

Anni Ronkainen

# JÄÄN SULATTAMINEN VESISTÖN PINTAVEDELLÄ ILMAN ULKOISTA LÄMMÖNLÄHDETTÄ

Faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen tuottaman jään sulattamisen suunnittelu

Diplomityö  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: yliopistonlehtori Henrik Tolvanen  
Tarkastaja: yliopistonlehtori Seppo Syrjälä  
Maaliskuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Anni Ronkainen: Jään sulattaminen vesistön pintavedellä ilman ulkoista lämmönlähdettä  
Diplomityö  
Tampereen yliopisto  
Ympäristö- ja energiatekniikan DI-tutkinto-ohjelma  
Maaliskuu 2023

---

Suomen kaukolämmöntuotannossa on muutospaineita siirtyä fossiilisten polttoaineiden ja turpeen hyödyntämisestä hiilineutraalimpaan ja vihreämpään lämmöntuotantoon ilmastonmuutoksen ja geopoliittisten haasteiden vuoksi. Lämpöpumppuja on pidetty yhtenä lupaavimmista ratkaisuksista vastamaan kaukolämmöntuotannon muutospaineisiin. Vesistöjen hyödyntäminen lämpöpumppujen lämmönlähteenä on Suomessa haastavaa, koska vesistöjen pintaveden lämpötila laskee alle 1 °C talviaikaan. Yhtenä vaihtoehtona on hyödyntää pintaveden jäädyttämistä lämmönlähteenä hyödyntäen vapautuva faasimuutoslämpö. Kuitenkin pintaveden jäädyttämisestä johtuen jäätä syntyy 5–7 t/h jo 1 MW:n kokoisella lämpöpumppulaitoksella, mikä aiheuttaa ongelmia jään varastoinnille laitosalueella. Tässä tutkimuksessa tutkittiin, miten syntyvä jää voitaisiin sulattaa vesistön pintavedellä ilman ulkoista energianlähdettä.

Tämän tutkimuksen toteutus koostui kirjallisuuskatsauksen ja kokeellisen osuuden toteuttamisesta. Kirjallisuuskatsauksen avulla tutkittiin faasimuutoslämpöä lämmönlähteenä hyödyntävien lämpöpumppujen sovelluskohteita, jään ja lumen hävittämistapoja sekä jään sulamisnopeuteen vaikuttavia tekijöitä ja sulamisajan laskennallista määrittämistä. Tämän pohjalta päädyttiin tarkastelemaan jään sulattamista paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa. Molemmille tapauksille luotiin kirjallisuuskatsausta hyödyntäen numeeriseen laskentaan perustuva jään sulamis-malli, joka pohjautui lämmönsiirron, konversion ja ajan mallintamiseen. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin jään sulattamiskokeita, joiden avulla pyrittiin varmistumaan numeerisen mallin tuloksien luotettavuudesta. Jään sulamisajan tuloksia hyödynnettiin määrittäessä konfiguraatio paikallaan olevan veden tapaukselle ja sulatusjärjestelmän dimensiointi vesivirtauksen tapaukselle. Lisäksi molemmille tapauksille määritettiin sovelluskohteita numeeristen mallien, laitoksen ominaisuuksien, vesistön ominaisuuksien, sähköenergian kulutuksen ja sulamisajan perusteella.

Tutkimuksen tuloksissa havaittiin kirjallisuuskatsaukseen perustuvan numeerisen mallin vertautuvan kohtuullisen hyvin käytännön jään sulatuskokeisiin. Veden lämpötila, jääkappaleen koko ja lämmönsiirtopinta-ala, konversio sekä veden virtausnopeus havaittiin merkittävimiksi sulamisaikaan vaikuttaviksi tekijöiksi. Laitoksen konfiguraatiota määrittäessä havaittiin, ettei alle 12 °C paikallaan oleva vesi ehdi sulattamaan 1 MW:n lämpöpumppulaitoksen tuottamaa jäämäärää, ellei jäätä pilkota mekaanisesti. Siten veden lämpötilan ollessa alle 12 °C jäätä kertyy vesistöön. Laitoksen dimensioinnin yhteydessä havaittiin, että tuotettu jäämäärä saadaan sulatettua, mikäli jään lämmönsiirtopinta-alaa kasvatetaan. Lisäksi havaittiin, että sulatusalueen pinta-alan ja pumpun koon tarve vaihtelevat vesistön lämpötilan funktiona ja säilyvät realistisen suuruusina tarkastelulla lämpötilavälillä 0,5–12 °C. Muutos pinta-alan tarpeeseen tarkastelulla lämpötilavälillä on vähäinen, mutta massavirran ja pumpun tehon tarve kasvavat voimakkaasti alhaisilla veden lämpötiloilla, jolloin sulattaminen vesivirtauksella voi muodostua kannattamattomaksi.

Paikallaan olevan veden käytölle havaittiin soveltuvimmiksi kohteet, jotka sijaitsevat suurien vesistöjen äärellä, ja joissa ei ole tilaa lämpöpumppulaitoksen yhteydessä varastoida jäätä. Lisäksi soveltuvat sellaiset kohteet, joissa vesistön lämpötila ei ole pitkään alhainen, jäätä saa purkaa ja kertyä vesistöön sekä kohteet, joissa sähköenergian kulutusta ja rakentamisen tarvetta halutaan minimoida. Vesivirtauksessa sulattamisella havaittiin soveltuvimmiksi kohteet, joissa vesistön lämpötila on alhainen, vesistö on pieni tai etäisyys vesistöön on pitkä. Lisäksi soveltuvat sellaiset kohteet, joissa vesistöön ei ole soveltuvaa purkupaikkaa, vesistöön ei saa kertyä ylimääräistä jäätä tai muutoin vesistöön jään purkamista ei sallita. Tutkimuksessa havaittiin potentiaalisia jatkotutkimuskohteita liittyen veden jäähtymiseen ja virtausnopeuden käyttäytymiseen jään pinnalla sekä määrittämiseen, millaisia mahdollisuuksia on jään uudelleen- ja hyötykäytölle.

Avainsanat: jään sulamisaika, jään sulamisnopeus, jään sulattaminen, jään sulaminen, faasimuutoslämpöä hyödyntävä lämpöpumppulaitos, jään sulamisajan mallintaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ABSTRACT

Anni Ronkainen: Using surface water to melt ice without external heat source  
Master of Science Thesis  
Tampere University  
Master's Degree Program in Environmental and Energy Engineering  
March 2023

---

In Finnish district heat production, pressures for change are shifting from the use of fossil fuels and peat to more carbon-neutral and greener heat production due to climate change and geopolitical challenges. Heat pumps have been considered one of the most promising solutions to respond to the pressures of change in district heating production. Using surface water as a heat source for heat pumps is challenging in Finland, when the surface water temperature falls below 1 °C during winter. One option is to use the freezing of surface water as a heat source to obtain the released phase change heat. However, due to the freezing of surface water, 5–7 t/h of ice is produced in a 1 MW heat pump plant, which causes problems for storage in the plant area. This study investigated how the produced ice is melted by using surface water to melt ice without external heat source

This study consisted of a literature review and an experimental part. In the literature review were studied the applications for heat pumps, which use phase change heat as a heat source, the melting applications of ice and snow, as well as the factors affecting the melting speed of ice and the calculation of the melting time. Based on literature review, it was decided that in this study are examined how the ice melts with water flow and in water which isn't moving. For both cases, with using the literature review of this study was created an ice melting model based on numerical calculation, which was based on modeling heat transfer, conversion and time. In addition, ice melting experiments were carried out in the study and those were used to ensure the reliability of the results of the numerical model. The melting time of the ice was used to determine the configuration of the standing water and the dimension of the melting system based on the water flow. In addition, applications were determined for both cases based on numerical models, plant characteristics, water body characteristics, electrical energy consumption and melting time.

In the results of the study, it was found that the numerical model based on the literature review compares reasonably well with the practical ice melting experiments. The temperature of the water, the size of the ice cube and the heat transfer area, the conversion and the water flow rate were found to be the most significant factors affecting the melting time. When determining the configuration of the plant, it was found that standing water below 12 °C can't melt the amount of ice produced by the 1 MW heat pump plant on an hourly basis, which leads to the accumulation of ice in the water. When dimensioning the plant, it was found that the amount of ice produced can be melted if the heat transfer surface of the ice is increased. It was also found that the need for the surface area of the melting area and the size of the pump vary as a function of the temperature of the water body and remain reasonable also, when the temperature of water is 0.5 °C. The change in the need for surface area in the considered temperature range is small, but the need for mass flow and pump power increase strongly at low water temperatures, so melting with water flow can become unprofitable.

For standing water, the most suitable sites were found to be located next to large bodies of water, when there is no free surface area connected to a heat pump plant. It is also possible when the temperature of the body of water is not low for a long time, ice can be discharged and accumulated in the body of water, and sites where the consumption of electrical energy and the need for construction are to be minimized. The most suitable locations for water flow were those where the temperature of the water body is low, the water body is small, the distance to the water body is long. It is also a possible solution when there is no suitable unloading place for the water body, ice must not accumulate in the water body, excess ice must not accumulate, or otherwise the unloading of ice into the water body is not allowed. Further research topics were found to be the behavior of the water flow rate and temperature decrease on the surface of the ice, the effects of the shape of the ice on the melting time, and the possibilities of reuse and utilization of the ice.

Keywords: melting time of ice, melting rate of ice, modelling of melting rate, ice melting

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty toimeksiantona Ramboll Finland Oy:lle jatkotutkimuksena aikaisemmin teetetylle Sami Hirvosen diplomityölle *Pintaveden jäädyttäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä kaukolämmön tuotannossa*.

Haluan kiittää Ramboll Finland Oy:tä mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisesta aiheesta. Ramboll Finland Oy:stä haluan esittää suuret kiitokset Jouni Laukkaselle työni ohjaamisesta, asiantuntevista kommentteista ja kannustuksesta, Sami Hirvoselle yhteisistä pohdinnoista jään sulattamiseen liittyen sekä muille energiatiimiläisille kannustuksesta. Lisäksi haluan kiittää Ympäristögeotekniikan yksikköä käytännön jään sulattamiskokeiden mahdollistamisesta. Tampereen yliopistosta haluan kiittää diplomityöni ohjaajaa Henrik Tolvasta palautteesta ja neuvoista työtäni koskien sekä opetuksesta opiskeluvuosieni varrelta. Haluan myös kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta opintojeni ja diplomityöprosessin aikana.

Seuraavaksi suuntaan sitten gradun tekoon, energiaan liittyvien suunnittelutehtävien pariin sekä tietysti hiihtämään ennen kuin lumet laduilta sulavat.

Tampereella, 25.3.2023

Anni Ronkainen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. FAASIMUUTOSLÄMPÖÄ HYÖDYNTÄVÄ LÄMPÖPUMPPULAITOS .....	5
2.1 Lämpöpumppujen rooli kaukolämmöntuotannossa .....	5
2.2 Vesistön hyödyntäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä .....	7
2.3 Faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen toimintaperiaate .....	11
3. JÄÄN SULATTAMISTEKNIIKOITA .....	14
3.1 Sulatusaltaat .....	14
3.2 Sulatuskentät .....	17
3.3 Varastointi luonnollista sulamista varten .....	18
3.4 Jäähdytysjärjestelmät .....	18
4. JÄÄN SULAMISEN MALLINTAMINEN .....	21
4.1 Jään sulaminen .....	21
4.2 Muutokset jäässä sulamisen funktiona .....	24
4.3 Lämmönsiirto jäähän konvektion vaikutuksesta .....	24
4.4 Sulamisaikaa koskevat tutkimukset .....	27
5. AINEISTO JA MENETELMÄT .....	31
5.1 Tutkimuksen tarkoitus ja päätavoitteet .....	31
5.2 Tutkimuksen eteneminen .....	31
5.3 Tutkimuskohteen kuvaus .....	33
5.4 Sovelluskohteiden määrittäminen sulattamiselle paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa .....	35
5.5 Jään sulamisaikaa kuvaavan mallin luominen numeerisella laskennalla	37
5.6 Jään sulatustestit .....	44
5.7 Numeerisen sulamismallin kehittäminen .....	46
5.8 Paikallaan olevassa vedessä sulattamiseen perustuvan järjestelmän konfiguraation ja vesivirtaukseen perustuvan laitoksen dimensioiden määrittäminen .....	48
5.9 Numeerisen mallin herkkyyden ja tutkimuksen tulosten luotettavuuden arviointi	53
6. TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI .....	55
6.1 Jään sulamismallin vertailu kokeellisiin tuloksiin .....	55
6.2 Jään sulamisaika paikallaan olevassa vedessä .....	58
6.3 Jään sulamisaika vesivirtauksessa .....	60

6.4	Sulatusjärjestelmän konfiguraatio paikallaan olevan veden tapauksessa	64
6.5	Dimensioitu sulatusjärjestelmä vesivirtauksen tapauksessa .....	66
6.6	Herkkyystarkastelut.....	68
6.7	Tutkimuksen luotettavuus.....	73
6.8	Pohdinta.....	79
7.	YHTEENVETO.....	84
	LÄHTEET .....	87

# KUVALUETTELO

<i>Kuva 1 Suomen kaukolämmöntuotanto 2021 perustuen lähteeseen (Energiateollisuus 2022a).....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 2 Vesistöä lämmönlähteenä hyödyntävä avoimen ja suljetun systeemin lämpöpumput.....</i>	<i>8</i>
<i>Kuva 3 Tarvittava massavirta vesistöstä 1 MW:n lämpöpumppulaitoksella hyödyntäen kaavaa 1 ja sulamislämmölle arvoa 334 kJ/kg (Kahraman et al. 1998) veden lähtiessä höyrystimeltä lämpötilassa 0,5°C.....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 4 Yksinkertaistettu kylmäkoneen toimintaperiaate perustuen lähteeseen (Kaappola et al. 2022).....</i>	<i>11</i>
<i>Kuva 5 Putkijääkoneen komponentit ja toimintaperiaate muokattuna lähteestä (Tangthieng 2011).....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 6 Lumen sulatusallas siirtämällä lämpöä veteen perustuen lähteeseen (Nurmi 2013).....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 7 Lumen sulatusallas jatkuvalla vesivirtauksella perustuen lähteeseen (Nurmi 2013).....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 8 Kenttämaisesti sulattamisessa käytetyt tekniikat a) nestekiertoinen b) infrapunasäteilyyn perustuva perustuen lähteeseen (Mensah &amp; Choi 2015).....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 9 Ruotsissa sijaitsevan Sundsvallin sairaalan lumijäähdytysjärjestelmä. Perustuu lähteeseen (Skogsberg &amp; Nordell 2001).....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 10 Liikkuva rajapinta kiinteän ja sulan välillä.....</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 11 Entalpia lämpötilan funktiona jään sulamisessa.....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 12 Jään paksuus ajan funktiona numeerisesti määritettynä johtumalla muokattuna lähteestä (Kahraman et al. 1998).....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 13 Jään paksuus ajan funktiona numeerisesti ja kokeellisesti määritettynä huomioiden johtuminen sekä konvektio muokattuna lähteestä (Kahraman et al. 1998).....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 14 Pallonmuotoisen jääkappaleen (Halkaisijaltaan 3-in. ≈ 6–8 cm) sulamisnopeuden muutos ajan funktiona muokattuna lähteestä (Vanier &amp; Tien 1970).....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 15 Tutkimuksen eteneminen.....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 16 Pintavettä jäädyttävän lämpöpumppulaitoksen (pilottilaitos) toimintaympäristö perustuen lähteeseen Hirvonen (2022).....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 17 Vesivirtauksessa sulattaminen lämpöpumppulaitoksen yhteydessä.....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 18 Sovelluskohteiden määrittäminen.....</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 19 Meriveden keskilämpötila Suomenlahdelta Helsingin edustalta Harmajan mittausasemalta (Ilmatieteen laitos).....</i>	<i>36</i>
<i>Kuva 20 Lämmönsiirtoala vesivirtauksesta ja paikallaan olevasta vedestä jäähän.....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 21 Sulava massa dm ajanhetkessä dt.....</i>	<i>38</i>
<i>Kuva 22 Jään sulattamisen laskenta.....</i>	<i>39</i>
<i>Kuva 23 Kuution muodon muuttuminen konversion funktiona paikallaan olevassa vedessä.....</i>	<i>46</i>
<i>Kuva 24 Korjauskertoimen määrittäminen konversion funktiona eri λ:n arvoilla.....</i>	<i>48</i>
<i>Kuva 25 Lämpöpumppulaitokselta tulevasta jäästä muodostuva suorakulmio (m= 6000 kg ja dimensiot 0,2m x 5,9m x 5,5m).....</i>	<i>50</i>
<i>Kuva 26 Lämmönsiirtopinta-alan moninkertaistaminen leikkaamalla edellä esitetty suorakulmainen kappale (Kuva 25) veden eri lämpötiloilla.....</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 27 Suuren jääkappaleen leikkaaminen ja sulatusalueen pinta-alan tarpeen mitoittaminen.....</i>	<i>52</i>
<i>Kuva 28 Jääkuution (m = 11 g, L= 0,023 m, T<sub>0</sub> = -7 °C) sulamisaika lämpötilan funktiona paikallaan olevassa vedessä.....</i>	<i>55</i>

Kuva 29 Jääkuution ( $m = 8 \text{ g}$ , $L = 0,021 \text{ m}$ , $T_0 = -6 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona vesivirtauksessa nopeudella $0,6 \text{ m/s}$ .....	57
Kuva 30 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona paikallaan olevassa vedessä. ....	59
Kuva 31 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen ajan funktiona eri lämpötiloilla paikallaan olevassa vedessä. ....	59
Kuva 32 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen kuution koon funktiona eri lämpötiloilla paikallaan olevassa vedessä. ....	60
Kuva 33 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona vesivirtauksessa. ....	61
Kuva 34 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen ajan funktiona eri lämpötiloilla vesivirtauksessa. ....	62
Kuva 35 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen kuution koon funktiona eri lämpötiloilla vesivirtauksessa. ....	63
Kuva 36 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisaika jään pinnalla olevan vesivirtauksen nopeuden funktiona. ....	64
Kuva 37 Jään määrä paikallaan olevassa vedessä ajan funktiona, kun vesistön lämpötila on $2 \text{ °C}/4 \text{ °C}$ , kun jäätä syntyy $6 \text{ t/h}$ . ....	65
Kuva 38 Jään kertyminen ja vesistön sulatuskyky tunnin aikana eri vesistön lämpötiloilla, kun jäätä syntyy $6 \text{ t/h}$ . ....	65
Kuva 39 Jään määrä tunnin kuluttua, kun jäätä syntyy $6 \text{ t/h}$ , ja jäästä muodostuu yksi suorakulmainen kappale ( $5,5 \text{ m} \times 5,9 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ ), jota sulatetaan virtauksella eri lämpötiloilla. ....	66
Kuva 40 Sulatusalueen pinta-ala eri veden lämpötiloilla, kun jäätä syntyy $6 \text{ t/h}$ .....	67
Kuva 41 Tarvittava massavirta vettä, kun jäätä sulatetaan $6 \text{ t/h}$ . ....	67
Kuva 42 Pumpun teho eri veden lämpötiloilla, kun jäätä sulatetaan $6 \text{ t/h}$ , pumpun nostokorkeus on $5 \text{ m}$ , hyötysuhteeksi on oletettu $75 \%$ ja edellä esitetyillä massavirroilla (Kuva 41). ....	68
Kuva 44 Muutos kuution ( $m = 10 \text{ g}$ , $L = 0,022 \text{ m}$ , $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisajassa lämpötilan kasvaessa $0,5 \text{ °C}$ vesivirtauksen nopeuden ollessa $0,6 \text{ m/s}$ .....	70
Kuva 45 Jään kertyminen paikallaan olevaan veteen tunnin aikana jään syntymisnopeuden muuttuessa $\pm 1 \text{ t/h}$ eri veden lämpötiloilla. ....	71
Kuva 46 Jään kertyminen paikallaan olevaan veteen tunnin aikana jään sulamisnopeuden muuttuessa $\pm 10 \%$ veden eri lämpötiloilla.....	71
Kuva 47 Jääkuution sulaminen ( $m = 27 \text{ g}$ , $L = 0,031 \text{ m}$ , $T_0 = -6 \text{ °C}$ ) ajan funktiona paikallaan olevassa vedessä.....	76
Kuva 48 Jääkuution sulaminen ( $m = 27 \text{ g}$ , $L = 0,031 \text{ m}$ , $T_0 = -7 \text{ °C}$ ) ajan funktiona vesivirtauksessa.....	77
Kuva 49 Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen alkuarvo numeerisessa laskentamallissa lämpötilan funktiona. ....	79



# LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	engl. Combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto	
COP	engl. Coefficient of Performance, tehokerroin	
$a$	terminen diffuusiokerroin	[m <sup>2</sup> /s]
$A$	pinta-ala	[m <sup>2</sup> ]
$AH$	absoluuttinen ilman kosteus	[g/m <sup>3</sup> ]
$c$	ominaislämpökapasiteetti	[J/(kgK)]
$C$	kerroin Nusseltin luvun korrelaatiolle (Vanier & Tien 1970)	[-]
$D$	halkaisija	[m]
$g$	putoamiskiihtyvyyys	[m/s <sup>2</sup> ]
$Gr$	Grashoffin luku	[-]
$h_c$	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$h_l$	pumpun nostokorkeus	[m]
$i_{light}$	valon intensiteetti	[W/m <sup>2</sup> ]
$k$	lämmönjohtavuus	[W/(mK)]
$l$	sulamis- /latenttilämpö	[J/kg]
$L$	pituus	[m]
$L_c$	karakteristinen mitta	[m]
$m$	massa	[kg]
$\dot{m}$	massavirta	[kg/s]
$Nu$	Nusseltin luku	[-]
$p$	paine	[bar]
$P$	teho	[W]
$Pr$	Prandtin luku	[-]
$Q$	lämpöenergia	[J]
$\dot{Q}$	lämpöteho	[W]
$Ra$	Rayleighin luku	[-]
$Re$	Reynoldsin luku	[-]
$St_L$	Stefanin luku	[-]
$t$	aika	[s]
$T$	lämpötila	[°C, K]
$U$	nopeus	[m/s]
$U_\infty$	virtauksen nopeus	[m/s]
$v_w$	tuulen nopeus	[m/s]
$V$	tilavuus	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	tilavuusvirta	[m <sup>3</sup> /s]
$x$	faasien välisen rajapinnan sijainti	[m]
$X$	konversio	[-, %]
$y$	pituus y-suunnassa	[m]
$z$	pinta-alan korjauskerroin	[-]
$z_{wc}$	eristekerroksen (puuhake) paksuus	[cm]
$\beta$	tilavuuden laajenemiskerroin	[1/K]
$\epsilon$	halkaisijan suhteellinen muutos	[-]
$\eta$	hyötysuhde	[-]
$\lambda$	muutoksen voimakkuutta kuvaava taajuuskerroin	[-]
$\omega$	dimensioton muotoa kuvaava parametri	[-]
$\mu$	dynaaminen viskositeetti	[Ns/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	kinemaattinen viskositeetti	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	tiheys	[kg/m <sup>3</sup> ]

# 1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos ja geopoliittiset haasteet asettavat muutospaineita Suomen kaukolämmöntuotannolle, sillä kaukolämmöntuotanto on pitkään perustunut fossiilisten polttoaineiden ja turpeen hyödyntämiseen (Smil 2016; Tilastokeskus). Lisäksi on kyseenlaistettu biomassan nykyisen laajuista käyttöä energiantuotannossa (Sitra 2021). Fossiilisten polttoaineisiin perustuvan tuotannon kustannukset ja polttoaineiden hinnat ovat viime aikoina nousseet muun muassa päästöoikeusmaksujen ja polttoaineen saatavuuden heikkenemisen vuoksi (Energiavirasto b; Energiateollisuus 2022b). Myös Euroopan Unionin kasvihuonepäästövähennystavoitteet ohjaavat kaukolämmöntuotannon siirtymistä fossiilista polttoaineista kohti hiilineutraalimpaa ja vihreämpää lämmöntuotantoa vastaten siten ilmastonmuutoksen asettamiin haasteisiin (Euroopan komissio 2011).

Lämpöpumppulaitoksia on pidetty yhtenä lupaavimmista teknologioista korvaamaan polttamista kaukolämmöntuotannossa (Sayegh et al. 2018; Kontu, et al. 2019). Alhainen sähkön hinta ja hinnan vaihtelu, joustavuus kaukolämpö- ja sähköverkossa, sektori-integraatio sekä teknologinen kehitys ovat luoneet lämpöpumppulaitoksille mahdollisuuksia toimia kannattavina kaukolämmöntuotantolaitoksina (Passi et al. 2016). Sähkön kulutuksessa joustavuus on merkittävä etu, kun sähköntuotanto muuttuu sääriippuvaisemmaksi. Polttoaineiden hintojen nousu ja ilmastonmuutos ovat myös lisänneet kiinnostusta hyödyntää lämpöpumppuja laajemmin (Chua et al. 2010), mikä mahdollistaa myös lämmityssektorin päästöjen vähenemisen (Fischer & Madani 2017).

Vesistöjen hyödyntämistä lämpöpumpun lämmönlähteenä on viime vuosina tarkasteltu Suomessa (Rauhamäki 2019). Haasteeksi on kuitenkin osoittautunut veden alhainen lämpötila kaukolämmön talviajan kysyntähuipun aikana. Vesistön pintaveden jäädyttämistä lämpöpumpun lämmönlähteenä ovat tutkineet muun muassa Hirvonen (2022) diplomityössään ja Røsvik et al. (1993) osana norjalaista LAVA-ohjelmaa. Hirvonen (2022) tutki diplomityössään mahdollisuutta hyödyntää pintaveden jäädyttämistä lämmönlähteenä hyödyntäen siten faasimuutoslämmön. Pintaveden jäädyttäminen vähentää pumppattavan veden tarvetta verrattuna siihen, että pintavettä, jonka lämpötila on alhainen, ei jäädytetä. Faasimuutoslämmön hyödyntäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä kuitenkin johtaa lämmöntuotannon ohella jään syntymiseen lämmöntuotannon sivutuotteena. Kokoluokaltaan 1 MW:n kokoisen laitoksen tapauksessa jäätä syntyy jäätä 5–7 t/h, mikä

aiheuttaa merkittävästi haasteita esimerkiksi jään varastoinnille talvella, kun jään luonnollinen sulaminen on vähäistä. Laitoksen koon ollessa verrannollinen syntyvän jään määrään on jään syntyminen suuremmissa laitoksissa vieläkin merkittävämpi haaste, jolloin jään sulattaminen voisi olla ratkaisu varastoinnin haasteeseen.

Aikaisemmissa tutkimuksissa sulamista on mallinnettu sekä vakaisissa, muuttumattomissa olosuhteissa että muuttuvissa olosuhteissa. Lisäksi malleja on kehitetty sekä yksittäisiä moniulotteisia. (Rees et al. 2002) Jään sulamistutkimusta on lähestytty sekä empiirisesti (Hao & Tao 2001; Hosseini & Rahaeifard 2009) että laskennallisesti numeerisella menetelmällä (Lei et al. 2017; Kahraman et al. 1998). Lämmönsiirtoa ja sulamisprosessia on tutkittu kirjallisuudessa niin pallonmuotoisille (Eames & Adref 2002) kuin suorakulmaisille kappaleille (Kahraman et al. 1998). Kiinteän pallonmuotoisen aineen sulamista fluidissa on tutkittu altaaseen upottamalla (Schenk & Schenkels 1968). Lisäksi on tutkittu lämmönsiirron ominaisuuksia kiinteän aineen ja virtaavan nesteen välillä (Hao & Tao 2001).

Lisäksi aikaisemmin on tutkittu jään ja lumen sulattamista käytännössä rakennuksien katoilta, kaupunkien jalkakäytäviltä ja silloilta (Mensah & Choi 2015; Qin et al. 2017; Wang et al. 2017). Lisäksi lumen sulattamista ja muita lumen hävittämiskäytännöksiä suuremmissa mittakaavassa on tarkasteltu muun muassa Pohjoismaissa osana kaupunkien lumen hallintaa (WSP Finland Oy 2010; Skogsberg & Nordell 2001). Jään pakotettua sulattamista ei tiedettävästi ole kirjallisuudessa tarkasteltu yhtä laajassa mittakaavassa kuin lumen sulattamista. Lumi ja jää ovat kemiallisilta ominaisuuksiltaan samantyyppisiä. Ero lumen ja jään välillä perustuu niiden erilaisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin. Ero makro-ominaisuuksissa johtuu kaasua sisältävistä kaasukoloista. (Leppäranta, et al. 2017)

Jään ja lumen sulamisaikaa on tutkittu jonkin verran. Kirjallisuudessa on tutkittu jääkerroksen sulamista (Kahraman et al. 1998; Tubini & Rigon 2021) ja massan muutosta (Vanier & Tien 1970) ajan funktiona. Lisäksi Mcleod et al. (1996) ovat tutkineet pallonmuotoisen kappaleen halkaisijan muutosta ajan funktiona. Skogsberg & Lundberg (2005) tutkivat lumen pintasulamisaikaa lämpötilan, valon intensiteetin, tuulen nopeuden, absoluuttisen ilman kosteuden ja eristekerroksen paksuuden (puuhake) funktiona. Lumen luonnollista sulamisaikaa on kuvattu kirjallisuudessa (Sundin 1998). Skogberg & Nordell (2001) ovat tutkineet lisäksi lumivaraston sulamista eristyskerroksen alta. Lisäksi Moghadas et al. (2015) ovat koonneet kirjallisuuskatsauksen lumensulamismalleista ja -algoritmeista.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on löytää ratkaisu Hirvosen (2022) diplomityössä esitellmän lämpöpumppulaitoksen sivutuotteen jään muodostumisesta syntyvään haasteeseen. Tavoitteena on tutkia vesistön pintavedellä jään sulattamista ilman ulkoista lämmönlähdettä. Tutkimuksessa tarkastellaan sulattamista paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa. Näiden soveltuvuutta tarkastellaan sekä laitoksen toimintaympäristön että laitoksen jään syntymisnopeuden näkökulmista. Tutkimuksen tarkoituksena on toimia esiselvityksenä megawattikokoluokan laitoksen suunnittelulle ja rakennuttamiselle.

Tässä tutkimuksessa vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Minkälaisiin sovelluskohteisiin pintaveden faasinmuutosta hyödyntävät lämpöpumput sopivat ja mitä vaihtoehtoja on jään hävittämiselle?
2. Mitkä tekijät vaikuttavat jään sulamisnopeuteen ja miten sulamisaika voidaan laskeallisesti määrittää?
3. Minkäkokoinen vesivirtaukseen perustuvan sulatusjärjestelmän tulisi olla lämpöpumppulaitoksen (1 MW) tapauksessa?
4. Minkälainen konfiguraatio olisi jään sulatuslaitoksella sulatettaessa paikallaan pysyvässä vedessä lämpöpumppulaitoksen (1 MW) tapauksessa?
5. Minkälaisiin sovelluskohteisiin vesivirtauksella ja paikallaan olevalla vedellä sulattaminen soveltuvat?

Tutkimuksen ensimmäiseen ja toiseen tutkimuskysymykseen vastataan kirjallisuuden perusteella. Tutkimuksen kolmanteen, neljänteen ja viidenteen tutkimuskysymykseen vastataan tutkimuksessa toteutettavan numeerisen jään sulamista kuvaavan mallin avulla sekä kirjallisuuden, vesistön lämpötiladatan ja määriteltyjen lähtöarvojen pohjalta. Tutkimuksen aikana toteutettu numeerinen malli jään sulamiselle luodaan hyödyntäen kirjallisuutta sekä kokeellisen osuuden tuloksia.

Työ etenee seuraavasti. Luvussa 2 perehdytään faasimuutoslämpöä hyödyntäviin lämpöpumppulaitoksiin. Aluksi luvussa tarkastellaan lämpöpumppujen roolia lämmöntuotannossa, jonka jälkeen tarkastellaan vesistön hyödyntämistä lämpöpumpun lämmönlähteenä ja lopuksi tarkastellaan faasimuutoslämpöä hyödyntävien lämpöpumppujen toimintaperiaatetta. Faasimuutoslämpöä hyödyntävien lämpöpumppulaitoksen sovelluskohteita tarkastelemalla pyrittiin hahmottamaan, millainen kyseinen lämpöpumppulaitos on sekä millaisia rajoituksia ja mahdollisuuksia laitos ja sen toimintaympäristö asettavat jään hävittämiselle. Luvussa 3 jäsennellään jään hävittämiselle soveltuvia tapoja selvittämällä niiden mahdollisuuksia ja rajoituksia. Hävittämistapoja selvitettiin tarkastelemalla

aikaisempia tutkimuksia ja käytännön ratkaisuja jään ja lumen hävittämiseen liittyen. Näiden pohjalta luvussa päädyttiin käsittelemään sulatusaltaita, sulatuskenttiä, varastointia luonnollista sulamista varten sekä jäähdytysjärjestelmiä. Näiden osalta tarkasteltiin toimintaperiaatteita ja aikaisempia tutkimuksia tai käytännön kokemuksia. Luvussa 4 tarkastellaan jään sulamisen mallintamista. Luvussa keskitytään jään sulamisen tarkasteluun, lämmönsiirtoon konvektion vaikutuksesta sekä aikaisempiin tutkimuksiin jään sulamisajasta. Luvua 4 hyödynnettiin numeerista jään sulamisaikaa kuvaavan laskentamallin luomisessa.

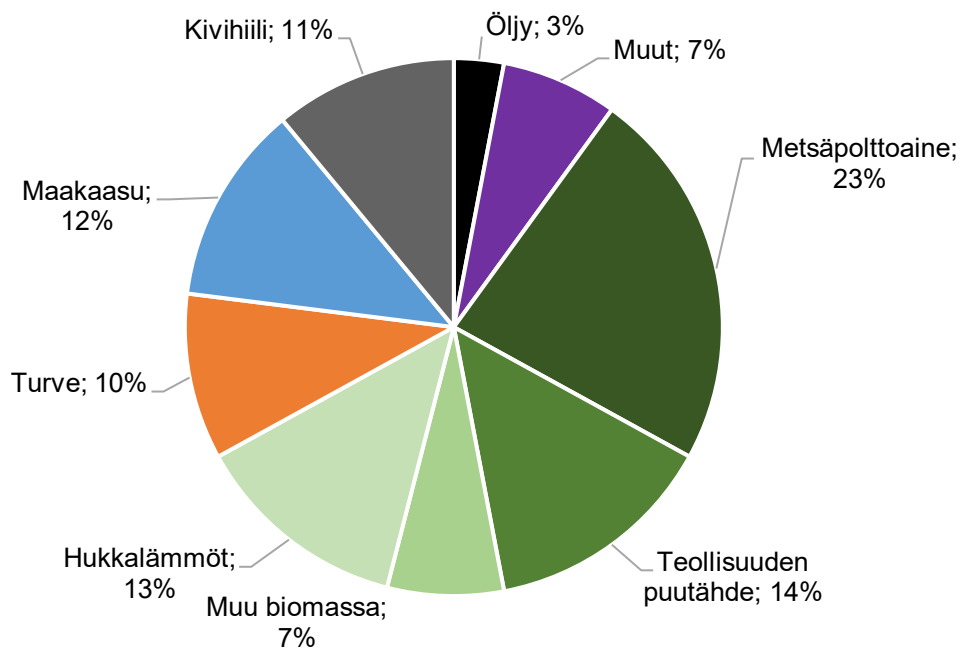
Luvussa 5 esitellään tutkimuksessa käytetyt aineistot ja menetelmät. Luvussa 5 käsitellään, mitkä ovat tutkimuksen tarkoitus ja päätavoitteet sekä miten tutkimus etenee. Lisäksi esitellään tutkimuksen kohteena oleva faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen pilotti. Luvussa käsitellään lisäksi, paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa sulattamisen sovelluskohteiden määrittämisen kuvaus, miten numeerinen laskentamalli on muodostettu, miten jään sulatuskokeet on suoritettu ja miten numeerista mallia on kehitetty sulatuskokeiden perusteella. Luvun lopuksi esitetään kuvaukset siitä, miten tutkimuksen luotettavuutta on arvioitu ja miten herkkyystarkastelut on suoritettu.

Luvussa 6 on esitetty tutkimuksen tulokset ja pohdinta. Tuloksissa on esitetty, miten jään sulatuskokeiden mittauspisteet vertautuvat tutkimuksen aikana luotuun numeeriseen malliin niin paikallaan olevan veden kuin vesivirtauksenkin tapauksessa. Lisäksi on esitetty numeerisen mallin perusteella lämpötilan, jääkappaleen koon ja jään pinnalla olevan virtauksen nopeuden vaikutus sulamisaikaan sekä konversio ajan funktiona molemmille tarkasteluille sulatusmenetelmille. Näiden perusteella on esitetty konfiguraatio paikallaan olevassa vedessä sulattamiselle sekä sulatuslaitoksen dimensiointi vesivirtauksessa sulattamisen tapauksessa. Luvun lopussa on pohdinta luvussa esitettyjen tulosten ja vesistön lämpötiladatan avulla sovelluskohteista molemmille tapauksille. Luku 7 koostuu tutkimuksen merkittävimmät johtopäätökset tutkimuksesta ja sen tuloksista.

## 2. FAASIMUUTOSLÄMPÖÄ HYÖDYNTÄVÄ LÄMPÖPUMPPULAITOS

### 2.1 Lämpöpumppujen rooli kaukolämmöntuotannossa

Suomessa kaukolämmön asema lämmöntuotannossa on pitkään ollut merkittävä. Vuonna 2021 kaukolämmön markkinaosuus oli 45 % kiinteistöjen lämmöntuotannosta. Kaukolämmöntuotanto on Suomessa perustunut aiemmin voimakkaammin fossiilisten polttoaineiden ja turpeen hyödyntämiseen lämmönlähteenä. Kuitenkin kaukolämmöntuotannon kehitys kohti päästöttömämpää lämmöntuotantoa on johtanut muun muassa biomassan ja hukkalämpöjen osuuksien kasvuun. (Smil 2016; Tilastokeskus 2020; Energiategollisuus 2022a) Kuva 1 havainnollistaa Suomen kaukolämmöntuotannon lämmönlähdejakaumaa vuodelta 2021.



**Kuva 1 Suomen kaukolämmöntuotanto 2021 perustuen lähteeseen (Energiategollisuus 2022a).**

Vuonna 2021 kaukolämmöntuotanto oli yhteensä 39,3 terawattituntia (TWh). Kaukolämmöntuotannossa merkittävimmät lämmönlähteet olivat biomassaan perustuvat lähteet, joiden osuus yhteenlaskettuna kokonaistuotannosta oli 44 %. Lisäksi hukkalämmöillä oli turpeen, kivihiilen ja maakaasun lisäksi merkittävä osuus. Hukkalämmöllä tarkoitetaan tässä muuten hyödyntämättä jäävää lämpöenergiaa, kuten jätevedestä talteen otettua lämpöenergiaa. Hukkalämpö sisältää tässä myös lämpöpumpuilla tuotetun uusiutuvan

lämmön. Hukkalämmöillä tuotettiin noin 5 TWh lämpöenergiaa vastaten 13 % kokonais-  
tuotannosta. Hukkalämmöillä tuotetun lämmön määrä on kasvanut voimakkaasti. Viimei-  
sen 10 vuoden aikana tuotanto on yli kolminkertaistunut. (Energiateollisuus 2022a)

Yleisiksi kaukolämmöntuotannossa käytetyiksi lämpöpumppujen lämmönlähteiksi David  
et al. (2017) tunnistivat jäteveden, vesistöt kuten järvet, meret ja joet, teollisuuden huk-  
kalämmöt, geoenergian, savukaasun, kaukojäähdytyksen paluuveden ja varastoidun au-  
rinkoenergian. Edellä mainittujen lisäksi voi yleiseksi lämmönlähteeksi lisätä datakes-  
kusten tuottaman hukkalämmön (Wahlroos et al. 2018). Yleisimmin hyödynnetyiksi  
lämmönlähteiksi David et al. (2017) tunnsti puhdistetun jäteveden ja vesistöt niiden  
pysyvyyden ja stabiiliuden vuoksi. Puhdistetun jäteveden osuus oli tutkitusta  
lämpöpumppukapasiteetista noin 56 % ja vesistöjen osuus noin 24 %.

