

Asta Kallunki

## **LUMIVARASTOJEN HYÖDYNTÄMINEN RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYKSESSÄ**

Katsaus lumijäähdytysjärjestelmän toimintaan ja taloudellisuuteen

# LUMIVARASTOJEN HYÖDYNTÄMINEN RAKENNUSTEN JÄÄHDYTYKSESSÄ

Katsaus lumijäähdytysjärjestelmän toimintaan ja taloudellisuuteen

Asta Kallunki  
Opinnäytetyö  
Kevät 2024  
Talotekniikka  
Oulun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Talotekniikan tutkinto-ohjelma, LVI-insinööri

---

Tekijä: Asta Kallunki

Opinnäytetyön nimi: Lumivarastojen hyödyntäminen rakennusten jäähdytyksessä - Katsaus lumijäähdytysjärjestelmän toimintaan ja taloudellisuuteen

Työn ohjaaja(t): Niko Peltokangas

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2024

Sivumäärä: 42 + 2 liitettä

---

Mukavuusjäähdytystä tullaan näillä näkymin tarvitsemaan enenevässä määrin ja perinteiset kylmäaineet ovat tietyiltä ominaisuuksiltaan ympäristölle haitallisia ja niiden käyttöä pyritään rajoittamaan. Lisäksi erilaiset hiilineutraaliustavoitteet asettavat oman haasteensa jäähdytysjärjestelmille.

Tässä työssä perehdytään yhteen vaihtoehtoiseen jäähdytysmuotoon, lumijäähdytykseen. Työssä hyödynnettiin olemassa olevaa tutkimusdataa lumijäähdytysjärjestelmistä Ruotsista ja Norjasta, sekä erinäisiä muita kirjoituksia ja lähteitä, joista työ koostettiin.

Työn tuloksena selvisi, että lumijäähdytysjärjestelmä on toimiva vaihtoehto Oulun alueella. Verrattuna esimerkiksi perinteisiin jäähdytysjärjestelmiin, joiden COP on noin 3,5, lumijäähdytys tuottaa paremman kylmäkertoimen ja kuluttaa vähemmän sähköä. Ongelmiksi työssä huomattiin aurauslumen epäpuhtaus, lumitykeillä tuotettavan lumen energiatarpeet ja järjestelmän tilavaatimukset.

---

Asiasanat: lumijäähdytys, vapaajäähdytys, uusiutuva energia, aurauslumi

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Building Services, Bachelor of Engineering

---

Author: Asta Kallunki

Title of thesis: Using snow storages for cooling buildings – A brief look into snow cooling system and its economic value

Supervisor(s): Niko Peltokangas

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2024

Number of pages: 42 + 2 appendices

---

This thesis provides general information about a snow cooling system and its economic value. It's important to investigate snow cooling as an alternative to traditional cooling machines to lessen pollution and carbon emissions. There is also some proof that a snow cooling system might be cheaper than some other methods used for commercial cooling after a while of operating. The biggest cost efficiency factor is that the snow cooling system uses less electricity than conventional cooling systems and that the cold transfer fluid is meltwater from the snow.

The thesis was put together mainly from other already existing works and studies. It's noteworthy to mention that there aren't too many snow cooling experts in the world. Most knowledge comes from Sweden, Norway, and Japan.

Results of this thesis show that a snow cooling system could be implemented in Finland's climate, there is enough snow in the Oulu region and the seasonal average temperature also supports this claim. Problems that arose include: the quality and cleanliness of plowed snow, the snow storage's large size and building costs. Also, the costs of snow cannons using water and electricity in producing artificial snow.

---

Keywords: snow cooling, free-cooling, renewable energy, carbon neutrality, plough snow

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	VAPAAJÄÄHDYTYSMENETELMÄT .....	7
2.1	Mukavuusjäähdytyksen historiaa .....	7
2.2	Lumijäähdytyksen toiminnasta .....	8
2.3	Esimerkkejä lumijäähdytysjärjestelmistä .....	12
2.3.1	Sundsvallin sairaala, Ruotsi .....	13
2.3.2	Kustannukset .....	14
2.3.3	Ennen käyttöönottoa .....	15
2.3.4	Oslon lentokenttä, Norja .....	16
2.3.5	Toiminnasta .....	17
2.3.6	Ensimmäisten toimintavuosien tarkastelu .....	19
2.3.7	Lumivaraston koosta ja järjestelmän soveltuvuudesta .....	21
3	LUMIJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUSTA JA TALOUDELLISUUDESTA ...	22
3.1	Lumivaraston koon mitoittamisesta .....	23
3.2	Lumivarastoon vaikuttavat lämpökuormat ja lumen sulamisen huomioiminen .....	24
3.3	Lumijäähdytyksen taloudellisuus .....	28
3.4	Lumijäähdytysjärjestelmän vertailu perinteisiin viilennysjärjestelmiin .....	29
3.5	Lumitykeillä tuotettu lumi .....	30
3.6	Sulamisvesi kylmäaineliuksena .....	31
3.7	Aurauslumen potentiaali lumijäähdytyksessä .....	32
3.8	Esimerkkilaskelma 5,5 MW jäähdytyslaitokselle .....	36
4	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	39
5	POHDINTAA .....	42
	LÄHTEET .....	43
	LIITTEET .....	46

# 1 JOHDANTO

Lunta ja jäätä on käytetty muun muassa ruokatarpeiden säilyttämiseen jo satoja vuosia sitten, esimerkiksi jääkellareita ja sahanpuruilla peitetyjä jääkasoja hyödynnettiin Suomessa jopa vielä pitkälle 1950- ja 1960-luvulle jääkaapin yleistymiseen saakka, varsinkin maaseudulla. (Darment Oy 2023.)

Jäähdytysjärjestelmät ja niiden kehittäminen ovat ajankohtaisia aiheita. Asuin- ja muiden rakennusten jäähdytystä tullaan tarvitsemaan näillä näkymin aina vain enemmän ihmismäärän maapallolla toistaiseksi kasvaessa ja ilmaston lämmitessä siten, että kesäisin jo pohjoisellakin pallonpuoliskolla on huomattavasti lämpimämpää kuin koskaan aiemmin.

Kylmäala kehittyi edelleen ja esimerkiksi lumella toteutettava mukavuusviilennys on varteenotettava vaihtoehto suuremmissa kohteissa, kun harkitaan ilmastoa suojelevaa vaikutusta ja raaka-ainepotentiaalin uusiutuvuutta. Lumijäähdytyksen rinnalle on mahdollista ottaa myös perinteisillä kylmäaineilla toimiva jäähdytysjärjestelmä hybridiratkaisuksi, mikäli tätä kohteeseen halutaan ja sitä olisi kannattavaa käyttää.

Talvet ovat edelleen toistaiseksi esimerkiksi Suomessa runsaslumisia ja pitkäkestoisia. Hukkaan menevällä lumella voi olla valtava jäähdytyspotentiaali, jos se saadaan valjastettua oikein.

Lumen käyttäminen rakennusten jäähdytykseen ei ole uusi keksintö. Lumijäähdytysjärjestelmät voisivat edesauttaa uusiutuvien energiamuotojen valtavirtaistamista siitä huolimatta, että käyttöönottokustannukset ovat suurehkoja. On kannattavaa miettiä, onko kyseessä oleva jäähdytystapa sellainen, että se tukisi tulevaisuuden hiilineutraaliuden tavoitetta.

Tässä työssä on tarkasteltu lumijäähdytysjärjestelmän toimintaa ja taloudellisuutta, sekä sivuttu mahdollisuutta hyödyntää järjestelmää Oulun alueella. Työlle ei ollut olemassa olevaa kohdetta, joten työn aikana on painotettu jo olemassa olevia sovelluksia ja niistä tehtyä tutkimusta sekä tuloksia. Näistä on tehty yhteenveto, joka tarjoaa tietoa lumijäähdytyksestä ja sen suunnittelupe-  
rusteista. Lisäksi teorian pohjalta on esitetty ajatuksia järjestelmän hyödyntämisestä Oulussa.

## 2 VAPAAJÄÄHDYTYSMENETELMÄT

Vapaaäähdytyksestä puhuttaessa tarkoitetaan järjestelmiä, jotka hyödyntävät joko sisälämpötilaa alhaisempaa ulkolämpötilaa tai vaikkapa kylmää vettä kylmäaineen sijasta. Yksinkertaisimmillaan suoraa vapaaäähdytystä voi verrata kotona ikkunan aukaisemiseen talvipakkasella. Asunnosta poistuu lämmintä ilmaa ja tilalle saadaan kylmää korvausilmaa esimerkiksi saunomisen tai kokkaamisen jälkeen, jolloin lämpökuormaa syntyy asuintiloihin hetkellisesti enemmän.

Toiminnallisuuden kannalta vapaaäähdytysjärjestelmä, varsinkin viileällä ilmalla toimiva, tarvitsee tarpeeksi suuren lämpötilaeron. Ulkoilmavirralla viilennettäessä +10 °C alaspäin oleva ulkoilman lämpötila on sopiva, jotta järjestelmää on järkevä käyttää. (Toivanen 2010.)

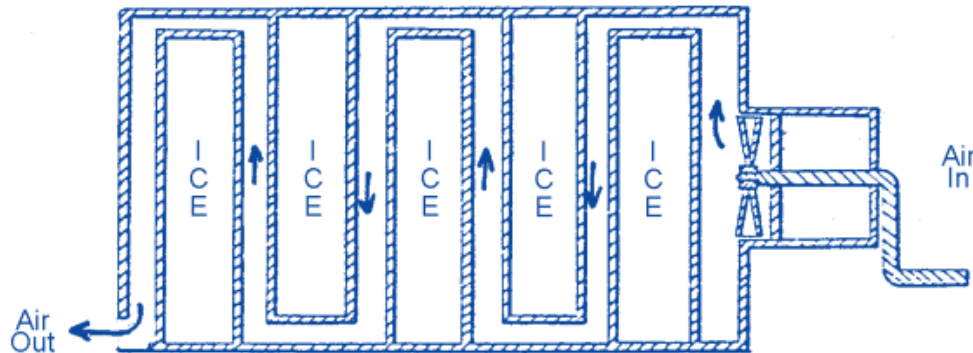
Hyödynnettäessä vapaaäähdytysjärjestelmiä on mahdollista saada säästöä energiakustannuksissa ja energian kulutuksessa. Lisäksi järjestelmät ovat yleisesti ottaen ympäristöystävällinen vaihtoehto, kun halutaan jäähdyttää esimerkiksi teollisuuskohteita tai toimistorakennuksia, näitä ratkaisuja käytetään varsinkin atk-tilojen viilennykseen. Monesti vapaaäähdytyksen lisäksi järjestelmässä on myös hybridiominaisuutena kylmäainepiiri, sille ajalle, kun vapaaäähdytystä ei ole mahdollista käyttää. (Toivanen 2010.)

### 2.1 Mukavuusjäähdytyksen historiaa

Koneellisesti mukavuusviilennykseen lunta ja jäätä on käytetty todennäköisesti ensimmäisen kerran 1800-luvulla. USA:n Cincinnatiin kotoisin oleva George Knight ehdotti Scientific American-lehdessä sairaalaan kehitettyä järjestelmää, joka sisälsi ilmastointilaitteiston ilmankostuttimella, joka puhdisti ja viilensi kierrätettävää ilmaa. Ilmankostuttimen vesi kiersi jäähdytyskierukan kautta, joka oli ympäröity sulavalla jäällä. Ilma pakotettiin puhaltimen avulla kulkemaan kylmän vesisumutteen kautta rei'itettyjen päätelaitteiden lävitse. (Nagengast, 1999.)

Knighatin kommenttina keksintöön oli, että laite oli tarkoitettu valinnaiseen & harkinnanvaraiseen käyttöön kesäkuumalla. Vuonna 1865, vain vuosi Knighatin vanavedessä, Nathaniel Shaler esitteli jään avulla toimivan ”parannellun jäähdytysaparaattinsa” (vapaasti suomennettuna), laitteen toimintaperiaate nähtävissä kuvassa 5. Tässä laitteessa on lämmönvaihtimena jäällä täytettyjä lokeeroita ja ilma puhalletaan hyvin kapeaa ja mutkittelevaa reittiä jäähdytettävään tilaan. Shalerin

mukaan laitteessa oli mahdollista käyttää myös kuivausainetta, kuten esimerkiksi silikageeliä, jos ilmavirran halusi pysyvän kuivana. (Nagengast, 1999.)



*Figure 1: Shaler's patented cooler for ventilating air, 1865.*

KUVA 1. Nathaniel Shalerin jäädytyslaite (Nagengast, 1999)

Nykyisellään jäädytysjärjestelmät ovat kehittyneet huomattavasti Knightin ja Shalerin keksinnöistä. Esimerkiksi ilmalämpöpumput kierrättävät kylmäaineen avulla viilennettyä ilmaa ja vähentävät tiloista ilmankosteutta, joka on monesti tukalan olon syytä lämpimillä ilmoilla.

Kylmäaineita käytetään yleisesti ilmalämpöpumpuissa, autojen ilmastointijärjestelmissä ja jääkaapeissa. Raaka-aineet näihin kaasun muodossa käytettäviin kylmäaineisiin louhitaan kaivoksissa, joista monet sijaitsevat Kiinassa. Huomattavaa on myös se, että kylmäaineiden ilmastoa lämmittävä vaikutus on pahimmillaan jopa 23 000 kertaa suurempi kuin hiilidioksidin. (Kylmäaine.fi 2023.)

## 2.2 Lumijäädytyksen toiminnasta

Yksi vapaajäädytyksen muoto on lumijäädytys, joka hyödyntää talviaikana varastoitua lunta esimerkiksi aurauksen sivutuotteena tai lumitykeillä tuotettuna. Lumijäädytykseen tarvitaan paljon lumimassaa, kuten esimerkiksi Sundsvallin sairaalassa ja Oslon lentokentällä käytettävissä lumijäädytysjärjestelmissä.

Lumimassan määrät vaihtelivat Sundsvallin 30 000 m<sup>3</sup> varastosta Oslon 90 000 m<sup>3</sup>. Lumen säilöminen varastoon tapahtuu lumisena aikana, jolloin aurauslumet lähialueelta tai muulta suunnit-



tellulta alueelta toimitetaan lumivarastoon jäähdytyskautta odottamaan. (Nordell & Skogsberg 2007; Moe 2018.)

