutkittiin kaukolämpöön liitettyä sulatusjärjestelmää ja sen käyttöä ulkona olevien portaiden sulana pitämiseen. Tutkimusmenetelminä olivat kirjallisuuteen ja kokemuseräiseen tietoon perustuvat menetelmät. Keskeisimpiä kirjallisuuslähteitä olivat ASHRAE:n ja VTT:n julkaisut lumensulatusjärjestelmistä.

Portaiden lumensulatukseen tarvittava teho on vaakatasossa olevaa pinta-alaa kohti suurempi kuin vaakatasossa olevan piha-alueen sulatukseen tarvittava teho. Ero johtuu siitä, että portaissa on sulana-pidon varmistamiseksi lämmitettävä vaakatasossa olevan askelman lisäksi portaan nousun osa. Laskentatulosten mukaan Etelä-Suomessa lumensulatukseen tarvitaan lämmitystehoa tasaisella pinnalla noin 300 W/m^2 . Portaissa vastaava lämmitysteho on noin $619\text{--}700 \text{ W/m}^2$.

Avainsanat: Kaukolämpö, lumensulatus, portaat, Excel-laskuri

Abstract

Author:	Asko Saarinen
Title:	Dimensioning Snow Melting System for Stairs
Number of Pages:	49 pages + 1 appendix
Date:	25 April 2024
Degree:	Master of Engineering
Degree Programme:	Name of the degree programme in Construction
Supervisors:	Rauno Holopainen, Principal lecturer Mikko Keinänen, Specialist

The aim of this thesis was to create a dimensioning program for of the commissioning company to be used to dimension the power required by the snow melting system of outdoor stairs.

The thesis examined a defrosting system connected to district heating, studying how it was used to keep outdoor stairs thawed. The main literature sources used for the thesis were publications by ASHRAE and VTT Technical Research Centre of Finland on snow melting systems. The calculation instructions of these two were compared by performing calculations.

The calculations performed in the thesis showed that snow melting in Southern Finland requires a heating capacity of about 300 W/m² on a flat surface. As the power required to melt snow on stairs is higher per horizontal area than the power required to defrost the horizontal yard area because not only the horizontal step but also the ascent needs to be heated to ensure that the stairs are kept thawed, the corresponding heating capacity of the stairs is approximately 619–700 W/m².

Tags: district heating, snow melting, stairs, Excel- calculator

Alkusanat

Haluan erityisesti kiittää Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy:n energiaosaston osastopäällikkö Mikko Keinästä työn ohjaamisesta ja kommentoinnista.

Helsingissä,

Asko Saarinen

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kaukolämpöön liitetty lumensulatusjärjestelmä	2
3	Kytkenät	6
3.1	Kytkentä kaukolämmössä	6
3.2	Säätöjärjestelmän toiminta	7
4	Sähköinen lumensulatusjärjestelmä	8
5	Kaukolämmön ja sähkön hintojen kehitys	10
6	Liuospohjainen lumensulatus	13
6.1	Kaukolämmönsiirtimet	14
6.2	Lumensulatusjärjestelmän liuosputkisto	15
6.3	Jakotukit	15
6.4	Asennus	17
6.5	Asennusesimerkkejä	20
6.6	Nestekiertoisen lumensulatuksen vaikutus kaukolämpölaitokseen	22
7	Sähköinen lumensulatus	23
8	Tehomitoitus	27
9	Energiankulutus	33
9.1	Liuospohjainen sulatusjärjestelmä	34
9.2	Sähköinen sulatusjärjestelmä	36
10	Excel- tehomitoitusohjelma	37
10.1	Laskentaesimerkki ASHRAE:n kaavoilla	39
10.2	Laskentaesimerkki VTT:n laskentakaavoilla	43
11	Yhteenveto	45
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1: Raportti lumensulatuksesta	

1 Johdanto

Talvikauden liukastumiset aiheuttavat suuria taloudellisia menetyksiä, eri asteisia vammoja, inhimillistä kärsimystä ja pahimmillaan pitkiä sairaspoissaoloja. Vuonna 2021 palkansaajille tapahtui 11 000 työtapaturmaa, jotka johtuivat liukastumisesta tai horjahduksesta [1]. Tämän vuoksi lämmityksien käyttö katu- ja liikennealueiden lumen sulatuksessa sekä liukkaudentorjuntakeinona on yleistynyt kaupunkikeskuksissa kävelykaduilla ja liikekeskuksien piha- ja ulkoalueilla. Myös osaan ulkoportaita, jotka ovat vilkkaassa käytössä, on jälkikäteen asennettu lumensulatusjärjestelmä.

Lumensulatusjärjestelmän tehon mitoitusta on käsitelty ASHRAE:n käsikirjan [2.] luvussa 52. Lumensulatusjärjestelmiä on tutkittu Suomessa VTT:n projektissa [3]. Aiheesta on tehty myös AMK- opinnäytetyö [4]. Laitevalmistajien esitteissä on myös esitetty lumensulatusjärjestelmien toteutustapoja [5; 6]. Aikaisempia julkaisuja on hyödynnetty opinnäytetyössä.

Lumen sulatuksen etuja ovat muun muassa talvikunnossapidon työkustannusten pieneneminen ja pintamateriaalien pysyminen paremmassa kunnossa, kun kuluttavaa mekaanista lumen poistoa ei tarvitse tehdä [3]. Yleisesti lumensulatuksia on tehty verrattain paljon katu- ja piha-alueille, erilaisille pintamateriaaleille, mutta portaissa lumensulatuksen käyttö on ollut vähäisempää ja näissä yleisenä lumensulatusjärjestelmänä on ollut sähkölämmitys. Sähkölämmityksen osuus lumensulatuksena on kasvanut sen helpon käytettävyyden vuoksi. Sähkölämmitys on myös helppo asentaa kaltevalle pinnalle ja sen investointikustannus on nestekiertoiseen järjestelmään verrattuna edullinen. Nestekiertoisen järjestelmän ongelmana on muun muassa putkistoon jäävät ilmataskut, joita helposti jää asennuksessa putkistoon [3].

Sähköllä toimivien lumensulatusjärjestelmien on havaittu kuitenkin olevan helposti vikaantuvia ja niiden käyttöikä on ollut nestekiertoisia järjestelmiä lyhyempi. Tästä syystä kaukolämpöön liitetyt järjestelmät ovat alkaneet yleistyä.

Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot -LVI- kortissa on mainittu muovisten putkistojen käyttöiäksi 50 vuotta ja vastaavasti ST-kortissa sähkökaapeleiden käyttöiäksi annetaan 20 vuotta [7; 8]. Lumensulatuksessa käytettävien kaapeleiden käyttöikä ei ole näin pitkä johtuen verrattain kovista lämpötiloista kaapeleissa. Sähkökäyttöiset kaapelit pintalämpötila on $+60/+220\text{ }^{\circ}\text{C}$, kun vastaavasti liuospohjaisessa järjestelmässä maksimilämpötila $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tehollisesti ei ole todettu olevan suurta merkitystä, tehdäänkö sulatus sähköllä vai liuoksella [3]. Hankintahinta ja käyttökustannukset ovat ratkaisevassa asemassa vertaillessa näitä kahta erillistä lämmitysmuotoa.

Opinnäytetyön tavoitteena on laatia ulkona olevaan portaan lumensulatuksen mitoitusperusteet kaukolämpöön liitettävää lumensulatusjärjestelmää varten. Mitoitusperusteiden pohjalta kehitetään helppo- ja nopeakäyttöinen Excel-pohjainen laskuri, jolla pystytään mitoittamaan lumensulatusjärjestelmään tarvittava teho ja lämmönsiirto-putkiston lämpöhäviöt.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytettiin kirjallisuutta, jonka avulla perehdyttiin aiemmin tehtyihin samankaltaisiin tutkimuksiin ja verkkojulkaisuihin. Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytettiin myös kokemusperäisiä havaintoja aikaisemmin suunnitelluista lumensulatusjärjestelmistä ja niiden toiminnasta.

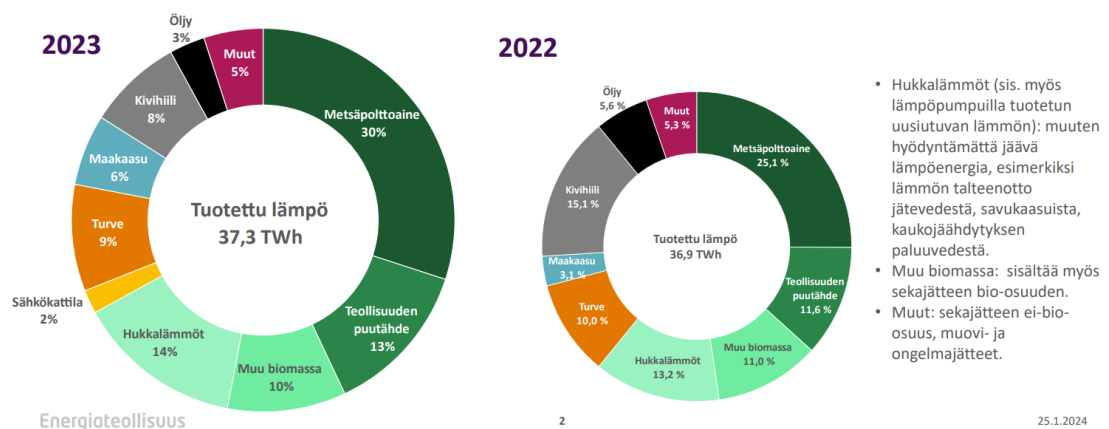
2 Kaukolämpöön liitetty lumensulatusjärjestelmä

Kaukolämpö on Suomen yleisin lämmitysmuoto. Kaukolämpöä käytetään lämmönlähteenä lumensulatusjärjestelmissä. Motivan raportin mukaan kaukolämmöllä lämpiää Suomen koko rakennuskannasta 50 %. Kaukolämpöverkko on kaikkiaan 177 Suomen kunnassa ja kaupungissa. Kaukolämmön tuotanto isoimmissa kaupungeissa perustuu yhteistuotantolaitoksiin, joissa tuotetaan sähköä. Sähkön ja lämmön yhteistuotannossa turbiineissa sähköntuotannon yhteydessä syntyvä hukkalämpö otetaan talteen kaukolämpöverkoston. Sähköstä lähes kol-

mannes tuotetaan yhteistuotantona lämmöntuotannon yhteydessä, jolloin polttoaineen energiasisältö käytetään mahdollisimman tarkkaan hyödyksi. Noin 90 % polttoaineen energiasta saadaan muutettua sähköksi ja lämmöksi [9].

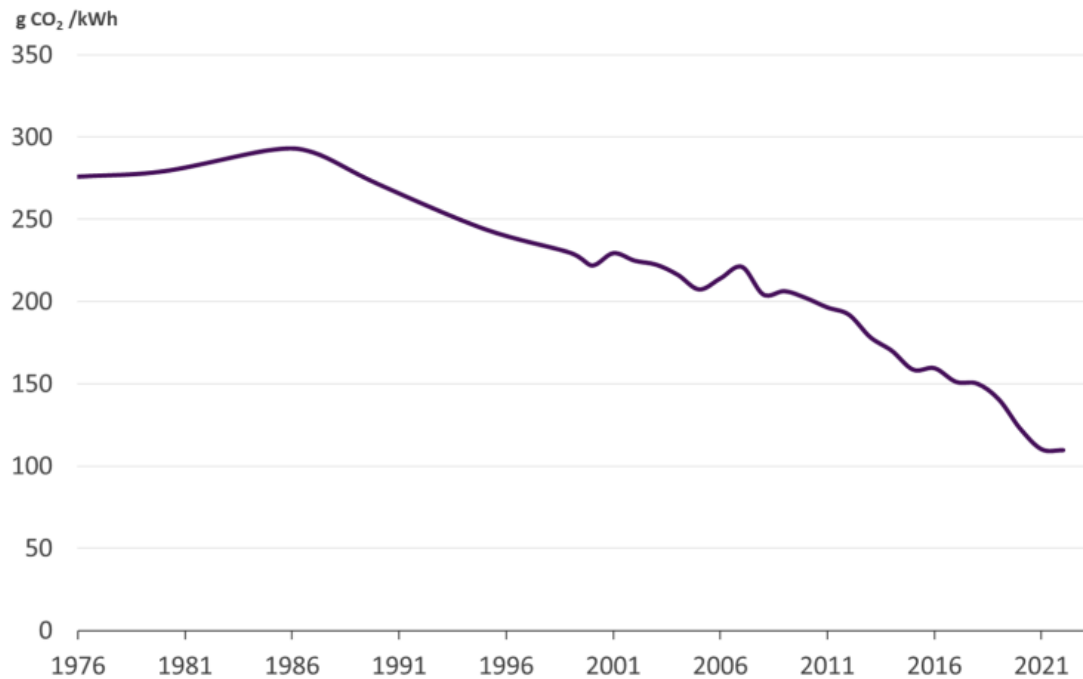
Pienemmissä kunnissa ja kaupungeissa kaukolämpöä tuotetaan niiden omissa polttolaitoksissaan. Polttolaitoksissa yleisesti käytössä olevat polttoaineet ovat maakaasu, kivihiili, turve ja puu. Kaukolämmön tuotantotapoina ovat myös yleis-työssä hybridiratkaisut, jotka eivät perustu polttoaineen polttoon vaan lämpöpumppu ratkaisuihin tai teollisuuden hukkalämpöön. Lämpöpuilla energiaa on otettavissa, esim. maaperästä, vesistöistä tai jätevedestä. Alalla on myös kokeilussa geotermiset ratkaisut [10].