***Taulukko 1 Kaukolämmöntuotannossa yleisesti käytetyt lämmönlähteet ja nii-  
den lämpötilojen vaihteluvälit koottu lähteistä (David et al. 2017; Wahlroos et al.  
2018).***

Lämmönlähde	Lämmönlähteen lämpötilan vaihteluväli [°C]
Jätevesi	10–20
Vesistöt (järvet, joet ja meret)	2–15
Teollisuuden hukkalämpö	12–46
Geoenergia	9–55
Savukaasut	34–60
Kaukojäähdytyksen paluuvesi	0–9
Varastoitu aurinkoenergia	10–35
Datakeskukset	25–60

Suomessa kaukolämmöntuotantoon on lämpöpumppulaitoksia viime vuosina otettu käyt-  
töön. Lisäksi lämpöpumppuinvestoinnin kannattavuutta on arvioitu usealla paikkakun-  
nalla. Tällä hetkellä suurimmat kaukolämpöjärjestelmässä olevat lämpöpumppulaitokset  
hyödyntävät lämmönlähteenä puhdistettua jätevettä. (Kontu et al. 2019) Sen lisäksi Suo-  
messä kaukolämmöntuotannossa on lämmönlähteenä hyödynnetty muun muassa data-  
keskusten tuottamaa hukkalämpöä, savukaasujen hukkalämpöä ja kaukojäähdytyksen  
paluuvettä (Passi et al. 2016; Kontu et al. 2019). Kiinteistökohtaisissa lämpöpumpuissa  
hyödynnetään lämmönlähteenä yleisimmin ilmaa ja maalämpöä (Sulpu ry 2021).

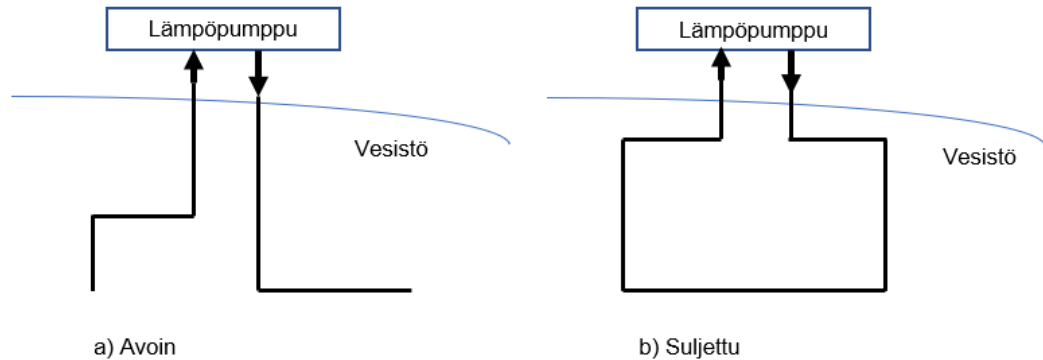
Suomen kaukolämmön lämpöpumppujen tuotanto on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna Ruotsiin, jossa lämpöpumppukapasiteetti on noin 1220 MW. Lämpöpumpuilla tuotetaan noin 4 TWh lämpöä, mikä on noin 7,4 % Ruotsin kaukolämmön kokonaistuotannosta (Averfalk et al. 2017). Potentiaaliksi lämpöpumppujen tuotannoksi Suomessa on arvoitu kaukolämmön kokonaismyynnistä 10–25 % (Kontu et al. 2019). The Heat Roadmap Europe (HRE) ennustaa kaukolämmön vastaavan 50 % lämmön kokonaiskäytöstä, josta 25–30 % tuotetaan teollisen kokoluokan lämpöpumpuilla (yli 1 MW), vuoteen 2050 mennessä (David et al. 2017),

## 2.2 Vesistön hyödyntäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä

Vesistöä lämmönlähteenä hyödyntävät lämpöpumput hyödyntävät vesistöön kuten jokeen, järveen, pohjaveteen tai meriveteen keräytynyttä lämpöenergiaa (Wang et al. 2012). Vesistöjen sisältämä lämpö luokitellaan matalan lämpötilan lämmönlähteeksi, mikä tarkoittaa selvästi pienempää COP-kerrointa verrattuna korkeamman lämpötilan lämmönlähteeseen. COP-kertoimella (*engl. Coefficient of Performance*) kuvataan tuotetun lämpöenergian suhdetta kulutettuun energiaan. Ilmalämpöpumppeihin verrattuna vesistöjen COP-kerroin on kuitenkin tyypillisesti suurempi, sillä vesistöjen lämpötila on yleensä talviaikaan korkeampi kuin ulkoilman. (Gaur et al. 2021). Lisäksi vesistöjen saatavuus kaupunkien läheisyydessä on hyvä, ja vettä vesistöissä on hyödynnettäväksi käytännössä rajattomasti. Vesistöt ovat myös saatavuudeltaan vakaita ja ilmaisia, mikä on etu lämmönlähteelle lämmöntuotannossa. (David et al. 2017) Vesistöjä lämmönlähteinä hyödynnettäessä on kuitenkin huomioitava, että vesistö kestää siitä otettavan lämpökuorman. Edellytyksenä on lisäksi ekologisen tilan muuttumattomuus lämpötilan muuttuessa. Lämpötilan vaihtelu  $-0,5 - +5$  °C välillä ei ole havaittu merkittäviä vaikutuksia ekologiseen tilaan. (Fink et al. 2014)

Vesistölämpöpumput, kuten lämpöpumput yleensäkin, voidaan jaotella avoimiin ja suljettuihin systeemeihin (Kavanaugh & Rafferty 2014). Avoimissa systeemeissä vesistöä pumpataan vettä erilliselle lämmönvaihtimelle, jonka jälkeen vesi palautetaan vesistöön. Lämmönvaihtimelta kerätty lämpöenergia siirretään erillisellä väliaineella, joka kiertää lämmönvaihtimen ja höyrystimen välillä. (Liu et al. 2019) Suljettu systeemi perustuu siihen, että aine ei liiku systeemin rajojen ulkopuolelle. Lämmönkeruu suljetun systeemin vesistölämpöpumpuissa tapahtuu lämmönkeruuputkiston avulla, jossa lämmönkeruu liuos kiertää keräten lämpöä tässä tapauksessa vesistöä. (Kavanaugh & Rafferty 2014) Kuva 2 havainnollistaa avointa ja suljettua lämpöpumppusysteemiä vedessä.





**Kuva 2 Vesistöä lämmönlähteenä hyödyntävä avoimen ja suljetun systeemin lämpöpumput**

Avoimien lämpöpumppusysteemien hyötysuhteet on havaittu korkeimmiksi kuin suljettujen, mutta toisaalta suljettujen systeemien investointikustannukset ovat useimmiten alhaisemmat (Liu et al. 2019). Suljettujen systeemien etuna verrattuna avoimiin on myös se, että putkistot eivät kärsi korroosiovaurioista eivätkä mahdollisista vesistöistä putkistoon tulevista eliöistä, jotka saattavat aiheuttaa tukkeutumista (Wu, et al. 2020). Lisäksi suljetuissa systeemeissä putkiston likaantuminen on vähäisempää kuin avoimissa sekä vaadittava pumppausteho alhaisempi matalamman nostokorkeuden vuoksi (Kavanaugh & Rafferty, 2014).

Vesistölämpöpumpuista suurimpia ovat merivesilämpöpumput. Pohjoismaissa suurimmat merivesilämpöpumput sijaitsevat Ruotsissa, Norjassa ja Islannissa (David et al. 2017; Eskafi et al. 2019; Su et al. 2020). Suurin merivettä hyödyntävä lämpöpumppulaitos on kapasiteetiltaan noin 250 MW ja sijaitsee Tukholmassa (David et al. 2017). Norjan ja Islannin suurimmat ovat kapasiteetiltaan noin 10 MW (Eskafi et al. 2019).

Suomessa ei tiedettävästi ole teollisen mittakaavan vesistöä hyödyntäviä lämpöpumppulaitoksia. On arvioitu, että kiinteistökokoluokassa asennetuista maalämpöpumppujen keruupiireistä asennetaan vesistöihin vuosittain 5 % (Motiva). Yhtenä esimerkkinä suurimmista voidaan pitää järvilämpöä hyödyntävää lämpöpumppujärjestelmää (900 kW), jolla lämmitetään Kisakallion urheiluopiston tiloja (SYKE 2019). Lisäksi muun muassa eri asuatomessualueilla kuten Lappeenrannan Rauhassa ja Vaasan Suvilahdessa on yhdistetty vesistön lämpöä hyödyntävä lämpöpumppua osaksi hybridilämmitysjärjestelmää (Takala 2014).

Suomessa haasteena vesistöjen laajemmassa hyödyntämisessä ovat vesistöjen matalat lämpötilat talviaikaan, kun lämmönkysyntä on korkeimmillaan. Talviaikaan lämpötila on Suomen vesistöissä tyypillisesti alle 4 °C. (Aittomäki 1983) Suomessa on tutkittu vaihto-

ehtoa hyödyntää merivettä kokoluokaltaan kaukolämmöntuotantoon soveltuvan lämpöpumppulaitoksen lämmönlähteenä kuten Norjassa ja Ruotsissa muun muassa Helenin toimesta (Rauhamäki 2019). Kuitenkin Suomessa haasteena ovat matalat rannikot ja kylmä ilmasto, jotka heikentävät merivesilämpöpumppulaitoksen kannattavuutta kaukolämmöntuotannossa (Passi et al. 2016). Riittävän lämpimän meriveden saaminen talvella vaatisi noin 20 kilometriä pitkän siirtoputkiston Helsingistä paikkaan, jossa olisi riittävästi syvänteitä ja lämpimämpää vettä. Kun verrataan lämpöpumppulaitoksen ominaisinvestointia (€/MW) esimerkiksi maanalaiseen Esplanadin lämpöpumppulaitokseen, joka tuottaa kaukojäähdytyksen yhteydessä samassa prosessissa kaukolämpöä hyödyntäen näin kiinteistöjen hukkalämpöjä, ominaisinvestointi on moninkertainen. (Rauhamäki 2019). Tällä hetkellä Helenin suunnitteilla oleva meriveden talteenottoprojekti on ympäristövaikutuksen arvioinnin selostusvaiheessa (Helen 2022).

Eskafi et al. (2019) tutkivat merilämpöpumppujen kannattavuutta alhaisilla lämpötiloilla. He havaitsivat, että lämpötilan ollessa 1 °C tai alle lämpöpumpun kannattavuus on tarkasteltava huolellisesti. Hiawen et al. (2015) tutkivat merivesilämpöpumpun kylmimmän ajanjakson tehokuutta COP-kertoimella kaukolämmöntuotannossa ja havaitsivat, että kylmimmän ajanjakson COP jäi alhaiseksi ollen 2,43.

Lämpöpumpun höyrystimessä vedestä kylmäaineeseen siirtyvää lämpötehoa  $\dot{Q}$  (W) pintavettä lämmönlähteenä hyödynnettäessä voidaan mallintaa seuraavalla kaavalla (mukailien Bergman et al. 2017):

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{out} - T_{in}), \quad (1)$$

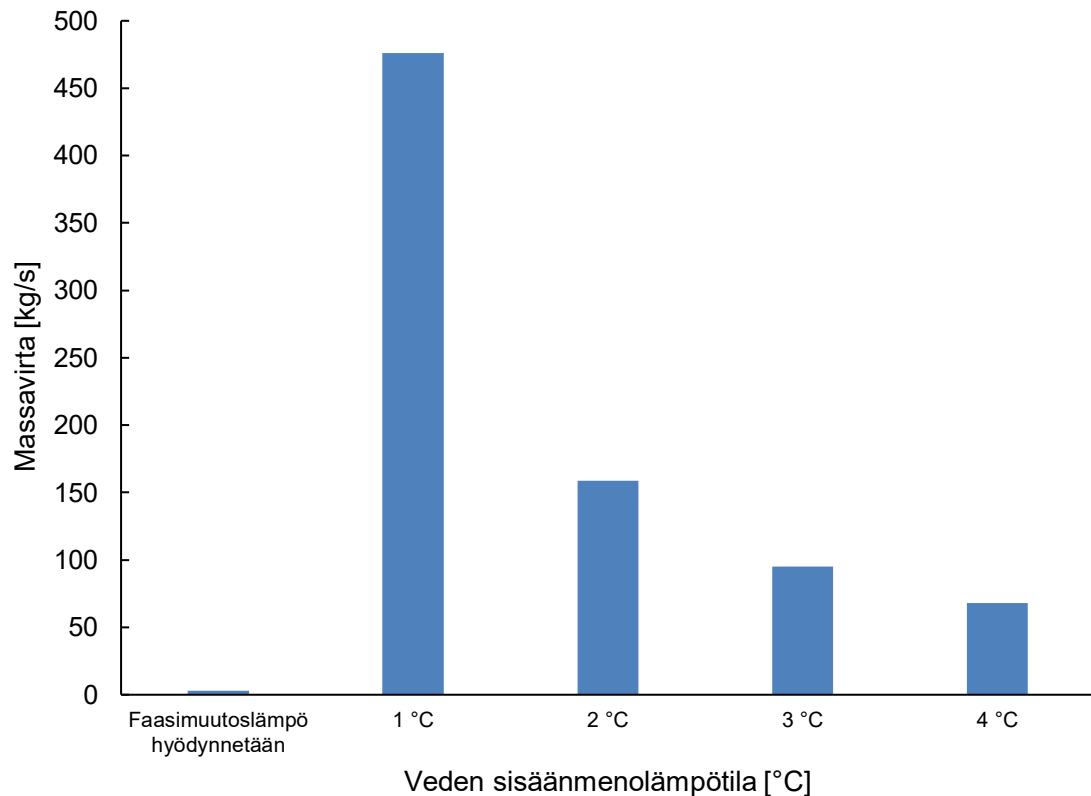
jossa  $\dot{m}$  on veden massavirta (kg/s),  $c_p$  ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (J/(kgK)) ja  $T$  lämpötila (K).

Kaavan 1 perusteella voidaan havaita, että höyrystimessä syntyvän lämpötilan eron suuruudella on suuri vaikutus kylmäaineeseen siirtyvän lämpötilaeron suuruuteen. Tämä johtaa siihen, että haluttaessa saavuttaa sama lämpöteho sisäänmenolämpötilan laskeessa, kasvaa tarvittava massavirta.

Kuten edellä todettiin, Suomessa vesistön pintaveden lämpötila on talviaikaan alhainen, ja lämpimämpää vesistön vettä jouduttaisiin pumppaamaan huomattavan matkan päästä mereltä johtuen Suomen matalista rannikoista ja ilmasto-olosuhteista. Tämän vuoksi pintaveden jäädyttäminen voisi soveltua lämpöpumpun lämmönlähteeksi talviaikaan. Vesistön pintaveden jäädyttämistä lämpöpumpun lämmönlähteenä ovat tutkineet muun muassa Hirvonen (2022) diplomityössään ja Røsvik et al. (1993) osana norjalaista LAVA-ohjelmaa. Pintavettä jäädyttävän lämpöpumpun toimintaperiaate perustuu faasilämmön

vapauttamiseen jäädytettäessä vettä. Kyseisen lämpöpumpun toimintaperiaatetta on kuvattu seuraavassa alaluvussa 2.3.

Alhaisilla veden sisäänmenolämpötiloilla veden massavirran tarve kasvaa todella suureksi, mikä tekee pumppaamisen vaikeaksi. Sen sijaan pintavettä jäädytettäessä eli faasimuutoslämpö talteen otettaessa massavirran tarve pysyy huomattavan pienenä (Kuva 3).



**Kuva 3 Tarvittava massavirta vesistöistä 1 MW:n lämpöpumppulaitoksella hyödyntäen kaavaa 1 ja sulamislämmölle arvoa 334 kJ/kg (Kahraman et al. 1998) veden lähtiessä höyrystimeltä lämpötilassa 0,5°C.**

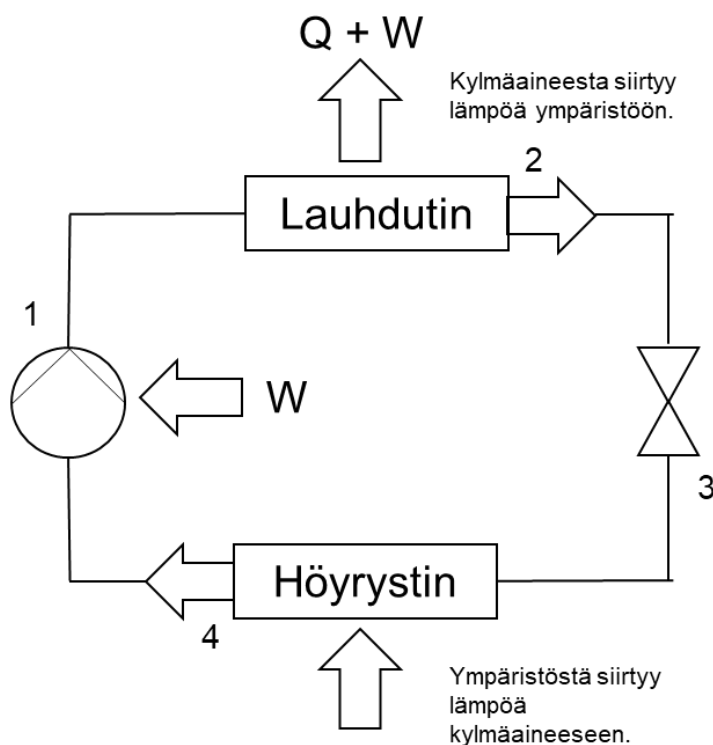
Hirvonen (2022) havaitsi, että faasimuutoslämmön hyödyntäminen alaluvussa 2.3 esitetävän putkijääkoneen tekniikalla voisi yhdistettynä lämpötilaa kaukolämpöverkkoon nostamaan lämpöpumppuun olla kannattava ja muihin lämmöntuotantomuotoihin nähden kilpailukykyinen lämmöntuotantomuoto. Haasteeksi kuitenkin havaittiin syntyvä jään määrä, joka on suoraan verrannollinen laitoksen kokoon. 1 MW:n kokoisen lämmöntuotantolaitoksen tapauksessa syntyvä jää määrä olisi noin 5–7 t/h.

Røsvik et al. (1993) havaitsivat, että faasimuutosta hyödyntävän lämpöpumpun COP ja sillä tavoiteltu lämmöntuotanto jäivät alhaisemmiksi kuin odotettiin. Pohdittaessa käytän-

nön kokeen kautta parannuksia he ehdottivat niiden liittyvän käytettävään tekniikkaan, kuten vesivirran pysäytykseen höyrystimellä sillä aikaa, kun jäätä irrotetaan, sekä jääkerroksen paksuuden optimointiin.

### 2.3 Faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen toimintaperiaate

Jäätä valmistava laite toimii kylmäkoneen tavoin. Kylmäkoneen toiminta perustuu lämmönsiirtoon matalammasta lämpötilasta korkeampaan lämpötilaan prosessiin tehdyllä työllä. Kylmäkoneen kiertoprosessin toiminta perustuu kiertoaineena toimivan kylmäaineen höyrystämiseen ja lauhduttamiseen eri painetasoilla. Kylmäkoneen kiertoprosessissa on neljä pääkomponenttia, jotka ovat lauhdutin, paisuntaventtiili, höyrystin ja kompressori. Systeemiin tehty työ on kompressorille vietyä sähköenergiaa, joka muuttuu kompressorilla lämpöenergiaksi luovuttaen osan lämmöstä kylmäaineeseen ja osan ympäröivään ilmaan tai jäähdyttävään väliaineeseen. (Kaappola et al. 2022) Kylmäkoneen kiertoprosessia on havainnollistettu alla (Kuva 4).



**Kuva 4** Yksinkertaistettu kylmäkoneen toimintaperiaate perustuen lähteeseen (Kaappola et al. 2022).

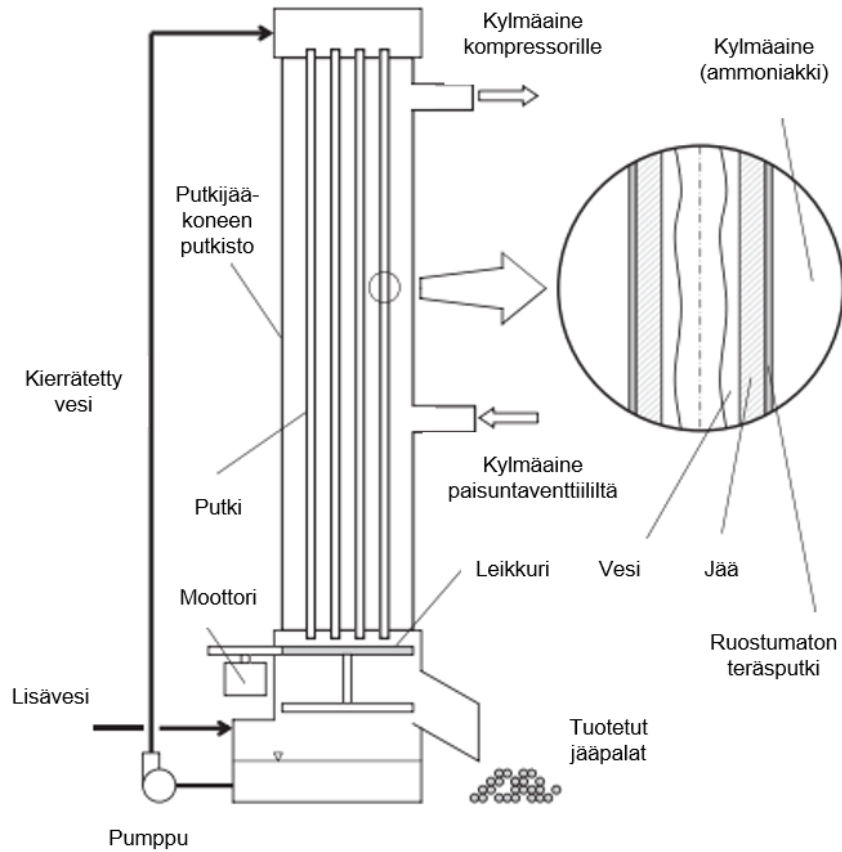
Kylmäkoneen kiertoprosessissa kompressorille höyrystimeltä tuleva höyrystynyt kylmäaine puristetaan korkeampaan paineeseen, jolloin kylmäaine tulistuu ja sen lämpötila

nousee merkittävästi. Korkeapaineinen ja -lämpötilainen, tulistunut höyry siirtyy lauhduttimelle, jossa se tiivistyy korkeapaineiseksi nesteeksi luovuttaen lämpöä ympäristöön. (Kaappola et al. 2022)

Faasimuutoslämpöä hyödyntävällä lämpöpumppulaitoksella lämmöntuotanto perustuu kylmäkoneen kiertoprosessissa lauhduttimelta talteen otettavaan lämpöön. Vettä jäädettävän lämpöpumpun lauhduttimelta vapautuva lämpö on lämpötilaltaan noin 37 °C. Kaukolämpöjärjestelmässä olevan laitoksen vettä jäädettävältä lämpöpumpun lauhduttimelta on siirrettävä välipiirin kautta vapautuva lämpö toisen lämpöpumpun höyrystimelle. Toisen lämpöpumpun tarkoituksena on nostaa tuotetun lämmön lämpötila kaukolämpöverkkoon soveltuvaksi. (Hirvonen 2022)

Lauhduuttimelta tuleva nestemäinen kylmäaine siirtyy paisuntaventtiilille, jossa sen paine ja lämpötila laskevat sekä osa nesteestä höyrystyy. Höyrystimelle siirtyy osittain höyrystynyt matalapaineinen ja -lämpötilainen neste, joka höyrystimessä sitoo lämpöä ympäristöön ja höyrystyy siirtyen takaisin kompressorille. (Kaappola et al. 2022) Lämmöntuotannossa sivutuote jää syntyy höyrystimellä kylmäaineen ja jäädettävän veden välisessä lämmönsiirrossa. Tässä työssä tarkastellaan putkijääkoneen toimintaperiaatetta, joka esitetään seuraavaksi.

Kylmäaineen ja jäädettävän veden välillä lämpö siirretään useiden ruostumattomien teräsputkien välityksellä. Nestemäinen vesi pumpataan putkijääkoneen yläosaan, josta se putoaa koneen alaosiin gravitaation vaikutuksesta. Tämä vesi on kiertävä eli se pumpataan pohjalta uudelleen putkijääkoneen yläosaan. Vettä lisätään kompensoimaan jäädettynyttä vettä. Jäätä muodostuu putken sisäisimmälle pinnalle, kunnes jääkerrosten välisen alueen halkaisija on noin 1 cm. Tämän jälkeen aloitetaan sulatusprosessi kuuman kaasun avulla, jolloin putkien pinnalle muodostunut jää putoaa putkijääkoneen alaosaan leikkurille, jolla jääpalat voidaan leikata sopivan pituisiksi. Jään muodostumisprosessi kestää noin 28 minuuttia, josta sulatusprosessin kesto on noin 5–10 minuuttia. (Tangthieng 2011) Putkijääkoneen komponentteja ja toimintaperiaatetta on havainnollistettu alla (Kuva 5).



**Kuva 5 Putkijääkoneen komponentit ja toimintaperiaate muokattuna lähteestä (Tangthieng 2011).**

Useimmiten syntynyt jää voidaan poistaa höyrystimeltä siten, että höyrystimen pintaa lämmitetään kuumalla kiertoaineella, kuten edellä esitettiin. Kuuma kiertoaine saadaan suoraan kylmäkoneen kompressorilta ohittamalla lauhtutin ja kuristusventtiili. Jää voidaan myös poistaa höyrystimeltä mekaanisesti tai ilman painetta muuttamalla. (ASHRAE 2018) Jää on myös mahdollista sulattaa nopeasti sähkövastuksella (Kaappola et al. 2022).

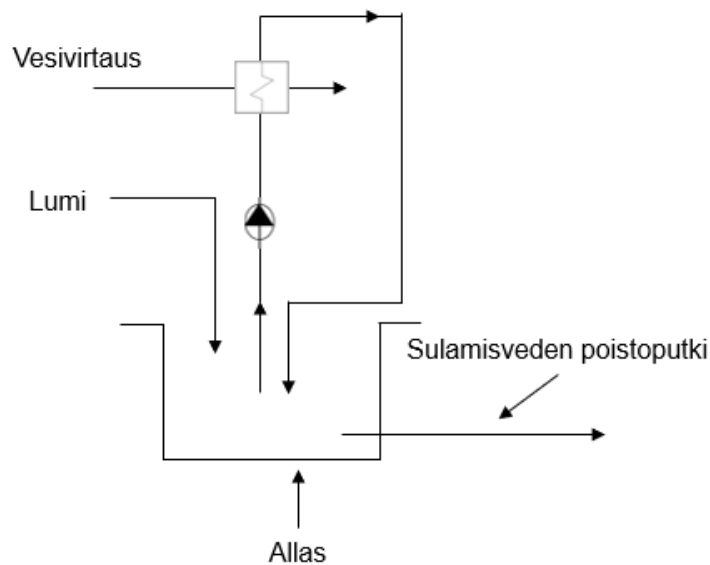
## 3. JÄÄN SULATTAMISTEKNIIKOITA

### 3.1 Sulatusaltaat

Sulatusaltaita on käytetty vaihtoehtoisina menetelminä lumen ja jään sulattamiseen, kun lumen tai jään sulattamisessa hyödynnetään vettä. Lisäksi sulatusajoneuvoja ja -yksiöitä voidaan tarkastella sulatusaltaina. Sulattaminen perustuu useimmiten lumen tai jään kaatamiseen altaan pohjalla olevan veden joukkoon, jolloin vesi siirtää lämpöä sulatettavaan aineeseen aiheuttaen sulamisen. Eroja on kuitenkin eri altaiden toimintaperiaatteissa liittyen altaan lämmönlähteeseen ja sulattamiseen käytetyn veden lähteeseen. Lämmönlähteenä on muun muassa käytetty polttoöljyä, maakaasua ja aurinkolämpöä (WSP Finland Oy 2010), maalämpöä (Takeda et al. 2006), veden ja höyryn lämpösäilytystä (Serebrenniko & Plokhov 2019) sekä puhdistettua jätevettä (Maeda et al. 1994). Lisäksi Nurmi (2013) on tutkinut kaukojäähdytyksen ja kaukolämmön paluuvien hyödyntämistä lumensulatusaltaan lämmönlähteenä.

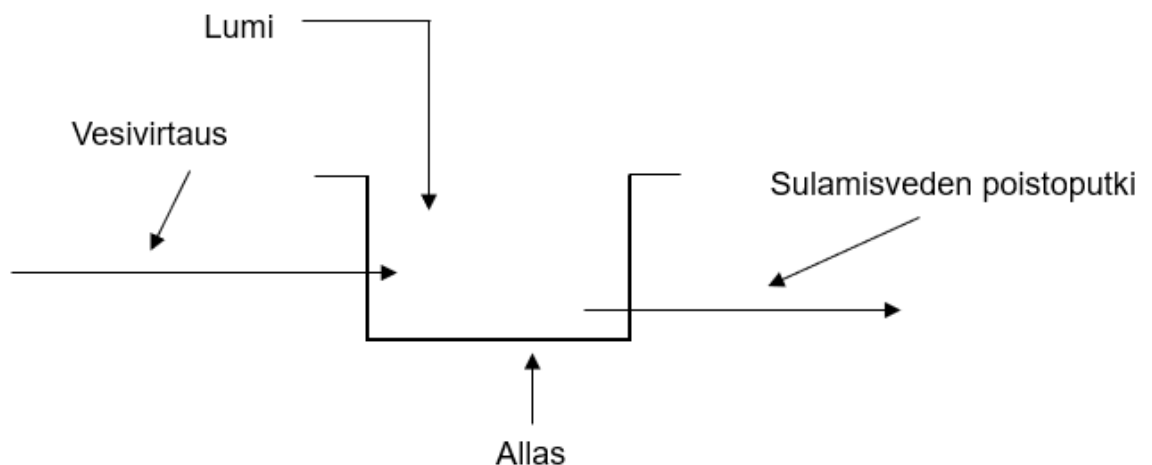
Altaiden sulamisvesi voidaan poistaa sulatuksen jälkeen esimerkiksi vesistöön, muualle ympäristöön tai viemäriverkkoon riippuen altaasta tai vaihtoehtoisesti se voidaan hyödyntää käyttämällä uudelleen joko jättämällä se osittain altaan pohjalle tai suihkuttamalla se sulatettavan aineen pinnalle. Suihkutettu sulamisvesi voidaan välissä lämmitellä, mikä nopeuttaa sulattamista.

Sulatusaltaiden vesi voi olla myös paikallaan olevaa vettä, jota lämmitetään ulkoisella lämmönlähteellä. Sulatusaltaan vettä voidaan lämmitellä jatkuvasti muun muassa kaasupolttimella, jonka liekki voidaan ohjata altaan veden alla sijaitseviin putkiin. Liekin sammuttua voidaan syntyneillä pakokaasuilla lämmitellä vettä niiden edetessä putkissa. Tässä tapauksessa myös lämmin vesi altaassa nousee ylöspäin kasatun lumen päälle edistämään sulamista. Lämmönlähteenä on käytetty muun muassa polttoöljyä ja maakaasua. (WSP Finland Oy 2010) Vastaavanlaisesti sulatusaltaan vettä on voitu lämmitellä siirtämällä lämpöä altaaseen esimerkiksi voimalaitoksen hukkalämmöistä (Nurmi 2013). Tämän kaltaisia lumen sulatusallasta on havainnollistettu alla (Kuva 6).



**Kuva 6 Lumen sulatusallas siirtämällä lämpöä veteen perustuen lähteeseen (Nurmi 2013).**

Vaihtoehtoisesti voidaan sulatusaltaassa hyödyntää lämpimän veden virtausta. Tämän kaltainen allas on muun muassa Japanissa Sapporossa Atsubetsun jätevedenpuhdistamolla, jossa puhdistettua jätevettä syötettiin altaaseen. Sulamisvesi altaalta johdetaan viereiseen jokeen. (Nurmi 2013) Tämän kaltaista sulatusallasta on havainnollistettu alla (Kuva 7).



**Kuva 7 Lumen sulatusallas jatkuvalla vesivirtauksella perustuen lähteeseen (Nurmi 2013).**



Maeda et al. (1994) tarkastelivat kolmea eri tapaa sulattaa puhdistetulla jätevedellä lunta sulatusaltaassa. He tarkastelivat sitä, mikä vaikutus on sulamisaikaan sillä, missä vaiheissa lämmin vesi ja lumi kaadetaan altaaseen suhteessa toisiinsa. Tutkimuksessa tarkasteltiin kolmea eri vaihtoehtoista tapaa:

- 1) lumen kaataminen lämpimään veteen
- 2) lumen kaataminen kylmempään edellisen lumen sulamisveteen ja lämpimän veden kaatamiseen jälkikäteen lumen ja edellisen lumen sulamisveden joukkoon
- 3) lumen kaataminen lämpimään veteen ja vielä lämpimän veden kaataminen jälkikäteen lumen ja veden joukkoon.

Nopein sulamisnopeus todettiin saavutettavan tavalla, jossa lumi kaadettiin kylmään veteen ja jälkikäteen lämmin vesi kaadettiin joukkoon. Pisin sulamisaika havaittiin olevan tavalla, jossa lumi kaadettiin lämpimään veteen. Lämpimän veden kaataminen lumen päälle havaittiin siten nopeuttavan lumen sulamista.

Vesistökin voi toimia allasratkaisun tavoin. Vesistön koosta riippuen se voi olla vastaanottokapasiteetiltaan lähes ääretön. Lumen kaatamista ei ole kielletty Ympäristönsuojelulain 18§:n nojalla. Muun muassa Helsingin kaupungin lumenhallinnassa lumen kaatamista mereen onkin hyödynnetty yhtenä ratkaisuna (WSP Finland Oy 2010). Pykälän 18 nojalla voisi olettaa, ettei jään poistaminen vesistöön ja sulattaminen siellä ole kiellettyä etenkään, kun pintavedestä muodostettu jää ei lumen tavoin sisällä esimerkiksi roskia tai haitta-aineita.

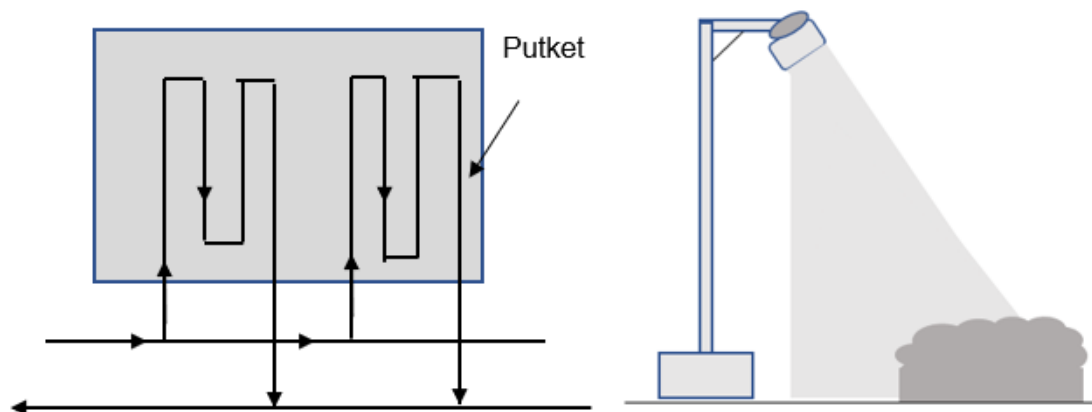
Vesistöä sulatuksen lämmönlähteenä hyödyntää Norjassa Oslossa sijaitseva lumensulatuslautta, jossa lunta sulatetaan merivedellä. Lautalla hyödynnetään murskaimia, jotta pakkautuneen lumen ja jään pinta-alan ja tilavuuden suhde saadaan mahdollisimman suureksi. Merivettä sekoitetaan jään ja lumen joukkoon voimakkaasti sekoittaen, jotta sulaminen tehostuu ja kiintoaines vajoaa sulatuskanavan pohjalle. Lisäksi laitoksella on käytetty muitakin menetelmien lumen sisältämien epäpuhtauksien poistoon, jotta ne eivät päädy vesistöön. (Seehusen 2011) Myös Suomessa vesistöä lämmönlähteenä on kokeillut muun muassa Helsingin kaupungin rakentamispalveluliikelaitos Stara yhdessä suomalaisen yhtiön Clewat Oy:n kanssa. He ovat käyttäneet lumensulatuslaitetta, joka sulattaa lunta sähkökäyttöisesti hyödyntäen virtaavan veden voimaa ja meriveden lämpötilaa. Sulatettu lumi poistetaan vesistöön tai viemäriverkostoon. Laitteella voidaan poistaa sulatuksen aikana lumesta haitallisia aineita, kuten roskia. Tällöin haitalliset aineet eivät päädy vesistöön tai viemäriverkostoon. Laitteella on onnistuttu sulattamaan kuorma-auton kuormallinen lunta 10 kWh:lla sähköä. (Clewat Oy; Stara 2021)

### 3.2 Sulatuskentät

Mensah & Choi (2015) tutkivat sulatustekniikoita, joita on hyödynnetty muun muassa kaupungeissa katujen lumensulatuksessa. Katujen sulatuksessa käytetyt tekniikat ovat jaettavissa nestekiertoisiin, sähköisiin ja infrapunasäteilyä hyödyntäviin. Nestekiertoiset ovat selvästi yleisimpiä, koska niissä voidaan hyödyntää useampia eri lämmönlähteitä. Sulatusjärjestelmät koostuvat tyypillisesti lämmönlähteestä, lämmönsiirtolaitteistosta, sensoreista, jotka mittaavat sääolosuhteita sekä järjestelmän ohjauksesta.

Nestekiertoisten sulatusjärjestelmien lämmönsiirto perustuu tyypillisesti maanpinnan alle asennettuun putkistoon, jossa lämmönsiirtoaine kiertää luovuttaen lämpöä maanpinnan yläpuolelle. Nestekiertoisten lämmönlähteenä voidaan käyttää sähköä, aurinkolämpöä, maaperään varastoitunutta lämpöä tai teollisuuden prosessien hukkalämpöä. (Mensah & Choi 2015; Zhao et al. 2020) Lisäksi sulatusaluiden tapauksessa käytettyjä lämmönlähteitä kuten jätevettä ja kaukolämmön paluuvettä voitaisiin hyödyntää lämmönlähteenä myös nestekiertoisten sulatusjärjestelmien tapauksessa.

Infrapunasäteilyihin perustuvat lämmitysjärjestelmät koostuvat energianlähteestä, infrapunalämmittimistä tai -lamputa, antureista ja ohjausjärjestelmästä. Infrapunalämmittimet ja -lamput asennetaan tyypillisesti sulatettavan aineen yläpuolelle. Infrapunasäteilyn lämmitysvaikutus perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn, joka syntyy lämmönlähteeseen molekyylien nopean vibraation- ja rotaatioliikkeen seurauksena. (Mensah & Choi 2015)



**Kuva 8 Kenttämaisesti sulattamisessa käytetyt tekniikat a) nestekiertoinen b) infrapunasäteilyyn perustuva perustuen lähteeseen (Mensah & Choi 2015).**

Sähköä hyödyntävät järjestelmät perustuvat maanpinnan alle asennettuihin lämmityskaapeleihin tai lämmitysmattoihin, jotka koostuvat ohuemmista lämmityskaapeleista. Lämmityskaapelit koostuvat useista osista, jotka ovat lämmityskierre, eristekerros, me-

tallinen suojakerros ja veden pitävä ja korroosionestokerros. Lämmityskaapeleilla muunnetaan siihen syötetty sähköenergia lämpöenergiaksi. Lämmityskaapeleiden etuja ovat muun muassa niiden tehokkuus muuttaa sähköenergia lämpöenergiaksi, pitkä käyttöikä sekä korkea suorituskyky. (Mensah & Choi 2015; Lai et al. 2015)

### **3.3 Varastointi luonnollista sulamista varten**

Luonnollinen sulaminen koostuu pintasulamisen sekä sateen ja maapinnan aiheuttamasta sulamisesta (Skogsberg & Lundberg, 2005). Sateen ja maaperän aiheuttaman sulamisen osuus on vain noin 20 % luonnollisesta sulamisesta (Skogsberg & Nordell, 2001), joten pintasulamisen osuus on siis selvästi merkittävin. Pintasulamiseen vaikuttavaa tuulen nopeus, säteilyn intensiteetti, ilman lämpötila ja ilman kosteus (Skogsberg & Lundberg, 2005). Suomessa luonnollinen sulaminen on talvella vähäistä, joten varastointi luonnollista sulamista varten talvella vie paljon tilaa.

Maan päälle lumen tai jään varastointi voidaan tehdä kasaamalla se kasaksi lumenvastaanottoaikkojen tapaan tai levittämällä se laajalle pinta-alalle tasaisesti ohuempana kerroksena sulatuskenttämäisesti. Lumenkaatopaikat ovat olleet tyypillisin ratkaisu kaupunkien lumen hallinnassa. Tiiviissä kaupunkiympäristössä niille vaadittavaa tilaa on haastavaa löytää läheltä, kun kaupunkien keskuksien läheisyydessä olevia lumenvastaanottoaikkoja halutaan nykyään mieluummin kaavoittaa asuinrakennuksille. Tämä johtaa siihen, että kuljetusmatkat lumenvastaanottoaikkoille ovat pitkiä. (WSP Finland Oy 2010) Sulatuskenttiä voidaan lämmittää tarpeen mukaisesti tai jatkuvasti erilaisilla sulatusjärjestelmillä, joita on esitelty aikaisemmin alaluvussa 3.1. Sulatuskentät voivat myös perustua ainoastaan luonnollisen sulamisen hyödyntämiseen, jota laajalle pinta-alalle levittäminen ohuempana kerroksena edistää lämmönsiirtopinta-alan kasvaessa. Maan päälle varastoinnin lisäksi voidaan varastoida osittain maan pinnan alle sekä kokonaan maan pinnan alle (Kumar et al. 2016).