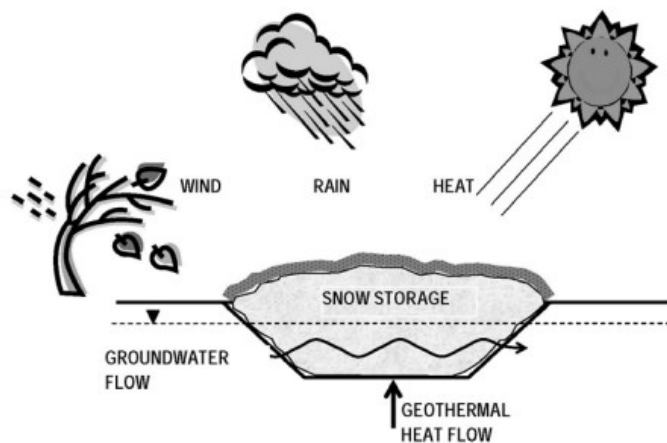
Lumivarastoille on erilaisia vaihtoehtoja, kuten kuvassa 1 on esitetty. Vasemmalta oikealle kuvailtuna: lumimassaa voidaan säilyttää joko varistorakennuksessa tai kokonaan maanpinnalla päältä lämpöeristettynä. Lunta voidaan varastoida myös osittain kuopassa tai altaassa ja päältä lämpöeristettynä. Säilytys voi olla myös täysin maan alla, jolloin luonnolliseen sulamiseen myötävaikuttavia tekijöitä saadaan eliminoitua eniten, eikä erillisiä eristeitä tarvita, sillä ympäröivä maa-aines on tarpeeksi eristävää sellaisenaan. (Nordell & Skogsberg 2007.)



KUVA 2. Vaihtoehtoja erilaisille lumivarastoille (Nordell & Skogsberg 2007)

Maan päälle tai osittain kuoppaan/altaaseen sijoitettu lumimassa voidaan eristää muutamalla eri tavalla, muun muassa irrallisella täyte-eristyksellä, joka voi olla esimerkiksi puulastuja, riisin kuoria tai mineraaleja sisältävää murskettä. Eristelakanoita on myös mahdollista käyttää. Ne voivat olla vaikkapa ojella täytettyjä tai täyttämättömiä pressuja. On kuitenkin huomattava, että lumimassaan kohdistuvia lämpövuotoja tapahtuu aina, kun ympäristön lämpötila ylittää 0 °C. (Nordell & Skogsberg 2007.)

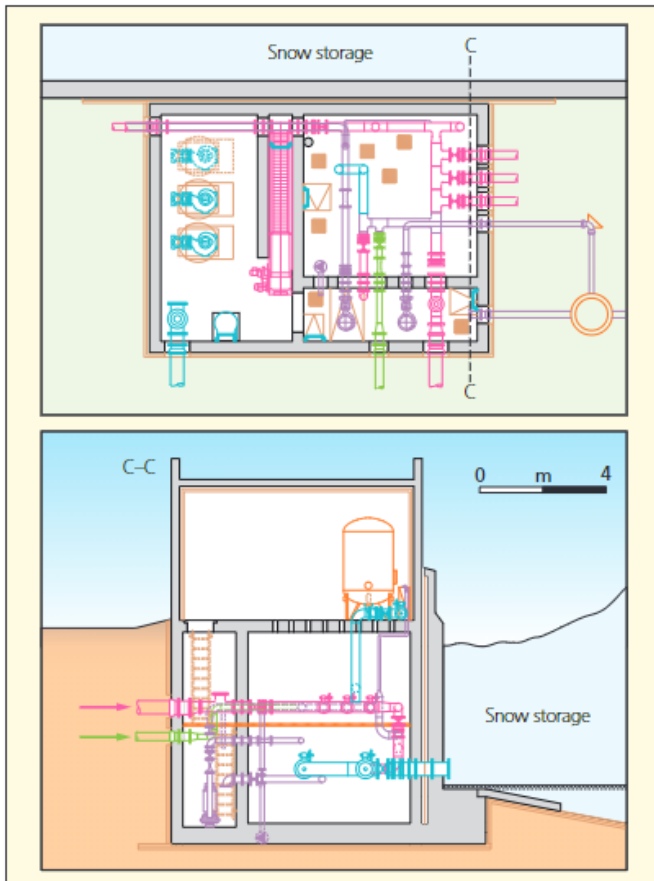
Luonnollisessa sulamisessa lämpökuormat tulevat lumimassaa ympäröivistä olosuhteista. Luonnolliseen sulamiseen luokitellaan maasta johtuva sulaminen, sateesta johtuva sulaminen sekä pinnan sulaminen. Kuvassa 2 on havainnollistettu näitä sulamismuotoja. Lumimassan pinnan sulaminen johtuu lämpösäteilystä ja ilman vaikutuksesta. Maa-aineksen vaikutuksesta tapahtuva sulaminen johtuu siitä, että lumivaraston pohjaa ja sivuja rasittavat lämpökuormat. Näiden luonnollisten sulamisien jälkeen jäävä lumimassa on se, jota pystytään hyödyntämään viilennystarkoitukseen. (Nordell & Skogsberg, 2007.)



KUVA 3. Luonnollisen sulamisen lähteet päältä avoimessa, mutta eristetyssä lumivarastoaltaassa (Nordell 2015)

Lumivarastojen suurta kokoa selittää myös osin se, että lumesta hukataan tietty osa joka tapauksessa, eikä tätä ole mahdollista täysin estää nykyisellä teknologialla. Lisäksi sulamisvettä tarvitaan järjestelmän toimivuuden kannalta, joten täysin sulamaton lumi ei lopulta edes palvelisi tarkoitusta. Kaikissa varastointitavoissa tulee huomioida, että lumimassaa ympäröivän alustan tulee olla vettä läpäisemätön, jotta epäpuhdas sulamisvesi ei imeydy maaperään, vaan käsitellään asianmukaisesti. (Nordell & Skogsberg 2007; Moe 2018.)

Jäähdytysjärjestelmän toiminta perustuu siihen, että sulamisvettä kierrätetään kylmäaineena jäähdytysputkistossa. Esimerkiksi Oslon lentokentän lumivarastosta sulamisvesi johdetaan kolmi-kerroksiseen pumppaamoon, tämä on havainnollistettu kuvassa 3 (Moe 2018).



KUVA 4. Lumijäähdytysjärjestelmän pumppaamo, yläkymä ja sivuleikkaus (Moe 2018)

Sulamisvedelle on kolme erillistä sisäänottoaukkoa altaan länsiseinämällä, jolla myös pumppaamorakennus sijaitsee. Vesi johdetaan ennen pumppuja hihnaseulan lävitse, jotta siitä saadaan siivilöityä kaikki vierasesineet, kuten puulastut, hiekka tai muut vastaavat, etteivät pumput ja putkisto tukkeudu. (Moe 2018.)

Sulamisveden lämpötila on 0–2 °C ja paluueden lämpötila noin 10 °C, hieman kuukaudesta ja ympäröivästä lämpötilasta riippuen. (Nordell 2015.)

Pumppaamolta sulamisvesi siirtyy lämmönvaihtimelle, jossa se vielä hienosuodatetaan pyörivässä automaattisuodattimessa. Tämän jälkeen viileä sulamisvesi tekee vaihdon lämpimämmän paluueden kanssa lämmönvaihtimessa ja jatkaa matkaansa lentokentän jäähdytysjärjestelmään. Paluuvesi johdetaan takaisin lumen varastoaltaaseen, mikä edesauttaa lumimassan sulamisen käynnissä pysymistä. Lumialtaan ympäristössä on neljä erillistä venttiiliä, jotka säätävät paluueden takaisinsuodattumista altaaseen. Tunneleiden ja kanavien muodostumista lumimassaan estetään sillä, että imuventtiileitä ja takaisinsuodatusta kontrolloivia venttiileitä käytetään saman-

aikaisesti. Mikäli lumimassaan muodostuisi tunneleita ja/tai kanavia sulamisen tai venttiilien eriaikaisen käytön seurauksena, tällä olisi vaikutusta lämmön siirtymiseen ja sulamisprosessin tasaisuuteen. (Moe 2018.)

Jokaisen jäähdytyskauden jälkeen on tärkeää tyhjentää ja puhdistaa lumivarasto, kuten kuvasta 4 nähdään. Tyhjennystä ja veden tasaista levittymistä varten järjestelmässä on kaksi pumppua, joista toinen huolehtii siitä, että kaikki sulamisvesi johdetaan maanalaiseen kivisäiliöön. (Moe 2018.)



*KUVA 5. Sulamisvettä lumialtaassa kesäaikaan vasemmalla ja puhdistusta varten tyhjennetty allas oikealla (Avinor/Halvard Felde)*

Altaan tyhjennys ja puhdistus jokaisen jäähdytyskauden jälkeen on tärkeää, siksi ettei lämmönvaihtimeen ala kertyä leväkasvustoa. Tämä alentaisi painetta järjestelmässä mikä pudottaisi koko systeemin kapasiteettia ja vaikuttaisi lämmön siirtymisen arvoihin. (Moe 2018.)

### **2.3 Esimerkkejä lumijäähdytysjärjestelmistä**

Seuraavissa kappaleissa esitellään yksityiskohtaisemmin Ruotsissa sijaitsevaa Sundsvallin sairaalaa sekä Norjassa sijaitsevaa Oslon lentokentän uudisrakennusta. Molemmissa kohteissa käytetään jäähdytyskauden aikana lumijäähdytysjärjestelmää perinteisen jäähdytysjärjestelmän rinnalla.

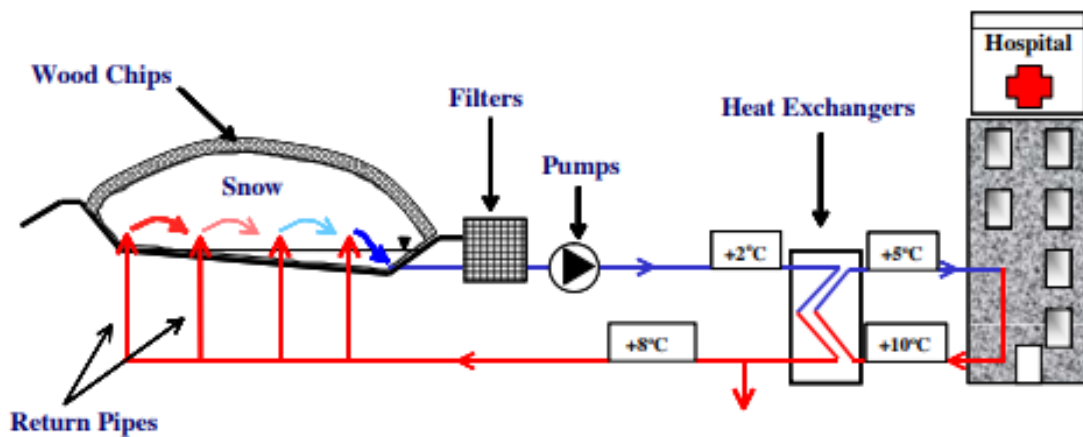
Lumijäähdytysjärjestelmillä on pyritty innovaatioon, vihreään energiaan sekä järjestelmien käyttökustannusten vähentämiseen. Lisäksi Norjassa on otettu huomioon aurauslumen loppusijoituspaikkojen ongelmat. Osa aurattavasta lumesta käytetään hyödykkeenä jäähdytysjärjestelmään.

### 2.3.1 Sundsvallin sairaala, Ruotsi

Ruotsissa sijaitsevassa Sundsvallin sairaalassa on käytetty lumijäähdytysjärjestelmää jo lähes neljännesvuosisadan, vuoden 2000 kesäkuusta.

Lumen keräys aloitettiin jo 1999–2000 talvella. Pinta-alaa sairaalalla on 190 000 m<sup>2</sup> ja vuoden 2010 ennuste jäähdytykselle oli 3000 kW tehoa ja 3000 MWh jäähdytysenergiaa. (Nordell & Skogsberg 2007.)

Jäähdytysjärjestelmä koostuu lumella täytetystä keräysaltaasta, jonka koko on noin 60 000 m<sup>3</sup>, sekä putkistosta, joka pumpkaa lumen sulamisvettä lämmönvaihtimien läpi sairaalarakennuksen jäähdytysjärjestelmään. Paluuvesi kierrätetään takaisin lumenkeräysaltaaseen, jossa se jäähtyy uudelleen varastoidun lumen lämpötilan ansiosta. Tätä prosessia on havainnollistettu kuvassa 6. Altaassa oleva lumi on eristetty puulastukerroksella. Lumijäähdytysjärjestelmän rinnalla käytetään lisäksi perinteistä jäähdytysjärjestelmää niissä tilanteissa, kuin se on tarpeellista. (Skogsberg 2005.)



KUVA 6. Sundsvallin sairaalan lumijäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate (Skogsberg 2005)

Tohtorintyössään vuodelta 2005 Kjell Skogsberg on tilastoinut kattavasti sairaalan neljän ensimmäisen vuoden toimintaa, tämä on näkyvillä taulukossa 1.

Kerättyä lumimäärää on saatu tasaisesti kasvatettua, mutta mielenkiintoista on se, ettei kerättyä lumimassaa kuitenkaan ole ollut tarpeeksi ensimmäisinä viitenä toimintavuonna. Vuosi 2005 on

ollut tilastoinnin mukaan tuohon saakka huonoin vuosi lumen määrän kannalta, sillä lumitykeillä on tuotettu 70 % kaiken kerätyn lumimassan määrästä.

Lumitykeillä tuotettu lumimassa maksaa sen verran, mitä lumitykkeihin menevä energia ja vesi maksavat, oletettavasti Sundsvallin tapauksessa on nähty järkeväksi kuitenkin täyttää lumiallasta.