Biomassa ja hukkalämmöt ovat korvanneet fossiilisia polttoaineita kaukolämmön- tuotannossa (kuva 1). Biomassan käyttö on kaksinkertaistunut ja hukkalämpöjen määrä on yli kolminkertaistunut vuodesta 2010. Hukkalämpöjä hyödyntämällä vähennetään fossiilisten polttoaineiden käyttöä [9].



Kuva 1. Kaukolämmön hankinnan energialähteet vuosina 2023 ja 2022 [8].

Kaukolämmön energiantuotannon ympäristövaikutukset ovat riippuvaisia tuotantoketjun eri vaiheista, joita ovat polttoaineiden hankinta, jalostus, varastointi ja kuljetus sekä energian tuotantoprosessi ja jätteiden käsittely. Kuvassa 2 on havainnollistettu kaukolämmön ominaispäästöjen muuttumisesta vuosien 1976–2022 aikana [9].



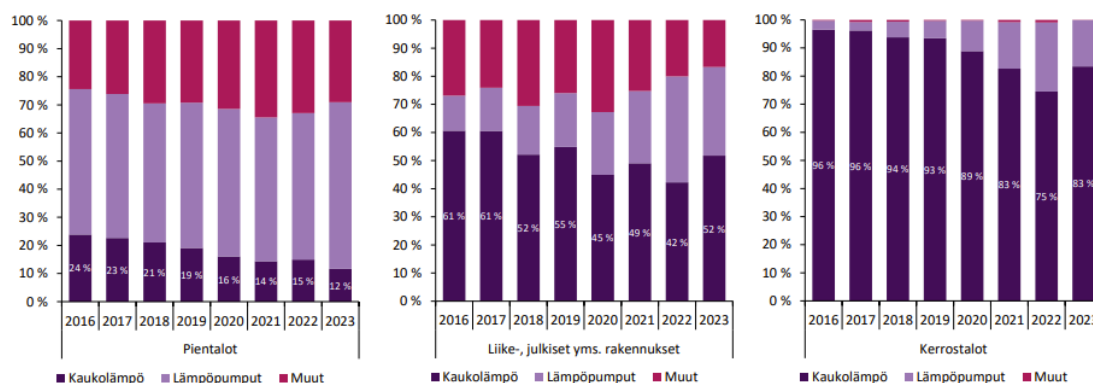
Kuva 2. Kaukolämmön ominaispäästöjen muutos vuosina 1976–2022 [9].

Kaukolämmön ominaispäästöt ovat laskeneet noin 59 % vuoteen 2010 verrattuna (kuva 3). Sähköenergian ominaispäästöt ovat laskeneet kymmenessä vuodessa 78 %. Molempien energiatuotantomuotojen päästöjen pieneneminen on ollut merkittävää [9].

	Vuosi 2022	Muutos vrt. 2021
Kaukolämmön hankinta yhteensä	36 900 GWh	- 6,0 %
Kaukolämmön tuotanto polttoaineilla	31 800 GWh	- 5,5 %
Kaukolämmön tuotantoon liittyvä sähkön tuotanto	8 100 GWh	- 18,8 %
Edellisiin käytetty polttoaine	48 600 GWh	- 6,5 %
Lämmön talteenotto ja lämpöpumpun tuotanto	4 900 GWh	- 9,1 %
Kaukolämmön käyttö	33 000 GWh	- 6,6 %
Asuintalojen osuus käytöstä	54,1 %	+ 0,8 %-yks.
Asiakkaat:		
❖ Sopimusteho	19 400 MW	+ 0,8 %
❖ Rakennustilavuus	1030 milj. m ³	+ 0,8 %
❖ Asuintalojen osuus rakennustilavuudesta	46,1 %	+ 0,1 %-yks.
Myydyn lämmön verollinen keskihinta:		
❖ Aritmeettinen keskiarvo	88,22 €/MWh	+ 6,6 %
❖ Lämmön myynnillä painotettu keskiarvo	91,32 €/MWh	+ 10,2 %
Kaukolämpöverkon pituus	16 200 km	+ 0,9 %

Kuva 3. Kaukolämmön energiantuotannon vertailu vuosina 2022–2021 [9].

Kaukolämmön osuus rakennusten lämmityksestä on noin puolet. Uudisrakentamisessa suuntana on viimeisinä vuosina ollut lämpöpumppujen ja hybridilämmityksen käytön lisääntyminen. Pienasuinrakennuksien osalta lämpöpumppujen osuus on jo merkittävä, mutta asuinkerrostalojen ja liikerakentamisen kohdalla kaukolämmöllä on vielä suurin osuus lämmöntuotosta (kuva 4) [9].



Kuva 4. Päälämmitysmuodon valinta uudisrakentamisessa. [9.]

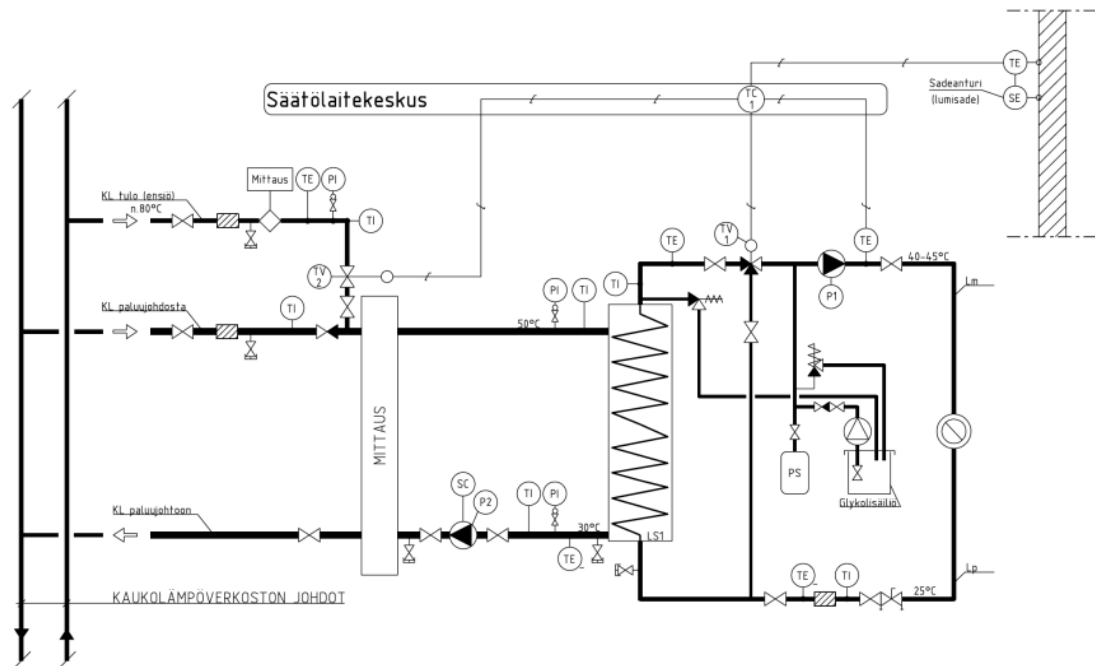
3 Kytkennät

3.1 Kytkentä kaukolämmössä

Liuospohjainen sulatusjärjestelmä voidaan kytkeä kaukolämpöverkoston periaatteessa kahdella tavalla. Ensimmäinen kytkentä esimerkki (kuva 5), missä pääasiallinen lämmitys tapahtuu kiinteistön lämmitysverkoston paluuviedellä tai mahdollisen ilmanvaihtoverkoston paluuviedellä. Ensiöpuolella on venttiilit, joilla voidaan ohjata kaukolämpövettä kulkemaan lumensulatusjärjestelmän siirtimen kautta, jolla lämmitetään lumensulatusverkon liuoksen lämpötilaa, mikäli muiden lämmitysverkoston paluuviedestä saatava lämmitysteho ei ole riittävä pitämään lumensulatusverkon lämpötilaa haluttuna. Kytkennän etuna on, että kaukolämpölaitokselle lähtevän paluuvien lämpötila saadaan pidetty mahdollisimman matalana. Säädön kannalta on tärkeää, että meno- ja paluunesteen lämpötila mitataan ja tehoa rajoitetaan, mikäli kaukolämmön paluulämpötila laskee alle + 5°C, millä vältetään vesipuolen verkoston ja siirtimen jäätyminen [12].

Perinteisemmän kytkennän, jossa energia otetaan verkostoon suoraan ensiöpuolelta, etuna on pienempi siirrin, koska lämpötilaerot ovat suuremmat ja säätö on yksinkertaisempi. Vastaavasti haittana on, että paluulämpötilaa kauko-

lämpöverkostoon ei saada pidettyä niin matalana kuin kytkennällä, jossa lumen-
sulatusjärjestelmässä käytetään ensisijaisesti kiinteistön muiden lämmitysver-
kostojen paluuvettä [12].



Kuva 5. Katu- tai piha-alueen sulanapitokytkentä [12].

3.2 Säätojärjestelmän toiminta

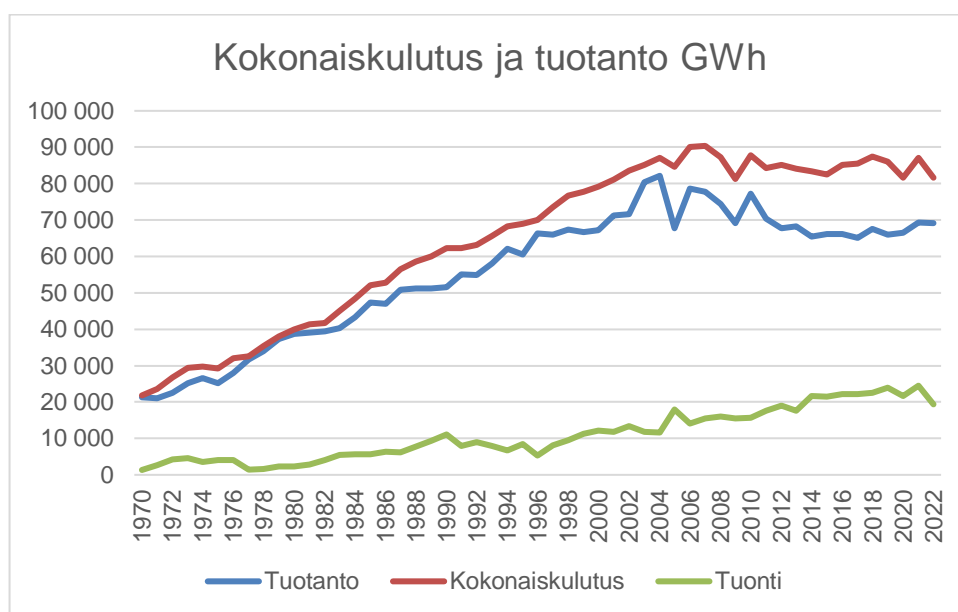
Säätojärjestelmällä pyritään pitämään lumensulatusjärjestelmän liuoslämpötilat vakiona. Järjestelmän säätö on periaatteessa molemmissa mallikytkennöissä samanlainen. Järjestelmä aktivoituu, kun ulkolämpötila on laskenut alle asetusarvon. Yleisesti tämä arvo on $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Verkoston lämpötila pidetään tämän jälkeen asetusarvokäyrän mukaisena säätämällä venttiileitä sarjassa.

Lumianturin havaitessa lunta säätojärjestelmä ohjaa lumensulatusjärjestelmän menoveden maksimilämpötilalle ($+45\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja pitää veden lämpötilan asetusarvossa niin kauan, kuin lumisadetta havaitaan. Sääto palaa normaalitilanteeseen asetellun viiveen jälkeen. Normaali viive on 2 tuntia. Säätoä rajoitetaan, mikäli

lumensulatusalueen pintalämpötila nousee yli +5 °C tai mikäli kaukolämmön pailuulämpötila laskee alle +2 °C. Näillä toimenpiteillä estetään lumensulatussiirtimen jäätyminen sekä pihakerroksen yllilämmittäminen.

4 Sähköinen lumensulatusjärjestelmä

Sähkön kulutus on lisääntynyt tasaisesti Suomessa vuodesta 1970. Myös sähköntuotanto on vastaavasti lisääntynyt vastaamaan kulutusta (kuvat 6 ja 7). Vasta 2000-luvun alussa on sähkönkulutuksessa tapahtunut muutos, ja käyttö on tasaantunut ja hetkellisesti jopa laskenut. Sähkönkäyttö asukasta kohti on myös tasaisesti noussut 1970-luvulta aina 2000-luvun alkuun asti. Tuotanto Suomessa on lisääntynyt, mutta 2010-vuoden jälkeen tuotanto on jäänyt kulu- tuksesta, jolloin sähköomavaraisuus on laskenut ja tuontia on jouduttu lisää- mään [13].