### **3.4 Jäähdytysjärjestelmät**

Jäähdytyksen kysyntä on kasvussa erityisesti kiinteistöjen tapauksessa (Skogsberg & Lundberg 2005). Uusia ratkaisuja jäähdytykseen on tutkittu, jotta voidaan vastata kansallisiin ja kansainvälisiin tavoitteisiin (Skogsberg & Nordell 2001).

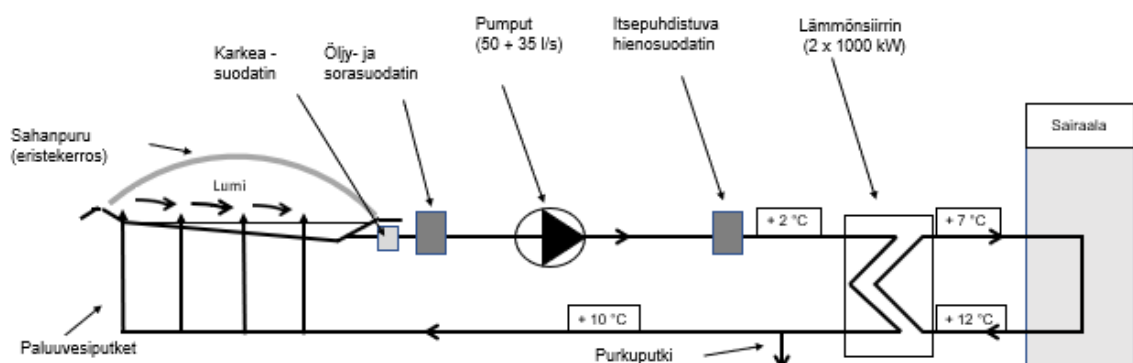
Jää soveltuu jäähdytyksessä käytettäväksi sen sopivan sulamislämpötilan, korkean ominaislämpökapasiteetin ja sulamislämmön vuoksi (Skogsberg & Nordell, 2001). Ennen nykyisten jäähdytystekniikoiden kehitystä jäätä onkin hyödynnetty tyypillisesti erilaisiin

ruoan varastointiin liittyviin jäähdytystarpeisiin (Skogsberg 2005). Lumen ja jään käyttämistä kiinteistöjen jäähdyttämisessä on tutkittu muun muassa Japanissa, Kiinassa, Pohjois-Amerikassa ja Pohjoismaissa (Skogsberg 2005; Moe 2018; Kumar et al. 2016).

Jään ja lumen hyödyntämisellä jäähdytyksessä voidaan vähentää energian kulutusta esimerkiksi, jos sillä voidaan korvata kompressori- tai absorptiojäähdytystä. Lisäksi tässä tapauksessa on mahdollista vähentää kasvihuonepäästöjä. (Kumar et al. 2016) Lämpö- ja vuotohäviöiden välttämisen vuoksi varastot tulisivat olla vesi- ja lämpöeristettyjä (Skogsberg 2005).

Kumar et al. (2016) havaitsivat tutkimuksessaan, että lumen ja jään hyödyntämiseen perustuvien järjestelmien COP- eli tehokertoimet, jotka kuvaavat tuotetun jäähdytyksen suhdetta järjestelmän energian kulutukseen, ovat tyypillisesti välillä 10–20. Kyseisten järjestelmien jäähdytysenergiakustannukset todettiin vaihtelevan välillä 0,38–0,42 \$/kWh. Vaihtelujen COP-kertoimissa ja jäähdytysenergian kustannuksissa havaittiin johtuvan muun muassa varastoidun lumen tai jään tiheydestä ja lämpötilasta, sähkön hinnasta sekä siitä, kuinka hyvin varasto on eristetty ympäristöstä. Investointikustannusten havaittiin olevan yhtä suuret yleisesti käytettyjen jäähdytysjärjestelmien ja lumen ja jään sulamiseen perustuvien jäähdytysjärjestelmien välillä. Kuitenkin verrattuna yleisesti käytettyihin jäähdytysjärjestelmiin havaittiin lumi- ja jäävarastojen COP-kertoimet korkeimmiksi sekä käyttö- ja ylläpitokustannukset alhaisimmiksi. Sen vuoksi tuotetun jäähdytysenergian kustannus oli alhaisempi lumeen tai jäähän perustuvissa järjestelmissä. Kyseisten järjestelmien yleistymisen esteiksi havaittiin yleisesti käytettyjen jäähdytysjärjestelmien käytön varmuus, kannattavuus sekä joustavuus.

Esimerkkinä jäähdytysjärjestelmästä on esitetty Ruotsissa sijaitsevasta Sundsvallin sairaalakiinteistön järjestelmä (Kuva 9).



**Kuva 9 Ruotsissa sijaitsevan Sundsvallin sairaalan lumijäähdytysjärjestelmä. Perustuu lähteeseen (Skogsberg & Nordell 2001).**

Sundsvallin sairaalan lumen sulamiseen perustuva jäähdytysjärjestelmä koostuu lumivarastosta, josta eritarkoituksiin olevien suodattamien kautta lumen sulamisvesi pumpataan lämmönsiirtimelle. Lämmönsiirrin on kytkettyä sairaalakiinteistön jäähdytysjärjestelmään. Lumivarastosta lähtenyt lämmönsiirtimelle kylmäenergiaa luovuttanut paluuvesi palautetaan lumivarastolle sulattamaan edelleen lumivarastoa. Sairaalan jäähdytysjärjestelmän lumivarasto on kooltaan 140 m x 60 m ja lumen vastaanottokapasiteetiltaan 40 000 t. Järjestelmä on tuottanut vuosittain 655–1 345 MWh jäähdytysenergiaa, joka on vastannut koko sairaalakiinteistön jäähdytystarpeesta 77–93 %. Jäähdytysjärjestelmän  $COP_{total}$  on vaihdellut vuosittain 4,3–17,2 välillä.  $COP_{total}$  eroaa tavallisesta COP-kertoimesta siten, että se ottaa huomioon kaiken energian kulutuksen järjestelmän elinkaaren ajalta jaettuna arvioidun teknillisen käyttöiän mukaisesti käyttövuosille. (Skogsberg & Nordell 2001).

## 4. JÄÄN SULAMISEN MALLINTAMINEN

### 4.1 Jään sulaminen

Jää on kiinteässä olomuodossa olevaa vettä, jonka sulamispiste normaalipaineessa on 0 °C. Tässä lämpötilassa jää alkaa muuttua kiinteästä nestemäiseksi vedeksi. Sulaminen sitoo energiaa, jotta kiinteässä aineessa olevia sidoksia katkeaa. Jään ja veden välille muodostuu niitä erottava liikkuva rajapinta. Jään sulaminen onkin tyypillinen esimerkki niin sanotun liikkuvan rajapinnan tai vapaan reunan ongelmasta. Ongelmaa voidaan myös kutsua Stefanin ongelmaksi itävaltalaisen fyysikon ja matemaatikon Jožef Stefanin mukaan. Olennainen osa ongelmaa on liikkuvan, kiinteä- ja nestefaasin rajapinnan määrittäminen. Tästä johtuen analyttistä ratkaisua ei tunneta kuin muutamassa yksinkertaisessa tapauksessa, joten on hyödynnettävä numeerisia menetelmiä. (Alexiades & Solomon 1993)

Lämmönjakautumista voidaan kuvata seuraavalla osittaisdifferentiaaliyhtälöllä:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (2)$$

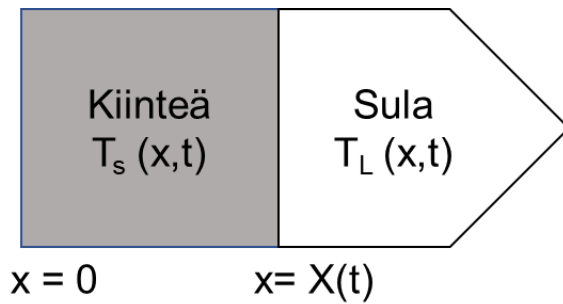
jossa  $\rho$  on tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c$  ominaislämpökapasiteetti ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ),  $k$  lämmönjohtavuus ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ) ja  $x$  faasien välisen rajapinnan sijainti (m). Rajapinnalla on havaittavissa kiinteä- ja nestefaasia. Energian konversio voidaan määrittää erikseen molemmille faaseille kiinteälle ja nesteelle seuraavasti:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < X(t) \quad (3)$$

ja

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_L \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad X(t) < x < \infty, \quad (4)$$

joissa  $T$  on lämpötila (K),  $t$  aika (s) ja  $\alpha$  terminen diffuusiokerroin ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Nesteeseen viitataan alaindeksillä  $L$  ja kiinteään alaindeksillä  $s$ . Faasien välisen rajapinnan sijaintia on havainnollistettu seuraavaksi (Kuva 10).



**Kuva 10 Liikkuva rajapinta kiinteän ja sulan välillä.**

Sulaessa rajapinta kiinteän ja sulan välillä rajapinta liikkuu vasemmalle ja jähmettyessä oikealle. Liikkuvalla reunalla  $x = X(t)$  pätee

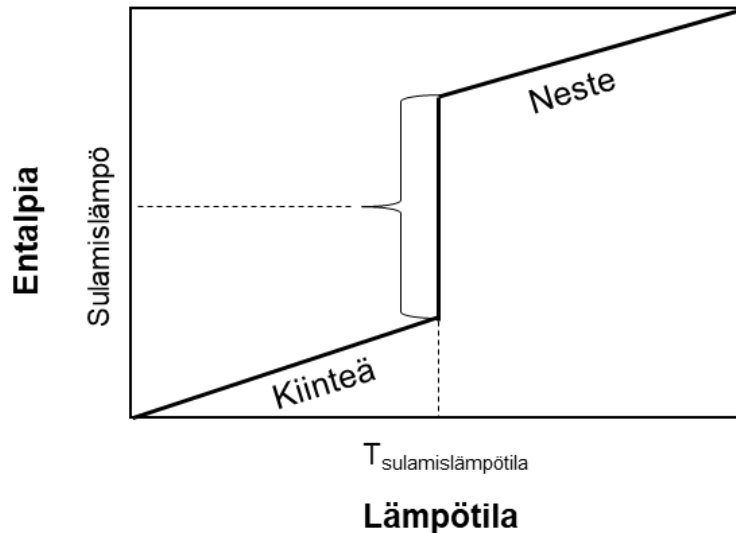
$$T_s(x, t) = T_f = T_L(x, t), \quad (5)$$

jossa  $T_f$  on aineen sulamislämpötila (K). Latenttilämmön sitoutumisesta syntyy lämpövuossa epäjatkuvuuskohta, jonka yli pääsemiseksi voidaan johtaa Stefanin ehto, joka voidaan esittää seuraavasti

$$k_s \frac{\partial T}{\partial x}(X(t), t) - k_L \frac{\partial T}{\partial x}(X(t), t) = \rho l \frac{dx}{dt}, \quad (6)$$

jossa  $l$  on latenttilämpö (J/kg). Numeerisesti voidaan osittaisdifferentiaaliyhtälöt ratkaista, jolloin voidaan määrittää liikkuvan reunan sijainti  $x = X(t)$  sekä faasien lämpötilat  $T_s(x, t)$  ja  $T_L(x, t)$ . (Kahraman et al. 1998)

Yleisimmin käytetty sulamista mallintava tapa määrittää sulamista on hyödyntää entalpiamenetelmää, joka perustuu tilannekohtaisesti määriteltyjen energiayhtälöiden ratkaisemiseen. Hyödyntämällä entalpiamenetelmää voidaan liikkuvan rajapinnan ongelma välttää laskennassa, sillä menetelmässä rajapinnan sijainnilla ei ole merkitystä. Jään sulamista mallinnettaessa entalpia on oletettu muuttuvan lämpötilan funktiona (Kuva 11). (Lei, et al., 2017)



**Kuva 11 Entalpia lämpötilan funktiona jään sulamisessa.**

Entalpiamenetelmää hyödyntäen voidaan kirjoittaa sulamiseen sitoutuvaa lämpöenergia  $dQ$  (J) mukaillen (Hosseini & Rahaeifard 2009) seuraavasti:

$$\frac{dQ}{dt} = mc_s \frac{dT}{dt} + l \frac{dm}{dt}, \quad (7)$$

jossa  $m$  on jään massa (kg) ja  $c_s$  jään ominaislämpökapasiteetti (J/(kgK)).

Lei et al. (2016) esittävät, että entalpiamenetelmää hyödynnettäessä epävarmuutta sulamisen mallintamiseen luovat muun muassa jään sisältö ja sisällön mahdolliset epähomogeenisuudet, jään tiheyden mahdollinen epähomogeenisuus sekä jään muodon epäsymmetrisyydet. Sen vuoksi he esittävät, että seuraavat oletukset sulamista määrittäessä on tehtävä:

- 1) Lämpötilan muutoksista johtuvia aineominaisuuksien lukuarvojen muutoksia ei oteta huomioon.
- 2) Ympäristön lämpötila  $T_\infty$  ja konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $h$  oletetaan vakioiksi ajan ja sulamisen funktiona.
- 3) Lämmönsiirto oletetaan täydelliseksi.
- 4) Jää ja vesi oletetaan isotrooppisiksi ja homogeenisiksi eikä tilavuuden muutoksia oteta huomioon.
- 5) Pinnan kaarevoitumisen muutoksia ei huomioida.
- 6) Sulaminen tapahtuu vasta sulamispisteessä.



## 4.2 Muutokset jäässä sulamisen funktiona

Muutokset lämmönsiirrossa ja aineominaisuuksissa ovat merkittävimpiä, kun kyseessä on kahden eri faasin välinen faasinmuutos sen sijaan, kun faasimuutosta ei tapahdu. Kiinteä hiukkanen kokee sulaessaan sekä muutoksia alkuperäisestä koosta että muutoksia muodosta. Erot ovat havaittavissa voimakkaammin, kun kyseessä on pakotettu konvektiivinen virtaus johtuen pääasiallisesti sulasekoituksen termisestä epätasapainosta virtauksen kanssa. Tämän vuoksi sulamisprosesseissa virtauksien aineominaisuuksien tunteminen on tärkeätä sulamisaikaa mallintavien dynaamisten mallien kehittämisessä. (Hao & Tao 2001)

Jään sulaessa sen myös sen aineominaisuudet muuttuvat. Aineominaisuuksien muutokset sulamisprosesseissa voidaan yleisesti jakaa kahden tyyppiin muutoksiin. Ensinnäkin lämpötilan vaikutuksesta johtuvaan muutokseen. Toiseksi aineominaisuuksien muutosta voidaan selittää sulamispisteessä havaittavissa olevilla eroilla, jotka johtuvat aineominaisuuksien eroista nestemäisen ja kiinteän välillä. Merkittävimmät aineominaisuudet sulamisen mallintamisen kannalta, jotka eivät pysy vakiona sulamisen funktiona, ovat tiheys, lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti. (Alexiades & Solomon 1993)

Hao & Tao (2001) esittävät, että jään sulaessa jään muoto muuttuu voimakkaasti. Pinta pyöristyy/kaarevoituu, sillä muutokset virtausmallissa jään muodon muuttuessa aiheuttavat paikallisesti eroja lämmönsiirrossa veden ja jään pinnan välillä. Vanier & Tien (1970) esittivät aikaisempaan tutkimukseen pohjautuen, että pallonmuotoinen kappale muuttuu päärynän muotoa muistuttavaksi luonnollisen konvektion vaikutuksesta. Hao & Tao (2001) havaitsivat, että pakotetussa virtauksessa pallonmuotoisen jääkappaleen sulavan pakotetun virtauksen nopeusvektorin mukaisesti.

## 4.3 Lämmönsiirto jäähän konvektion vaikutuksesta

Jään sulaminen aiheutuu ympäristön ja jään välisestä lämmönsiirrosta, jossa lämmönsiirto tapahtuu korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämmönsiirto voi tapahtua kolmella tapaa konvektiolla, säteilyllä tai johtumalla. Lämmönsiirto konvektiossa tapahtuu fluidin, kuten nesteen tai kaasun, välityksellä, johtumalla kiinteän aineen välityksellä ja kappaleen lämpötilasta aiheutuneella säteilyllä. Lämmönsiirto voidaan jakaa luonnolliseen ja pakotettuun lämmönsiirtoon. Pakotettu lämmönsiirto on aiheutettu esimerkiksi pakottamalla fluidi virtaukseen esimerkiksi pumpulla tai puhaltimella. Luonnollista sen sijaan on fluidin liike paine-erojen ja gravitaation vaikutuksesta. (Stephan, 2010) Tässä työssä tarkastellaan jään sulattamista konvektion vaikutuksesta, ja tämän vuoksi seuraavaksi keskitytään tarkemmin ainoastaan luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon.

Konvektion vaikutuksesta tapahtuva siirtyvä lämpöteho  $\dot{Q}$  (W) voidaan määrittää seuraavasti:

$$\dot{Q} = h_c A (T_s - T_\infty), \quad (8)$$

jossa  $h_c$  on konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K)),  $A$  lämmönsiirtopinta-ala (m<sup>2</sup>),  $T_s$  kappaleen pintalämpötila (K) ja  $T_\infty$  ympäristön lämpötila (K).

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $h$  (W/m<sup>2</sup>K) voidaan määrittää Nusseltin luvun  $Nu$  (-) avulla seuraavasti:

$$Nu = \frac{h_c L_c}{k}, \quad (9)$$

jossa  $L_c$  on karakteristinen mitta (m) ja  $k$  fluidin lämmönjohtavuus (W/(mK)).

Nusseltin luvun määrittäminen jakaa laskennassa konvektion luonnolliseen ja pakotettuun konvektioon. Pakotetussa konvektioissa Nusseltin luku riippuu Reynoldsin luvusta  $Re$  (-) ja Prandtin luvusta  $Pr$  (-) ja luonnollisessa se riippuu Grashoffin luvusta  $Gr$  (-) ja Prandtin luvusta. Nusseltin luvun riippuvuus voidaan ilmaista seuraavasti:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (10)$$

pakotetulle konvektiolle ja

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (11)$$

luonnolliselle konvektiolle. Nusseltin luvulle on olemassa korrelaatioita, joita hyödynnetään määrittäessä tapauskohtaista Nusseltin lukua. Keskitytään seuraavaksi korrelaatioissa tarvittaviin muuttujiin Reynoldsin, Prandtin ja Grashoffin luvun määrittämiseen.

Reynoldsin luku määritellään seuraavasti:

$$Re = \frac{\rho U_\infty L_c}{\mu} = \frac{U_\infty L_c}{\nu}, \quad (12)$$

jossa  $U$  on fluidin nopeus (m/s),  $\rho$  fluidin tiheys (kg/m<sup>3</sup>),  $\mu$  dynaaminen viskositeetti (Ns/m<sup>2</sup>) ja  $\nu$  kinemaattinen viskositeetti (m<sup>2</sup>/s).

Prandtin luku määritellään aineominaisuuksien perusteella seuraavasti:

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \quad (13)$$

jossa  $c_p$  on aineen ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (J/(kgK)).

Grashoffin luku voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä:

$$Gr = \frac{L_c^3 g \beta (T_\infty - T_s)}{\nu^2}, \quad (14)$$

jossa  $g$  on putoamiskiihtyvyyys ( $m/s^2$ ) ja  $\beta$  tilavuuden lämpölaajenemiskerroin ( $1/K$ ). (Stephan 2010)

Pakotetulle konvektiolle pallonmuotoiselle kappaleelle on esitetty kirjallisuudessa muun muassa seuraavia Nusseltin luvun korrelaatioita. Finlayson & Olson (1987) esittivät Whitakerin (1972) ja Leppertin (1961) esittämät korrelaatiot. Whitaker (1972) esitti Nusseltin luvun riippuvan  $Re$  on Reynoldsin luvusta (-) ja  $Pr$  Prandtlin luvusta (-) seuraavasti:

$$Nu = 2 + \left(0,4Re^{\frac{1}{2}} + 0,06Re^{\frac{2}{3}}\right)Pr^{0,4}, \quad (15)$$

ja Leppert (1961) seuraavasti:

$$Nu = (1,2 + 0,53Re^{0,53})Pr^{0,3}. \quad (16)$$

Nusseltin luvun korrelaatiota pallonmuotoiselle kappaleelle luonnollisella konvektiolla on esitetty seuraavaksi. Luonnollisessa konvektiossa Nusseltin luku riippuu  $Re$  Reynoldsin luvusta (-),  $Gr$  Grashoffin luvusta (-),  $Ra$  Rayleighin luvusta (-) ja  $Pr$  Prandtlin luvusta (-). Vanier & Tien (1970) esittivät seuraavanlaisen korrelaation:

$$Nu = 2 + C * (PrGr)^{\frac{1}{4}}, \quad (17)$$

jossa  $C = 0,422 \pm 0,006$ . Korrelaatio soveltuu, kun  $1,7 * 10^6 < Pr * Gr < 2,4 * 10^8$ .

Achenbach (1995) esitti Nusseltin luvulle seuraavan korrelaation:

$$Nu = 2 + 0,56 * (0,846 + Pr * Ra)^{\frac{1}{4}}, \quad (18)$$

joka soveltuu, kun  $Ra < 10^7$ .

Kast & Klan (2010) esittivät Churchillin ja Chun (1975) mukaisesti, että pallonmuotoiselle kappaleelle soveltuu seuraava korrelaatio:

$$Nu = \left(0,825 + 0,387(Raf_1(Pr))^{\frac{1}{6}}\right)^2, \quad (19)$$

jossa  $f_1$  voidaan määrittää Prandtlin luvun  $Pr$  funktiona seuraavasti:

$$f_1(Pr) = \left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{-\frac{16}{9}}, \quad (20)$$

kun  $10^{-1} < Ra < 10^{12}$  ja  $0,001 < Pr < \infty$ .

Lisäksi Churchillin esittämää Nusseltin luvun korrelaatiota pallonmuotoiselle kappaleelle luonnollisen konvektion tapauksessa voidaan määrittää seuraavasti:

$$Nu = 2 + \frac{0,589Ra^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0,469}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}, \quad (21)$$

kun  $Pr \geq 0,7$  ja  $Ra \leq 10^{11}$ .

#### 4.4 Sulamisaikaa koskevat tutkimukset

Tässä alaluvussa kootaan kirjallisuudessa esitettyjä tutkimustuloksia sulamisajasta. Solomon (1979) esittää sulamisajalle  $t_{melt}$  (s) seuraavan approksimaation:

$$t_{melt} = \frac{L^2}{2\alpha_L(1 + \omega)St_L} (1 + (0,25 + 0,17\omega^{0,7})St_L), \quad 0 \leq St_L \leq 4 \quad (22)$$

jossa  $L$  on pituus (m),  $\omega$  dimensioton muotoa kuvaava parametri (-),  $\alpha_L$  terminen diffuusiokerroin ( $m^2/s$ ) ja  $St_L$  Stefanin luku (-). Dimensioton muotoa kuvaava parametri  $\omega$  voidaan määrittää seuraavalla kaavalla:

$$1 + \omega = \frac{LA}{V}, \quad (23)$$

jossa  $A$  on pinta-ala ( $m^2$ ), johon lämmönsiirto kohdistuu ja  $V$  kappaleen tilavuus ( $m^3$ ).

Siten  $\omega$  voidaan esittää seuraavasti:

$$\omega = \begin{cases} 0 & \text{laatalle, kun toinen reuna on eristetty} \\ 1 & \text{sylinterille} \\ 2 & \text{pallonmuotoiselle} \end{cases} \quad (24)$$

sylinterille, pallonmuotoiselle ja laatalle, jonka toinen reuna on eristetty. Stefanin luku voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä:

$$St_L = \frac{c_L \Delta T_L}{L}, \quad (25)$$

jossa  $c_L$  on ominaislämpökapasiteetti ( $J/(kgK)$ ),  $l$  latenttilämpö ( $J/kg$ ) ja  $\Delta T_L$  kappaleen lämpötilan ja sulamispisteen erotus ( $K$ ).

Skogsberg & Lundberg (2005) tutkivat lumen pintasulamisaikaa lämpötilan, valon intensiteetin, tuulen nopeuden, absoluuttisen ilman kosteuden ja eristekerroksen paksuuden (puuhake) funktiona. Tehtyjen kokeiden perusteella he havaitsivat lumen pintasulamisaikaa  $SMR$  ( $kg/(m^2h)$ ) noudattavan seuraavaa yhtälöä:

$$SMR = -0,97z_{wc} + 0,164v_w + 0,00175i_{light} + 0,102T_{air} + 0,192AH, \quad (26)$$

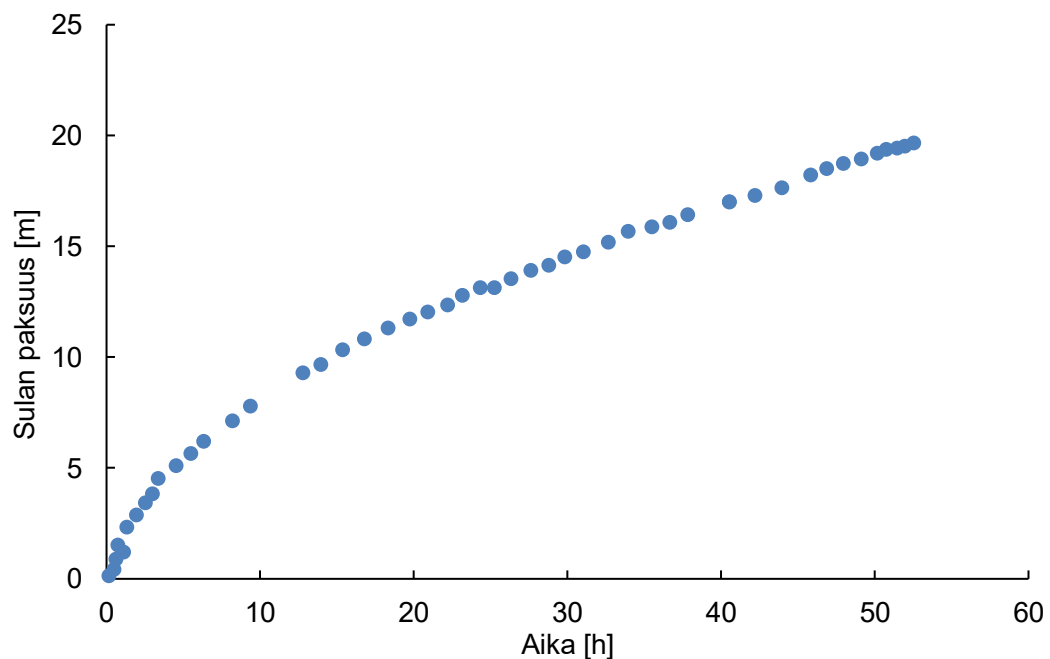
jossa  $z_{wc}$  on eristekerroksen paksuus (cm),  $v_w$  tuulen nopeus (m/s),  $i_{light}$  valon intensiteetti ( $W/m^2$ ),  $T_{air}$  ilman lämpötila ( $^{\circ}C$ ) ja  $AH$  absoluuttinen ilman kosteus ( $g/m^3$ ).

Lumi ja jää ovat kemiallisilta ominaisuuksiltaan samanlaisia. Ero lumen ja jään välillä perustuu niiden erilaisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin ja visuaalisiin havaintoihin. Ero makro-ominaisuuksissa johtuu kaasua, useimmiten ilmaa, sisältävistä kaasukoloista. Kaasukolojen osuus lumen tilavuudesta on suurempi kuin jään. Lumen tilavuudesta on

noin 90 % kaasua ja jään tilavuudesta vain noin 1 % kaasua useimmiten ilmaa sisältäviä onkaloilta. Tästä johtuen jää on lunta tiheämpää. Kaasukoloilla on lisäksi vaikutusta lämmöneristävyyskykyyn. (Leppäranta et al. 2017)

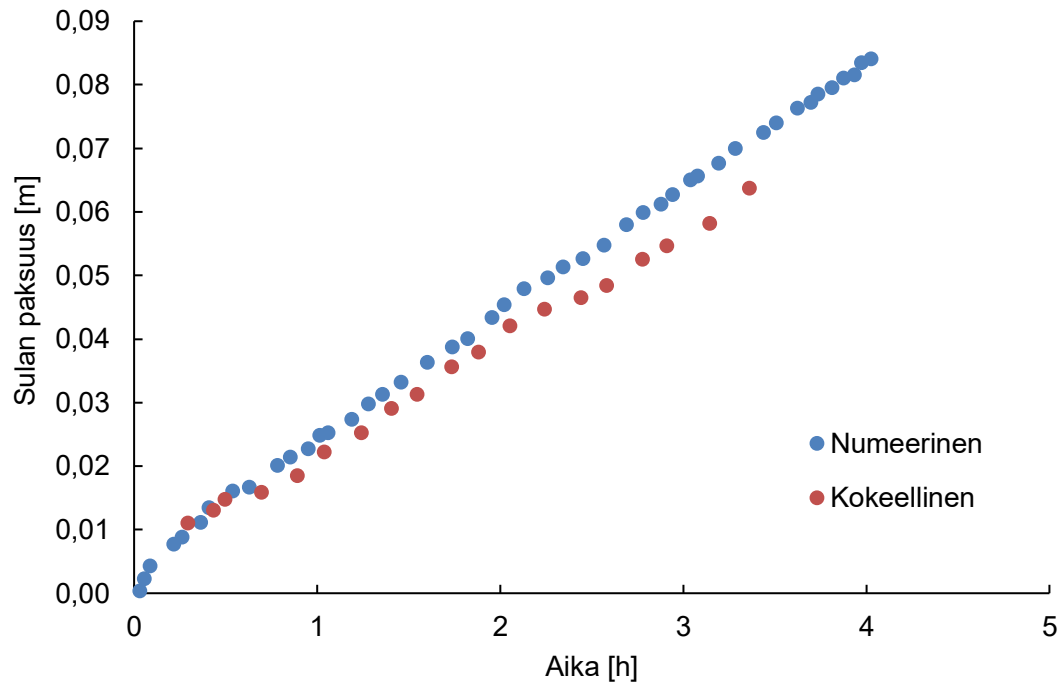
Kahrmann et al. (1998) tutkivat suorakulmaisen jään sulamisaikaa analyyttisesti, numeerisesti ja kokeellisesti hyödyntämällä Stefanin ehtoa rajapinnalla. Koe valittiin vastaamaan sellaista yksinkertaista tilannetta, jolle analyyttinen ratkaisu on mahdollinen. Jään sulamista tutkittiin lämmittämällä kuumaa vettä sisältävällä kuparisella astialla ainoastaan jään yläpintaa. Muut pinnat eristettiin. Tutkimus kohdistui vertaamaan tilannetta, jossa huomioitiin ainoastaan johtuminen tilanteeseen, jossa johtumisen lisäksi huomioitiin konvektion vaikutus jään pinnalla. Jään alkulämpötilaksi määriteltiin  $-30\text{ °C}$ . Sulamisen alkaessa oletettiin, että jään lämpötilan muuttuvan  $0\text{ °C}$ :ksi, ja lämmitykseen käytetyn kuumen veden lämpötilaksi määritettiin  $70\text{ °C}$ .

Kuva 12 esittää jään sulamista ajan funktiona numeerisella määrityksellä, kun lämmönsiirrossa on huomioitu johtuminen. Jään paksuuden voidaan havaita ensin muuttuvan nopeasti ajan funktiona, mutta muutoksen jälkeen hidastuvan ja tasoittuvan.



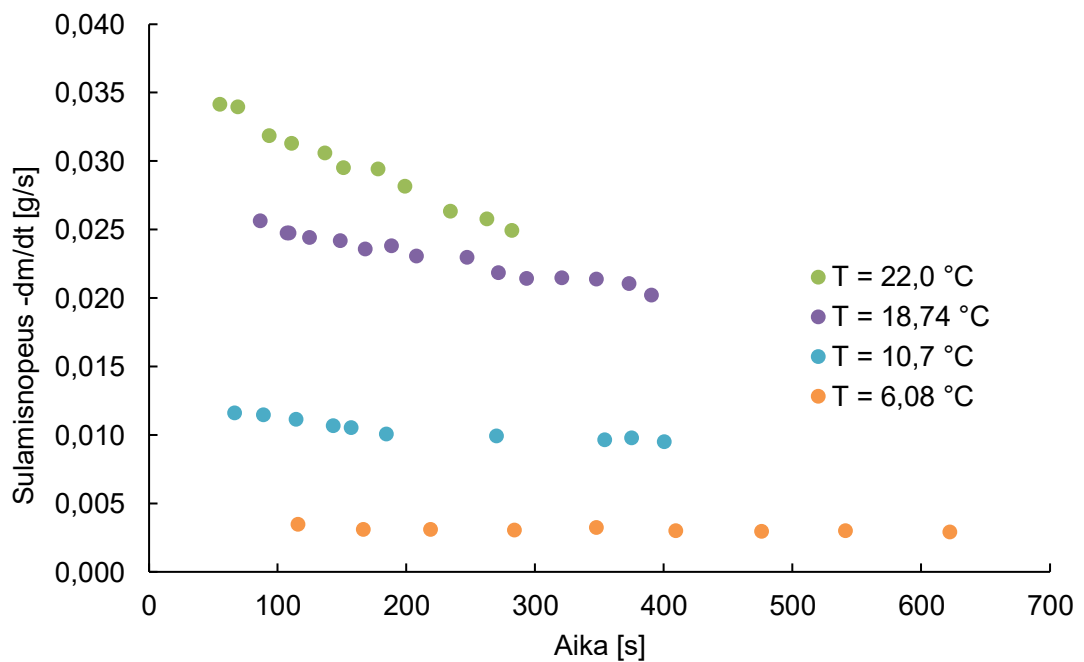
**Kuva 12 Jään paksuus ajan funktiona numeerisesti määritettynä johtumalla muokattuna lähteestä (Kahrman et al. 1998).**

Kuva 13 esittää jään paksuuden muutosta ajan funktiona numeerisesti ja kokeellisesti määrittämällä, kun lämmönsiirrossa huomioidaan sekä johtuminen että konvektio. Jääkerroksen paksuuden voidaan havaita muuttuvan lineaarisesti alun jälkeen. Kokeellisesti määriteltyjen tulosten voidaan havaita vastaavan hyvin numeerista mallia.



**Kuva 13 Jään paksuus ajan funktiona numeerisesti ja kokeellisesti määritettynä huomioiden johtumisen sekä konvektio muokattuna lähteestä (Kahraman et al. 1998).**

Vanier & Tien (1970) tutkivat osana tutkimustaan kokeellisesti pallonmuotoisen jääkappaleen sulamisnopeutta vapaan konvektion vaikutuksesta. Kokeessa jääkappale, jonka pintalämpötilaksi mitattiin  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , upotettiin veteen. Koe toistettiin useilla eri veden lämpötiloilla ja halkaisijan mitoilla. Jääkappaleen sulamisnopeuden muutosta mitattiin ajan funktiona (Kuva 14).



**Kuva 14 Pallonmuotoisen jääkappaleen (Halkaisijaltaan 3-in.  $\approx$  6–8 cm) sulamisnopeuden muutos ajan funktiona muokattuna lähteestä (Vanier & Tien 1970).**

Lämmönsiirtoalan kasvaessa sulamisnopeuden havaittiin laskevan lineaarisesti ajan funktiona. Sulamisnopeuden muutoksen voimakkuus laski lämpötilan laskiessa ja voimistui lämpötilan noustessa.

Vanierin & Tienin (1970) tutkimuksessa esitettiin lisäksi konvektiivista lämmönsiirtokerrointa  $\bar{h}$  (W/(m<sup>2</sup>K)) ja sulamisaikaa  $t$  (s) kuvaavat kaavat. Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin  $\bar{h}$  määriteltiin tutkimuksessa seuraavasti:

$$\bar{h} = Nu \frac{k}{D_0} \approx \frac{\rho_s l \epsilon D_0}{\Delta T t}, \quad (27)$$

jossa  $Nu$  on Nusseltin luku (-),  $k$  lämmönjohtavuus (W/(mK)),  $D_0$  jääkappaleen halkaisija alkutilanteessa  $t_0=0$  s (m),  $\rho_s$  jään tiheys (kg/m<sup>3</sup>),  $l$  sulamislämpö (J/kg),  $\epsilon$  halkaisijan suhteellinen muutos (-),  $\Delta T$  lämpötilaero (K) ja  $t$  aika (s).

$$\epsilon = \frac{D_0 - D_i}{D_0}, \quad (28)$$

jossa  $D_i$  kuvaa hetkellistä halkaisijaa (m).

Sulamisaika voidaan laskea seuraavasti, kun halkaisijan suhteellinen muutos on huomattavan pieni ( $\epsilon \ll 1$ ):

$$t \approx \frac{D_0^2}{\left(\frac{\rho_l}{\rho_s}\right) \left(\frac{k}{\rho_l c_p}\right) \left|\frac{c_p \Delta T}{l}\right| Nu} \left(\frac{\epsilon}{2}\right), \quad (29)$$

jossa  $\rho_l$  nesteen tiheys (kg/m<sup>3</sup>) ja  $c_p$  ominaislämpökapasiteetti (J/(kgK)).

## 5. AINEISTO JA MENETELMÄT

### 5.1 Tutkimuksen tarkoitus ja päätavoitteet

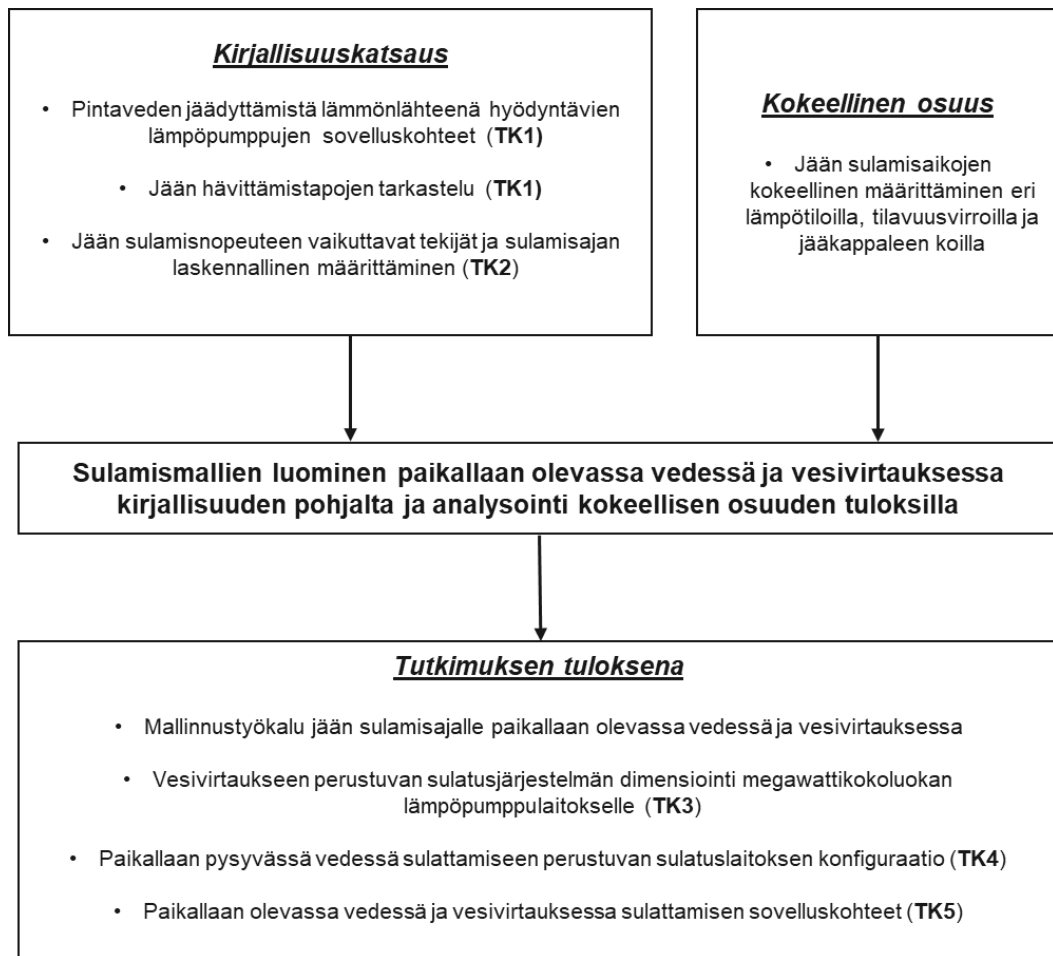
Tutkimus tehtiin Ramboll Finland Oy:lle toimeksiantona toimien jatkotutkimuksena Ramboll Finland Oy:n viime keväänä 2022 teettämälle Sami Hirvosen diplomityölle *Pintaveden jäädyttäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä kaukolämmön tuotannossa*. Hirvosen (2022) diplomityössä tehtiin selvitys teollisen kokoluokan pintavettä jäädyttävän lämpöpumpun kannattavuudesta ja soveltuvuudesta kaukolämmöntuotannossa. Selvitys osoitti, että kyseinen lämpöpumppulaitos olisi kannattava ja kilpailukykyinen lämmöntuotantolaitos kaukolämpöjärjestelmässä. Ratkaistavaksi haasteeksi laitoksen suunnittelussa ilmeni kuitenkin jäädytettäessä syntyvän jään määrä. 1 MW:n kokoisen laitoksen tapauksessa jäätä syntyisi 5–7 t/h:ssa.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on ratkaista jään syntymisestä aiheutuva haaste ja toimia siten esiselvityksenä megawattikokoluokan pintaveden jäädyttämistä lämmönlähteenä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen suunnittelua ja rakentamista varten. Tehtävän tutkimuksen päätavoitteet olivat suurimmilta osin Ramboll Finland Oy:n asettamat ja pohjautuvat aikaisempaan diplomityöhön. Tavoitteena oli tutkia jään sulattamista vesistön pintavedellä ilman ulkoista lämmönlähdettä. Työssä tarkasteltiin sulattamista paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa. Näiden soveltuvuutta tarkasteltiin sekä laitoksen toimintaympäristön että laitoksen jään syntymisnopeuden kannalta. Tavoitteet ovat muotoiltu tutkimuskysymyksiksi, jotka on esitelty aiemmin tässä työssä johdannossa 1.