TAULUKKO 1. Jäähdytysjärjestelmän toimintadataa (Skogsberg 2005)

**Table 1 Operation data 2000-2004 at the snow cooling plant at the Sundsvall Regional Hospital.**

Year	2000 <sup>1</sup>	2001	2002	2003 <sup>2</sup>	2004 <sup>2</sup>	2005 <sup>2</sup>
Snow volume [m <sup>3</sup> ]	18,800	27,400	40,700	36,800	35,400	39,900
Share of artificial snow [%]	49%	59%	57%	37%	52%	70%
Snow cooling period	6/6-29/8	26/4-22/8	25/4-29/8	6/5-17/8	28/4-3/9	
Total cooling energy [MWh]	655.5	1159.1	1345.3	1068.4	870.5	
Snow cooling energy [MWh]	607.9	897.2	1125.9	894.5	799.6	
Snow cooling proportion [%]	92.7%	77.4%	83.7%	83.7%	91.9%	
Maximum total cooling power [kW]	1366	1648	2004	2034	1919	
Maximum snow cooling power [kW]	1366	1148	1873	1508	1594	
COP <sub>snow</sub> [-]	5.2	15.7	23.8	7.4	6.9	
COP <sub>snow,total</sub> [-]	4.3	11.2	16.0	6.2	5.7	
COP <sub>snow,total</sub> /COP <sub>chiller,total</sub> [-]	2.0	3.3	6.6	2.6	2.4	

<sup>1</sup>Snow cooling started June 6<sup>th</sup>

<sup>2</sup>Municipal water was complemented with water from own well

### 2.3.2 Kustannukset

Sairaalan lumijäähdytysjärjestelmän rakennuttaminen ja suunnittelu on ollut tyyristä. Kokonaiskustannukset ovat nousseet 1,59 miljoonaan euroon, kuten taulukossa 2 esitetään.

TAULUKKO 2. Sundsvallin sairaalan lumijäähdytysjärjestelmän rakennuskustannukset (Nordell & Skogsberg 2007).

	(kSEK)	(k€ )
Pond construction	4,800	527.5
Ground thermal insulation	1,000	109.9
Fence + vehicle approach	700	76.9
Pump house	1,000	109.9
Pumps, pipes, etc	4,000	439.6
Electrical installations	1,000	109.9
Control system	600	65.9
Planning	1,400	153.8
<i>Total</i>	14,500	1,593.4

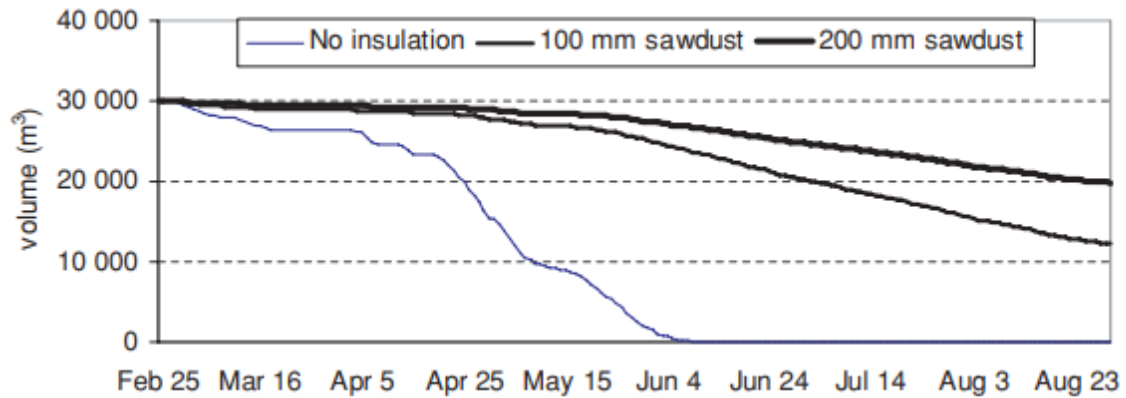
Suurimmat kustannukset ovat muodostuneet lumialtaan rakennuttamisesta n. 527 500 €, sekä pumpuista ja putkivarusteista n. 439 600 €. Järjestelmän suunnittelu on kustantanut n. 153 800 €. Toki kustannuksissa on otettava huomioon myös se, että järjestelmä on aikanaan ollut tuossa mittakaavassa ainoa laatuaan ja esimerkiksi suunnittelu on ollut täysin uutta.

Sundsvallin sairaalan lumijäähdytysjärjestelmä on saanut myös avustusta 7 miljoonaa Ruotsin kruunua, eli arviolta 609062 € (Da Alesandro 2023). Summa on arvioitu tämän hetken valuutan vaihtoarvolla 1 € on 11,49 kr (xe.com).

Lisäksi on hyvä huomioida, että järjestelmä on rakennettu yli 20 vuotta sitten, eli kustannukset olisivat luultavasti nykyään suuremmat inflaation ja rakennusmateriaalien kallistumisen vuoksi. Kustannuksiin vaikuttaa myös se, halutaanko käyttää samantyylistä maan päällä sijaitsevaa lumiallasta kuin Sundsvallissa, osittain upotettua lumiallasta, vai kokonaan maan alle rakennettua lumivarastoa.

### 2.3.3 Ennen käyttöönottoa

Ennen lumijäähdytysjärjestelmän käyttöönottoa tehdyt teoreettiset laskelmat sekä kenttäkoe vuonna 1998 tutkivat kuinka paljon lunta tarvittaisiin, jotta kaikki lumimassa ei jäähdytyskauden aikana sulaisi pois ja siitä olisi mahdollista saada 1000 MWh verran jäähdytysenergiaa. Kenttäkoekesä tutkittiin 15 000 m<sup>3</sup> ja 30 000 m<sup>3</sup> suuruisten lumimassojen luonnollista sulamista helmikuusta elokuuhun, tätä on havainnollistettu kuvassa 7.



KUVA 7. Lumimassojen sulaminen ajan kuluessa (Nordell & Skogsberg 2007)

15 000 m<sup>3</sup> lumimassa todettiin riittämättömäksi jo simulaatiovaiheessa, eikä sitä ole kuvassa lainkaan (Nordell & Skogsberg 2007).

30 000 m<sup>3</sup> lumimassa puolestaan sulaisi pois kesäkuun alkuun mennessä ilman eristettä. Lumimassan päällisen eristäminen sahanpuruilla, joko 10 cm tai 20 cm paksuudelta puolestaan auttoi siinä, ettei lumivarasto sulanut liian nopeasti jäähdytyskauden aikana. Käytettäessä 20 cm sahanpurukerrosta, oli lumimassaa jäljellä noin 20 000 m<sup>3</sup> jäähdytyskauden lopussa.

Sairaalan käytössä oleva lumiallas on eristetty päältä 20 cm paksuisella kerroksella puulastuja, joiden koko vaihtelee 0,2–1,5 cm. Biohajoavan eristeen huono puoli on se, ettei sen käyttöikä ole kovinkaan pitkä. Uutta materiaalia on lisättävä joka vuosi ja puulastujen käyttöikä on pisimmillään kolme vuotta, ennen kuin ne on vaihdettava kokonaan. (Nordell & Skogsberg 2007.)

Puulastuja on mahdollista hankkia esimerkiksi metsätalouden sivutuotteina, siinä mielessä eriste on kuitenkin suhteellisen taloudellinen ja ympäristöystävällinen.

### 2.3.4 Oslon lentokenttä, Norja

Vuonna 1998 avajaisiaan viettäen lentokentän laajennusremontti valmistui vuonna 2017 ja lumijäähdytysjärjestelmä otettiin käyttöön remontin valmistumisen yhteydessä. Tosin lumen keräminen aloitettiin jo vuotta aiemmin. Kohteessa ilmeni laajennuksen myötä lisätarvetta jäähdytykselle. Lisäksi haluttiin säästää sähkökulutuksessa, joten päädyttiin tarkastelemaan vapaa-jäähdytysmenetelmien mahdollisuuksia. Lentokentällä oli jo valmiiksi olemassa kehittyneet lumenkeräysjärjestelmät. Ongelmana oli jo aikaisemminkin se, mihin kiitoradoilta, taksiväyliltä ja



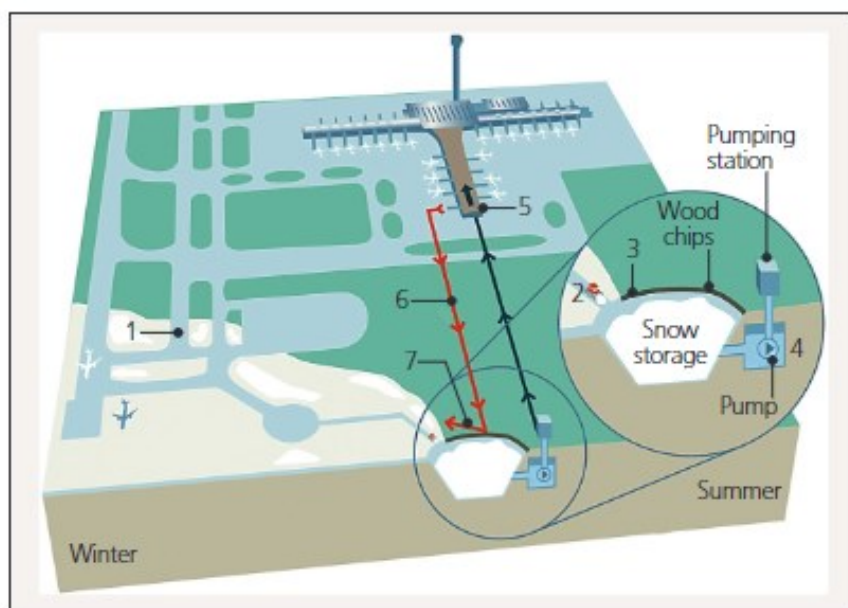
muualta auratut lumet voidaan sijoittaa. Lentokentän maantieteellinen sijainti, noin 40 km Oslost pohjoiseen, on myös ihanteellinen lumijäähdytykselle, sillä vuoden keskilämpötila on 5 °C. (Moe 2018.) Vertailun vuoksi, Suomen keskilämpötila on vuonna 2023 ollut 3,2 °C (Ilmatieteen laitos 2024).

Oslon lentokentän suurimmaksi inspiraatioksi mainitaan Sundsvallin sairaala Ruotsissa ja Hokkaidon lentokenttä Japanissa, viimeksi mainitussa on käytetty lumijäähdytysjärjestelmää vuodesta 2010. (Moe 2018.)

Lentokentän lumijäähdytysjärjestelmän rakentamis- ja käyttöönottokustannuksia ei suoraan Moen artikkelissa mainita, mutta maininta ”suurista investointikustannuksista” löytyy. Tämä on tulkinanvaraista, mutta oletus tilanteessa on, että kustannukset eivät ainakaan ole alittaneet Sundsvallin sairaalan vastaavia.

### 2.3.5 Toiminnasta

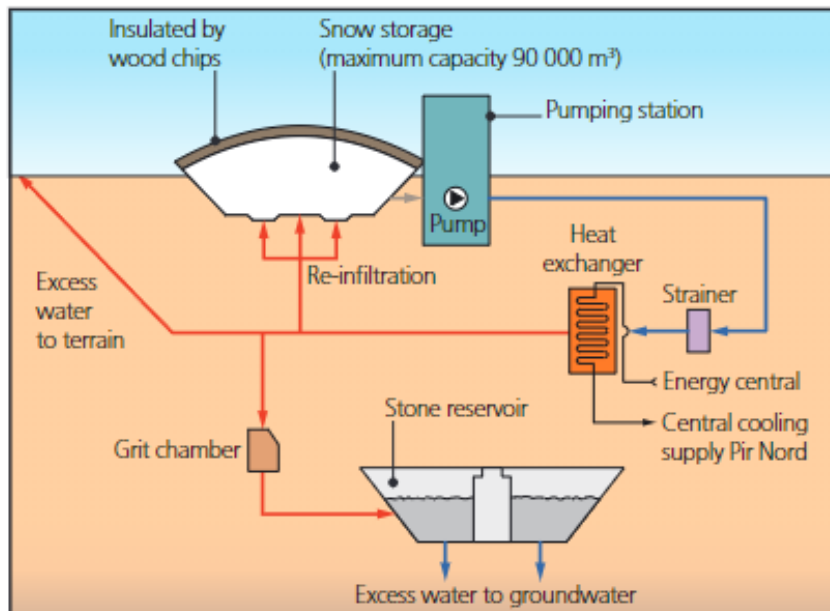
Toimintaperiaate Oslon lentokentällä on käytännössä hyvin sama kuin Sundsvallin sairaalassa, tämä on esitettyä kuvassa 8.



KUVA 8. Oslon lentokentän lumijäähdytyksen toimintaperiaate (Moe 2018)

Puulastuilla eristetty lumimassa on omassa ”varastossaan” tai altaassa, huomioitavaa on myös se, että lentokentän aurauslumet jaotellaan kahteen eri kategoriaan, puhtaaseen ja epäpuhtaaseen lumeen. Epäpuhtaassa lumessa voi olla muun muassa jäätyminenestonestettä kiitoradoilta ja lentokoneista. Tätä lunta ei käytetä lainkaan jäähdytysjärjestelmässä vaan se ohjataan suoraan jätevedenpuhdistamoon. Puhtaampi lumi, joka voi toki sisältää muun muassa hiekkaa, säilötään lumivarastoon ja käytetään lentokenttärakennuksen jäähdytykseen. Jäähdytyskauden lopulla, lumivarastossa on jäljellä hiekkaa, puulastuja ja vettä. Myös Oslon lentokentällä on käytetty lumitykkeitä tarpeeksi puhtaan, laadukkaan ja korkean albedon, eli heijastekyvyn, omaavan lumen aikaansaamiseksi. Lumen heijastaessa auringon säteilyä paremmin voidaan minimoida luonnollista sulamista. Puulastut, joilla lumimassan päällinen on eristetty, saattavat aika ajoin liikkua paikoiltaan ja paljastaa lumimassan päällimmäisen kerroksen. (Moe 2018.)

Kuten kuvasta 9 voidaan havainnoida, lumivaraston maksimikapasiteetti on 90 000 m<sup>3</sup> ja maan alle rakennetun osan tilavuus on 30 000 m<sup>3</sup>. Sulamisvesi johdetaan pumpaamon (pumping station) kautta suodattimen (strainer) läpi lämmönvaihtimeen (heat exchanger) ja siitä eteenpäin lentokentän jäähdytysjärjestelmään. Osa paluuvdestä palautetaan lumivarastoon sulamisen edesauttamiseksi. Lumijäähdytystä käytetään pääsääntöisesti lentokentän uudisosan viilennykseen. (Moe 2018.)