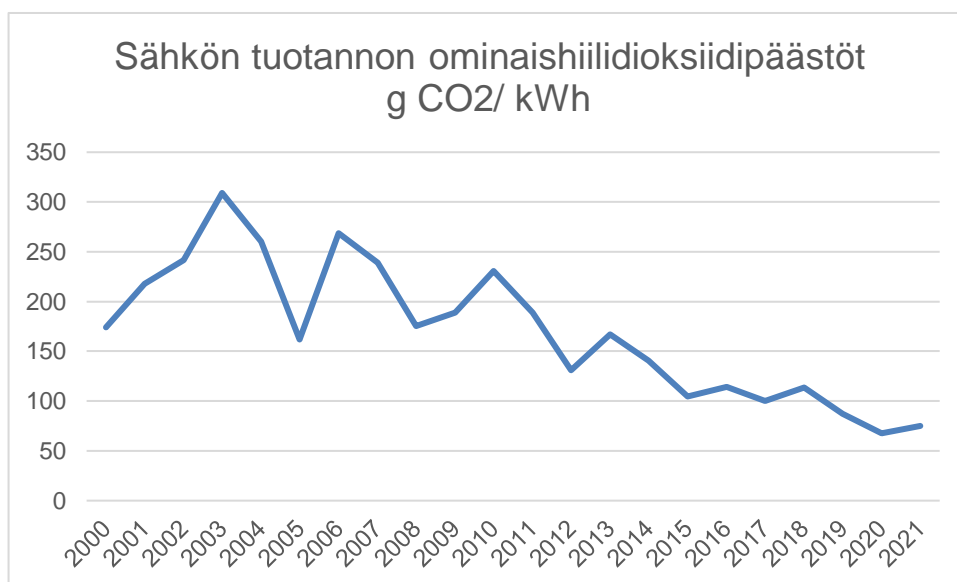


Kuva 6. Sähkön kokonaiskulutus, tuotanto ja tuonti [13].



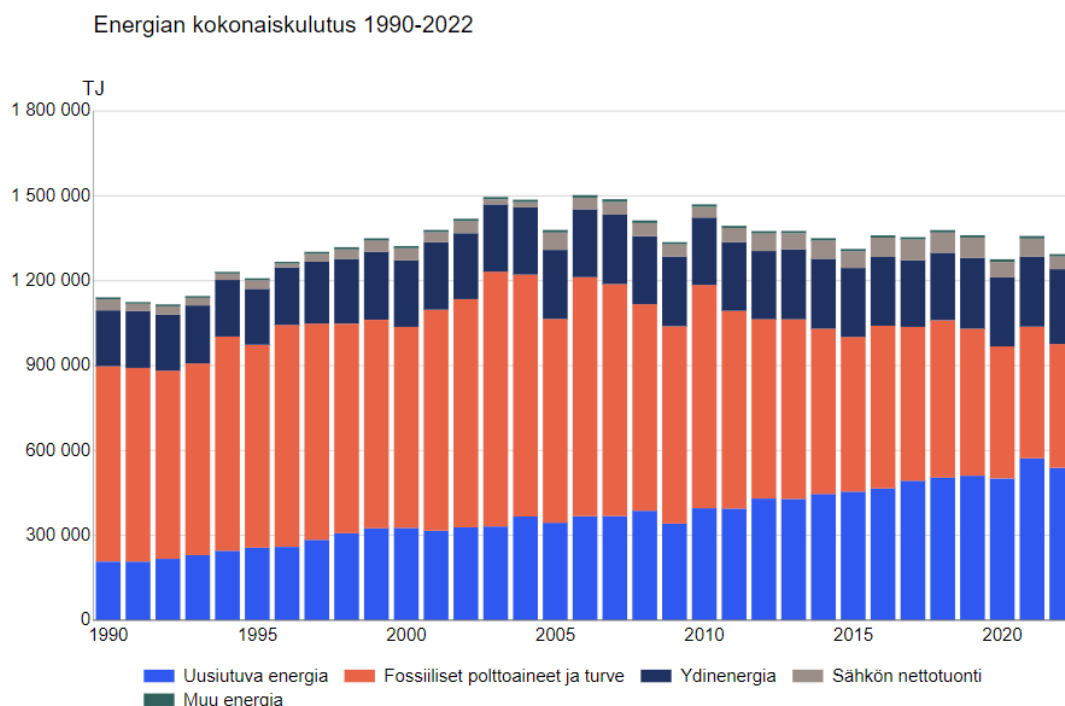
Kuva 7. Sähkönkäyttö asukasta kohti Suomessa [13].

Sähkön tuotannon hiilidioksidipäästöjä on tilastoitu 2000- luvulta lähtien (kuva 8). Uusiutuvien energialähteiden käyttäminen tuotannossa, on laskenut hiilidioksidipäästöjä. Tilastokeskuksen mukaan vuoden 2022 uusiutuvien energialähteiden käyttö laski 6 %, mutta osuus kokonaisuudesta pysyi 42 %:ssa [14].



Kuva 8. Sähkön tuotannon ominaishiilidioksidipäästöt [12].

Suomen kokonaisenergiankulutuksesta voidaan havaita (kuva 9), että fossiilisten polttoaineiden käyttö on vähentynyt ja uusiutuvan energian käyttö on lisääntynyt [14].

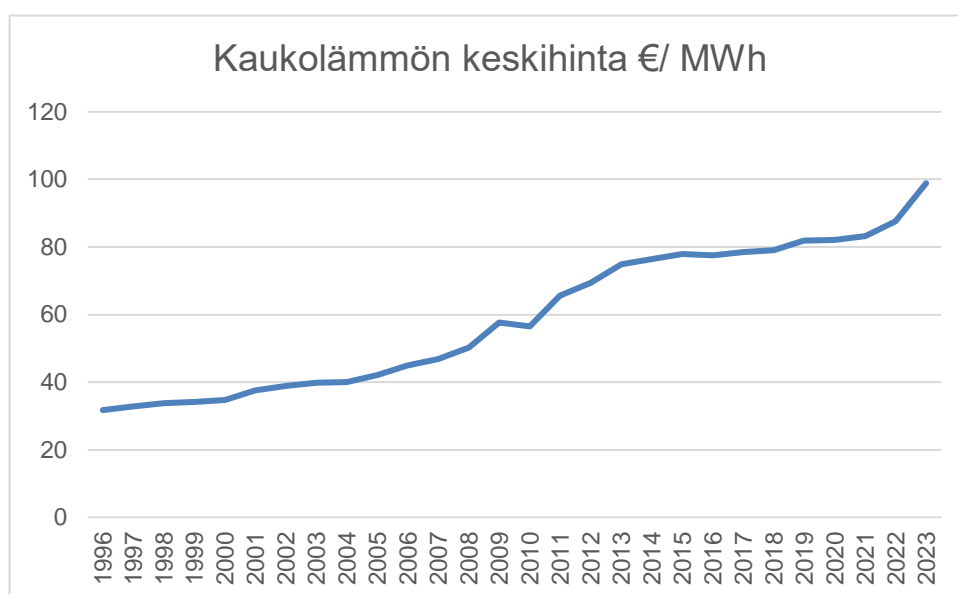


Kuva 9. Energian kokonaiskulutus [13].

5 Kaukolämmön ja sähkön hintojen kehitys

Tilastokeskus on julkaissut kaukolämmön hintatilastoja vuodesta 1996 lähtien. Tilastoista on havaittavissa kaukolämmön hinnan jatkuvaa nousua (kuva 10). Vuoden 2022 jälkeen hinnan nousu on ollut jyrkkää. Kaukolämmön hinta on 30-vuodessa noin kolmin-kertaistunut [15]. Hintojen nousuun on vaikuttanut suurimmalta osin fossiilisten polttoaineiden kallistuminen ja varsinkin nyt viime vuosina korona sekä Ukrainan sota [16].

Kaukolämmön hinta muodostuu kolmesta komponentista, itse energianhinnasta, sopimusvesivirtamaksusta sekä perusmaksusta. Perusmaksu ja sopimusvesivirta maksu ovat vuositasolla kiinteitä ja perustuvat laskennalliseen vuosikulutukseen. Energian hinta on muuttuva kuukausitasolla. Hinta on korkeampi niinä kuukausina, kun kulutusta on paljon ja kesäkuukausina hinta on halvempi, kun kulutusta ei ole juurikaan. Esimerkiksi vuoden 2024 tammikuun energiamaksu Helsingin Energialla (Helen Oy) on 127,06 €/ MWh ja heinäkuussa vastaavasti energian hinta on 39,48 €/ MWh [17].



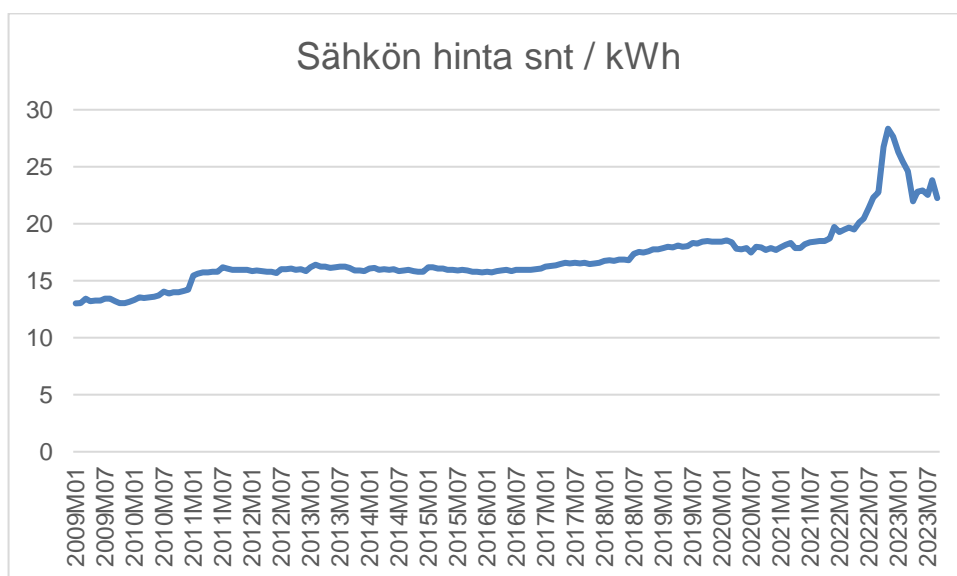
Kuva 10. Kaukolämmön keskihinta vuosina 1996–2023 [14].

Sähkön energiahinnan nousu on ollut myös kasvussa, kuten kaukolämmönkin hinta. Tilastokeskus on julkaissut sähkön hintatilastoja vuodesta 2009 lähtien. Tilastoista on havaittavissa sähkön hinnan jatkuvaa nousua, kuten kaukolämmön hinnoissakin (kuva 11). Sähköhinnan nousuun vaikuttavat monet tekijät. Syynä hintojen nousuun on muun muassa energiantuotantoon liittyvien kustannusten kohoaminen. Tämä johtuu siitä, että suurten energia-alan yrityksille muodostuu kustannuksia päästöoikeuksista. Päästöoikeuksien kustannuksiin vaikuttavat EU:n entisestään kiristyneet päästövähennystavoitteet [16].

Sähkön hintaan vaikuttavat myös merkittävästi maailmantalous, maakaasun hinta ja keliolosuhteet. Suomi kuuluu useassa Euroopan maassa käytössä olevaan Nord Pool -pörssiin. Pörssi mahdollistaa yhteismarkkinat, jolloin Suomessa tuotettu ylimääräinen sähkö pystytään myymään muihin maihin ja vastaavasti pörssistä pystytään ostamaan sähköä alijäämätilanteessa [18].

Sähkön hinta muodostuu neljästä komponentista. Nämä komponentit ovat perusmaksu, sähköenergian siirtomaksu, sähkövero sekä itse energianhinta. Siirtomaksu ja sähkövero ovat vuositasolla kiinteitä ja näiden laskutus perustuu käytettyyn energiaan. Perusmaksu on kiinteä kuukausitasolla. Sähköenergian hinta muuttuu sähköpörssin mukaan joka tunti [18].

Sähköverkon toiminnan peruste on, että sähköä tuotetaan kulutusta vastaava määrä, mikä tarkoittaa, että sähköntuotannon tulee joustaa kulutuksen mukaan. Sähkötuotannossa puhutaan ns. säätötehossa. Euroopassa sähköä tuotetaan suhteellisen paljon maakaasulla. Tämän takia, kun maakaasun hinta nousee, tulee sähkön hinnan olla riittävän korkea kattamaan nousseet kustannukset.



Kuva 11. Sähkön hinnan kehitys [19].

6 Liuospohjainen lumensulatus

Liuospohjaisessa lumensulatuksessa glykoliliuosta lämmitetään lämmönsiirtimen välityksellä ja liuos siirretään putkistoa pitkin lämmitettävälle alueelle. Liuosputkisto on vastaavanlainen kuin vesikiertoisissa lattialämmityksissä. Liuoksen lämmittäminen voi tapahtua myös esim. sähköllä tai maalämpöpumpulla, mutta yleisesti lumensulatusjärjestelmät ovat liitettynä kaukolämpöön, koska lumensulatusta käytetään yleisesti kaupunkien kävelykatujen, suurien portaiden ja pysäköintialueiden sulatukseen missä kaukolämpöä on lähellä käytettävissä (kuva 12).

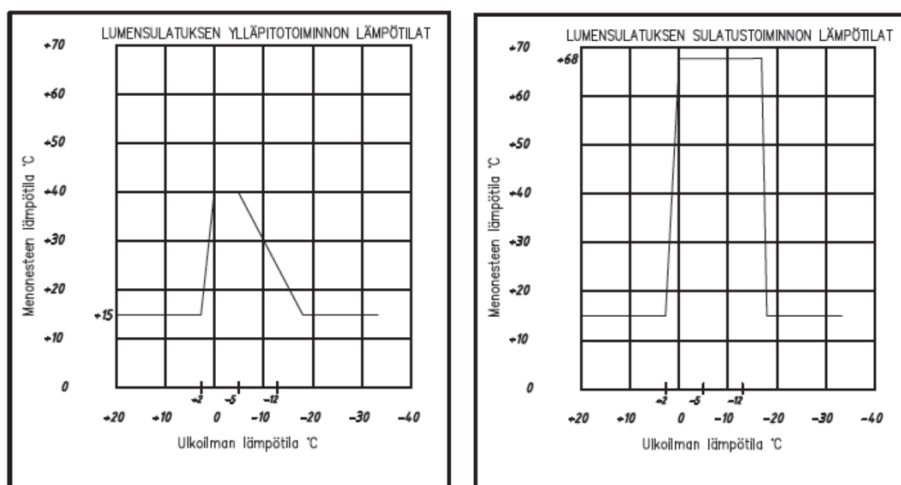
Putkisto eroaa tavallisesta lattialämmityspotkesta pehmeiden, taipuisuuden ja kokonsa puolesta. Jakotukkeina käytetään joko haponkestävästä teräksestä tehtyjä jakotukkeja tai PEX- muovista tehtyjä johtuen ympäristön tuomasta rasi- tuksesta [5].