### 5.2 Tutkimuksen eteneminen

Tutkimus aloitettiin määrittelemällä tutkimusongelma. Tutkimusongelmaksi määritettiin jään syntymisestä aiheutuva haaste lämpöpumppulaitokselle. Tutkimusongelman määrittämisen jälkeen jatkettiin ongelmaan perehtymiseen ja rajauksien määrittämiseen. Määriteltyjen rajausten perusteella päädyttiin tarkastelemaan jään sulattamisratkaisuja ja sulattamista ilman ulkoista lämmönlähdettä. Tutkimuksen eteneminen on esitetty alla (Kuva 15).





***Kuva 15 Tutkimuksen eteneminen.***

Jäsentelyn ja perehtymisen jälkeen tutkimus aloitettiin tekemällä kirjallisuuskatsaus aikaisempiin tutkimuksiin ja muuhun kirjallisuuteen. Kirjallisuuskatsaus keskittyi kolmeen osa-alueeseen: faasimuutoslämpöä lämmönlähteenä hyödyntäviin lämpöpumppulaitoksiin, jään hävittämistapojen tarkasteluun ja jään sulamisajan mallintamiseen.

Faasimuutoslämpöä lämmönlähteenä hyödyntävien lämpöpumppulaitoksen sovelluskohteita tarkastelemalla pyrittiin hahmottamaan, millainen kyseinen lämpöpumppulaitos on sekä millaisia rajoituksia ja mahdollisuuksia laitos ja sen toimintaympäristö asettaa jään hävittämiseksi. Edellä mainittuja lähestyttiin selvittämällä laitoksen toimintaperiaatetta, toimintaympäristöä ja merkitystä lämmöntuotannossa. Jään hävittämistekniikoita jäseneltiin selvittämällä mahdollisuuksia ja rajoituksia hävittämistekniikoiden kannalta. Hävittämistekniikoita selvitettiin tarkastelemalla aikaisempia tutkimuksia ja käytännön ratkaisuja jään ja lumen hävittämiseen liittyen.

Jään sulamismalli luotiin numeerisella laskennalla hyödyntäen lämmönsiirto-, konversion sekä ajan mallinnusta. Malli luotiin hyödyntämällä kirjallisuusselvitystä ja kokeellista

osuutta. Mallin luomista varten kirjallisuuskatsauksessa keskityttiin jään sulamisen tarkasteluun, sulamiseen vaikuttaviin tekijöihin sekä muihin aikaisempiin jään sulamisaikaa ja -nopeutta koskeviin tutkimuksiin. Näiden asioiden pohjalta voitiin arvioida, mitä tekijöitä on sulamismallia luodessa otettava huomioon numeerista laskentaa varten. Kirjallisuusselvityksen perusteella päädyttiin luomaan mallit jään sulattamiselle virtaavassa vedessä sekä paikallaan olevassa vedessä, joiden luomista on tarkasteltu yksityiskohtaisemmin alaluvussa 5.5.

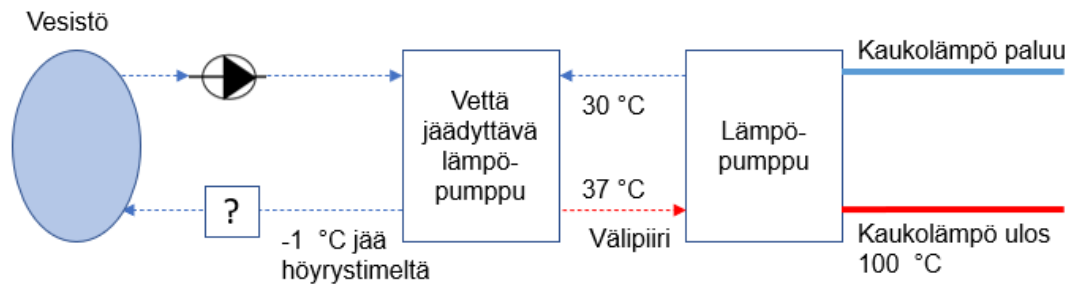
Luotujen mallien luotettavuutta arvioitiin muun muassa kokeellisella osuudella, jota on kuvattu tarkemmin alaluvussa 5.6. Kokeellisella osuudella lisäksi havainnointiin luotettavuuden arvioinnin yhteydessä tehtyjen oletusten ja arvioiden oikeellisuutta. Kokeellisen osuuden perusteella tehtyjen havaintojen ja niiden perusteella tehtyjen kehitystoimenpiteiden avulla saatiin laadittua jään sulamista virtaavassa vedessä ja paikallaan olevassa vedessä mallintavat mallit.

Valmiit mallit ovat osa tutkimuksen tulosta. Niitä hyödynnettiin määrittäessä dimensioita vesivirtauksessa sulattamiseen perustuvassa sulatusjärjestelmässä sekä määrittäessä paikallaan pysyvässä vedessä sulattamiseen perustuvan sulatuslaitoksen konfiguraatiota. Lisäksi tuloksille tehtiin herkkyys- ja luotettavuustarkastelu.

Sovelluskohteiden määrittämistä tarkasteltiin soveltuvaa hävittämistapaa jälle arvioimalla vesistön, laitosalueen ja laitoksen ominaisuuksien perusteella. Lisäksi tarkasteltiin muita huomioitavia tekijöitä, kuten sulamisajan ja energian kulutuksen merkitystä lämpöpumppulaitoksen kannalta. Myöskin luotuja numeeriseen laskentaan pohjautuvia malleja hyödynnettiin yhtenä osatekijänä arvioitaessa sovelluskohteita. Määrittämisessä hyödynnettiin alalukujen 6.1–6.7 tuloksia sekä vesistön lämpötilaa. Sovelluskohteiden määrittämistä on tarkasteltu tarkemmin alaluvussa 5.4. Lopuksi muodostettiin johtopäätökset.

### **5.3 Tutkimuskohteen kuvaus**

Työn tarkoituksena on toimia esiselvitystyönä pintavettä jäädyttävälle lämpöpumppulaitokselle. Kyseistä lämpöpumppulaitosta ei toistaiseksi ole, joten tämä tutkimus tehtiin mahdollista tulevaa laitosta tarkastellen. Pintavettä jäädyttävän lämpöpumppulaitoksen toimintaa ja toimintaympäristöä on havainnollistettu seuraavaksi pienessä kaukolämpöjärjestelmässä (Kuva 16).



**Kuva 16 Pintavettä jäädättävän lämpöpumppulaitoksen (pilottilaitos) toimintaympäristö perustuen lähteeseen Hirvonen (2022).**

Jäädättävälle lämpöpumpulle pumpataan pintavettä laitoksen läheisyydessä olevasta vesistöstä. Vesi jäädätetään, ja syntynyt jää poistuu höyrystimeltä  $-1\text{ °C}$ , jonka jälkeen se poistetaan mahdollisuuksien mukaan vesistöön joko kiinteänä jäänä tai nestemäisenä vetenä. Vettä jäädättävän lämpöpumpun lauhduttimen lämpötila on noin  $37\text{ °C}$ . Lauhduttimelta lämpöteho siirretään välipiirin kautta toiselle lämpöpumpulle, jonka tarkoituksena on nostaa lämpötila kaukolämpöverkon menolämpötilan tasolle. Kaukolämmön paluuvesi palaa lämpöpumpulle.

Pintavettä jäädättävän lämpöpumppulaitoksen käyttötunnit kaukolämpöjärjestelmässä vaihtelevat kaukolämpöjärjestelmän koon mukaan. Hirvonen (2022) esitti, että pienessä kaukolämpöverkossa kyseinen laitos voi toimia peruskuormalaitoksena vuoden ympäri, jolloin sen lisäksi tarvitaan huippukuormalaitos ja mahdollisesti lämpökeskus. Suuremmissa kaukolämpöverkossa voidaan välipiiriin yhdistää esimerkiksi lämpövarastoja ja muitakin lämmönlähteitä hyödyntäviä lämpöpumppuja kuten ilma-vesilämpöpumppua. Tämä mahdollistaa tuotannon kustannusten optimoinnin, kun lämmöntuotantoa voidaan optimoida ulkolämpötilan mukaisesti.

Pintavettä jäädättävän lämpöpumpun kannattavimmat ajotunnit ovat talviaikaan, jolloin ilman lämpötila on tyypillisesti alhainen, ja pintaveden lämpötila on hieman yli  $0\text{ °C}$ . Kun pintaveden lämpötila on hieman yli  $0\text{ °C}$ , hyödynnettävä lämpöenergian määrä jäisi alhaiseksi muilla tavoin vesistön lämpöä hyödyntävillä lämpöpumpuilla. Lämpötilaltaan alhaisen pintaveden tapauksessa  $1\text{ MW}$ :n lämpötehon saavuttamiseksi tarvittaisiin todella suuria virtaamia ja putkikokoja, jotka asettaisivat haasteita avoimen tai suljetun vesistö-lämpöpumpun tekniselle toteutukselle ja taloudelliselle kannattavuudelle.

## 5.4 Sovelluskohteiden määrittäminen sulattamiselle paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa

Sovelluskohteiden määrittämisessä huomioitiin erityisesti ajankohdat, jolloin ilman lämpötila ja veden lämpötila ovat alhaisia. Tarkastelu keskittyy siten talviaikaan ja aikaan välittömästi ennen ja jälkeen talven.

Sovelluskohteita määritettäessä vesistössä sulattamista käsiteltiin paikallaan olevana vetenä. Syntynyt jää voidaan talviaikaan hävittää vesistöön purkamalla jää sulaan aukkoon tai jääpeitteen alle. Kun jääpeitettä ei ole, voidaan jää sulan aukon tavoin vastavasti purkaa avoimeen vesistöön.

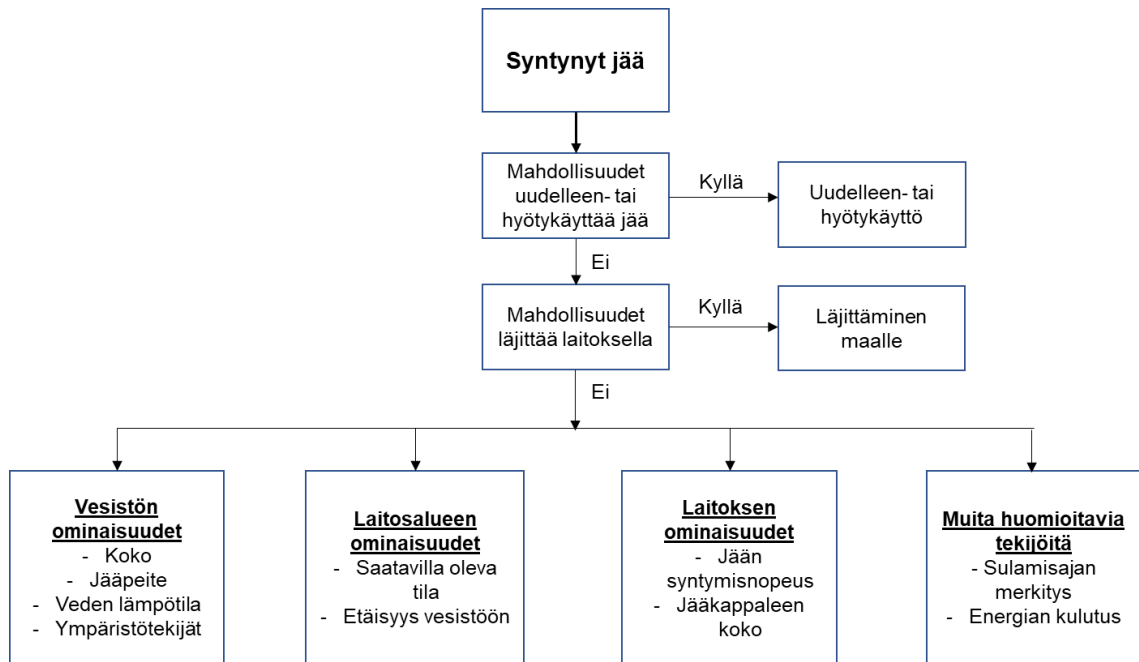
Virtauksen tapauksessa oletettiin sulatuksen tapahtuvan lämpöpumppulaitoksen yhteydessä sijaitsevalla sulatusjärjestelmällä (Kuva 17). Sulatusjärjestelmä ajatellaan koostuvan pumpusta, joka pumppaa vettä vesistöstä ”verkkomaiselle” sulatusalueelle, jonne yksi tai useampi jääkappale sijoitetaan. Pumpattu vesi virtaa ylhäältä jääkappaleille ja edelleen verkon läpi palautuen takaisin vesistöön jään sulamisesta syntyvän sulamisveden lisäksi.



**Kuva 17 Vesivirtauksessa sulattaminen lämpöpumppulaitoksen yhteydessä.**

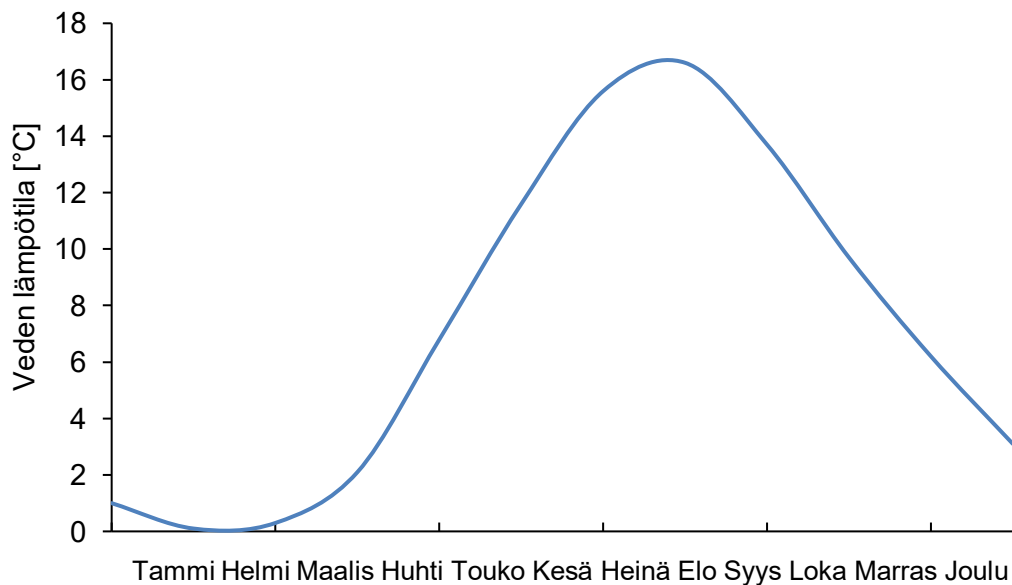
Sovelluskohteiden määrittäminen tehtiin seuraavasti (Kuva 18). Ensiksi tarkasteltiin vaihtoehtoiset menetelmät, jonka jälkeen voitiin arvioida niihin liittyviä tekijöitä vesistön, laitosalueen ja laitoksen ominaisuuksien perusteella. Lisäksi tarkasteltiin muita huomioitavia tekijöitä, kuten sulamisajan ja energian kulutuksen merkitystä lämpöpumppulaitoksen kannalta. Sovelluskohteita määritettäessä tehtiin seuraavat oletukset:

- 1) Vesistössä sulattaminen vaatii vähemmän rakentamista ja laitteistoa, joten se on yksinkertaisemmin toteutettavissa ja toimiessaan yksinkertaisempi.
- 2) Vesivirtaukseen perustuva laitos on investointikustannuksiltaan ja käyttökustannuksiltaan kalliimpi, sillä se vaatii muun muassa rakentamista, laiteinvestointeja ja siitä aiheutuu käyttökustannuksia pumppaamisesta johtuen.
- 3) Jään kertyminen vesistöön aiheuttaa jääpeitteen kasvua.



**Kuva 18 Sovelluskohteiden määrittäminen.**

Määrittämisessä hyödynnettiin alulukujen 6.1–6.7 tuloksia sekä vesistön lämpötilaa, jota arvioitiin hyödyntämällä vesistön lämpötilaprofiilia pystysuunnassa talviaikaan sekä meriveden lämpötiladataa (Kuva 19). Vesistön pintalämpötila talviaikaan on 0 °C ja pinnan alla lämpötila vaihtelee 1–4 °C välillä (Leppäranta 2017). Meriveden lämpötila on alle 2 °C tammi-maaliskuun ajan ja tämän ajanjakson ulkopuolella yli 2 °C.



**Kuva 19 Meriveden keskilämpötila Suomenlahdelta Helsingin edustalta Harmajan mittausasemalta (Ilmatieteen laitos).**

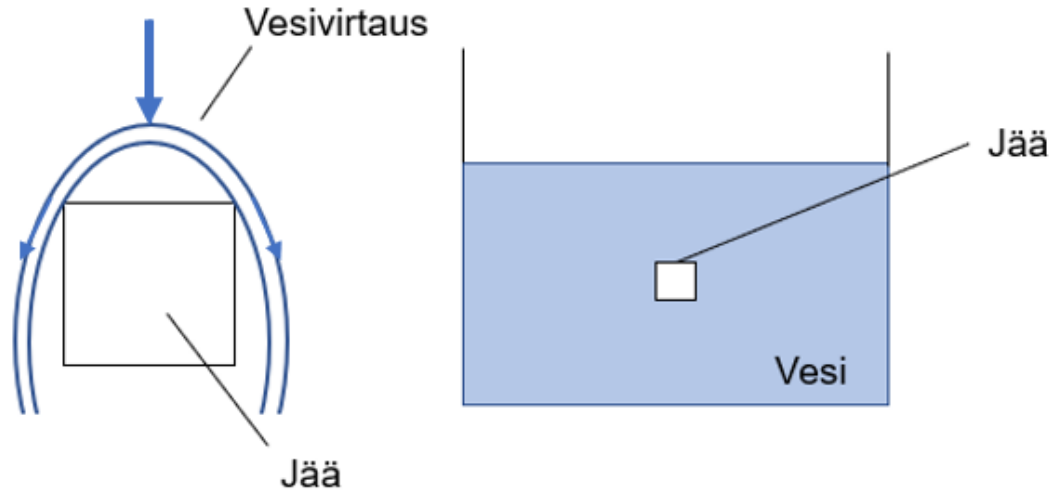
## 5.5 Jään sulamisaikaa kuvaavan mallin luominen numeerisella laskennalla

Jään sulamismallin luomisessa hyödynnettiin entalpiametodia, joka perustuu oletukseen siitä, että jään sulamista voidaan laskennallisesti määrittää ratkaisemalla jään sulamiseen sitoutuvan lämmön siirtymistä eikä siten rajapinnan sijaintia jään ja sulan välille tarvitse tietää. Entalpiametodi on kuvattu tarkemmin alaluvussa 4.1. Yksinkertaistettu jään sulamismalli luotiin erikseen jään sulattamiselle vesivirtauksella ja paikallaan olevassa vedessä. Vesivirtauksen tapauksessa lämmönsiirto jäähän tapahtuu pakotetun konvektion vaikutuksesta. Paikallaan olevan veden tapauksessa sen sijaan lämmönsiirto tapahtuu luonnollisen konvektion vaikutuksesta.

Yksinkertaistetun jään sulamismallin laskenta toteutettiin numeerisella laskennalla. Numeerisella laskennalla ei voida saavuttaa täydellisiä matemaattisia ratkaisuja, mutta numeerista laskentaa voidaan hyödyntää, kun analyttinen ratkaisu ei ole mahdollinen tai sen ratkaiseminen on haastavaa. Huolellisesti luotu numeerinen malli vastaa usein riittävän hyvin todellisuutta. Numeerisella laskennalla voitiin lisäksi tässä tapauksessa ottaa huomioon konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen  $h_c$  (W/(mK)) muutokset sulamisen ja ajan funktiona. Lisäksi numeerisella laskennalla voitiin huomioida jääkappaleen massan ja siten lämmönsiirtoalan muutos ajan funktiona.

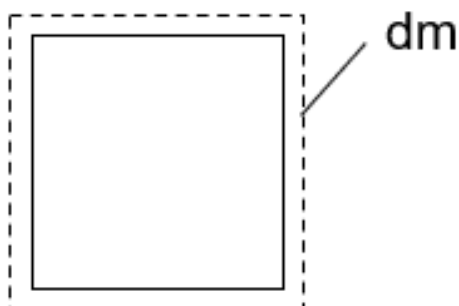
Jään sulamista kuvaavaa laskentamallia luodessa tehtiin seuraavat oletukset:

- 1) Mallinnettu jääkappale on muodoltaan kuutio.
- 2) Lämpö jäähän siirtyy ainoastaan vesivirtauksesta pakotetun konvektion vaikutuksesta ja paikallaan olevasta vedestä luonnollisen konvektion vaikutuksesta.
- 3) Lämmönsiirtoala on veden virtauksen tai altaassa olevan veden peittämä alue, joka oletetaan molemmissa tapauksissa koostuvan koko kuution pinta-alasta (Kuva 20).



**Kuva 20 Lämmönsiirtoala vesivirtauksesta ja paikallaan olevasta vedestä jäähän.**

- 4) Jää on isoterminen.
- 5) Koko jääkappaleen lämpötilan asettuessa lämpötilaan  $0\text{ °C}$  jääkappale alkaa sulaa.
- 6) Kuutio sulaa tasaisesti joka sivulta ajanhetkessä  $dt$  (Kuva 21).

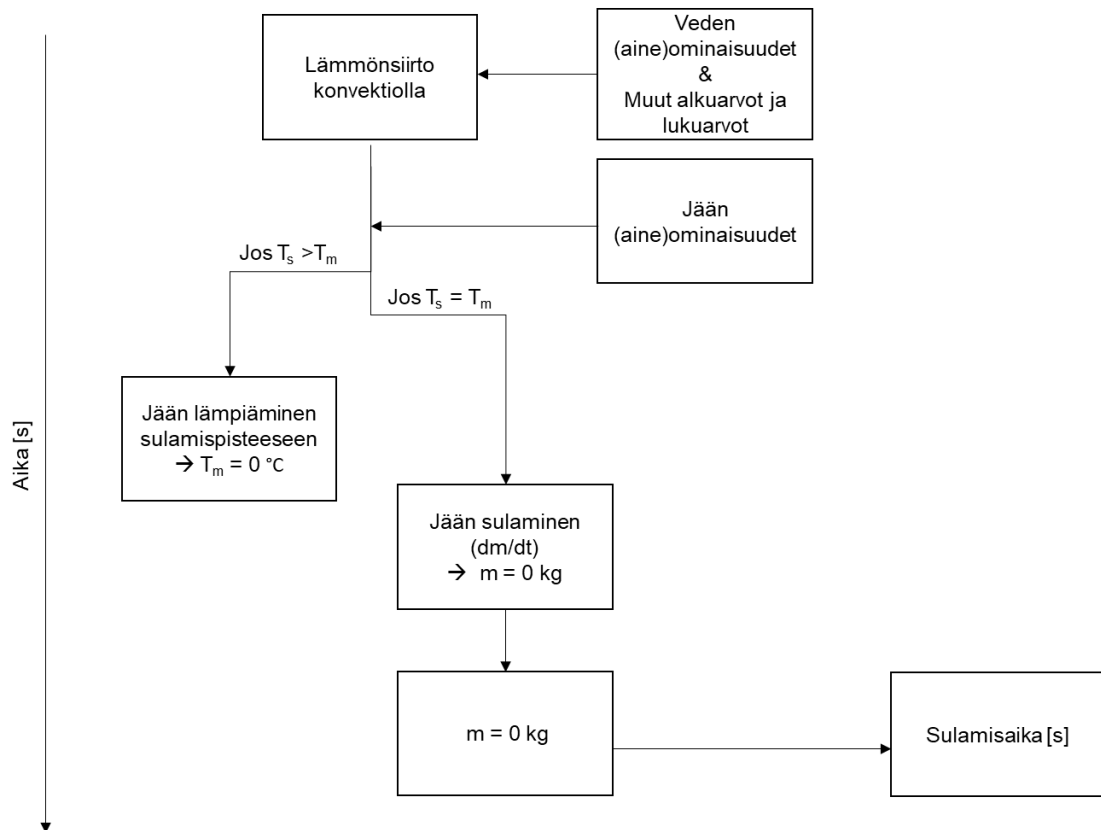


**Kuva 21 Sulava massa  $dm$  ajanhetkessä  $dt$ .**

- 7) Karakteristinen mitta  $L_c$  on särmän pituus, joka pienenee sulamisen funktiona edellisen oletuksen ja kuvan (Kuva 21) mukaisesti.
- 8) Vesivirtauksen nopeus sen osuessa jään pinnalle pysyy vakiona.
- 9) Vesivirtauksessa lämpöä jäähän siirtävä vesi ei jäähy jään vaikutuksesta vaan sen lämpötila pysyy vakiona.

10) Jään pinnan muoto alkaa sen sulaessa kaarevoitua/pyöristyä (Hao & Tao, 2001), jonka vuoksi käytetään Nusseltin luvun korrelaatioita pallonmuotoiselle kappaleelle.

Laskenta voitiin tehdä numeerisesti seuraavasti hyödyntämällä edellä esitettyjä oletuksia, luvussa 4 esitettyjä kaavoja, ominaisuuksia jäälle ja vedelle sekä muita alkuarvoja ja lukuarvoja (Kuva 22).



**Kuva 22 Jään sulattamisen laskenta.**

Laskennassa hyödynnettiin seuraavia vakiona pysyviä lukuarvoja (Taulukko 2).

**Taulukko 2 Käytetyt, lukitut alkuarvot**

Aineominaisuus	Lukuarvo
Sulamislämpö, $l$	334 000 J/kg
Paine, $p$	1 bar
Jään sulamispiste, $T_m$	0 °C (273,15 K)

Lisäksi laskennassa hyödynnettiin seuraavia arvoja ja aineominaisuuksia, jotka voitiin valita laskentatilanteen mukaisesti. Nämä ovat esitetty seuraavaksi (Taulukko 3).



**Taulukko 3 Käytetyt, muutettavissa olevat aineominaisuudet ja alkuarvot**

Aineominaisuus/ Alkuarvo	Yksikkö
Jään alkulämpötila, $T_{s,0}$	°C (K)
Veden lämpötila, $T_{\infty}$	°C (K)
Jääkuution massa alkutilanteessa, $m_0$	kg
Kuution särmän pituus alkutilanteessa, $L_0$	m
Tilavuusvirta, $\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s
Putken halkaisija, $d_p$	m
Aika-askel, $dt$	s

Kokeellisen osuuden jääkappaleiden ominaisuuksien perusteella käytettiin numeerisen mallin tulosten esittämiseen alaluvussa 6.1 vertailevuuden vuoksi samoja alkuarvoja edellisessä taulukossa (Taulukko 3) esitetyille aineominaisuuksille ja alkuarvoille. Nämä alkuarvot on esitetty seuraavaksi (Taulukko 4).

**Taulukko 4 Käytetyt alkuarvot ja aineominaisuuksien alku- ja lukuarvot verrattessa kokeellista osuutta numeeriseen mallin.**

Aineominaisuus/ Alkuarvo	Paikallaan oleva vesi	Vesivirtaus
Jään alkulämpötila, $T_{s,0}$	-7 °C	-6 °C
Veden lämpötilan vaihteluväli, $T_{\infty}$	0,5–16 °C	0,5–16 °C
Jääkuution massa alussa, $m_0$	0,011 kg	0,008 kg
Kuution särmän pituus alkutilanteessa, $L_0$	0,023 m	0,021 m
Tilavuusvirta, $\dot{V}$	-	4,4 * 10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s
Putken halkaisija, $d_p$	-	0,012 m
Aika-askel, $dt$	1,00 s	0,20 s

Alaluvuissa 6.2 ja 6.3 esitetyissä numeerisen mallin tuloksissa käytettiin toisiaan vastaavia jään ominaisuuksia ja alkuarvoja vertailtavuuden vuoksi. Nämä ovat esitetty alla (Taulukko 5). Vastaavia arvoja hyödynnettiin lisäksi sulatuslaitoksen dimensioinnissa ja konfiguraation määrittämisessä alaluvuissa 6.4 ja 6.5. Alkuarvot ovat osittain peräisin Hirvosen (2022) diplomityössä esisuunnittelemaista laitoksesta, kuten jään lämpötila, ja osittain kokeellisessa osuudessa hyväksi havaituista lukuarvoista.

**Taulukko 5 Käytetyt alkuarvot ja aineominaisuuksien alku- ja lukuarvot verrattessa kokeellista osuutta numeeriseen malliin.**

Aineominaisuus/ Alkuarvo	Paikallaan oleva vesi	Vesivirtaus
Jään alkulämpötila, $T_{s,0}$	-1 °C	-1 °C
Veden lämpötilan vaihteluväli, $T_\infty$	0,5–16 °C	0,5–16 °C
Jääkuution massa alussa, $m_0$	0,010 kg	0,0010 kg
Kuution särmän pituus alkutilanteessa, $L_0$	0,022 m	0,022 m
Tilavuusvirta, $\dot{V}$	-	$4,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Putken halkaisija, $d_p$	-	0,012 m
Aika-askel, $dt$	1,00 s	0,20 s

Mallin laskenta toteutettiin numeerisen laskennan tavoin aika-askeleittain, jolloin riittävän pienellä aika-askeleella voidaan tarvittaessa hyödyntää edellisen aika-askeleen lukuarvoja. Hyödyntämällä kaavoja 7 ja 8 voitiin kirjoittaa seuraavasti:

$$h_c A (T_\infty - T_s) = m c_{p,s} \frac{dT}{dt} + l \frac{dm}{dt}, \quad (30)$$

Jokaiselle aika-askeleelle pätevä yhtälö voitiin kirjoittaa siten seuraavasti:

$$h_{c,i} A (T_\infty - T_s^i) = m c_{p,s} \frac{(T_s^i - T_s^{i-1})}{dt} + l \frac{(m^{i-1} - m^i)}{dt}, \quad (31)$$

jossa alaindeksi  $s$  viittaa kiinteään,  $i$  sen hetkiseen aika-askeleeseen ja  $i - 1$  edelliseen aika-askeleeseen.

Jäälle käytettävät aineominaisuudet oletettiin vakioksi. Käytetyt lukuarvot ovat esitettyinä seuraavassa taulukossa (Taulukko 6).

**Taulukko 6 Käytettävät jään aineominaisuudet**

Aineominaisuus	Lukuarvo
Ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa, $c_{p,s}$	2 100 J/kgK
Lämmönjohtavuus, $k_s$	2,22 W/(mK)
Tiheys, $\rho_s$	920 kg/m <sup>3</sup>

Oletuksien 4) ja 5) mukaisesti lämmönsiirto kohdistuu ensin ainoastaan nostamaan jään pintalämpötilan  $T_s$  arvoon 0 °C, jolloin sulamisnopeus  $\frac{dm}{dt}$  (kg/s) on 0. Seuraavan aika-askeleen jään lämpötila  $T_s^{i+1}$  (K) voitiin laskea seuraavasti hyödyntäen aika-askeleen lämpötilan muutosta aikayksikköä kohden  $\frac{dT}{dt}$  (K/s) seuraavasti:

$$T_s^{i+1} = T_s^i + \frac{dT}{dt} dt. \quad (32)$$

Kun sulamislämpötila  $T_m$  on saavutettu, on  $\frac{dm}{dt} > 0$  ja  $\frac{dT}{dt} = 0$ , sillä on voimassa  $T_s^i = T_s^{i-1}$ .

Seuraavan aika-askeleen jääkappaleen massa  $m^{i+1}$  (kg) voitiin laskea seuraavasti:

$$m^{i+1} = m^i - \frac{dm}{dt} dt. \quad (33)$$

Massan muutoksen avulla lasketun uuden massan avulla voitiin laskea jään tiheyden lukuarvoa käyttäen uusi tilavuus  $V^{i+1}$  (m<sup>3</sup>) seuraavasti:

$$V^{i+1} = \frac{m^{i+1}}{\rho_s} \quad (34)$$

ja sen jälkeen uusi särmän pituus  $L$  (m) seuraavasti:

$$L^{i+1} = \sqrt[3]{V^{i+1}}. \quad (35)$$

Särmän pituuden avulla voitiin laskea aika-askelittain lämmönsiirtopinta-ala  $A$  [m<sup>2</sup>] seuraavasti:

$$A^{i+1} = 6(L^{i+1})^2. \quad (36)$$

Konvektiiviset lämmönsiirtokertoimet  $h_{c,i}$  ajanhetkellä  $i$  voitiin määrittää hyödyntämällä seuraavia aineominaisuuksia, jotka voitiin laskea x-steamien avulla vesivirtauksen lämpötilassa  $T_\infty$  (°C) ja paineessa  $p$  (bar). Lisäksi hyödynnettiin karakteristisena mittana särmän pituutta  $L_i$  (m) ja putoamiskiiktyvyyttä  $g$  (m/s<sup>2</sup>). Veden tilavuuden laajenemiskerroin  $\beta$  (1/K) määritettiin vakioksi laskemalla keskimääräinen lukuarvo hyödyntäen korrelaatiota lähteestä (Zhutovsky & Kovler, 2015).

**Taulukko 7 Veden aineominaisuuksien määrittäminen x-steamistä lämpötilan ja paineen funktioina sekä muut vakiona säilyvät lukuarvot konvektiivista lämmönsiirtokerrointa määritettäessä.**

Aineominaisuus	Yksikkö
Veden tiheys, $\rho_l$	kg/m <sup>3</sup>
Dynaaminen viskositeetti, $\mu_l$	Pa s
Prandtin luku, $Pr_l$	-
Lämmönjohtavuus, $k_l$	W/(mK)
Veden tilavuuden laajenemiskerroin, $\beta$	$5,27 \cdot 10^{-5}$ 1/K
Putoamiskiiktyvyys, $g$	9,81 m/s <sup>2</sup>

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin voitiin määrittää vesivirtauksen tapauksessa hyödyntäen kaavoja 9,10,12 ja 13 eri ajanhetkillä. Tilavuusvirran  $\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/s) avulla voitiin laskea virtauksen nopeus  $U$  (m/s) putken päästä seuraavasti:

$$U = \frac{\dot{m}}{\rho_l A_p} = \frac{\dot{V}}{A_p}, \quad (37)$$

jossa  $\dot{m}$  on vesivirtauksen massavirta (kg/s),  $\rho_l$  nesteen tiheys (kg/m<sup>3</sup>) ja  $A_p$  putken sisäpinta-ala (m<sup>2</sup>), joka voidaan määrittää putken sisähalkaisijan  $d_p$  (m) avulla.

Edellä määritetty virtausnopeus  $U$  viittaa putken päästä lähtevään virtausnopeuteen. Kuitenkin lämmönsiirtoa määritettäessä kaavassa 12 on otettava huomioon ensinnäkin, että virtausnopeus kiihtyy 10 cm:n matkalla gravitaation vaikutuksesta ja toisaalta hidastuu ilmanvastuksen vaikutuksesta. Lisäksi on otettava huomioon, että todennäköisesti virtaus jään pinnalla  $U_\infty$ , (m/s), jota käytetään määritettäessä Reynoldsin lukua kaavalla 12, on todennäköisesti pienempi kuin virtauksen nopeus 10 cm:n etäisyydellä, sillä nopeus todennäköisesti hidastuu virtauksen kohdatessa jään pinnan.

Gravitaation vaikutusta vesivirtaukseen voitiin määrittää myös numeerisella laskennalla, jolloin vesivirtauksen kiihtyminen oli mahdollista laskea aika-askeleittain seuraavasti:

$$U^i = U^{i-1} + g * dt. \quad (38)$$

Ilmanvastus havaittiin niin pieneksi verrattuna gravitaation vaikutukseen, joten se jätettiin tässä laskennassa huomioimatta.

Jään pinnalla olevaa nopeuden suhdetta vesivirtaukseen ei voida määrittää tässä laskennan avulla. Nopeuksien suhdetta pyritään havainnoimaan kokeellisen osuuden tuloksilla.

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin määritettiin hyödyntämällä kaavaa 9. Pakotetulle konvektiolla käytettiin kahta eri korrelaatiota Nusseltin lukua määritettäessä alaluvun 6.1 tapauksessa, sillä vastaavanlaiselle tilanteelle ei kirjallisuudessa ole esitetty suoraan soveltuvaa korrelaatiota. Määrityksessä hyödynnettiin kaavoja 15 ja 16, jotka riippuvat Reynoldsin ja Prandtin luvuista. Kahden eri korrelaation avulla pyrittiin havainnoimaan, miten mallin tulokset eroavat toisistaan eri korrelaatioilla, ja mikä korrelaatioista soveltuisi tilanteeseen parhaiten vertaamalla eri korrelaation ja kokeellisen osuuden tuloksia toisiinsa. Alaluvussa 6.1 parhaimmaksi havaittua Nusseltin luvun korrelaatiota käytettiin alalukujen 6.3 ja 6.5 tulosten esittämisessä.

Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin paikallaan olevan veden tapauksessa määritettiin eri ajanhetkillä hyödyntäen kaavoja 9,11,13 ja 14. Luonnolliselle konvektiolle käytettiin nel-

jää eri Nusseltin luvun korrelaatiota esittäessä alaluvun 6.1 tuloksia, sillä kirjallisuudessa ei aivan vastaavanlaisille tilanteille ole esitetty suoraan soveltuvaa Nusseltin luvun korrelaatiota. Usean korrelaation avulla pyrittiin havainnoimaan, miten mallin tulokset eroavat toisistaan eri korrelaatiolla, ja mikä korrelaatioista soveltuisi tilanteeseen parhaiten vertaamalla eri korrelaation ja kokeellisen osuuden tuloksia toisiinsa. Nusseltin lukua määritettäessä hyödynnettiin kaavoja 17–21, jotka riippuvat Reynoldsin, Rayleighin, Grashoffin ja Prandtlin luvuista. Alaluvussa 6.1 parhaimmaksi havaittua Nusseltin luvun korrelaatiota käytettiin alalukujen 6.2 ja 6.4 tulosten esittämisessä.

## 5.6 Jään sulatustestit

Tutkimuksen jään sulatustestit edustavat tutkimuksen kokeellista osuutta. Kokeellisen osuuden tarkoituksena oli havainnoida yksinkertaistetun entalpiametodiin ja numeeriseen laskentaan perustuvalla jään sulamismallilla saatujen tulosten suhdetta todellisuudessa saavutettaviin tuloksiin. Kokeellisen osuuden tulosten ja silmämääräisten arvioiden mukaan mallia voitiin luotettavuuden arvioinnin lisäksi kehittää vastamaan todellista jään sulamiskäyttäytymistä.

Kokeellisella osuudella mitattiin jään sulamisaikaa eri kokoisilla jääkappaleilla ja lämpötiloilla paikallaan olevalla vedellä ja vesivirtauksella. Kokeen aikana oli mahdollista myös tehdä silmämääräisiä havaintoja, kuten havainnointia kuution sulamisesta eri tilavuusvirroilla vesivirtauksen tapauksessa. Tutkimuksen kokeellinen osuus suoritettiin Ramboll Finland Oy:n Ympäristögeotekniikan yksikön laboratoriossa sekä vesistöissä. Huoneen lämpötilan vaikutuksesta aiheutuvaa lämmönsiirtoa ei otettu huomioon verratessa tuloksia malliin.

