

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jukka Heino

**LUMEN VARASTOINTI JA HYÖDYNTÄMINEN TILOJEN
JÄÄHDYTYKSEEN, CASE: KONE OYJ**

Työn tarkastajat:

Prof. Timo Hyppänen

TkT. Jouni Ritvanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
LUT Energia
Energiatekniikan koulutusohjelma

Jukka Heino

Lumen varastointi ja hyödyntäminen tilojen jäähdytykseen, Case: Kone Oyj

Diplomityö

2015

120 sivua, 28 kuvaa, 14 taulukkoa ja 6 liitettä

Tarkastajat: Prof. Timo Hyppänen

TkT. Jouni Ritvanen

Ohjaaja: Real Estate Specialist, Harri Suominen

Hakusanat: jäähdytys, lumijäähdytys, energiatase, energiatalous, uusiutuva energia

Tämän diplomityön tarkoituksena on selvittää mahdollisuutta hyödyntää lunta tilojen jäähdytykseen Koneen Hyvinkään tehdasalueella. Työssä kerrotaan myös yleisesti eri jäähdytysmuodoista ja tuotantotavoista. Eri kirjallisuuslähteiden pohjalta tutkittiin erilaisia lumijäähdytysjärjestelmiä, joiden energiataseiden pohjalta tehtiin sopiva malli kohdealueelle. Mallin avulla selvitettiin lumesta hyödynnettävä jäähdytysenergian määrä. Esitetylle varastolle hahmoteltiin investointi- ja käyttökustannukset kirjallisuuslähteiden ja asiantuntijoiden avulla. Kustannuksien ja jäähdytysenergiämäärien avulla laskettiin lumijäähdytyksen tuotantokustannukset, joita verrattiin perinteiseen kompressorijäähdyttimeen. Lopuksi pohdittiin vielä takaisinmaksuaikoja lumivaraston liittyessä nykyisiin jäähdytysjärjestelmiin ja kokonaan uuteen jäähdytysverkostoon. Tuloksien mukaan lumijäähdytys ei ole taloudellisesti kannattavaa Koneen Hyvinkään tehdasalueella. Ongelmaksi muodostui investointikustannusten suuruus verrattuna saatuihin säästöihin. Ympäristöllisesti ja yrityksellisesti hanketta voidaan pitää kannattavana. Lumijäähdytyksestä voidaan saada kannattavampi suuremmilla lumimäärillä, mikä vaatisi myös suuremmat jäähdytysenergiankulutukset kuin Koneella on. Myös hyödyntämällä luonnon omia rakenteita voidaan parantaa kannattavuutta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
LUT Energy
Energy Technology

Jukka Heino

Snow storage and utilization of snow for cooling buildings, Case: Kone Oyj

Master's thesis

2015

120 pages, 28 figures, 14 tables and 6 appendices

Examiners: Professor Timo Hyppänen

D.Sc. (Tech.) Jouni Ritvanen

Supervisor: Real Estate Specialist, Harri Suominen

Keywords: cooling, snow cooling, energy balance, energy economics, renewable energy

The purpose of this master's thesis is to examine the possibility to utilize snow on cooling buildings at Kone's Hyvinkää factory area. In this report is also told generally of different cooling methods and cooling production. Snow cooling and energy balances were studied based on different literature sources. The energy balance and model was also made for Kone's area. The model was used to determine the amount of snow to utilize for cooling. The investment and production costs for the storage were defined from the literature sources and the help of experts. The calculated operation costs were compared to traditional compressor cooling. At the end payback times of the snow storage were compared to existing cooling systems and whole new cooling network. Based on the calculations the snow cooling isn't economically profitable in the Kone's Hyvinkää factory area. Major problems were high investment costs compared to savings. From the environmental and company's points of view snow cooling is profitable. Snow cooling could be economically more profitable if the snow amount and the cooling rate were bigger. Also utilization of nature's own structures could make project more profitable.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Kone Industrial Oy:lle kesän ja syksyn 2014 aikana. Haluan kiittää Konetta mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta tehdä tämä työ. Erityskiitoksen haluan antaa Koneen kiinteistöosastolle tuesta ja neuvoista diplomityön kirjoittamisen aikana.

Kiitoksen ansaitsee myös Lappeenrannan teknillinen yliopisto ja erityisesti energiatekniikan osasto. Olen saanut koko opiskelujen ajan asiantuntevaa opetusta ja hyviä neuvoja. Lappeenrannan opiskelujasta jäi monia hyviä muistoja ja ystäviä.

Haluan kiittää myös kaikkia työhön osallistuneita henkilöitä, joilta sain arvokkaita tietoja työhön liittyen. Kiitokset myös tyttöystävälleni, perheelleni ja ystävilleni Hyvinkäällä.

Hyvinkäällä 20.1.2015

Jukka Heino

Sisällysluettelo

Symboli- ja lyhenneluettelo	7
Johdanto	10
1.1 Työn tavoite ja rajaus.....	11
1.2 Työn rakenne	11
2 Tilojen jäähdytys ja jäähdytysenergiantuotanto	13
2.1 Rakennusten jäähdytystarve	13
2.1.1 Rakennuksen jäähdytysjärjestelmät	15
2.2 Kaukojäähdytys	16
2.3 Jäähdytyksen tuotantomuodot	18
2.3.1 Vapaa jäähdytys	19
2.3.2 Kompressorijäähdytys	22
3 Lumen varastointi ja käytettävä tekniikka	25
3.1 Rakennetut lumivarastot	26
3.2 Maanpäälliset lumivarastot	28
3.2.1 Sundsvallin sairaalan lumijäähdytys	28
3.3 Maanalaiset lumivarastot	34
3.4 Lumen ominaisuudet ja sulaminen	35
3.5 Lumijäähdytyksen energiatase.....	39
3.5.1 Sundsvallin energiatase	43
3.6 Käytettävä tekniikka	46
4 CASE: Kone Oyj	51
4.1 Hyvinkään tehdasalue	51
4.1.1 Jäähdytysenergian tämänhetkinen kulutus	52
4.1.2 Jäähdytysenergian mahdollinen tarve	57
4.2 Hankkeen kuvaus.....	60
4.2.1 Alueelle satavan lumen määrä.....	64
4.2.2 Energiantuotantoennuste	65
4.2.3 Vaihtoehtoiset projektit	67

5	Jäähdytysenergiantuotanto	68
5.1	Energiantuotantolaskelmat	68
5.1.1	Varaston ja tekniikan mitoitus.....	75
5.2	Lumijäähdytyksen taloudellisuus	80
5.2.1	Investointi	81
5.2.2	Käyttö- ja ylläpitokustannukset.....	82
5.2.3	Mahdolliset tukimuodot	86
5.3	Tuotanto- ja käyttökustannukset.....	88
5.3.1	Herkkyystarkastelut.....	91
6	Ympäristövaatimukset	95
6.1	Vaikutukset ympäristöön ja niiden arviointi.....	96
6.1.1	Ilmastovaikutukset.....	97
7	Projektin kannattavuus	99
7.1	Taloudellinen	99
7.2	Ympäristöllinen	106
7.3	Yrityksellinen	107
8	Yhteenveto ja johtopäätökset	108
8.1	Jatkotutkimus.....	111
	Lähdeluettelo	113

LIITTEET

Liite 1: Hyvinkään tehdasalueen aksonometrikuva

Liite 2: Hissitehtaan jäähdytysenergian tarve ja -tehon määrittäminen

Liite 3: Säätilastojen keskiarvot Klaukkalan sääasemalta vuosilta 2009–2014

Liite 4: Lumivaraston asemapiirros

Liite 5: Lumivaraston leikkauskuvat

Liite 6: Investointikustannukset

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	pinta-ala, [m ²]
C	tehollinen lämpökapasiteetti, [Wh/brm ² K]
c_p	ominaislämpökapasiteetti, [J/kgK]
d	putken halkaisija, [m]
$G_{\text{säteily,pystypinta}}$	pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikkö kohti, [Wh/m ²]
g	maan vetovoiman kiihtyvyys, [m/s ²]
H	ominaislämpöhäviö, [W/K]
h	nostokorkeus, [m]
I	investointi, [€]
i	laskentakorko, [%]
L	putken pituus, [m]
m	massa, [kg]
n	pitoaika, [a]
n_{vi}	rakennuksen vuotoilmakerroin, [1/h]
P	sähköteho, [W]
Q	lämpöenergia, [Wh]
q	nettotuotto, [€]
q_m	massavirta, [kg/s]
q_v	tilavuusvirta, [m ³ /s]
s	lumen sulamisenergia, [J/kgK]
T	lämpötila, [°C, K]
U	rakennusosan lämmönläpäisykerroin, [W/m ² K]

V	tilavuus, [m ³]
v	virtausnopeus, [m/s]

Kreikkalaiset aakkoset

$\eta_{\text{lämpö}}$	lämpökuormien kuukausittainen hyödyntämisaste, [W]
φ_{henk}	yhden henkilön luovuttama keskimääräinen lämpöteho, [W]
Δp	paine-ero, [Pa]
Δt	ajanjakson pituus, [h]
Φ	lämpövirta, [W]
ρ	tiheys, [kg/m ²]
τ	aikavakio, [h]

Dimensiottomat luvut

$\sum K$	kertavastusten summa, [-]
η_a	ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton hyötysuhde, [-]
γ	lämpökuormanenergian ja lämpöhäviöenergian suhdeluku, [-]
ε	pinnan emissiviteetti, [-]
a	numeerinen parametri, [-]
COP	kylmäkerroin, [-]
F	säteilyn kokonaiskorjauskerroin, [-]
f	kitkakerroin, [-]
ka	rakennuksen käytönaikainen käyttöaste, joka kuvaa ihmisten keskimääräistä läsnäoloa rakennuksessa, [-]
t	käyntiaste, [-]
x	valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin, [-]

Alaindeksit

GM	<i>ground melt</i> , maan pinnasta ja seinämistä johtuva sulaminen
i	ilma
ikk	ikkuna
iv	ilmanvaihto
joht	johtuminen
k	kehäkerroin
K	kylmäpuoli
l	lämmönsiirrin
log	logaritminen
m	meno
p	paluu
rak	rakennus
RM	<i>rain melt</i> , sateesta johtuva sulaminen
s	sisä
SM	<i>surface melt</i> , pinnan sulaminen
u	ulko
var	varjokerroin
ver	verhokerroin
vi	vuotoilma

JOHDANTO

Tänä päivänä jäähdytyksen tarve on kasvanut merkittävästi toimisto- ja tuotantotiloissa sekä asuinhuoneistossa. Syitä lienevät kasvaneet asumis- ja työskentelymukavuuden tarpeet, suurentuneet lämpökuormat sekä työn tuottavuuden heikkeneminen työskentelylämpötilan noustessa. Perinteiset jäähdytysratkaisut ovat tyypillisesti olleet kiinteistökohtaisia kompressorijäähdytyksiä, mutta nykyaikaiset energiatehokkuustoimet ovat kasvattaneet mielenkiintoa kohti uusiutuvaa energiaa ja kestäväää kehitystä. Maapallon pohjoisilla osilla talvella sataneen lumen hyödyntäminen kesän jäähdytystarpeeseen on esimerkki tästä.

Tämän diplomityön idea lumen hyödyntämisestä rakennuksien jäähdytykseen kehitettiin Koneen kiinteistöosastolla, jossa heräsi halu tehostaa Hyvinkään tehdasalueen jäähdytystä. Alun perin mielenkiinnon lumijäähdytystä kohtaan herätti Sundsvallin lumijäähdytys. Sundsvallin sairaalaa on jäähdytetty menestyksekkäästi lumella jo yli 10 vuotta. Koneen Hyvinkään tehdasalueen jäähdytystarve on kesällä, ja tällä hetkellä jäähdytys tapahtuu pääasiassa kiinteistökohtaisilla jäähdytyskompressoreilla. Sen sijaan lumijäähdytyksessä kerättäisiin talvella lumi yhteen kasaan, ja lumen sulamisvettä hyödynnettäisiin kesällä jäähdytykseen. Lumen hyödyntäminen jäähdytyksessä pienentäisi ostoenergian tarvetta, tekisi energian hankinnasta ja tuotannosta ekologisempaa sekä kasvattaisi yrityksen imagoa kestäväen kehityksen kannalta. Lisäksi jäähdytys parantaisi sisäilmaa ja sitä kautta työn tuottavuutta ja samalla parantaisi yrityksen tulosta.

Lumen varastointia jäähdytykseen on hyödynnetty varsinkin Japanissa, jossa ruokaa on viilennetty lumen ja jään avulla jo vuosisatoja (Skogsberg 2005, 6). Myös erilaisia toimistorakennuksia sekä vuodesta 2010 alkaen New Chitosen lentokenttää jäähdytetään lumella. Ruotsissa Sundsvallin sairaalaa on 2000-luvulla jäähdytetty jopa 90-prosenttisesti lumella. Pohjoismaista myös Norjaan on rakenteilla altaan muotoinen jäähdytyslaitos jäähdyttämään lentokenttää. Myös Yhdysvallat ja Kanada ovat tehneet tutkimusta lumen hyödyntämisestä. (Nordell 2014, 198–199; Cowi 2012; JFS 2009; Skogsberg 2005, 6.)

1.1 Työn tavoite ja raja

Työn tavoitteena on selvittää, onko Koneen tehdasalueella Hyvinkäällä kannattavaa varastoida lumi talvisin ja hyödyntää sen sulamisenergiaa tilojen jäähdyttämiseen. Kannattavuuden selvittämiseen liittyy olennaisesti varaston optimaalisen koon ja sijainnin määrittäminen, tarvittava lumimäärä ja sen suhteuttaminen alueen jäähdytystarpeeseen, kustannusten määrittäminen sekä kannattavuuden pohtiminen muun muassa talouden, ympäristön sekä yrityksen kannalta. Tarkoituksena on myös selvittää alueen tämänhetkinen jäähdytysenergian käyttö ja tuotanto sekä laskea mahdollisen jäähdytyksen tarve tulevaisuudessa.

Työ keskittyy pääasiassa jäähdytysenergiatuotantoon, joten jäähdytyksen eri jakotapojen tarkastelut rakennusten sisällä jää vähemmälle. Jäähdytysenergiatuotannolla tarkoitetaan lumen kylmän sulamisveden hyödyntämistä jäähdyttämiseen. Työstä rajataan pois erilaisten testaus- ja tuotekehitysalueiden jäähdytysjärjestelmät, koska niiden käyttö eroaa yleensä merkittävästi normaalista toimisto- ja tuotantokäytöstä. Lisäksi niille on tyypillisesti rakennettu omat jäähdytysjärjestelmät.

Alueen nykyisestä ja mahdollisesta tulevaisuuden jäähdytystarpeesta joudutaan tekemään huomattavia arvioita ja oletuksia, koska nykyisissä järjestelmissä ei ole olemassa erillistä mittarointia. Tulevaisuuden jäähdytystarve määritellään nykyisen jäähdytystehon pohjalta, ja osille rakennuksista se pyritään laskemaan lämpökuormien perusteella. Rajoituksia joudutaan tekemään myös silloin, kun aletaan hahmotella lumesta hyödynnettävän jäähdytysenergian määrää. Tarkemmin tulevista rajauksista kerrotaan kyseisen kappaleen kohdalla.

1.2 Työn rakenne

Työ alkaa teoriaosuudella, jonka varaan varsinainen tutkimus rakentuu. Teoriaosuudessa kerrotaan yleisesti rakennusten jäähdytyksestä ja jäähdytysenergiatuotannosta sekä erikseen lumen varastoinnin eri muodoista ja tekniikasta jäähdyttämiseen. Tutkimusosassa

paneudutaan Koneeseen yrityksenä ja Hyvinkään tehdasalueen jäähdytykseen. Työssä pyritään selvittämään mahdolliset lumivarastoinnin kohteet ja selvitetään varaston kannattavuutta. Lumesta hyödynnettävän jäähdytysenergian määrittämiseen hyödynnetään aikaisempien tutkimusten energiataseita. Tutkimusten pohjalta voidaan tehdä energiatase tähän kohteeseen. Lumivaraston luonnollista sulamista pyritään mallintamaan mahdollisimman tarkasti, jolloin hyödynnettävän jäähdytysenergian määrä saadaan selville. Lopuksi pohditaan järjestelmän kannattavuutta useasta eri näkökulmasta. Kannattavuuden tarkastelu muotoutuu taloudelliseen, ympäristölliseen ja yritykselliseen näkökulmaan. Taloudelliseen kannattavuuteen pyritään arvioimaan kustannukset asiantuntijoiden avulla, jolloin tarkastelusta saadaan mahdollisimman tarkka. Ympäristölliseen tarkasteluun liittyy nykyinen jäähdytysenergiankulutus ja tuotantomuodot. Yrityksellinen tarkastelu ja kannattavuus liittyvät työskentelyolosuhteiden parantumiseen sekä yrityksen imagoon uusiutuvan energian ja ekologisuuden kannattajana.

2 TILOJEN JÄÄHDYTYS JA JÄÄHDYTYSENERGIANTUOTANTO

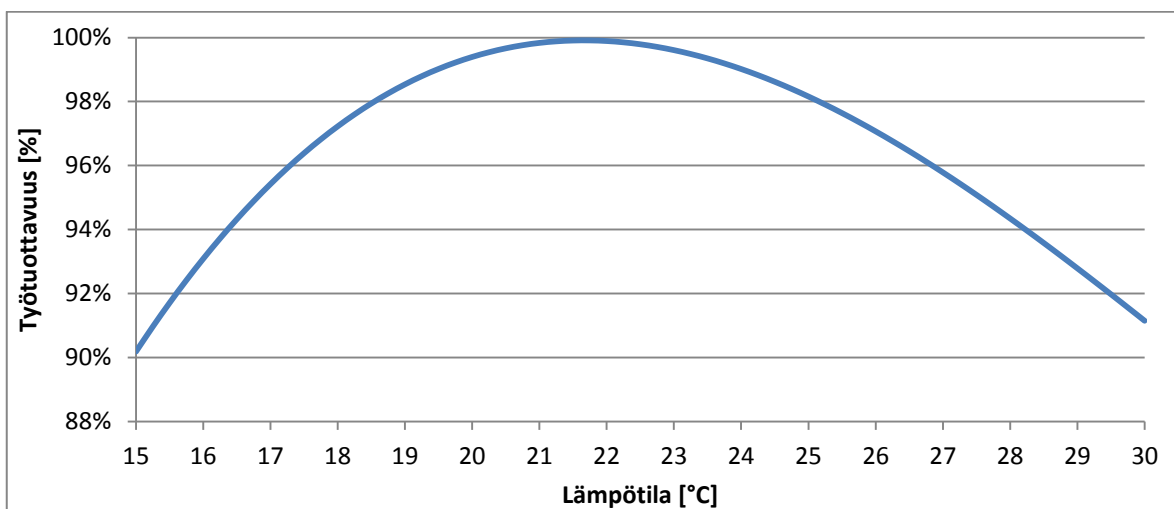
Jäähdytyksellä tarkoitetaan lämpöenergian siirtämistä, jotta kohdetilaan saadaan viileämpi lämpötila. Erilaisia jäähdytystekniikoita ovat muun muassa kylmähöyryprosessit, vapaajäähtyminen, haihtuminen, säteily ja erilaiset kylmävarastot. Jäähdytys voidaan tuottaa kiinteistökohtaisesti lähellä loppukäyttäjää tai kuljettaa kaukokylmänä pidemmältä matkalta. Tässä kappaleessa käydään läpi rakennusten jäähdytystarvetta, rakennuskohtaisia jäähdytysjärjestelmiä, kaukojäähdytyksen toimintaperiaatetta ja käyttöä Suomessa sekä jäähdytysenergian erilaisia tuotantomuotoja. Jäähdytysenergiantuotannolla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa energianmuuntaa jäähdytystä varten.

2.1 Rakennusten jäähdytystarve

Rakennuksen jäähdytystarpeen tärkein mitoituskriteeri on huonelämpötilan tavoitearvon pysyvyys, jonka mukaan jäähdytysteho valitaan. Huonelämpötilaan vaikuttavat rakennuksen ja rakennusmateriaalien ominaisuudet, sähkölaitteet ja kuormitus. Rakennuksen ja rakennemateriaalien ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa rakennuksen lämpötekniset ominaisuudet, ikkunoiden koko, määrä ja sijainti sekä rakenteiden lämmönjohtavuus, massa ja varauskyky. Nykyaikana sähkölaitteet tuottavat rakennukseen suuren määrän lämpökuormaa, joka pitää poistaa. Varsinkin toimistorakennuksissa tietokoneiden lisääntynyt määrä huonetilaa kohden on kasvattanut jäähdytystarvetta. Rakennuksen kuormitukseen vaikuttavat esimerkiksi työajat, tehtävä työ sekä sen fyysinen rasitus. (Energieollisuus ry 2006, 550.)

Tavoitelämpötilat, joihin eri huonetyypeissä pitäisi pyrkiä, on määritelty Suomen rakentamismääräyskokoelman asetuksessa D2. Kesäkaudella huonelämpötilan suunnitteluarvona käytetään lämpötilaa 23 °C, ja rakennuksen käyttöaikana ei oleskeluvyöhykkeen lämpötila saa olla korkeampi kuin 25 °C. Kuitenkin hyväksytty poikkeama oleskelutilan huonelämpötilan suunnitteluarvosta on 1 °C. Kesäkauden mitoittavana lämpötilana voidaan käyttää arvoa 25 °C. (D2 2012, 6.)

Lämpötilan vaikutusta työn tuottavuuteen on havainnoinut kuvassa 1. Kuvaaja on muokattu tieteellisestä artikkelista, jossa on koottu yhteen 24:n eri tutkimuksen tulokset lämpötilan vaikutuksesta työn tuottavuuteen yksinkertaista toimistotyötä vastaavassa työmuodossa. Tutkimustulokset, jotka on saatu yksinkertaiseen toimistotyöhön pohjautuvasta datasta, eivät välttämättä sovellu suoraan luovan työn tuottavuuden arviointiin. Yli 25 °C:ssa työtuottavuus laskee keskimäärin 2 %/°C (Seppänen et al. 2006, 3–4.)



Kuva 1. Työn tuottavuus suhteessa työskentelylämpötilaan. (Seppänen et al. 2006, 6.)

Kuvasta huomataan, että lämpötilan noustessa lähelle 30 °C:tta, työn tuottavuus yksinkertaisessa toimistotyössä laskee melkein 10 %. Toimistotyössä tämä näkyy ylimääräisinä taukoina, ajattelutyöskentelyn heikentymisenä sekä yleisen keskittymiskyvyn alenemisenä. Luovassa ja vaativassa toimistotyössä työtuottavuuden voi olettaa laskevan jyrkemmin, koska työtä voidaan pitää henkisesti raskaana. Tehdastyössä voidaan olettaa työtuottavuuden laskevan entisestään lämpötilan kasvaessa fyysisesti raskaamman työn takia. Tehdastyössä, eli fyysisessä työssä, lämpötilan nousu näkyy työn hidastumisena, laadun heikkenemisenä sekä työn mielekkyyden alenemisenä.

Rakennustyyppi vaikuttaa merkittävästi jäähdytystehon tarpeeseen sekä huipunkäyttöaikaan. Esimerkiksi ATK-konesaleissa jäähdytystehon tarve voi olla ympärivuotinen, ja vastaavasti asuinrakennuksessa jäähdytyksen huipunkäyttöaika on vain

300 tuntia. Suurin jäähdystystehon tarve esiintyy yleensä heinä-elokuussa, jolloin ilmanlämpötila sekä -kosteus ovat suurimmillaan. Taulukossa 1 on esitetty tyypillisiä jäähdystystehon ja -energiankulutuksen arvoja erilaisille rakennustyypeille. (Energiateollisuus ry 2006, 550.)

Taulukko 1. Jäähdytystehon ja -energiankulutuksen tyypillisiä arvoja. (Energiateollisuus ry 2006, 550.)

Rakennustyyppi	Tehontarve [W/m ²]	Energiankulutus [kWh/m ²]	Huipunkäyttöaika [h]
Asuinrakennus	15–30	10–15	300–600
Toimistorakennus	30–70	15–50	500–1400
Kauppakeskus	100–200	70–150	700–2000
ATK-tilat	>300		>3000
Hotellit	40–70		800–1200

Jäähdytysjärjestelmän mitoituslämpötiloihin vaikuttavat merkittävästi rakennustyyppi ja kohde sekä tavoitelämpötilat. Yleisesti ensiöpuolen lämpötilat ovat 7–15 °C ja toisiopuolen lämpötilat 9–20 °C. Lämmönsiirtimille suositeltava asteisuus on 1–2 °C. Asteisuuden ollessa alle 1,5 °C, kustannukset nousevat merkittävästi. (Energiateollisuus ry 2006, 546.)