Kuva 12. Kanavarannan lumensulatetut portaat.

Sulatuksen ohjaus tapahtuu ulkolämpötilan, lumisateen, sulatusalueen pinta-lämpötilan ja kaukolämmön paluuveden rajoituksen perusteella. Sulatuksen perusteena voi olla myös ennakoiva säädata, jossa lumisateen ennuste saadaan Ilmatieteen laitoksen palvelimelta. Ennakoivan säädatan perusteella nostetaan lumensulatusjärjestelmän liuoksen lämpötilaa ennakoivasti.

Sulatusjärjestelmän menolämpötiloja muutetaan ulkolämpötilan mukaan riippuen siitä, onko ylläpitotoiminto vai sulatustoiminto käytössä. Alla olevissa kuvissa on esitetty näitä vastaavat liuoksen menolämpötilat (kuva 13).



Kuva 13. Menoveden lämpötilat ylläpito- ja sulatustoiminnoilla.

6.1 Kaukolämmönsiirtimet

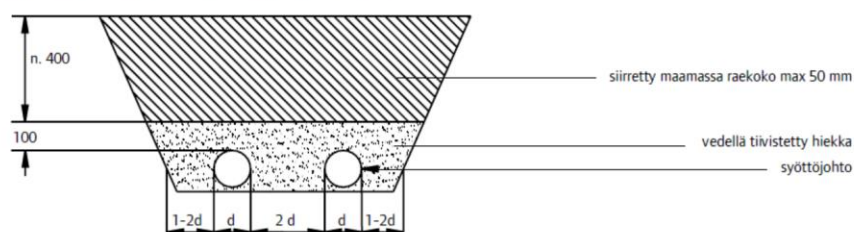
Lämmönsiirrin on energiatekniikan komponentti, jolla lämpöenergiaa siirretään eri lämpötilassa olevien ainevirtojen välillä. Lämmönsiirtimissä ei ole mitään mekaanisesti liikkuvia osia, vaan lämmönsiirto tapahtuu ainevirtoja erottavan seinämän läpi johtumalla.

6.2 Lumensulatusjärjestelmän liuosputkisto

Liuosputkisto on putkisto, joka tuo lämmitetyn liuoksen lämmönjaolta sulatettavalle alueelle. Syöttöputkistona voi käyttää valmiiksi eristettyjä PEX-putkielementtejä tai hitsaamalla RST-putkistoa. Tärkeää syöttöputkiston asennuksessa on huomioida tarvittava lämmöneristys, jotta lumensulatus tapahtuu vain halutulla alueella [5]. Kuvassa 14 on esimerkki syöttöputkiston asennuksesta putkikaivantoon ilman eristettä ja eristeen kanssa.

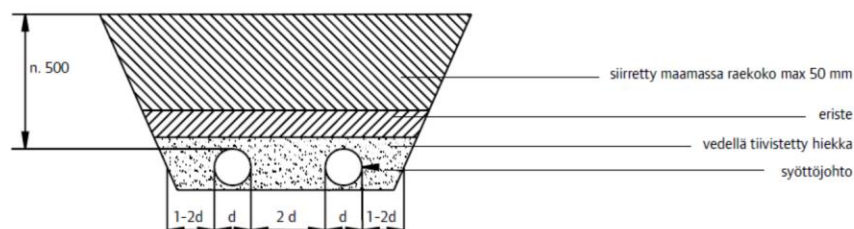
Syöttöputket

Syöttöputken putkikaivanto ilman eristettä



Putken alapuolinen maa-kerros tehdään voimassa olevan standardin mukaan.

Syöttöputken putkikaivanto eristeellä



Putken alapuolinen maa-kerros tehdään voimassa olevan standardin mukaan.

Kuva 14. Lumensulatusjärjestelmän asennus-esimerkki putkikaivantoon [5].

6.3 Jakotukit

Jakotukit (kuva 15) ovat lumensulatusjärjestelmän komponentteja, jotka jakavat syöttöputkilta tulevan liuoksen sulatus piireihin. Piirit jakotukkeihin pyritään suunnittelemaan niin, että ne olisivat yhtä pitkät. Näin vältetään piirikohtaisilta linjasäädöiltä. Jakotukkien sijainnin pitää olla korkeammalla kuin alueen, jota kyseinen jakotukki palvelee, jotta verkostoon ei muodostu ilmapussia. Tämä ei

aina ole mahdollista porras- ja luiskalämmityksissä. Tapauksissa, joissa jakotukit jäävät alemmaksi on verkostossa käytettävä alipaineilmanpoistimia.



Kuva 15. Lumensulatusjärjestelmän jakotukki.

Jakotukkikaivoja (kuva 16) käytetään asennuksissa, jossa lämmönlähde sijaitsee pitkällä sulatettavasta alueesta tai jakotukkeja ei saada asennettua esimerkiksi rakennuksen sisälle. Jakotukkikaivoihin asennetaan putkiston piirit ja niiden sulku- ja sääventtiilit vastaavasti kuten kuvassa 15 on asennettu. Liuos tuodaan jakotukkikaivoihin eristetyillä syöttöputkillä.



Kuva 16. Ruostumattomasta teräksestä hitsattu jakotukkikaivo

6.4 Asennus

Sulatusputkiston asennetaan yleensä joko betonisen rakenteen sisään tai hiekkakerrokseen. Alustamateriaalilla ei ole tehomitoituksen kannalta suurtakaan merkitystä, kunhan putkisto on eristetty maaperästä (lämpöhäviöt maaperään).

Jäätäneen betonin lämmönjohtavuus on $\lambda=1,7 \text{ W/mK}$ ja jäätäneen hiekan $\lambda=3,34 \text{ W/mK}$ [3]. Materiaalin lämmönjohtavuus vaikuttaa sulatuksen nopeuteen. Suurempi lämmönjohtavuus mahdollistaa nopeamman pintojen sulatuksen ja pienempi vaatii suuremman ylläpitolämpöenergian.

Putkiston asennussyvyydelläkään ei ole merkittävää vaikutusta maaperän lämpöhäviöihin. Tuplaamalla asennussyvyys lisääntyvät lämpöhäviöt maaperään noin 2 % (Taulukot 1–5).

Maaperän eristämällä on taas hyvinkin merkittävä vaikutus lämpöhäviöihin. Poistamalla eristys kokonaan, lisää se lämpöhäviöitä 22 %. Näin ollen kokonaistehosta maaperän lämpöhäviöt olisivat 24 %, kun ne eristettynä ovat vain 2 % luokkaa (Taulukot 1–5).

Taulukko 1. Lämpöhäviöt maaperään, kun alusmateriaalina on jäänyt asennushiekka.

RAKENNE			λ	Paksuus	R
			W/mK	mm	m ² K/W
Pintamateriaali 1	Graniittilaatta		2,9	50	0,02
Pintamateriaali 2			0	150	0,00
Alustamateriaali 1 (putket)	Asennushiekka (jäänyt)		3,34	100	0,03
Alustamateriaali 2			0	150	0,00
Eriste	XPS -eriste (sula)		0,037	100	2,70
Maaperä	Pohjamaa (jäänyt)		2,5	200	0,08

Putkiston asennussyvyys alustamateriaaliin	h_a	100	mm
Asennussyvyyden lämpövastus	R_a	0,030	m ² K/W
Putkiston asennussyvyys	h	150	mm

Lämpöpövästus putkesta lumeen	R_{pi}	0,049	m ² K/W	1,7 %
Lämpövastus putkesta maaperään	R_{pm}	2,783	m ² K/W	98,3 %
Lämmönjohtuminen		0,35	m ² K/W	
Lämpöhäviö maaperään, $T_{maa} = 5\text{ °C}$		19,4	W/m ²	

Taulukko 2. Lämpöhäviöt maaperään, kun alusmateriaalina on jäänyt betoni.

RAKENNE			λ	Paksuus	R
			W/mK	mm	m ² K/W
Pintamateriaali 1	Graniittilaatta		2,9	50	0,02
Pintamateriaali 2			0	150	0,00
Alustamateriaali 1 (putket)	Betonikivi (jäätynyt)		1,7	100	0,06
Alustamateriaali 2			0	150	0,00
Eriste	XPS -eriste (sula)		0,037	100	2,70
Maaperä	Pohjamaa (jäätynyt)		2,5	200	0,08

Putkiston asennussyvyys alustamateriaaliin	h_a	100	mm
Asennussyvyyden lämpövastus	R_a	0,059	m ² K/W
Putkiston asennussyvyys	h	150	mm

Lämpöpövästus putkesta lumeen	R_{gl}	0,078	m ² K/W	2,7 %
Lämpöpövästus putkesta maaperään	R_{gs}	2,783	m ² K/W	97,3 %
Lämmönjohtuminen		0,35	m ² K/W	
Lämpöhäviö maaperään, T _{maa} = 5 °C		19,2	W/m ²	

Taulukko 3. Lämpöhäviöt maaperään, kun eristys poistetaan.

RAKENNE			λ	Paksuus	R
			W/mK	mm	m ² K/W
Pintamateriaali 1	Graniittilaatta		2,9	50	0,02
Pintamateriaali 2			0	150	0,00
Alustamateriaali 1 (putket)	Betonikivi (jäätynyt)		1,7	100	0,06
Alustamateriaali 2			0	150	0,00
Eriste	XPS -eriste (sula)		0,037	0	0,00
Maaperä	Pohjamaa (jäätynyt)		2,5	200	0,08

Putkiston asennussyvyys alustamateriaaliin	h_a	100	mm
Asennussyvyyden lämpövastus	R_a	0,059	m ² K/W
Putkiston asennussyvyys	h	150	mm

Lämpöpövästus putkesta lumeen	R_{gl}	0,078	m ² K/W	49,4 %
Lämpöpövästus putkesta maaperään	R_{gs}	0,080	m ² K/W	50,6 %
Lämmönjohtuminen		6,32	m ² K/W	
Lämpöhäviö maaperään, T _{maa} = 5 °C		189,6	W/m ²	

Taulukko 4. Kokonaistehot ilman maaperän eristystä.

LASKENTA				
Lumen lämmittäminen	q_s	19,4	W/m ²	2 %
Lämmön siirto pinnasta ilmaan (lumivapaa)	q_h	205,0	W/m ²	26 %
Lumen sulattaminen	q_m	279,2	W/m ²	35 %
Pinnan kuivatus (veden haihdutus)	q_e	105,0	W/m ²	13 %
Lämpöhäviöt maaperään	q_e	189,6	W/m ²	24 %
Sulatusteho lumisateen aikana	q_o	299	W/m²	
Sulatusteho lumisateen jälkeen	q_o	798	W/m²	
Sulatusteho 50 % lumen peitossa	q_o	643	W/m²	

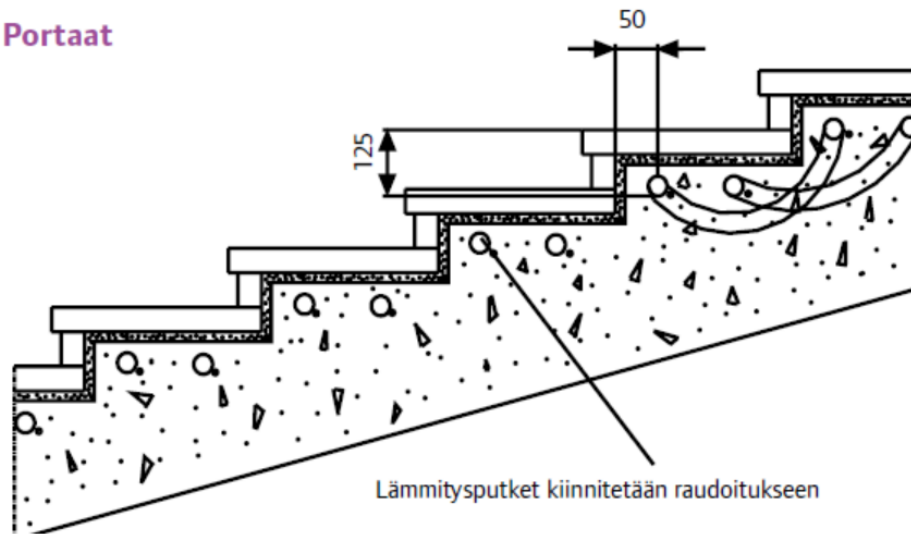
Taulukko 5. Kokonaistehot kun maaperä on eristetty.