Kokeellisen osuuden aikana mitattavat suureet on esitetty alla (Taulukko 8). Taulukossa on kuvattu lisäksi suureen yksikkö, mitatun suureen lukuarvon lähde, mittausajankohta sekä peruste suureen mittaukselle. Mitattujen suureiden lisäksi kokeessa tehtiin silmämääräisiä havaintoja erityisesti siitä, miten jääkappaleen pinta-ala ja muoto muuttuivat sulamisen funktiona, jotta mallissa määritettyä lämmönsiirtoalaa voitiin kehittää vastamaan paremmin todellista alaa. Lisäksi muut silmämääräiset havainnot kirjattiin ylös.

**Taulukko 8 Kokeellisessa osuudessa mitattavat suureet.**

Mitattava suure	Yksikkö	Lukuarvon lähde	Mittausajan-kohta	Peruste suureen mittaukselle
Jääpalan pintalämpötilan alkuarvo	°C	Pakastimen sisälämpötila mittaaminen lämpömittarilla	Ennen sulamiskokeen aloittamista	Numeerisen laskentamallin tulosten luotettavuuden arviointi ja kehittäminen
Veden lämpötila	°C	Vesiastian veden lämpötilan mittaaminen lämpömittarilla	Koko sulatuskokeen ajan	Veden lämpötilan vakiona pysymisen varmistaminen, Numeerisen laskentamallin tulosten luotettavuuden arviointi ja kehittäminen
Jääkuution massa	kg	Vaaka	Ennen sulamiskokeen aloittamista	Massaltaan poikkeavien jääpalojen poisto koetilanteesta, Numeerisen laskentamallin tulosten luotettavuuden arviointi ja kehittäminen
Tilavuusvirta	m <sup>3</sup> /s	Vesivirtauksen mittaaminen hyödyntäen mitta-astiaa ja sekuntikelloa	Ennen sulamiskokeen aloittamista	Numeerisen laskentamallin tulosten luotettavuuden arviointi ja kehittäminen
Sulamisaika	s	Sekuntikellolla	Sulamiskokeen käynnistyksestä ja jään sulamisen loppuun asti	Numeerisen laskentamallin tulosten luotettavuuden arviointi ja kehittäminen

Jääpalat jäädytettiin koetta varten pakastimessa, jonka lämpötilan perusteella jään pintalämpötilan alkuarvo määritettiin. Kokeessa käytettiin kahdenkokoisia kuutionmuotoisia jääpaloja. Pienemmillä kuutiolla suoritettiin suurin osa kokeista. Suurempia kuutioita käytettiin havainnoimaan koon vaikutusta sekä sitä, miten jään massa muuttuu ajan funktiona mallin luotettavuuden arvioimiseksi. Kuutioita sulatettiin useita samalla lämpötilalla tai vaihtoehtoisesti tiheästi lämpötilan funktiona. Lisäksi käytettiin vielä suurempia kappaleita (0,920 kg) havaitsemaan mallin luotettavuutta edelleen suuremmalla koolla.

Koe aloitettiin valmistelemalla koetilanne ennen kuin jääkuutio poistettiin pakastimesta. Astiaan, jossa oli sulattamiseen käytettävä vesi, laitettiin lämpötilamittari, jolla veden alkulämpötila mitattiin ja lämpötilan vakiona säilymistä kokeen aikana seurattiin. Jääkuutiot punnittiin laboratorion vaa'alla välittömästi pakastimesta ottamisen jälkeen. Suurien jääkappaleiden massat laskettiin tiheyden ( $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$ ) ja tilavuuden perusteella.

Sulatuskoe aloitettiin kuutioiden tapauksessa punnitsemisen jälkeen ja ympyrälieriön tapauksessa välittömästi pakastimesta oton jälkeen. Sulamisaikaa mitattiin sekuntikellolla, joka käynnistettiin, kun jääkappale asetettiin vesivirtaukseen tai paikallaan olevaan veteen. Sekuntikello pysäytettiin, kun jääkappale oli kokonaan sulanut.

Paikallaan olevan veden koetilanne toteutettiin upottamalla jääkappale vesiastiaan, jossa on runsaasti vettä jääkappaleen tilavuuteen nähden. Suurin kappale upotettiin vesistöön, jotta voitiin olla varma, että vettä oli riittävästi jääkappaleen tilavuuteen nähden. Sekä vesiastian että vesistön tapauksessa kappale upotettiin pakotetusti kokonaan veden pinnan alle. Vesistön tapauksessa jääkappale asetettiin keskikohtaan korkeussuunnassa. Vesiastian tapauksessa jääkappale asetettiin sekä korkeus- että leveysuunnassa keskelle.

Vesivirtauksessa sulattaminen toteutettiin hyödyntämällä laboratoriossa olevaa pumpua, jolla vesiastiasta pumpattiin vettä 10 cm:n etäisyydellä jääkappaleesta. Jääkappale asetettiin seulan päälle, jonka läpi vesi pumpattiin. Seulan läpi pumpattu vesi palautettiin takaisin vesiastiaan, jonka lämpötilaa seurattiin koetilanteen ajan. Tilavuusvirran vaikutusta sulamisaikaan tutkittiin käyttäen eri tilavuusvirtoja. Samalla havainnoitiin tilavuusvirran muutoksen vaikutuksia jääkappaleen sulamiseen myös silmämääräisesti.

## 5.7 Numeerisen sulamismallin kehittäminen

Yksinkertaista numeerista jääkappaleen sulamismallia kehitettiin kokeellisen osuuden havaintojen mukaisesti. Paikallaan olevassa vedessä sulattamisessa havaittiin kokeellisessa osuudessa kuution lähestyvän sulamisen funktiona pallonmuotoista kappaletta (Kuva 23).



**Kuva 23** Kuution muodon muuttuminen konversion funktiona paikallaan olevassa vedessä.

Tämä otettiin nyt mallia kehitettäessä huomioon pinta-alaa korjaavalla kertoimella  $z$ , jonka arvo on välillä 0–1. Korjauskertoimen tarkoituksena on tässä korjata lämmönsiirtopinta-alassa tapahtuvaa muutosta, kun kuutio konversion funktiona muuttuu pallonmuo-

toiseksi ja muodon vuoksi lämmönsiirtopinta-ala pienenee. Ilman korjauskertoimen käyttöä numeerinen malli antaa lyhyempiä sulamisaikoja kuutiolle, sillä lämmönsiirtoala on aika-askeleittain suurempi kuin, mitä lämmönsiirtopinta-ala todellisuudessa on. Korjauskerroin  $z$  (-) voidaan laskea konversion  $X$  (-) funktiona seuraavasti:

$$z(X) = z_0 + (1 - e^{-\lambda * X}) * (z_{fin} - z_0), \quad (39)$$

jossa  $z_0$  on alkuarvo korjauskertoimelle (-),  $\lambda$  muutoksen voimakkuutta kuvaava taajuuskerroin (-) ja  $z_{fin}$  lopullinen arvo korjauskertoimelle (-).

Kuution tapauksessa, jonka oletetaan muuttuvan pallonmuotoiseksi, sulamisen funktiona, voitiin korjauskerroin määrittää seuraavasti:

$$\begin{cases} z_0 = 1 \\ z(X) = z_0 + (1 - e^{-\lambda * X}) * (z_{fin} - z_0) \\ z_{fin} = \frac{A_{pallo}}{A_{kuutio}} \end{cases} \begin{matrix} X = 0 \\ 0 < X < 1, \\ X = 1 \end{matrix} \quad (40)$$

jossa pinta-ala kuutiolle  $A_{kuutio}$  (m<sup>2</sup>) voitiin määrittää seuraavasti:

$$A_{kuutio} = 6L^2 \quad (41)$$

ja pallolle ja  $A_{pallo}$  (m<sup>2</sup>) seuraavasti:

$$A_{pallo} = 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (42)$$

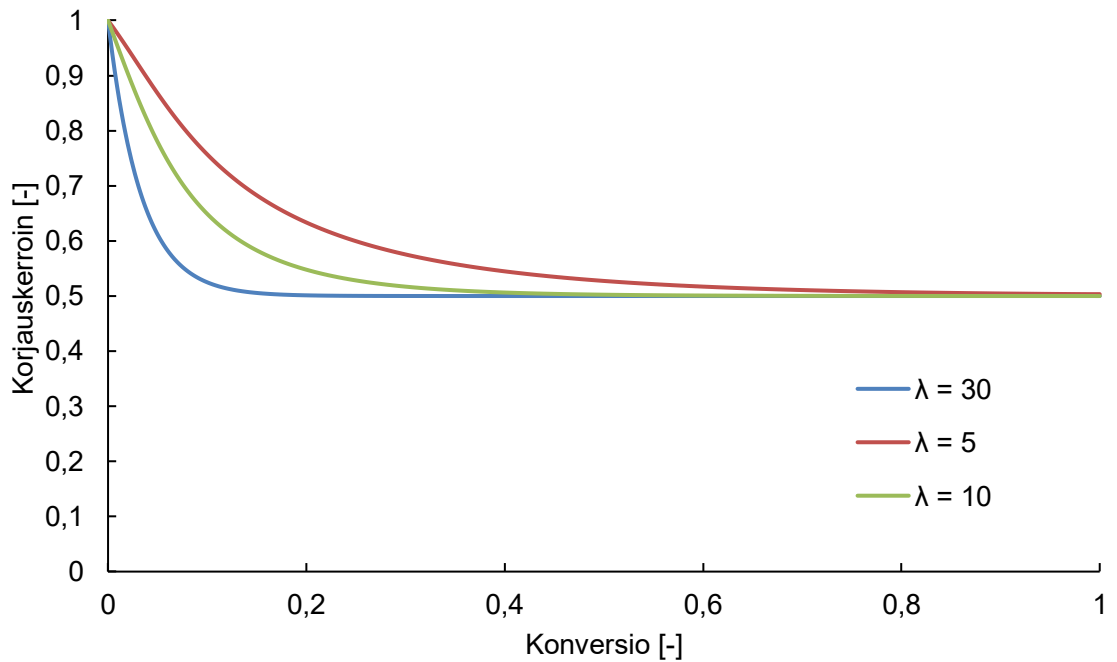
joissa  $L$  on kuution sivun pituus (m) ja  $d$  pallon halkaisija (m).

Korjauskerroin  $z_i$  otetaan aika-askeleella huomioimalla ja lisäämällä se pinta-alan kertoimeksi kaavaan 31, jolloin kaava 31 voidaan esittää seuraavasti:

$$h_c z_i A (T_\infty - T_s^i) = mc_{p,s} \frac{(T_s^i - T_s^{i-1})}{dt} + l \frac{(m^{i-1} - m^i)}{dt}, \quad (43)$$

Taajuuskertoimen arvon vaikutusta korjauskertoimen muutokseen konversion funktiona on havainnollistettu alla (Kuva 24). Korjauskertoimen muutos on voimakkaampaa taajuuskertoimen suuremmilla arvoilla. Pienemmillä arvoilla korjauskertoimen arvo lähtee pienenemään hitaammin.





**Kuva 24** Korjauskertoimen määrittäminen konversion funktiona eri  $\lambda$ :n arvoilla.

Paikallaan olevalle vedelle pinta-alan korjauskertoimeksi valittiin seuraavat alkuarvot (Taulukko 9). Arvot valittiin kokeellisen osuuden tuloksiin perustuen vastaamaan tilannetta, että kuutio muuttuu palloksi hitaasti sulamisen funktiona.

**Taulukko 9** Pinta-alan korjauskertoimen arvot paikallaan olevalle vedelle.

Suure	Paikallaan oleva vesi
Taajuuskerroin, $\lambda$	5
Pinta-alan korjauskertoimen arvo sulamisen lopussa, $Z_{fin}$	0,52

Vesivirtauksessa sulattamisen tapauksessa havaittiin kokeellisessa osuudessa, että kuutio ei sulamisen funktiona muutu pallonmuotoiseksi vaan ainoastaan reunat hieman pyöristyvät. Tämän perusteella oletetaan, että lämmönsiirtoalan muutokset johtuvat ainoastaan sulamisesta, ja että muodon muutokset eivät vaikuta lämmönsiirtoalaan.

## 5.8 Paikallaan olevassa vedessä sulattamiseen perustuvan järjestelmän konfiguraation ja vesivirtaukseen perustuvan laitoksen dimensioiden määrittäminen

Konfiguraation määrittäminen toteutettiin vertaamalla veden sulatuskykyä ja laitoksen jään tuotantomäärää sekä tuotetun jään ominaisuuksia. Veden sulatuskyvyn määrittämisessä hyödynnettiin kehitettyä numeerista mallia. Laskennassa käytetyt alkuarvot laitoksen

tuottamalle jäälle on esitetty alla (Taulukko 10). Jään ja veden aineominaisuudet ovat vastaavat kuin ne, joita käytettiin alaluvuissa 6.4 ja 6.5. Nämä esitettiin aiemmin (Taulukko 5).

**Taulukko 10 Konfiguraation määrittämisessä käytetyt lukuarvot.**

Suure	Paikallaan oleva vesi
Lämpöpumppulaitoksen lämpöteho, $\dot{Q}$	1 MW
Jään syntymisnopeus, $\frac{dm}{dt}$	6 t/h
Jään alkulämpötila, $T_{s,0}$	0 °C
Jääkuution massa alkutilanteessa, $m_0$	10 g
Kuution särmän pituus alkutilanteessa, $L_0$	0,022 m
Veden lämpötilan vaihteluväli, $T_\infty$	0,5–12 °C
Aika-askel, $dt$	1,00 s

Paikallaan olevan veden tapauksessa konfiguraatiota määritettäessä oletettiin, että jäätä tuotetaan sykleissä putkijääkoneen toimintaperiaatteen mukaisesti (ks. alaluku 2.3). Syklin jälkeen jää hävitetään vesistöön. Tarkastelu tehtiin tuntitasolla huomioiden vain saman tunnin aikana syntyneen jään sulaminen ja kertyminen.

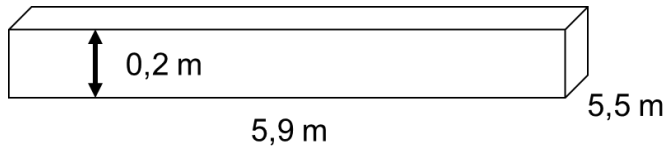
**Taulukko 11 Konfiguraation määrittämisessä käytetyt lukuarvot.**

Suure	Lukuarvo
Jäätä valmistavien koneiden lukumäärä	3
Syklejä	6
Jään tuotanto syklissä	1 t/h

Konfiguraatiota määritettäessä oletettiin, että lämpöpumppulaitos koostuu useasta jäätä valmistavasta koneesta. Hirvonen (2022) esitti, että 1 MW lämpöpumppulaitos koostuu noin 3 jäätä valmistavasta koneesta. Jos koneen jään tuotantosykli on noin 30 min, on jään tuotantosyklejä tunnin aikana yhteensä 6, jolloin yhdessä syklissä jäätä syntyy 1 t/h, kun laitos tuottaa jäätä yhteensä 6 t/h. Siten jäätä syntyy 10 min välein vesistöön ja sykliden välissä vesistö sulattaa syntynyttä jäätä. Mikäli vesistö ei kykene sulattamaan jään alle 20 min, jäätä kertyy vesistöön ja jokaisen syklin jälkeen vesistössä on jäätä yhä enemmän.

Sulatusjärjestelmän dimensiointia määritettäessä oletettiin, että jääkappaleita kasatessa sulattamista varten jääkappaleet yhdistyvät toisiinsa ja niistä muodostuu yksi suorakul-

mainen kappale. Laskentaa varten arvioitiin suorakulmaisen kappaleen massa ja dimensiot. Jääkappaleen massana pidettiin tunnin aikana syntyvän jään massaa eli 6000 kg ja dimensioiden arvioitiin olevan 0,2m x 5,9m x 5,5m, jotta lämmönsiirtopinta-ala saatiin mahdollisimman suureksi (Kuva 25).



**Kuva 25 Lämpöpumppulaitokselta tulevasta jäästä muodostuva suorakulmio ( $m= 6000 \text{ kg}$  ja dimensiot  $0,2\text{m} \times 5,9\text{m} \times 5,5\text{m}$ ).**

Suorakulmaisen jääkappaleen dimensioiden ja massan sekä veden ja jään aineominaisuuksien avulla määritettiin numeerista laskentaa ja aika-askeleittain laskemista hyödyntäen, kuten alaluvussa 5.5, edellä esitetyn suorakulmion (Kuva 25) sulamista tunnin aikana sekä tarvittavaa veden massavirtaa. Laskenta perustui siihen, että jokaisella aika-askeleella pätee seuraava yhtälö:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{jää} l = \dot{m}_{vesi} c_p \Delta T_{vesi} = h_c A \Delta T_m \quad (44)$$

jossa  $\dot{Q}$  on lämpövirta (W),  $\dot{m}_{jää}$  sulavan jään massavirta (kg/s),  $l$  latenttilämpö (J/kg),  $c_p$  veden ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa (J/(kgK)),  $\Delta T_{vesi}$  veden lämpötilan muutos (K),  $h_c$  konvektiivinen lämmönsiirtokerroin (W/(m<sup>2</sup>K)),  $A$  lämmönsiirtopinta-ala (m<sup>2</sup>) ja  $\Delta T_m$  logaritminen keskilämpötila (K). Konvektiivinen lämmönsiirtokerroin määritettiin vastaavanlaisesti kuin alaluvussa 5.5 kuvattiin hyödyntämällä Whitakerin (1972) esittämää korrelaatiota Nusseltin luvulle (Kaava 15). Konvektiivisesta lämmönsiirtokerrointa määritettäessä karakteristisena mittana käytettiin pituutta, jolle virtaus kohdistuu.

Kaavassa 44 oleva pinta-ala määritettiin sivujen kappaleen sivujen pinta-alojen summana vähentämällä kuitenkin pohjan pinta-ala. Logaritminen keskilämpötila määritettiin seuraavasti:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{vesi,alussa} - T_{jää}) - (T_{vesi,lopussa} - T_{jää})}{\ln\left(\frac{T_{vesi,alussa} - T_{jää}}{T_{vesi,lopussa} - T_{jää}}\right)}, \quad (45)$$

jossa alaindeksi alussa viittaa veden lämpötilaan, joka vesi on ennen kuin se on kosketuksissa jäähän ja lopussa, kun se on luovuttanut lämpöä jäähän ja poistuu jään pinnalta. Kaavan 44 perusteella voitiin ensin määrittää sulavan jään massavirta ensimmäisellä aika-askeleella seuraavasti:

$$\dot{m}_{jää} = \frac{h_c A \Delta T_m}{l} \quad (46)$$

Tämän perusteella voitiin määrittää veden massavirta seuraavasti:

$$\dot{m}_{vesi} = \frac{\dot{m}_{jää} l}{c_p \Delta T_v} \quad (47)$$

Tämä määritetty massavirta oletettiin samansuuruiseksi kuin ensimmäisellä aika-askeleella ja siten vakioiksi. Massanvirran vakiona olettamisesta ja jään sulamisesta johtuen vesi jäähtyy joka aika-askeleella vähemmän eli  $\Delta T_{vesi}$  pienenee jokaisella aika-askeleella. Tämä voitiin määrittää seuraavasti:

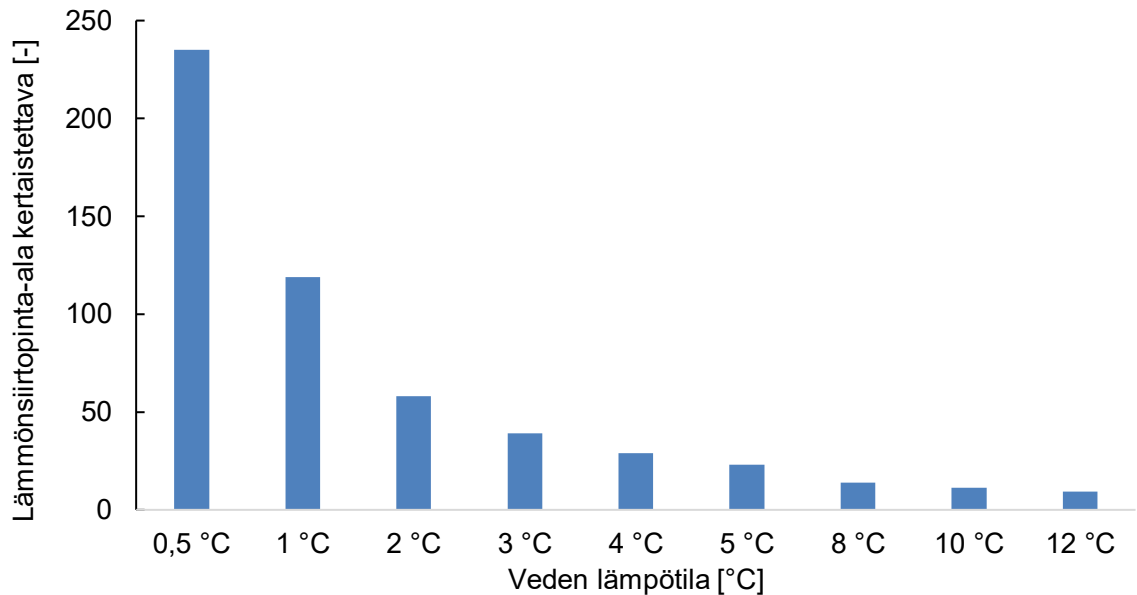
$$\Delta T_{v,i} = \frac{h_{c,i} A_i \Delta T_{m,i-1}}{\dot{m} c_p} \quad (48)$$

jossa  $i$  viittaa sen hetkiseen aika-askeleeseen ja  $i - 1$  edelliseen. Hyödyntämällä kaavaa 47 aika-askeleittain voitiin selvittää, milloin jää on kokonaan sulanut sekä tilavuuden muutos aika-askeleittain vastaavasti kuin alaluvussa 5.5 esitettiin. Tilavuuden muutoksen perusteella voitiin määrittää jokaisella aika-askeleella jääkappaleen sen hetkiset dimensiot. Laskennassa oletettiin, että tilavuuden muutoksesta 40 % aiheutuu kappaleen leveyden pienenemisestä, 40 % syvyyden pienenemisestä ja loppu muutos korkeuden pienenemisestä. Laskennassa käytettiin seuraavia arvoja (Taulukko 12). Lisäksi veden ja jään aineominaisuuksille käytettiin lukuarvoja, jotka on esitetty aiemmin (Taulukko 6 ja Taulukko 7).

**Taulukko 12 Dimensioinnin määrittämisessä käytetyt lukuarvot.**

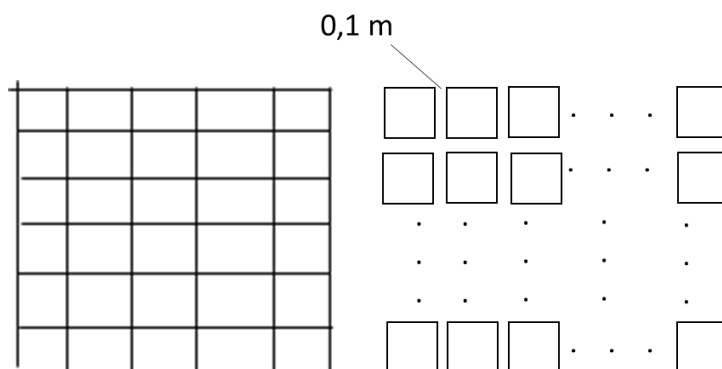
Suure	Vesivirtaus
Lämpöpumppulaitoksen lämpöteho, $\dot{Q}$	1 MW
Jään alkulämpötila, $T_{s,0}$	0 °C
Jään kokonaismassa alkutilanteessa, $m_0$	6 t
Veden lämpötilan vaihteluväli, $T_\infty / T_{vesi}$	0,5–12 °C
Veden lämpötila, $\Delta T_{vesi}$	$T_\infty - 0,5 * T_\infty$
Vesivirtauksen nopeus jään pinnalla,	0,5 m/s
Aika-askel, $dt$	0,12 s

Laskennan aikana todettiin (ks. Kuva 39), ettei jää ehdi sulaa, mikäli lämmönsiirtopinta-ala on edellä esitetyn kappaleen (Kuva 25) mukainen. Tämän vuoksi massavirran ja sulatusalueen pinta-alaa määrittämistä varten oli määritettävä, kuinka moninkertaiseksi lämmönsiirtopinta-ala on leikattava (Kuva 26) eri veden lämpötiloilla, jotta lämpöpumppulaitoksella tunnissa syntynyt jää saadaan seuraavan tunnin aikana sulatettua.



**Kuva 26 Lämmönsiirtopinta-alan moninkertaistaminen leikkaamalla edellä esitetty suorakulmainen kappale (Kuva 25) veden eri lämpötiloilla.**

Moninkertaistamisen avulla voitiin määrittää tarvittava massavirta sulattamiseen vastavasti kuten edellä määritettiin kokonaisen suuremman jääkappaleen sulattamista. Sulatusalueen maa-alueen pinta-alan tarpeen määrittämistä varten oletettiin tässä työssä, että jää leikataan pystysuuntaisesti, jotta pinta-alan tarve voidaan minimoida. Kuva 27 havainnollistaa ylhäältäpäin katsottuna, miten suorakulmainen kappale (Kuva 25) leikataan lämmönsiirtopinta-alan kasvattamisen vuoksi (vasen puoli) ja miten leikatut kappaleet asetetaan 0,1 m etäisyydelle toisistaan, jotta vesi pääsee virtaamaan (oikea puoli). Sulatusalueen pinta-alan tarve voidaan siten määrittää huomioimalla välit (0,1 m) sekä yksittäisten leikattujen jääkappaleiden yläpintojen pinta-alojen summa.



**Kuva 27 Suuren jääkappaleen leikkaaminen ja sulatusalueen pinta-alan tarpeen mitoittaminen.**

Massavirran tarpeen avulla voitiin mitoittaa pumppu sulatuslaitokselle hyödyntäen alkuarvoja, jotka on esitetty seuraavaksi (Taulukko 13).

**Taulukko 13 Pumpun mitoituksessa käytetyt lukuarvot.**

Suure	Lukuarvo
Pumpun nostokorkeus, $h_L$	5 m
Pumpun hyötysuhde, $\eta$	75 %

Pumppu mitoitettiin hyödyntäen seuraavaa kaavaa:

$$P = \frac{\dot{m}gh_L}{\eta}, \quad (49)$$

jossa  $g$  putoamiskiihtyvyyys [ $\text{m/s}^2$ ],  $h_L$  nostokorkeus [m] ja  $\eta$  pumpun hyötysuhde [-].

## 5.9 Numeerisen mallin herkkyyden ja tutkimuksen tulosten luotettavuuden arviointi

Luotettavuuden arviointi kohdistui luotuun numeeriseen sulamislaskentamalliin, tuloksiin sulatuslaitoksen dimensioinnista ja konfiguraation määrittämisestä sekä kokeelliseen osuuteen. Luotettavuuden arvioinnissa arvioitiin tutkimuksen tuloksia, numeerista mallia luotaessa tehtyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia, laskennan alkuarvoja sekä virhelähteitä niin kokeellisen osuuden kuin numeerisen mallin luomisen tapauksessa. Arviointi suoritettiin hyödyntämällä aikaisempia tutkimuksia ja kirjallisuutta, herkkyytstarkasteluita, kokeellista osuutta sekä arvioimalla virhelähteitä niin kokeellisen osuuden kuin numeerisen mallin luomisen tapauksessa.

Aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista tai kirjallisuudesta ei havaittu löytyvän aivan vastaavanlaisia koetilanteita paikallaan olevassa vedessä tai vesivirtauksessa sulattamiselle. Viitauksia vertailukelpoisiin sulamisaikoihin ei löytynyt, joten arvioitiin ainoastaan sulamiskäyttäytymisen luotettavuutta hyödyntämällä Vanierin & Tienin (1970) tutkimusta. Kirjallisuudessa esitettyjä konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvoja vedellä verrattiin numeerisen mallin vastaaviin lukuarvoihin.

Tulosten luotettavuutta voitiin arvioida myös herkkyytstarkastelujen tuloksilla, sillä ne kuvaavat numeerisen mallin, sulatuslaitoksen konfiguraation määrittämisen ja laitoksen dimensioinnin herkkyyttä eri muutoksille ja siten niiden tuloksille. Mikäli muuttuva tekijä on erityisen herkkä, voidaan sitä pitää luotettavuuden kannalta heikentävänä tekijänä. Herkkyytstarkastelut tehtiin numeerisen mallin aika-askeleelle, konversion muutokselle, massan muutokselle, jään pinnalla olevan virtausnopeuden muutokselle, veden lämpötilan muutokselle ja eri Nusseltin luvun korrelaatioiden käyttämiselle. Lisäksi dimensioinnin ja konfiguraation määrittämiselle tehtiin herkkyytstarkastelu jään syntymisnopeuden ja sulamisnopeuden muuttuessa. Tehdyt herkkyytstarkastelut on koottu alle (Taulukko 14).

**Taulukko 14 Tehdyt herkkyystarkastelut**

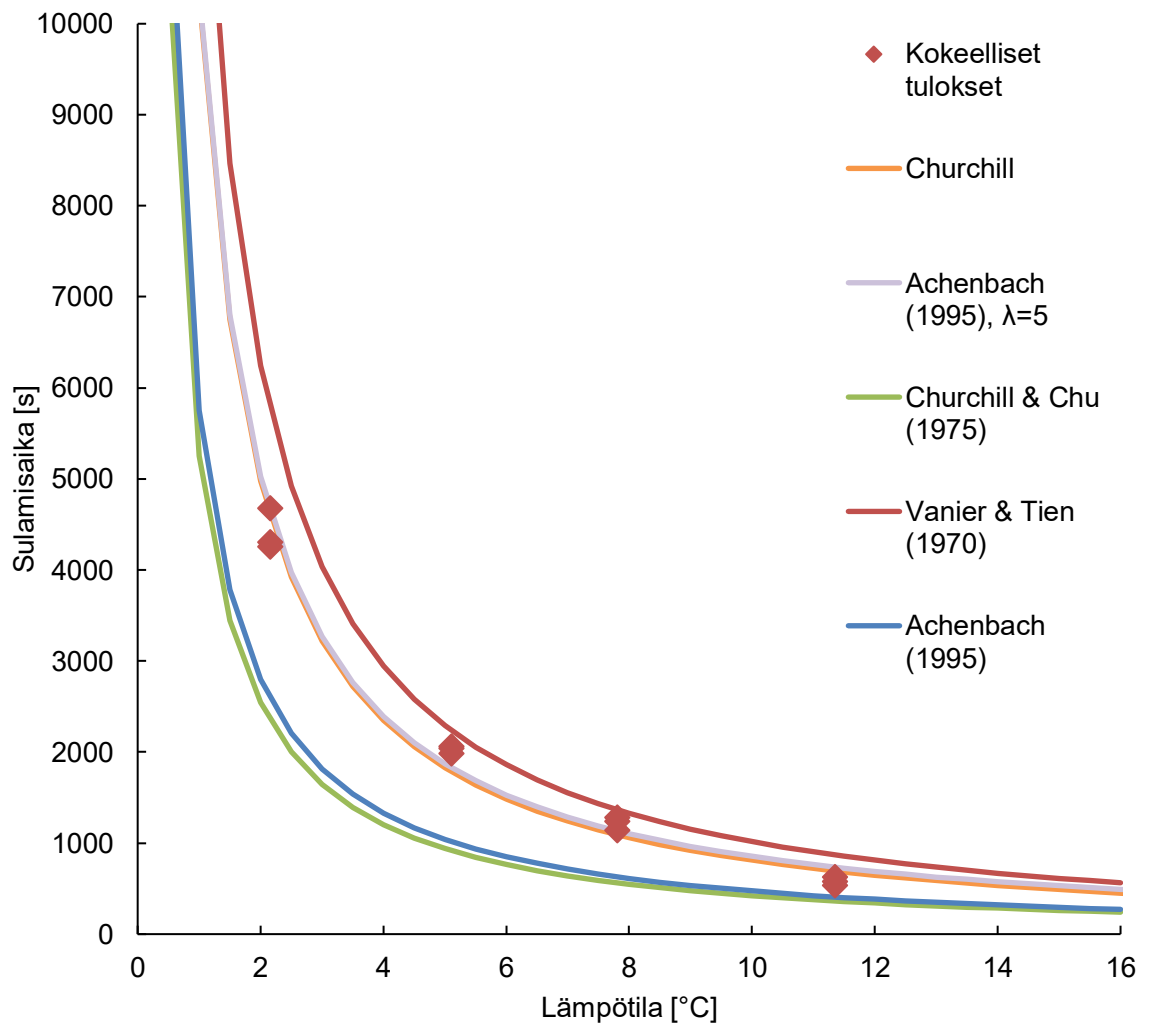
Mallin tekijä	Paikallaan oleva vesi	Vesivirtaus
Aika-askel, $dt$	+/- 20 %	+/- 20 %
Konversio, $X$	X=95 % & X=99 %	X=95 % & X=99 %
Massa, $m$	-9,5 % (-20 %) +8,5 % (+20 %)	-10,0 % (-20 %) +9,0 % (+20 %)
Virtausnopeus jään pinnalla, $U_{\infty}$	+/- 20 %	+/- 20 %
Lämpötilan vaikutus, $T$	Muuttuu voimakkaasti (ks. Kuva 43)	Muuttuu voimakkaasti (ks. Kuva 43)
Nusseltin luvun korrelaatio, $Nu$	Ero sulamisajassa verrattuna korrelaatioihin: (Vanier & Tien (1970), Achenbach (1995) & Churchill & Chu (1975))	Ero sulamisajassa verrattuna korrelaatioon Leppert (1961)
Jään syntymisnopeus, $dm/dt$	+/- 1 t/h eli +/- 16,7 %	+/- 1 t/h eli +/- 16,7 %
Jään sulamisnopeus, $-dm/dt$	+/- 10 %	+/- 10 %

Kokeellista osuutta hyödynnettiin osittain luotettavuuden arvioinnissa. Luotettavuutta voitiin arvioida verratessa mittapisteitä lämpötilan funktiona numeerisen malliin. Lisäksi tehtiin erillisiä kokeita arviomaan luotettavuutta suuremmille jääkappaleille ja korkeammalle lämpötilalla. Lisäksi tehtiin silmämääräisiä havaintoja tilavuusvirran muutoksista kuution sulamisessa. Kuution konversiota ajan kuluessa tarkasteltiin myös. Virhelähteiden arvioinnissa pyrittiin tunnistamaan merkittävimmät virhelähteet sekä arvioimaan niiden vaikutusta luotettavuuden kannalta. Virhelähteitä arvioitiin kokeellista osuuden suorittamisessa sekä arvioimalla toisaalta numeerista mallia luotaessa tehtyjä oletuksia ja yksinkertaistuksia hyödyntäen osittain kokeellista osuutta.

## 6. TULOKSET JA NIIDEN ANALYYSINTI

### 6.1 Jään sulamismallin vertailu kokeellisiin tuloksiin

Jään sulamisaikaa lämpötilan funktiona paikallaan olevassa vedessä pyrittiin selittämään sekä numeerisen laskennan että kokeellisen osuuden perusteella. Kokeellisen osuuden mittaukset sulamisajasta ja numeerisen mallin tulokset ovat esitetty vastaavalla alkuarvoilla luotettavuuden arvioinnin ja vertailevuuden vuoksi. Kokeelliset tulokset ovat yksittäisiä mittapisteitä sulamisajoista jään sulatuskokeista ja numeerisen laskennan avulla esitetty numeerinen malli jään sulamisaikaa lämpötilan funktiona on tiheällä lämpötilavälillä muodostettu funktio. Tässä käytetyt lukuarvot on esitetty alaluvussa 5.5.



**Kuva 28** Jääkuution ( $m = 11 \text{ g}$ ,  $L = 0,023 \text{ m}$ ,  $T_0 = -7 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona paikallaan olevassa vedessä.



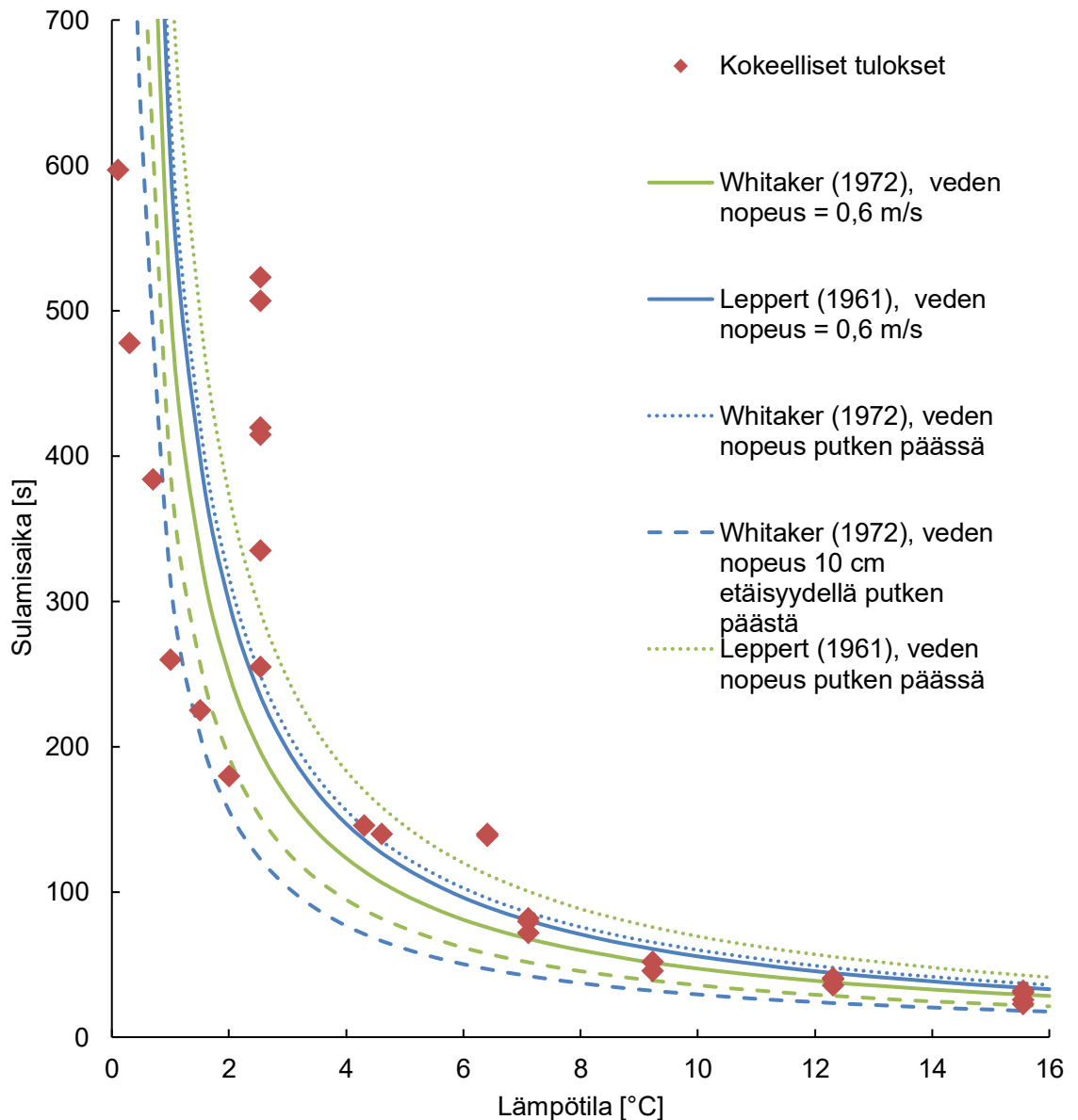
Vastaavanlaiselle lämmönsiirtolanteelle ei kirjallisuudessa ole esitetty suoraan soveltuvaa Nusseltin luvun korrelaatiota. Tämän vuoksi tarkasteltiin useampaa Nusseltin luvun korrelaatiota. Eri korrelaatioita käytettäessä erot ovat havaittavissa sulamisaikojen eroavaisuuksina, jotka säilyvät prosentuaalisesti lähes samana lämpötilan muuttuessa.

Kun kokeellisessa osuudessa havaittiin, että sulamisen vaikutuksesta jääkuutio muuttui pallonmuotoiseksi hitaasti sulamisen aikana, pyrittiin tätä ottamaan huomioon huomioiden lämmönsiirtoalan pieneminen kappaleen muodon muutoksesta johtuen. Tämän vuoksi on esitetty (Kuva 28) lisäksi muodon muutoksen huomioiva numeerinen malli Achenbachin (1995) korrelaatiolla hyödyntäen alaluvussa 5.7 esitettyjä pinta-alankorjaukskerroinfunktion arvoja, jotka on valittu kokeellisessa osuudessa havaitun muodon muutoksen ja sen nopeuden perusteella.