2.1.1 Rakennuksen jäähdytysjärjestelmät

Rakennuksen jäähdytysjärjestelmät voidaan jakaa ilmajärjestelmiin, ilma-vesijärjestelmiin, vesijärjestelmiin sekä hajautettuihin järjestelmiin. Ilmastoinnin tarkoitus on hallita ilmavirtoja pitämällä oleskelutilojen ilma puhtaana, sopivan lämpöisenä ja kosteana. (Energiateollisuus ry 2006, 552.)

Ilmajärjestelmissä jäähdytys tapahtuu jäähdytyspatterilla ilmanvaihtokoneessa. Jäähdytyspatterit jäähdytetään esimerkiksi jäähdytyspiirissä kiertävän veden avulla. Muita keskeisiä ilmanvaihtokoneen komponentteja ovat suodattimet, puhallin, lämmityspatterit, kostutin ja jälkilämmitys. Ilmajärjestelmissä ilmanvaihto ja jäähdytys tapahtuvat samalla ilmavirralla, joka voidaan mitoittaa jäähdytyksen, lämmityksen tai henkilömäärien mukaan. (Energiateollisuus ry 2006, 552.)

Ilma-vesijärjestelmissä jäähdyttävä vaikutus siirtyy ilmavirtaan huonetiloissa, jolloin jäähdytysteho tuodaan huoneeseen veden mukana. Ilmavesijärjestelmiä ovat esimerkiksi aktiivi-ilmastointipalkit, suutinkonvektorit sekä puhallinkonvektorit. Ilma-vesijärjestelmissä jäähdytyksen huonekohtainen säätö on helppo toteuttaa, mikä mahdollistaa monipuolisemman järjestelmäkokonaisuuden. (Energieollisuus ry 2006, 552.)

Vesijärjestelmissä jäähdytettävän huoneen tuloilmaa ei säädetä, vaan jäähdytysteho tuodaan suoraan veden avulla huoneeseen jo olevaan ilmaan. Vesijärjestelmiä ovat muun muassa passiiviset ilmastointipalkit sekä puhallinkonvektorit, joissa on erillinen tulo- ja poistoilma. (Energieollisuus ry 2006, 552.)

Hajautetuissa järjestelmissä tilat jäähdytetään huonekohtaisesti, jolloin rakennuksessa ei ole keskitettyä jäähdytysjärjestelmää. Myös ilmanvaihto tapahtuu erillisellä laitteella. Hajautettuihin järjestelmiin kuuluvat esimerkiksi siirrettävät ilmastointilaitteet. (Energieollisuus ry 2006, 552.)

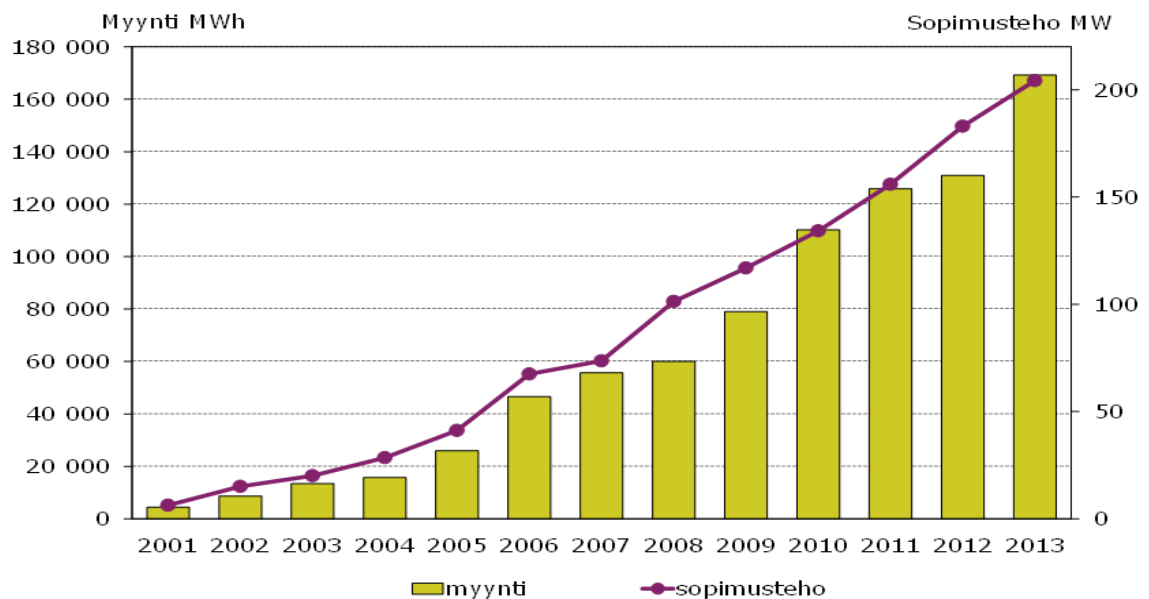
2.2 Kaukojäähdytys

Kaukojäähdytyksen perusidea on tuottaa keskitetysti jäähdytysenergiaa, joka jaetaan jakeluverkostoa pitkin usealle asiakkaalle. Kiinteistökohtaiseen jäähdytysjärjestelmään verrattuna kaukojäähdytyksessä tehostetaan energian käyttöä sekä parannetaan tuotannon hyötysuhteita. Usein myös pystytään hyödyntämään ilmaisenergianlähteitä, jolloin energian tuottamisesta tulee kustannustehokkaampaa. (Energieollisuus ry 2006, 529.)

Kaukojäähdytys voidaan toteuttaa kaukolämmityksen tapaan keskitettynä tai hajautettuna järjestelmänä. Keskitetyn järjestelmän etuina ovat suuret laitoskoot ja vapaajäähdytyksen hyödyntäminen, mutta heikkoutena ovat suuri putkiverkoston tarve ja suuremmat siirtohäviöt. Hajautetussa järjestelmässä on helpompi toteuttaa rakennuskohtainen, paikallinen jäähdytys, mutta tuotantokustannukset nousevat usein suuremmiksi. (Energieollisuus ry 2006, 529–530.)

Kaukojäähdytysenergia jaetaan kaukolämmön tavoin eristettyjen meno- ja paluuputkien avulla. Kaukojäähdytysjärjestelmässä jakelulämpötila on yleensä 6–12 °C, ja meno- ja paluupuolen lämpötilaero on noin 4–10 °C. Kylmävesi rajoittaa virtausnopeuden 1–2 m/s, ja myös siirrettävä teho on huomattavasti pienempi kuin kaukolämpöjärjestelmissä johtuen pienemmästä lämpötilaerosta. Esimerkiksi halkaisijaltaan DN100 kiinnivaahdotetussa johdossa siirtoteho noin 8 °C:een lämpötilaerolla on noin 370 kW, ja vastaavassa kaukolämpöputkessa, jonka lämpötilaero on 50 °C, siirtoteho on noin 2 900 kW. (Energiateollisuus ry 2006, 541.)

Kuvassa 2 on näkyvissä 2000-luvun kehitys Suomen kaukojäähdytyksessä. (Energiateollisuus ry 2013.)

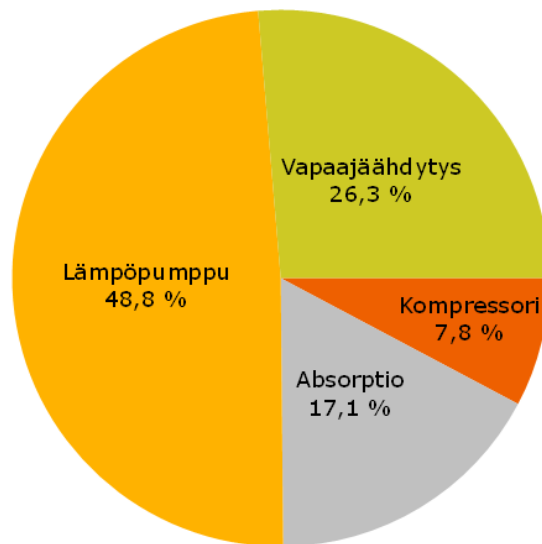


Kuva 2. Kaukojäähdytyksen myynti ja sopimusteho Suomessa 2000-luvulla. (Energiateollisuus ry 2013.)

Suomessa kaukojäähdytystä tuotetaan kahdeksalla paikkakunnalla: Helsingissä, Turussa, Lahdessa, Heinolassa, Lempäälässä, Espoossa, Tampereella ja Porissa. Vuoden 2014 alussa Suomessa olevien kaukojäähdytysasiakkaiden sopimusteho oli hieman yli 200 MW ja myyty energiamäärä noin 170 GWh. (Energiateollisuus ry 2013.)

2.3 Jäähdytyksen tuotantomuodot

Kappaleessa käydään läpi jäähdytysenergian yleisimmät tuotantomuodot. Jäähdytyslaitteiston tarkoitus on siirtää lämpöenergiaa pois jäähdytettävästä kohteesta. Lämpöenergiaa voi siirtää esimerkiksi hyödyntämällä kylmähöyryprosessia tai luonnon matalia lämpötilatasoja. Kuvassa 3 on esitettyä Suomen kaukojäähdytyksen eri tuotantomuotojen prosentuaaliset osuudet. (Energiateollisuus ry 2013.)



Kuva 3. Suomen kaukojäähdytyksen tuotantomuodot. (Energiateollisuus ry 2013.)

Jäähdytysenergiatuotannosta tarkemmin keskitytään vapaajäähdytykseen ja kompressorijäähdytykseen. Lämpöpumppusovellukset käsitellään myös kompressorijäähdyttiminä. Lämpöä tarvitsevia sorptioprosesseja ei käsitellä, koska Koneen Hyvinkään alueella ei ole saatavilla ylimääräistä lämpöä kustannustehokkaasti.

Jäähdytysenergian tuotannon tehokkuutta kuvaa kylmäkerroin, joka määritellään yhtälöllä 1. Kylmäkerrointa nimitetään myös COP-kertoimeksi (coefficient of performance) tai tehokertoimeksi. (Larjola 2012, 9–12.)

$$COP = \frac{\Phi_K}{P} \quad (1)$$

Missä

COP	kylmäkerroin, [-]
Φ_K	lämpövirta kylmäntäpuolelta, [W]
P	sähköteho, [W]

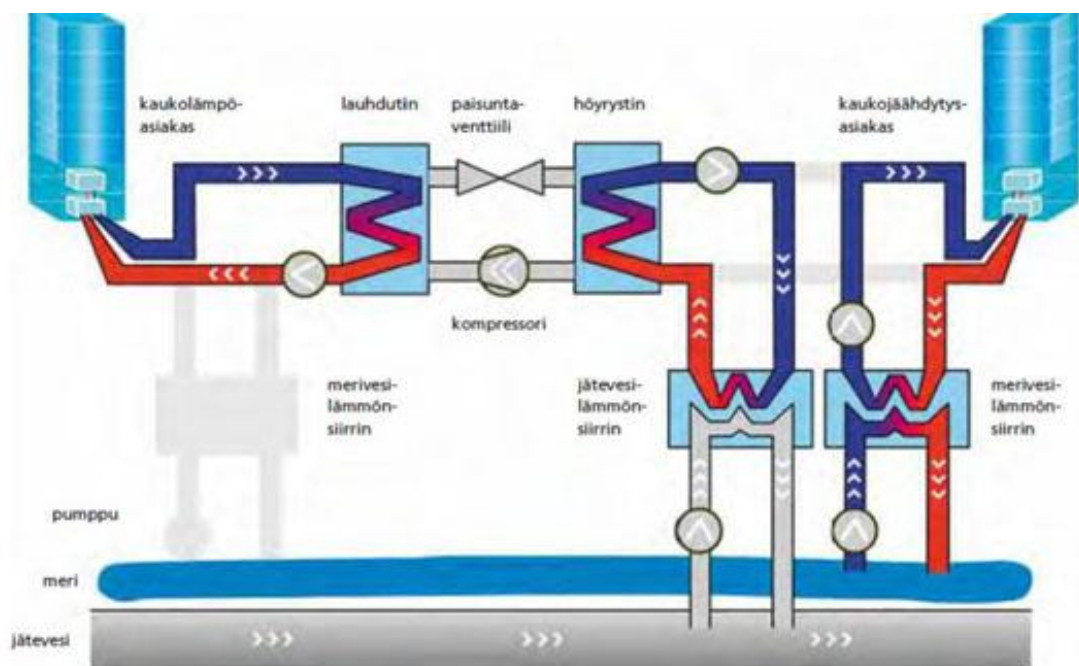
Kylmäkerroin kuvaa saavutettua jäähdytystehoa suhteessa käytettyyn sähkötehoon. Eri tuotantomuodoilla kylmäkertoimet vaihtelet voimakkaasti. Kompressorijäähdyttimillä kerroin on tyypillisesti välillä 2–4, ja vapaajäähdytyksessä jäätä käyttämällä voidaan kylmäkerroin saada jopa arvoon 90. (Energiateollisuus ry 2006, 539; Skogsberg 2005, 8.)

2.3.1 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytyksellä tarkoitetaan luonnon matalien lämpötilojen hyödyntämistä jäähdytyskäyttöön, jolloin energiasäästöt voivat olla huomattavia. Yksinkertaisimmillaan vapaajäähdytys on suoraan viileän ulkoilman käyttämistä tilojen jäähdytykseen. Suomen olosuhteissa vapaajäähdytys soveltuu erinomaisesti ympärivuotiseen jäähdytykseen, sillä ilman lämpötilan pysyvyys on Etelä-Suomessakin yli 60 prosenttia vuodesta alle 10 °C (D5 2007, 68). Kesäaikana yksinkertainen vapaajäähdytys tapahtuu pääasiassa yöjäähdytyksenä. Tällöin yöllä viileää ilmaa johdetaan ilmanvaihdon avulla jäähdytettävään kohteeseen, jolloin tilan lämpötila on normaalia matalampi. Yöjäähdytyksen hyödyntäminen kuitenkin lisää ilmanvaihdon energiankulutusta ja on tehokas vain matalilla lämpötiloilla. Keskikesän korkeilla yölämpötiloilla, eli aikana, jolloin jäähdytyksen tarve on suurimmillaan, ei yöjäähdytys yksistään riitä.

Vesistön kautta tapahtuva vapaajäähdytys tehostuu entisestään. Varsinkin meriveden lämpötila pysyy Suomessa kesäisinkin matalalla, jolloin sitä voidaan tehokkaasti hyödyntää jäähdytykseen. Vapaajäähdytys voidaan myös toteuttaa yhdessä esimerkiksi lämpöpumpun avulla. Tällöin jäähdytyksessä hyödynnetään ympäristön matalia lämpötilatasoja, jota tehostetaan lämpöpumpulla.

Helsingin Energia on hyvä esimerkki yhtiöstä, joka hyödyntää vapaajäähdytystä tuotannossaan. Yhtiö tuottaa kaukojäähdytyksestään noin 20 % merivedellä, joka vastaa noin 20 GWh energiaa (Helsingin Energia 2013). Kuvassa 4 on esitettyä Katri Valan lämpö- ja jäähdytyslaitos. (Iso-Herttua 2011, 11–12.)



Kuva 4. Katri Valan lämpö- ja jäähdytyslaitoksen talviajomalli. (Iso-Herttua 2011, 12.)

Kuvassa on talvikauden ajomalli, jolloin jäähdytys tapahtuu suoraan vapaajäähdytyksenä lämmönvaihtimien läpi kulkevalla merivedellä. Kesällä kaukojäähdytys tehdään pääasiassa lämpöpumpuilla merivedestä, jolloin ylijäämä lämpö hyödynnetään kaukolämpöasiakkaille. (Iso-Herttua 2011, 11–12.)

Lumen ja jään avulla saadaan kaikkein tehokkain vapaajähdytyksen muoto, koska niiden ominaissulamisenergia on suuri. Jähdytysveden lämpötila on lähellä nollaa, jolloin sen viilentävä ominaisuus on suuri. Haittana on kausiluontoisuus, eli lunta ja jäätä pitää varastoida. Varastointi kasvattaa investointikustannuksia sekä vaatii paljon tilaa. Lumi ja jää täytyy myös eristää, jotta ne kestäisivät koko jähdytyskauden. Lumen ja jään varastoinnista kerrotaan tarkemmin kappaleessa 3.

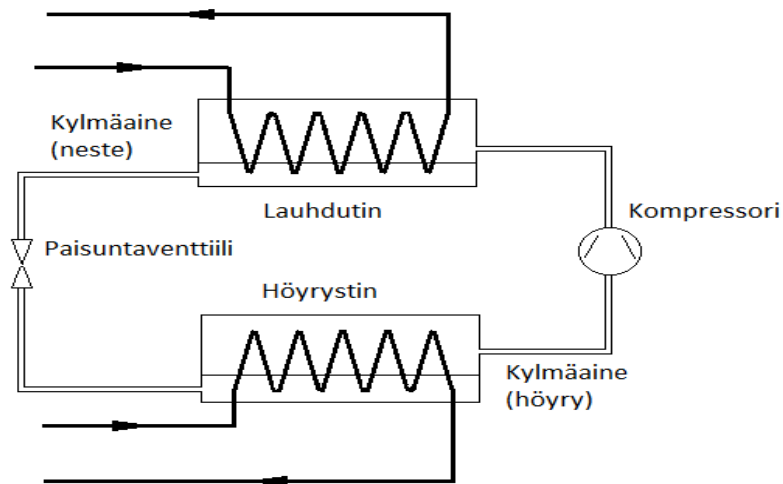
Vapaajähdytyksen suurimpina hyötyinä ovat yleensä suuri kylmäkerroin, halpa energianlähde ja ympäristöystävällisyys. Suuren kylmäkertoimen takaa pieni sähkötehon tarve, jota yleensä tarvitaan vain pumppuihin. Halvalla energianlähteellä tarkoitetaan luonnon tuottamaa kylmää, esimerkiksi merivettä tai lunta. Lisäksi vapaajähdytys aiheuttaa vain vähän päästöjä ympäristöön johtuen pienestä sähkötehosta sekä kylmäaineettomuudestaan.

Vapaajähdytyksen suurimpina haittoina ovat saatavuus, soveltuvuus sekä mahdollisesti suuret investointikustannukset. Tehokkaaseen vapaajähdytyksen hyödyntämiseen tarvitaan matalan lämpötilatason lähteitä. Jotta vesi olisi tehokas jähdyttämään, vesistön tarvitsee olla riittävän suuri, jotta se pysyy riittävän viileänä ympäri vuoden. Lumen ja jään hyödyntäminen jähdytykseen vaatii pohjoisen sijainnin. Vapaajähdytys ei välttämättä sovellu kaikkialle varsinkin, jos jähdytystarve on kesäaikaan. Suuremmat järjestelmät vaativat suuret rakennelmat, jotka ovat todennäköisesti perinteisiä kompressorijähdyttimiä kalliimpia. Rakentamisen lisäksi niiden tilantarve on valtava.

Vapaajähdytyksessä COP-arvo vaihtelee huomattavasti, ja se riippuu paljon hyödynnettävästä kohteesta. Jään avulla voidaan päästä jopa COP-kertoimeen 90. Sundsvallin sairaalan lumijähdytyksessä suurin saatu COP-kerroin on ollut lähes 20. (Snowpower 2014b; Skogsberg 2005, 8.) Vastaavasti vesistöjä ja ulkoilmaa hyödyntävien vapaajähdytysjärjestelmien COP-kertoimet riippuvat voimakkaasti vuodenajasta ja käytettävissä olevista lämpötilatasoista. Talvella jähdytys on tehokasta, mutta kesäisin teho heikkenee.

2.3.2 Kompressorijäähdytys

Kompressorijäähdytys on kylmähöyryprosessi, jossa jäähdytysteho perustuu kiertoaineen höyrystymisen vaatimaan lämpöön. Ne ovat yleensä kiinteistökohtaisia jäähdytyslaitteita, ja niitä käytetään esimerkiksi jääkaapeissa. Kompressorijäähdytyksessä jäähdytettävän tilan lämpö tuodaan höyrystimeen. Höyrystimessä alhaisessa paineessa kulkeva kylmäaine sitoo itseensä lämpöä ja höyrystyy, jolloin jäähdytettävä kohde jäähtyy. Höyrystynyt kylmäaine imetään kompressorilla, joka nostaa kylmäaineen painetta puristuksessa. Kompressorin jälkeen kylmäaine johdetaan lauhtuttimeen, jossa se lauhtuessaan luovuttaa sitomansa lämmön pois. Lauhduttimen jälkeen on paisuntaventtiili, joka säätelee kylmäainesyöttöä sekä ylläpitää paine-eroa matala- ja korkeapuolen välillä. Paisuntaventtiilissä kylmäaineen paine laskee, jolloin kylmäaine muuttuu neste-höyryseokseksi. Samalla sen lämpötila laskee. Kuvassa 5 on esitettynä kompressorijäähdytyksen toimintaperiaate. (Energieollisuus ry 2006, 532.)



Kuva 5. Kompressorijäähdytyksen toimintaperiaate. Muokattu lähteestä Energieollisuus ry (2006, 532.)

Kompressorijäähdytys vaatii toimiakseen kiertoaineen, yleisesti niin sanotun kylmäaineen. Hyvä kiertoaine on myrkytön, palamaton sekä stabiili. Kiertoaineella tulisi olla sopiva höyrystymispiste, joka määräytyy käytettävän kompressorin mukaan. Kemiallisesti stabiili kiertoaine takaa huoltovapaamman toiminnan. Tehokkuuden kannalta kiertoaineella täytyy

olla hyvät lämmönsiirto- ja virtausominaisuudet, jolloin lämpöpinnat ja putkipoikkipinta-
alat pienentyvät. Kiertoaineet merkitään koostumuksen perusteella lasketun
numerotunnuksen mukaan. Yksi esimerkki käytettävästä kiertoaineesta on R134a. (Larjola
2012, 9–12.)

Prosessi voidaan tehdä suorana tai epäsuorana jäähdytyskytkentänä. Suorassa kytkennässä
höyrystin sijaitsee suoraan jäähdytettävässä kohteessa, josta siirtyy lämpöä höyrystyvään
kylmäaineeseen, kuten perinteisessä jääkaapissa. Epäsuorassa, eli välillisessä kytkennässä,
on kaksi erillistä piiriä, primääri- ja sekundääripiiri. Primääripiirissä tuotettu jäähdytysteho
siirtyy höyrystimen kautta sekundääripiirin lämmönsiirtoaineeseen. Sekundääripiiri, eli
jakelupiiri, jakaa jäähdytysenergian jäähdytettäviin kohteisiin. Epäsuorassa kytkennässä on
yleensä huonompi hyötysuhde alhaisemman höyrystymislämpötilan ja siirtohäviöiden
takia, mutta sen avulla voidaan jakaa jäähdytystä suuremmalle alueelle. Suurissa
jakelupiireissä epäsuorakytkentä on välttämätön. (Oinonen & Soimakallio 2001, 29–30.)

Lauhdutin voidaan kytkeä kompressorijäähdytimeen myös suorasti tai epäsuorasti.
Lauhdutustehon määrä on myös suuri, teoreettisesti energiataseen mukaan sähkö- ja
kylmätehon summa. Lämpöpumpusovelluksissa lauhdutusteho käytetään hyväksi,
esimerkiksi siirretään kaukolämpöverkkoon. Aikaisemmin esimerkkinä ollut Katri Valan
lämpö- ja jäähdytyslaitos toimii lämpöpumppperiaatteella silloin, kun vapaata energiaa ei
ole hyödynnettävissä. Esimerkiksi välikausilla kaukojäähdytysasiakkaille tuotetun kylmän
lauhdutusteho siirretään kaukolämpöasiakkaille. Lauhdutuslämmön hyödyntäminen
parantaa oleellisesti järjestelmän kokonaishyötysuhdetta. (Iso-Herttua 2011, 11–12.)

Kompressorijäähdytyksen kompressoreina käytetään pääasiassa viittä eri
kompressorityyppiä. Mäntäkompressorissa on edestakaisin liikkuva mäntä, joka puristaa
kylmäainetta nesteeksi. Se on yleisesti käytössä alle 1,5 MW:n kokoluokissa. Esimerkiksi
pienet mäntäkompressorit toimivat jääkaapeissa. Ruuvikompressorissa männän sijasta
ruuvi puristaa kylmäainetta korkeaan paineeseen hyvällä hyötysuhteella. Myös kokoluokat
kasvavat jo 10 MW:n tehoon asti. Keskipakoiskompressoreissa juoksupyörä työntää
kylmäainetta ulkokehälle, josta se poistuu kohti lauhdutinta. Hyötysuhde on hyvä
pienilläkin kuormilla, tilan tarve pieni ja keskipakoiskompressoreita voidaan rakentaa

teholtaan jopa 25 MW:n kokoiseksi. Lamelli- ja kiertomäntäkompressoreissa mäntä pyörii epäkeskoisesti puristaen kiertoainetta korkeampaan paineeseen. Turbokompressoreissa paineen kasvu tapahtuu juoksupyörällä pumppua vastaavalla tavalla, jolloin kylmäaineen liike-energia kasvaa. Laitteella on suurilla tehoilla korkea hyötysuhde, mutta osateholla turbokompressorin tuotto ja paineen kehitys heikkenevät nopeasti verrattuna muihin kompressorityyppeihin. (Energiateollisuus ry 2006, 532–533.)