LASKENTA				
Lumen lämmittäminen	q_s	19,4	W/m ²	3 %
Lämmön siirto pinnasta ilmaan (lumivapaa)	q_h	205,0	W/m ²	33 %
Lumen sulattaminen	q_m	279,2	W/m ²	45 %
Pinnan kuivatus (veden haihdutus)	q_e	105,0	W/m ²	17 %
Lämpöhäviöt maaperään	q_e	10,5	W/m ²	2 %
Sulatusteho lumisateen aikana	q_o	299	W/m²	
Sulatusteho lumisateen jälkeen	q_o	619	W/m²	
Sulatusteho 50 % lumen peitossa	q_o	464	W/m²	

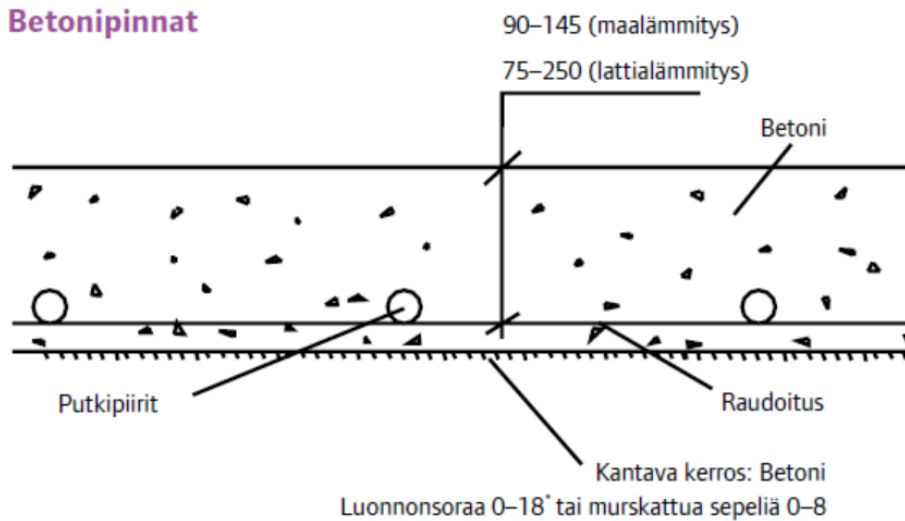
6.5 Asennusesimerkkejä

Kuvassa 17 on esitetty asennusesimerkki putkiston sijoituksesta portaisiin ja tasiselle betonipinnalle. Asentaessa putkisto portaisiin yhden lenkin sulatusalueena suositellaan neljää porrasta. Putkisto asennetaan niin, että menoputki kiertää ensin portaiden ulkolaidan ja paluu kierretään takaisin portaan sisälaidan kautta (kuva 18).

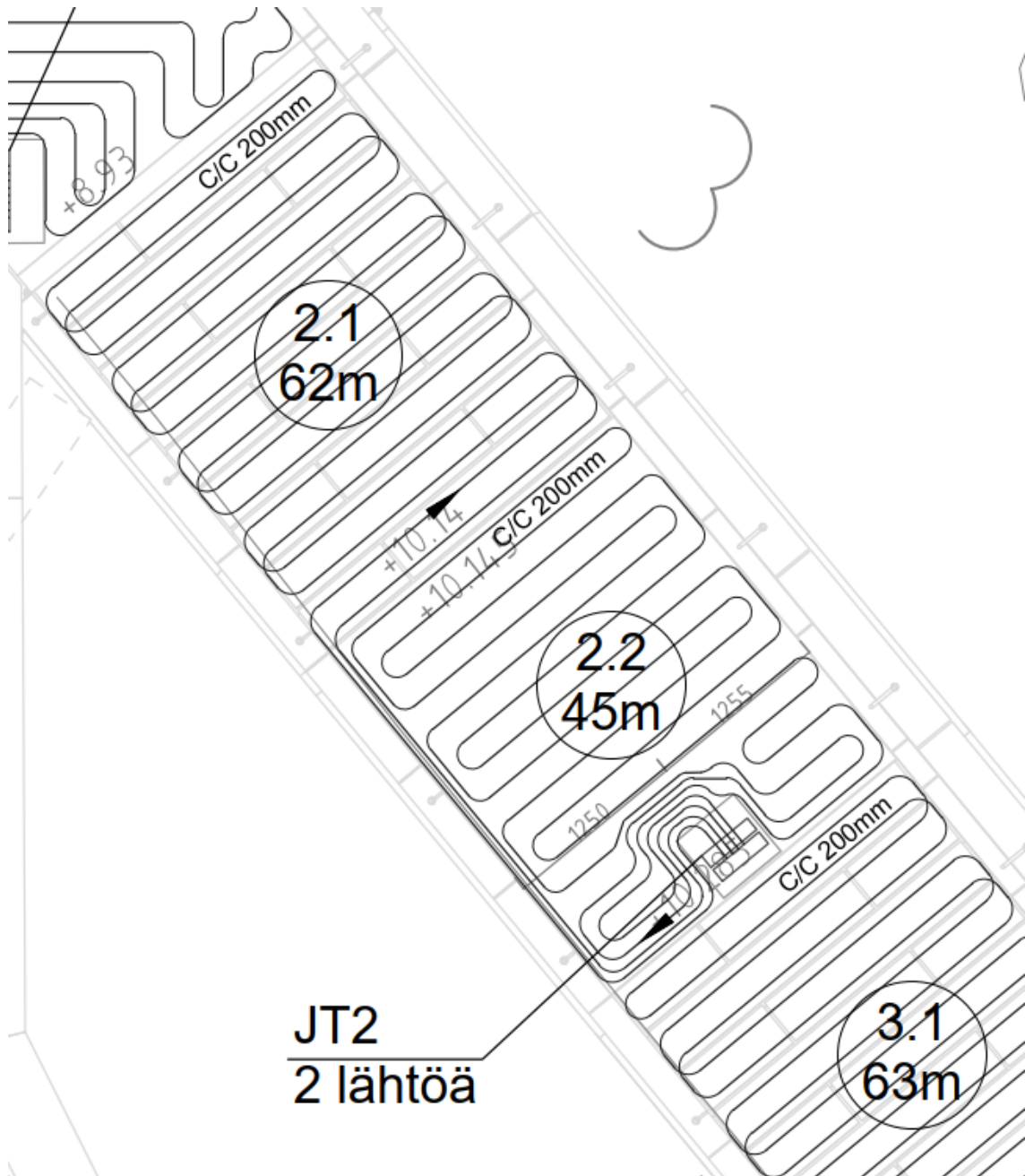
Portaat



Betonipinnat



Kuva 17. Leikkauskuva liuosputkiston sijoituksesta portaaseen ja betonilaattaan [5].



Kuva 18. Tasokuva putkiston asennuksesta portaan tasopintaan.

6.6 Nestekiertoisen lumensulatuksen vaikutus kaukolämpölaitokseen

Lumensulatusjärjestelmässä lämmittävän pinnan lämpötila on yleensä $+3\text{--}5^{\circ}\text{C}$ ja lämmönsulatuksen käytettävän liuoksen menolämpötila on $+35\text{--}40^{\circ}\text{C}$. Pinnan ja liuoksen lämpötilat ovat verrattain matalat, mikä mahdollistaa erilaiset

lämmönlähteet, esimerkiksi kaukolämmön, maalämpölaitteistot sekä hukkaenergian. Järjestelmän hyötysuhdetta saadaankin parannettua, mikäli on mahdollista käyttää sulatukseen hukkalämpöä. Hukkalämmön saatavuus on kaupunkikeskuksissa vähäistä, minkä vuoksi järjestelmän lämmönlähteeksi valitaan kaukolämpö.

Rakennusten kaukolämmitys määräysten ja ohjeiden K1 [11] mukainen kytkentä kaukolämmön paluuveteen johtaa säätöteknisesti ja hankintakustannuksiltaan ratkaisuun, joka ei ole asiakkaalle kustannusteknisesti järkevin. Kaukolämpölaitoksen kannalta tämänkaltaisen kytkentä on suositeltavampi, koska verkostoon saadaan mahdollisimman hyvä lämpötilaero.

Loppuasiakkaan kannalta tämä ei vaan valitettavasti ole optimiratkaisu, koska energiasta maksetaan yhtä paljon kuin normaalikäytössä ensiöpuolen menovettä lämmittämällä. VTT:n julkaisemassa raportissa [2] on tutkittu paluuveden lämpötilan merkitystä yhteistuotantolaitoksissa. Mikäli kaukolämmön paluuvettä saadaan laskettua -2°C :een, tarkoittaa tämä laitoksen tuotossa sähkön ja kaukolämmön osalta noin 0,6 %:n parannusta. Kaukolämmön paluuveden 2°C :n lämpötilan pudotukseen tarvitaan noin 5,4 MW:n lämmitysteho ja noin 18 000 m^2 :n lämmitettävä katuosuus, kun liuoksen jäähtymä on 15°C ja mitoitus-teho on 300 W/m^2 [3].

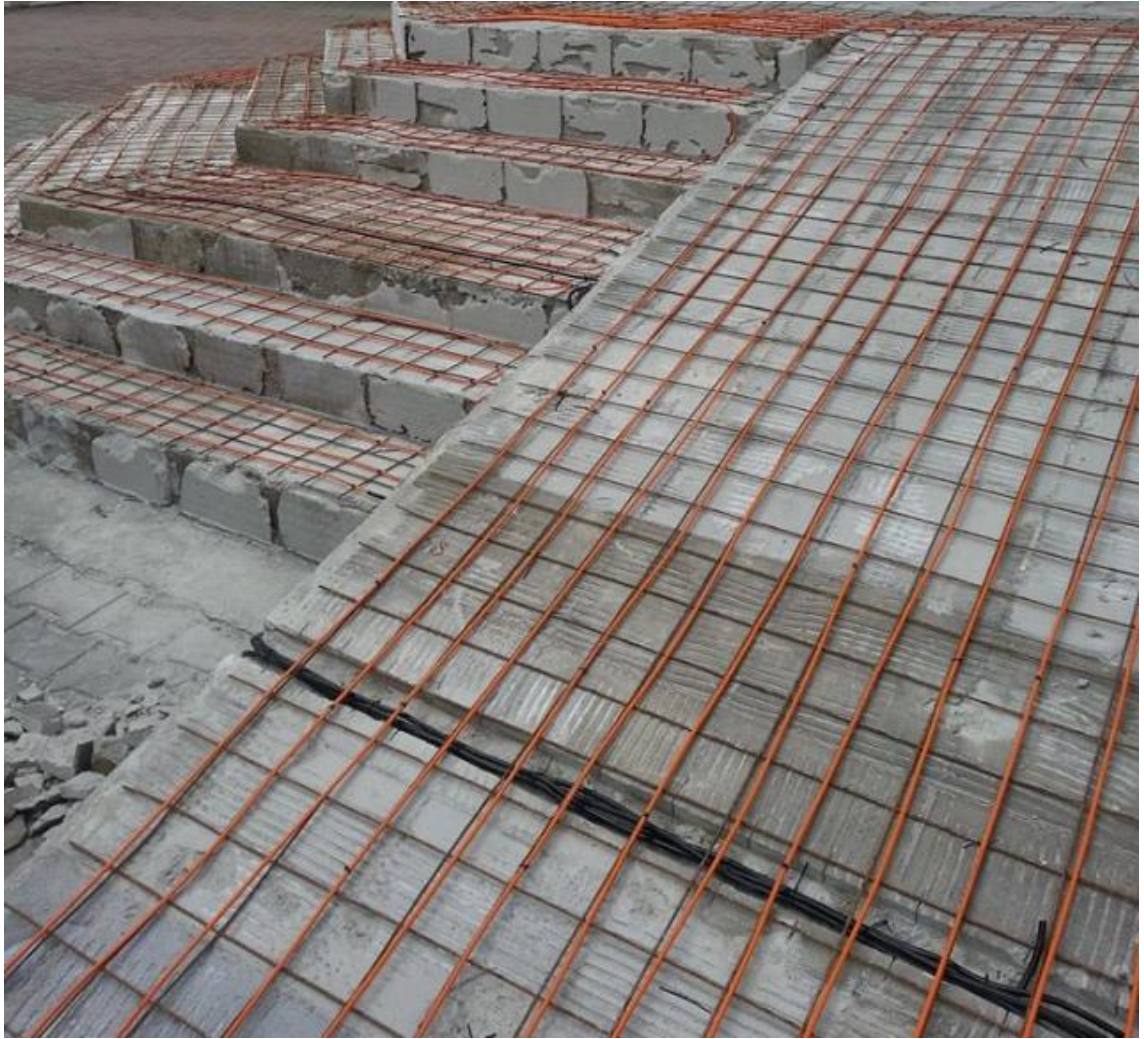
7 Sähköinen lumensulatus

Sähköinen lumensulatusjärjestelmä on rakenteen puolesta helpoin ja hankintahinnaltaan halvin vaihtoehto toteuttaa lumensulatus.

Sähköisessä sulatuksessa maahan upotetaan, asennetaan pintamateriaalin uriin tai pintamateriaalin alle (kuva 19), vastaavanlainen lämpökaapeli kuin lattialämmityksessä. Sulanapitokaapeleita on kahta erilaista päätyyppiä, jotka ovat itsesäätyvät kaapelit ja vakiovastuskaapelit. Vakiovastuskaapeleiden metriteho

muuttuu ympäristön lämpötilan mukaan, kun taas vakiovastuskaapeleiden sähköteho määräytyy kaapelin vastuksen, pituuden ja käyttöjännitteen mukaan [19].

Itsesäätyviäkaapeleita käytetään monesti pienemmissä sulatusjärjestelmissä kaapelin itsesäätyvyyden takia, jolloin erillistä ohjaustekniikkaa ei tarvita sulatuksen säätöön. Päälle-ohjaustermostaattia suositellaan kuitenkin käytettäväksi, energiatehokkuuden takia, ettei sulatusta käytetä sellaisissa ulko-olosuhteissa, kun sulatusta ei tarvita. Itsesäätyvissäkaapeleissa kaapelinteho ei välttämättä ole sama koko kaapelin mitalta, mikäli siihen vaikuttavat erilaiset ulkoiset olosuhteet. Vakiovastuskaapeleita käytetään suuremmissa sulatusjärjestelmissä, joissa itsesäätyvien kaapeleiden tehot eivät enää riitä. Vakiovastuskaapelit tarvitsevat enemmän ohjaustekniikka, termostaatin käynnistämään sulatus ja rajoitustermostaatteja sulatusalueelle [21].