Churchillin korrelaatiolla luotu ja Achenbachin (1995) muodonmuutoksen huomioon otettava numeerinen malli vaikuttavat olevan kokeellisten tulosten perusteella soveltuvimpia. Nämä mallit ennustavat sulamisajan arvolle lähes samanlaisia tuloksia valitulla lämpötilavälillä ja vastaavat hyvin kokeellisen osuuden mittapisteitä. Churchillin korrelaatio ennustaa hieman lyhyempiä sulamisaikoja kuin muokattu Achenbach korkeammilla lämpötiloilla. Ero sulamisajoissa näiden välillä esimerkiksi lämpötilassa  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  on  $0,5\%$  ja kasvaa veden lämpötilan kasvaessa noin  $0,5\%$ -yksikköä lämpötilan kasvaessa  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Churchillin korrelaatiota on käytetty lopuille paikallaan olevalle vedelle muodostetuille tuloksille.

Numeerinen malli hyödyntäen Churchillin korrelaatiota ennustaa keskimäärin  $8\%$  pidempiä sulamisaikoja verrattuna kokeellisen osuuden tuloksiin. Parhaiten malli ennustaa suhteessa mittapisteisiin  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Lämpötilaväleihin  $0\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $12\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$  liittyy hieman epävarmuutta suhteessa kokeelliseen osuuteen mittapisteiden puuttuessa näiltä lämpötilaväleiltä.

Jään sulamisaikaa lämpötilan funktiona vesivirtauksessa pyrittiin selittämään sekä numeerisen laskennan että kokeellisen osuuden perusteella (Kuva 29). Kokeellisen osuuden mittaukset ja numeerisen mallin ennusteet sulamisajasta ovat esitetty vastaavanlaisilla alkuarvoilla luotettavuuden arvioinnin ja vertailevuuden vuoksi. Kokeelliset tulokset ovat yksittäisiä mittapisteitä sulamisajoista jään sulatuskokeista ja numeerisen laskennan avulla esitetty numeerinen malli jään sulamisajasta lämpötilan funktiona on tiheällä lämpötilavälillä muodostettu funktio. Tässä käytetyt lukuarvot on esitetty alaluvussa 5.4. Kokeellisessa osuudessa havaittiin, että vesivirtauksen tapauksessa jääkuution reunat pyöristyivät hieman, mutta kuutio ei muuttunut pallonmuotoiseksi sulamisen funktiona. Pyöristymisen vuoksi käytettiin pallonmuotoiselle kappaleelle olevia Nusseltin luvun korrelaatiota.



**Kuva 29** Jääkuution ( $m = 8 \text{ g}$ ,  $L = 0,021 \text{ m}$ ,  $T_0 = -6 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona vesivirtauksessa nopeudella  $0,6 \text{ m/s}$ .

Kaikki yllä esitetyt numeeriset mallit eri Nusseltin luvun korrelaatioilla ja jään pinnalla olevan vesivirtauksen nopeuksilla ennustavat sulamisajalle samaa suuruusluokkaa olevia arvoja. Alaluvun 5.7 mukaisesti arvioitiin jään pinnalla olevan virtausnopeuden suuruutta, ja havaittiin jääkappaleen pinnalla olevan nopeuden arvon  $0,6 \text{ m/s}$  noudattavan parhaiten kokeellisia tuloksia, jolloin molemmat tarkastellut Nusseltin luvun korrelaatiot vastaavat hyvin kokeellisen osuuden tuloksia korkeammalla veden lämpötilalla. Alhaisemmilla veden lämpötiloilla mallit poikkeavat kokeellisista tuloksista. Whitakerin (1972)

korrelaatio noudattaa paremmin kokeellisen osuuden mittapisteitä, kun vesivirtauksen nopeus jään pinnalla oletetaan olevan 0,6 m/s.

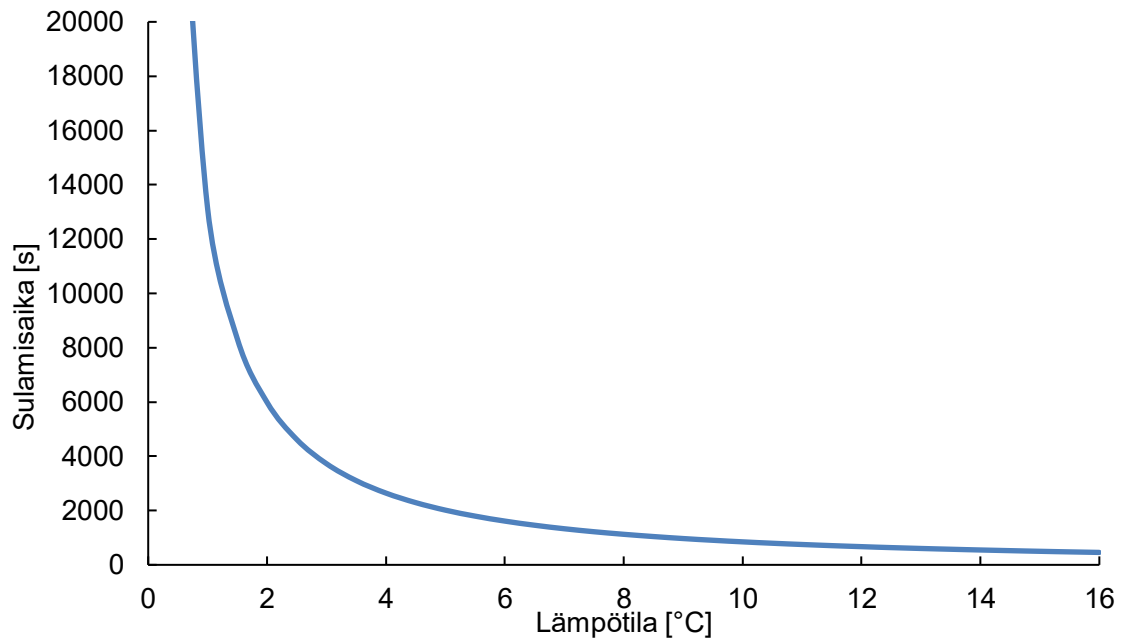
Whitakerin (1972) korrelaatiota ja nopeutta 0,6 m/s hyödynnetään muissa numeerisen mallin tuloksia liittyen vesivirtaukseen. Alhaisilla veden lämpötiloilla korrelaatiolla muodostettu numeerinen malli ennustaa pisteisiin lämpötilavälillä 0–2 °C nähden keskimäärin 80 % pidempiä sulamisaikoja ja rinnakkaismittausten (noin 2,5 °C lämpötilalla olevat mittapisteet) keskiarvoon nähden 50 % lyhyempiä sulamisaikoja. Mallin ennustavuus sulamisajasta on siten selkeästi heikko alhaisilla sulamislämpötiloilla. Kuitenkin korkeammilla lämpötiloilla malli ennuste vertautuu paremmin kokeellisen osuuden mittapisteisiin. Lämpötilavälillä 4–8 °C numeerinen malli ennustaa keskimäärin 20 % lyhyempiä sulamisaikoja ja lämpötilavälillä 4–8 °C keskimäärin 14 % pidempiä sulamisaikoja.

Ero kokeellisiin tuloksiin voi johtua monesta tekijästä. Kokeelliset tulokset sulamisajasta on määritetty sisälämpötilassa, jolloin ilman lämpötilasta aiheutuva konvektion vaikutus saattaa korostua erityisesti pidemmän sulamisajan tapauksessa. Määritettäessä veden kiihtyvyyttä numeerisesti havaittiin, että nopeus kasvaa putoamiskiihtyvyyden vuoksi merkittävästi, joten pienet erot putken etäisyydessä jään pinnasta vaikuttavat vesivirtauksen nopeuteen jään pinnalla, mikä osakseen voi selittää numeerisen mallin poikkeavuutta kokeellisen osuuden mittapisteistä. Toisaalta myös kokeellisissa tuloksissa on alhaisilla lämpötiloilla selkeästi hajontaa, mikä voi selittää myös heikompa ennustettavuutta sulamisaikaan alhaisissa lämpötiloissa. Etenkin rinnakkaismittauksissa 2,5 °C:ssa on sekä merkittävää hajontaa että merkittävä ero verrattuna tätä alhaisemmilla lämpötiloilla tehtyihin mittauksiin.

## **6.2 Jään sulamisaika paikallaan olevassa vedessä**

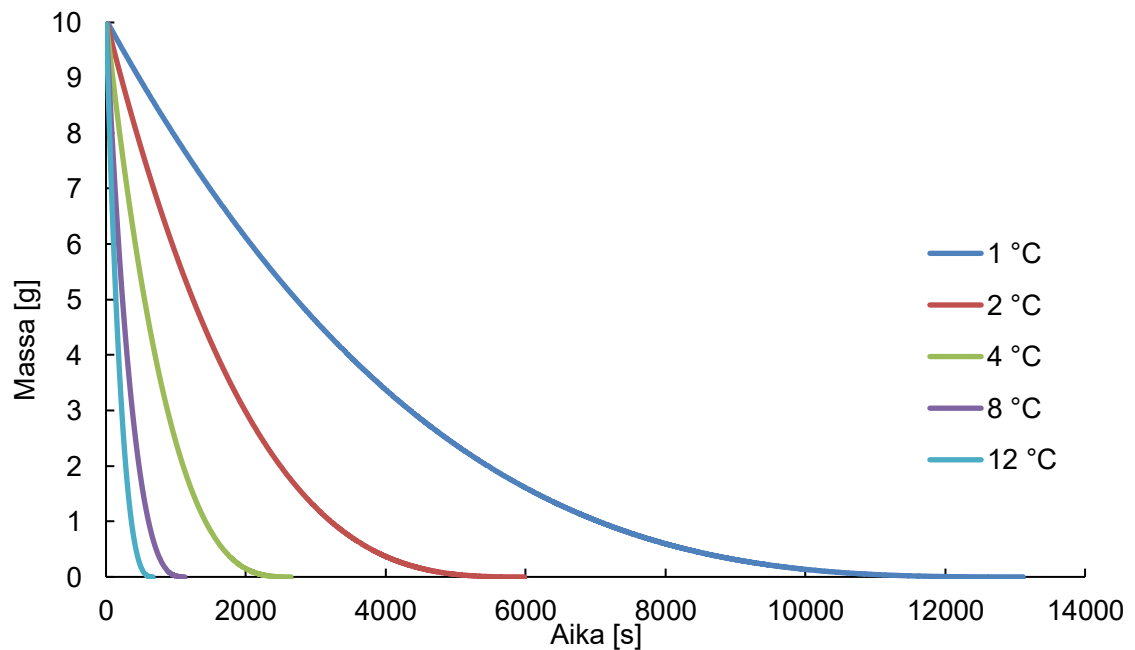
Tarkastellaan seuraavaksi lämpötilan ja massan vaikutusta sulamisaikaan sekä jääkuution sulamista ajan funktiona paikallaan olevassa vedessä. Tulokset on muodostettu käyttäen alaluvussa 5.4 esitettyä menetelmää hyödyntäen soveltuvammaksi havaittua korrelaatiota Churchill Nusseltin luvun määrittämisessä.

Lämpötilan vaikutusta sulamisaikaan paikallaan olevassa vedessä on havainnollistettu alla (Kuva 30).



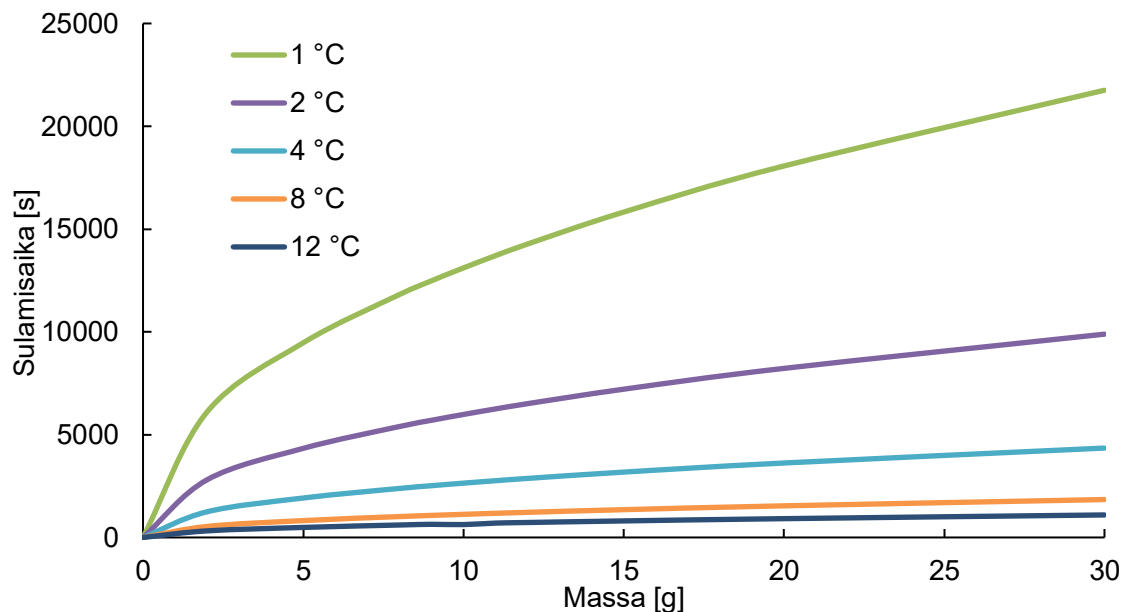
**Kuva 30 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona paikallaan olevassa vedessä.**

Matalilla veden lämpötiloilla sulamisajat ovat pitkiä, ja muutos lämpötilassa aiheuttaa voimakkaan muutoksen arvioituun sulamisaikaan. Korkeimmilla veden lämpötiloilla muutos sulamisaikaan lämpötilan muuttuessa ei ole voimakas vaan tasoittuu. Sulamisajan prosentuaalista muutosta lämpötilan muuttuessa on tarkasteltu tarkemmin herkkyystar-kasteluissa (ks. alaluku 6.6, Kuva 43). Jääkuution massan muutosta ajan funktiona on esitetty alla (Kuva 31).



**Kuva 31 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen ajan funktiona eri lämpötiloilla paikallaan olevassa vedessä.**

Jääkuution sulamispisteeseen lämpiämisen osuus on sulamisajassa niin vähäinen, ettei se erotu yllä olevassa kuvassa. Kun jään lämpötilan arvo saavuttaa sulamispisteen, jääkappale sulaa voimakkaasti kuitenkin hidastuen lämmönsiirtopinta-alan pienentyessä sulamisen funktiona. Kun jääkappaleen koko ja lämmönsiirtopinta-ala ovat pieniä, sulamisnopeus hidastuu voimakkaasti. Erityisesti jääkappaleen massan lähestyessä arvoa 0, sulamisnopeus on erittäin hidas. Paikallaan olevan veden lämpötilan kasvaessa jääkappaleen sulamisnopeuden muutokset ovat vastaavanlaiset, mutta sulamisnopeus voimistuu johtuen korkeammasta konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvosta. Eri lämpötilojen välillä on jo 1 °C tapauksessa havaittavissa sulamisajassa merkittäviä eroja alhaisien lämpötilojen välillä. Jääkuution massan muutoksen vaikutusta sulamisaikaan on esitetty alla (Kuva 32).



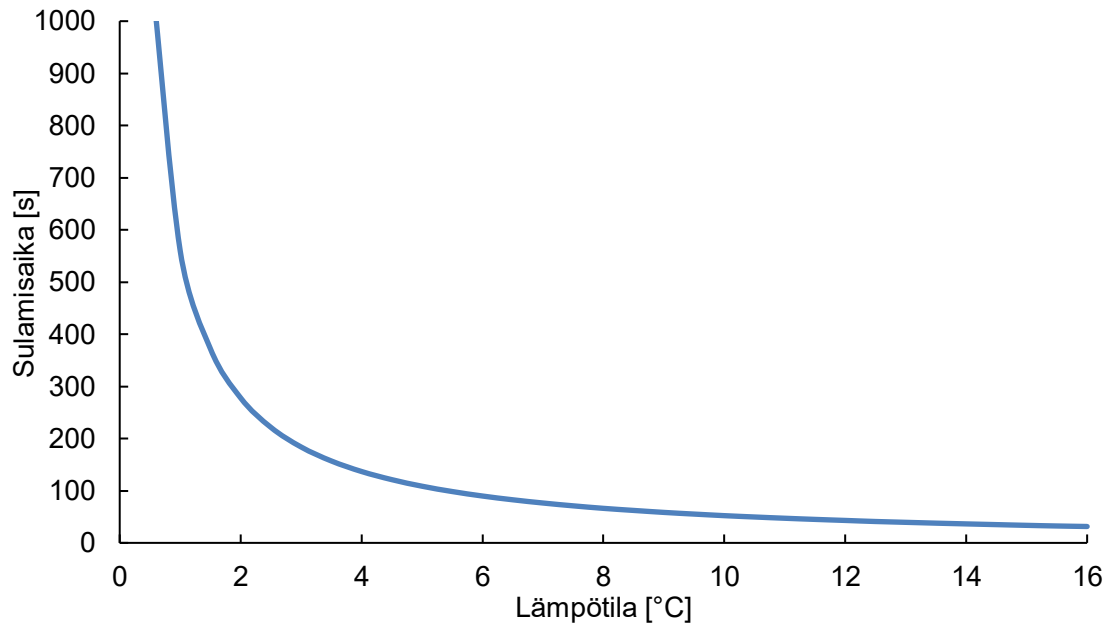
**Kuva 32 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen kuution koon funktiona eri lämpötiloilla paikallaan olevassa vedessä.**

Sulamisaika muuttuu voimakkaasti massan muuttuessa, kun jääkappaleen massa on pieni. Alhaisemmilla lämpötiloilla muutos on voimakkaampi kuin korkeimmilla lämpötiloilla. Massan ollessa hieman suurempi muutos sulamisaikaan tasoittuu. Alhaisilla lämpötiloilla muutos massassa on edelleen voimakkaampi, mutta tasoittuu silti jääkuution massan kasvaessa. Korkeimmilla lämpötiloilla muutos on vähäinen.

### 6.3 Jään sulamisaika vesivirtauksessa

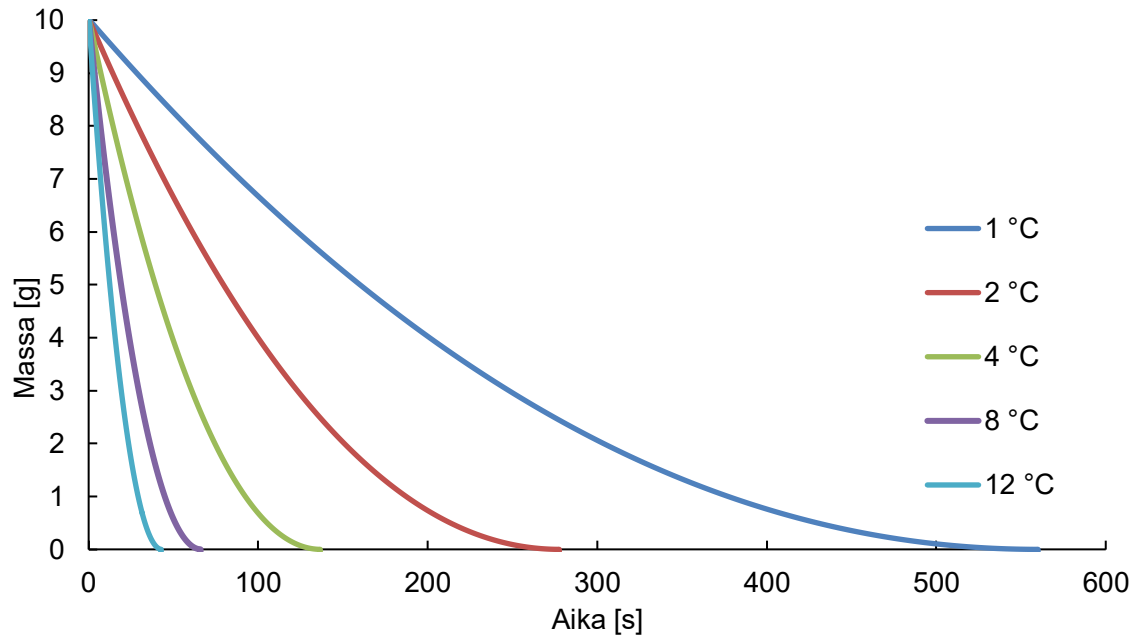
Tarkastellaan seuraavaksi lämpötilan ja massan vaikutusta sulamisaikaan sekä jääkuution sulamista ajan funktiona vesivirtauksessa. Tulokset on muodostettu käyttäen aluvussa 5.4 esiteltyä menetelmää hyödyntäen soveltuvammaksi havaittua korrelaatiota

Whitaker (1972) Nusseltin luvun määrittämisessä. Jään pinnalla olevan veden virtausnopeuden arvona käytettiin 0,6 m/s. Lämpötilan vaikutusta sulamisaikaan paikallaan olevassa vedessä on havainnollistettu alla (Kuva 33).



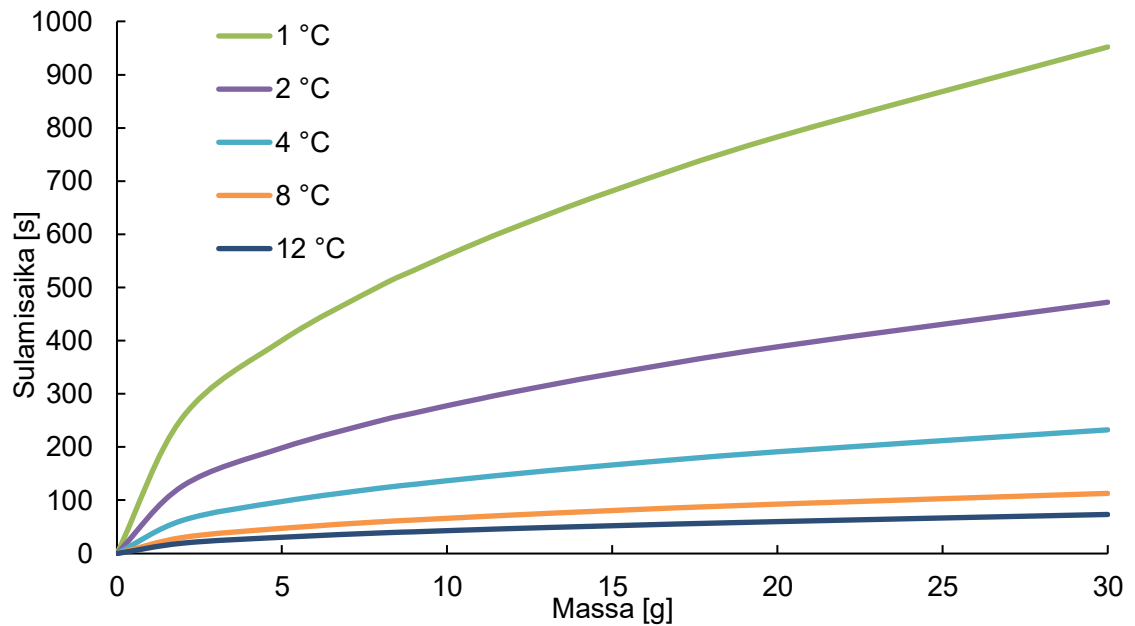
**Kuva 33 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisaika lämpötilan funktiona vesivirtauksessa.**

Sulamisajan lämpötilan funktiona voidaan havaita käyttäytyvän vastaavanlaisesti kuin paikallaan olevan vedenkin, mutta sulamisajat ovat selkeästi lyhyemmät. Voidaan havaita, että matalilla veden lämpötiloilla sulamisajat ovat pitkiä, ja muutos lämpötilassa aiheuttaa voimakkaan muutoksen arvioituun sulamisaikaan. Korkeimmilla veden lämpötiloilla muutos sulamisaikaan lämpötilan muuttuessa tasoittuu ja eikä ole voimakas. Sulamisajan prosentuaalista muutosta lämpötilan muuttuessa on tarkasteltu tarkemmin herkkyystarkasteluissa (ks. alaluku 6.6, Kuva 43). Seuraavaksi on tarkasteltu jääkuution massan muutosta ajan funktiona (Kuva 34).



**Kuva 34** Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen ajan funktiona eri lämpötiloilla vesivirtauksessa.

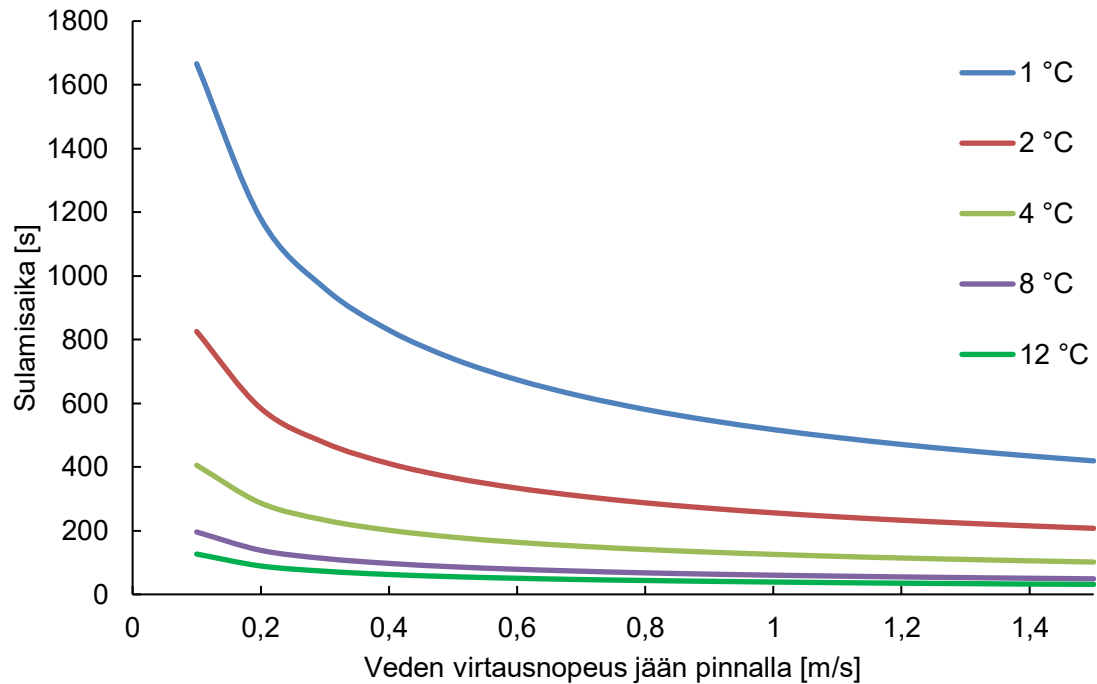
Jääkuution sulamisen käyttäytyminen vastaa paikallaan olevan veden tapauksessa sulamista, mutta kuitenkin nopeammalla sulamisnopeudella. Jääkuution sulamispisteeseen lämpiämisen osuus on sulamisajassa niin pieni, ettei se erotu yllä olevassa kuvassa. Kun jään lämpötilan arvo saavuttaa sulamispisteen, jääkappale sulaa voimakkaasti kuitenkin hidastuen lämmönsiirtopinta-alan pienentyessä sulamisen funktiona. Kun jääkappaleen koko ja lämmönsiirtopinta-ala ovat pieniä, sulamisnopeus hidastuu voimakkaasti. Erityisesti jääkappaleen massan lähestyessä arvoa 0 sulamisnopeus on erittäin hidas. Paikallaan olevan veden lämpötilan kasvaessa jääkappaleen sulamisnopeuden muutokset ovat vastaavanlaiset. Kuitenkin sulamisnopeus voimistuu johtuen korkeammasta konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvosta. Eri lämpötilojen välillä on jo  $1 \text{ °C}$  tapauksessa havaittavissa sulamisajassa havaittavissa merkittäviä eroja alhaisien lämpötilojen välillä. Seuraavaksi on esitetty jääkuution massan muutoksen vaikutusta sulamisaikaan (Kuva 35).



**Kuva 35 Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulaminen kuution koon funktiona eri lämpötiloilla vesivirtauksessa.**

Muutokset ovat vastaavanlaiset kuin paikallaan olevan veden tapauksessa. Sulamisaika muuttuu voimakkaasti massan muuttuessa, kun jääkappaleen massa on pieni. Alhaisemmilla veden lämpötiloilla muutos on voimakkaampi kuin korkeimmilla lämpötiloilla. Massan ollessa hieman suurempi muutos sulamisaikaan tasoittuu. Alhaisilla veden lämpötiloilla muutos massassa on voimakkaampi, mutta tasoittuu silti jääkuution massan kasvaessa. Korkeimmilla veden lämpötiloilla muutos on vähäinen ja tasoittuu massan kasvaessa. Vesivirtauksen tapauksessa verrattuna paikallaan olevan veden tapaukseen massan kasvaessa muutoksien voidaan havaita olevan hieman voimakkaampia ja tasoittuminen vähäisempää. Vesivirtauksen nopeuden vaikutuksen sulamisaikaan on havainnollistettu numeerisen mallin avulla seuraavaksi (Kuva 36).



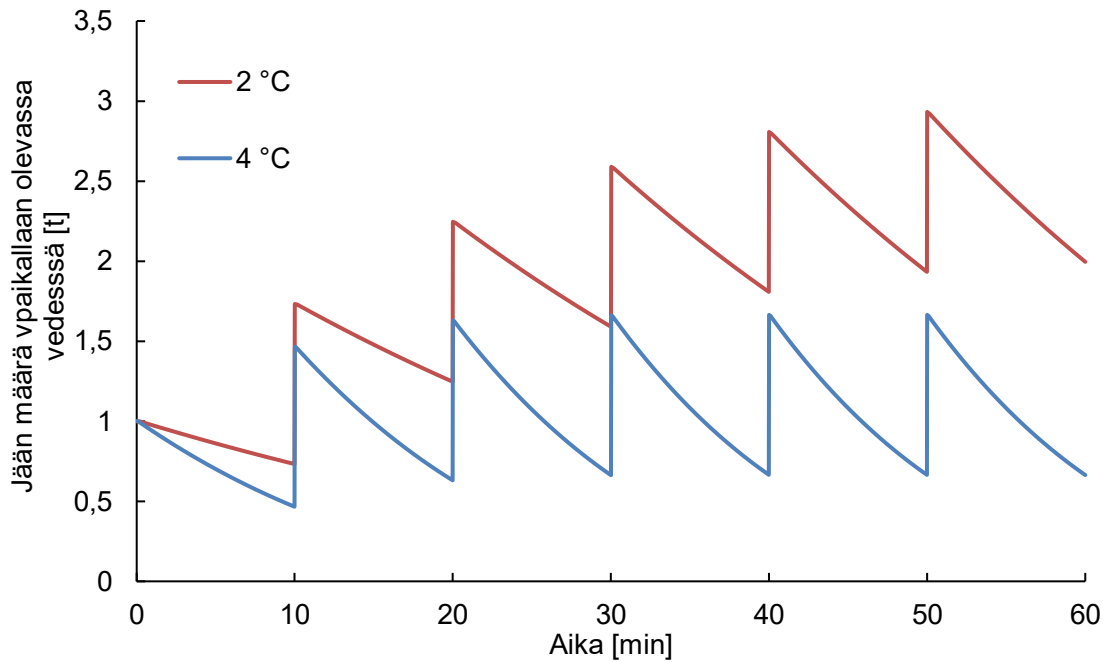


**Kuva 36** Jääkuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisaika jään pinnalla olevan vesivirtauksen nopeuden funktiona.

Alhaisilla sulamisnopeuden arvoilla sulamisaika on pitkä. Nopeuden kasvaessa sulamisaika lyhenee merkittävästi aluksi, mutta sulamisnopeuden kasvaessa sulamisajan lyheneminen tasoittuu ja muuttuu merkityksettömäksi varsinkin korkeammilla veden lämpötiloilla.

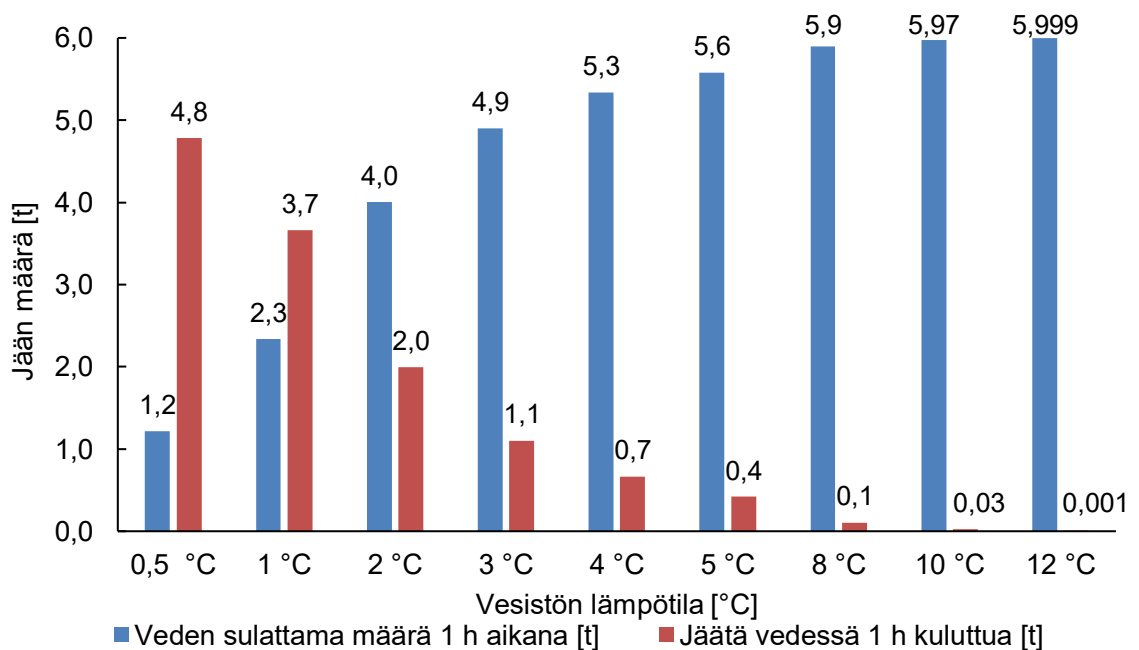
#### 6.4 Sulatusjärjestelmän konfiguraatio paikallaan olevan veden tapauksessa

Tarkastellaan seuraavaksi jään syntymisnopeuden ja sulamisnopeuden suhdetta paikallaan olevan veden tapauksessa (Kuva 37). Tarkastelu tehdään alaluvussa 5.8 kuvatun mukaisesti.



**Kuva 37 Jään määrä paikallaan olevassa vedessä ajan funktiona, kun vesistön lämpötila on 2 °C/ 4°C, kun jäätä syntyy 6 t/h.**

Jäätä syntyy 20 minuutin välein vesistöön 1 t lisää, jonka jälkeen paikallaan olevaan veteen juuri syntynyt jää sulaa. Alhaisilla lämpötiloilla jäätä kertyy veteen, sillä vesi ei ehdi sulattaa kertynyttä jään määrää ennen kuin jäätä syntyy lisää. Jään kertymisen määrää ja veden sulatuskykyä yhden tunnin aikana eri veden lämpötiloilla on havainnollistettu tarkemmin alla (Kuva 38). Veden sulattamassa määrässä tunnin aikana ei ole otettu huomioon aikaisemmin vedessä olevan jään sulamista.

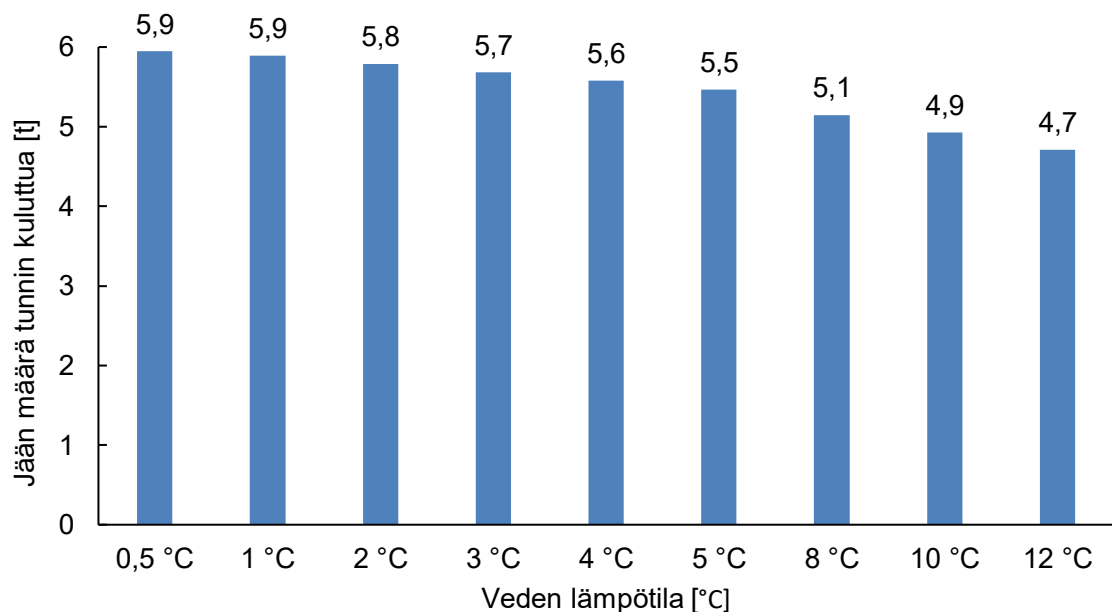


**Kuva 38 Jään kertyminen ja vesistön sulatuskyky tunnin aikana eri vesistön lämpötiloilla, kun jäätä syntyy 6 t/h.**

Mikäli jäätä syntyy 6 t/h, ei paikallaan oleva vesi ehdi veden lämpötiloilla 0,5–12 °C sulattamaan kaikkea syntynyttä jäätä. Tämä johtuu siitä, että sulamisnopeus on hitaampi kuin jään syntymisnopeus, mikä johtaa jään kertymiseen. Suuremmilla lämpötiloilla vesi kykenee sulattamaan syntyneen jään, kun jäätä syntyy 6 t/h.

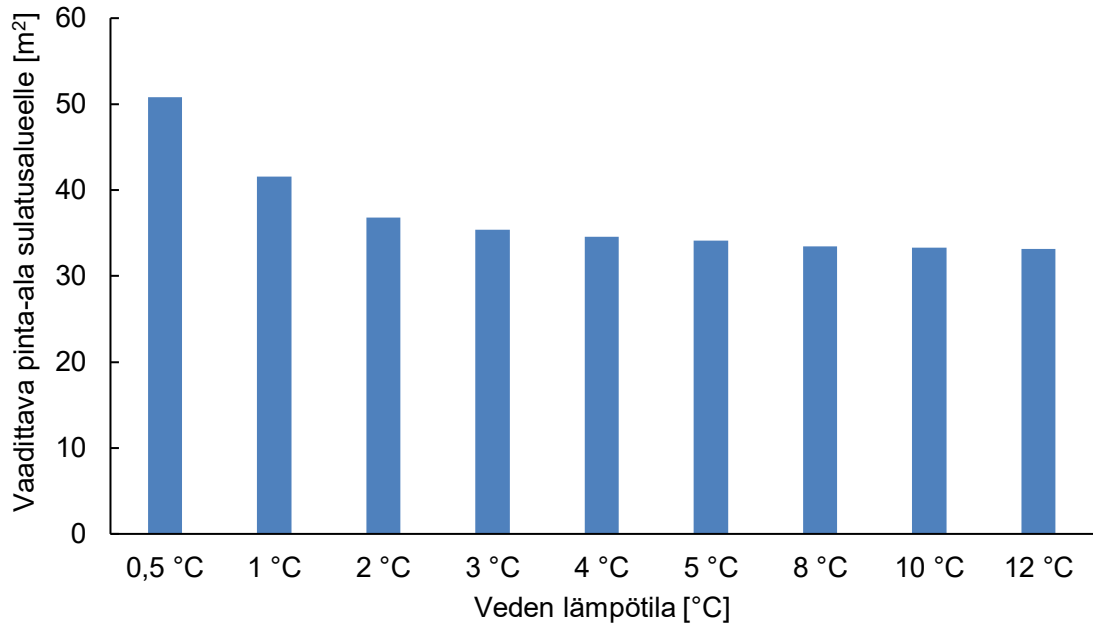
## 6.5 Dimensioitu sulatusjärjestelmä vesivirtauksen tapauksessa

Tarkastellaan seuraavaksi alaluvun 5.8 mukaisesti tuloksia sulatusjärjestelmän dimensioinnille. Tuloksissa esitetään sulatusalueelle maa-alueen pinta-alan tarve, massavirran tarve ja pumpun tehon tarve. Kuva 39 havainnollistaa jään määrää tunnin kuluttua, kun sulatetaan suorakulmaista kappaletta, jonka massa on 6 t (ks. Kuva 25).