Kompressorijäähdyttimien kylmäkertoimet riippuvat pääasiassa lämpötilatasoista sekä kokoluokasta. Kompressorijäähdytyskoneiden COP-kertoimet vaihtelevat 2,5:stä 6:een. Ympärivuotinen COP-kerroin tosin on usein pienempi kuin valmistajan ilmoittama kerroin. Tämä johtuu eri lämpötilatasoista, jotka vaihtelevat laitetta käytettäessä. Kompressorijäähdytyskoneiden jäähdytysveden lämpötila laskee noin 6 °C:seen, joka mahdollistaa tehokkaan käytön rakennuksen jäähdytysjärjestelmissä. Kompressorijäähdytyksen hyviä puolia ovat tunnettu tekniikka, suhteellisen pienet investointikustannukset, helppo toteutettavuus ja mahdollinen yhteistuotanto. Haittana ovat kylmäaineen mahdolliset ympäristöhaitat ja suuremmat käyttökustannukset. (Energiateollisuus ry 2006, 539, 541.)

3 LUMEN VARASTOINTI JA KÄYTETTÄVÄ TEKNIikka

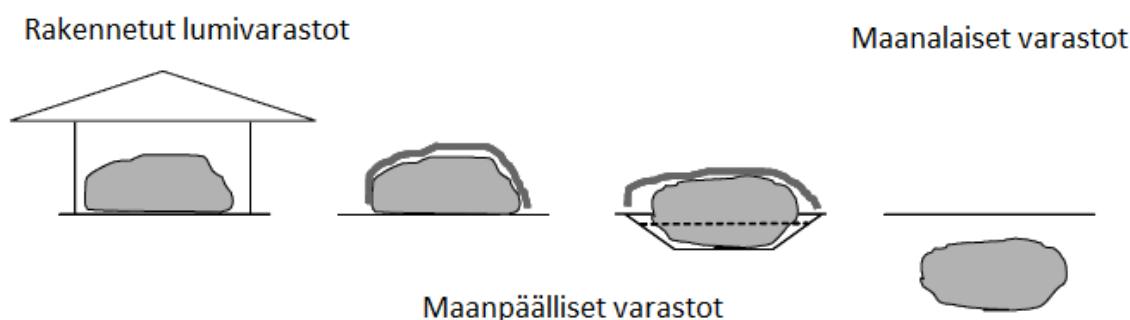
Lumi on jääkiteiden ja ilman muodostamaan kuohkeaa ainetta. Se on uusiutuva luonnonvara, joka sataa maahan kasvettuaan pilvessä riittävän isoiksi hiutaleiksi riittävän matalassa lämpötilassa. Lumen tiheys vaihtelee 100–700 kg/m³ välillä. Veden ominaislämpökapasiteetti on 4,18 kJ/kgK ja vastaavasti jään ominaislämpökapasiteetti on 2,09 kJ/kgK. Jään sulamislämpö vedeksi on noin 333 kJ/kg. Jään sulamislämpötila 0 °C tekee siitä hyvän materiaalin kylmävarastoinnille. Tämä kapasiteetti tarkoittaa, että tarvitaan noin 100 kWh muuttamaan yksi tonni jäätä 0 °C:sta 5 °C:seen vettä. (Nordell & Skogsberg 2000, 1; Skogsberg 2005, 5; Incropera et al 2007, 940.)

Lumijäähdytyksessä tarkoituksena on varastoida lumi talvella ja hyödyntää siitä saatava kylmä sulamisvesi kesällä tilojen jäähdytykseen. Lumen ja jään varastointi on yleistä Japanissa ja Kiinassa, mutta myös Kanada, Yhdysvallat sekä Ruotsi ovat tutkineet aihetta. Japanissa on toteutettu noin 100 projektia ja Kiinassa noin 50–100 projektia vuosina 1970–2000. Ruotsissa Sundsvallin sairaalan jäähdytys tapahtuu lähes kokonaan lumella. Myös Suomessa Helsingin ja Turun kaupungit ovat energiayhtiöidensä kanssa tarkastelleet lumijäähdytyksen toteuttamista maanlasiin kallioluoliin, mutta yhtään järjestelmää ei ole tähän päivään mennessä vielä Suomeen toteutettu. (Yle Helsinki 2012; Yle Turku 2012; Paksoy 2005, 351.)

Lumen ja jään hyödyntäminen jäähdytyksessä on perinteinen tapa. Ennen kompressorijäähdyttimien aikakautta jääkaapit toimivat nimensä mukaisesti jäällä. Talvella järven jäätyessä jäätä sahattiin kesäksi heinien alle säästöön jäätä, jota käytettiin kesällä elintarvikkeiden viilennykseen. (Snowpower 2014c.)

Lumijäähdytysjärjestelmän perusideana on, että kiertoaine, esimerkiksi vesi, kulkeutuu lumen tai jään lävitse samalla jäähtyen. Se voi olla suljettu tai avoin järjestelmä, mutta tärkeää on, että kiertoaine hyödyntää sulamisen latenttilämpöä. Järjestelmän tehoa kontrolloidaan säätämällä kiertoaineen virtausta. Lunta varastoidaan pääasiassa kolmella eri tapaa: rakennetuissa lumivarastoissa, maan päällä avoimissa varastoissa sekä maan alla

olevissa varastoissa. Eri varastotyypeistä on näkyvissä periaatekuva kuvassa 6. (Skogsberg 2005, 5.)



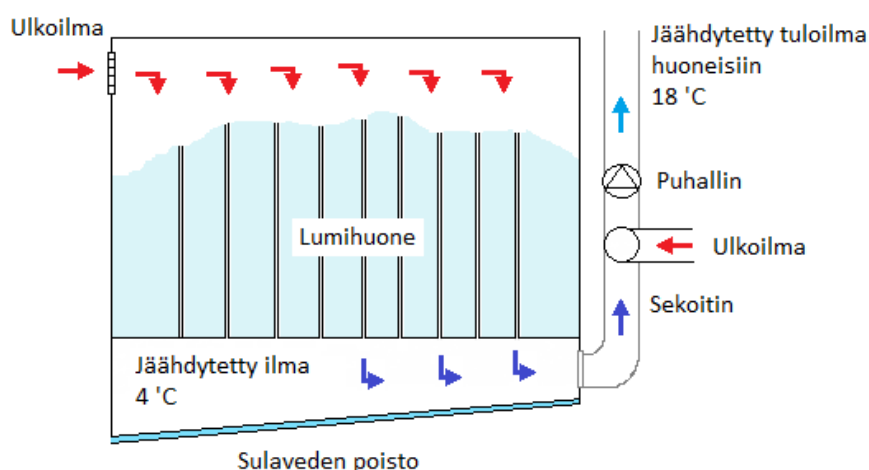
Kuva 6. Lumen varastoinnin eri tyypit. Muokattu lähteestä Skogsberg (2005, 5.)

Lumen käyttämisessä jäädytykseen on merkittäviä hyötyjä. Lumesta hyödynnettävä kylmä sulamisvesi vähentää huomattavasti sähkön kulutusta verrattuna perinteisiin kompressorijäädyttimiin. Lumen kuljetusmatkat saattavat lyhentyä, ja saastunut lumi saadaan puhdistettua suodattimien avulla. Tämän takia myös jäädytyksen ja lumen poiston kasvihuonekaasupäästöt pienentyvät, ja jäädytyksestä tehdään lähes kokonaan uusiutuvaa. (Snowpower 2014a.)

3.1 Rakennetut lumivarastot

Japanissa *Himuro* ja *Yukimoro* ovat perinteisiä jäädytysmenetelmiä. *Himuro* on talossa sijaitseva huone, jossa ruokaa säilytetään yhdessä jään kanssa viileässä. *Yukimorossa* jään sijasta käytetään lunta. Jäädytys tapahtuu luonnollisen konvektion kautta, ja sitä pystytään hieman säätämään erilaisilla sulkimilla, esimerkiksi verhoilla. Näissä järjestelmissä lämpötila on muutaman asteen yli 0 °C, ja ilman suhteellinen kosteus on noin 90–95 prosenttia. Suuri heikkous on, että ilman kosteutta ja lämpötilaa ei voida säätää tarkasti. (Paksoy 2005, 351.)

Japanissa on myös käytössä järjestelmiä, joissa lunta varastoidaan rakennuksen pohjakerrokseen, jonne syntyvän lumihuoneen läpi johdetaan ilmanvaihdon raikasilma. Hokkaidossa sijaitsevan toimistorakennuksen 11 000 m²:n huoneistoala jäähdytetään näin ainakin hetkellisesti. Talven aikana lunta varastoidaan rakennuksen kahden ensimmäisen kerroksen korkuiseen huoneeseen noin 7 000 tonnia, jolloin lunta on tilavuudeltaan noin 15 000 m³. Lumikerrokseen kaivetaan 1 000 pystysuoraa reikää, joiden lävitse ilma kulkeutuu. Lumikerroksen läpi kuljettuaan ilman lämpötila on noin 4 °C. Lopulta lumikerroksen läpi kulkeutunut kylmäilma ja lämmin ulkoilma sekoitetaan keskenään, jolloin huonetiloihin menevän ilman lämpötila säädetään 18 °C:seen. Kuvassa 7 on kuvattu järjestelmän toimintaperiaate. Järjestelmän suurin kylmäteho on 1 000 kW, ja se kattaa noin 90 prosenttia tarvittavasta jäähdytysenergiasta. (Kobiyama 2008, 1–6.)



Kuva 7. Hokkaidon toimistorakennuksen jäähdytys. Muokattu lähteestä Kobiyama (2008, 4.)

Kanadassa on kehitetty kaksi jäähän perustuvaa järjestelmää, *Icebox* ja *Fabrikaglace*. Niissä molemmissa on eristämätön laatikko eristetyn suojan sisällä. Talvella vettä suihkutetaan ohut kerros laatikon päälle, jolloin laatikon pinnalle muodostuu jäätä viileän ilman vaikutuksesta. Hyvissä olosuhteissa on mahdollista yhden talven aikana muodostaa jopa 20 metrin paksuisia jääpaloja. Kesällä kylmän tuottamiseksi sulavesi johdetaan lämmönvaihtimeen ja sieltä takaisin jäähän. Näissä järjestelmissä jäähdytysteho on ollut

8–1 600 kW kylmäkertoimien ollessa noin 90–100. Järjestelmiä ei ole rakennettu yleisesti lähinnä suurten rakennuskustannuksien ja tiedon puuttumisen takia. (Skogsberg 2005, 8.)

3.2 Maanpäälliset lumivarastot

Maan päällä olevat lumivarastot ovat tyypillisesti lumialtaita. Lumialtaat, tai vaihtoehtoisesti jääaltaat, ovat matalia altaita tai syvänteitä, joita käytetään lumen ja jään varastointiin. Altaat ovat vesi- ja lämpöeristettyjä pohjasta estääkseen vesi- ja lämpövuodot ja päältä ne ovat lämpöeristettyjä. Lumi tai jää voidaan tehdä varastoon tai se voidaan kerätä, jolloin sulavasta materiaalista pystytään puhdistamaan epäpuhtaudet suodattimien avulla. (Nordell & Skogsberg 2000, 2.)

Maailmassa on tällä hetkellä muutamia suuria lumialtaita. Ruotsin Sundsvallin lumiallas on rakennettu vuonna 2000. Japanissa New Chitosen lentokentällä on vuonna 2010 käyttöön otettu lumiallas. Sinne voidaan varastoida noin 120 000–240 000 m³ lunta, joka tuottaa noin 5–10 GWh jäähdytysenergiaa. Alue on 100 metriä pitkä ja 200 metriä leveä. Alueelle kasataan 6–12 metriä lunta talvisin sekä keräämällä että tykkimällä. Myös Norjaan Oslon lentokentälle on rakenteilla lumiallas jäähdytyskäyttöön. Maanpäällisistä lumivarastojen tekniikasta kerrotaan tarkemmin Sundsvallin sairaalan lumialtaan mukaisesti. (Nordell 2012, 4; Cowi 2012; JFS 2009.)

3.2.1 Sundsvallin sairaalan lumijäähdytys

Ruotsin rannikkokaupunki Sundsvallin aluesairaalaan kehitettiin Västernorrlandin maakunnan toimesta lumialtaaseen perustuva lumijäähdytyslaitos, jonka tarkoituksena on jäähdyttää sairaalan tiloja sekä suojella laitteistoja ylikuumenemiselta. Ideana oli myös auttaa Sundsvallin kaupungin ongelmaa lumen varastoinnin kanssa sekä tehdä itse sairaalasta omavaraisempi, ympäristöystävällisempi ja energiatehokkaampi. Varasto

täytettiin lumella ensimmäisen kerran talvella 1999–2000 ja ensimmäinen jäähdytyskausi aloitettiin kesäkuussa 2000. (Skogsberg 2005, 11; Landstinget Västernorrland 2011.)

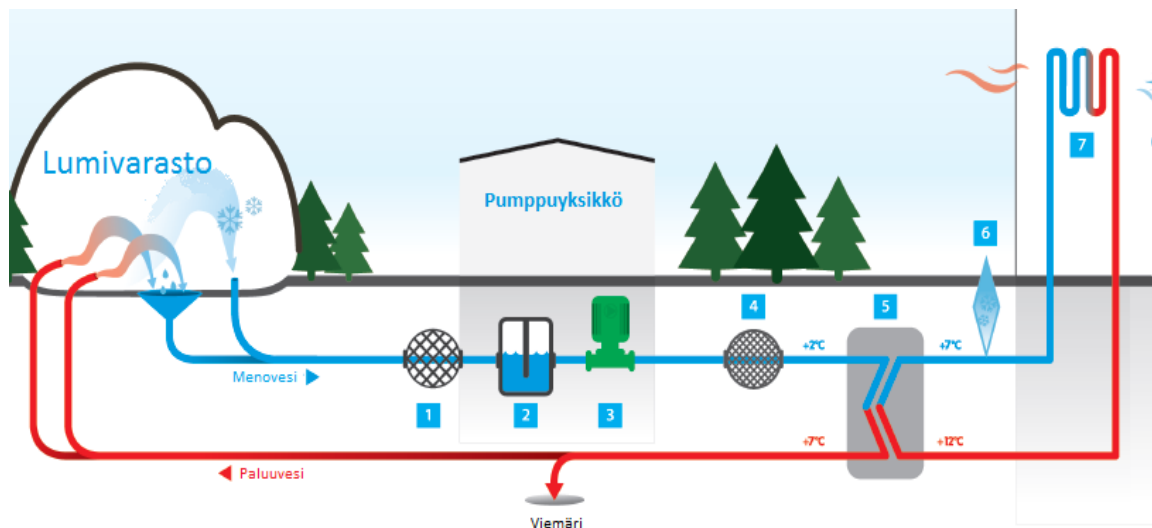
Sundsvallin lumijäähdytystä aloitettiin tutkimaan simulaatioiden ja pienen kenttäkokeen kautta. Kenttäkokeessa 200 m³ lunta varastoitiin 12 metriä pitkälle ja kuusi metriä leveälle alueelle. Sivuilla oli metrin korkuiset puuseinät, joissa oli eristeenä 0,05 metriä paksut polystyreenilevyt. Seinien yläpuolelta lumi eristettiin 0,2 metrin kerroksella sahanpurua, ja sen päällä oli vielä suojapeite. Kokeen tulos oli, että kesän loputtua lumesta oli jäljellä vielä noin 75 %. Lumen luonnollinen sulaminen oli tutkijoille hieman odotettua alhaisempi. (Skogsberg 2005, 11.)

Simulaatioissa tutkittiin tilannetta, jossa tarvittava jäähdytysenergian tarve olisi 1 000 MWh. Lumen luonnollista sulamista mallinnettiin 15 000 m³:n ja 30 000 m³:n lumimäärillä kolmella eri eristemäärällä: ei eristettä ollenkaan (tapaus A) sekä 0,1 metrin (tapaus B) ja 0,2 metrin (tapaus C) sahanpurueristeiden kanssa. Simuloitu lumivarasto oli katkaistun kartion mallinen, ja sen korkeus oli neljä metriä, yläreunan halkaisija 105,6 metriä ja sivujen kaltevuus 26,6 astetta. Lumen tiheytenä käytettiin arvoa 650 kg/m³. Lumen sulamisessa otettiin huomioon pinnan sulaminen, sateesta johtuva sulaminen sekä maanpohjasta aiheutuva sulaminen. Tulosten perusteella tapauksessa A 30 000 m³:n lumikasasta sulaisi pois kesäkuun aikana. Eristettynä lumikasasta oli jäljellä elokuun lopussa tapauksessa B 12 169 m³ ja tapauksessa C 19 040 m³. Prosenttiosuuksina nämä ovat alkuperäisestä lumimäärästä 40,6 % ja 63,5 %. Tapauksessa C pinnan sulamisesta johtuva lumihävikki oli 9 149 m³, maanpohjasta aiheutuva hävikki 1 421 m³ ja sateesta aiheutuva hävikki 390 m³. Pinnan sulamisesta aiheutuva sulaminen oli noin 30,5 % alkuperäisestä lumikasasta. Simulaatioiden pohjalta ehdotettiin syvempää varastoa, jolla pystyttäisiin vähentämään pinnalta tapahtuvaa sulamista. (Skogsberg 2005, 11–12.)

Sundsvalliin rakennettu lumivarasto on tyypiltään matala allas, jonka pituus on 130 metriä, leveys 64 metriä ja syvyys kaksi metriä. Allas on rakennettu varastoimaan 60 000 m³ lunta, jonka massa on noin 40 000 tonnia. Pohjaltaan se on monikerroksinen, joka koostuu vesitiivistä asfaltista, sorasta, eristekerroksesta sekä hiekasta. Se on myös rakennettu hieman kaltevaksi, jotta sulavesi valuu kohti ulosvientejä. Talvella lumivarasto täytetään

Sundsvallin kaupungilta kerätystä lumesta, sekä tarvittaessa lumivarastoon luodaan keinotekoista lunta. Eristeenä lumialtaan päällä käytetään noin 0,2 metrin kerrosta metsähaketta, joka on perinteinen eriste lumelle. Haketta täytyy kuitenkin uusia vuosittain, koska osa siitä mädäntyy, jolloin sen hyvä eristävyys katoaa. (Skogsberg 2005, 12, 16, 24, 27.)

Lumivarastosta saatava kylmä vesi pumpataan ensiöpiirissä suodattimien läpi lämmönsiirtimeen, jossa vesi luovuttaa jäädytysenergiansa lämmönsiirtimien avulla jäädytyskohteen toisiopiiriin. Ensiöpiirin lämmennyt paluuvesi johdetaan takaisin lumivarastoon, jossa se viilenee, kun uusi lumi sulaa. Sundsvallin lumivarastossa on paluueden kierrolle yhteensä 36 läpivientiä, joita ohjataan venttiileillä varaston sivulta. Vastaavasti ulosvientejä on kaksi kappaletta, ja ne sijaitsevat pumppuyksikön läheisyydessä. Kuvassa 8 on näkyvissä Sundsvallin lumijäädytyksen toimintaperiaate. (Skogsberg 2005, 13.)



Kuva 8. Sundsvallin lumijäädytyksen toimintaperiaate. Muokattu lähteestä Landstinget Västernorrland (2011.)

Kuvan 8 kohdassa 1 sulavesi lumivarastosta kulkeutuu karkean hiukkassuodattimen läpi. Tämä varmistaa, ettei metsähake tai sora kulkeudu kierto-putkeen. Kohdassa 2 on öljynerotin, joka puhdistaa mahdolliset saasteet teiltä, josta lumi on kerätty. Öljynerotin

tyhjennetään jokaisen jäähdytyskauden jälkeen. Kohdassa 3 on pumput, joita on Sundsvallissa kaksi kappaletta. Pumppujen maksimi tilavuusvirrat ovat 0,035 m³/s ja 0,050 m³/s. Kohdassa 4 on hienosuodatin, joka talteenottaa jäljellä olevat epäpuhtaudet. Hienosuodatin on itsestään puhdistuva, ja se käyttää hyväksi sen läpi virtaavaa vettä. Kohdassa 5 on lämmönvaihtimet, joita on kaksi kappaletta. Lämmönvaihtimien tehot ovat 1 000 kW ja 2 000 kW. Lämmönvaihtimille tuleva vesi on noin 2 °C:tta. Kaksiasteinen vesi viilentää sairaalalta tulevan, noin 12-asteisen veden noin 7 °C:seen. Kohdassa 6 on varajäähdytin, jonka teho on 800 kW. Jäähdytysjärjestelmä toimii pääasiassa lumella, mutta varajäähdytin hoitaa jäähdytystarpeen silloin, kun lumivarasto ei ole käytössä. Kohdassa 7 on kuvattu itse jäähdytettävä kohde, eli sairaala. (Landstinget Västernorrland 2011; Skogsberg 2005, 13.)

Sundsvallin lumijäähdytyksestä tulleet tulokset ovat olleet vakuuttavia. 2000-luvun alussa lumivarastossa oli parhaimmillaan noin 40 000 m³ lunta, josta keinotekoisien lumen osuus vaihteli 37 %:sta jopa 70 %:iin. Jäähdytyskausi alkoi normaalisti huhti-toukokuussa, ja se kesti tyypillisesti elokuun loppuun asti. 2000-luvun alussa jäähdytystarve oli 655–1 345 MWh. Jäähdytystarpeesta lumijäähdytyksellä on katettu noin 77–93 %. Taulukossa 2 on esitelty kuuden ensimmäisen toimintavuoden tärkeimmät mittausparametrit. (Skogsberg 2005, 16.)

Taulukko 2. Sundsvallin sairaalan lumialtaan tulokset. (Snowpower 2014b.)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Lumen määrä [m³]	18 800	27 400	40 700	36 800	35 400	39 900
Keinotekoisien lumen osuus [%]	49 %	59 %	57 %	38 %	52 %	70 %
Jäähdytyskausi [-]	6.6–29.8	26.3–22.8	25.4–29.8	6.5–17.8	28.4–3.9	22.4–19.9
Tuotettu jäähdytysenergia [MWh]	655,5	1 159,1	1 345,3	1 068,4	870,5	941,9
Lumen osuus jäähdytyksestä [%]	93 %	77 %	84 %	84 %	92 %	92 %
Max jäähdytysteho [kW]	1 366	1 648	2 004	2 034	1 919	1 995
Max lumen jäähdytysteho [kW]	1 366	1 148	1 873	1 508	1 594	1 610
COP, lumi [-]	4,3	11,2	17,2	6,2	5,7	6,1
COP, lumi / COP, kompressori [-]	2,0	3,3	6,6	2,6	2,4	3,1

Taulukon 2 tuloksista huomataan, että lumen osuus tuotetusta jäähdytysenergiasta on ollut huomattava jokaisena vuotena. Vuonna 2002 lumen COP-kerroin oli 17,2, ja sen suhde varajäähdyttimen COP-kertoimeen oli 6,6. Muina vuosina suhde on ollut hieman maltillisempi, mutta kuitenkin jokaisena vuonna lumen COP-kerroin on ollut vähintään kaksi kertaa suurempi kuin perinteisen kompressorijäähdyttimen COP-kerroin.

Sundsvallin sairaalan lumijäähdytyksen kokonaisinvestointi oli noin 1,6 miljoonaa euroa. Projekti toimi myös samalla kokeilu-, tutkimus- ja esittelyhankkeena, jolloin investointia on hankala jakaa normaaliin tapaan. Investointikustannusten on kuitenkin arvioitu jakaantuvan taulukon 3 mukaisesti. (Skogsberg 2005, 21.)

Taulukko 3. Sundsvallin sairaalaan lumialtaan investointikustannukset. (Skogsberg 2005, 21.)