Kuva 19. Sähköinen lumensulatusjärjestelmä asennettuna portaisiin ennen pintavalua.

Sulatustehoihin on valmistajien sivuilla annettu ohjearvoja, mutta ainakin ulkoportaiden osalta kunnolliseen sulatukseen tarvitaan huomattavasti suurempia neliötehoja kuin on esitetty. Ohjeellisia arvoja on annettu erilaisiin käyttötarkoituksiin, muun muassa lähteessä [20]:

- | | |
|---|--------------------------|
| • tuulelta suojatut jalkakäytävät | 150–200 W/m ² |
| • tuulelta suojaamattomat jalkakäytävät | 200–250 W/m ² |
| • ulkoportaat, ovien edustat | 200–350 W/m ² |
| • pysäköintialueet, ajotiet | 200–350 W/m ² |
| • eristetyt lastauslaiturit ja sillat | 250–300 W/m ² |
| • eristämättömät lastauslaituri ja sillat | 300–400 W/m ² |

Sulatuksen ohjaus tapahtuu normaalisti pienemmissä järjestelmissä kaksoistermostaatilla ulkolämpötilan mukaan ja suuremmissa järjestelmissä on lisäksi otettu mukaan ohjaukseen lumisadeanturit sekä pinnan lämpötilan rajoitusanturi. Piirien jako muodostuu tarvittavasta pinta-alasta ja tehosta.

Kaksoistermostaatti on yhdistelmälaite (kuva 20), joka koostuu lämpötilansäätimestä ja lämpötilanrajoittimesta. Lämpötilasäädin ohjaa lämmitystä päälle ja pois esimerkiksi ulkolämpötilan perusteella ja lämpötilarajoitin estää ylikuumenemisen esimerkiksi kaapelin lämpötila. Kaksoistermostaatteja on myös sellaisia malleja missä pystytään asettelemaan kaksi lämpötila-aluetta, joilla laite toimii. Esimerkiksi ulkolämpötilaohjauksessa lämmitys ohjataan päälle $+2\text{ °C}$:ssa ja pois -5 °C :ssa.



Kuva 20. Kaksoistermostaatti [21].

Suuremmissa sulatusalueissa sähkötehot kasvavat jo huomattavan suuriksi, jolloin niillä on vaikutusta kiinteistön sähköverkon rakenteeseen, keskuksiin, kaapelointiin sekä liittymään. Esimerkiksi 100 m² parkkipaikan sulatuksen 3-vaihe-teho olisi edellä mainituilla ohjearvoilla 35 kW, jolloin kuorman ottama 3-vaihevirta on noin 50 A. Sulakelähdöt ja kaapelointi tulisi mitoittaa kestäämään kyseisen kuorma, myös kiinteistön pääsulakkeiden koon pitää vastata kasvanutta huipputehoa.

8 Tehomitoitus

Lämpöä siirtyy sulatettavan alueen pinnalta lumeen johtumalla. Periaatteena lumen sulattamisessa on, että lumi sulatetaan vedeksi, sulanut vesi pyritään johtamaan sadevesikaivoihin ja jäljelle jäänyt filmikerros haihdutetaan ilmaan. Tässä tapahtumassa tulee ero perinteisen tasaisen pinnan ja portaiden sulattamisen välillä. Tasaisella pinnalla lumensulattamiseen yleisesti riittävä teho on noin 300 W/m², tämä teho muodostuu ensin lumen lämmittämisestä ja itse lumensulattamisesta [3]. Sulanut vesi saadaan johdettu pinnalta pois kaivoihin, kun taas portaissa ei vedenjohtaminen kaivoihin ole aina mahdollista, jolloin pitää myös huomioida pinnan kuivattaminen, eli veden haihduttaminen, ettei pinta jäädy uudelleen sulattamisen jälkeen.

Alla esitetyillä kaavoilla lasketaan tarvittavat tehot, lumen lämmittämiseksi, lämmönsiirtyminen pinnasta ilmaan (lumivapaana), lumen sulaminen, pinnan kuivatus (veden haihduttaminen) sekä lämpöhäviöt maaperään.

Lumen lämmittämiseen tarvittava lämpövirran tiheys eli teho pinta-alaa kohti ratkaistaan kaavalla 1 [2].

$$q_{lumi} = \frac{\rho_{vesi} * S * (c_{p_{jää}} * (t_s - t_y) + c_{p_{vesi}} * (t_f - t_s))}{C_1} \quad (1)$$

q_{lumi}	on lumikertymä lämmittäminen sulamispiste lämpötilaan tarvittava teho sulatusjakson aikana [W/m ²]
ρ_{vesi}	on veden tiheys [kg/m ³]
S	on lumisateen määrä vetenä mm/h
$c_{p_{jää}}$	on jään ominaislämpökapasiteetti [J/kg*K]
$c_{p_{vesi}}$	on veden ominaislämpökapasiteetti [J/kg*K]
t_y	on ulkoilman lämpötila[°C]
t_s	on lumen sulamislämpötila (=0 °C)
t_f	on vesifilmikerroksen lämpötila (yleensä 0,56 °C)
C_1	on 1000 mm/m x 3600 s/h= 3.6x 10 ⁶

Lumen sulattamiseen tarvittava teho ratkaistaan kaavalla 2 [2].

$$q_m = \frac{\rho_{vesi} * S * h_{lumi}}{C_1} \quad (2)$$

q_m	on lumensulamien [W/m ²]
ρ_{lumi}	on veden tiheys [kg/m ³]
S	on lumisateen määrä vetenä [mm/h]
h_{lumi}	on lumen sulamislämpötila [kJ/(kg)]
C_1	on 1000 mm/m x 3600 s/h= 3.6x 10 ⁶

Lämmönsiirron teho pinnasta ilmaan (lumivapaa) lasketaan kaavoilla 3 ja 4.

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin riippuvuus lasketaan kaavalla 3 [2].

$$h_c = 0,037 \left(\frac{\lambda_i}{L} \right) Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad (3)$$

h_c	on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ilmalle [W/m ² K]
λ_i	on ilman lämmönjohtavuus [W/mK]
L	on sulanapitoalueen karakteristinen mitta [m]
Re	on Reynoldsin luku ilmalle [-]
Pr	on Prandtin luku ilmalle [0.7]

Konvektion ja lämpösäteilyn lämmönsiirtoteho pinta-alaa kohti lumettomassa pinnasta ilmaan lasketaan kaavalla 4 [2].

$$q_h = h_c * (t_s - t_y) + \sigma * \varepsilon * (T_f^4 - T_{yk}^4) \quad (4)$$

q_h	on lämmönsiirto pinnasta ilmaan (lumivapaa) [W/m ²]
h_c	on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin ilmalle [W/m ² K]
σ	on Stefan- Boltzmanin vakio = $5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m ² K ⁴)]
ε	on pinnan emissiokerroin [0.9]
T_f	on vesifilmikerroksen lämpötila [K]
T_{yk}	on ympäröivän ilman keskimääräinen säteilylämpötila ulkolämpötila mitoituslämpötilassa [K]

Veden haihduttamiseen tarvittava teho pinta-alaa kohti lasketaan kaavalla 5 [2].

$$q_e = \rho_{kuiva} * D * (W_f - W_a) * H_{fg} \quad (5)$$

q_e	on pinnan kuivattaminen [W/m ²]
ρ_{kuiva}	on kuivan ilman tiheys ulkoilman mitoitustilassa [kg/m ³]
D	on massansiirtokerroin [m/s]
W_f	on kylläisen ilman absoluuttinen kosteus [kgH ₂ O/kgk.i.]
W_a	on ulkoilman absoluuttinen kosteus [kgH ₂ O/kgk.i.]
H_{fg}	on veden haihtumislämpö [kJ/kgK]

Lämmönsiirtonesteen (≈putken) keskimääräinen lämpötila lasketaan kaavalla 6 [3].

$$T_{putki} = \frac{T_m + T_p}{2} \quad (6)$$

T_{putki}	on lämmönsiirtonesteen keskilämpötila [°C]
T_m	on lämmönsiirtonesteen menolämpötila [°C]
T_p	on lämmönsiirtonesteen paluulämpötila [°C]

Lämpöhäviövirrat maaperään lasketaan kaavalla 7 [2].

$$q_{maa} = \frac{T_{putki} - T_{maa}}{\sum_{i=1}^n \frac{s_{r,i}}{\lambda_{r,i}}} \quad (7)$$

q_{maa}	on lämpöhäviöteho lämmönlämmönluovutuspiirin alapuolelle [W/m ²]
T_{putki}	on putkikerroksen keskilämpötila [°C]
T_{maa}	on kuukautinen keskilämpötila [°C]
s_r	on rakennekerroksen paksuus [m]
λ_r	on rakennekerroksen lämmönjohtavuus [W/mK]

Kokonaisteho lasketaan kaavalla 8 [3].

$$q_a = q_{lumi} + q_h + q_e + q_m + q_{maa} \quad (8)$$

q_a	on kokonaisteho [W/m ²]
q_{lumi}	on lumikertymän lämmittäminen sulamispisteen lämpötilaan tarvittava teho sulatusjakson aikana [W/m ²]
q_h	on lämmönsiirto pinnasta ilmaan (lumivapaa) [W/m ²]
q_e	on pinnankuivuminen [W/m ²]
q_m	on lumensulaminen [W/m ²]
q_{maa}	on lämpöhäviöteho lämmönluovutusputkiston alapuolelle [W/m ²]

9 Energiankulutus

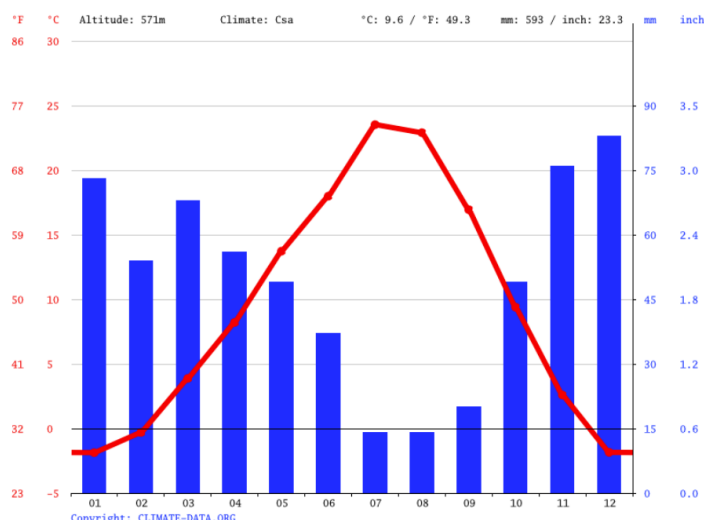
Lumensulatusjärjestelmän energiankulutus voidaan arvioida sulatukseen käytetystä keskimääräisestä sulatustehosta sekä sulatukseen käytetystä ajasta. Sulatustehona voidaan käyttää luvun 8 kaavoja tai ASHRAE:n taulukkoarvoja [2].

ASHRAE:n käsikirjassa [2] on annettu taulukkoarvoja lumensulatusjärjestelmän vuosittaisen energiakulutuksen arviointiin. Taulukko on jaettu kahteen eri tehoarvoon, minimiteho myrskyssä ja minimiteho normaalissa olosuhteissa. Molemmilla annetuissa taulukkoarvoissa annettulla energiakulutuksella lumettoman pinnan suhde pitäisi toteutua 99 %:n varmuudella. Laskentatavassa ylläpitolämmityksen on oletettu olevan käynnissä aina, kun ei sada lunta ja kun ulkolämpötila on alle 0 °C.

Taulukossa lähimpänä Suomen olosuhteita on Spokane, Washington. Taulukosta saatava vuotuisen tehon keskiarvo on 502 W/m² [2]. Kuvissa 21 ja 22 on esitetty kuukausien keskilämpötilat ja sademäärät Helsingissä ja Spokaneessa (Yhdysvallat).



Kuva 21. Kuukauden keskilämpötilat ja sademäärät Helsingissä [21].



Kuva 22. Kuukauden keskilämpötilat ja sademäärät Spokane, Washington [21].

ASHRAE:n taulukoissa [2] annetut arvot eivät huomio mahdollisia lämpöhäviöitä maaperään eivätkä ota huomioon auringonsäteilyn aiheuttamaa sulamista lumipinnalla. Suunnitteluvaiheen energialaskentaan tämä arvo on kuitenkin tarpeeksi lähellä antamaan riittävän tarkan energiankulutuksen arvon.

Energialaskennan helpottamiseksi käytetään usein myös kokemusperäisi vakioarvoja. Vakioarvoina näihin Suomessa voidaan pitää keskimääräisen sulatustehona 50 % ja sulatusaikana 1000 h [3].