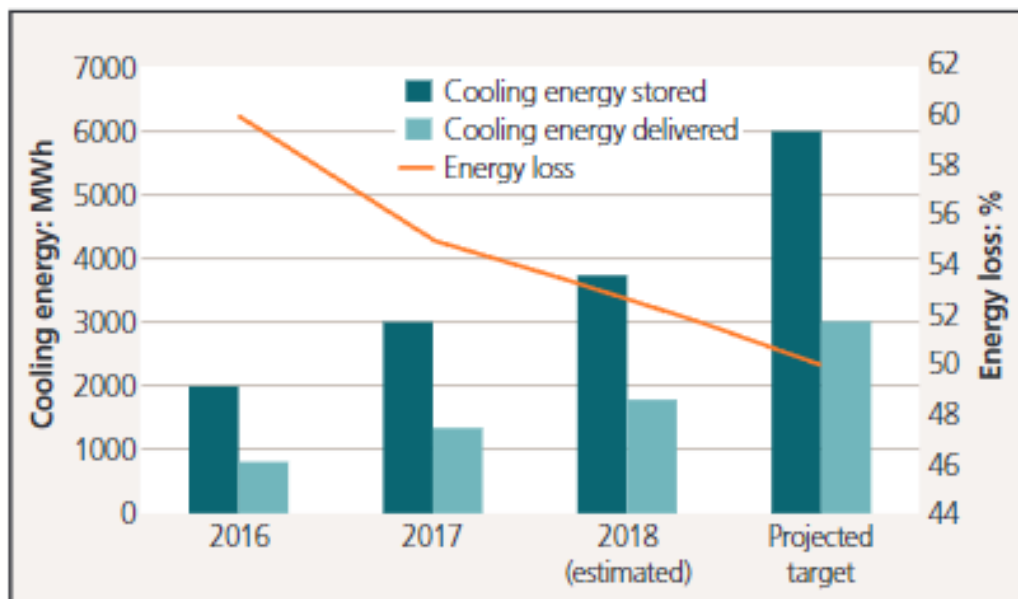


KUVA 9. Lumijäähdytysjärjestelmän osat (Moe, 2018)

### 2.3.6 Ensimmäisten toimintavuosien tarkastelu

Jesper Mæx Moen artikkelissa on Oslon lentokentän lumijäähdytysjärjestelmän lisäksi tarkasteltu sitä, onko järjestelmä ollut hyödyllinen. Dataa artikkelissa on vuosilta 2016–2018, mutta on huomattava, että vuoden 2018 tulokset ovat olleet vasta arvioita.

Kuvassa 10 tumma turkoosi palkki kuvaa varastoitua energiaa ja vaalea turkoosi puolestaan viilennykseen toimitettua energiaa. Kuten huomataan, hukkaenergian määrä on saatu laskemaan ensimmäisen toimintavuoden 61 % toisen toimintavuoden 55 %. Toki hukkaenergiaa on vielä yli puolet tuotetusta energiasta myös vuoden 2018 arviossa, mutta tavoitteena on ollut päästä noin 50 %. Lumimassan hukkaama energia syntyy enimmäkseen luonnollisesta sulamisesta ja tämä oli noin 45 % hukkaenergian kokonaismäärästä. (Moe 2018.)



KUVA 10. Toimitettu viilennysenergia ja hukkaenergia (Moe, 2018)

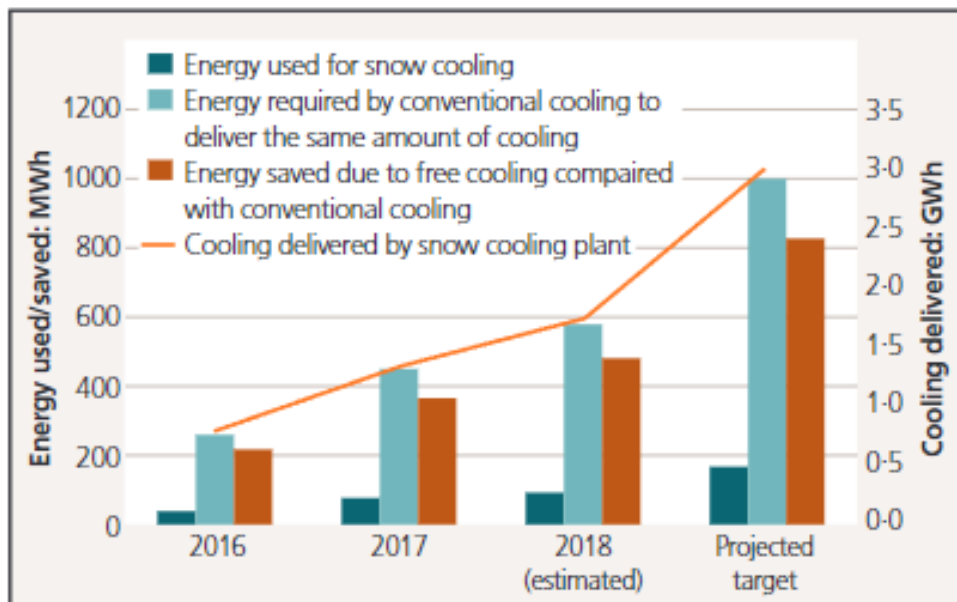
Lumijäähdytysjärjestelmän laskennallinen maksimiteho on 5 MW. Vuonna 2016 päästiin 3,7 MW ja 2017 4,5 MW laitoksen normaalikäynnillä. Lumijäähdytyksen rinnalla rakennuksessa toimii perinteinen jäähdytysjärjestelmä 4 MW teholla.

Energiaa on saatu testivuonna 2016 noin 2000 MWh, 2017 noin 3000 MWh ja vuoden 2018 tuloksen odotettiin nousevan miltei 4000 MWh. SCOP oli 2016 17,9 ja 2017 18,7, mikä on huomattavasti suurempi kuin perinteisillä jäähdytysjärjestelmillä, joilla COP on noin 3. (Moe 2018.)

COP on lyhenne sanoista coefficient of performance ja tarkoittaa energiatekniikassa lukua, jolla kuvataan järjestelmän kuluttamaa energiaa sen tuottamaan energiaan. Käytännössä COP 1 tarkoittaa sitä, että järjestelmä antaa yhtä paljon energiaa ulos kuin se tarvitsee toimiakseen. SCOP tarkoittaa puolestaan kausittaista (S = seasonal) vertailua, tässä tapauksessa koko jäähdytyskauden aikana tapahtuvaa. COP:sta puhuttaessa käytetään myös nimitystä kylmäkerroin.

Tarkastelun tulokset näyttävät kuitenkin lupaavilta järjestelmän kannalta ja näyttävät noudattavan samaa linjaa Sundsvallin sairaalan datan kanssa. Lentokentällä käytetty lumivarasto on suurempi kuin sairaalassa, joten myös tuottavuus on luonnollisesti suuremmassa kokoluokassa.

Kuvassa 11 on havainnoitu lumijäähdytyslaitoksen käyttöönoton jälkeisiä energiansäästöjä. Tumma turkoosi palkki kuvastaa lumijäähdytykseen käytettyä energiamäärää (MWh). Vaalea turkoosi puolestaan kertoo perinteisten jäähdytysjärjestelmien käytetyistä energiamääristä saman viilennystehon tuottamiseen kuin lumijäähdytys (MWh). Ruskea palkki indikoi energian säästön määrää lumijäähdytystä ja perinteisiä jäähdytysjärjestelmiä vertaillessa (MWh) ja oranssi viiva on toimitettu jäähdytysteho (GWh).



KUVA 11. Lumijäähdytyksestä saadut energiansäästöt (Moe, 2018)

Energiansäästöt ovat tasaisesti kasvaneet, ensimmäisenä vuonna noin 51 % ja seuraavana vuonna noin 69 %, mikäli jäähdytyslaitos onnistui jatkamaan samalla tahdilla ennustettu tavoite olisi ollut saavutettavissa mahdollisesti 2019–2020. Mielenkiintoinen huomio on myös siinä, että

lumijäähdytysjärjestelmän energiankulutus on huomattavasti pienempää kuin samalla teholla toimivien perinteisten jäähdytysjärjestelmien.

### **2.3.7 Lumivaraston koosta ja järjestelmän soveltuvuudesta**

Tärkeää lumijäähdytysjärjestelmässä on se, että täyttöaikana lumivarasto saadaan mahdollisimman lähelle täyttä säilöntäkapasiteettiaan. Jokainen metrin paksuinen lumikerros, joka varastokuoppaan saadaan, kasvattaa varastoitua jäähdytysenergiaa arviolta 700 MWh. Lisähyötyä tulee myös siitä, että lunta kasataan varastokuoppaan siten, että lumimassan korkein kohta on maanpinnan yläpuolella. Tämä kasvattaa lumen tilavuutta, muttei pinta-alaa ja auttaa minimoimaan luonnollisen sulamisen vaikutusta. (Moe 2018.)

Oslon lentokentän järjestelmän kanssa todettiin, että lumijäähdytysjärjestelmä soveltuu parhaiten suuriin kohteisiin tai uudisrakennuksiin. Tämä johtuu korkeista investointikustannuksista ja lumivaraston massiivisesta tilantarpeesta. Ensimmäisten kahden toimintavuoden aikana todettiin, että järjestelmä toimii tyydyttävällä tavalla ja auttaa lentokenttää hyödyntämään resursseja, jotka ilman lumijäähdytysjärjestelmää menisivät hukkaan. Jäähdytyskonseptia voisi mahdollisesti hyödyntää myös runsaslumisissa kaupungeissa, joilla on haasteita saastuneiden sulamisvesien puhdistuksen kanssa ja tarvetta suuremmalle jäähdytysjärjestelmälle, kuten esimerkiksi kaukokylmälle. (Moe 2018.)

### 3 LUMIJÄÄHDYTYSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELUSTA JA TALOUDELLISUUDESTA

Yleisesti minkä tahansa rakennuksen jäähdytyksen suunnittelu aloitetaan selvittämällä kohteen jäähdytysenergian tarve. Tästä lumijäähdytyksen suunnitteluun jatketaan mitoittamalla tarvittava lumimassan määrä, huomioon ottaen lumen sulamiseen vaikuttavat ulkoiset tekijät.

Ympäristöministeriön asetus 1048/2017 Rakennuksen energiatodistuksesta, kohta 2.2.9 Jäähdytys, määrittelee jäähdytysenergian tarpeen laskennan seuraavasti:

Rakennuksen jäähdytysjärjestelmän nettotarve, eli tilojen ja ilmanvaihdon jäähdytysenergian nettotarve, lasketaan energiatehokkuusasetuksen mukaisella vakioidulla käytöllä ja vaatimukset täyttävällä dynaamisella ohjelmistolla. Jäähdytysjärjestelmän energiankulutus lasketaan jäähdytysenergian nettotarpeesta ottamalla huomioon tuoton, varastoinnin, jakelun ja luovutuksen häviöt sekä muunnokset. Nämä huomioidaan esimerkiksi energiatehokkuuden laskentaohjeessa esitetyllä tavalla.

Jäähdytysenergian tarve on välttämätön tieto jäähdytysjärjestelmien suunnittelussa. Kun tämä on tiedossa, voidaan jatkaa lumijäähdytysjärjestelmän laskentaan. Jäähdytysenergian tarvetta voidaan mallintaa esimerkiksi IDA ICE-ohjelmiston avulla, tai muulla vastaavalla tehtävään sopivalla ohjelmistolla.

Lumijäähdytysjärjestelmän energiantuotto lasketaan kaavan 1 avulla (Moe 2018).

$$W = q_v * C * \Delta T * h \quad (\text{KAAVA 1})$$

W on tuotettu energia (MWh)

$q_v$  on massavirta (kg/s)

C on aineen lämpökapasiteetti (kJ/kg K)

$\Delta T$  on lämpötilaero (K)

h on aika (tunteja, h)

Lumijäähdytyksen perustana on pääasiassa jään piilevä sulamislämpö, eli energia, jota jään muuttuminen vedeksi vapauttaa. Jään vakiona pysyvä sulamislämpötila 0 °C / 273 K on ainutlaatuinen ominaisuus, joka antaa lumijäähdytysjärjestelmälle käytännössä rajoittamattoman tehon

potentiaalin. Sulamisveden, kierrätys lumivarastossa sijaitsevan lumen läpi samalla nopeudella, kuin se siirretään jäähdytettävään kohteeseen, mahdollistaa hyvän jäähdystehon vain pumppukapasiteettiä säätämällä. Lumen varastoima energia voidaan laskea kaavasta 2. (Moe 2018.)

$$W = V * \rho * L \quad (\text{KAAVA 2})$$

W on varastoitu energia (kWh)

V on varaston tilavuus (m<sup>3</sup>)

$\rho$  on aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>) vaihtelee välillä 650–735 kg/m<sup>3</sup> (Moe 2018.)

L on sulamiseen tarvittava energia (kWh/kg) lumella 333,6 kJ/kg tai 0,0926 kWh/kg, tässä käytetty kWh/kg (Moe 2018)

Lumivaraston sulaminen voidaan jakaa luonnolliseen ja pakotettuun sulamiseen. Näistä kahdesta pakotettu sulaminen tulee lumijäähdytysjärjestelmässä siitä, että lämmönvaihtimelta tuleva paluuvesi päästetään takaisin varastoon. Luonnolliseen sulamiseen vaikuttavat lämpötilan vaihtelu, maan lämpötila ja sateista johtuva sulaminen. Suurin osuus kaikkeen sulamiseen tulee ilman lämpötilan vaikutuksesta, tämä kattaa lähes puolet kaikista sulamishäviöistä. (Nordell, Skogberg 2007; Moe 2018.)

Tämän lisäksi putkistolle, lämmönvaihtimelle, kiertovesipumpulle, sekä järjestelmän venttiileille tulee tehdä suunnitelmat ja mitoitukset voimassa olevien säännösten, ohjeiden ja standardien mukaisesti. Suunnitellessa tulee myös huomioida materiaalit, suodattimet ja muut tarvittavat järjestelmän osat.

### 3.1 Lumivaraston koon mitoittamisesta

Lumijäähdytysjärjestelmän olennainen osa on myös lumivarasto. Lumivarastojen mitoittamisesta ei tällä hetkellä ole olemassa yksityiskohtaisia ohjeita tai standardeja. Olemassa oleva tieto on ensikäden raportoituja kokemusta toiminnassa olevista järjestelmistä.