Kustannuserä	[k€]	Osuus [%]
Altaan rakennus	527,5	33 %
Pohjan lämpöeristys	109,9	7 %
Aita + tiekustannukset	76,9	5 %
Pumppuyksikkö	109,9	7 %
Tekniikka	439,6	28 %
Sähköasennukset	109,9	7 %
Valvontajärjestelmä	65,9	4 %
Suunnittelu	153,8	10 %
Yhteensä:	1 593,4	100 %

Investointikustannuksista suurimmat osuudet syntyvät altaan rakennuksesta sekä tekniikan hankkimisesta. Jäähdytysjärjestelmän käyttökustannukset vuosilta 2002–2003 ja 2003–2004 ovat näkyvillä taulukossa 4. Ensimmäiseltä kolmelta vuodelta käyttökustannuksia ei ole saatavilla, mutta niiden on arvioitu laskevan vuosittain. Taulukossa oleva ”Lumen käsittelykustannukset” sisältää lumen tuonnin altaaseen ja keinotekoisien lumen hankinnan. Vuosina 2002–2003 urakoitsija oli vastuussa lumen käsittelystä, jolloin myös tilaajan kustannukset olivat suuremmat. Tuodusta lumesta maksettiin 150 Ruotsin kruunua per kuorma, eli noin 16,5 €/kuorma. ”Jäähdytyksen tuotanto” sisältää jäähdytyskauden aikaiset kulut, pois lukien sähkön ja veden. Jäähdytyskauden jälkeisiin töihin kuuluvat eristeen poisto ja käsittely sekä altaan siivous. (Skogsberg 2005, 21.)

Taulukko 4. Sundsvallin sairaalan lumialtaan käyttökustannukset. (Skogsberg 2005, 22.)

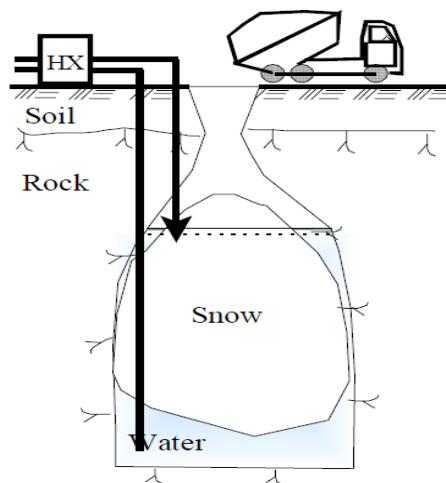
Selite	2002/2003	2003/2004
Keinotekoisien lumen osuus	37 %	52 %
Keinotekoisien lumen määrä [m ³]	13 984	18 408
Lumen käsittelykustannukset [€]	128 565	80 612
Tuotu lumi [€]	-15 493	-10 779
Jäähdytyksen tuotanto [€]	21 952	18 453
Jäähdytyskauden jälkeiset työt [€]	16 224	14 756
Sähkökustannukset [€]	3 906	5 043
Vesikustannukset [€]	3 800	3 679
Käyttökustannukset [€/MWh]	178	140

Lumen käsittelykustannukset sekä sähkökustannukset riippuvat paljon keinotekoisien lumen määrästä. Vesikustannukset ovat säilyneet pieninä, koska alueelle rakennettiin oma kaivo, joka otettiin käyttöön vuonna 2002. Toisaalta oman kaivon käyttö lisää sähkökustannuksia pumppauksen takia. Kunnallinen vesi maksaa alueella noin 5 SEK/m³, eli noin 0,55 €/m³. Vuosien 2004–2005 Käyttökustannusten arvioitiin olevan noin 93 €/MWh, ja vuonna 2005 ennustettiin, että vuoden 2010 käyttökustannukset olisivat enää 55 €/MWh. Myös kannattaa huomioida, että kyseessä on käyttökustannukset eikä tuotantokustannukset. Käyttökustannuksiin ei ole otettu investoinnin osuutta huomioon. (Skogsberg 2005, 22.)

Vuosien myötä varaston kokoa on kasvatettu alkuperäisestä noin 30 000 m³:stä 75 000 m³:iin. Vuonna 2010 lumesta hyödynnettävä jäähdytysenergia oli jo 3 000 MWh ja maksimi jäähdytysteho on ollut 3 000 kW. Samalla sairaalan jäähdytyskuormasta lumen kattama osuus on jo noussut lähelle 100 prosenttia. Vuonna 2006 tuotantokustannukset laskivat jo perinteisten, eli kompressorijäähdyttimien tasolle. Syinä olivat suuremmat lumimäärät, lumivaraston tehokkaampi toiminta ja kasvaneet energianhinnat. Vuonna 2010 tuotantokustannuksia pidettiin jo alemmina kuin kompressorijäähdyttimien. (Nordell 2014, 196, 198.)

3.3 Maanalaiset lumivarastot

Lumen sulamisen ja säilymisen kannalta paras vaihtoehto lumivarastoksi olisi maanalainen lumivarasto. Tällöin ei tarvita erillistä eristystä ja maanpäällinen tilantarve on vähäinen. Maanalainen lumivarasto voidaan rakentaa lähelle jäädytyskohdetta, esimerkiksi kaupungin keskustan alapuolelle. Kuvassa 9 on kuvattu lumen säilyttämistä kalliossa. Kuvan järjestelmässä lumi kipataan varastoon yläpuolelta. Lumen sulamisvesi pumpataan lämmönsiirtimelle (HX), jossa se viilentää toisiopiiriä. Lämmönsiirtimessä lämmennyt sulamisvesi johdetaan takaisin lumivarastoon sulattamaan lisää lunta. (Nordell et al 2007, 6.)



Kuva 9. Maanalainen lumivarasto. (Nordell 2000, 7.)

Vuonna 1999 ruotsalaisessa tutkimuksessa tarkasteltiin edellytyksiä lumen jäädytykseen maanalaisissa lumivarastoissa. Tutkimuksessa varastojen kokoluokat olivat 25 000–150 000 m³, ja lumen tiheys oli 650 kg/m³. Simulaatioiden mukaan lumen luonnollinen sulaminen oli noin 3–6 % ensimmäisinä vuosina ja 1–3 % kymmenentenä vuotena. Taloudellisempaan varastokokona pidettiin 100 000 m³:ä. (Paksoy 2005, 352.)

Kalliovaraston rakentamisen hyödyt ovat sijainti, eristämisen tarpeettomuus sekä vähäinen maanpinnan tarve. Sijainnilla tarkoitetaan mahdollisuutta esimerkiksi louhia kallioon lumivarasto kaupungin alle. Tämän ansiosta lumen kuljetuskustannukset vähenevät ja

jäähdytysenergian siirtomatkat lyhenevät. Suurimpana heikkoutena ovat kalliit rakennustyöt, jotka aiheutuva pääasiassa louhinnasta. Tällä hetkellä maailmassa ei ole todennäköisesti yhtään maanalaista lumivarastoa, jota käytettäisiin jäähdytykseen.

Helsingin kaupunki ja Helsingin Energia tutkivat 2010-luvulla lumen varastoinnin ja sulattamisen kannattavuutta kalliovarastoinnissa. Tarkoituksena oli parantaa katujen kunnossapitoa sekä saada samalla lumelle sulatuspaikka kantakaupunkiin ja hankkia lisää läjitystilaa lumelle. Lumen sulattamiseen olisi käytetty lämmönlähteinä esimerkiksi kaukolämmön paluuvettä tai kaukojäähdytyksen vettä. Helsingin Energian kaukojäähdytyksen mittakaavassa varteenotettavalla lumimäärällä ei olisi kuitenkaan voinut tuottaa kuin murto-osan jäähdytystarpeesta. Järjestelmä ei olisi varsinaisesti ollut jäähdytystuotantomuoto vaan lähinnä hetkellinen apu. Päätelmäksi Helsingin kaupunki ja Helsingin Energia totesivat, että lumen varastointi kallioon osana kaukojäähdytystä ei ole kannattavaa. Kalliovaraston rakentaminen olisi ollut niin kallista, että takaisinmaksuajat olisivat olleet yli 100 vuotta. (Sipilä 2013; Sipilä 2014.)

3.4 Lumen ominaisuudet ja sulaminen

Lumen tiheys vaihtelee huomattavasti käsittelyn, ajankohdan ja sijainnin mukaan. Vastataneen lumen tiheys on noin 100 kg/m^3 , ja lumikasaan pakkautuneen lumen tiheys voi olla jopa 700 kg/m^3 . Tässä tutkimuksessa lumen ajatellaan olevan pakkautunutta, jolloin sen tiheys vaihtelee välillä $600\text{--}700 \text{ kg/m}^3$. Lumen ominaisuuksista puhuttaessa tulee usein esille termi ”vesiarvo”. Se kuvaa vesikerroksen paksuutta, joka syntyy, kun lunta sulatetaan. Yleisesti voidaan käyttää nyrkkisääntöä ”yksi senttimetri lunta vastaa yhtä millimetriä vettä”. (Keskinen 2012, 17–19.)

Lumen luonnollinen sulaminen johtuu lämmönsiirrosta lämpimästä ympäristöstä ja viileään lumeen. Lumivaraston tulee olla riittävän eristetty, jotta lumen luonnollinen sulaminen ei vähennä merkittävästi hyödynnettävää jäähdytystehoa. Lumivarastoissa lumen sulamisen tulisi riippua pitkälti jäähdytysenergian tarpeesta, jota voidaan säädellä

varastoon syötettävän veden määrän mukaan. Lumen luonnollinen sulaminen voidaan karkeasti jakaa kolmeen osaan: lumenpinnan sulamiseen, sateesta johtuvaan sulamiseen sekä maanpinnasta johtuvaan sulamiseen. (Skogsberg 2005, 29.)

Lumenpinnan sulaminen johtuu lämmön siirtymisestä suoraan ilmasta ja auringon säteilyenergiasta. Lumen luonnollisesta sulamisesta lumenpinnalla tapahtuva sulaminen on merkittävien. Jos käytössä on läpäisevä eriste, esimerkiksi sahanpuru, myös kosteuden siirtymisen vaikutus kasvaa. Eristyksen on taattava lumen säilyminen koko jäähdytyskaudella. Siksi se on tärkeä tekijä kesällä, jolloin ilman lämpötila kasvaa merkittävästi. Lämmön johtumista tapahtuu eristekerroksen, esimerkiksi sahanpurun tai varaston seinämän, läpi. Johtumisen suuruuteen vaikuttavat materiaalin lämmönjohtavuus ja tasojen välinen etäisyys. Auringon säteilyä voidaan torjua rakentamalla varasto suojaisaan paikkaan. Sundsvallissa auringon säteilyn vaikutusta tarkasteltiin vertaamalla lumen ja vesisateen määrää poistetun veden määrään vuosina 2002 ja 2004. Niiden erotuksen katsottiin johtuvan ainakin osittain auringon säteilystä. Vuonna 2002 haihtunut jäähdytysenergia vastasi 56,3 %:sesti ja vuonna 2004 13,8 %:sesti kyseisten vuosien auringon maanpinnalle tulevaa säteilyenergiaa. Nämä lukemat vastasivat hyvin aikaisemmin tehtyjä simulaatioita. (Skogsberg 2005, 19, 36–37, 47.)

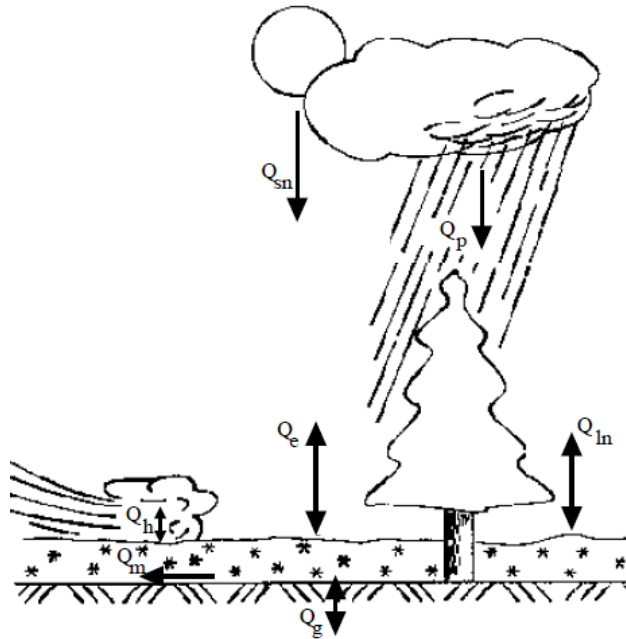
Sateesta johtuva sulaminen riippuu ilman lämpötilasta ja sateen määrästä. Sateen lämpötila mukaillee ilman lämpötilaa. Lumivarastoon tapahtuvasta sateesta johtuva sulaminen on helppo eliminoida rakentamalla varasto suojaan sateelta. Avoimien järjestelmien, eli suoraan ilmaan yhteydessä olevien järjestelmien, eristyksellä on merkittävä rooli sateelta suojaamisen kannalta. Lumikasan ollessa maanpinnan yläpuolella sadevesi saattaa jäädä lumialtaan ulkopuolelle. Sateen haihduttava ominaisuus riippuu pääasiassa sateen kovuudesta ja kestosta. Erittäin kova sade voi vaikuttaa eristekerrokseen. Tämän takia lumenpinnan sulaminen kasvaa. Skogsbergin (2005) mukaan 500 mm:n ja 15 °C:een lämpöinen sade vastaa 8,7 kWh/m²:n lämmön vaikutusta. Toisin sanoen se sulattaisi noin 90 kg jäätä. (Skogsberg 2005, 40.)

Maanpinnasta johtuvan sulamisen aiheuttaa ympäristöstä aiheutuva lämmön johtuminen sekä varaston sulamisveden vuodot. Sundsvallin sairaalan lumijäähdytyksessä arvioidaan

maanpinnasta johtuvan lumensulamisen aiheuttamien lämpöhäviöiden olevan noin 37 MWh kolmen kuukauden jäädytyskauden aikana. Lumimäärässä se vastaa noin 400 tonnia lunta, joka on kaksi prosenttia koko altaan lumimäärästä. Arvioissa käytettiin seuraavia arvoja: altaassa olevan veden lämpötila 4 °C, pohjaveden lämpötila 6 °C, maan lämmönjohtavuus 1 W/m°C ja pohjaveden syvyys 1 metri altaasta. Näillä arvoilla saadaan lämpövuoksi 2 W/m². (Skogsberg 2005, 40–41; Nordell 2000, 8.)

Lumen sulamisesta syntyy luonnollisesti sulamisvettä, joka täytyy huomioida varaston toiminnassa. Kustannusten kannalta sulamisvesi kannattaa pyrkiä kierrättämään mahdollisimman tehokkaasti, jolloin ulkopuolisen veden osuus jää vähäisemmäksi. Sulamisvettä joutuu kuitenkin ajoittain ajaa ulos varastosta, jotta veden pinta säilyisi mahdollisimman vakiona. Liiallinen veden määrä sulattaisi lunta liikaa, ja pakollisesta veden viipymääjasta saattaisi tulla liian pitkä. Veden viipymääajan tarkoituksena on pitää kiertoaineen lämpötila riittävän alhaisena. Energiategokkuuden kannalta ylimääräinen sulamisvesi kannattaa ajaa pois lämmönsiirtimen jälkeen, jolloin sulamisvesi on lämmennyt. (Skogsberg 2005, 16–17, 19.)

Jotta lumijäädytyksestä saadaan toimiva, täytyy luonnollisen sulamisen aiheuttamat tekijät, eli toisin sanoen häviöt, eliminoida mahdollisimman hyvin pois. Tällöin lumen sulaminen tapahtuisi pääasiassa kiertoaineen konvektion kautta. Häviöiden eliminointi myös edesauttaisi lumen säilymistä koko jäädytyskauden yli, jolloin järjestelmästä tulisi mahdollisimman tehokas. Kuvassa 10 on esitetty lumen sulamiseen vaikuttavat tekijät. (Tarbaton & Luce 1996, 42.)



Kuva 10. Lumen sulamiseen vaikuttavat tekijät. Muokattu lähteestä Tarbaton & Luce (1996, 42.)

Kuvassa alaindeksi g tarkoittaa maan pinnasta johtuvaa lämpöä, sn auringon säteilyä, ln pitkäaaltoista säteilyä, p sateen mukana tulevaa lämpöä, h tuntuvaa lämpöä eli ilmasta ja tuulesta aiheutuvaa sulamista, e sublimoitumisesta ja tiivistymisestä johtuva lämpöhäviö ja m sulamisveden mukana kulkeutuvaa lämpöä. Näistä suureista sulamisveden avulla hyödynnetään lumivaraston kylmäenergia. (Tarbaton & Luce 1996, 42.)

Skogsberg ja Nordel (2001) mallinsivat lumen sulamista matalassa lumialtaassa, jossa eristeenä käytettiin 0,2 metrin paksuista sahanpurukerrosta. Simulaatioiden mukaan lumen luonnollisesta sulamisesta 83 % johtui lumen pinnan sulamisesta sekä 13 % maanpinnasta ja 4 % sateesta johtuvasta sulamisesta. Simulaatioiden ja myös käyttökokemuksien mukaan erityisesti lumen pinnan sulamiseen kannattaa keskittyä. (Skogsberg & Nordel 2001, 69; Skogsberg 2014.)

3.5 Lumijäähdetyksen energiatase

Lumivarastoa käsitellään tässä tutkimuksessa avoimena systeeminä, jossa taserajan yli siirtyy ainetta ja energiaa. Termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energia muuttaa muotoaan, mutta sitä ei synny eikä häviä. Energiatase määritellään yhtälön 2 mukaan. (LUT teknillinen termodynamiikka 2014.)

$$E_{\text{sisään}} - E_{\text{ulos}} = \frac{dE}{dt} \quad (2)$$

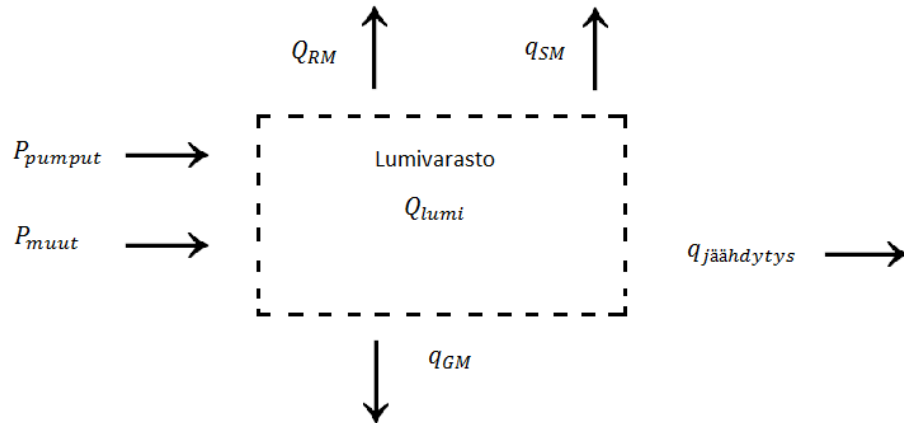
Missä

$E_{\text{sisään}}$ sisääntulevat energiavirrat, [J/s]

E_{ulos} poistuvat energiavirrat, [J/s]

$\frac{dE}{dt}$ systeemin energian muutosnopeus, [J/s]

Lumivaraston energiatasetta määritellään ottamalla huomioon kuvassa 10 näkyvät sulamiseen liittyvät lämpövirrat, määrittelemällä lumen sulamiseen tarvittava energia, eli lumen energia, sekä tarvittava tai kulutettu jäähditysenergia. Lumen luonnollinen sulamisen katsotaan johtuvan pinnan sulamisesta, pohjan sulamisesta sekä sateen vaikutuksesta. Itse lumivarastoa pidetään energianieluna, jolla on tietty energiakapasiteetti, eli lumen sulamiseen tarvittava energia. Näiden lisäksi systeemiin, esimerkiksi pumppuihin, tuodaan sähköenergiaa. Kuvassa 11 on esitettyä lumijäähdytysjärjestelmän energiatasepiirros.



Kuva 11. Lumivaraston energiatasepiirustus.

Lumivarastoon kerättävän lumen sisältämä energia, eli lumen sulamiseen tarvittava energia, voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä 3. Kuvassa se on määritelty varaston kesäaikaiseksi sisältämäksi energiaksi, mutta se on varsinaisesti sisääntuleva energiavirta talven aikana.

$$Q_{\text{lumi}} = sm + mc_p\Delta T \quad (3)$$

Missä

s	lumen sulamisenergia, [kJ/kg]
m	varastoidun lumen massa, [kg]
c_p	ominaislämpökapasiteetti, [J/kgK]
ΔT	lämpötilaero, [K]

Sateen mukana varastoon tuleva ja lunta sulattava lämpöenergia Q_{rm} määritetään samoin kuin lumen sisältämä energia ilman sulamista. Pohjan ja seinämien kautta varastoon tulee

tietty määrä lämpöä johtumalla. Tämä lämpö sulattaa lunta. Tämä lämpövirta q_{GM} määritetään yhtälöllä.

$$q_{GM} = UA(T_s - T_u) \quad (4)$$

Missä

U	rakennusosan lämmönläpäisykerroin, [W/m ² K]
A	seinän ala, [m ²]
T_s	sisäilman lämpötila, lämmityksen asetusarvo, [°C, K]
T_u	kuukauden keskimääräinen ulkoilman lämpötila, [°C, K]

Pinnan kautta tapahtuva sulaminen, eli lämpövirta q_{SM} , jakautuu johtumiseen, konduktioon ja säteilyyn, joiden myötä jäädytysenergiaa poistuu varastosta häviöinä. Johtumista tapahtuu esimerkiksi käytettävän eristeen läpi, ja se lasketaan edellisellä yhtälöllä 4. Konvektio, eli lämmönsiirto väliaineen ja pinnan välillä, voidaan laskea yhtälöllä.

$$q_{konv} = hA(T - T_\infty) \quad (5)$$

Missä

h	konvektiolämmönsiirtokerroin, [W/m ² K]
T_∞	ympäristön lämpötila, [°C, K]
T	kappaleen lämpötila, [°C, K]

Säteilystä johtuva lämmönsiirto lasketaan yhtälöllä.

$$q''_{\text{säteily}} = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_{\text{pinta}}^4) \quad (6)$$

Missä

σ Stefan-Boltzmannin vakio, [W/m²K⁴]

ε pinnan emissiviteetti, [-]

Jäähdytysteho $q_{\text{jäähdytys}}$ on varastosta poistuva energiavirta, joka hyödynnetään tilojen jäähdyttämiseen. Se voidaan määrittää lämpövirran yhtälöllä.

$$q = q_m c_p (T_m - T_p) = q_v \rho c_p (T_m - T_p) \quad (7)$$

Missä

q_m massavirta, [kg/s]

T_m menopuolen lämpötila, [°C, K]

T_p paluupuolen lämpötila, [°C, K]

q_v tilavuusvirta, [m³/s]

ρ pumpattavan nesteen tiheys, [kg/m³]

Kertomalla jäähdytystehon käyttöajalla saadaan selville käytetty jäähdytysenergia. Pumppuja käytetään kiertoaineen siirtämiseen, ja niiden mukana varastoon tulee energiaa. Pumppujen sähköteho voidaan laskea yhtälöllä.

$$P = \frac{q_v \Delta p}{\eta} = \frac{q_v \rho g h}{\eta} = \frac{q_m g h}{\eta} \quad (8)$$

Missä

Δp	paine-ero, [Pa]
η	hyötysuhde, [-]
g	maan vetovoiman kiihtyvyys, [m/s ²]
h	nostokorkeus, [m]

Myös muiden sähkölaitteiden takia varastoon tuodaan energiaa. Muita sähkölaitteita ovat esimerkiksi järjestelmään tarvittavien tilojen valaistus ja tietokoneet.

3.5.1 Sundsvallin energiatase

Sundsvallin energiataseen määrittelyyn käytetään apuna sen alkuvuosien tuloksia, jotka ovat näkyvissä taulukossa 5. Lumen tiheys on määritelty vuosina 2002 ja 2003 tehtyjen mittausten perusteella. Muille vuosille tiheys merkittiin mittausten keskiarvoksi.

Taulukko 5. Sundsvallin sairaalan energiataseen määrittämiseen käytetyt arvot. (Snowpower 2014b.)

		2000	2001	2002	2003	2004	2005
Jäähdytyskauden pituus [h]		2 016	3 600	3 048	2 496	3 096	3 624
Lumen määrä [m³]		18 800	27 400	40 700	36 800	35 400	39 900
Lumen tiheys [kg/m³]		650	650	664	637	650	650
Lumen massa [t]		12 220	17 810	27 025	23 442	23 010	25 935
Lumen sulamiseen tarvittava energia [MWh]		1 130,4	1 647,4	2 499,8	2 168,3	2 128,4	2 399,0
Veden lämpiämiseen tarvittava energia [MWh]		57,0	83,1	126,1	109,4	107,4	121,0
Lumen energia [MWh]		1 187,4	1 730,5	2 625,9	2 277,7	2 235,8	2 520,0
Lumella tuotettu jäähdytysenergia	[MWh]	609,6	892,5	1130,1	897,5	800,9	866,5
	[%]	51,3 %	51,6 %	43,0 %	39,4 %	35,8 %	34,4 %
Kokonaishäviöt	[MWh]	577,8	838,0	1 495,9	1 380,3	1 434,9	1 653,5
	[%]	48,7 %	48,4 %	57,0 %	60,6 %	64,2 %	65,6 %

Prosenttiosuudet lumella tuotetusta jäähdytysenergiasta ja kokonaishäviöenergiasta on laskettu lumen sulattamiseen tarvittavasta energiasta, eli toisin sanoen energianielun sisältämästä energiasta. Taulukossa kokonaishäviöihin kuuluvat muun muassa luonnollinen sulaminen, jäähdytyskauden loputtua varastoon jäänyt lumi sekä sulamisveden purut.