9.1 Liuos pohjainen sulatusjärjestelmä

Alla on esitetty esimerkki liuos pohjaisen lumensulatusjärjestelmän energiankulutuksesta. Laskelmassa on käytetty seuraavia lähtöarvoja:

Sulatettavan alueen pinta-ala 1000 m²

Sulatusteho 619 W/m²

Sulatusaika 1000 h

Sulatusteho 50 %

Lumensulatusjärjestelmän energiankulutus lasketaan kaavasta

$$E = q * a * h * x \quad (9)$$

E	on kokonaisenergiakulutus [kWh]
g	on lumensulatuksen teho [kW/m ²]
a	on sulatettava pinta-ala [m ²]
h	on sulatuksen aika [h]
x	on sulatusteho [%]

Laskelmasta saadaan alueen sulatuksen energian kulutukseksi vuositasolla 309,5 MWh. Vastaavasti jos käytetään ASHRAE:n taulukko arvoja, saadaan sulatuksen energian-kulutukseksi vuositasolla 251,0 MWh.

Liuoskiertoisen järjestelmän energiankulutus on likimain samaa suuruusluokkaa kuin sähköisessä lumensulatusjärjestelmässä. Tuotetut päästöt ja laitteiston käytöstä aiheutuvat kustannukset vaihtelevat näiden järjestelmien välillä.

Vastaavat päästöt ja käyttökulut vuositasolla ovat seuraavat:

Liuospohjaisella järjestelmällä lumensulatuksen vuosikustannukset ovat 25 565 €/a, kun kaukolämmön keskihinta on 82,6 €/MWh (alv 0%, keskihinta Helenillä vuonna 2023).

Energiankäytön CO₂-päästöjä muodostuu 41 t CO₂/a, kun kaukolämmön CO₂-päästökertoimenä on 133,8 kgCO₂/MWh [22], joka vastaa vuoden 2024 kaukolämmön päästökerrointa.

9.2 Sähköinen sulatusjärjestelmä

Sähköisellä järjestelmällä lumensulatuksen vuosikustannukseksi tulisi käyttäen sähkönkeskihintaa 96,8 €/MWh (alv 0% keskihinta Helenillä vuonna 2023) 29 960 €/a.

Energian käytön CO₂-päästöjä muodostuisi 39,43 t CO₂/a.

Sähkön ominaispäästökerroin vuodelle 2024 on 127,4 kgCO₂/MWh [23]

Laskelmissa on laskettu vain energian käytön kustannukset ja niistä aiheutuvat CO₂-päästöt. Laskelmassa ei ole huomioitu järjestelmän investointeja, mahdollista kaukolämmön vesivirran nousua tai sähköliittymän liityntä nousua ja näistä aiheutuvia kuluja.

10 Excel- tehomitoitusohjelma

Excel- tehomitoitusohjelman tekemisen perustana oli saada työkalu yrityksen käyttöön lumensulatusjärjestelmien mitoittamista varten. Ohjelma mitoittaa lumensulatusjärjestelmän tehon, kun tarvittavat lähtötiedot on annettu taulukkoon. Lisäksi ohjelma laskee vuosittaisen arvion energiankulutuksesta sekä CO₂-päästöistä. Ohjelmasta saadaan myös tulostettua tuloste saaduista arvoista, jota pystytään hyödyntämään tuloksien esityksissä.

Mitoitusohjelman laatiminen aloitettiin lähtötietolomakkeen laatimisesta. Lähtötietolomakkeelle täydennetään laskennassa tarvittavat tiedot, jotka muuttuvat laskentakohteen mukaan. Taulukon vihreät solut ovat muutettavia lähtöarvoja. Vakioarvot ja laskennassa tarpeelliset muuttamattomat tiedot ovat lukituissa soluissa, ettei näitä pysty vahingossa muuttamaan.

LÄHTÖTIEDOT			
Ulkoilman lämpötila	T_y	-10,0	°C
Pilvisuusaste	ψ	1,0	-
Ulkoilman suhteellinen kosteus	RH	85,0	%
Sulanapitoalueen karakteristinen mitta	L	2,5	m
Sulatettavan lumikerroksen paksuus		30	mm
		3,0	kg/m ²
Sulatusaika		1,0	h
Sulatusnopeus (lumena)		30	mm/(m² h)
	Vetenä	3,0	dm ³ /(m ² h)
Tuulen nopeus	w	4,0	m/s
Sulanpitoalueen pinta-ala	A_t	1000	m ²
Lumettoman alueen suhdeluku koko sulatettavaan pinta-alaan	A_r	0,50	-
<i>Lumetonta aluetta on 500 m² ja lumellista aluetta on 500 m²</i>			
Sähkön hinta	€/MWh	96,8	MWh
Kaukolämmön hinta	€/MWh	82,6	MWh
Sähkön päästöt	tCO ₂ /kWh	152,0	tCO ₂ /kWh
Kaukolämmön päästöt	tCO ₂ /kWh	223,0	tCO ₂ /kWh
Sulatusaika vuodessa	h/a	1000,0	h
Sulatusteho		50,0	%

Kuva 23. Kuvakaappaus Excel-laskurin lähtötietolomakkeesta

Rakenteet-taulukkoon syötetään tiedot lumensulatusalueen rakenteista. Alasvetovalikoihin on kerätty yleisimmät päällystemateriaalit ja alusmateriaalit sekä näiden lämmönjohtavuudet [3], jotta laskennan tekeminen olisi helppoa ja vaivatonta (taulukko 6).

Taulukko 6. Kuvakaappaus Excel-laskurin rakenteiden lähtöarvotaulukosta.

RAKENNE				λ W/mK	Paksuus mm	R m ² K/W
Pintamateriaali 1	Betonikivi (jäätynyt)			1,7	50	0,03
Pintamateriaali 2				0	150	0,00
Alustamateriaali 1 (putket)	Asennushiekka (jäätynyt)			3,34	100	0,03
Alustamateriaali 2				0	150	0,00
Eriste	XPS -eriste (sula)			0,037	20	0,54
Maaperä	Pohjamaa (jäätynyt)			2,5	200	0,08

Mitoitusohjelma antaa lopulliset tehot taulukoituna erivaiheisiin sekä kokonaistehon (taulukko 7).

Taulukko 7. Kuvakaappaus Excel-laskurin laskentatuloksista

LASKENTA				
Lumen lämmittäminen	q_s	19,4	W/m ²	3 %
Lämmön siirto pinnasta ilmaan (lumivapaa)	q_h	205,0	W/m ²	33 %
Lumen sulattaminen	q_m	279,2	W/m ²	45 %
Pinnan kuivatus (veden haihdutus)	q_e	105,0	W/m ²	17 %
Lämpöhäviöt maaperään	q_e	10,5	W/m ²	2 %
Sulatusteho lumisateen aikana	q_o	299	W/m²	
Sulatusteho lumisateen jälkeen	q_o	619	W/m²	
Sulatusteho 50 % lumen peitossa	q_o	464	W/m²	

Työssä laskettiin lumensulatuksen tehot ASHRAE:n kaavoilla sekä vertailtiin näitä VTT:n projektin raportissa annettuihin kaavoihin. Kaavat eroavat ASHRAE:n kaavoista, niin että lumenlämmittäminen ja lämmönsiirtopinnasta lasketaan yhdistetyllä kaavalla ja lumen sulattaminen lasketaan omalla kaavallaan, kun taas ASHRAE:ssa jokainen kohta lasketaan omilla kaavoillaan. VTT:n las-

kennassa molemmissa kaavoissa käytetään vakiokerrointa $0,2778 \times 10^{-6}$. Pinnan kuivatus ja maaperään johtuvat lämpöhäviöt lasketaan molemmissa samalla tavalla. VTT:n raportin mukaisilla kaavoilla tehosta tulee noin 4 % pienempi, kuin ASHRAE:n kaavoilla, kun mitoitus tapahtuu ulkolämpötilassa -10°C .

10.1 Laskentaesimerkki ASHRAE:n kaavoilla

Lumen lämmittämiseen tarvittava lämpövirran tiheys eli teho pinta-alaa kohti lasketaan kaavalla 1:

$$q_{lumi} = \frac{100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 30 \frac{\text{mm}}{\text{h}} * (2,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * (0 - -10)^\circ\text{C} + 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} * (0,56 - 0)^\circ\text{C}}{3,6 * 10^6} * 1000$$

$$= 19,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Lumen sulattamiseen tarvittava teho pinta-alaa kohti lasketaan kaavalla 2:

$$q_m = \frac{100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 30 \frac{\text{mm}}{\text{h}} * 335 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3,6 * 10^6} * 1000$$

$$= 279,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Lämmönsiirron teho pinta-alaa kohti pinnasta ilmaan (lumivapaa) lasketaan kaavoilla 3 ja 4:

Konvektiivinen lämmönsiirtokertoimen riippuvuus lasketaan kaavalla 3:

$$h_c = 0,037 * \left(\frac{0,02561 \frac{\text{W}}{\text{mK}}}{2,5 \text{ m}} \right) * 666667^{0,8} 0,71^{0,33}$$

$$= 15,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Konvektion ja lämpösäteilyn lämmönsiirtoteho pinta-alaa kohti lumettomasta pinnasta ilmaan lasketaan kaavalla 4:

$$q_h = 15,46 \frac{W}{m^2 K} * (0,56 - -10)^\circ C + 5,670 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * 0,9 * (273,71^4 - 263,15^4) K$$

$$= 205,0 W/m^2$$

Veden haihduttamiseen pinnalta tarvittava teho pinta-alaa kohti lasketaan kaavalla 5:

$$q_e = 1,342 \frac{kg}{m^3} * 0,0127 \frac{m}{s} * (0,00396 - 0,0015) \frac{kg}{kg_{k.i.}} * 2499 \frac{J}{kg} * 1000$$

$$= 105,2 W/m^2$$

Rakennekerroksien lämpövastukset:

Pintamateriaali Graniittilaatta 50 mm, $\lambda = 2,9 W/mK$

$$R_1 = \frac{0,05 m}{2,9 \frac{W}{mK}} = 0,02 m^2 K/W$$

Alustamateriaali Jäätynyt betonikivi 100 mm, $\lambda = 1,7 W/mK$

$$R_2 = \frac{0,1 m}{1,7 \frac{W}{mK}} = 0,06 m^2 K/W$$

Eriste XPS- eriste 100 mm (sula), $\lambda = 0,037 W/mK$

$$R_3 = \frac{0,1 m}{0,037 \frac{W}{mK}} = 2,70 m^2 K/W$$

Maaperä pohjamaa 200 mm (jäätynyt), $\lambda = 2,5 \text{ W/mK}$

$$R_4 = \frac{0,2 \text{ m}}{2,5 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,08 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Lämmönvastus putkesta lumeen:

Maasta lumeen lämmönsiirtokertoimenä käytetään kokemusperäistä kaavaa
 $400 + 20 \cdot (\text{maaperän keskilämpötila} - 2)$

$$R_5 = 0,02 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,06 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + \frac{1}{460} \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,082 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Lämpövastus putkesta maaperään (jäätynyt asennushiekka 50 mm, $\lambda = 3,34 \text{ W/mK}$)

$$R_6 = 2,7 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 0,08 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + \frac{0,05 \text{ m}^2\text{K}}{3,34 \text{ W}} = 2,80 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Lämmönläpäisykerroin maahan

$$U_7 = \frac{1}{0,082 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + 2,80 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Liuoksen keskilämpötila

$$T_m = \frac{45^\circ\text{C} + 25^\circ\text{C}}{2} = 35^\circ\text{C}$$

Lämpöhäviöt maaperään

$$q_{maa} = (35\text{ }^{\circ}\text{C} - 5\text{ }^{\circ}\text{C}) * 0,35 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 10,5\text{ W/m}^2$$

Kokonaisteho ratkaistaan kaavalla 8:

$$q_a = 19,4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 205,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 279,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 105,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + 10,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 619,3\text{ W/m}^2$$

10.2 Laskentaesimerkki VTT:n laskentakaavoilla

Lumen lämmittämiseen tarvittava teho pinta-alaa kohti lasketaan kaavalla 10:

$$q_{lumi} = 0,2778 * 10^{-6} * v_1 * (\rho_{lumi} * C_{lumi} * (T_s - T_y) + (\rho_{vesi} * C_{vesi} * (T_f - T_s))) \quad (10)$$

q_{lumi}	on lumen lämpötilan nostoon tarvittava lämpö [W/m ²]
ρ_{vesi}	on veden tiheys [kg/m ³]
C_{vesi}	on veden ominaislämpökapasiteetti [J/kg*K]
ρ_{lumi}	on lumen tiheys [kg/m ³]
C_{lumi}	on lumen ominaislämpökapasiteetti [J/kg*K]
v_1	on lumisateen määrä [mm/h]
$cP_{jää}$	on jään ominaislämpökapasiteetti [J/kg*K]
T_f	on vesifilmikerroksen lämpötila [°C]
T_s	on lumikertymän lämpötila [°C]
T_y	on ympäristön lämpötila [°C]

Sijoittamalla lukuarvot kaavaan saadaan

$$\begin{aligned} q_{lumi} &= 0,2778 * 10^{-6} * 30 \frac{mm}{h} * (100 \frac{kg}{m^3} * 2,1 \frac{kJ}{kgK} (-5 - -10)^{\circ}C + 998 \frac{kg}{m^3} \\ &\quad * 4,18 \frac{kJ}{kgK} (0,56 - -5)^{\circ}C) * 1000 \\ &= 202,1 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Lumen sulattamiseen tarvittava teho lasketaan kaavalla 11:

$$q_{lumi} = 0,2778 * 10^{-6} * p_{lumi} * v_1 * r_1 \quad (11)$$

R_1	on lumen sulatuslämpö [kJ/kg °C]
-------	----------------------------------

Sijoittamalla lukuarvot kaavaan saadaan

$$\begin{aligned} q_m &= 0,2778 * 10^{-6} * 100 \frac{kg}{m^3} * 30 \frac{mm}{h} * 335 \frac{kJ}{kg \text{ } ^\circ C} * 1000 \\ &= 279,2 W/m^2 \end{aligned}$$

Veden haihduttaminen ja lämpöhäviöt maaperään lasketaan vastaavasti kuin ASHRAE:n esimerkissä on kuvattu.