Varmaksi tiedetään ainoastaan se, että lumivaraston koko riippuu jäähdystarpeesta ja sen muoto vaikuttaa koko järjestelmän toimivuuteen ja rakennuskustannuksiin. Esimerkiksi Sundsvallin

sairaalan tapauksessa lumialtaan pohjan pinta on lievästi kalteva, jotta sulamisvesi virtaa helpommin järjestelmän ottoaukkoa kohden (Da Alesandro 2023). Myös Oslon lentokentän lumivaraston pohja on 0,5 % kalteva ottoaukkojen suuntaan (Moe 2018).

Varastojen mitoittaminen on tällä hetkellä hieman epävarmaa, mutta taulukossa 3 on esitely muutamia esimerkkikohteita ja niissä käytettyjen allasmallisten lumivarastojen mittoja. Mitoista voidaan havainnoida, että edes saman kokoluokan sovelluksissa altaan koko ei ole vakioitu.

*TAULUKKO 3. Yhteenvetona mitoitustietoja erilaisista lumijähdytyksellä toimivista kohteista (Moe 2018; Da Alesandro 2023)*

Erialaisten lumijähdytyslaitosten, tutkimusten ja laitosmitoitusten yhteenvedo				
Sijainti	Laitos	Kylmätehon tarve	Lumimäärä	Altaan mitat
Kanada	Hylätty louhos	7000 kW	90 000 m <sup>3</sup>	120 m * 80 m * 9,5 m
Ruotsi	Kaasuvoimala	30,7 Gwh/vuosi	3 200 000 m <sup>3</sup>	400 m * 400 m * 20 m
Ruotsi	Teollisuus	1500 kW	121 230 m <sup>3</sup>	120 m * 100 m * 3 m
Japani	Lentokenttä	2500 kW	120 230 m <sup>3</sup>	200 m * 100 m * 6 m
Sundsvall, Ruotsi	Sairaala	2500 kW	60 000-75 600 m <sup>3</sup>	140 m * 60 m * 9 m
Oslo, Norja	Lentokenttä	5000 kW	30 000-90 000 m <sup>3</sup>	120 m * 84 m * 4,5 m

Vakioidut mitoitustiedot edesauttaisivat lumijähdytyksen valtavirtaistamista ja mahdollistaisivat suunnittelijoille paremmat ennakkotiedot tämän tyyppisiin järjestelmiin. Lisäksi kustannusten ja järjestelmän kokonaistilantarpeen arviointi olisi huomattavasti helpompaa.

### 3.2 Lumivarastoon vaikuttavat lämpökuormat ja lumen sulamisen huomioiminen

Lumivarastoon vaikuttavat useat lämpökuormat. Näitä kuormia muodostuu muun muassa ilman, maaperän ja sateen vaikutuksesta. Lämpökuormat vaikuttavat siihen, mikä varastoitavan lumen häviökerroin on ja kuinka paljon lunta tulee varastoida. (Da Alesandro 2023.) Kuten aikaisemmin jo todettiin, suurin osa sulamishäviöistä muodostuu ilman vaikutuksesta ja sulamishäviöitä tulee järjestelmässä olemaan aina, kun ilman lämpötila ylittää 0 °C.

Tässä kappaleessa on tarkennettuna lumimassan sulamishäviöiden ja määrän laskentaa.



Ilmasta aiheutuvat kuukausittaiset sulamishäviöt lasketaan kaavan 4 avulla (Da Alesandro 2023).

$$Q_{\text{ilma,kuukausi}} = A_{\text{pinta-ala}} * \frac{\lambda_{\text{puulastut}}}{\Delta Z_{\text{puulastut}}} (T_{\text{kuukausi}} - T_{\text{sulaminen}}) * h \quad (\text{KAAVA 4})$$

$Q_{\text{ilma,kuukausi}}$  on sulamisenergia ilman lämmön vaikutuksesta (kWh)

$A_{\text{pinta-ala}}$  on lumikasan pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$\lambda_{\text{puulastut}}$  on puulastujen lämmönjohtavuus (W/mK)

$\Delta Z_{\text{puulastut}}$  on puulastujen kokonaispaksuus (m)

$T_{\text{kuukausi}}$  on kuukauden keskilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{sulaminen}}$  on lumen sulamislämpötila  $0^{\circ}\text{C}$

$h$  on laskettavan kuukauden tuntimäärä (h)

Maaperästä johtuvat kuukausittaiset sulamishäviöt lasketaan kaavalla 5 (Da Alesandro 2023).

$$Q_{\text{maa,kuukausi}} = A_{\text{pohja}} * \frac{\lambda_{\text{maa}}}{\Delta Z_{\text{pohjavesi}}} (T_{\text{maa}} - T_{\text{sulaminen}}) * h \quad (\text{KAAVA 5})$$

$Q_{\text{maa,kuukausi}}$  on sulamisenergia maaperän lämmön vaikutuksesta (kWh)

$A_{\text{pohja}}$  on lumialtaan pohjan pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$\lambda_{\text{maa}}$  on maa-aineksen lämmönjohtavuus (W/mK)

$\Delta Z_{\text{pohjavesi}}$  on pohjaveden pinnan ja lumialtaan pohjan välinen etäisyys (m)

$T_{\text{maa}}$  on maan lämpötila välillä  $\Delta Z_{\text{pohjavesi}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{sulaminen}}$  on lumen sulamislämpötila  $0^{\circ}\text{C}$

$h$  on laskettavan kuukauden tuntimäärä (h)

Sateesta johtuvat kuukausittaiset sulamishäviöt lasketaan kaavan 6 avulla (Da Alesandro 2023).

$$Q_{\text{sade,kuukausi}} = A_{\text{pinta-ala}} * P_{\text{sade,kuukausi}} * (T_{\text{kuukausi}} - T_{\text{sulaminen}}) * C_{\text{vesi}} \quad (\text{KAAVA 6})$$

$Q_{\text{sade,kuukausi}}$  on sulamisenergia sateen vaikutuksesta (kWh)

$A_{\text{pinta-ala}}$  on lumikasan pinta-ala ( $\text{m}^2$ )

$P_{\text{sade,kuukausi}}$  on keskimääräinen sademäärä kuukaudessa (m)

$T_{\text{kuukausi}}$  on kuukauden keskilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{sulaminen}}$  on lumen sulamislämpötila  $0^{\circ}\text{C}$

$C_{\text{vesi}}$  on veden tilavuuskohtainen ominaislämpökapasiteetti (kWh/m<sup>3</sup>K)

$C_{\text{vesi}}$  tässä on saatu:  $\rho_{\text{vesi}} * C_{\text{vesi}}$ , jossa  $\rho_{\text{vesi}}$  = veden tiheys (kg/m<sup>3</sup>) ja  $C_{\text{vesi}}$  = veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kgK). (Da Alesandro 2023.)

Kokonaissulamishäviöt voidaan laskea kaavan 7 avulla (Da Alesandro 2023).

$$Q_{\text{sulamishäviöt,tot}} = \sum Q_{\text{ilma,kuukausi}} + \sum Q_{\text{maa,kuukausi}} + \sum Q_{\text{sade,kuukausi}} \quad (\text{KAAVA 7})$$

Näiden tietojen avulla voidaan selvittää sulamisen häviökerroin kaavasta 8 (Da Alesandro 2023).

$$F_f = \frac{Q_{\text{sulamishäviöt,tot}}}{Q_{\text{jäähdytystarve}}} \quad (\text{KAAVA 8})$$

Lumen sulamismäärien selvittämiseksi voidaan käyttää apuna laskettuja sulamishäviöitä kaavoista 4–6. Nämä edustavat menetettyä lumimassa kuutiometreinä, maan, ilman ja sateen vaikutuksesta. Sulamismäärän laskennassa  $Q_{\text{sulamishäviö}}$  yksikön on oltava muodossa Wh, ei kWh. Lisäksi huomioidaan, lumen tiheys ja sulamiseen tarvittava energia. (Da Alesandro 2023.)

Maan lämmön vaikutuksesta sulavan lumen määrä saadaan selvitettyä kaavalla 9 (Da Alesandro 2023).

$$V_{\text{maa,kuukausi}} = \frac{Q_{\text{maa,kuukausi}}}{L * \rho_{\text{lumi}}} \quad (\text{KAAVA 9})$$

$V_{\text{maa,kuukausi}}$  on kuukaudessa sulaneen lumen määrä ( $\text{m}^3$ )

$Q_{\text{maa,kuukausi}}$  on sulamisenergia maaperän lämmön vaikutuksesta (Wh)

L on sulamiseen tarvittava energia (Wh/kg) lumella 333,6 kJ/kg tai 92,6 Wh/kg. Tässä käytetty Wh/kg. (Moe 2018; Da Alesandro 2023.)

$\rho$  on lumen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) vaihtelee välillä 650–735  $\text{kg}/\text{m}^3$  (Moe 2018.)

Ilman vaikutuksesta sulavan lumen määrä lasketaan kaavalla 10 (Da Alesandro 2023).

$$V_{\text{ilma,kuukausi}} = \frac{Q_{\text{ilma,kuukausi}}}{L * \rho_{\text{lumi}}} \quad (\text{KAAVA 10})$$

$V_{\text{ilma,kuukausi}}$  on kuukaudessa sulaneen lumen määrä ( $\text{m}^3$ )

$Q_{\text{ilma,kuukausi}}$  on sulamisenergia ilman lämpötilan vaikutuksesta (Wh)

L on sulamiseen tarvittava energia (Wh/kg)

$\rho$  on lumen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Sateesta johtuva sulamismäärä saadaan selville kaavan 11 avulla (Da Alesandro 2023).

$$V_{\text{sade,kuukausi}} = \frac{Q_{\text{sade,kuukausi}}}{L * \rho_{\text{lumi}}} \quad (\text{KAAVA 11})$$

$V_{\text{sade,kuukausi}}$  on kuukaudessa sulaneen lumen määrä ( $\text{m}^3$ )

$Q_{\text{sade,kuukausi}}$  on sulamisenergia ilman lämpötilan vaikutuksesta (Wh)

L on sulamiseen tarvittava energia (Wh/kg)

$\rho$  on lumen tiheys ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

Sulaneen lumeen kokonaismäärä kuutiometreinä saadaan selville kaavan 12 kautta (Da Alessandro 2023).

$$V_{\text{sulaminen,tot}} = \sum V_{\text{maa,kuukausi}} + \sum V_{\text{ilma,kuukausi}} + \sum V_{\text{sade,kuukausi}} \quad (\text{KAAVA 12})$$

Kokonaissulamisen ollessa tiedossa kuutiometreinä, voidaan arvioida seuraavaksi koko jäähdytyskauden aikana sulaneen lumen määrä prosentteina kaavalla 13. (Da Alessandro 2023.)

$$V_{\text{sulanut lumi}} = 1 - \frac{V_{\text{sulaminen,tot}}}{V_{\text{lumimäärä alussa}}} \quad (\text{KAAVA 13})$$

$V_{\text{sulanut lumi}}$  on sulamisen prosentuaalinen kokonaismäärä (%)

$V_{\text{sulaminen,tot}}$  on sulanut lumi ( $\text{m}^3$ )

$V_{\text{lumimäärä alussa}}$  on varastoitu lumimäärä jäähdytyskauden alkaessa ( $\text{m}^3$ )

Sulamiseen vaikuttavat tekijät ja sulamismäärät on hyvä ottaa huomioon lumijäähdytysjärjestelmää ja tarvittavaa lumivarastoa suunnitellessa. Karkeasti ajateltuna noin puolet lumivaraston säilöntäkapasiteetista voidaan tosiasiasa hyödyntää jäähdytysenergiaksi.

Näiden tietojen avulla voidaan tarkastella, tarvitseeko järjestelmä mahdollisesti enemmän lunta kuin alun perin on suunniteltu sekä paljonko lunta varastoon jää jäähdytyskauden jälkeen. Tämän perusteella saadaan harkittua lumivarastolle sopivinta kokoa ja täyttömäärää.

### 3.3 Lumijäähdytyksen taloudellisuus

Lumijäähdytysjärjestelmässä käyttökustannuksia on sidottu eniten lumen ja lämmöneristyksen hallintaan. Käyttö- ja ylläpitokustannuksiin on otettava myös huomioon työntekijöiden palkat, sekä energia- ja polttoainekustannukset. Nämä kaikki johtavat taloudellisesti epävarmaan suorituskykyyn, jota on vaikeampi ennustaa kuin perinteisillä kylmäkoneilla. (Da Alessandro 2023, 21, 22.)

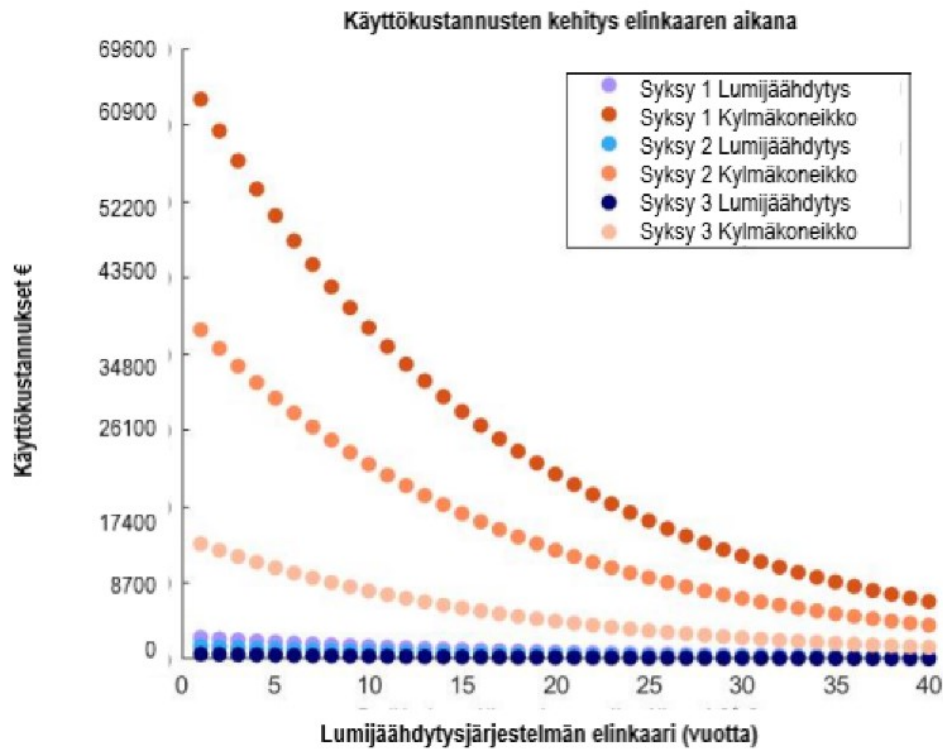
120 000 m<sup>3</sup> (6000 MWh) kokoiselle järjestelmälle takaisinmaksuaika on arvioitu olevan noin kolme vuotta. (Nordell 2005, 54–56.) Aiemmin on arvioitu, että rakennuskustannukset tulisivat alemaan ja suurempi jäähdytystarve vähentäisi takaisinmaksuaikaa. Tällä hetkellä rakennuskustannukset ovat yleisesti kuitenkin kasvaneet. Lumijäähdytysjärjestelmän tekniseksi käyttöäksi arvioidaan noin 40 vuotta (Da Alesandro 2023, 22).