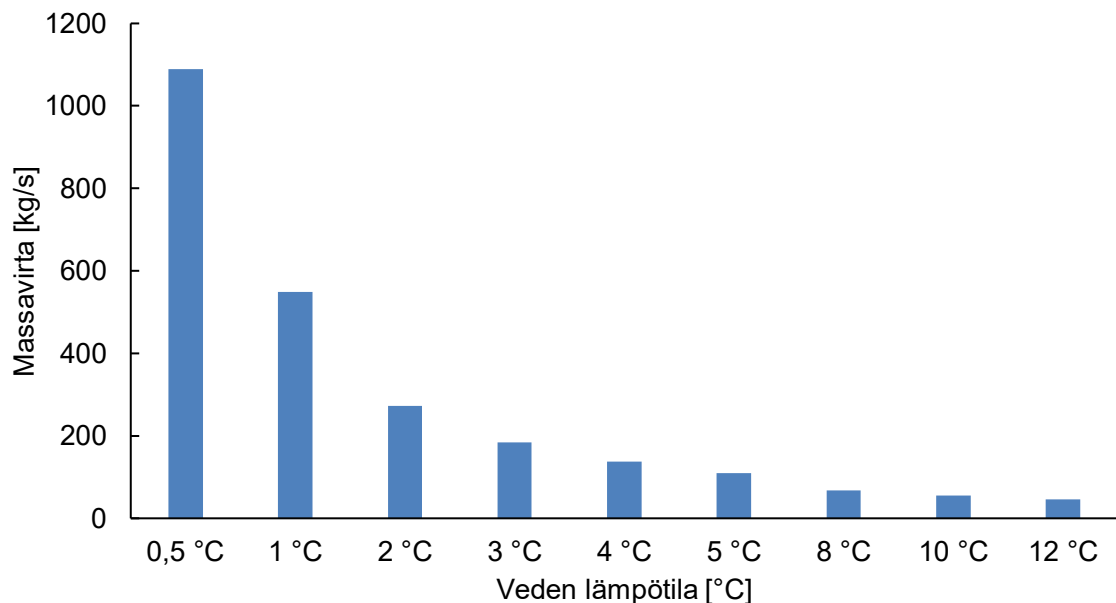
**Kuva 39 Jään määrä tunnin kuluttua, kun jäätä syntyy 6 t/h, ja jäästä muodostuu yksi suorakulmainen kappale (5,5m x 5,9m x 0,2m), jota sulatetaan virtauksella eri lämpötiloilla.**

Mikäli 6 t jäätä on yksi iso kappale, ei jääkappale ehdi sulaa tunnin aikana tarkastelluilla veden lämpötiloilla. Sen vuoksi tarkasteltiin alaluvun 5.8 mukaisesti jääkappaleen leikkaamista osiin moninkertaistamalla siten lämmönsiirtopinta-alan (ks. Kuva 26). Jääkappaleen jakaminen useampaan osaa lisää lämmönsiirtopinta-alaa, mutta lisää myös vaadittavan pinta-alan tarvetta sulatusalueelle. Lisätarve johtuu siitä, että kappaleiden välille on jätettävä tilaa, jotta vesi pääsee virtaamaan alueen läpi. Pinta-alan tarve sulatusalueelle on esitetty seuraavaksi (Kuva 40).



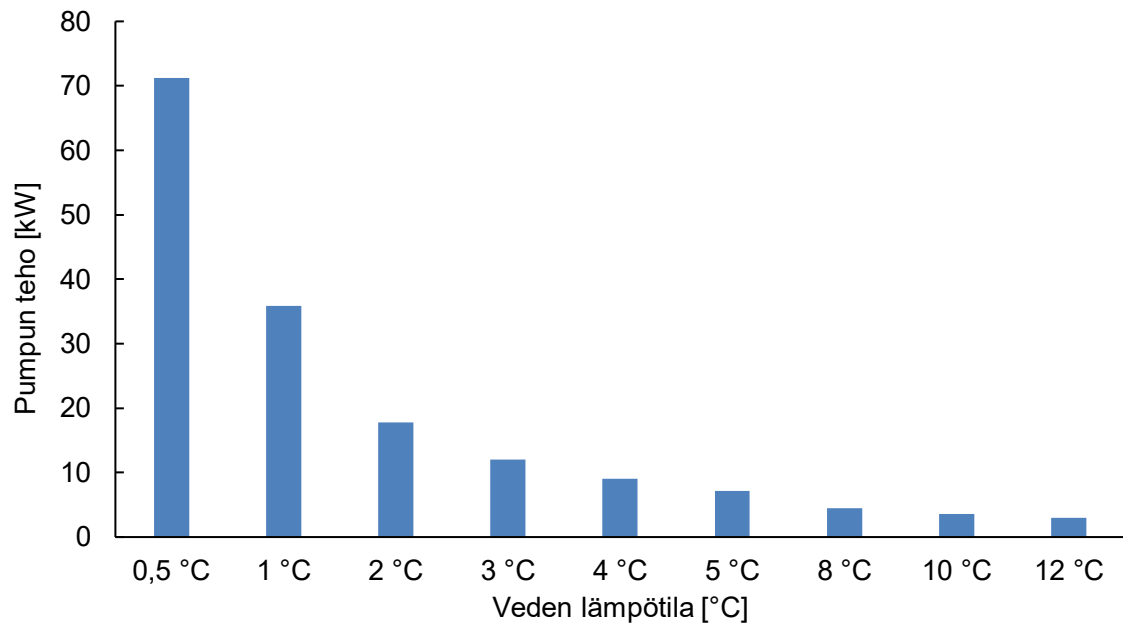
**Kuva 40 Sulatusalueen pinta-ala eri veden lämpötiloilla, kun jäätä syntyy 6 t/h.**

Pinta-alan tarve kasvaa hieman alhaisemmilla veden lämpötiloilla, kun jääkappale on leikattava useampaan osaan suuremman lämmönsiirtopinta-alan saavuttamisen vuoksi. Kuitenkin pinta-alan tarve säilyy kohtuullisena alhaisemmillakin veden lämpötiloilla ollen esimerkiksi 51 m<sup>2</sup>, kun veden lämpötila on 0,5 °C. Massavirran tarvetta eri veden lämpötiloilla on esitetty seuraavaksi (Kuva 41).



**Kuva 41 Tarvittava massavirta vettä, kun jäätä sulatetaan 6 t/h.**

Korkeimmilla veden lämpötiloilla massavirta on alle 100 kg/s, mutta alhaisilla veden lämpötiloilla massavirran tarve kasvaa voimakkaasti. Esimerkiksi alhaisimmalla tarkastellulla lämpötilalla massavirran tarve on 1100 kg/s. Tarkastellaan vielä yllä esitettyjä massavirran arvoja hyödyntämällä pumpun tehon tarvetta (Kuva 42).



**Kuva 42 Pumpun teho eri veden lämpötiloilla, kun jäätä sulatetaan 6 t/h, pumpun nostokorkeus on 5 m, hyötysuhteeksi on oletettu 75 % ja edellä esitetyillä massavirroilla (Kuva 41).**

Pumpun tehon tarve, kuten massavirran tarve edellä, kasvaa voimakkaasti alhaisilla tarkasteluilla veden lämpötiloilla ja selkeästi pienempi korkeammilla lämpötiloilla. Pumpun koko ja sähköenergian kulutus voivat osoittautua haasteeksi laitoksen kannattavuudelle mitoitettaessa sulatusjärjestelmää lämpöpumppulaitokselle, jonka läheisyydessä olevan vesistön veden lämpötilan on vuoden aikana pitkään erityisen alhainen.

Vastaavanlainen vesivirtaukseen perustuvaa sulattamista voisi soveltaa myös hyödyntämällä joen virtausta. Tässä tapauksessa ei olisi tilan tarvetta sulatusalueelle eikä tarvetta pumpulle.

## 6.6 Herkkyystarkastelut

Tämän tutkimuksen edellä esitetyt tulokset liittyvät pitkälti sulamisaikaan, joten herkkyystarkastelut liittyvät myös pitkälti sulamisajan herkkyyden tarkasteluun eri mallin tekijöiden muuttuessa.

Herkkyystarkasteluissa havaittiin, että numeerisen mallin aika-askeleen muuttamisella ei paikallaan olevan veden eikä vesivirtauksen tapauksessa ollut juurikaan vaikutusta sulamisaikoihin lämpötilavälillä 0,5–16 °C. Paikallaan olevan veden tapauksessa vaikutus oli keskimäärin -0,1 %, kun aika-askeletta pienennettiin tai kasvatettiin 20 %. Vesivirtauksen tapauksessa vaikutus oli keskimäärin -0,1 %, kun aika-askeletta pienennettiin 20 % ja 0,1 %, kun aika-askeletta kasvatettiin 20 %.

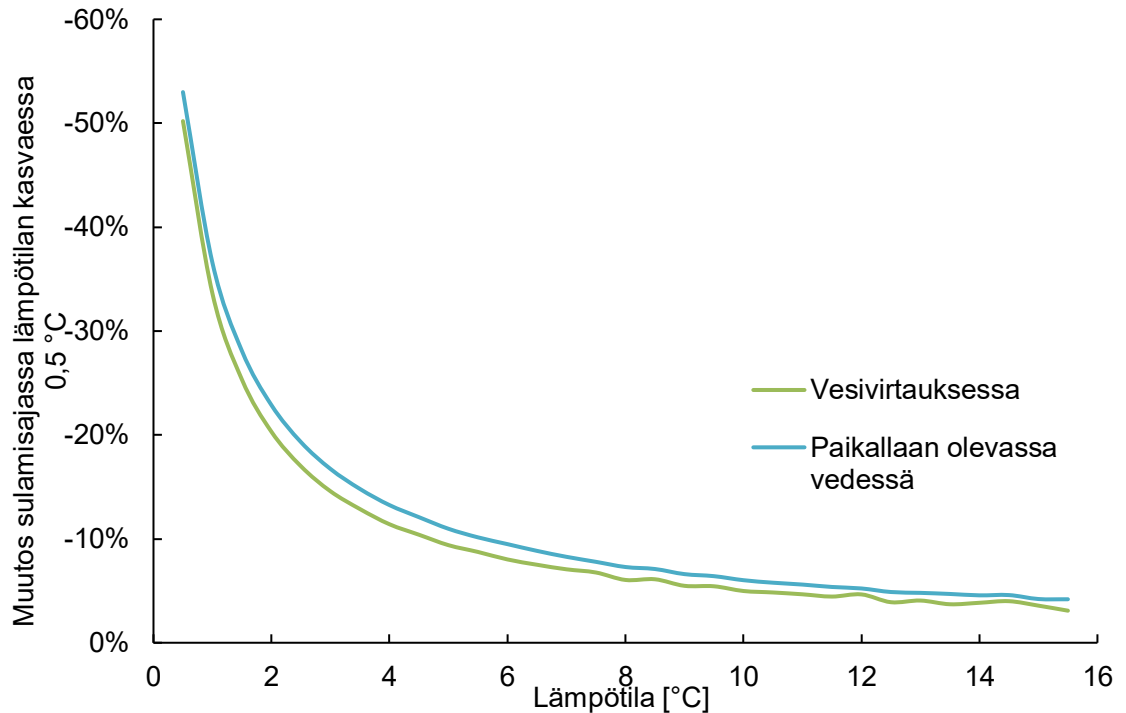
Konversion vaikutuksella sulamisaikaan huomattiin olevan merkittävä vaikutus sulamisaikoihin lämpötilavälillä 0,5–16 °C. Paikallaan olevan veden tapauksessa vaikutus oli keskimäärin -36,5 %, kun konversio oli 95 % ja -21,0 %, kun konversio oli 99 %. Vesivirtauksen tapauksessa vaikutus oli keskimäärin -22,5 %, kun konversio oli 95 % ja -10,0 %, kun konversio oli 99 %.

Sulatettavan kuution massalla oli lisäksi selkeästi vaikutusta sulamisaikoihin lämpötilavälillä 0,5–16 °C. Paikallaan olevan veden tapauksessa vaikutus oli keskimäärin -9,5 %, kun kuution massaa pienennettiin 20 % ja 8,5 %, kun massaa kasvatettiin 20 %. Vesivirtauksen tapauksessa vaikutus oli keskimäärin -10,0 %, kun kuution massaa pienennettiin 20 % ja 9,0 %, kun massaa kasvatettiin 20 %.

Vesivirtauksen tapauksessa tarkasteltiin lisäksi jään pinnalla olevan veden nopeuden vaikutusta sulamisaikaan numeerisen laskentamallin avulla lämpötilavälillä 0,5–16 °C. Nopeuden muutoksella havaittiin olevan selkeästi vaikutusta sulamisaikaan. Kun nopeutta pienennettiin 20 %, sulamisaika kasvoi keskimäärin 13,0 %. Muutos sulamisajassa oli keskimäärin -10,5 %, kun sulamisaikaa kasvatettiin 20 %.

Alaluvussa 6.1 esitettiin useita korrelaatiota Nusseltin luvulle. Paikallaan olevalle vedelle esitettiin edellä olevissa tuloksissa esitetyn Churchillin korrelaation lisäksi kolme muuta korrelaatiota. Tarkastellaan niiden sulamisaikojen suhdetta Churchillin korrelaatioon lämpötilavälillä 0,5–16 °C. Vanier & Tien (1970) korrelaation käyttäminen numeerisessa mallissa kasvattaa sulamisaikojä 25 %. Sen sijaan Achenbachin (1995) ja Churchillin & Chun (1975) korrelaatiot ennustavat lyhyempiä sulamisaikojä kuin käytetty Churchillin korrelaatio. Achenbachin (1995) korrelaatiolla luotu malli ennustaa keskimäärin 42 % lyhyempiä sulamisaikojä ja Churchillin & Chun (1975) korrelaatiolla 48 % lyhyempiä sulamisaikojä. Vesivirtauksen tapauksessa esitettiin vaihtoehtoinen Leppertin (1961) korrelaatio Whitakerin (1972) korrelaatiolle. Muutos sulamisajassa vaihtelee vesivirtauksen lämpötiloilla ja on keskimäärin +78 % verrattuna Whitakerin (1972) korrelaatioon, kun jään pinnalla olevan veden virtaus on 0,6 m/s.

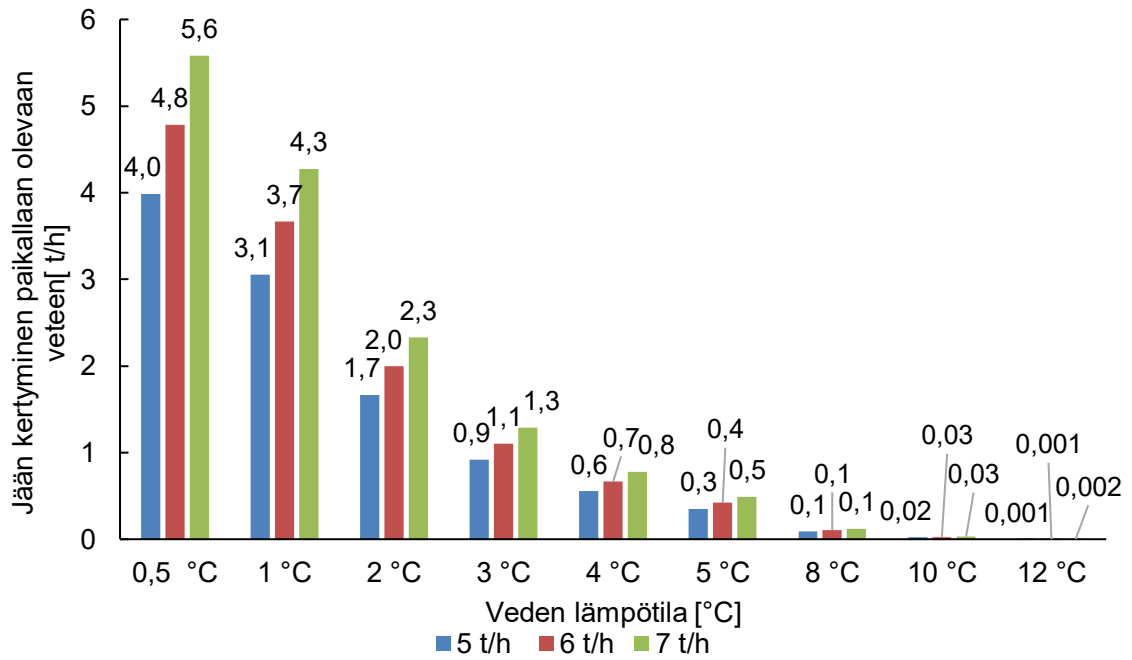
Lämpötilan muutosta on tarkasteltu aiemmin tässä tutkimuksessa valitulla lämpötilavälillä 0,5–16 °C (ks. Kuva 30 ja Kuva 33). Kuva 43 esittää prosentuaalista muutosta lämpötilan kasvaessa 0,5 °C, kun vesivirtauksen nopeus on 0,6 m/s. Numeerisen laskennan käyttäminen aiheuttaa tässä värähtelyä paikallaan olevan veden kuvaajaan.



**Kuva 43 Muutos kuution ( $m = 10 \text{ g}$ ,  $L = 0,022 \text{ m}$ ,  $T_0 = -1 \text{ °C}$ ) sulamisajassa lämpötilan kasvaessa  $0,5 \text{ °C}$  vesivirtauksen nopeuden ollessa  $0,6 \text{ m/s}$ .**

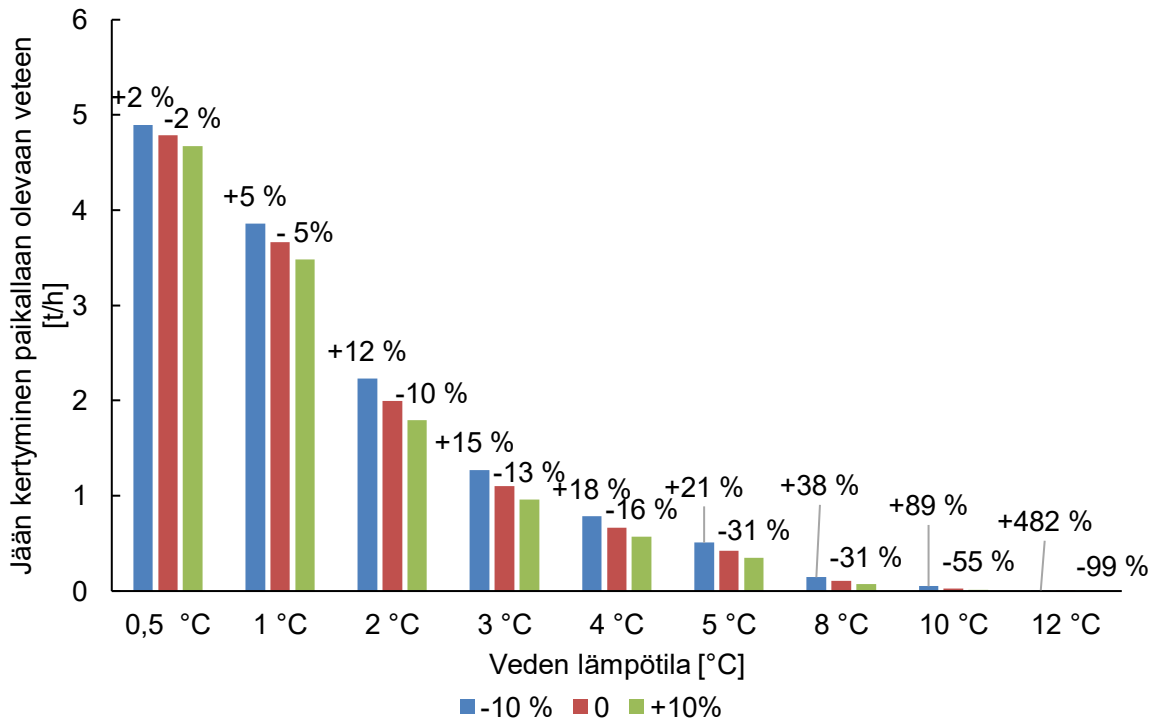
Sekä paikallaan olevan veden että vesivirtauksen tapauksessa veden lämpötilan muutos sulamisaikaan alhaisilla veden lämpötiloilla ( $0,5\text{--}5 \text{ °C}$ ) on jo  $1 \text{ °C}$  muutoksen tapauksessa erittäin voimakas. Korkeimmilla lämpötiloilla ( $5\text{--}16 \text{ °C}$ ) ero  $1 \text{ °C}$  muutoksen tapauksessa tasoittuu ja on vähäisempi.

Tarkastellaan vielä sulatusjärjestelmien konfiguraation ja dimensioinnin herkkyyttä niin sulamisajan kuin laitoksen tuottaman jään määrän tapauksessa. Paikallaan olevan veden tapauksessa jään syntymisnopeuden muuttuminen aiheuttaa prosentuaalisesti vastaavan muutoksen jään kertymiseen vesistöön kuin muutoksen suuruus verrattuna syntymisnopeuteen  $6 \text{ t/h}$ . Jään kertymistä on havainnollistettu alla  $\pm 1 \text{ t/h}$  muutoksella (Kuva 44).



**Kuva 44 Jään kertyminen paikallaan olevaan veteen tunnin aikana jään syntymisnopeuden muuttuessa +/- 1 t/h eri veden lämpötiloilla.**

Sulamisnopeuden muutoksen (+/- 10 %) vaikutusta jään kertymiseen paikallaan olevaan veteen on havainnollistettu eri veden lämpötiloilla alla (Kuva 45).



**Kuva 45 Jään kertyminen paikallaan olevaan veteen tunnin aikana jään sulamisnopeuden muuttuessa +/- 10 % veden eri lämpötiloilla.**



Sulamisnopeuden muutos jään kertymiseen paikallaan olevaan veteen ei ole prosentuaalisesti vastaava sulamisajan muutokseen verrattuna ja se vaihtelee eri veden lämpötiloilla. Alhaisilla veden lämpötiloilla sulamisnopeuden muutoksen vaikutus jään kertymiseen on vähäinen, sillä sulamisajat ovat pitkiä. Muutoksen vaikutus kertymiseen kasvaa lämpötilan kasvaessa. Korkeimmilla lämpötiloilla sulamisnopeuden muutoksien vaikutukset ovat merkittäviä, sillä lähestytään lämpötilaa, jossa sulamisnopeus on suurempi tai yhtä suuri kuin jään syntymisnopeus.

Vastaavanlaiset herkkyystarkastelut sulamisnopeuden muutoksen ja jään syntymisnopeuden muuttuessa tehtiin vesivirtaustapaukselle. Vesivirtauksen tapauksessa jään sulamisnopeuden muuttumisella +/- 10 % ei käytännössä ole vaikutusta massavirran ja pumpun tehon tarpeeseen. Muutos on korkeintaan +/- 1 %. Sulatusalueen pinta-alan tarpeeseenkin muutos on hieman suurempi, mutta korkeintaan +/- 4 %. Sen sijaan, jään syntymisnopeuden muutos aiheuttaa prosentuaalisesti samansuuruisen muutoksen. Eli +/- 1 t/h eli +/- 16,7 % muutos aiheuttaa vastaavasti +/- 16,7 % muutoksen sulatusalueen pinta-alan, massavirran ja pumpun tehon tarpeeseen.

Herkkyystarkastelujen tulokset lämpötilavälillä 0,5–16 °C on koottuna alla (Taulukko 15). Muutos sulamisaikaan on esitetty ensin ja suluissa on esitetty mallin tekijään tehty muutos, konversiolle arvo tai arvioitava Nusseltin luvun korrelaatio.

**Taulukko 15 Herkkyystarkastelut numeeriselle mallille lämpötilavälillä 0,5–16 °C.**

Mallin tekijä	Paikallaan oleva vesi	Vesivirtaus
Aika-askel, $dt$	-0,1 % (-20 %)	-0,1 % (-20 %)
	-0,1 % (+20 %)	+0,1 % (+20 %)
Konversio, $X$	-36,5 % ( $X=95$ %)	-22,5 % ( $X=95$ %)
	-21,0 % ( $X=99$ %)	-10,0 % ( $X=99$ %)
Massa, $m$	-9,5 % (-20 %)	-10,0 % (-20 %)
	+8,5 % (+20 %)	+9,0 % (+20 %)
Virtausnopeus jään pinnalla, $U_{\infty}$	-	+13,0 % (-20 %)
	-	-10,5 % (+20 %)
Lämpötilan vaikutus, $T$	Muuttuu voimakkaasti (ks. Kuva 43)	Muuttuu voimakkaasti (ks. Kuva 43)
Nusseltin luvun korrelaatio, $Nu$	+25 % (Vanier & Tien 1970)	-73 % (Leppert 1961)
	-42 % (Achenbach 1995)	
	-48 % (Churchill & Chu 1975)	
Jään syntymisnopeus, $dm/dt$	Prosentuaalisesti sama muutos tehdyn muutoksen kanssa	Prosentuaalisesti sama muutos tehdyn muutoksen kanssa
	esim.	esim.
	+/- 16,7 % (+/- 16,7 %)	+/- 16,7 % (+/- 16,7 %)
Jään sulamisnopeus, $-dm/dt$	Muuttuu lämpötilan muuttuessa (ks. Kuva 45)	Muutos vähäinen, +/- 0-4 % (+/- 10 %)

## 6.7 Tutkimuksen luotettavuus

Numeerisen mallin luomisessa tehtiin oletuksia, joiden paikkaansa pitävyyksiin liittyy epävarmuuksia. Lisäksi tehtiin yksinkertaistuksia, joista aiheutuu epätarkkuutta. Näiden vuoksi numeerisen mallin luotettavuus heikkenee. Merkittävimmät epävarmuutta luovat yksinkertaistukset ja tehdyt oletukset liittyvät lämmönsiirtopinta-alaan, pallonmuotoisten korrelaation käyttämiseen, jään pinnalla olevan veden virtausnopeuden lukuarvoon, oletuksiin virtauksen nopeuden ja lämpötilan vakiona pysymiseen jään pinnalla, oletukseen siitä, että jää lämpenee 0 °C ennen kuin alkaa sulaa sekä oletukseen tasaisesta sulamisesta kaikilta kuution pinnoilta.

Vesivirtauksessa lämmönsiirto ei välttämättä kohdistu pinta-alaan, joka numeerisen laskennan tapauksessa on oletettu, mikä saattaa johtaa liian lyhyiden sulamisaikojen enustamiseen. Upotettuna veteen lämmönsiirto kohdistuu koko ala. Virtausnopeuden arvoa jään pinnalla on vaikea määrittää, joten arvio tehtiin kokeellisten tulosten perusteella sopivimman arvon mukaan. Mikäli arvioitu nopeus poikkeaa huomattavasti todellisesta arvosta, saattaa se aiheuttaa virheellisyyttä merkittävästi sulamisaikaan. Myöskin todellisuudessa nopeus todennäköisesti saattaa hidastua ja lämpötila saattaa laskea jään jäähdyttävyuden vuoksi veden virratessa pinnalla. Numeerinen malli olettaa ne vaikeiksi, mikä aiheuttaa malliin epätarkkuutta. Pienillä jääkappaleilla on todennäköisempää, että jää ehtii kauttaaltaan saavuttamaan sulamislämpötilansa 0 °C ennen kuin se alkaa sulaa, mutta suuremmilla kappaleilla oletus voi olla selkeästi virheellinen ja aiheuttaa virheellisyyttä tuloksiin. Jään sulaminen oletetaan mallissa tapahtuvan tasaisesti (ks. Kuva 21). Tämän oletuksen mukaisesti myös karakteristinen mitta muuttuu tasaisesti, minkä avulla konvektiivinen lämmönsiirtokerroin muuttuu myös. Paikallaan olevassa vedessä oletus tasaisesta sulamisesta on todennäköisesti realistisempi, mutta vesivirtauksessa todennäköisesti oletus tasaisesta sulamisesta ei pidä täysin paikkaansa, jolla on epätarkkuutta lisäävä vaikutus.

Tulosten luotettavuutta arvioitiin osittain myös kokeellisen osuuden tuloksilla, joita on käsitelty tarkemmin alaluvussa 6.1. Kokeellisten tulosten ja mallin ennusteita verrattaessa voitiin havaita, että mallin ennusteet vastasivat suuruusluokaltaan hyvin mittapisteitä, mikä lisää mallin luotettavuutta. Numeerisen mallin antamia tuloksia arvioitiin alaluvun 6.1 tulosten lisäksi tekemällä sulatuskokeita korkeammalla lämpötilalla sekä eri kokoisilla kappaleilla niin paikallaan olevan veden tapauksessa kuin vesivirtauksenkin. Seuraavaksi on esitetty tuloksia paikallaan olevan veden tapaukselle (Taulukko 16).

**Taulukko 16 Mallin luotettavuutta varten tehdyt kokeet korkeammalla lämpötilalla ja koon muutoksella paikallaan olevassa vedessä.**

Lämpötila	Jääkappale	Mallin ennuste sulamisajasta	Mitattu sulamisaika
54 °C	m = 11 g T <sub>0</sub> = -7 °C	86 s (Churchill) 108 s (Achenbach, λ=5)	73 s, 75 s
13 °C	m = 27 g T <sub>0</sub> = -7 °C	877 s (Churchill) 928 s (Achenbach, λ=5)	660 s, 660 s
6 °C	m = 920 g T <sub>0</sub> = -7 °C	10 284 s (171 min) (Churchill) 10 202 s (170 min) (Achenbach, λ=5)	16 320 s (272 min)

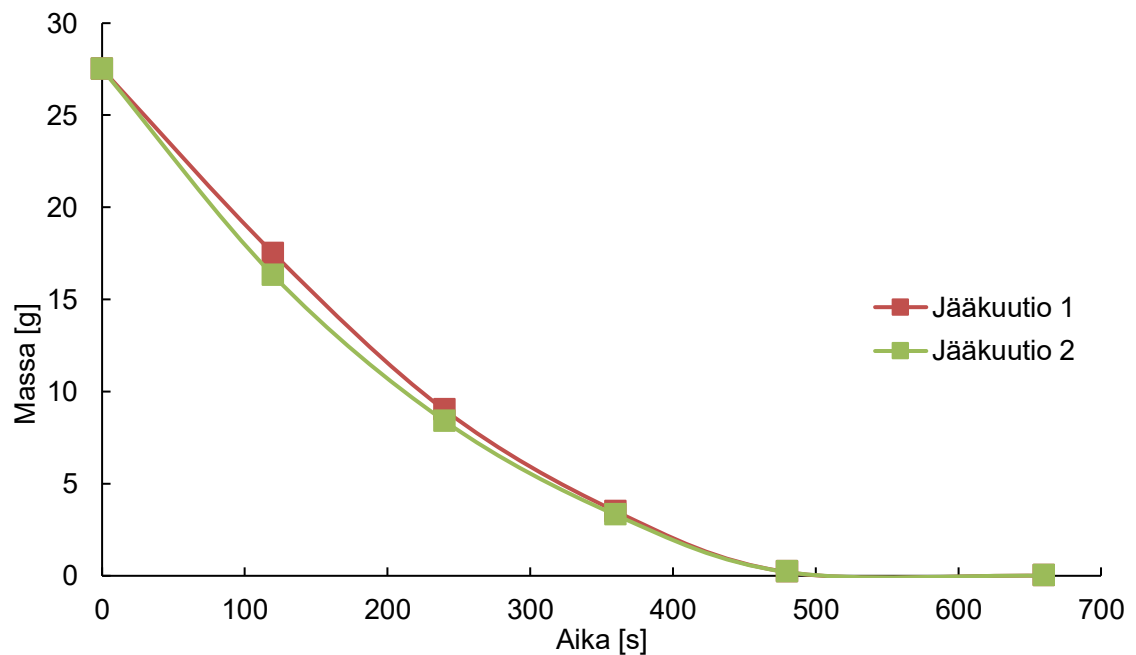
Numeerisen mallin tulokset ovat suuruusluokaltaan samankaltaisia verrattuna tehtyihin sulatuskokeisiin. Korkeamman lämpötilan tapauksessa malli ennustaa hieman pidempiä sulamisaikoja verrattuna kokeellisesti mitattuihin sulamisaikoihin. Massaltaan 27 g:n kokeisen kuution tapauksessa malli ennustaa lyhyempiä sulamisaikoja, mutta selkeästi suuremmalla kappaleella (920 g) malli ennustaa selkeästi lyhyempää sulamisaikaa verrattuna kokeellisiin tuloksiin. Seuraavaksi on esitetty tuloksia vastaavasti virtaavan veden tapaukselle (Taulukko 17).

**Taulukko 17 Mallin luotettavuutta varten tehdyt kokeet korkeammalla lämpötilalla ja koon muutoksella vesivirtauksessa.**

Lämpötila	Jääkappale	Mallin ennuste sulamisajasta	Mitattu sulamisaika
52 °C	m = 8 g T <sub>0</sub> = -6 °C	7 s	11 s, 12 s
13 °C	m = 27 g T <sub>0</sub> = -6 °C	64 s	56 s, 58 s, 60 s
7,5 °C	m = 920 g T <sub>0</sub> = -6 °C	627 s	1 135 s (18 min 55 s)

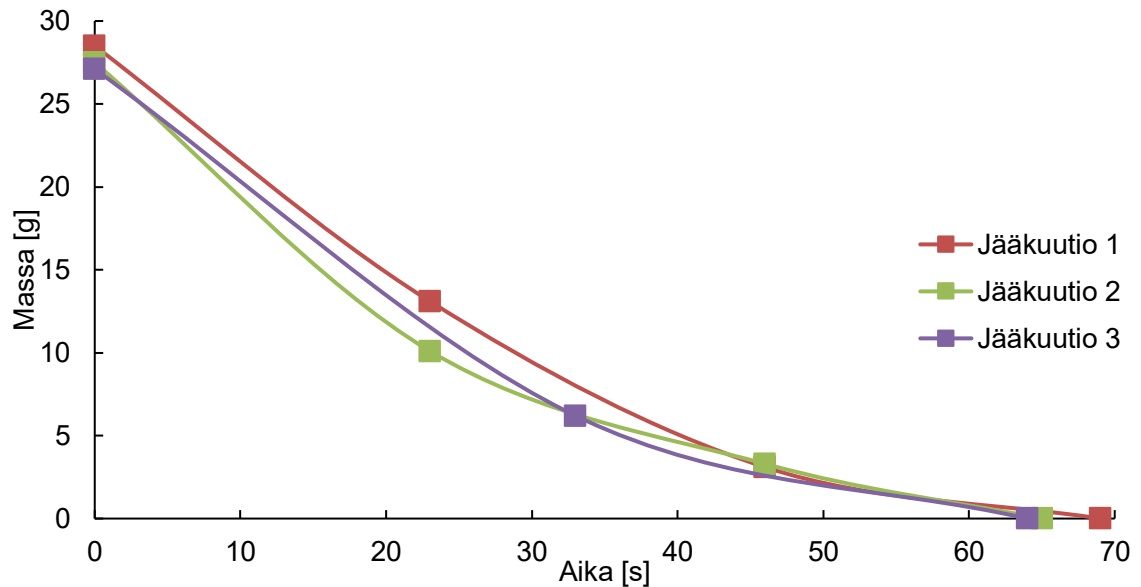
Numeerisen mallin tulokset ovat suuruusluokaltaan samankaltaisia verrattuna tehtyihin sulatuskokeisiin myös vesivirtauksen tapauksessa. Korkeamman lämpötilan tapauksessa malli ennustaa hieman lyhyempiä sulamisaikoja verrattuna kokeellisesti mitattuihin sulamisaikoihin. Massaltaan 27 g:n kokoisen kuution tapauksessa malli ennustaa myös hieman pidempiä sulamisaikoja, mutta selkeästi suuremmalla kappaleella (920 g) malli ennustaa selkeästi lyhyempää sulamisaikaa verrattuna kokeellisiin tuloksiin.

Arvioidaan seuraavaksi jääkuution sulamista ajan funktiona kokeellisesti määritetyillä mittapisteillä. Kokeellisesti määritetyt mittapisteet jääkuution sulamiselle paikallaan olevassa vedessä on esitetty alla (Kuva 46).



**Kuva 46 Jääkuution sulaminen ( $m = 27 \text{ g}$ ,  $L = 0,031 \text{ m}$ ,  $T_0 = -6 \text{ °C}$ ) ajan funktiona paikallaan olevassa vedessä.**

Kokeellisesti määritetyt mittapisteet ja niiden perusteella muodostettu kuvaaja vastaa muodoltaan aikaisemmin esitettyä kuvaajaa kuution sulamiselle (ks. Kuva 31). Sulaminen on aluksi voimakkaampaa, jonka jälkeen se hidastuu ja lopussa massan muutos on hidasta. Seuraavaksi on esitetty kokeellisesti määritetyt mittapisteet jääkuution sulamiselle virtaavassa vedessä (Kuva 47).



**Kuva 47 Jääkuution sulaminen ( $m = 27 \text{ g}$ ,  $L = 0,031 \text{ m}$ ,  $T_0 = -7 \text{ °C}$ ) ajan funktiona vesivirtauksessa.**

Kokeellisesti määritetyt mittapisteet ja niiden perusteella muodostettu kuvaaja vastaa muodoltaan aikaisemmin esitettyä kuvaajaa kuution sulamiselle (ks. Kuva 34). Sulaminen on aluksi voimakkaampaa, jonka jälkeen se hidastuu ja lopussa massan muutos on hidasta. Kuitenkin verrattuna paikallaan olevaan veteen on kokeellisten mittausten perusteella vesivirtauksen tapauksessa lopussa tapahtuva massan muutos hieman nopeampaa.

Arvioidaan seuraavaksi tilavuusvirran tai massavirran muutoksen vaikutuksen luotettavuutta numeerisessa mallilla kokeellisen osuuden perusteella. Eri tilavuusvirroilla sulatettaessa havaittiin, että tilavuusvirtaa kasvatettaessa vesi jäädästä alkoi poistumaan pinnalta liian korkean nopeuden vuoksi, jolloin vesi ei peittänyt koko pinta-alaa. Tästä johtuen tilavuusvirran kasvattaminen ei todellisuudessa lyhentänyt merkittävästi sulamisaikaa. Lisäksi havaittiin myös pieni tilavuusvirta ei peitä jäätä kokonaan, mikä pidentää sulamisaikaa. Siten veden nopeuden kasvattaminen ei todellisuudessa välttämättä lyhennä sulamisaikaa kuin tuloksissa esitetty laskentamalli esittää (ks. Kuva 36) ja toisaalta alhaisimmilla nopeuksilla numeerinen malli ennustaa todennäköisesti liian lyhyitä sulamisaikoja).

Kokeellisessa osuudessa luotettavuutta pyrittiin lisäämään pienten ja keskikokoisten kappaleiden tapauksessa rinnakkaismittauksilla samalla lämpötiloilla tai vaihtoehtoisesti tiheästi tehdyillä mittauksilla lyhyellä lämpötilavälillä. Kuitenkin on huomattava, että kokeelliseen osuuteen liittyy epävarmuuksia sekä muita tekijöitä, jonka vuoksi numeerista sulamismallia ei voida suoranaisesti kehittää vastamaan kokeellisia tuloksia. Kokeelli-

sessä osuudessa todellisuudessa tapahtuu lämmönsiirtoa myös ilman lämpötilan vaikutuksesta. Ilman lämpötilan vaikutuksesta sulamisaika lyhenee hieman vesivirtauksen tapauksessa. Merkitys korostuu etenkin alhaisilla veden lämpötiloilla, jolloin sulamisaika on pitkä.

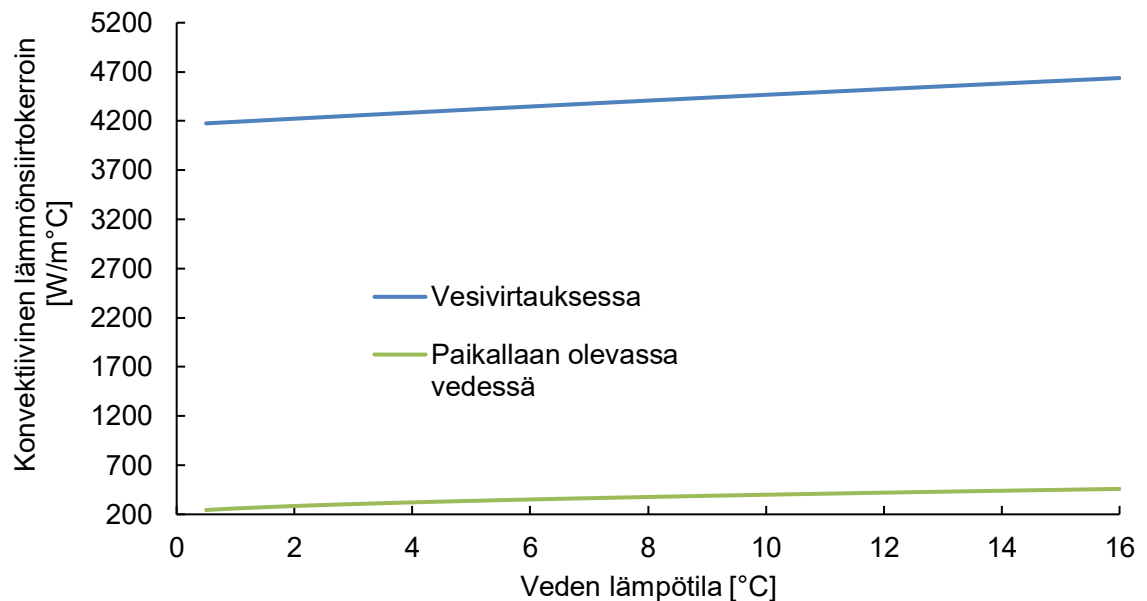
Lisäksi kokeellisessa osuudessa virhelähteitä ovat kokeen suorituksessa tapahtuvat aikaviiveet, käytettyjen mittalaitteiden mahdolliset epätarkkuudet sekä jään ominaisuuksiin liittyvät epävarmuudet. Aikaviiveet liittyvät siihen, että jään siirtämiseen pakastimesta punnitsemiseen ja edelleen sulatuskokeen aloittamiseen liittyy aikaviive, jonka aikana jää ehtii hieman lämmetä ja/tai sulaa. Lisäksi konversion seurannassa syntyy virhettä, kun jääpala siirretään vaa'alle ja takaisin koetilanteeseen. Käytettyjen mittalaitteiden epätarkkuudet liittyvät tässä tapauksessa lämpötilamittareiden ja vaa'an lukemiin. Jään ominaisuuksien epävarmuudet liittyvät tehtyihin oletuksiin jään homogeenisuudesta ja lämpötilan määräytymiseen pakastimen sisälämpötilan mukaan. Lisäksi kokeessa käytettiin jääpaloja, jotka tehtiin käyttäen kuutionmuotoista jäämuottia, mutta silti jäiden massoissa oli pieniä eroavaisuuksia. Mikäli punnituksessa havaittiin jään massan poikkeavan merkittävästi, jääpalaa ei käytetty sulatuskokeessa.