Kokonaisteho lasketaan kaavalla 8:

$$q_a = q_m + q_e + q_{maa} + q_{lumi} \quad (8)$$

$$q_a = 202,1 \frac{W}{m^2} + 279,2 \frac{W}{m^2} + 105,0 \frac{W}{m^2} + 10,5 \frac{W}{m^2} = 596,8 W/m^2$$

q_a	on kokonaisteho [W/m^2]
q_{maa}	on lämpöhäviöteho lämmönluvutuspiirin alapuolelle [W/m^2]
q_e	on pinnankuivuminen [W/m^2]
q_m	on lumensulamien [W/m^2]
q_{lumi}	on lumikertymän lämmittäminen sulamispiste lämpötilaan tarvittava teho sulatusjakson aikana [W/m^2]

11 Yhteenveto

Insinööriyön aiheena oli tutkia portaiden lumensulatusjärjestelmän mitoitus.

Energiankulutuksen kannalta ei ole väliä, onko lumensulatus toteutettu sähköisellä lämmityskaapelilla vai nestekiertoisella järjestelmällä. Näiden laitteistojen erot tulevat käytöstä, laitteiden huollosta, energianhinnasta ja laitteiston uusimistarpeesta.

Energiahintojen voimakas vaihtelu vuosina 2022–2023 on vaikeuttanut laitteistojen elinkaariajattelua. Sähkönhinnan nousu talvella 2022 aiheutti osaltaan myös muiden energiahintojen nousupaineita. Näiden lisäksi energiahintoihin on vahvasti vaikuttanut raaka-aineiden hinnan korotukset. Nämä muuttujat vaikuttavat monelta osin laitteistojen valintaan ja elinkaarikustannuksiin. Vielä vuona 2021 sähkökäyttöiset lumensulatusjärjestelmät eivät olisi olleet kannattavia isossa mittakaavassa, koska kaukolämmön energiahinta oli verrattain halpaa. Tilannetta nykytiedoilla tarkastellessa sähköiset järjestelmät voisivat olla jopa perusteltuja, hankintakustannusten ollessa pienemmät.

Näiden molempien järjestelmien parhaimmat edut tulisivat esille, mikäli käytettäisiin liuospohjaista järjestelmää ja lämmitys toteutettaisiin lämpöpumppusovelluksella. Tämän kaltaisen järjestelmän toimivuutta ja energiatehokkuutta ei kuitenkaan tutkittu tässä työssä.

Työn laskentavaiheessa perehdyttiin teholaskentaan, joka perustui lumensulattamisen viiteen vaiheeseen. Tehon määrittämiseksi tulee laskea ensin lumen lämmittämiseen ja lumensulattamiseen tarvittava lämmitysteho, sitten lämmönsiirto pinnasta ilmaan, pinnan kuivatus, eli veden haihduttaminen sekä lämpöhäviö maaperään. Näiden kaikkien tehojen yhteenlaskettu teho on kokonaisteho, joka tarvitaan lumen sulattamiseksi.

Portaan pintamateriaaleilla ja alusmateriaalilla ei juurikaan ole merkitystä sulatustehon määräytymiseen, jos materiaalien lämmönvastus ei ole suuri kuten

esimerkiksi eristeellä. Suurin tehohukka syntyy, mikäli lämmitettävän pinnan alla ei ole eristettä. Eristeen paksuuden kasvukaan ei ole mitenkään merkittävä vaan se, että jo 20 mm eristettä vähentää lämpöhäviöitä 140 W/m^2 .

Portaisen lumensulatukseen tarvittavan tehon laskenta ei poikkea tasaisella pinnalla tehdystä tehonlaskennasta. Portaiden toimivuuden kannalta tehoa tarvitaan kuitenkin enemmän, kuin vaakatasolla tapahtuvaan sulatukseen. Tämä tehon tarpeen lisääntyminen johtuu siitä, että portaissa on kaksi kylmää pintaa, joita pitää lämmittää ja tehoa tarvitaan haihduttamaan vesi pinnalta pois nopeammin. Mikäli vettä ei saada haihdutettua pinnalta pois, alkaa portaan kylmimpään kohtaan, eli portaan etukulmaan muodostumaan jäätä. Tehon tarpeen lisääntyminen johtuu siis vain nopeammasta sulatus- ja haihdutusprosessista. Karkeasti Etelä-Suomessa lumensulatukseen tarvitaan lämmitystehoa tasaisella noin 300 W/m^2 . Portaissa vastaava lämmitysteho on noin $619\text{--}700 \text{ W/m}^2$.

Työn lopputuloksena laadittiin Excel-pohjainen laskuri, jolla pystytään suhteellisen helposti tekemään laskelmat lumensulatusjärjestelmän tehosta sekä arvioimaan energiakulutus ja näiden vuosikustannukset annetuilla lähtöarvoilla.

Mitoitusohjelman laskentatuloksia on jatkossa tarkoitus tarkastella todellisten mitattujen kulutuksien osalta. Lisäksi mitoitusohjelman visuaalista puolta on tarkoitus vielä jatkokehittää ja tulosteiden ulkoasua yhtenäistetään myöhemmin vastaamaan yrityksen visuaalista ulkoasua.

Lähteet

- 1 Vuonna 2021 palkansaajien työpaikkatapaturmat. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<https://www.stat.fi/julkaisu/cl8li52edp3su0cw16sf1ofhz>>. Luettu 16.3.2024.
- 2 2011 ASHRAE Handbook - heating, ventilating, and air-conditioning applications. 2011. E-kirja. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Luettu 24.11.2022.
- 3 Kirjavainen, Miikka; Kivikoski, Kari; Ritola, Jouko & Sipilä, Kari. 2001. Liikenne- ja yleisten alueiden sulanapitojärjestelmät. Verkkoaineisto. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. <<https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2001/T2113.pdf>>. Luettu 24.11.2022.
- 4 Venta, Sami. 2014. Sulanapidon teho. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 5 Uponor Meltaway snow and ice meltin system. 2023. Verkkoaineisto. Uponor. <<https://brandportal.uponor.com/m/d88d52c1f997579/original/TI-Meltaway-EN-1121160-v2.pdf>>. Luettu 28.11.2022.
- 6 Roth SnowFlex lumensulatusjärjestelmä. Suunnittelu- ja asennusohjeet. Verkkoaineisto. Roth. <https://www.roth-finland.fi/fileadmin/user_upload/Roth_North_Europe/Images_for_Roth_North_Europe/Finland/PDF_files_for_Finland/PDF_files_for_Products_Finland/SnowFlex/SnowFlex_esite_uusi.pdf>. Luettu 20.3.2024.
- 7 Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot 2008. RT 18-10922 Rakennustieto.
- 8 Sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien huolto- ja kunnossapito-ohjelmien laatiminen 2020. ST 96.01 Sähköinfo.
- 9 Energiantuotanto julkaisut energiavuosi 2022 -kaukolämpö. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2022.pdf>. Luettu 5.3.2024.
- 10 Energian hinnat. 2022. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://www.stat.fi/til/ehi/2021/04/ehi_2021_04_2022-0310_tie_001_fi.html>. Luettu 5.3.2024.
- 11 Rakennusten kaukolämmitys Määräykset ja ohjeet. 2020. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <https://energia.fi/files/5423/JulkaisuK1_2020_Energiateollisuus_ry_%28paiv._20201119%29.pdf>. Luettu 28.11.2022.

- 12 Sähkötase 1970–2022. 2022. Verkkoaineisto. Energiateollisuus.
<<https://energia.fi/tilastot/sahkotase-1970-2022/>>. Luettu 5.3.2024.
- 13 Energiankokonaiskulutus. 2023. Verkkoaineisto. Tilastokeskus.
<<https://www.stat.fi/julkaisu/cl8n4s3sx02dl0bw26mn4i6e4>>. 20.12.2023. Luettu 5.3.2024.
- 14 Kaukolämmön hinta kuluttajatyypeittäin. 1996–2024. Muuttujina Kaukolämmön hinta, kuukaudet, kaukolämmön kuluttajatyypit, 1996. 2024. Verkkoaineisto. Tilastokeskus <https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_12gd.px>. Luettu 5.3.2024.
- 15 Energian hinnat. 2022. Verkkoaineisto. Tilastokeskus.
<https://www.stat.fi/til/ehi/2021/04/ehi_2021_04_2022-03-10_tie_001_fi.html>. Luettu 5.3.2024.
- 16 Kaukolämpöhinta 2024. Verkkoaineisto. Helen <<https://www.helen.fi/lammitys/kaukolampo/hinnat>>. Luettu 5.3.2024.
- 17 Vuonna 2021 palkansaajien työpaikkatapaturmat. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <<https://www.stat.fi/julkaisu/cl8li52edp3su0cw16sf1ofhz>>. Luettu 5.3.2024.
- 18 Nordpool. Verkkosivusto. NordPool <<https://www.nordpoolgroup.com/>>. Luettu 5.3.2024.
- 19 Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. 2008–2023. Muuttujina Sähkön hinta, kuukaudet, kaukolämmön kuluttajatyypit, 2008. 2023. Verkkoaineisto. Tilastokeskus <https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_13rb.px>. Luettu 20.3.2024.
- 20 Sulanapitokaapelit. Verkkoaineisto. Pistesarjat <<https://pistesarjat.fi/fi/tuotteet/sulanapito/sulanapitokaapelit>>. Luettu 20.3.2024.
- 21 Ulkoalueiden sulanapito. Verkkoaineisto. Pistesarjat. <<https://pistesarjat.fi/fi/ajankohtaista/Ulkoalueiden-sulanapito>>. Luettu 28.11.2023.
- 22 Sademäärät. Verkkoaineisto. Climate Data. <<https://en.climate-data.org/>>. Luettu 28.11.2023.
- 23 Kaukolämmön päästöt. Verkkoaineisto. Rakentamisen päästötietokanta <https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000763>. Luettu 5.3.2024.
- 24 Sähkön päästöt. Verkkoaineisto. Rakentamisen päästötietokanta <https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000778>. Luettu 5.3.2024.

- 25 Kaukolämpö ja kaukojäähdytys. Verkkoaineisto. Energiateollisuus
<<https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/kaukolampo-ja-jaahdytys/>>. Luettu 5.3.2024.

Kohde
Osoite
kaupunki

Raportti lumensulatus
LVIA
Työnumero



LASKENTA				
Lumen lämmittäminen	q_{L}	19	W/m ²	3 %
Lämmön siirto pinnasta ilmaan (lumivapaa)	q_{L}	205	W/m ²	31 %
Lumen sulattaminen	q_{L}	279	W/m ²	42 %
Pinnan kuivatus (veden haihdutus)	q_{L}	105	W/m ²	16 %
Lämpöhäviöt maaperään	q_{L}	51	W/m ²	8 %
Sulatusteho lumisateen aikana	q_{L}	299	W/m ²	
Sulatusteho lumisateen jälkeen	q_{L}	659	W/m ²	
Sulatusteho 50 % lumen peitossa	q_{L}	504	W/m ²	

		Energia MWh	
Energiakulutus		330	
		Kaukolämpö	Sähköinen
Porras	Vuotuiset käyttökustannukset*	€27 225	€31 906
	Päästöt tCO ₂	74	50
	Elinkaarikustannukset 25 vuotta	€535 184	€627 189

Korkokanta 3,0 %; inflaatio 2,0 %, energianhinnannousu 3% vuosi (molemmat)

TULOKSET		
Sulanpitoalueen pinta-ala	1000	m ²
Mitoitusteho	659	W/m ²
Mitoitustehon varmuuskerroin (kokonaisteho)	1,14	
Lämmönsiirtimen mitoitusteho	751	kW
Luoksen menolämpötila	45,0	°C
Luoksen paluulämpötila	25,0	°C
Luoksen lämpötilaero	20,0	°C
Luoksen keskilämpötila	35,0	°C
Etyleeniglykoli		
Vahvuus (tilavuus -%)	40,0	til-%
Jäätymispiste	-25,0	°C
Tarvittava liuosvirtaama Etyleeniglykoli 4	10,04	dm ³ /s

TULOKSET			
Putkijako	s	0,06	m
Sulanapitoputkiston pituus	L	15528,14	m
Nesteen massavirta	m ³	9,25	kg/s
Virtausnopeus yhdessä putkilenkissä	v	0,12	m/s
Yhden putkilenkin maksimipituus	l	70,00	m
Putkilenkkien määrä	n	222,00	kpl

Taulukko 8. Laskelmissa käytetyt materiaaliikohtaiset arvot [2.]

Parametri	Yks.	Pohjamaa	Sora	Murske	Asfaltti	Asennushiekka	Betoni kivi	XPS-eriste
Kuivatilavuuspaino	kg/m ³	1350	1800	1800	2200	1900	2300	30
Vesipitoisuus	til.-%	45,0	7,2	5,4	2,2	22,8	2,0	2,0
Jäätymislämpö	Wh/m ³	41 808	6 696	5 022	2 046	21 204	2 139	1 860
Lämmönjohtavuus –sula –jäätynyt	W/Km	1,50 2,50	1,58 1,12	1,40 0,92	1,1 1,5	2,56 3,34	1,7 1,7	0,037 0,037
Tilavuuslämpökapasiteetti sulana	kJ/m ³ K	2 900	1 658	1 583	2 050	2 387	2 180	60
Tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä	kJ/m ³ K	1 960	1 507	1 545	2 050	1 909	2 180	60