### **3.4 Lumijäähdytysjärjestelmän vertailu perinteisiin viilennysjärjestelmiin**

Tässä työssä ei luetteloita tai perehdytä tarkemmin tämän hetken kylmäaineliuoksiin. Yleisesti ottaen tänä päivänä käytössä olevat kylmäaineet ovat pääsääntöisesti turvallisia käyttää suljetuissa kiertopiireissä. Kylmäaineita myös valvotaan tehokkaasti ja niille on asetettu tarkat täyttörajat kylmälaitoksissa.

Lumijäähdytys hyödyntää samanlaista periaatetta, kuin muutkin kylmäainejärjestelmät. Erona on kuitenkin se, ettei kylmäaineena käytettävä lumen sulamisvesi ole yleisesti ottaen ihmiselle haitallista ja lumi on materiaalina halpaa. Sitä on myös kohtalaisen helposti saatavilla.

Maisterintyössään Da Alesandro (2023, 37) on tarkastellut lumijäähdytysjärjestelmän ja kylmäkoneikon elinkaarikustannuksia kolmen jäähdytyskauden ajalla, tulokset ovat näkyvillä kuvassa 12. Kuva on suomennettu ja valuutta vaihdettu euroiksi ymmärrettävyyden vuoksi.



KUVA 12 Lumijäähdytysjärjestelmän käyttökustannukset kolmena peräkkäisenä jäähdytyskaute-  
na, suomennettu kuvio (Da Alesandro 2023, 37)

Tuloksista huomataan, että kylmäkoneikolla käyttökustannukset ovat aluksi suuremmat ja piene-  
nevät lineaarisesti kolmen jäähdytyskauden aikana. Lumijäähdytykselläkin on nähtävissä tämä  
sama lineaarisuus, mutta pienemmässä mittakaavassa. Käyttökustannukset ovat huomattavasti  
halvemmat kuin kylmäkoneikolla lähes koko mallinnetun seurannan ajan.

Tämä vahvistaa käsitystä siitä, että lumijäähdytysjärjestelmän käyttö on alun rakentamiskustan-  
nusten jälkeen edullisempaa kuin perinteisen kylmäkoneikon, mutta on huomattava, että tämä  
edullisuus koskee ainoastaan suuria rakennuksia.

### 3.5 Lumitykeillä tuotettu lumi

Lumijäähdytysjärjestelmän energiatehokkuutta ja taloudellisuutta pohdittaessa tulee myös kartoit-  
taa lumitykeillä tuotettavan lumen tarve. Sekä Sundsvallin sairaalassa, että Oslon lentokentällä  
on käytetty lumitykkeitä lisälumen tuottamiseksi, kuten nähdään kuvasta 13.



KUVA 13. Oslon lentokentän lumivarastoa täytetään lumitykeillä (Avinor/Halvard Felde)

Esimerkiksi hiihtokeskuksissa lumitykeillä tuotetun lumen sähköntarve on arviolta 50 % rinteiden kunnossapidon ja käytön sähkönkulutuksen jakaumasta (Motiva 2010). Laskettelurinteisiin käytettäviä energiamääriä ei luonnollisesti voi vertailla suoraan lumijäähdytysjärjestelmien kanssa, mutta lumetusjärjestelmien tehokkuutta on kuitenkin tutkittu jonkin verran. Tästä saaduilla tunnusluvuilla voisi olla mahdollista tarkastella myös lumitykkien vaikutusta lumijäähdytysjärjestelmän energiankulutukseen.

Näitä tunnuslukuja ovat muun muassa käytetyn sähkön määrä suhteessa tuotetun lumen määrään kWh/m<sup>3</sup>, käytetyn sähkön määrä suhteessa lumitykkien käyttötunteihin MWh/h. Tämän lisäksi tarkastellaan veden kulutusta tuotettuun lumimäärään m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> ja pumppaukseen käytettyä sähkön määrää suhteessa käytetyn veden määrään kWh/m<sup>3</sup>. (Motiva 2010.)

Näiden tietojen avulla on mahdollista tutkia koko järjestelmän energiankulutuksen lisäksi pelkäämään lumitykkien vaatiman energian kulutusta ja kustannuksia. Energian kustannukset tässä tapauksessa muodostuvat sähköstä ja vedestä. Sähkön hinta riippuu sopimuksen tyypistä, sähkön toimittajasta ja siirtomaksuista ja veden hinta puolestaan muun muassa kunnasta johon järjestelmää oltaisiin perustamassa.

### 3.6 Sulamisvesi kylmäaineliuksena

Tyypillisesti kylmäaineliuksissa käytetään vettä ja jäätymisenestoainetta, kun jäähdytysjärjestelmää käytetään alle +3 °C. Veden jäätymispistettä lähellä olevissa lämpötiloissa operoitaessa on aina huomioitava riski siitä, että vesi jäätyy. (Kianta ym. 2019).

Lumijäähdytysjärjestelmässä ainutlaatuisista on se, ettei sulamisvedeen lisätä suolaa tai muutakaan jäätymisenestoainetta. Järjestelmän toiminta on riippuvainen sulamisvedestä, jonka lämpötila on 0–2 °C (Skogsberg 2015). Sulamisvesi koostuu jään, lumen ja veden yhdistelmästä. Lumijäähdytysjärjestelmän toiminta perustuu siihen, että ulkolämpötila on tarpeeksi korkea aiheuttaakseen lumen vapaata sulamista muun muassa ilmasta johtuvista lämpöhäviöistä. Tämän lisäksi aiheutetaan pakotettua sulamista palauttamalla lumivarastoon hallitusti useiden venttiilien kautta paluuvettä, jonka lämpötila on noin 10 °C (Skogsberg 2015; Moe 2018).

Tällä tavoin sulamisprosessi pysyy jäähdytyskauden ajalla jatkuvasti käynnissä, eikä uudelleenjäätymistä tapahdu. Lumijäähdytysjärjestelmä ei kuitenkaan ole lämpötilarajoitustensa tai sulamisveden koostumuksen vuoksi soveltuva kohteisiin, joihin tarvitaan alle 0 °C lämpötilassa olevaa kylmäaineliuosta. Jäähdytysmuoto onkin parhaimmillaan mukavuusjäähdytyksenä.

Sulamisvedessä voi mahdollisesti olla mukana suolaa (Da Alesandro 2023), mikä alentaa veden jäätymispistettä (Kianta ym. 2019). Suolaa voi päätyä sulamisvedeen esimerkiksi, jos teiden huollossa on käytetty hiekoitushiekan lisäksi tiesuolaa. Suolan määrää tulisi kuitenkin analysoida tarkemmin, mikäli halutaan tietoa siitä vaikuttaako auraslumen sisältämä tiesuola sulamisveden ominaisuuksiin.

### **3.7 Auraslumen potentiaali lumijäähdytyksessä**

Auraslumen käyttö on houkutteleva vaihtoehto, kun ajatellaan lumijäähdytystä. Parhaimmassa tapauksessa auratulla lumella saisi katettua järjestelmän lumimäärän tarpeen ja lumivarastoon tuotu lumi olisi myös pois lumenkaatopaikoilta ja vesistöistä.

Kaupunkialueilta aurattu lumi on epäpuhdasta, siitä voi löytyä esimerkiksi raskasmetalleja, öljyä, orgaanisia yhdisteitä, suoloja, bakteereja, hapenkulusta aiheuttavia aineita sekä ravinteita. Lumen puhtauteen vaikuttaa muun muassa se kuinka kylmällä alueelle kaupunki sijaitsee, mikä on autokannan ikärakenne, minkälainen osa on raskasta liikennettä sekä kauanko lumi ehtii olla maassa ennen auraamista. Kylmemmän alueen suurempi epäpuhtausaste selittyy sillä, että rakennuksilla on suurempi lämmitysenergian tarve, tiet kuluvat enemmän ja autot tuottavat enemmän päästöjä ilmaan toimiessaan vähemmän tehokkaasti (Pikkarainen 2017).



Aurauslumen kaataminen suoraan mereen kuormittaa ympäristöä ja esimerkiksi Helsingin Herne- saaren lumenkaatopaikalla meriveteen päätyy tuhansia roskakiloja ja kymmeniä miljoonia mikro- muovipartikkeleita normaalilumisena talvena. (Pikkarainen 2017.)

Oulussa aurauslunta kerätään muuan muassa Oritkarin ja Taskilan lumenkaatopaikoille. Lumen- kaatopaikkojen vesitiivyydestä tai roskan ja mikromuovin erottelusta ei ole juurikaan tietoa saata- villa. Oulun kaupunki on kuitenkin kieltänyt lumien varastoimisen suoraan vesistöihin (Oulun kau- pungin rakennusvalvonta).

Aurauslumen määrä Oulun alueella on runsasta, varsinkin kuluneen talven 2024 aikana. Suu- rimmat lumen vastaanottopaikat ovat Oritkarin ja Taskilan lumenkaatopaikat, tämän lisäksi Hau- kiputaalla, Oulunsalossa ja Kiimingissä sijaitsevat pienemmät lumen kaatopaikat. (Juttila 2024.) Taulukossa 4 on esitetty vastaanotettuja lumimääriä kahdella suurimmalla lumenkaatopaikalla muutaman viime vuoden ajalta.

*TAULUKKO 4. Aurauslumen vastaanottomääriä Oulussa (Juttila 2024)*

Aurauslumen määrä Oulun kahdella suurimmalla lumen vastaanottopaikalla			
Vuosi	Oritkari (m <sup>3</sup> )	Taskila (m <sup>3</sup> )	huom.
2020	55781	27840	
2021	388815	180381	
2022	438099	158754	
2023	263885	153626	
2024	416249	271904	9.4.2024 saakka

Lumen määrästä voidaan päätellä, että aurauslumen määrä olisi riittävää tyypillisenä talvena Oulussa tuottamaan lumijäähdytystä esimerkiksi yhtä suurelle rakennukselle kuin Sundsvallin sairaala, jonka pinta-ala on 190000 m<sup>2</sup>. Jäähdytystehon ja lumivaraston suhdetta on arvioitu kar- keasti taulukkoon 5, kohteet ovat aikaisemmasta taulukosta 3.

TAULUKKO 5. Arvio lumen ja jäähdytystehon suhteesta

Jäähdytysteho	Lumivarasto	
kW	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /kW
3000	60000	20,00
5000	90000	18,00
2500	120230	48,09
1500	121230	80,82
7000	90000	12,86

Tässä palataan takaisin, siihen, ettei lumivarastojen kokoa ole mitenkään standardisoitu, joten mitään yleistä totuutta ei ole mahdollista näistä suhteista muodostaa. Mutta Oslon lentokentän ja Sundsvallin sairaalan kohdalla, voidaan keskiarvoksi laskea noin 19 m<sup>3</sup> lunta / 1 kW jäähdytysteho. Tätä voidaan pitää jokseenkin oikean suuntaisena, sillä aikaisemman perusteella tiedetään Oslon lentokentän suuren inspiraation olleen Sundsvallin sairaala. Molemmissa myös käytetään samantyyppisiä lumialtaita ja eristemateriaaleja sekä paksuuksia. Tietojen vakiinnuttaminen kuitenkin vaatisi lisää laadukasta tutkimusta. Kahden sovelluksen otos ei riitä antamaan tarpeeksi tarkkaa arvoa laskentaa varten, mutta sitä käytetään tässä havainnollistamistarkoituksissa.

Aiemmin esitetyllä kaavalla 2 voidaan laskea lumeen varastoituneen energian määrä. Tässä yhteydessä puhutaan raakalumesta, sillä kyseessä on lumenkaatopaikalle tuotu aurouslumi, jota ei ole eroteltu tai käsitelty millään tavoin. Arvioivan laskennan tuloksia on esitelty taulukossa 6. Laskennassa lumen tiheytenä on käytetty 735 kg/m<sup>3</sup>.

TAULUKKO 6. Arvio raakalumeen varastoituneesta jäähdytysenergiasta

Arvio Oulun aerauslumen määrän perusteella: raakalumeen varastoitunut jäähdytysenergia				
Vuosi	Oritkari (m <sup>3</sup> )	Taskila (m <sup>3</sup> )	Oritkari (MWh)	Taskila (MWh)
2020	55781	27840	3797	1895
2021	388815	180381	26463	12277
2022	438099	158754	29817	10805
2023	263885	153626	17960	10456
2024	416249	271904	28330	18506

Varastoituvat energiamäärät ovat riippuvaisia lumen määrästä. Vuosi 2024 on ollut poikkeuksellisen luminen ja varastoitunutta energiaa onkin pelkästään Oritkarin lumenkaatopaikalla yli 28300 MWh. Moen aineiston perusteella aikaisemmin työssä esitetystä kuvasta 10, voidaan karkeasti arvioida, että noin puolet varastoidun energian kapasiteetista saadaan käytettyä jäähdytysenergiaksi (Moe 2018). Tähän vaikuttavat muun muassa sulamishäviöt. Lumenkaatopaikan lumimääristä näitä ei kuitenkaan ole kannattavaa laskeskella.

Aikaisemmalla nyrkkisäännöllä, noin 19 m<sup>3</sup> lunta / 1 kW jäähdytystehoa, mietittynä on havainnollistettu aerauslumen määrän ja jäähdytystehon suhdetta taulukossa 7. Esimerkiksi vuoden 2020 83621 m<sup>3</sup> aerauslunta vastaa noin 4 MW jäähdytystehoa, jota voidaan pitää linjassa esimerkiksi aikaisemmin esitetyn Oslon lentokentän 90000 m<sup>3</sup> lunta ja 5 MW jäähdytystehoa kanssa.