Lumen määrän kasvaessa luonnollisesti myös lumen energiasisältö ja häviöt kasvavat. Lumivarasto on altis häviöenergioille, joten varaston koon kasvaessa myös sulaminen ympäristön vaikutuksesta kasvaa. Lumella tuotetun jäähdytysenergian prosenttiosuus saattaa luoda väärän kuvan, mutta sen pieneminen johtuu lumen määrän kasvamisen vaikutuksesta lumen sulamiseen ympäristöön. Prosenttiosuuksista voidaan nähdä yhteys jäähdytyskauden pituuteen ja lumen määrään. Esimerkiksi vuonna 2002 ja 2005 lumen määrät olivat lähes yhtä suuret, mutta vuonna 2005 jäähdytyskausi on lähes 600 tuntia, eli noin 25 päivää pidempi, jolloin lunta sulaa luonnollisesti kauemmin. Vastaavasti vuonna 2001 ja 2005 jäähdytyskaudet olivat lähes yhtä pitkät, mutta lumimäärässä on yli 10 000 m³:n ero, jolloin vuoden 2005 kokonaishäviöt ovat suuremmat. Toki tämä tarkastelu ei ole yksiselitteinen, mutta suuntaa antava.

Vuonna 2002 kesä- ja heinäkuussa mitattiin keskimääräisiä arvoja lumella tuotettuun jäähdytystehoon, veden tilavuusvirtaan sekä lämpötiloihin ennen lämmönsiirintä ja lämpötilan nousuun lämmönsiirtimessä. Kyseisen ajankohdan keskimääräinen jäähdytysteho oli 453,4 kW, tilavuusvirta 2 567,7 m³/d, eli noin 0,0297 m³/s, lämpötila ennen lämmönsiirintä, eli menoveden lämpötila, 3,3 °C ja lämpötilan nousu lämmönsiirtimessä 3,6 °C. Näin lumivaraston veden paluulämpötilaksi saadaan 6,9 °C. Kyseisten mittauksien mittapaikkana oli lämmönsiirrin. (Skogsberg 2005, 18.)

Vuosina 2002 ja 2004 mitattiin lumen ja veden massan sekä sulamisveden lämmönsiirtimen jälkeisen purkamisen massan erotusta. Tämän erotuksen oletettiin johtuvan varaston lopputyhjennyksestä, lumen haihtumisesta ilmaan sekä suodattimien huuhteluun kuluvaksi vedeksi. Vuonna 2002 lumen ja kesän aikana sataneen veden massa oli 28 637 tonnia ja purettu vesimäärä 25 082 tonnia. Näiden erotukseksi saadaan 3 555 tonnia. Tämän määrän sulamiseen ja lopulta lämpenemiseen samaan lämpötilaan kuin menovesi tarvitaan energiaa noin 342,5 MWh. Varaston lumimäärään verrattuna

jäähdytyskauden aikana satoi noin 1 612 tonnia vettä. Skogsbergin (2005) mukaan vesisateen lämpötila mukaillee ulkoilman lämpötilaa. Sundsvallissa vuonna 2002 ilman keskilämpötila oli noin 18,5 °C. Tällöin sateen aiheuttama sulattamislämpö olisi noin 34,8 MWh. (Skogsberg 2005, 19–20, 40.)

Luonnolliseen sulamiseen kuuluva energia pyritään arvioimaan Sundsvallin energiataseessa Skogsbergin ja Nordelin (2001) tekemien simulaatioiden mukaan. Simulaatioissa pinnan sulamiseen kului 30,50 %, pohjasta aiheutuvaan sulamiseen 4,74 % ja sateesta aiheutuvaan sulamiseen 1,30 % koko lumen energiamäärästä. Taulukkoon 6 on merkitty lumen sulamisen aiheuttavat eri energiavirrat Sundsvallin sairaalan lumijäähdytyksessä vuosina 2000–2005. Jokaiselle vuodelle ei ole saatavilla kaikkia arvoja, mutta ne on pyritty arvioimaan edellisten vuosien ja säätilastojen perusteella. (Skogsberg & Nordel 2001, 69.)

Taulukko 6. Sundsvallin lumen sulamisen energiavirtojen (MWh) jakaantuminen.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Q_{lumi} [MWh]	1 187,4	1 730,5	2 625,9	2 277,7	2 235,8	2 520,0
$Q_{\text{jäähdytys}}$ [MWh]	609,6	892,5	1 130,1	897,5	800,9	866,5
Q_{SM} [MWh]	332,5	519,2	1 050,4	797,2	760,2	957,6
Q_{GM} [MWh]	59,4	84,8	126,0	107,1	102,8	113,4
Q_{RM} [MWh]	39,2	47,4	42,5	37,2	36,3	40,7
$Q_{\text{häviöt}}$ [MWh]	146,7	186,7	276,9	438,8	535,6	541,8

Taulukkoa varten ainoat mitatut arvot olivat lumen määrä ja lumella tuotettu jäähdytysenergia. Lumen määrän avulla saadaan selville lumen sulamiseen tarvittava energia, kun tiedetään menoveden lämpötila. Sateesta johtuva sulaminen on laskettu ilman lämpötilan ja sademäärien avulla (Skogsberg 2005, 20). Pinnan sulaminen ja maan pinnasta johtuva sulaminen on arvioitu aiemmin esitettyjen simulaatioiden pohjalta. Pinnan sulamisessa on otettu huomioon lumimäärä ja lämpötilat, joiden kasvaessa myös oletetaan pinnan sulamisenkin kasvavan. Prosenttiosuiksina käytettiin arvoja 28–40 %, kun simulaatioiden mukaan 30 000 m³:n lumivarastolle prosenttiosuus olisi 30,5 % lumen sulamisesta. Pohjan kautta tapahtuvan sulamisen arvioitiin laskevan tasaisesti noin 5 %:sta 4,5 %:iin, koska maanpinta varaa itseensä kylmyyttä vuosittain enemmän ja enemmän.

Häviöt ovat edellä mainittujen arvojen erotus. Taulukossa 7 on esitetty luvut prosenttiosuuksina.

Taulukko 7. Sundsvallin lumen sulamisen energiavirtojen jakaantuminen prosenttiosuuksina.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Q_{lumi} [%]	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %	100,00 %
$Q_{\text{jäähditys}}$ [%]	51,34 %	51,57 %	43,03 %	39,40 %	35,82 %	34,39 %
Q_{SM} [%]	28,00 %	30,00 %	40,00 %	35,00 %	34,00 %	38,00 %
Q_{GM} [%]	5,00 %	4,90 %	4,80 %	4,70 %	4,60 %	4,50 %
Q_{RM} [%]	3,30 %	2,74 %	1,62 %	1,63 %	1,62 %	1,61 %
$Q_{\text{häviöt}}$ [%]	12,36 %	10,79 %	10,55 %	19,26 %	23,96 %	21,50 %

Taulukosta huomataan, että alkuvuosina muut häviöenergiavirrat olivat noin 10 %:ssa, kun loppuvuosina osuus oli kasvanut noin 20 %:iin. Yksi selitys voi olla varastoon jäävän lumen määrä, jota ei ole tilastoitu. Myös luonnollisen sulamisen prosenttiosuudet todellisuudessa voisivat olla merkittävästi erilaiset kuin simulaatioissa. Taulukkojen perusteella voidaan karkeasti arvioida, että Sundsvallissa noin 25 000 m³:llä ja siitä pienemmällä lumimäärillä pystytään lumesta hyödyntämään noin 50 %.

3.6 Käytettävä tekniikka

Tärkeimmät komponentit lumijäähdytysjärjestelmässä ovat varasto rakennusmateriaaleineen, siirtoputket, lämmönsiirtimet, pumput, suodattimet ja varajäähdytin. Yleisesti ottaen lumivarastolla ei ole rajoitusta tehon suhteen, koska kiertoaine kulkeutuu lumen läpi samalla suhteella kuin jäähdytyskohdetta jäähdytetään. Tämän perusteella siirtoputkien, pumppujen ja lämmönsiirtimien kapasiteetti määrittelee varaston tehon. (Skogsberg 2005, 48.)

Lumijäähdytyksessä varaston muoto ja rakenne ovat tärkeitä tekijöitä järjestelmän toimivuuden kannalta. Hyvällä lämpöeristyksellä pystytään vähentämään lumen sulamista ympäristöön, jolloin lunta pystytään hyödyntämään enemmän jäähdyttämiseen. Lumijäähdytyksen luonteen takia varaston täytyy olla suurikokoinen, jotta lumesta

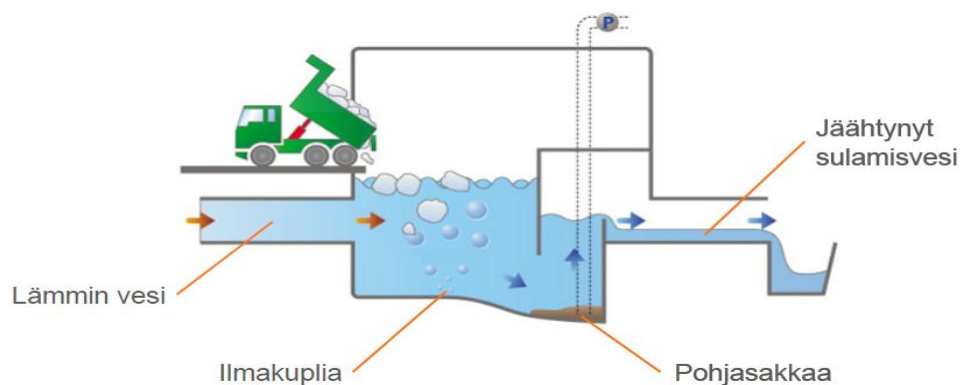
saataisiin konkreettista hyötyä jäähdytykseen. Suuren koon takia varastosta tulee usein suurin yksittäinen kustannuserä järjestelmää tehtäessä. Myös varaston tyyppi vaikuttaa merkittävästi kustannuksiin: allasmallisen varaston rakentaminen on todennäköisesti halvempaa kuin kokonaan uuden rakennuksen tekeminen. Allasmalleissa säästetään rakennuskustannuksissa, kun varaston päällismäisenä eristeenä käytetään haketta, mutta vuosittaiset käyttökustannukset suurenevat. Varastoa suunniteltaessa on myös hyvä miettiä luonnon omien rakenteiden, kuten kallion, hyödyntämistä. Käyttämällä kalliota ei usein tarvita erillistä eristystä, jolloin voidaan säästää kustannuksissa. Toisaalta kallio joudutaan usein louhimaan, ja louhinta taas on suuri menoerä. Sundsvallin sairaalan lumijäähdytyksessä varasto on tyypiltään matala allas. Varastotyypin etuina on varmasti yksinkertainen rakenne, mutta haasteita tuovat lämpöhäviöt varaston päältä sekä suuri tilan tarve. (Skogsberg 2005, 12.)

Lumivarastoissa energian siirtämisen periaatteet ovat samanlaisia kuin esimerkiksi kaukolämpö ja -kylmäjärjestelmissä. Jäähdytysputkien putkityypeiksi ja -materiaaleiksi on monia eri vaihtoehtoja, esimerkiksi teräs, muovi tai lasikuitu. Putket on hyvä eristää estääkseen ylimääräiset lämpövuodot, mutta maan ja putken pienestä lämpötilaerosta johtuen eristepaksuus voi olla pienempi kuin kaukolämpöjärjestelmässä. Paluujohdossa eristettä ei välttämättä tarvitse ollenkaan. Maan alle rakennetut putket ovat usein kiinnivaahdotettua kaukolämpöjohtoa. Suoraan ulkoilmassa oleva putki täytyy suojata kosteudelta. Maanalaisiin tiloihin voi käyttää maakaasuputkea, eli eristämätöntä teräsputkea, jonka pinnassa on ohut muovikerros. (Energiateollisuus ry 2006, 541; Suomen Kaukolämpö ry 2004, 9.)

Putkistojen mitoitus eroaa merkittävästi kaukolämpöjärjestelmistä huomattavasti pienemmän lämpötilaeron takia. Tämän takia suurille jäähdytystehoille tarvitaan myös halkaisijaltaan suuret putket. Kustannuksiltaan lumivarastoon käytettävät jäähdytysenergian siirtoputket vastaavat kaukolämmitysverkoston kustannuksia. Myös jäähdytysputkien rakentaminen on nopeampaa, koska putkia ei tarvitse esilämmittää. Lopullinen mitoitus riippuu tarvittavasta jäähdytystehosta ja lumivaraston tyypistä. Jäähdytystehon ja lumivarastotyypin perusteella voidaan määrittää veden tarvittavat

lämpötilat ja näin ollen putkien tehonsiirtokapasiteetti. (Suomen Kaukolämpö ry 2004, 8–9; Energiateollisuus ry 2006, 198.)

Suodattimien tarkoitus on puhdistaa lumi epäpuhtauksista, kuten sorasta, öljystä ja hiekasta. Suurimmat haasteet tulevat todennäköisesti hiekoitushiekasta, jota kulkeutuu kerättävään lumen mukana lumivarastoon. Öljysuodattimen avulla lumivarastosta saadaan entistä ympäristöystävällisempi, kun muuten luontoon sulavan lumen mukana kulkeutuva öljy pystyttäisiin keräämään talteen. Lumivaraston järkevällä suunnittelulla, esimerkiksi hyödyntämällä lumensulatuslaitosten suunnittelua, kuten kuvassa 12 näkyy, voidaan vähentää hiekan erottamisen tarvetta.



Kuva 12. Lumensulatuslaitoksen toimintaperiaate. (Nurmi 2013, 29.)

Kuvan osoittamalla tavalla hiekka, eli pohjasakka, jäisi varaston pohjalle, jolloin sen voisi kerätä kaivureilla jäähdytyskauden päätyttyä. Tämän jälkeen asennettaisiin vielä erilliset hiekanerottimet, jotka voidaan tarvittaessa tyhjentää myös kesken jäähdytyskauden. Hiekanerottimien jälkeen ovat öljynerottimet, jotka myös voidaan tarvittaessa tyhjentää kesken jäähdytyskauden. Ennen lämmönvaihdinta täytyy vielä olla hienosuodatin, jolla estetään lämmönvaihtimen ylimääräinen likaantuminen ja varmistetaan sen toimiminen hyvällä hyötysuhteella.

Pumput siirtävät kiertoaineena usein toimivan veden lumivarastosta eteenpäin kohti lämmönsiirtimiä. Järjestelmässä voi olla myös apupumppuja esimerkiksi syöttämään

paluuvettä lämmönsiirtimestä varaston sisääntuloventtiileille. Pumpputyypinä voidaan käyttää samoja pumppuja kuin kaukojäähdytysjärjestelmissä, eli keskipakopumppuja. Pumpputyyppejä ja käytettäviä materiaaleja voi hieman rajoittaa kiertoaineen mukana kulkeutuvat pienet epäpuhtaudet. (Energiateollisuus ry 2006, 169–172.)

Pumppujen mitoitukseen vaikuttavat painehäviöt niin verkostossa kuin päätelaitteissakin, ja ne yleensä mitoitetaan lämmönsiirtimen toiminta-arvojen mukaisille virtaamille. Putkivirtauksen painehäviöihin vaikuttavat tiheys, virtausnopeus, kitkakerroin, putken pituus ja halkaisija sekä kertavastusten summa. Kitkakerroin määritellään sisäpinnan karheuselementin ja Reynoldsin luvun avulla. Kertavastukset syntyvät putkilinjan mutkista ja kulmista. Putkivirtauksen painehäviöt määritetään yhtälöllä. (Backman 2012, 2.)

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2 \left(f \frac{L}{d} + \sum K \right) \quad (9)$$

Missä

v	virtausnopeus, [m/s]
f	kitkakerroin, [-]
L	putken pituus, [m]
d	putken halkaisija, [m]
$\sum K$	kertavastusten summa, [-]

Kytkenätyypeillä voidaan vaikuttaa järjestelmän tehokkaaseen toimivuuteen. Rinnankytkentä mahdollistaa suuret säätömahdollisuudet sekä luotettavan toiminnan. Rinnankytkentä sopii hyvin järjestelmään, jossa on vaihtelevat jäähdytystehot sekä lyhyet siirtomatkat. Sarjakytkennän avulla pumpun tuottaman nostokorkeuden säätömahdollisuudet ovat suuret. Sarjakytkentää kannattaa käyttää silloin, kun

jäähdytyksen siirto on pitkä, jolloin se sopii hyvin välipumppaamoihin. (Energiateollisuus ry 2006, 79, 173–174.)

Lämmönsiirtimillä siirretään jäähdytysenergia rakennuksen omaan jäähdytyspiiriin. Tämä aiheuttaa hieman häviöitä, mutta näin varmistetaan jäähdytettävän rakennuksen jäähdytyspiirin laitteiden käytettävyys, kun siellä kiertää puhdas kiertoine. Lämmönsiirtimille rajoituksia aiheuttaa epäpuhtauksia sisältävä vesi, joka likaannuttaa lämmönsiirintä ja heikentää sen käyttöä.

Jäähdytysjärjestelmissä lämmönsiirtimen on pyrittävä erityisen tehokkaaseen lämmönsiirtoon, koska jäähdytysjärjestelmässä lämpötilaero on pieni. Lämmönsiirintyyppinä käytetään usein levylämmönsiirintä, koska virtaukset ovat suuret. Materiaaleina suositetaan ruostumatonta terästä, haponkestävää terästä ja kuparia. Lämmönsiirtimen lämpöteho lasketaan yhtälön avulla. (Energiateollisuus ry 2006, 71, 546.)

$$\Phi = k_1 A_1 T_{\log} = q_m c_p (T_m - T_p) \quad (10)$$

Missä

k_1 siirtimen lämmönsiirtoluku, [W/m²K]

T_{\log} logaritminen lämpötilaero, [K]

Varajäähdyttimen tarkoitus on tuottaa jäähdytysenergiaa, kun lunta ei ole saatavilla. Jäähdyttimeltä odotetaan käyttövarmuutta, luotettavuutta, pitkäikäisyyttä sekä investoinniltaan halpaa ratkaisua. Käyttökustannuksiltaan varajäähdytys voi olla hieman pääjäähdytysjärjestelmää kalliimpi, jonka perusteella perinteinen kompressorijäähdytys on yleisesti ottaen paras ja käyttökelpoisin vaihtoehto. Varajäähdyttimen koko riippuu jäähdytettävien tilojen jäähdytystarpeesta. Mitoitus ja muut tarvittavat laskelmat voidaan tehdä, kun muut komponentit ovat mitoitettu.

4 CASE: KONE OYJ

Kone Oyj on suomalainen, yksi maailman johtavia hissejä, liukuportaita sekä automaattioivia valmistava, kehittävä ja huoltava yritys. Yritys toimii noin 50 maassa yli 1 000 toimipisteessä. Tuotantoalueita on seitsemän ja globaaleja tutkimus- ja tuotekehityskeskuska kahdeksan. Ne sijaitsevat päämarkkina-alueilla Euroopassa, Yhdysvalloissa, Kiinassa ja Intiassa. Keskeisiä asiakkaita ovat rakennusurakoitsijat, rakennusten omistajat, kiinteistönhallintayhtiöt ja kiinteistöjen kehittämiseen keskittyvät toimijat. Maailmanlaajuisesti asiakkaita on satojatuhansia, joista suurin osa on kunnossapidon asiakkaita. Vuonna 2013 Koneen liikevaihto oli 6,9 miljardia euroa ja henkilöstömäärä vuoden lopussa yli 43 000. Kuvassa 13 on näkyvissä yhtiön logo. (Kone Oyj 2014a.)



Kuva 13. Koneen logo ja bränditeksti. (Kone Oyj 2014b.)

Bränditeksti *People Flow™* merkitsee sujuvaa, turvallista, mukavaa ja viivytyksetöntä liikkumista rakennuksissa ja niiden välillä. Itse logon alkuperää ei varsinaisesti tunneta, mutta sen arvellaan kuvaavan hissikoreja ja -kuiluja sekä rakennuksia. Sinivalkoinen väri muistuttaa yhtiön suomalaisista juurista. (Kone Oyj 2014b.)

4.1 Hyvinkään tehdasalue

Koneen Hyvinkään tehdasalue sijaitsee Hiiltomon teollisuusalueella, jossa toimivat Koneen lisäksi muun muassa Konecranes ja Myllyn Paras Oy. Pääosan alueen pinta-alasta ovat nykyisin Konecranesin ja Koneen hallussa. Hiiltomon teollisuusalueen toiminnan katsotaan alkaneen vuonna 1927, kun Hyvinkään Kauppala osti alueen ja kehitti sen

teollisuusalueeksi. Sitä ennen alueella sijaitsi muun muassa terva- ja liimatehdas. Vuonna 1943 Kone aloitti toimintansa alueella valmistamalla nostureita nosturitehtaalla. Vuonna 1945 Helsingin Verkatehdas siirtyi Hiiltomoon ja toiminta jatkui aina vuoteen 1978 asti. Verkatehtaan rakennukset tunnetaan nimellä Heves, joka nykyisin toimii pääasiassa Koneen toimistotiloina. Hissitehdas valmistui vuonna 1967, ja 1970-luvulla Kone rakensi merkittävästi lisää tuotanto- ja kehitystiloja alueelle. Vuonna 1994 Kone luopui nosturiliiketoiminnasta, ja nykyisin Konecranes toimii Hiiltomon teollisuusalueella samojen aitojen sisällä yhdessä Koneen kanssa. Tänäkin päivänä Koneen vanhimmat käytössä olevat rakennukset ovat peräisin 1940-luvulta. (Hyvinkää 2008; Junnila & Dönnner 1989, 277–279, 289.)

Alueella on nykyisin seitsemän Koneelle kuuluvaa rakennusta; toimistorakennus Heves, toimisto- ja tuotantorakennus Hissitehdas, ruokailu- ja vierailukeskuksena toimiva PFC (People Flow Center), opetustilana toimiva R-rakennus, lämpökeskuksena toimiva T2-rakennus, tuotantotilana toimiva K2-rakennus sekä toimistokäytössä oleva K1-rakennus. Varsinaista tilojen jäähdytystä on kaikissa muissa rakennuksissa paitsi R-rakennuksessa ja T2-lämpökeskuksessa. Liitteessä 1 on näkyvissä aksonometrikuva tehdasalueesta. Liitteen tummanharmaat rakennukset kuuluvat Konecranesille ja vaaleanharmaat Koneelle.

4.1.1 Jäähdytysenergian tämänhetkinen kulutus

Koneen Hyvinkään alueen jäähdytys koskee lähinnä toimistotiloja. Suurimmat jäähdytystehot ovat Heves-rakennuksessa, mutta jäähdytettynä on myös osia Hissitehtaalta, K-rakennukselta sekä PFC-vierailukeskuksesta. Tilojen jäähdytyskausi ajoittuu kesäkaudelle, keskimäärin alkaen toukokuusta ja kestäen elokuuhun saakka. Jäähdytyksen tarpeessa on eroja myös päivä- ja tuntikohtaisesta. Erot johtuvat työskentelyajoista ja ulkolämpötilan vaihteluista.