Tulosten luotettavuutta voidaan arvioida myös herkkyystarkastelujen tuloksilla (ks. alaluku 6.6), sillä ne kuvaavat numeerisen mallin, sulatuslaitoksen konfiguraation määrittämisen ja laitoksen dimensioinnin herkkyyttä eri muutoksille ja siten niiden tuloksille. Koska esimerkiksi aika-askeleen muutos ei ollut herkkä numeerisen mallin ennustamalle sulamisajalle, kertoo se mallin olevan aika-askeleen tapauksessa luotettava. Sen sijaan Nusseltin luvun korrelaation valinnassa havaittiin olevan merkittävästi herkkyyttä, mikä heikentää mallin ennusteen luotettavuutta. Tätä luotettavuuden heikkenemistä pyrittiin vähentämään valitsemalla soveltuvin korrelaatio verrattuna kokeellisen osuuden tuloksiin.

Vastaavanlainen käyttäytyminen ja vastaavanlaiset alkuarvot aikaisempiin tutkimuksiin ja kirjallisuuteen verrattuna lisäävät mallin luotettavuutta. Aikaisemmin tehdyistä tutkimuksista tai kirjallisuudesta ei havaittu löytyvän täysin vastaavanlaisia koetilanteita paikallaan olevassa vedessä tai vesivirtauksessa sulattamiselle. Vanier & Tienin (1970) esittivät tutkimuksessa (ks. Kuva 14) sulamisnopeuden pienenemisen massan pienenemisen ja olevan hitaampi alhaisimmilla veden lämpötiloilla. Sulamisnopeuden havaittiin pienenemisen vastavanlaisesti tässä tutkimuksessa (ks. Kuva 31 ja Kuva 34).

Kirjallisuudessa (Stephan, 2010) on esitetty luonnollisen konvektion tapauksessa nesteen konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen arvon olevan tyypillisesti  $10\text{--}1000\text{ W/m}^2\text{C}$  ja

pakotetun konvektion tapauksessa  $50\text{--}20\,000\text{ W/m}^2\text{°C}$ . Tässä tutkimuksessa luodon numeerisen mallin konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen alkuarvoja eri lämpötiloilla on havainnollistettu alla (Kuva 48).



**Kuva 48 Konvektiivisen lämmönsiirtokertoimen alkuarvo numeerisessa laskentamallissa lämpötilan funktiona.**

Lukuarvot vastaavat suuruusluokaltaan Stephanin (2010) esittämiä arvoja nesteiden konvektiiviselle lämmönsiirtokertoimelle niin luonnollisen konvektion kuin pakotetun konvektion tapauksessa.

## 6.8 Pohdinta

Faasimuutosta lämmönlähteenä hyödyntävät lämpöpumppulaitokset voisivat toimia etenkin talviaikaan kannattavina lämmöntuotantolaitoksina, kun vesistön lämpötila on alhainen ja toisaalta on tavoitteena pyrkiä eroon polttavasta lämmöntuotannosta. Kyseisten lämpöpumppulaitosten toimintaan liittyy merkittävä haaste käytössä syntyvän suuren jäämäärän käsittelyn vuoksi. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan arvioida, minkälaisia vaihtoehtoja jään sulattamiselle on. Parhaiten soveltuvaa keinoa lämpöpumppulaitoksen tuottaman jään hävittämiselle tulee arvioida sovelluskohteittain.

Jään sulattaminen on todennäköisesti yksinkertaisin ratkaisu hävittää jää. Kuitenkin ennen sulamisratkaisuun päättymistä, tulisi pohtia olisiko uudelleenkäyttö- ja hyötykäyttömahdollisuuksia. Olisi hyvä pohtia sovelluskohteittain, olisiko sivutuotteena syntyvää jäätä mahdollista hyödyntää jollain tapaa. Jäälle voisi etsiä käyttökohteita, jossa se voitaisiin käyttää sellaisenaan jäänä. Esimerkiksi elintarviketeollisuudessa voisi löytyä käyt-



tökohteita esimerkiksi toimitusketjuissa, kun halutaan varmistaa elintarvikkeiden säilyminen kylminä. Hyötykäytöstä esimerkkinä voisi pitää jään sulaessa syntyvän veden hyödyntämistä esimerkiksi jäädyttämään kiinteistöjä. Tämänkaltainen on esimerkiksi alaluvussa 3.4 esitelty Sundsvallin sairaalan jäähdytysjärjestelmä, jossa lumivarastolla voidaan jäädyttää sairaalakiinteistöä kesäaikaan lumivaraston sulaessa.

Ensisijaisena vaihtoehtona jään sulattamiselle voidaan pitää jään läjittämistä laitoksen läheisyydessä sijaitsevalle alueelle, jolloin jää sulaa luonnollisen sulamisen vaikutuksesta. Läjittäminen on yksinkertainen ratkaisu, koska se ei vaadi erillistä jään sulattamismenetelmää. Kuitenkin mikäli laitoksen tuottaman jään syntymisnopeus on huomattava ja/tai tilaa alueella läjittämiseksi ei ole, kannattaa pohtia sovelluskohteittain soveltuvampaa ratkaisua jään sulattamiseen. Tässä tutkimuksessa käsiteltiin paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa sulattamista vaihtoehtoisina ratkaisuuina ja tutkimuksen tuloksien perusteella voidaan määrittää, minkälaisiin sovelluskohteisiin paikallaan olevalla vedellä ja vesivirtauksella sulattaminen soveltuvat. Sovelluskohteiden määrittämisessä käytetyt aineistot ja menetelmät ovat kuvattuna alaluvussa 5.4.

Vesivirtauksessa sulattaminen on huomattavasti nopeampaa kuin paikallaan olevassa vedessä. Kuitenkin mikäli jäätä tuotetaan suuri määrä, eli etenkin suurempien laitosten tapauksessa, on jää mahdollista sulattaa huomattavasti nopeammin vesivirtauksella veden lämpötilan ollessa sama. On kuitenkin huomattava, että vesistöissä on tyypillisesti virtauksia, jotka saattavat lyhentää sulamisaikaa verrattuna esitettyyn paikallaan olevan veden tilanteeseen. Toisaalta, sillä vesi on jäätä tiheämpää, kelluu jää, mikäli vesistöissä ei ole jääpeitettä. Tästä johtuen veden kanssa kosketuksissa oleva lämmönsiirtoala pienenee, mikä voi johtaa pidempään sulamisaikaan.

Soveltuvaa sulatustapaa voidaan arvioida myös vesistön kannalta. Vesistöä voi arvioida sen koon, jääpeitteen, vesistöissä olevien virtauksien voimakkuuksien ja lämpötilan kannalta. Mikäli vesistön koko on pieni, voi vesistön lämpötila laskea merkittävästi jäädä johtuen ja aiheuttaa muutoksia vesistön ekologiseen tilaan. Samalla myös sen sulattamiskyky saattaa heikentyä merkittävästi. Mikäli vesistö on suuri ja sen lämpötila vain lyhyen aikaa lähellä 0 °C olisi todennäköisesti sulattaminen vesistöissä soveltuvampi ratkaisu. Menetelmän periaate on yksinkertaisempi ja siitä aiheutuu vähemmän kustannuksia kuin virtaavalla vedellä sulattamisesta. Suomessa lämpötila alle 1 °C vain tammi-maaliskuun ajan (Kuva 19). Siten tämänkaltaisia sovelluskohteita voisivat olla merien läheisyydessä sijaitsevat pintaveden jäädyttämistä lämmönlähteenä hyödyntävät lämpöpumppulaitokset. Sisämaan suurissa vesistöissä jäämäärä ei välttämättä vaikuta merkittävästi vesistön lämpötilaan, mikäli jää leviää tasaisesti vesistöön riittävän suurelle alalle. Suomessa suurten vesistöjen pintaveden lämpötilat ovat talviaikaan tyypillisesti 0 °C,

joten jää ei sula vesistöissä. Mikäli jää levittäytyy vesistöön, sen vaikutus jääpeitteen paksuuteen ei ole merkittävä. Kuitenkin pienissä vesistöissä vaikutus jääpeitteen paksuuteen olla todella merkittävä, mikä voi johtaa siihen, että vesistöissä on jäätä merkittävästi tavanomaista pidempään keväällä, mikä saattaa häiritä vesistön muuta käyttöä. Vesistöt, joissa on voimakkaita virtauksia, voisivat olla myöskin soveltuvia kohteita sulattamaan jäätä vesistöissä, sillä tulosten pohjalta voidaan havaita, että virtauksella on merkittävä sulamisaikaa lyhentävä vaikutus. Mikäli jäätä ei kuitenkaan haluta kertyvän vesistöön, ei paikallaan oleva vesi sovellu Suomessa talviaikaan sulattamaan laitoksella syntyvää jäätä.

Vesivirtauksen tapauksessa voisi pohtia lisäksi talviaikaan, kun veden lämpötila on alhainen, mahdollisuutta pumpata vettä syvemmältä, jolloin saataisiin noin 4 °C vettä (Lepäranta et al. 2017). Alhaisilla veden lämpötiloilla pumpun koon ja sulatuspinta-alan tarve ovat kuitenkin todella suuria, joten pintaveden hyödyntäminen voi osoittautua kannattamattomaksi ratkaisuksi sulattamiseen. Tällöin voisi olla perusteltua tarkastella pumpausta syvemmältä, sillä alhaisilla veden lämpötiloilla pienenkin lämpötilan muutoksen vaikutus sulamisaikaan on merkittävä (Kuva 33 ja Kuva 43). Pumpaus syvemmältä voisi olla siten perusteltua. Toinen vaihtoehtoinen ratkaisu olisi hyödyntää veden luonnollista virtausta, kuten esimerkiksi joen virtausta. Tässä tapauksessa voitaisiin sulatuslaitos sijoittaa joen yhteyteen, jolloin vettä ei tarvitsisi pumpata vesistöä.

Lisäksi tulisi arvioida ympäristövaikutusten, mahdollisten lupatarpeiden ja sähköenergian kulutuksen vaikutuksia. Suuri määrä jäätä kooltaan suhteelliseen pieneen vesistöön voi aiheuttaa veden lämpötilan merkittävän laskun, joka puolestaan hidastaa sulattamista. Lämpötilan laskusta voi aiheutua myös merkittäviä muutoksia vesistön ekologiseen tilaan ja toisaalta se voi myös haitata muuta vesistön käyttöä. Vesistöön hävittäminen voi siten osoittautua soveltumattomaksi vaihtoehdoksi. Todennäköisesti molempiin sulattamistapoihin liittyy sähköenergian kulutusta. Jään vesistöön siirtämisessä joudutaan todennäköisesti käyttämään sähköenergiaa, mutta todennäköisesti veden pumpaus aiheuttaa merkittävämpää energiankulutusta. Mikäli energian kulutusta halutaan minimoida, on silloin vesistöön hävittäminen soveltuvampi vaihtoehto.

Soveltuvuutta voidaan arvioida lisäksi laitosalueen ominaisuuksien osalta, jolloin voidaan arvioida etäisyyttä vesistöön, mahdollisuuksia jään purkupaikalle ja käytettävissä olevaa tilaa. Jään syntymisnopeuden muutoksilla havaittiin olevan prosentuaalisesti vastaava muutos niin jään kertymisessä vesistöön kuin tarvittavan pinta-alan ja pumpun koon lukuarvoihin (ks. alaluku 6.6). Mikäli jäätä syntyy merkittävästi vähemmän tai enemmän on arvioitava uudelleen, muuttuuko jompikumpi vaihtoehdoista selkeästi paremmaksi vaihtoehdoksi tai toinen ongelmalliseksi vaihtoehdoksi. Pitkä etäisyys vesistöön

voi hankaloittaa jään kuljettamista purkamista varten. Veden pumppaaminen vesistöstä voisi tässä tapauksessa olla soveltuvampi ratkaisu, mikäli etäisyys vesistöön on pitkä. Hävittäminen vesistöön voi myös estyä, mikäli soveltuvia purkupaikkoja vesistöön ei ole. Kuitenkin tilan vähäisyys voi osoittautua esteeksi vesivirtaukseen perustuvan laitoksen rakennuttamiselle.

Lämpöpumppulaitoksien tuottaman jään syntymisnopeudella ja koolla voi lisäksi olla merkitystä valittaessa soveltuvaa tapaa hävittää jää. Jään syntymisnopeuden muutoksilla havaittiin olevan prosentuaalisesti vastaava muutos niin jään kertymisessä vesistöön kuin tarvittavan pinta-alan ja pumpun koon lukuarvoihin (ks. alaluku 6.6). Mikäli jäätä syntyy merkittävästi vähemmän tai enemmän on arvioitava uudelleen, muuttuuko jompikumpi vaihtoehdoista ongelmalliseksi tai toinen selkeästi paremmaksi vaihtoehdoksi. Koolla ei havaittu olevan merkittäviä vaikutuksia kummassakaan tapauksessa kuin ainoastaan aivan pienillä kuution koilla, joissa lämmönsiirtoala on pieni (Kuva 32 ja Kuva 35). Todennäköisesti siten molemmat vaihtoehdot voivat soveltua.

Jatkotutkimuskohteet voisivat liittyä lämpöpumppulaitoksen toimintaan, sulatuslaitoksen toimintaan, eri tekijöiden optimointeihin tai vesivirtauksen käyttäytymiseen jään pinnalla, kuten vesivirtauksen nopeuden tai jäähtymisen tutkimiseen. Vesivirtaukseen perustuvan laitoksen dimensiointiin ja paikallaan olevan veteen perustuvan laitoksen konfiguraation määrittämiseen liittyy optimointimahdollisuuksia, joilla koko lämpöpumppulaitoksen toimintaa voidaan mahdollisesti optimoida. Optimointi voitaisiin kohdistaa vesivirtauksen tapauksessa massavirran tarpeen sekä putken pään ja jään etäisyyden optimointiin. Jääkuutioiden ja putken pään etäisyyden kasvattamisella voisi vähentää massavirran tarvetta, jos gravitaation vaikutuksesta voisi kasvattaa vesivirtauksen nopeutta jään pinnalla. Pienempi massavirran tarve mahdollistaisi sen, että tarvittavan pumpun teho ja energian kulutus voisivat olla alhaisempia. Lisäksi voisi optimoida pinta-alan tarvetta esimerkiksi arvioimalla jääkappaleiden etäisyyksien tarvetta toisistaan. Laitoskohtaisesti voisi optimoida käytettävissä olevan alueen koon perusteella, miten yksi suurempi kappale kannattaisi leikata pienemmäksi, jotta toisaalta lämmönsiirtopinta-ala on suurin mahdollinen, mutta toisaalta tarvittava sulatusalueen pinta-ala käytettävissä olevan alueen pinta-alan rajoissa.

Lisäksi voisi tarkastella erilaisten hävittämisvaihtoehtojen yhdistämistä, kuten läjittämisen ja esimerkiksi uudelleenkäytön hyödyntämistä paikallaan olevassa vedessä tai vesivirtauksessa sulattamisen lisäksi. Tässä tapauksessa voitaisiin läjittää tai uudelleen käyttää jäätä mahdollisuuksien mukaan esimerkiksi ilman lämpötilan ollessa korkea tai uudelleen käyttökohteen löytyessä. Jää sulatettaisiin tällöin pakotetusti vesivirtauksella

tai hävittämällä vesistöön vain, kun se on ainoa vaihtoehto, jolloin voitaisiin optimoida massavirran tarvetta ja jään mahdollista kertymistä vesistöön pidemmällä aikavälillä.

Tässä tutkimuksessa ei tarkasti otettu kantaa muun muassa, miten käytännössä jää siirtyy vesistöön tai miten jää siirtyy vesivirtaukseen perustuva laitokselle. Tämän yksityiskohtaisempi suunnittelu jää tämän tutkimuksen ulkopuolelle diplomityön laajuuden vuoksi. Lisäksi tällä hetkellä ei ole suunniteltua pilottilaitosta, joten tarkempi suunnittelu on haastavaa. Lisäksi jatkotutkimusaiheiksi voisi tämän tutkimuksen perusteella esittää uudelleenkäyttö- ja hyödyntämismahdollisuuksien tutkimisen ja uudelleen tarkastelun laitoksen kannattavuudesta huomioiden jään sulattaminen.

## 7. YHTEENVETO

Johtuen muun muassa ilmastonmuutoksesta ja geopoliittisista haasteista Suomen kaukolämmöntuotannossa on muutospainetta siirtyä fossiilisten polttoaineiden ja turpeen hyödyntämisestä kohti hiilineutraalimpaa ja vihreämpää lämmöntuotantoa. Lämpöpumppuja on pidetty yhtenä lupaavimmista ratkaisuista vastamaan kaukolämmöntuotannon muutospaineesiin. Suomessa vesistöjen hyödyntämisen haasteena ovat alhaiset vesistöjen lämpötilat etenkin talviaikaan, jolloin veden lämpötila on tyypillisesti alle 1 °C. Tämän vuoksi on vettä pumpattava jo 1 MW:n lämpötehon saamiseksi niin suuri massa-virta, että lämmöntalteenotto muuttuu haastavaksi. Vaihtoehtoisena keinona lämmöntalteenottoon vedestä on hyödyntää faasimuutoslämpöä lämmönlähteenä hyödyntäviä lämpöpumppulaitoksia. Kuitenkin, jotta jäätä valmistavan koneen lauhduttimelta saadaan tarpeeksi lämpöenergiaa 1 MW:n kokoisessa laitoksessa, syntyy sivutuotteena 5–7 t/h jäätä, josta aiheutuisi merkittäviä haasteita esimerkiksi jään varastoinnin osalta. Tämän tutkimuksen tavoitteena on löytää ratkaisu lämpöpumppulaitoksen sivutuotteen syntyvän jään muodostumisesta syntyvään haasteeseen tarkastelemalla sen sulattamista vesistön pintavedellä ilman ulkoista lämmönlähdettä.

Faasimuutoslämpöä hyödyntävissä lämpöpumppulaitoksissa yhdistyvät jäätä valmistava kone ja perinteinen lämpöpumppu. Jäätä valmistavassa koneessa höyrystimeltä syntyy laitoksen tuottama jää, ja lauhduttimelta saadaan otettua talteen lämpö, jonka lämpötilaa voidaan nostaa perinteisellä lämpöpumpulla kaukolämpöverkkoon sopivaksi. Faasimuutoslämpöä hyödyntävät lämpöpumput soveltuvat talviaikaiseen lämmöntuotantoon, kun ilman ja vesistöjen lämpötilat ovat alhaisia lämpöpumppujen lämmönlähteenä hyödyntämisen näkökulmasta. Faasimuutoslämpöä hyödyntävien lämpöpumppujen haasteet liittyvät syntyvän jään käsittelyyn sekä epävarmuuteen todellisesta COP-kertoimesta. Tutkimuksessa havaitut jään hävittämistavat voidaan jakaa sulatusaltaisiin, sulatuskenttiin, varastointiin luonnollista sulamista varten ja jäähdytysjärjestelmiin. Edellä mainittujen tapojen toimintaa on tutkittu niin tieteellisesti kuin käytännössäkin. Näiden pohjalta tässä tutkimuksessa päädyttiin tarkastelemaan tarkemmin sulattamista paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa.

Merkittävimmät sulamisnopeuteen ja -aikaan vaikuttavat tekijät ovat veden lämpötila, jääkappaleen koko ja lämmönsiirtopinta-ala, konversio ja veden virtaus jään pinnalla. Lämpötilan muutoksen vaikutus alhaisilla lämpötiloilla on voimakas, mutta tasoittuu lämpötilan ollessa korkeampi. Jään konversiossa sulamisnopeus on ensin nopea, mutta hidastuu voimakkaasti kuin jääkappale ja lämmönsiirtoala pienenevät konversion vuoksi.

Tämän vuoksi sulamisajat lyhenevät merkittävästi, jos jääkuution konversioksi oletetaan alle 100 %. Jääkappaleen koon tapauksessa sulamisnopeus muuttuu voimakkaasti massan muuttuessa, kun alkuperäinen jääkappaleen massa on pieni. Alkuperäisen massan ollessa hieman suurempi muutos sulamisnopeudessa tasoittuu. Veden virtausnopeuden jään pinnalla tapauksessa alhaisilla sulamisnopeuden arvoilla sulamisaika on pitkä. Jään pinnalla olevan veden nopeuden kasvaessa sulamisaika lyhenee merkittävästi aluksi, mutta sulamisnopeuden kasvaessa sulamisajan lyheneminen tasoittuu ja muuttuu merkityksettömäksi.

Paikallaan olevan veden tapauksessa sulamisajat ovat suhteellisen pitkiä veden lämpötiloilla 0,5–16 °C ja selkeästi pidempiä kuin vesivirtauksen tapauksessa. Siten faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen, joka tuottaa jäätä 6 t/h, tapauksessa vesistö ei ehdi sulattamaan jäätä vesistön lämpötilan ollessa alle 12 °C, ellei jäätä pilkota mekaanisesti. Siten veden lämpötilan ollessa alle 12 °C jäätä kertyy vesistöön. Vesivirtaukseen perustuvan sulatusjärjestelmän tapauksessa maa-alueen pinta-alan tarve pienenee vesivirtauksen lämpötilan kasvaessa. Alhaisimmalla tarkastelulla lämpötilalla 0,5 °C alan tarve lähestyy 51 m<sup>2</sup>. Pinta-alan tarve pienenee ollen jo esimerkiksi 2 °C alle 37 m<sup>2</sup> ja 4 °C alle 35 m<sup>2</sup>. Ongelmaksi laitoksen kannattavuudelle etenkin alhaisilla lämpötiloilla saattaa osoittautua vesistöstä pumpattavan massavirran tarve ja siten pumpun tehon tarve etenkin aivan alhaisimmilla lämpötiloilla. Alhaisimmalla tarkastelulla lämpötilalla 0,5 °C pumpun tehon tulisi olla yli 70 kW, lämpötilalla 2 °C hieman alle 20 kW ja lämpötilalla 4 °C hieman alle 10 kW. Tutkimuksessa tehdyt herkkyystarkastelut osoittavat, että jään syntymisnopeuden muutokset aiheuttavat sekä jään kertymiseen vesistöön että dimensioituihin suureisiin, eli pinta-alan tarve, veden massavirta ja pumpun teho kasvavat samassa suhteessa muutokseen. Jään sulamisnopeuden muutoksessa havaittiin dimensioitujen suureiden arvon muuttuvan vain vähän suhteessa sulamisnopeuden muutokseen, mutta jään kertymisen muutokset eivät vastanneet samassa suhteessa muutokseen vaan vaihtelivat veden lämpötilan muuttuessa.

Paikallaan olevalla vedellä sulattaminen soveltuu kohteille, jossa viereinen vesistö on suuri, vesistön lämpötila mahdollisimman korkea talviaikaan ja tilaa laitosalueella on vähäisesti. Paikallaan olevan vedellä sulattamisen etuina voidaan pitää vähäisiä rakennuttamis- ja laitteistotarpeita sekä vähäisempää sähköenergian kulutusta, kun vettä ei tarvitse pumpata. Vesivirtauksella sulattaminen soveltuu etenkin silloin, kun vesistön lämpötila on alhainen, vesistö on pieni, etäisyys vesistöön on pitkä, vesistöön ei ole soveltuvaa purkupaikkaa, vesistöön ei saa kertyä jäätä ylimääräistä jäätä ja/tai muutoin jään purkamista vesistöön ei sallita.

Jään sulattamiseen lämpöpumppulaitoksella liittyy potentiaalisia optimoinnin kohteita, koko lämpöpumppulaitoksen toiminnan kannalta. Potentiaaliset optimoinnin kohteet liittyvät vesivirtauksen tapauksessa sulatusalueen pinta-alaan ja veden massavirran tarpeeseen ja lämpöpumppulaitoksen tapauksessa jään tuottamiseen. Mahdolliset jatkotutkimusaiheet voisivat liittyä veden virtausnopeuden käyttäytymisen ja virtauksen jäähtymisen tarkasteluun jään pinnalla, arviointiin jääkappaleiden muodon vaikutuksista sulamisaikaan sekä jään uudelleen- ja hyötykäyttömahdollisuuksien selvittämiseen.

Tämä tutkimus toimii esiselvityksenä megawattikokoluokan faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen suunnittelulle ja rakennuttamiselle. Tutkimuksen perusteella on mahdollista arvioida soveltuvinta tapaa faasimuutoslämpöä hyödyntävän lämpöpumppulaitoksen tuottaman jään hävittämiseksi. Lisäksi tämän tutkimuksen perusteella on mahdollista yleisellä tasolla arvioida jään sulamiskäyttäytymistä paikallaan olevassa vedessä ja vesivirtauksessa.

# LÄHTEET

- Achenbach, E. (1995). Heat and flow characteristics of packed beds. *Exp Thermal Flu-id Sci.* Vol. 10, pp. 17–27.
- Aittomäki, A. (1983). Maaperä ja vesistöt lämmönlähteinä. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
- Alexiades, V. & Solomon, A. D. (1993). *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes.* Taylor & Francis.
- ASHRAE (2018). *2018 ASHRAE Handbook - Refrigeration (I-P Edition).* American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- Averfalk, H., Ingvarsson, P., Persson, U., Gong, M. & Werner, S. (2017). Large heat pumps in Swedish district heating systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Vol. 79, pp. 1275-1284.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2017). *Incropera's principles of heat and mass transfer.* Wiley Global Education.
- Chua, K. J., Chou, S. K. & Yang, W. M. (2010). Advances in heat pump systems: A review. *Applied energy.* Vol. 87(12), pp. 3611–3624.
- Clewat Oy. Ympäristöystävällinen lumensulatus. Saatavissa (viitattu 24.7.2022): <https://clewat.com/ymparistoystavallinen-lumensulatus/>
- David, A., Mathiesen, B. V., Averfalk, H., Werner, S. & Lund, H. (2017). Heat roadmap Europe: large-scale electric heat pumps in district heating systems. *Energies.* Vol. 10(4), p. 578.
- Eames, I. W. & Adref, K. T. (2002). Freezing and melting of water in spherical enclosures of the type used in thermal (ice) storage systems. *Applied thermal engineering.* Vol. 22(7), pp. 733–745.
- Energiategollisuus (2022a). Kaukolämpövuosi 2021. Saatavissa (viitattu 6.12.2022): [https://energia.fi/files/5650/Kaukolampo\\_2021\\_v2.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampo_2021_v2.pdf)
- Energiategollisuus (2022b). Vihreällä siirtymällä irti venäläisestä energiasta. Saatavissa (viitattu 18.7.2022): [https://energia.fi/energiapolitiikka/ukrainan\\_sota/vihrealla\\_siirtymalla\\_irti\\_venaja-riippuvuudesta](https://energia.fi/energiapolitiikka/ukrainan_sota/vihrealla_siirtymalla_irti_venaja-riippuvuudesta)
- Energiavirasto a. Biomassojen ja biopolttoaineiden kestävyys. Saatavissa (viitattu 4.2.2023): <https://energiavirasto.fi/biomassojen-ja-biopolttoaineiden-kestavyys>
- Energiavirasto b. Päästökauppa. Saatavissa (viitattu 18.7.2022): <https://energiavirasto.fi/paastokauppa>
- Eskafl, M., Ásmundsson, R. & Jónsson, S. (2019). Feasibility of seawater heat extraction from sub-Arctic coastal water; a case study of Onundarfjörður, northwest Iceland. *Renewable Energy.* Vol. 134, pp. 95–102.
- Euroopan komissio (2011). *Energy Roadmap 2050, COM (2011) 885 Final.*
- Fink, G., Schmid, M. & Wüest, A. (2014). Large lakes as sources and sinks of anthropogenic heat: Capacities and limits. *Water Resources Research.* Vol. 50, pp. 7285-7301.
- Finlayson, B. A. & Olson, J. W. (1987). Heat transfer to spheres at low to intermediate Reynolds numbers. *Chemical Engineering Communications.* Vol. 58(1-6), pp. 431-447.
- Fischer, D. & Madani, H. (2017). On heat pumps in smart grids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Vol. 70, pp. 342–357.
- Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z. & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science.* Vol. 71, 101764.
- Hao, Y. & Tao, Y. (2001). Melting of a solid sphere under forced and mixed convection: flow characteristics. *Journal of Heat Transfer.* Vol. 123(5), pp. 937–950.
- Helen (2022). Helenin meriveden lämmöntalteenotto- ja toteutusvaiheisiin. Saatavissa (viitattu 9.10.2022): <https://www.helen.fi/uutiset/2022/helen-kilpailuttaa-allianssikompanin-merivesijarjestelm%C3%A4n-kehitys-ja-toteutusvaiheisiin>
- Hiawen, S., Tingyu, W., Xin, J., Zhiyong, R., Haiyang, Y. & Duanmu, L. (2016). Energy Efficiency Enhancement Potential of the Heat Pump Unit in a Seawater Source Heat Pump District Heating System. *Procedia Engineering.* Vol. 146, pp. 134–138.



- Hirvonen, S. (2022). Pintaveden jäädyttäminen lämpöpumpun lämmönlähteenä kaukolämmön tuotannossa. Diplomityö, Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.
- Hosseini, R. & Rahaeifard, M. (2009). Experimental Investigation and Theoretical Modeling of Ice-Melting Processes. *Experimental Heat Transfer*. Vol. 22(3), pp. 144–162.
- Ilmatieteen laitos. Meriveden lämpötilatilastot. Saatavissa (viitattu 8.1.2023): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/meriveden-lampotilatilastot>
- Kaappola, E., Hirvelä, A., Jokela, M., & Kianta, J. (2022). *Kylmätekniiikan perusteet* (10. uudistettu painos.). Opetushallitus.
- Kahraman, R., Zughbi, H. D., Al-Nassar, Y. N., Hastaoglu, M. A. & Sobh, N. (1998). A simplified numerical model for melting of ice with natural convection. *International communications in heat and mass transfer*. Vol. 25(3), pp. 359-368.
- Kast, W. & Klan, H. (2010). *Heat Transfer by Free Convection: External Flows*. VDI Heat Atlas, pp. 667–672.
- Kavanaugh, S. P. & Rafferty, K. D. (2014). Geothermal heating and cooling: design of ground-source heat pump systems. ASHRAE.
- Kontu, K., Rinne, S. & Junnila, S. (2019). Introducing modern heat pumps to existing district heating systems- Global lessons from viable decarbonizing of district heating in Finland. *Energy*. Vol. 166, pp. 862-870.
- Kumar, V., Hewage, K., Haider, H. & Sadiq, R. (2016). Techno-economic performance evaluation of building cooling systems: A study of snow storage and conventional chiller systems. *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 130, pp. 8-20.
- Lai, J., Qiu, J., Chen, J., Fan, H. & Wang, K. (2015). New technology and experimental study on snow-melting heated pavement system in tunnel portal. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2015.
- Lei, G. L., Dong, W., Zheng, M., Guo, Z. Q. & Liu, Y. Z. (2017). Numerical investigation on heat transfer and melting process of ice with different porosities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 107, pp. 934-944.
- Leppäranta, M., Virta, J. & Huttula, T. (2017). *Hydrologian perusteet*. Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto. 223 s.
- Liu, L., Wang, M. & Chen, Y. (2019). A practical research on capillaries used as a front-end heat exchanger of seawater-source heat pump. *Energy*. Vol. 171, pp. 170–179.
- Maeda, T., Kinoshita, S., Sato, S. & Ujiie, A. (1994). Design of a snow melting tank using treated wastewater. *Water Science and Technology*. Vol. 29(1-2), pp. 319-326.
- McLeod, P., Riley, D. S. & Sparks, R. S. J. (1996). Melting of a sphere in hot fluid. *Journal of Fluid Mechanics*. Vol. 327, pp. 393-409.
- Mensah, K. & Choi, J. M. (2015). Review of technologies for snow melting systems. *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 29(12), pp. 5507–5521.
- Moe, J. M. (2018). Using stored snow as cooling at Oslo Airport, Norway. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, Vol. 171(5), pp. 11-16.
- Moghadas, S., Gustafsson, A. M., Muthanna, T. M., Marsalek, J. & Viklander, M. (2016). Review of models and procedures for modelling urban snowmelt. *Urban Water Journal*. Vol. 13(4), pp. 396–411.
- Motiva. Maalämpöpumppu. Saatavissa (viitattu 26.10.2022): [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/maalam-popumppu](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/maalam-popumppu)
- Nurmi, A. (2013). Lumen sulatus kaukojäähdytyksen ja kaukolämmön paluuedellä Helsingissä. Diplomityö, Aalto-Yliopisto.
- Passi, P., Ruohonen, S., Kontu, K. & Rinne, S. (2016). Suuret lämpöpumput kaukolämpöjärjestelmässä. Valor Partners Oy. Energiateollisuus ry.
- Qin, N., Wu, Y., Wang, H. W. & Wang, Y. Y. (2017). Experimental study and numerical simulation of the salinity effect on water-freezing point and ice-melting rate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 283(1), 012027.
- Rauhamäki, J. (2019). Merivesilämpöpumput kiinnostava mahdollisuus myös Helsingissä. Saatavissa (viitattu 9.10.2022): <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2019/merivesilampopumput>
- Rees, S. J., Spittler, J. D. & Xiao, X. (2002). Transient analysis of snow-melting system performance. *ASHRAE Transactions*. Vol. 108(2), pp. 406–423.

- Rosviki, P. D. S., Albrigtsenz, M. S. R. & Flagstad, M. S. O. A. (1993). Heat pump with ice production from river water Project Seilduksfabrikken A/S. Teoksessa *Heat Pumps for Energy Efficiency and Environmental Progress*, pp. 411-414. Elsevier.
- Sayegh, M. A., Jadwiszczak, P., Axcell, B. P., Niemierka, E., Bryś, K. & Jouhara, H. (2018). Heat pump placement, connection and operational modes in European district heating. *Energy and Buildings*. Vol. 166, pp. 122-144.
- Schenk, J. & Schenkels, F. (1968). Thermal free convection from an ice sphere in water. *Applied Scientific Research*. Vol. 19(1), pp. 465-476.
- Seehusen, J. (2011). Oslosnøen går rett i havet. Saatavissa (viitattu 22.9.2022): <https://www.tu.no/artikler/oslosnoen-gar-rett-i-havet/249785>
- Serebrennikov, A. A., & Plokhov, A. A. (2019). Impact of physical and mechanical characteristics of snow on the melting process intensity. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 272(2), p. 022131.
- Sitra (2021). Uusi selvitys: Biomassan kysyntä kasvaa tuntuvasti EU:ssa, tulevaisuuden käyttökohteet harkittava tarkasti. Saatavissa (viitattu 5.2.2023): <https://www.sitra.fi/uutiset/uusi-selvitys-biomassan-kysynta-kasvaa-tuntuvasti-eussa-tulevaisuuden-kayttokohteet-harkittava-tarkasti/>
- Skogsberg, K. (2005). Seasonal snow storage for space and process cooling. Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet.
- Skogsberg, K. & Nordell, B. (2001). The Sundsvall hospital snow storage. *Cold Regions Science and Technology*. Vol. 32(1), pp. 63-70.
- Skogsberg, K. & Lundberg, A. (2005). Wood chips as thermal insulation of snow. *Cold regions science and technology*. Vol. 43(3), pp. 207-218.
- Smil, V. (2016). Examining energy transitions: A dozen insights based on performance. *Energy Research & Social Science*. Vol.22, pp. 194-197.
- Solomon, A. (1979). Melt time and heat flux for a simple PCM body. *Solar Energy*. Vol. 22, pp. 251-257.
- Stara (2021). Staran lumensulatuskokeilussa positiivisia tuloksia. Saatavissa (viitattu 24.7.2022): <https://www.sttinfo.fi/tiedote/staran-lumensulatuskokeilussa-positiivisia-tuloksia?publisherId=17448252&releaseId=69903155>
- Stephan, P. (2010). Fundamentals of heat transfer. Teoksessa *VDI Heat Atlas*, pp. 17-30.
- Su, C., Madani, H., Liu, H., Wang, R. & Palm, B. (2020). Seawater heat pumps in China, a spatial analysis. *Energy Conversion and Management*. Vol. 203, pp. 1-15.
- Sulpu ry. Lämpöpumpputilasto 2021. Saatavissa (viitattu 16.12.2022): <https://www.sulpu.fi/suomen-lampopumpputilastot-vuosi-2021/>
- Sundin, E. (1998). Snow deposit melt and atmospheric icing: analysis and modelling by weather station data. Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet.
- Suomen virallinen tilasto (SVT). Sähkön ja lämmöntuotanto 2020. Saatavissa (viitattu 18.7.2022): [https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo\\_2020\\_2021-11-02\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html)
- SYKE (2019). Järvilämpöä urheiluopistoon Lohjalla. Saatavissa (viitattu 30.10.2022): <https://kestavyysloikka.ymparisto.fi/jarvilampoa-urheiluopistoon-lohjalla/>
- Takala, A. (2014). Uusiutuvan energian käyttömahdollisuudet liikuntakeskus Pajulahdessa. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- Takeda, S., Nagano, K., Katsura, T., Ibamoto, T., Narita, S. & Nakamura, Y. Snow melting performance of ground snow melting tank. Hokkaido University & Nippon Steel Corporation.
- Tangthieng, C. (2011). Effect of tube diameter on the specific energy consumption of the ice making process. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 31, pp. 701-707.
- Tubini, N. G. S. & Rigon, R. (2021). A method for solving heat transfer with phase change in ice or soil that allows for large time steps while guaranteeing energy conservation. *The Cryosphere*. Vol. 15(6), pp. 2541-2568.
- Vanier, C. R. & Tien, C. (1970). Free convection melting of ice spheres. *AIChE Journal*. Vol. 16(1), pp. 76-82.
- Wahlroos, M., Pärssinen, M., Rinne, S., Syri, S. & Manner, J. (2018). Future views on waste heat utilization—Case of data centers in Northern Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82, pp. 1749-1764.

Wang, Y., Wong, K. K., Liu, Q. H., Jin, Y. T. & Tu, J. (2012). Improvement of energy efficiency for an open-loop surface water source heat pump system via optimal design of water-intake. *Energy and buildings*. Vol. 51, pp. 93–100.

Wang, X., Zhu, Y., Zhu, M., Zhu, Y., Fan, H. & Wang, Y. (2017). Thermal analysis and optimization of an ice and snow melting system using geothermy by super-long flexible heat pipes. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 112, pp. 1353–1363.

WSP Finland Oy (2010). Lumen vastaanottoaikat -selvitys. Helsingin kaupungin rakennusviraston julkaisut 2010:16.

Wu, Z., You, S., Zhang, H., & Zheng, W. (2020). Model development and performance investigation of staggered tube-bundle heat exchanger for seawater source heat pump. *Applied Energy*. Vol. 262, 114504.

Ympäristönsuojelulaki 527/2014. Annettu Helsingissä 27.6.2014.

Zhao, W., Su, W., Li, L., Zhang, Y. & Li, B. (2020). Optimization design of the road unit in a hydronic snow melting system with porous snow. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 141(5), pp. 1509–1517.

Zhutovsky, S. & Kovler, K. (2015). Evaluation of the thermal expansion coefficient using non-destructive testing. *Proceedings of 10th international conference on mechanics and physics of creep, shrinkage, and durability of concrete and concrete structures—CONCREEP*. Vol. 10, pp. 1137–1146.