TAULUKKO 7. Raakalumesta saatava jäähdytysteho, jos 19 m<sup>3</sup> lunta / 1 kW jäähdytystehoa

Vuosi	Aerauslunta (m <sup>3</sup> )	Jäähdytystehoa (MW)
2020	83621	4
2021	569196	30
2022	596853	31
2023	417511	22
2024	688153	36

Näillä pienillä laskelmilla on ainoastaan tarkoitus antaa suuntaa sille, kuinka paljon lumessa on energiaa varastoituna ja minkä kokoluokan sovelluksiin lumijäähdytysjärjestelmä sopii.

### 3.8 Esimerkkilaskelma 5,5 MW jäähdytyslaitokselle

Otetaan teoreettinen rakennus, joka tarvitsee 5,5 MW jäähdytystehoa jäähdytyskaudelle touko-kuusta syyskuuhun. Teho on päätetty tuottaa lumijäähdytysjärjestelmän avulla. Aikaisemmin esitellyllä nyrkkisäännöllä saataisiin lumivaraston koon arvioksi 104 500 m<sup>3</sup>.

Taulukkoon 8 on mallinnettu laskemisen tuloksia. Laitoksen kuvitteellinen jäähdytystehon tarve on suurin määräävä tekijä laskelmissa. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat vuoden keskilämpötila, tässä käytetty vuoden 2023 keskilämpötilaa 3,2 °C (Ilmatieteen laitos 2024). Näiden lisäksi vaikuttaa lumen ominaislämpökapasiteetti. Lumelle on käytetty tässä ominaislämpökapasiteettia 2,1 kJ/kgK (Lapin Yliopisto 2024). Muut käytetyt suureet on esitelty aiemmin kaavojen 1 ja 2 kohdalla.

TAULUKKO 8. Teoreettisen rakennuksen lumivaraston ja varastoituneen energian mallinnusta

5,5	MW	Laitoksen jäähdytystehontarve
104500	m <sup>3</sup>	Nyrkkisäännöllä laskettu lumimäärä
0,22	q <sub>v</sub> (kg/s)	Massavirta ilmoitetun tehon kautta
7112374,5	kWh	Varastoitunut energia
104500	m <sup>3</sup>	Lumivaraston koko kaavaa 2 soveltamalla

Tuloksena saadaan, että 5,5 MW jäähdytyslaitokselle voisi ajatella 104 500 m<sup>3</sup> lumivarastoa, niin nyrkkisäännön 19 m<sup>3</sup> lunta / 1 kW jäähdytystehoa, kuin muun laskennan perusteella.

Aiemmin on esitetty, että lumivaraston koko tulisi mitoittaa siten, että varastosta saadaan paras hyöty kasaamalla lunta mieluummin korkeammaksi kasaksi, kuin levitettynä pinta-alaltaan laajemmalle. (Moe 2018). Näin saadaan minimoitua ilmasta aiheutuvat häviöt. Eristekerroksena voidaan ajatella 20 cm paksuudelta puulastuja, kuten Sundsvallissa ja Oslossa. Lumialtaan teoreettiseksi kooksi arvioidaan L 150 m \* P 90 m \* S 4,5 m, pinta-alaksi saataisiin näin 13500 m<sup>2</sup>.

Puulastujen lämmönjohtavuuden arvona käytetään 0,12 W/mK (Rakmk C4, 14, 2002). Kuukauden keskilämpötilat ilmastovyöhykkeeltä 3 ovat Ilmatieteen laitoksen tilastointipalvelusta (Ilmatieteen laitos 2024). Vyöhyke 3 on Oulun alueella energialaskennassa käytettävä ilmastovyöhyke. Ilmasta johtuvat lämpökuormat vaikuttavat laskennallisesti ja todellisuudessa eniten lumivarastoon (Moe 2018), niitä on mallinnettu taulukkoon 9. Kaavoina on käytetty aiemmin esitettyjä kaavoja 10 ja 13.

TAULUKKO 9. Ilman lämpökuormien vaikutuksesta sulavan lumen määrä

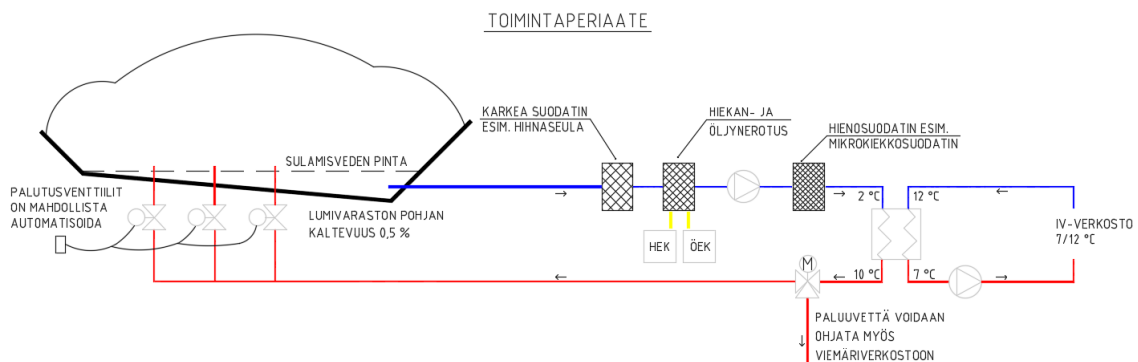
Kuukausi	Keskilämpötila °C	Lumen sulamispiste °C	t (h)	Q <sub>ilma,kuukausi</sub> kWh
Toukokuu	8,84	0	744	53273376
Kesäkuu	13,39	0	720	78090480
Heinäkuu	15,76	0	744	94976064
Elokuu	13,76	0	744	82923264
Syyskuu	9,18	0	720	53537760
Kuukausi	V <sub>ilma,kuukausi</sub> m <sup>3</sup>			
Toukokuu	782730			
Kesäkuu	1147360			
Heinäkuu	1395455			
Elokuu	1218367			
Syyskuu	786614			
V <sub>sulanut lumi</sub> %				
51				

Tulokset ovat linjassa sen kanssa, mitä aiemmin on esitetty, eli noin puolet lumesta sulaa jäähdytyskauden loppuun mennessä ilmasta johtuvien lämpökuormien vuoksi. Loppuja sulamiseen vaikuttavia maan lämpötilasta tai sateesta johtuvia lämpökuormia ei ole huomioitu tässä esimerkilaskelmassa. Lisäksi oletetaan, että lumivarastoon palautettava sulamisvesi vaikuttaa lopuksi jäljellä olevan lumen määrään. Tämä tarkoittaa sitä, että todellisuudessa jäähdytyskauden lopulla lunta on jäljellä vähemmän kuin laskennallinen 49 %.

Jäähdytyskauden lopulla lumivarasto tulee aina tyhjentää jäljelle jääneestä lumesta ja puhdistaa seuraavaa jäähdytyskautta varten. Puhdistaminen on tärkeää järjestelmän toimivuuden kannalta, ettei esimerkiksi levylämmönvaihtimeen tai putkistoon ala syntyä leväkasvustoa. (Moe 2018). Puhdistaminen tulee tehdä aina ennen kuin lunta tuodaan seuraavan kerran lumivarastoon.

Järjestelmään suositellaan myös puulastueristekerroksen ja muiden irtoroskien vuoksi kahta suodatusmetodia (Moe 2018). Karkeampi suodatin kuten hihnaseula erottelee suuremmat roskat. Sen jälkeen esimerkiksi mikrokiekkosuodattimella voidaan tehdä vielä tarkempi puhdistus sulamisvedelle. Lisäksi tulee huomioida hiekan- ja öljynerotus asianmukaisella tavalla.

Esimerkin toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 14, mukailien Skogsbergin (2005) piirtämää Sundsvallin sairaalan toimintaperiaatetta pienillä tarkennuksilla. Sulamisveden lämpötilat ovat Da Alesandron (2023) mukaan.



KUVA 14. Toimintaperiaate uudelleen piirrettyinä

Esimerkissä on ajateltu palautusventtiilien ohjauksen tulevan rakennusautomaation kautta. Tarvittaessa paluuvettä voitaisiin ohjata myös suoraan kaupungin tai kunnan viemäriverkoston. Tähän vaihtoehtoon pitäisi lumisäiliö varustaa anturilla, joka esimerkiksi ilmoittaisi moottoroidulle kolmitieventtiilille sulamisveden pinnan tason tietoja. Pinnan ylittäessä asetetun raja-arvon kolmitieventtiili päästäisi osan paluuvvedestä viemäriverkoston ja lumivaraston sulaminen pysyisi tällä tavoin hallittuna.

## 4 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Lumijäähdytysjärjestelmän toimintaperiaate ja -kulku ovat yksinkertaistettuna seuraavat: sulamisvesi käytetään pumppaamon kautta ja suodatetaan suurehkoista roskista vapaaksi. Sen jälkeen se siirretään tarkemman suodattimen kautta lämmönvaihtimeen ja siitä jäähdytysjärjestelmään. Paluuvesi palautetaan hallitusti säätöventtiilien avulla altaan pohjaosiin, jottei lumimassaan pääse syntymään koloja, kanavia tai muita lämmönsiirtoon vaikuttavia tekijöitä. Jäähdytyskauden loputtua on toiminnan kannalta tärkeää tyhjentää ja puhdistaa varastointiallas, siinä tapauksessa, kun varastointiallasta käytetään. Tämä takaa sen, että järjestelmä toimii tulevaisuudessakin moitteettomasti, eikä lämmönvaihtimeen ala syntyä leväkasvustoa. Talviaikana lumivarasto täytetään auraslumella ja lisälunta voidaan tuottaa lumitykkien avulla tarvittaessa. Mikäli lunta tuotetaan lumitykeillä, kustannukset ovat suoraan verrannollisia lumitykkien vaatimaan energia- ja vesimäärään.

Huolestuttavaa lumijäähdytyksen hyödyntämisen kannalta on ilmastonmuutos, jonka vuoksi luonnollisesti satanutta lunta ei välttämättä ole enää niin paljon saatavilla lähitulevaisuudessa. Tämä puolestaan nostaisi lumitykeillä tuotetun lumen määrää ja mahdollisesti vesittäisi jäähdytysjärjestelmän alkuperäistä tarkoitusta energian ja resurssien säästämiseksi. Lisäksi on tärkeää huomioida ympäristövaikutukset ja huolehtia lumivaraston läpäisemättömyydestä ja roskien, sekä mahdollisten lumen mukana tulevien haitallisten kemikaalien käsittelystä, jos käytettäisiin auraslunta.

Oulun auraslumimääristä pääteltynä, pelkästään Oritkarin ja Taskilan lumenkaatopaikoilla on kertynyt esimerkiksi vain vuonna 2024 arviolta 28330 MWh jäähdytysenergiaa raakalumena (9.4.2024 saakka). Tästä saadaan karkeasti noin puolet hyödynnettyä jäähdyttämiseen. Tällä muutoin hukkaan menevällä energiamäärällä olisi mahdollista jäähdyttää esimerkiksi Oritkarin alueella sijaitsevia rakennuksia, jos niihin ei tarvita alle 0 °C kylmäaineliuosta. Jäähdytysjärjestelmällä voisi myös viilentää vaikkapa Limingantullin Prismaa tai muita vastaavanlaisia rakennuksia. Tarkkoja jäähdytystehontarpeita ympäröiviin kiinteistöihin ei ole saatavilla, mutta auraslumeen varastoitu energiamäärä on joka tapauksessa huomattava. Esimerkiksi kun kiinteistöjä seuraavan kerran päivitetään, voi olla järkevää tarkastella lumijäähdytystä yhtenä vaihtoehtona jäähdytyksen osalta.

Oletettavaa kuitenkin on, että mikäli esimerkiksi Ouluun olisi halua rakennuttaa lumijäähdytysjärjestelmä, tulisi asemakaavaa muuttaa siltä osin, että lumivarasto olisi mahdollista toteuttaa. Lumivarasto voisi olla mahdollista perustaa myös vain lupahakemuksella, mikäli varastointipaikan osalta on huomioitu hulevesiverkoston osuus. Lisäksi ongelmana on se, ettei Oulussa juuri tällä hetkellä sijaitse sellaisia rakennuksia, joihin lumijäähdytystä voisi harkita. Esimerkiksi Oulun Yliopistollinen sairaala, Oulunsalon lentokenttä tai Oulun Yliopiston ja Oulun ammattikorkeakoulun kampukset voisivat olla mahdollisia kohteita lumijäähdytysjärjestelmälle. Yliopiston ja ammattikorkeakoulun kampuksien huonona puolena on se, että molemmilla on kesäaikana vähäisempi käyttöaste. Eli juuri sinä aikana, kun jäähdytysjärjestelmää olisi tehokkainta käyttää.

Joka tapauksessa, työn aikana selvisi, että Ouluun on ilmaston ja lumimäärien puolesta mahdollista perustaa lumijäähdytysjärjestelmä. Jäähdytysjärjestelmä on parhaimmillaan suurikokoisissa ja paljon jäähdytystehoa vaativissa kohteissa.

Lumivarastoa hyödyntävä jäähdytysjärjestelmä voi olla toisaalta heikkokin ratkaisu. Kaikki roska ja epäpuhtaudet, joita varastossa oleva lumimassa sisältää ovat pakkautuneet yhteen tilaan. Tämän vuoksi lumivaraston vuotamattomuudesta ympäristöön on huolehdittava.

Hyvää järjestelmässä on kuitenkin se, että epäpuhtauksia voidaan mitata, hallita ja analysoida helposti vesitiiviissä lumivarastossa sekä ohjata jatkokäsittelyä varten esimerkiksi jätevedenpuhdistamoon. Osa lumesta puristuu varastossa jääksi ylhäältäpäin tulevan paineen vaikutuksesta. Tässä metamorfoosissa mielenkiintoista onkin se, että jääksi puristuessaan lumesta poistuu luontaisesti osa epäpuhtauksista (Nordell, Skogsberg 2007).

Nordell ja Skogsberg ovat kirjoittaneet vuonna 2007 julkaistussa artikkelissaan, ettei insinööreillä, tai vaikkapa poliittisesti vaikutusvaltaisilla henkilöillä ole juurikaan tietoa lumijäähdytyksen tekniikasta, rakennuttamisesta tai suunnittelusta. Toki tämä on voinut muuttua nykyhetkeen tultaessa. Lisäksi tekniikka on, harmillista kyllä, tunnettu vain muutamassa maassa. Kustannukset järjestelmän käyttöönotossa ovat huomattavat, mutta todistetusti lumijäähdytyksellä saadaan katettua suurtenkin pinta-alojen jäähdytyksentarve. Tämän työn yksi tavoite onkin ollut tuoda tietoa järjestelmästä ja sen ominaisuuksista esille suomen kielellä.