Heves-toimistorakennuksessa jäähdytys tapahtuu suoraan ilmanvaihdon tuloilmaan ilmanvaihtokoneiden jäähdytyspattereissa sekä huonekohtaisen palkkiverkoston avulla. Jäähdytysverkko ulottuu alueen 10 ilmanvaihtokoneelle rakennuksen 13

ilmanvaihtokoneesta. Jäähdytettyjen ilmanvaihtokoneiden yhteenlaskettu tuloilma on noin 57,8 m³/s. Näiden lisäksi osaan rakennuksen toimistotiloihin on asennettu jäähdytyspalkit. Heveksen jäähdytysverkkoa palvelee kaksi kompressoria, jotka uusitaan kesään 2015 mennessä. Vanhat jäähdytyskompressorit ovat peräisin vuodelta 1981, ja uusimisen syynä ovat vanhojen koneiden kylmäaine R22, jonka käyttö kielletään vuoden 2015 alussa, sekä koneiden vanha ikä. Vanhojen kompressoreiden jäähdytysteho on yhteensä 680 kW. Uusimisen jälkeen jäähdytyskompressorien yhteenlaskettu jäähdytysteho on 800 kW. Jäähdytysverkosto on rakennettu vaiheittain vuosien 1981–2012 välisenä aikana. Jäähdytysverkostoon on myös liitetty 3 m³:n jäähdytysveden tasaussäiliö. Jäähdytyspiiriin kuuluu yhteensä lattia-alaa noin 19 700 m², jolloin vanhoilla koneilla ominaistehoksi saadaan noin 34,5 W/m². Kovimmilla helteillä tämä jäähdytysteho ei pelkästään riitä ilmanvaihtokoneiden jäähdytyspattereille. Alueilla, joissa sijaitsee jäähdytyspalkkiverkosto, jäähdytysteho on ollut aikaisempina vuosina riittävä. Uusittava kompressorijäähdytyskone todennäköisesti helpottaa tilannetta, mutta jos jäähdytysverkostoa rakennetaan lisää, on väistämättä lisättävä jäähdytystehoakin. Uusien jäähdyttimien jälkeen ominaisteho on noin 40,6 W/m². Tuloilmavirtaan suhteutettuna vanhojen koneiden ominaisteho on 11,76 kW/(m³/s) ja uusimisen jälkeen 13,84 kW/(m³/s).

Hissitehtaalla toimistotilojen tuloilma ja osin työtilojen tuloilma on jäähdytettyä. Koko Hissitehtaan 19 ilmanvaihtokoneesta yhdeksässä on jäähdytyspatteri. Jäähdyttämättä ovat tehdashallin suuret tuotantotilat, eteläpäädyn työ- ja varastointitilat sekä ensimmäisen kerroksen sosiaalitilat. Ilmanvaihtokoneiden jäähdytyspattereiden avulla jäähdytetyn ilman tilavuusvirta on noin 23,8 m³/s. Ilman jäähdytyspattereita rakennukselle tulee noin 44,2 m³/s ilmaa. Suuressa tehdastilassa on jäähdytystä ainoastaan työnjohtajien kopeissa lämpöpumppujen avulla. Toimisto-osassa on jäähdytysvesiverkostoon kytkettyjä jäähdytyspalkkeja, muutamia puhallinpattereita sekä kolmannen kerroksen pohjoispäädyn toimistotilojen suutinkonvektorit, joita käytetään jäähdytykseen ja lämmitykseen. Suutinkonvektorijärjestelmää lukuun ottamatta tuloilman ja toimistotilojen jäähdytysjärjestelmiä on asennettu pääasiassa 1990- ja 2000-luvuilla, joilta ajoilta on myös jäähdytysvesiverkoston putkisto. Suutinkonvektorijärjestelmän putkisto, joka toimii myös

lämmitysputkistona, on todennäköisesti pääosin alkuperäistä vuoden 1972 rakennusvaiheen ajalta. (Pöyry 2012, 34.)

Hissitehtaan tuloilman, jäähdytyspalkkien ja suutinkonvektoreiden jäähdytystä palvelee yksi jäähdytyskompressori. Jäähdytyskoneen jäähdytysteho on 430 kW. Jäähdytyskone lauhduttiminen on peräisin vuodelta 2004. Lauhduttimet ovat sijoitettuna toimisto-osan katolle, ja kylmäaineena koneessa kiertää R134A. Jäähdytyskompressoriin on myös liitettyä 6 m³:n jäähdytysveden tasaussäiliö, joka on peräisin vuodelta 1990. Hissitehtaan jäähdytyspiiriin kuuluu yhteensä noin 8 500 m², jolloin jäähdytyskompressorin ominaistehoksi on noin 50,6 W/m². Tuloilmavirtaan suhteutettuna jäähdytyskoneen ominaisteho on 18,07 kW/(m³/s). (Pöyry 2012, 34–35.)

K-rakennuksista tuotantotiloissa ei ole jäähdytystä, mutta toimisto-osa on jäähdytetty. Toimisto-osan jäähdytys valmistui vuoden 2014 kesällä, ja sen jäähdytysteho on 53 kW. Jäähdytysteho siirtyy ilmanvaihtokoneen tuloilmaan sekä avokonttorin Split-laitteisiin. Kylmäaineena koneessa käytetään R-407C:tä. Jäähdytetyn alueen pinta-ala on noin 1 010 m², jolloin rakennuksen ominaisjäähdytysteho on noin 52,5 W/m².

PFC-vierailukeskus valmistui vuonna 2012, jolloin sinne asennettiin kompressorijäähdytin. Jäähdytystehon on 90,4 kW, ja kylmäaineena käytetään R410a:ta. Kyseinen kone palvelee koko rakennusta, jonka pinta-alasta suurimman osan vievät ruokailutilat, neuvotteluhuoneet sekä esittelytila. Rakennuksessa on neljä ilmanvaihtokonetta, joiden yhteenlaskettu ilmamäärä on noin 7,5 m³/s. Jäähdytysteho siirtyy ilmanvaihtokoneen tuloilmaan sekä kattosäteilijöihin. Rakennuksen jäähdytetty pinta-ala on noin 1 900 m², jolloin rakennuksen ominaisjäähdytystehoksi saadaan noin 47,6 W/m². Tuloilmaan suhteutettuna jäähdytysteho on noin 12,05 kW/(m³/s). Tuloilmaan suhteutettu arvo on melko pieni, mutta jäähdytysteho siirtyy pääosin tehokkaiden säteilijöiden avulla. PFC-rakennuksen jäähdytysteho on riittänyt hyvin pitämään tilat viileänä. Jäähdytyskoneessa on myös vapaajäähdytystoiminto, jolloin voidaan jäähdyttää myös pelkällä ulkoilmalla.

R- ja T2-rakennuksiin ei ole rakennettu tilojen jäähdytystä. Taulukkoon 8 on lisätty yhteenvetona jäähdytettyjen rakennusten jäähdytysteho, jäähdytetyn alueen pinta-ala sekä

rakennuksen ominaisjäähdytysteho. Laskelmaan on huomioitu vain keskeisimmät jäähdytyslaitteet, jolloin esimerkiksi yksittäiset ilmalämpöpumput sekä testaustornien jäähdyttimet ovat jääneet tarkastelun ulkopuolelle.

Taulukko 8. Rakennuksien jäähdytysteho, jäähdytetty ala sekä ominaisjäähdytysteho.

Rakennus	Jäähdytysteho [kW]	Jäähdytetty ala [m ²]	Ominaisjäähdytysteho [W/m ²]
Heves, vanha	680,0	19 700	34,5
Heves, uusi	800,0	19 700	40,6
Hissitehdas	430,0	8 500	50,6
K	53,0	1 010	52,4
PFC	90,4	1 900	47,6

Alueen tilojen kokonaisjäähdytysteho ennen Heveksen jäähdytyskompressorien uusimista on noin 1 250 kW ja uusimisen jälkeen noin 1 370 kW. Jäähdytettyä pinta-alaa on yhteensä noin 31 110 m². Koko alueen jäähdytyksen ominaisteho ennen uusimista on 40,3 W/m² ja uusimisen jälkeen 44,1 W/m².

Rakennusten jäähdytysjärjestelmiin ei ole rakennettu erillistä mittarointia, joten jäähdytysenergian kulutus joudutaan arvioimaan. Pöyry (2012) arvioi tekemässään energiakatselmusraportissa Hissitehtaan jäähdytysjärjestelmien vuosittaiseksi sähkönkulutukseksi noin 460 MWh, josta 75 % olisi vedenjäähdytyskoneiston osuutta, eli noin 345 MWh. PFC-rakennuksen jäähdytyslaitteessa on erillinen mittari, joka mittaa koneen kulutettua sähköenergiaa. Lokakuussa 2014 mittari näytti lukemaa 106,1 MWh, joka on kolmen edellisen kesän yhteenlaskettu lukema. Yhdellä jäähdytyskaudella sähköenergiaa on kulutettu keskimäärin 35,4 MWh.

Heveksessä pidettiin elokuussa 2014 kovien helteiden aikana viikon kestänyt mittarointi liittyen yhden ilmanvaihtokoneen jäähdytyspiirin lämpötiloihin. Mittausdatasta saadut arvot kertoivat, että jäähdytyskoneen päivittäinen käyntiaika on 6.00–20.00 ja että viikonloppuisin jäähdytyskoneet eivät ole käytössä. Jos oletetaan, että jäähdytyskausi kestää keskimäärin toukokuusta elokuuhun, eli noin 17 viikkoa, on vuosittainen huipunkäyttöaika noin 1 193 tuntia, eli pyöristettynä noin 1 200 tuntia. Taulukossa 1

arvioitiin toimistorakennusten jäähdytyksen huipunkäyttöajoiksi 500–1 400 tuntia, joten 1 200 tuntia voisi olla todennukainen arvio käyttöajasta.

Vertailuun otetaan vielä huomioon kuukausittainen sähkönkulutus, joita on kerätty käsiluennana sekä Energiakolmio Oy:n mittausdatasta. Yhteistyö Energiakolmion kanssa on vasta alussa, joten mittaus tietoja ei ole pitkältä ajalta olemassa. Vertaamalla jäähdytyskauden kuukausien sähkönkulutusta muihin kuukausiin, huomataan että kesäisin sähkönkulutus nousee runsaasti. Ilman jäähdytystä sähkönkulutuksen pitäisi kesällä laskea, koska toimitiloista vähentyy väkeä kesälomille ja valaistuksen tarve on vähäisempi. Kuitenkin sähkönkulutus on poikkeuksetta noussut toukokuun ja elokuun välillä. Käsiluennan mukaan jäähdytyskauden ja muiden kuukausien keskiarvojen erotukset ovat Heveksellä noin 40 MWh, Hissitehtaalla 150 MWh ja PFC:llä 2 MWh. Energiakolmion tarjoamalta palvelulta oli kirjoitusvaiheessa saatavilla tietoa Hissitehtaalta ja PFC:ltä, joiden erotukset ovat 346 MWh ja 4 MWh. Lukemista täytyy kuitenkin korostaa, että erotus ei johdu pelkästään jäähdytyksestä.

K-rakennuksen jäähdytyksestä ei ole mittarointia, ja jäähdytys valmistui vasta keskikesällä 2014, joten sen käyttöaste täytyy puhtaasti arvioida. Taulukossa 9 on esitetty arviot tehtyjen pohdintojen pohjalta jäähdytyskoneiden huipunkäyttöajasta, jäähdytysenergian kulutuksesta, jäähdytyskoneen sähköenergian kulutuksesta sekä keskimääräisestä COP-arvosta.

Taulukko 9. Arviot rakennuksien jäähdytyksen huipunkäyttöajoista, jäähdytys- ja sähköenergian kulutuksesta sekä keskimääräisestä COP-arvosta.

Rakennus	Huipunkäyttöaika [h]	Jäähdytysenergian kulutus [MWh/a]	Sähköenergian kulutus [MWh/a]	COP [-]
Heves, vanha	1 200	816,0	408,0	2,0
Heves, uusi	1 200	960,0	417,4	2,3
Hissitehdas	1 500	645,0	345,0	1,9
K	1 000	53,0	23,0	2,3
PFC	900	81,4	35,4	2,3

Rakennusten ominaisjäähdytysenergiankulutus Heveksen vanhoilla koneilla on 41,1 kWh/m² ja uusilla koneilla 48,7 kWh/m². Hissitehtaalla ominaisjäähdytysenergiankulutus

on jopa $75,8 \text{ kWh/m}^2$. Taulukon 1 mukaan toimistorakennuksille tyypillinen arvo on noin $15\text{--}50 \text{ W/m}^2$. Rakennusten suuret arvot saattavat johtua esimerkiksi vanhoista jäähdytysenergian jakotavoista, jolloin tuotettua jäähdytysenergiaa kuluu myös häviöihin. Lisäksi tehdyt arviot, esimerkiksi Hissitehtaalle tehty energiakatselmus, saattavat antaa vääriä tuloksia. Oikeiden lukemien ja muutenkin energiankulutuksen seurannan kannalta kannattaa asentaa mittarointi jäähdytyskoneisiin.

Kaikkien rakennusten huipunkäyttöaika on arviolta noin 1 160 tuntia. PFC:n käyttöaika on pienempi johtuen pienemmästä käyttökapasiteetista, ja vastaavasti Hissitehtaan käyttöaika on suurempi johtuen saadusta sähköenergian kulutuksen arviosta. Jäähdytysenergian vuosittaiseksi kulutukseksi saadaan noin 1 600 MWh ja jäähdytyskoneiden sähkönkulutukseksi noin 800 MWh. Näin alueen rakennusten jäähdytyskompressoreiden keskimääräinen COP-arvo on noin 2.

4.1.2 Jäähdytysenergian mahdollinen tarve

Tulevaisuudessa jäähdytysenergiaa täytyy lisätä Heveksen toimistoihin sekä Hissitehtaalle tuotantotiloihin. Esimerkiksi Heveksessä kesällä 2014 lämpötila nousi parhaimmillaan noin $30 \text{ }^\circ\text{C}$:seen muutamilla alueilla. Siellä jäähdytysteho yksinkertaisesti ei riittänyt viilentämään tuloilmaa riittävästi. Hissitehtaalle suurin jäähdytyksen lisäyksen tarve on tehdastiloihin. Kesän hellejaksoilla työskentelylämpötila voi olla jopa viikkoja yli $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Edellisen kappaleen taulukosta 8 huomataan, että Heveksen jäähdytystehot ovat selvästi alhaisemmat kuin muissa rakennuksissa. Taulukosta karkeasti pääteltynä riittävä jäähdytysteho olisi noin 50 W/m^2 , joka toteutuu keskimäärin muissa rakennuksissa. Jos oletetaan, että Heveksen koko $22\,100 \text{ m}^2$ lattiapinta-ala jäähdytetään teholla 50 W/m^2 , olisi tarvittava jäähdytysteho $1\,105 \text{ kW}$. Tämä olisi 305 kW enemmän jäähdytystehoa kuin vuoden 2015 koneiden uusimisen jälkeen.

Suurimmat jäähdytysenergian tarpeet ovat Hissitehtaan tehdashallissa. Jäähdyttämätöntä alaa Hissitehtaalla on noin $21\,000 \text{ m}^2$, kun ottaa huomioon tehdashallin sekä sen vieressä

sijaitsevat työ- ja varastointitilat. Hissitehtaalle lasketaan arvio jäähdytysenergian tarpeesta soveltamalla rakennusmääräyskokoelman ohjetta D5. Ohjetta joudutaan soveltamaan, koska tehdasrakennuksille ei ole esitetty erillistä laskentaohjetta jäähdytykseen liittyen. Rakennuksen jäähdytystarve riippuu lämpötilatasoista, rakennuksen lämpökuormista ja niiden hyödyntämistä sekä lämpöhäviöistä. Laskennassa joudutaan tekemään myös useita oletuksia, mutta tärkeimpänä on saada tietoon arvio jäähdytystarpeen kokoluokasta.

Ulkolämpötilat ovat saatu Suomen Sääpalvelusta ja sääasemaksi valittiin Klaukkala, koska sieltä oli saatavissa riittävästi tietoja ja se sijaitsee riittävän lähellä Hyvinkäätä. Lämpötilat otettiin vuosilta 2009–2014. (Sääpalvelu 2014.) Tehtaan sisällä ilman lämpötila on pyritty pitämään noin 20 °C:ssa (Suominen 2014). Kesäajan sisälämpötilat määritetään rakentamismääräyskokoelman D2 mukaan, eli lämpötila saa kohota 25 °C:seen (D2 2012, 6). Lämpötilatasot ovat näkyvissä liitteen 2 lopussa.

Lämpöhäviöt aiheutuvat rakenteiden läpi johtuvasta lämpöenergiasta sekä vuotoilman ja ilmanvaihdon lämmitykseen tarvittavasta energiasta. Jokaiselle näistä ovat yhtenäiset ulko- ja sisälämpötilat sekä kunkin kuukauden tunnit. Rakennusosien ominaislämpöhäviöön vaikuttavat rakenteiden lämmönläpäisykertoimet ja pinta-alat. Vuotoilman ominaislämpöhäviöön vaikuttavat rakennuksen vuotoilmakerroin ja rakennuksen tilavuus. Ilmanvaihdon ominaislämpöhäviöön vaikuttavat poistoilmavirta ja käyntisuhde. Ominaislämpöhäviöt nousevat tehdasrakennuksessa merkittäviksi johtuen suuresta pinta-alasta ja hallin korkeudesta, rakennusosien kevyestä rakenteesta sekä merkittävästä ilmavirrasta. Toisaalta jäähdytyksen kannalta on hyvä, että lämpöhäviöt ovat suuret, jolloin lämpökuormatkin siirtyvät kuumasta tehdashallista viileämpään ulkoilmaan. Tehtaan lämpöhäviölaskelmat ovat näkyvissä liitteessä 2. Laskuista huomataan, että ilmanvaihdosta johtuva lämpöhäviö on suurin. Jos Hissitehtaalle rakennetaan jäähdytysverkosto, kyseistä lämpöhäviötä pystyttäisiin pienentämään merkittävästi rakentamalla myös tehokas lämmöntalteenottojärjestelmä ilmanvaihtokoneisiin. Tällöin lämmöntalteenottoa voitaisiin hyödyntää talvella lämmittämisen lisäksi kesän jäähdytyskaudella viilentämiseen. (D5 2007, 18–25.)

Rakennusta lämmittävien lämpökuormien katsotaan johtuvan henkilöistä, sähkö- ja muista työlaitteista sekä auringon säteilystä. Tarkastelusta jätetään pois tilojen lämmitysjärjestelmistä aiheutuva lämpökuorma sekä käyttöveden kierrosta vapautuva lämpöhäviö. Lämmitysjärjestelmät ovat poissa käytöstä jäädytyskaudella, ja käyttöveden kierron määrä on mitätön verrattuna rakennuksen tilavuuteen nähden. Lisäksi Hissitehtaalla käyttövesi kiertää katon rajassa, jolloin sen tuottama lämpövaikutus ei vaikuta työskentelyalueelle.

Sähkölaitteista aiheutuva lämpökuorma on arviolta 250 MWh. Muista laitteista aiheutuva lämpökuorma on arviolta 50 MWh. Henkilöistä aiheutuu noin 12,5 MWh:n lämpökuorma, ja auringon säteilyn vaikutus esimerkiksi kesäkuussa on noin 20 MWh. Suurin laskennallinen lämpökuorma, noin 251 MWh, on heinäkuussa. Lämpökuormien hyödynnettävyys perustuu rakennuksen tyyppiin sekä lämpökuormiin ja -häviöihin. Liitteessä 2 on esitetty laskelmat lämpökuormista ja niiden hyödyntämisestä.

Tehtyjen arvioiden pohjalta Hissitehtaan tehdasosan jäädytystehon karkeaksi arvioksi saadaan noin 700 kW ja jäädytyksen nettoenergian tarpeeksi noin 665 MWh, jolloin huipunkäyttöaika olisi noin 940 tuntia. Kyseisellä arviolla ominaisjäädytystehoksi saadaan noin 33,3 W/m². Käyttämällä tätä samaa arviota Hissitehtaan toisen kerroksen työ- ja varastointitiloihin Hissitehtaan kokonaisjäädytystehon lisäyksen tarpeeksi saadaan noin 50 kW, eli yhteensä 750 kW. Samalla arviolla K-rakennuksen tuotantotiloihin tarvittaisiin noin 270 kW jäädytystehoa. Taulukossa 10 on esitetty jäädytysenergian mahdollinen tarve esitettyjen arvioiden perusteella.

Taulukko 10. Alueen jäädytysenergian mahdollinen tarve.

Rakennus	Huipunkäyttöaika [h]	Jäädytysteho [kW]	Jäädytysenergian kulutus [MWh/a]
Heves	1200	305	366
Hissitehdas	940	750	705
K2	940	270	254

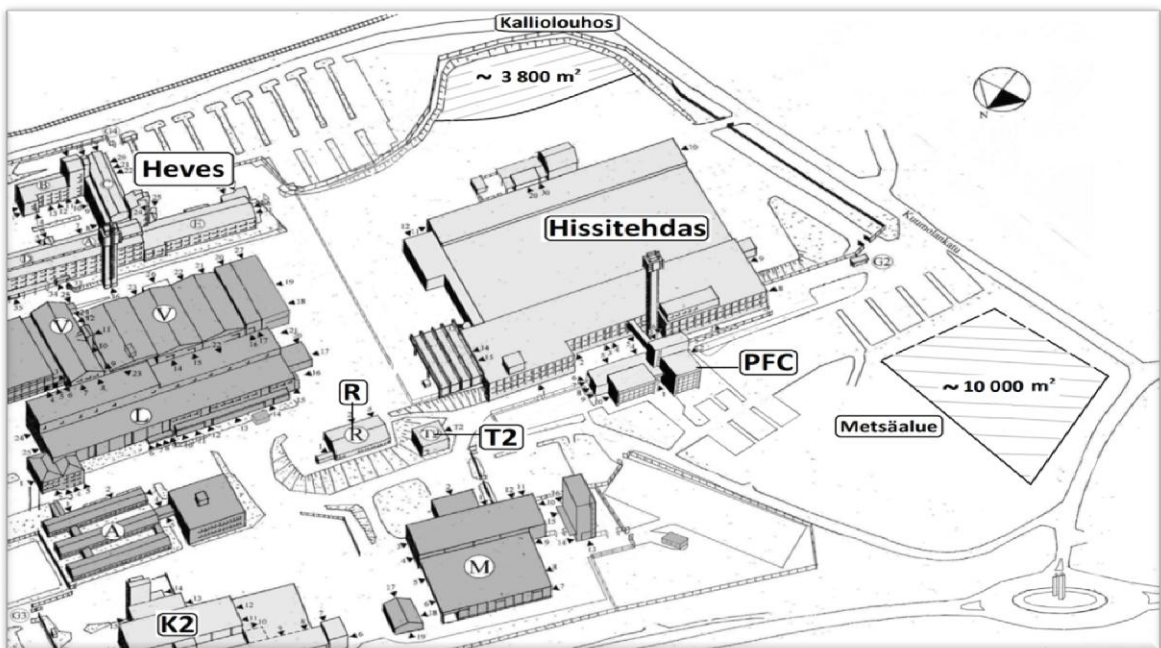
Koko alueelle olisi mahdollista lisätä jäähdytystehoa vielä noin 1 325 kW, jolloin kaikissa tiloissa olisi todennäköisesti riittävät jäähdytykset. Tämä on lähes sama määrä, mitä nyt on käytössä. Lisäyksen vuoksi jäähdytysenergian kulutus kasvaisi lähes 1 325 MWh:iin.

4.2 Hankkeen kuvaus

Lumivaraston tarkoituksena on vähentää ostoenergian tarvetta jäähdytyksen suhteen hyödyntämällä talvella satava lumi Hyvinkään tehdasalueelle. Varastosta katsotaan saatavan hyötyä ainakin yrityksellisesti ja ympäristöllisesti. Hanke edistäisi niin Koneen kuin Hyvinkään kaupungin strategiaa energiatehokkuudesta. Hyvinkään kaupunki on asettanut energiansäästö tavoitteet, joihin alueen yritykset liittyvät oleellisesti. Esimerkiksi koko Hyvinkään sähkönkulutuksesta 33 % kuluu teollisuuden yrityksiin. (Hyvinkää 2009, 8.)

Hankkeen kannattavuuden määrittelemisen alkaa lumivaraston suunnittelusta. Lumivaraston koko ja tyyppi valitaan sijoitettavan alueen ja kohteen jäähdytystarpeen mukaisesti. Niiden avulla määritellään kerättävän lumen määrä. Sijaintiin vaikuttaa vapaana oleva tila, jota voidaan hyödyntää. Sijainnin olisi myös hyvä olla lähellä jäähdytettävää kohdetta, ja sen kannattavuutta parantaa mahdollisuus hyödyntää jo valmiina olevia rakenteita tai luonnollisia rakenteita, kuten kalliota. Varaston koko myös rajoittuu saatavaan lumimäärään, joka pyritään keräämään kokonaan tehdasalueelta luonnollisena lumena. Ehdotetulle varastolle pyritään tekemään kappaleen 3.5.1 mallinen energiatase, jonka avulla määritellään hyödynnettävä jäähdytysenergia lumesta. Hankkeen määrittely etenee vaiheittain. Ensin arvioidaan alueelle satavan lumen määrä, lumivaraston sijaintiehdotukset, liitettävät rakennukset, tarvittava jäähdytysenergia, varastoon kerättävän lumen määrä ja lopuksi lumesta hyödynnettävä jäähdytysenergia energiataseiden avulla. Näiden arvioiden avulla hahmotellaan kustannukset. Lopuksi tarkastellaan hankkeen kannattavuutta, esimerkiksi taloudellisesta näkökulmasta.