Da Alesandro on vuoden 2023 maisterintyössään, jossa on suunniteltu yliopistorakennukseen lumijäähdytysjärjestelmää, tehnyt kattavat laskelmat lumijäähdytyksen kustannuksista ja toiminnasta. Työssä on saatu tällä tavoin todistettua järjestelmän käyttökelpoisuus. Lisäksi Da Alesandro on vahvistanut jo Nordellin, Skogsbergin ja Moen löydöksiä. Samassa työssä on myös



todistettu lumijäähdytysjärjestelmän olevan sähkönkäyttökustannuksiltaan elinkaarensa aikana edullisempi, kuin perinteiset jäähdytysjärjestelmät, joiden COP on noin 3,5. Lumijäähdytysjärjestelmien, kuten Oslossa tai Sundsvallissa, SCOP on noin 11–13.

## 5 POHDINTAA

Oulun ja Pohjois-Suomen lumimäärien kannalta lumijäähdytysjärjestelmää olisi mahdollista käyttää suurikokoisiin rakennuksiin, joissa on tarvetta mukavuusjäähdytykselle. Edellytyksenä on myös, että lähiympäristöön on mahdollista rakennuttaa lumensäilytysallas tai muu vastaava aikaisemmin esitelty lumen säilöntämuoto.

Ongelmaksi muodostuu aurauklumen likaisuus, varsinkin kaupunkialueilta. Lumen puhdistaminen roskasta ja hiekoitushiekasta sekä muista epäpuhtauksista voi olla työläs prosessi. Kuten Oslon lentokentällä Norjassa, ehkä Suomessakin olisi mahdollista hyödyntää hiekkaa ja soraa sisältävää aurauklunta lumijäähdytysjärjestelmiin. Kaikki aurauklumi ei kuitenkaan ole kelvollista käytettäväksi lumivarastoon. Tästäkin olisi harkittava tarkempia selvityksiä siitä, minkä laatuista lunta ja millaisilta alueilta sitä kannattaisi kerätä sekä minkälaiset kustannukset lumen kuljettamisesta, erottelusta epäpuhtausasteen mukaan ja puhdistamisprosessista syntyisi.

Lumijäähdytysjärjestelmän toimivuudesta ja käyttökustannuksista on saatu näyttöä nyt hieman yli 20 vuoden ajalta. Onkin perusteltua harkita kyseistä järjestelmää erilaisten suurikokoisten rakennusten mukavuusviilennykseen, tai teollisuusrakennusten jäähdytykseen, sekä osana Suomen vuoden 2035 hiilineutraaliuden tavoitteita.

Jäähdytysmuodolla on omat ongelmansa ja haasteensa. Mikäli rakennuskustannuksia saataisiin painettua alemmas, lumijäähdytyksessä kuitenkin olisi potentiaalia vakiinnuttaa itsensä kylmätekniikan kentälle. Tarvitaan kuitenkin vielä selkeämmät laskenta- ja mitoitusohjeet lumivarastoille, sekä koko järjestelmälle. Tarkempaa tutkimusta järjestelmän ympäristövaikutuksista ja aurauklumen soveltuvuudesta olisi myös aiheellista harkita.

Työn kannalta haasteita oli lähdemateriaalin saatavuuden määrässä ja siinä, ettei työlle ollut varsinaista rakenteilla olevaa kohdetta tai asiaan vihkiytynyttä toimeksiantajaa. Työn tavoitteena oli tarkastella tuoda tietoa lumijäähdytysjärjestelmän ominaisuuksista, talouspuolesta ja suunnittelusta sekä sivuta käyttömahdollisuuksia Oulun alueella. Pääsinkin suurilta osin näihin tavoitteisiin ja toivoisin, että opinnäytetyö toisi jotain ajatusta siitä, että lumijäähdytysjärjestelmä on varteenotettava vaihtoehto suunnitellussa energiatehokasta jäähdytysjärjestelmää suurikokoisiin kohteisiin.

## LÄHTEET

Da Alesandro Sofia 25.5.2023. Utvinning av snökyla som kylmetod: En förstudie åt Akademiska Hus i Luleå. Umeå Universitet. Hakupäivä 3.4.2024 <https://umu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1774086/FULLTEXT01.pdf>

Darment Oy 2023. Kylmäalan historiaa. Hakupäivä 18.7.2023 <https://darment.fi/kylmaalan-historia/>

Halvard Felde. Avinor 2017. Kuvat artikkelissa: Using stored snow as cooling at Oslo Airport, Norway. Civil Engineering, vol. 171 iss. 5, pp.11-16. Special issue on major and innovative projects in the Nordic countries. Hakupäivä 3.4.2024 <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/epdf/10.1680/jcien.17.00041>

Ilmatieteen laitos 2024. Lämpötila- ja sadetilastoja vuodesta 1961. Hakupäivä 21.4.2024 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>

Ilmatieteen laitos 2024. Vuoden 2023 sääyhteenveto. Hakupäivä 21.4.2024 <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2023>

Jutila, Mika 2024. Lupainsinööri. Oulun Kaupunki. Sähköposti 9.4.2024.

Kianta Jani, Aittomäki Antero, Indola Greger, Jyrinki Mikko, Kaappola Esko, Kukkonen Jari, Mansikkaviita Timo, Kovesjärvi Perttu, Nissinen Timo, Penttinen Jukka, Puroviita Timo, Puputti Timo, Silván Jani, Suokorte Jori, Vettenranta Jukka, Viikilä Hannu, Kapanen Mika. 1.2.2019. Välilliset Jäähdytysjärjestelmät. Suomen Kylmäyhdistys ry. Hakupäivä 23.4.2024 [https://www.kylmaextra.fi/files/127/Valilliset\\_Jaahdytysjarjestelmat\\_2019.pdf](https://www.kylmaextra.fi/files/127/Valilliset_Jaahdytysjarjestelmat_2019.pdf)

Kylmäaine.fi 2023. Kylmäaine.fi – tietoa kylmäaineista, talteenotosta, kylmäaineiden regeneroinnista ja kierrätyksestä. Hakupäivä 31.7.2023 <https://www.kylmaaine.fi/>

Lapin Yliopisto 2024. Lumen teknisiä ominaisuuksia. Hakupäivä 21.4.2024 [http://ace.ulapland.fi/talvitaide/oppimateriaalia/lumimateriaali\\_nettti.pdf](http://ace.ulapland.fi/talvitaide/oppimateriaalia/lumimateriaali_nettti.pdf)

Moe Jesper Mæx 5.5.2018. Using stored snow as cooling at Oslo Airport, Norway. Civil Engineering, vol. 171 iss. 5, pp.11-16. Special issue on major and innovative projects in the Nordic countries. Hakupäivä 3.4.2024 <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/epdf/10.1680/jcien.17.00041>

Motiva ry 04/2010. Energiatohokas Hiihtokeskus. Hakupäivä 10.4.2024 [https://www.motiva.fi/files/3227/Energiatohokas\\_hiihtokeskus.pdf](https://www.motiva.fi/files/3227/Energiatohokas_hiihtokeskus.pdf)

Nagengast Bernard 02/1999. Comfort from a Block of Ice – A History of Comfort Cooling Using Ice. ASHRAE Journal. Hakupäivä 18.7.2023 <https://www.ashrae.org/file%20library/about/mission%20and%20vision/ashrae%20and%20industry%20history/a-history-of-comfort-cooling-using-ice.pdf>

Nordell Bo 12/2015. Using ice and snow in thermal energy storage systems. Advances in Thermal Energy Storage Systems (s.187-200). Woodhead Publishing. Hakupäivä 18.7.2023 [https://www.researchgate.net/publication/281601181\\_Using\\_ice\\_and\\_snow\\_in\\_thermal\\_energy\\_storage\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/281601181_Using_ice_and_snow_in_thermal_energy_storage_systems)

Nordell Bo, Skogsberg Kjell 01/2007. The Sundsvall Snow Storage – Six Years of Operation. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design (s. 349-366). Springer. Hakupäivä 26.7.2023 [https://www.researchgate.net/publication/226859656\\_THE\\_SUNDSVALL\\_SNOW\\_STORAGE-SIX\\_YEARS\\_OF\\_OPERATION](https://www.researchgate.net/publication/226859656_THE_SUNDSVALL_SNOW_STORAGE-SIX_YEARS_OF_OPERATION)

Pikkarainen Kaisa 10/2017. Puhdas kuin lumi? – Lumi mikromuovien ja muun roskan reittinä kaupunkialueelta mereen. Helsingin Yliopisto. Hakupäivä 8.8.2023 <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/9d98af85-2115-4f28-8e9a-ab750a728e32/content>

Suomen Rakentamismääräyskokoelma C4 (kumottu) 30.10.2002. Ympäristöministeriön asetus lämmöneristyksestä. Hakupäivä 21.4.2024 <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset/kumotut>  
Suomen Säädoskokoelma 1048/2017 28.12.2017. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta. Hakupäivä 4.4.2024 <https://www.edilex.fi/data/rakentamismaaraykset/sk20171048.pdf>

Toivanen Timo 11/2010. Vapaaajähdytyksen toiminnan tutkiminen, opinnäytetyö. Mikkelin Ammattikorkeakoulu.

Hakupäivä

31.7.2023

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/22878/Vapaaajahdytyksen\\_tutkiminen.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/22878/Vapaaajahdytyksen_tutkiminen.pdf?sequence=1)

# LIITTEET

## Lumijäähdytys-taulukoita.xls

Eri maiden lumijäähdytyslaitosten, tutkimusten ja laitosmitoitusten yhteenveto				
Sijainti	Laitos	Kylnähtöön tarve	Lumimäärä	Altaan mitat
Kanada	Hylätty louhos	7000 kW	90 000 m <sup>3</sup>	120 m * 80 m * 9,5 m
Ruotsi	Kaasuvoimala	30,7 Gwh/vuosi	3 200 000 m <sup>3</sup>	400 m * 400 m * 20 m
Ruotsi	Teollisuus	1500 kW	121 230 m <sup>3</sup>	120 m * 100 m * 3 m
Japani	Lentokenttä	2500 kW	120 230 m <sup>3</sup>	200 m * 100 m * 6 m
Sundsvall, Ruotsi	Säiläala	2500 kW	60 000-75 600 m <sup>3</sup>	140 m * 60 m * 9 m
Oslo, Norja	Lentokenttä	5000 kW	30 000-90 000 m <sup>3</sup>	120 m * 84 m * 4,5 m

1,00 Swedish Krona =  
**0.087164918 Euros**  
1EUR = 11,4723 SEK

ve.com

0.087	muutoskerroin
SEK	EUR
800000	69500
700000	60900
600000	52200
500000	43500
400000	34800
300000	26100
200000	17400
100000	8700

Aurauksen määrä Oulun kahdella suurimmalla lumen vastaanottoaikalla			
Vuosi	Ontkari (m <sup>3</sup> )	Taskila (m <sup>3</sup> )	huom.
2020	55781	27840	
2021	388815	180381	
2022	438099	158754	
2023	263885	153626	
2024	416249	271904	9.4.2024 saakka

Jäähdytyslaitos	Lumivarasto	m <sup>3</sup> /kW	Keskianvo (Sundsvall/Oslo)	m <sup>3</sup> /kW	C <sub>lum</sub> (kJ/kgK)
3000	60000	20,00	19,00	2,1	
5000	90000	18,00	ρ kg/m <sup>3</sup>	L kWh/kg	
2500	120230	48,09	735	0,0926	
1500	121230	80,82	T <sub>ilmä</sub> (K)	T <sub>vesi</sub> (K)	ΔT (K)
7000	30000	12,86	273	276,2	3,2

Arvio Oulun aurauksen määrän perusteella: raakalumen varastoitunut jäähdytysenergia				
Vuosi	Ontkari (m <sup>3</sup> )	Taskila (m <sup>3</sup> )	Ontkari (MWh)	Taskila (MWh)
2020	55781	27840	3797	1895
2021	388815	180381	26463	12277
2022	438099	158754	29817	10805
2023	263885	153626	17969	10458
2024	416249	271904	26330	18506

Vuosi	Aurauksen määrä (m <sup>3</sup> )	Jäähdytysenergia (MW)
2020	83621	4
2021	569196	30
2022	596853	31
2023	417511	22
2024	688153	36

5,5	MW	Laitoksen jäähdytysenergia
104500	m <sup>3</sup>	Nykykäyttöön laskettu lumimäärä
0,22	q <sub>v</sub> (kg/s)	Massavirta ilmoitetun tehon kautta
7112374,5	kWh	Varastoitunut energia
104500	m <sup>3</sup>	Lumivaraston koko kaavaa 2 soveltamalla

A <sub>lumis</sub> m <sup>2</sup>	13500	C4 s. 14
h <sub>lumis</sub> W/mk	0,12	
hZ m	0,20	

Kuukausi	Keskilämpötila °C	Lumen sulamispiste °C	t(h)	Q <sub>lumis</sub> kWh
Toukokuu	8,84	0	744	53273376
Kesäkuu	13,39	0	720	78090480
Heinäkuu	15,76	0	744	94976064
Elokuu	13,76	0	744	82923264
Syyskuu	9,18	0	720	53637760

Kuukausi	V <sub>lumis</sub> m <sup>3</sup>
Toukokuu	782730
Kesäkuu	1147360
Heinäkuu	1395455
Elokuu	1218367
Syyskuu	786614

Kuukausi	g	t(h)
tammikuu	31	744
helmikuu	28	672
maaliskuu	31	744
huhtikuu	30	720
toukokuu	31	744
kesäkuu	30	720
heinäkuu	31	744
elokuu	31	744
syyskuu	30	720
lokakuu	31	744
marraskuu	30	720
joulukuu	31	744

Kuukausi	Keskilämpötila °C	Lumen sulamispiste °C
Tammikuu	-8	0
Helmi	-7,1	0
Maalis	-3,53	0
Huhtik	2,42	0
Toukoku	8,84	0
Kesäkuu	13,39	0
Heinäkuu	15,76	0
Elokuu	13,76	0
Syyskuu	9,18	0
Lokakuu	4,07	0
Marraskuu	-1,76	0
Joulukuu	-5,82	0