Lumivaraston sijainniksi on ehdolla kaksi aluetta. Ensimmäinen vaihtoehto sijoittuisi louhitun kallion viereen, josta on hyvät välimatkat Hevekseen ja Hissitehtaalalle. Kallioulouhoksen hyvinä puolina ovat etäisyydet rakennuksiin ja kallioseinämä. Kallioseinämä sijaitsee lännen puolella, jolloin ainakin osin itse varasto jäisi auringolta piiloon aamuisin ja aamupäivällä. Huonona puolena on alueen hyvä sijainti Hissitehtaaseen nähden. Nyt kallion viereistä aluetta käytetään tehtaan ulkovarastointipaikkana, joten lumivaraston rakentamisen jälkeen ulkovarastointitilaa ei voitaisi laajentaa. Toinen vaihtoehto sijaitsee Hissitehtaan parkkipaikan vieressä metsäalueella, johon nykyisinkin läjitetään lunta. Sieltä on lyhyt etäisyys Hissitehtaalalle, mutta muihin rakennuksiin etäisyydet kasvavat reilusti. Hyvänä puolena on alueen nykyinen käyttö, koska se on pääasiassa metsäaluetta, jolle todennäköisesti ei tule ainakaan lähitulevaisuudessa suurempaa käyttöä. Vaihtoehtoista kallioulouhosta pidetään ensisijaisena vaihtoehtona, johon pyritään tekemään tarkka energiatase. Metsäalueen energiantuotannon arvioon hyödynnetään Sundsvallin energiataseita. Kuvassa 14 on esitetty kahden eri vaihtoehdon sijainnit ja arvioidut pinta-alat. Kallioulouhos sijaitsee kuvan ylälaidassa ja metsäalue kuvan oikeassa laidassa.



Kuva 14. Lumijäähdytysjärjestelmän sijainniksi ehdotetut kaksi paikkaa.

Kallioulouhoksen kallion pohjan pinta-alan on arvioitu olevan noin 3 800 m² Hissitehtaan ja louhoksen välisestä tiestä kallioon päin. Louhoksen vieressä kulkevan tien pituus on noin 120 metriä. Pinta-ala mitattiin etäisyysmittarilla noin 25 mittapisteestä, joiden pohjalta piirrettiin hahmotelma alueesta. Mittapisteiden perusteella hahmotelma jaettiin kolmioiden ja suorakulmien muotoisiin alueisiin, joiden pinta-alat laskettiin. Kyseinen laskentatapa hieman vääristää kallion oikeaa muotoa, mutta antaa riittävän arvion pinta-alasta. Kallion seinämän korkeus määritetään piirustusten ja etäisyysmittarin avulla. Etäisyysmittari antoi korkeimman kohdan lukemaksi noin 8,3 metriä kallion kaakkoiskulmasta. Heves-rakennusta kohti kallionkielekkeen korkeus laski tasaisesti 5,9 metriin tiehen asti noin 90 metrin matkalla. Toiselta sivulta kallion kielekkeen korkeus vaihteli 6,9 metrillä 7,8 metriin tiehen asti. Piirustusten mukaan idän ja lounaan puoleisen sivun korkeus vaihteli välillä 8,33 metrillä 9,19 metriin, ja Heveksen päin kallion korkeus laski 4,39 metriin. Kaakkoiskulman ja Heves-rakennuksen väliseltä alueelta korkeuksista ei ollut piirustuksissa tietoja. Rakentamalla tien viereen noin 5 metriin seinän ja hyödyntämällä kallion korkeuksia voidaan lunta kerätä varastoon kekomaiseen muotoon yli 30 000 m³. Tilavuutta varastolle saadaan lisää joko räjäyttämällä kallion seinämiä lisää tai kasvattamalla sen korkeutta kaivamalla pohjaa. Kallioulouhokselta suurin etäisyys Hissitehtaalta on noin 90 metriä ja Hissitehtaan jäähdytyskompressorille noin 200 metriä. Vastaavat lukemat Hevekselle ovat noin 160 metriä ja 250 metriä. K-rakennuksille kallioulouhokselta tulee matkaa hieman yli 500 metriä. Putkireiteille etäisyydet hieman kasvavat, mutta ovat suuntaa antavia. Kuvassa 15 on ilmakehän kuva kallioulouhoksen alueelta lounaasta päin otettuna.



Kuva 15. Kalliolouhoksen ilmakuva. (Kone kiinteistöosasto 2013.)

Metsäalueelle olisi mahdollista rakentaa samantyyppinen järjestelmä kuin Sundsvallissa, eli matala allas. Alueella käytettävissä olevaksi pinta-alaksi on arvioitu olevan noin 10 000 m² karttapalveluiden ja piirustusten mukaan. Järjestelmän syvyys määritetään tarvittavan jäähdytysenergian kulutuksen mukaan. Etäisyys Hissitehtaalle on 70 metriä ja jäähdytyskompressorille 150 metriä. Vastaavat lukemat Hevekselle ovat 490 metriä ja 590 metriä. K-rakennukselle metsäalueelta tulee matkaa myös hieman yli 500 metriä.

Molemmissa järjestelmissä olisi tarkoitus kierrättää sulamisvettä lämmönvaihtimien läpi ja hyödyntää sulamisveden matala lämpötila tilojen jäähdytykseen. Lämmennyt sulamisvesi johdatettaisiin tarvittaessa takaisin varastoon. Jos varaston vesimäärä on riittävän korkea, sulamisvettä puretaan lämmönvaihtimen jälkeen. Jäähdytyskauden alkaessa täytyy pohtia, miten verkosto täytetään. Tähän voi käyttää esimerkiksi omaa kaivoa. Todennäköisesti kalliimpi vaihtoehto olisi suoraan vesijohtoveden käyttö. Parhaassa tapauksessa käytetään pelkkää sulamisvettä.

Alustavissa suunnitelmissa lumivarasto liitetään Hissitehtaaseen ja Heves-rakennukseen. K-rakennukset jäävät tarkastelusta pois, koska siirtomatkat rakennusten ja varaston välillä

tulisivat liian pitkiksi. Myös K-rakennusten jäähdyststarpeet ovat niin pienet, että putkien rakentaminen on turhaa. PFC-rakennuskin jää tässä tarkastelussa pois lähinnä pienen jäähdyststarpeen takia, jolloin rakentamiskustannukset kasvaisivat todennäköisesti liian suuriksi kyseisen rakennuksen osalta.

4.2.1 Alueelle satavan lumen määrä

Tehdasalueelle satavan lumen aurausalueen pinta-ala on yhteensä noin 170 000 m². Tähän sisältyy parkkipaikkoja, kulkuväyliä ja muita piha-alueita. Suurin osa on päällystetty asfaltilla, mutta varsinkin parkkipaikat ovat vielä pääosin hiekkapäällysteisiä. Hiekkapäällysteeltä kerätty lumi saattaa aiheuttaa ongelmia itse varastossa, koska lumen mukana kulkeutuu hiekkaa varastoon. Kun varaston koko on määritelty, voidaan erikseen määritellä, miltä alueelta varastoon kerättäisiin lunta, jolloin voidaan minimoida kerätyn hiekan määrä. Hiekan kulkeutumista varastoon tulisi välttää, jolloin myös hiekoitushiekan käyttöä tulisi optimoida.

Keskisen (2012) diplomityössä tutkittiin tilastotietoja lumisateiden määrästä yhteensä 31 talvena vuosina 1980–2011 Helsingissä ja Jyväskylässä. Keskisen (2012) tietojen mukaan keskimääräinen lumikertymä Helsinkiin on ollut noin 107 cm. Lumikertymän on arvioitu olevan lumensyvyysmittausten positiivinen muutos. Vastaavasti Klaukkalan sääaseman mukaan vuosien 2009–2013 keskimääräinen lumisadanta talvessa oli noin 144 cm (Sääpalvelu 2014). Näiden arvojen perusteella oletetaan, että normaalina talvena Hyvinkään lumikertymä on arviolta 120 cm, jolloin tehdasalueelle sataa hieman yli 200 000 m³ lunta. Hyvinkään tehdasalueilla, esimerkiksi Hissitehtaan katolla, on tehty lumen tiheyden mittauksia. Käsittelemättömän lumen tiheydet ovat vaihdelleet välillä 260–320 kg/m³ (Suominen 2014). Käyttämällä tiheyden arvoa 300 kg/m³ on alueelle satavan lumen massa noin 61 000 tonnia.

Alueella toimii erillinen urakoitsija, joka vastaa lumitöiden tekemisestä ja teiden kunnossapidosta. Heidän arvioiden mukaan talvena 2012–2013 lumikuormia kerättiin yhteensä 3 292 kappaletta ja talvena 2013–2014 vain 570 kappaletta. Yhden kuorman

tilavuudeksi arvioitiin 20 m³. (Onnelainen 2014.) Näillä arvoilla kerätyn lumen tilavuus talvena 2012–2013 oli 65 840 m³ ja talvena 2013–2014 11 400 m³. Talvea 2013–2014 pidetään keskimääräistä lämpimämpänä ja vähälumisena (Ilmatieteenlaitos 2014a). Vastaavasti talvea 2012–2013 pidetään normaalina talvena (Ilmatieteenlaitos 2014b). Kerättynä lumi pakkaantuu, jolloin sen tiheys kasvaa. Lumivaraston yhdeksi suunnittelun alkuarvoksi oletetaan, että alueelle satavan ja kerättävän lumen tilavuus on 50 000 m³, jossa lumen tiheys on 650 kg/m³.

Tarvittaessa lumi voidaan tuottaa keinotekoisesti. Esimerkiksi taulukosta 2 nähdään, että Sundsvallin sairaalan lumijäähdytykseen lunta on tuotettu noin 38–70-prosenttisesti keinotekoisesti. Keinotekoisesti lunta voidaan tuottaa paineilmakäyttöisellä lumipeitsellä ja puhallinkäyttöisellä lumitykillä. Lumipeitseen syötetään paineilmaa ja korkeapaineista vettä, jolloin laite ei itsessään kuluta sähköä. Lumitykkikin vaatii korkeapaineisen veden, mutta paineilman sijasta tarvitaan myös sähköä. Keinotekoinen lumentuotanto toimii parhaiten kylmässä ja kuivassa ulkoilmassa sekä kylmässä veden lämpötilassa. Optimaalinen ulkoilman lämpötila on -30 °C:sta -15 °C:een. Tuotettu lumi on tiheydeltään noin 400–450 kg/m³. Modernien lumitykkien ominaisenergiankulutus on noin 1,1 kWh/m³ ja lumen sisältämä kylmäenergia noin 37–42 kWh/m³. Jos lumesta tulee pulaa, sitä voi tarvittaessa tehdä keinotekoisesti tai vastaavasti ilmoittaa kunnalle lumenkaatopaikasta. Kuitenkin paras vaihtoehto olisi hyödyntää ensisijaisesti alueelle satava lumi, koska muista vaihtoehtoista saattaisi tulla lisäkustannuksia. (Nurmi 2013, 21–24.)

4.2.2 Energiantuotantoennuste

Aikaisemmin mainittiin, että varasto suunnitellaan liitettäväksi Heveksen ja Hissitehtaan jäähdytyspiireihin. Taulukosta 8 nähdään, että Heveksen jäähdytyskoneen teho vuoden 2015 jälkeen on 800 kW ja Hissitehtaan jäähdytyskoneen teho 430 kW. Taulukossa 9 arvioitiin Heveksen jäähdytysenergiankulutuksen vuoden 2015 jälkeen olevan 960 MWh ja Hissitehtaan kulutuksen olevan 645 MWh. Taulukossa 10 esitettiin laskujen perusteella Heveksen mahdollisen jäähdytystehon lisätarpeen olevan 305 kW, joka vastaisi

jäähdytysenergiana 366 MWh:ia. Vastaavat arvot Hissitehtaan tulevaisuuden mahdollisille tarpeille ovat 750 kW ja 705 MWh.

Arvioiden perusteella lumivaraston jäähdytysalueeseen kuuluu tällä hetkellä tehona 1 230 kW ja jäähdytysenergiankulutuksena 1 605 MWh. Mahdollisen tulevaisuuden tarpeen jälkeen jäähdytysteho olisi yhteensä 2 285 kW. Arvio jäähdytysenergiankulutuksesta on yhteensä noin 2 675 MWh.

Lumijäähdytyksellä ei todennäköisesti voida kattaa koko kulutusta, sillä jäähdytysenergiankulutus on niin suurta. Esimerkiksi Sundsvallin lumijäähdytyslaskelmien mukaan noin 20 000–40 000 m³:n lumimäärillä voidaan tuottaa noin 600–900 MWh jäähdytysenergiaa. Tyypillisesti järjestelmään tarvitaan varajäähdytys. Varajäähdytys kattaa jäähdytyksen, kun lunta ei ole saatavilla tai sen teho ei yksin riitä kattamaan jäähdytystä. Tässä tutkimuksessa varajäähdytyksenä käytetään Heveksessä ja Hissitehtaalla olemassa olevia jäähdytyskoneita, jotka nyt yksistään kattavat rakennuksien jäähdytyksen. Lumijäähdytyksen käytöllä voidaan pienentää nykyisten jäähdytyskompressoreiden käyttöastetta, jolloin niiden käyttöikä kasvaa ja laiteviat pienenevät. Näin myös koneiden osalta kunnossapitokustannukset pienenevät ja käyttövarmuus kasvaa. Hissitehtaan tuotanto-osalla ei ole tällä hetkellä jäähdytystä, mutta työskentelyolosuhteiden parantamiseksi sen rakentamisen pohtimista kannattaa harkita. Varsinaista varajäähdytystä ei Hissitehtaalle välttämättä tarvita. Siten jos lunta ei ole saatavilla, jäähdytystä ei ole. Tällöin työskentelyolosuhteet säilyvät samoina kuin nykyään. Erillinen kompressorijäähdytys voidaan myös rakentaa Hissitehtaan tuotannolle, mutta sen myötä kustannukset nousevat. Muutoin Hissitehtaan tuotantopuolelle kustannukset koostuisivat ainoastaan putkista ja niiden asennuksista.

4.2.3 Vaihtoehtoiset projektit

Vaihtoehtoisesti lumen sijaan kaikki jäähdytys toteutettaisiin rakennuskohtaisesti kompressorijäähdytyksenä, kuten nyt toimitaan. Myös Hissitehtaan tuotantopuolelle voisi rakentaa oman jäähdytyspiirin, joka perustuisi kompressorijäähdytykseen. Tai vaihtoehtoisesti pysytään täysin nykyisessä tilanteessa, jolloin Hissitehtaan tuotanto-osalle ei rakenneta ollenkaan jäähdytystä. Sorptioprosessien ei katsota olevan kannattavaa, koska alueella ei ole saatavilla halpaa lämmönlähdettä.

Nykyisessä tilanteessa pysymisen hyvänä puolena ovat investointikustannukset. Uusia investointeja ei tarvitse tehdä, jolloin ainoat kustannukset tulevat kunnossapidosta ja käyttökustannukset jäähdytyskompressorien käymisestä. Myös tekniikka on tunnettua ja käyminen varmaa. Huonona puolena ovat korkeammat käyttökustannukset sekä jäähdytyksen ajoittainen riittämättömyys. Rakentamalla Hissitehtaalle kompressorijäähdyttimen työskentelyolosuhteita saadaan parannettua, mutta investointeja täytyy tehdä jäähdytyskompressoriin sekä jäähdytyspiiriin. Lumen avulla todennäköisesti saadaan säästöjä käyttökustannuksista, mutta myös luultavasti investoinnit ja kunnossapitokustannukset nousevat.

5 JÄÄHDYTYSENERGIANTUOTANTO

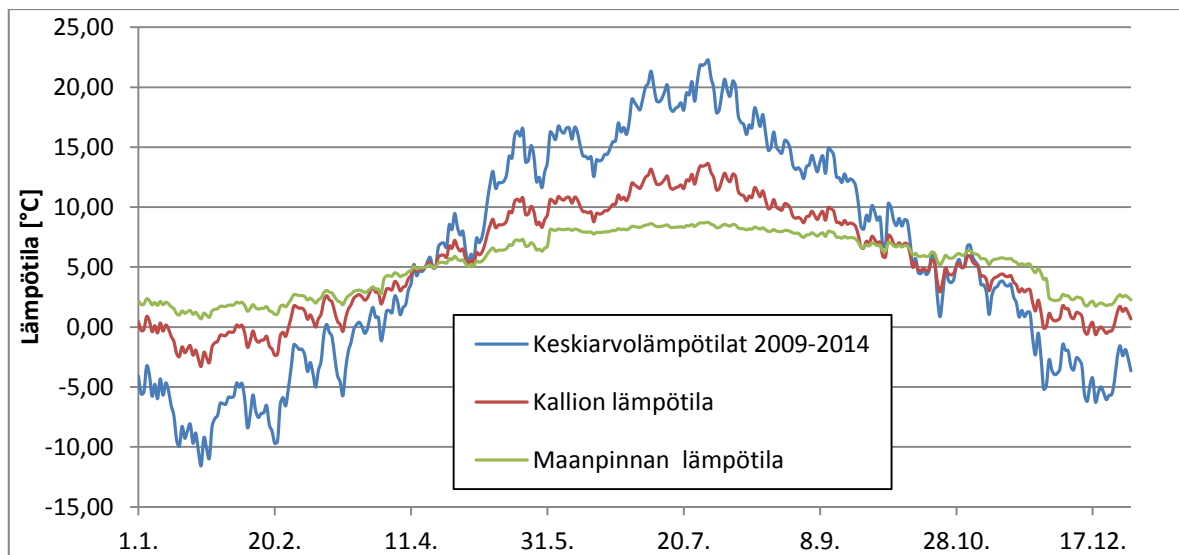
Kappaleessa määritetään lumivarastosta hyödynnettävä jäädytysenergia, tärkeimpien komponenttien alustava mitoitus, varastoon tarvittavat investointikustannukset, käytön aikaiset kustannukset ja mahdolliset tukimuodot sekä pohditaan eri muuttujia jäädytysenergiantuotannon kannalta. Molempia sijaintiehdotuksia pyritään pohtimaan, mutta tarkemmin keskitytään kalliolouhoksen alueeseen. Alueista pyritään mallintamaan lumen sulamista eri muuttujilla. Metsäalueeseen hyödynnetään Sundsvallin sairaalan lumijäädytyksen tuloksia, jotka ovat näkyvissä kappaleissa 3.2.1 ja 3.5.1. Mahdollisten tukimuotojen avulla hankkeesta saadaan taloudellisesti kannattavampaa. Herkkyystarkastelujen avulla saadaan selville eri muuttujien, esimerkiksi lumen määrän vaihtelun, vaikutus kustannuksiin ja järjestelmän kannattavuuteen.

5.1 Energiantuotantolaskelmat

Energiantuotantolaskelmissa pyritään mallintamaan lumen luonnollista sulamista erilaisissa varastotyypeissä ja erilaisilla lumen määrillä. Kalliolouhoksen alueeseen tehdään useampia malleja, joissa pyritään huomioimaan eri rakenteiden ja muuttujien vaikutusta. Näiden avulla hahmotellaan mahdollinen lumesta hyödynnettävä jäädytysenergianmäärä, jota käytetään kannattavuuden määrittelyn perustana. Metsäalueen hyödynnettävän jäädytysenergian määrittämiseen käytetään hyväksi Sundsvallin tuloksia ja simulaatioita. Kun hyödynnettävän energian ja häviöiden määrä on saatu hahmoteltua, aletaan pohtia sopivan varaston kokoa ja sinne kerättävän lumen määrää.

Energiantuotantolaskelmat aloitetaan määrittelemällä vuoden jokaiselle päivälle lämpötilojen keskiarvot. Lämpötilat ovat Klaukkalan sääasemalta vuosilta 2009–2014, joiden päiväkohtaisten lämpötilojen keskiarvot ovat näkyvissä kuvassa 16 (Sääpalvelu 2014). Kuvaan on myös lisätty arviot kallion ja maanpinnan lämpötiloista. Kallion lämpötila vakiintuu jo noin 10 metrin syvyydessä noin 5 °C:seen (Nylund 2010, 21).

Laskelmissa kallion lämpötilana on käytetty ulkolämpötilan ja 10 metrin syvyyden keskiarvoa, koska syvimmillään kalliolouhoksen kaakkoiskulmasta kallioseinämän korkeus on lähes 10 metriä. Maanpinnan lämpötila eroaa ilman lämpötilasta lähinnä pohjaveden ja auringon säteilyn takia. Tässä tutkimuksessa maanpinnan lämpötilan katsotaan mukautuvan ilman lämpötilan mukaan, mutta olevan melko tasainen johtuen pohjavedestä. Tasaisuuteen vaikuttaa myös varastoidun lumen lämpötilan tuoma vaikutus ympärillä olevaan ympäristöön. Pohjaveden lämpötilan on arvioitu vaihtelevan välillä 3–6 °C. (Nordell & Skogsberg 2000, 7–8.)



Kuva 16. Arviot ulkoilman, kallion ja maanpinnan lämpötiloista.

Kuvasta huomataan, että ilman lämpötila nousee kokonaisuudessaan plussan puolelle huhtikuun alussa, ja miinukselle siirrytään kokonaan marraskuun lopussa. Vuoden ulkoilman keskilämpötilaksi saadaan noin 5,77 °C. Sundsvallissa maanpinnan lämpötila eristeen alla on vaihdellut välillä 4–5 °C, joten kuvan 16 arvot ovat mielekkäitä (Skogsberg 2005, 20).

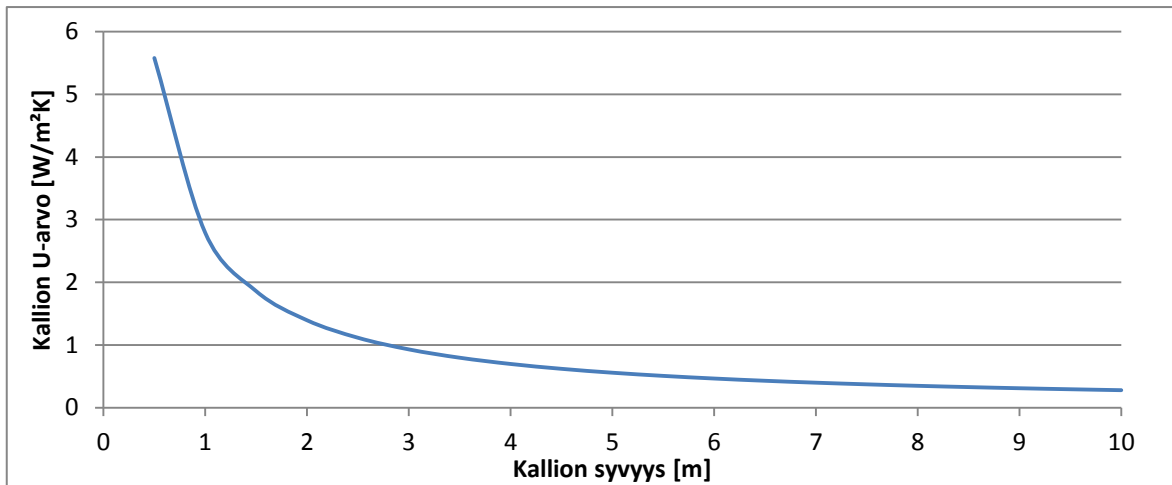
Aluksi oli tarkoituksena tehdä kokonaan eristetty malli, eli katollinen varasto. Täysin eristetyn rakennuksen suunnittelusta luovuttiin, koska kattorakenne olisi haastava toteuttaa ja siitä tulisi todennäköisesti suuri kustannuserä. Arkkitehdin kanssa pidetyssä

suunnittelukokouksessa päädyttiin pelkkään seinämärakenteeseen. Lisäksi katto rajaa varaston tilavuuden tiettyyn määrään, katottomassa järjestelmässä lunta voidaan varastoida ”rajattomasti”. Katon sijaan lumikasalle täytyy miettiä vaihtoehtoinen eristys, joka voisi olla esimerkiksi metsähake tai erillinen eristepeitto.

Mallinuksissa kuvan 15 kallioulouhoksen alueelle tehdään varasto, jonka pohjan alana käytetään aikaisemmin mitattua noin $3\,800\text{ m}^2$, kallion seinämän alaksi saadaan noin $1\,130\text{ m}^2$ ja rakennetun seinän korkeudeksi määritellään 5 metriä, jolloin seinän alaksi saadaan noin 560 m^2 . Lumimääräksi määritellään $30\,000\text{ m}^3$, jolloin rakennetun seinämän yläpuolelle jäisi vielä noin 3 metriä lunta. Tämä tarkoittaa, että kaakkoiskulmasta lumi nousee noin kallion tasolle ja muualta se on seinämää sekä muuta kalliota korkeammalla. Seinän ja osalta kalliota ylimeneväksi pinta-alaksi saadaan noin 650 m^2 . Tämä altistaa sen hieman enemmän lämpöhäviöille. Alkuarvoksi pinnan alaksi määritellään noin $4\,000\text{ m}^2$, joka on hieman pienempi kuin alussa oleva avoin pinta-ala. Tässä on otettu huomioon pinta-alan pientyminen yhdellä arvolla laskennan yksinkertaistamiseksi. Laskennan yksinkertaistamiseksi myös muut pinta-alat säilyvät vakioina. Hyvin eristetyssä järjestelmässä se ei aiheuta merkittäviä epätarkkuuksia. Kallioulouhoksesta tehdään kolme erilaista mallia, jotka eroavat toisistaan eristeen osalta. Eristeinä käytetään eristepeitettä (malli I) sekä metsähaketta 0,2 metrin kerroksella (malli II) ja 0,1 metrin kerroksella (malli III).

Maanpohjana mallissa käytetään samanlaista kuin Sundsvallin lumijäähdytyksessä, eli vesitiivistä asfalttia, soraa, eristekerrosta sekä hiekkaa. Tämän pohjan U-arvoksi saadaan noin $0,3\text{ W/m}^2\text{K}$. (Skogsberg 2005, 41.) Pohjan lämmönläpäisykerrointa on helppo parantaa kasvattamalla eristepaksuutta, mutta pohjan pinta-alan ollessa lähes $4\,000\text{ m}^2$ voivat kustannukset kasvaa merkittävästi. Rakennetun seinän tarvittavaa paksuutta on hankala arvioida oikeaksi lumen suuren massan takia. Tähän vaiheeseen kuitenkin riittää, että lämmönläpäisyyluku saadaan riittävän lähelle. Rakennetun seinän U-arvona käytetään tässä vaiheessa varovaista arvoa $0,5\text{ W/m}^2\text{K}$.

Kallio on korkeimmillaan lähes 10 metrinen. Suomessa kallioperä on yleisimmin graniittia, jonka lämmönjohtavuus on $2,79 \text{ W/mK}$ (Incropera et al 2007, 940). Kuvassa 17 on esitettyä yksinkertainen piirros kallion U-arvon muutoksesta syvyyden funktiona.



Kuva 17. Kallion U-arvo syvyyden funktiona.

Kuvasta huomataan, että noin kolmen metrin syvyydessä kallion U-arvo laskee alle yhden. Sitä ennen U-arvo on huomattavan korkea. Jotta pintakalliota pystytään merkittävästi hyödyntämään, tulisi kallioseinämän olla riittävän syvä, jolloin lämpövuodot ympäristöön pienenevät. Laskennan yksinkertaistamiseksi kallion keskimääräisenä U-arvona käytetään $0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$. Perusteluina ovat lumen sulamisen myötä lumen pinnan vajoaminen syvemmälle kallioon, jolloin U-arvo laskee verrattuna pintaan. Vuosittain lämpövuodot pienenevät, koska lumi viilentää kalliota kesäisin ja talvella viilentävä vaikutus syntyy ulkoilman matalasta lämpötilasta. Vuosittaista pienenemistä ei kuitenkaan oteta huomioon laskelmissa.

Eristeepitteen oletetaan pitävän sateen ja auringon säteilyn kokonaan varaston ulkopuolella. Sen myös oletetaan olevan läpäisemätön, eli kosteus ei siirry sen lävitse. Eristeepitelle käytetään U-arvoa $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tämä olisi esimerkiksi noin 35 mm polyesterivanu lämmönjohtavuusarvolla $0,054 \text{ W/mK}$. (Mäkelä 2002, 23.) Päälipuolisen pinta-alan oletetaan pysyvän jälleen vakiona arvossa $4\,000 \text{ m}^2$. Lopulliset lämpöhäviöt

lasketaan jokaiselle rakenteelle erikseen yhtälöllä 4. Lämpöhäviöt muutetaan päiväsulamiseksi kuutioina yhtälöllä.

$$\Delta V = \frac{Q \cdot 86\,400 \frac{s}{d}}{24 \frac{h}{d} \cdot \rho \cdot s} \quad (11)$$

Missä

ΔV sulamisnopeus, [m³/d]

Q lämpöhäviö, [kWh]

Käytettäessä eristeenä metsähaketta, varasto altistuu suuremmille lämpöhäviöille johtuen esimerkiksi sateesta ja auringon säteilystä. Sulamista tapahtuu myös muun muassa kosteudensiirtona eristepinnan läpi. Auringolle ja ilmalle avointa lumen pinta-alaa on noin 4 000 m², koska lumi muodostuu hieman kekomaiseen muotoon. Pinnan sulamisen määrittelyyn käytetään hyväksi Skogsbergin (2005) esittämää yhtälöä.

$$SMR = -0,09 + 0,00014 \cdot P_{aurinko} + 0,0575 \cdot T_{ilma} + 0,0012 \cdot T_{ilma} \cdot v_{tuuli} - 0,18 \cdot T_{ilma} \cdot z \quad (12)$$

Missä

SMR *surface melt rate*, pinnan sulaminen, [kg/m²,h]

$P_{aurinko}$ auringon säteilyteho, [W/m²]

T_{ilma} ulkoilman lämpötila, [°C]

v_{tuuli} tuulen nopeus, [m/s]

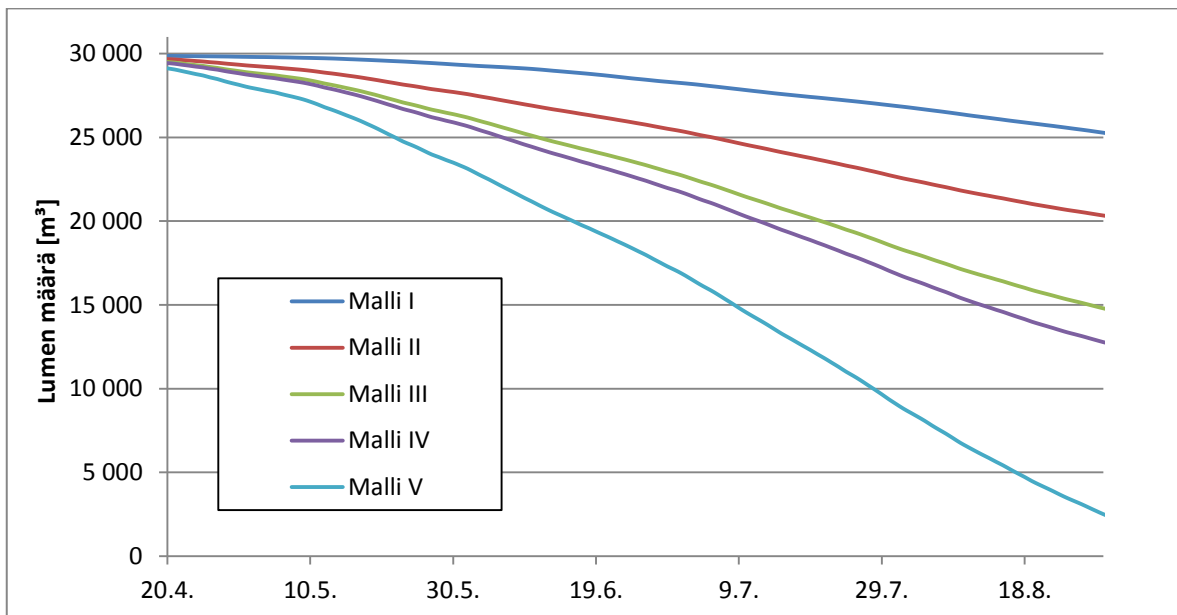
z eristekerroksen paksuus, [m]

Kyseinen yhtälö hieman vääristää todellista tilannetta, mutta antaa tähän tilanteeseen riittävän tarkan kuvauksen pinnan sulamisesta. Laboratoriomittauksissa laatikon pohjalle asetettiin lunta, joka eristettiin eri paksuisilla eristekerroksilla. Tuulettimen avulla laatikkoon johdettiin ilmaa, josta mitattiin lämpötila ja suhteellinen kosteus. Aurinkoa kuvasi kolme lamppua laatikon yläreunassa. (Skogsberg & Lundberg 2005, 4.)

Auringon säteilytehon, tuulen nopeuden sekä vesisateen määrän tilastotiedot on otettu Suomen Sääpalvelusta Klaukkalan sääasemalta, ja vuosien 2009–2014 lukemat ovat näkyvissä liitteessä 3. Sateesta johtuva lämpöhäviö lasketaan yhtälöllä 3. Pohjan, kallion ja rakennetun seinän lävitse tulevien lämpöhäviöiden laskentatapa säilyy ennallaan. Pinnalta avoimesta mallista tehdään kaksi käyrää, joista toisessa käytetään eristeenä 0,2 metrin kerrosta metsähaketta (malli II) ja toisessa 0,1 metrin kerrosta (malli III).

Neljäs ja viides malli käsittelevät metsäaluetta. Sen luonnolliseen sulamiseen on käytetty hyväksi Sundsvallin tuloksia, mutta säätiedot ovat paikallisia. Neljännessä mallissa pinnan eristeenä on 0,2 metrin kerros metsähaketta (malli IV) ja viidennessä mallissa 0,1 metrin eristekerros (malli V). Varaston tilavuudeksi määritellään tässä vaiheessa myös $30\,000\text{ m}^3$, jotta kaikkia malleja pystytään vertailemaan. Todellisuudessa metsäalueessa olisi paljon pelivaraa, koska alueella vapaana oleva pinta-ala on laaja ja syvyyttä voidaan kasvattaa pohjaa kaivamalla. Metsäalueen altaan syvyydeksi määritellään neljä metriä, pituudeksi 125 metriä ja leveydeksi 60 metriä. Nyt pohjaksi lasketaan varsinainen pohja sekä sivut, jotka jäävät maan alle. Samalla pinnan pinta-ala kasvaa, joten voidaan odottaa, että sulamista on enemmän kuin aiemmissa tapauksissa. Pohjan ja sivujen kautta tapahtuvaan lämpöhäviöön käytetään yhtälöä 4 ja pinnan kautta tapahtuvaan sulamiseen yhtälöä 12. Muut arvot säilyvät samoina.

Kuvassa 18 on esitettyä kaikki viisi mallia, eli mallit I-V, samassa kuvaajassa. Käyrät kuvaavat kunkin eri järjestelmän lumen luonnollista sulamista. Sulamisen on katsottu johtuvan ympäristön lämpöhäviöistä, sateesta ja pinnan sulamisen eri tekijöistä. Aikakseli alkaa huhtikuun 20. päivä, koska eri malleissa lumimäärä alkoi vähentyä pääasiassa 20–22. huhtikuuta.



Kuva 18. Lumen luonnollinen sulaminen eri järjestelmissä.

Kuvasta huomataan, että 30 000 m³ lumimäärästä edellisillä arvoilla kallioulouhoksen alueelle sijoitettavasta varastosta eristepeitteen avulla noin 80 % säilyisi elokuun loppuun, mallissa II noin 70 % ja mallissa III noin 50 %. Mallissa IV säilyisi noin 45 % ja mallissa V noin 5 %. Eri järjestelmistä hyödynnettävä energiamäärä katsotaan olevan elokuun lopussa lumimäärän energiasisältö, johon on lisätty varmuuskerroin. Varmuuskerroin sisältää muut häviöt ja sen perusteena on taulukon 7 tulokset Sundsvallista. Eristepiteelle käytetään 20 %:n kerrointa ja metsähakkeelle 10 %:n kerrointa, koska metsähakkeen laskemisessa käytettiin tarkempaa yhtälöä. Lisäksi eristepeitteen laskentatavassa oletettiin häviöiden olevan ainoastaan lämpöhäviöitä ympäristöstä, joten suurempi varmuuskerroin varmistaa muiden häviökertoimien mukaan laskemisen. Taulukkoon 11 on lisättyä kunkin järjestelmän mahdollinen energiamäärä, kun jokaisessa järjestelmässä alkuperäinen lumimäärä oli 30 000 m³. Kyseisen lumimäärän energiasisältö on noin 1 800 MWh.

Taulukko 11. Laskennallinen eri järjestelmistä hyödynnettävä energiamäärä.

		Malli I, kallio	Malli II, kallio	Malli III, kallio	Malli IV, metsä	Malli V, metsä
Jäljellä oleva	lumimäärä [m ³]	25 100	20 200	14 500	12 500	2 000
	energiamäärä [MWh]	1 510	1 210	870	750	120
Hyödynnettävä	energiamäärä [MWh]	1 210	1 090	790	670	110
	energiamäärä [%]	66,9 %	60,5 %	43,5 %	37,4 %	6,0 %

Taulukossa jäljellä olevalla lumimäärällä ja energiamäärällä tarkoitetaan elokuun lopun tilannetta. Ajankohdaksi valittiin elokuun loppu, koska suurin jäädytystarve on yleensä elokuun jälkeen ohitse. Hyödynnettävän energiamäärään on huomioitu 20 %:n ja 10 %:n varmuuskertoimet. Hyödynnettävää energiamäärää voidaan pitää melko luotettavana, jos niitä vertaillaan Sundsvallin tuloksiin taulukoissa 5 ja 6. Metsäalueen tulokset ovat huonompia kuin Sundsvallissa, koska mallissa käytettiin hyvin yksinkertaista rakennetta altaana. Kallioulouhoksen tulokset ovat hieman parempia, mikä voidaan perusteella pienemmästä pinnan pinta-alasta. Energian kannalta pohdittuna kannattaa jättää mallit III–V tarkastelusta pois.

5.1.1 Varaston ja tekniikan mitoitus

Edellisen kappaleen perusteella laskennat tehdään kallioulouhoksen mallien I ja II tulosten perusteella. Metsäalue ja pienemmät eristekerrokset jätetään pois, koska hyödynnettävä energiamäärä on vähäinen. Aikaisempien mittausten mukaan alueelle voisi tehdä varaston, jonka tilavuus olisi noin 30 000 m³, riippuen lumikasan korkeudesta. Taulukossa 11 on näkyvissä eri järjestelmien jäädytykseen hyödynnettävät energiamäärät. Kuvassa 19 on esitetty hahmottelupiirros lumivarastosta 30 000 m³:n lumikuormalla. Liitteessä 4 on esitetty lumivaraston asemapiirros ja liitteessä 5 leikkauskuvat.



Kuva 19. Lumivaraston hahmottelupiirros.

Lumesta hyödynnettävän energian määrä rajoittuu pitkälti putkien ja pumppujen siirtokykyyn sekä lämmönsiirtimeen tehokkuuteen. Tekniikan komponenttien alustavassa mitoituksessa keskitytään lähinnä tehoihin ja halkaisijoihin, eikä syvennytä esimerkiksi lämmönsiirtoalan määrittämiseen tai tarkempaan tyyppimäärittelyyn. Alustava mitoitus alkaa lämmönsiirtimeen tehon määrittämisestä. Tehon määrittämisen myötä saadaan selville lämmönsiirtimeen läpi menevä massavirta, kun tiedetään lämpötilaerot putkistoissa. Massavirran avulla voidaan määrittää putkikoot ja siirtyä pumppujen mitoitukseen, joissa otetaan huomioon siirtomatkat. Muiden komponenttien valinnat, esimerkiksi suodattimien mitoitus, tehdään edellisten arvojen perusteella.

Kappaleessa 4.2.2 määritettiin Hissitehtaan ja Heveksen tämänhetkiseksi jäädytystehoksi 1 230 kW ja energiankulutukseksi 1 605 MWh ja mahdolliseksi tulevaisuuden jäädytystehoksi 2 285 kW ja energiankulutukseksi 2 675 MWh. Lämmönsiirtimeet pyritään mitoittamaan tämänhetkistä tehoa varten, jolloin lämmönsiirtimeiden tehoksi määritetään 1 400 kW. Kyseisellä teholla lumijäädytyksellä voitaisiin kattaa kokonaan tämänhetkinen kulutus ja yhdessä tämänhetkisillä koneilla voitaisiin kattaa tulevaisuuden tarve. Todennäköisesti huipputehoilla lumijäädytys ei yksistään riitä, joten se toimisi

jäähdytyskompressorien kanssa yhdessä. Lämmönsiirtimet jaetaan kahteen osaan, joista toinen menee Hevekselle ja toinen Hissitehtaalalle. Molempien siirtimien tehoksi määritellään 700 kW. Tämä on Heveksen nykyisestä tehosta noin 90 prosenttia ja Hissitehtaan tehoon verrattuna lähes kaksinkertainen. Tulevaisuuden tarpeessa Hissitehtaan tehontarpeen lisäys on merkittävästi suurempi, minkä takia sinne sijoitetaan jo tässä vaiheessa suuri lämmönsiirrin. Sundsvallissa lämmönsiirtimen lämpötilaero oli 3,6 K. Tähän kohteeseen lämmönsiirrin kuitenkin mitoitetaan lämpötilaerolla 5 K. Näillä arvoilla saadaan yhtälön 10 mukaan lämmönsiirtimen läpi meneväksi massavirraksi 700 kW:n teholla

$$q_m = \frac{\Phi}{c_p(T_m - T_p)} = \frac{700 \text{ kW}}{4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 5 \text{ K}} = 33,3 \text{ kg/s}$$

Lämmönvaihtimien toimiessa täydellä teholla putkistossa menevän veden massavirta on 33,3 kg/s. Kappaleessa 2.2 mainittiin, että kaukojäähdytyksen kylmävesi rajoittaa putkissa menevän veden virtausnopeuden välille 1–2 m/s. Veden tiheyden ollessa 1 000 kg/m³ jäähdytysputken poikkipinta-alaksi saadaan

$$A = \frac{q_m}{\rho v} = \frac{33,3 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{1\,000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0,022 \text{ m}^2$$

Kun poikkipinta-ala on 0,022 m², putken sisähalkaisijaksi saadaan noin 0,167 metriä. Varastosta lähtevä putki kuljettaa tietyn matkan jäähdytysvettä molempiin kohteisiin, jolloin putken pitää olla riittävä molemmille lämmönsiirtimille. Tällöin massavirta on 66,7 kg/s, putken poikkipinta-ala 0,044 m² ja putken sisähalkaisija 0,238 metriä. Alkumatkan yhteisen osan putkikoko voisi olla DN250, jolloin virtausnopeus olisi 1,36 m/s. Rakennuksille menevien putkien kooksi valitaan DN150, jolloin virtausnopeudet ovat 1,88 m/s. Molemmat nopeudet ovat vielä hyväksyttäviä.

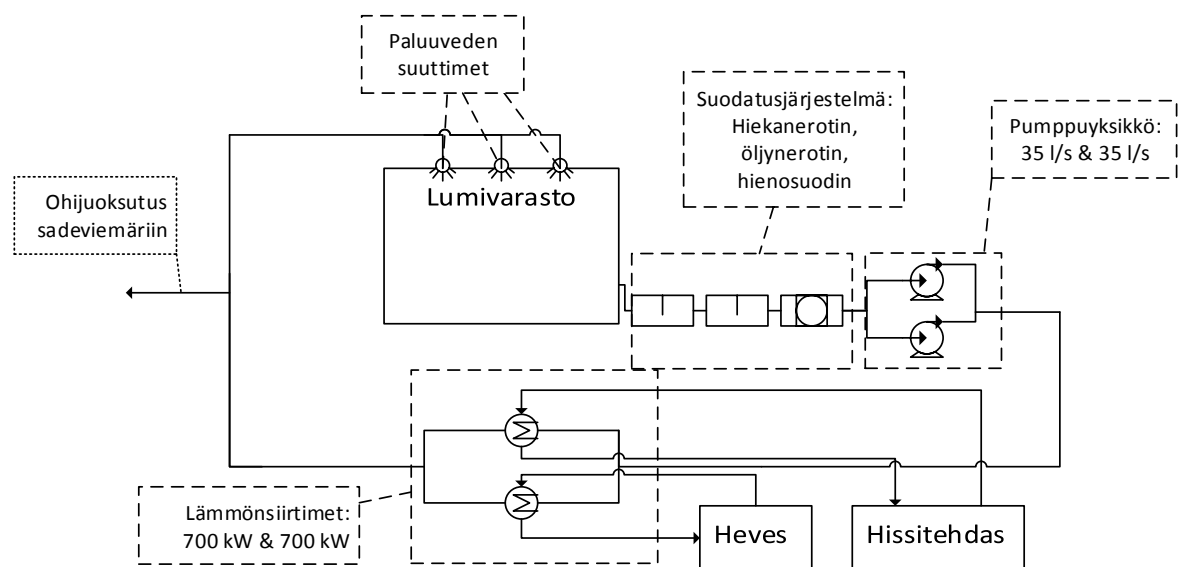
Pumput mitoitetaan lämmönsiirtimen toiminta-arvojen mukaisille virtaamille. Massavirtana käytetään arvoa 66,7 kg/s, joka on 1 000 kg/m³:n tiheydellä tilavuusvirraksi muunnettuna 0,0667 m³/s. Painehäviöt määritetään aikaisemmin mainitulla yhtälöllä 9. Moodyn-käyrästä saadaan kitkakertoimet, jotka ovat edellä mainituille arvoille noin 0,0135–0,014. Kertavastukset Hissitehtaan osuudella ovat arviolta 1,4 ja Hevekselle päin 2,2. Verkoston pituudessa on huomioitu suorin reitti rakennuksille sekä meno- ja paluuputkisto. Painehäviöiksi saadaan yhteiselle osuudelle noin 3 kPa, Heveksen putkiosuudelle noin 90 kPa ja Hissitehtaalte noin 70 kPa. Oletetaan painehäviöiden olevan yhteensä noin 210 kPa, johon sisältyy esimerkiksi lämmönsiirtimistä, venttiileistä ja muista komponenteista sekä mahdollisista nousuista aiheutuva painehäviö. Pumpun hyötysuhteena käytetään tässä vaiheessa arvoa 0,7. Maksimipumppaustehoksi saadaan yhtälön 8 mukaan

$$P = \frac{q_v \Delta p}{\eta} = \frac{0,0667 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 210 \text{ kPa}}{0,7} = 20,01 \text{ kW}$$

Pumppuja kannattaa todennäköisesti asentaa kaksi rinnakkain, koska nostokorkeus ei ole suuri, mutta tilavuusvirran vaihtelu on. Rinnankytkennällä järjestelmään saa paremman säädettävyyden, ja hyötysuhde säilyy hyvänä suurella toiminta-alueella. Säädettävyyttä voidaan vielä parantaa taajuusmuuttajien avulla.

Muihin komponentteihin kuuluvat esimerkiksi hiekan ja öljyn erottimet, esisuodattimet, hienosuodattimet sekä muut pienlaitteet. Kyseiset komponentit mitoitetaan pääasiassa putkikoon ja tilavuusvirran mukaan. Hiekoitushiekan kulkeutuminen putkistoon tulisi minimoida varaston pohjan järkevällä suunnittelulla. Loput hiekat ja muut karkeat epäpuhtaudet estetään asentamalla riittävä välppä putken suulle. Välppän koko määritetään raekoon mukaan. Öljyerottimella saadaan puhdistettua lumessa olevat epäpuhtaudet. Hienosuodattimilla suojataan pumppuja ja lämmönsiirtimiä, ja ne pyritään mitoittamaan laitteiden vaatiman puhtauden mukaisesti. Näitä komponentteja ei tässä vaiheessa mitoiteta, mutta niiden hinnat pyritään arvioimaan riittävän tarkasti talouslaskelmissa.

Tekniikan osalta valmistajilta pyydettiin apua mitoituksen arvoista ja soveltuvuudesta sekä arvioita kustannuslaskennasta. Edellä mainitut arvot soveltuivat lämmönsiirtimiin, pumppuihin ja erottimiin. Lämmönsiirtimiin *Danfoss* suositteli avattavaa mallia XGC-X042-L-5-PR-117-D. Kyseinen malli edellyttää suodatinta, jonka erotusaste on vähintään 1 mm. Avattavuuden ansiosta se on helppo puhdistaa myös kesken jäähdytyskauden sulamisvedestä tulevista epäpuhtauksista. (Vitikainen 2014.) Pumppuihin *Wilo* suositteli kahta IL-E 80/170-15/2-RI-pumppua. Pumpuissa on taajuusmuuttajat, jolloin niiden säädettävyys on hyvä. Myös pumppujen edellyttämä suodattimien erotusaste on noin 1 mm. (Aaltonen 2014.) Erottimiksi *Wavin-Labko* suositteli monivaiheista järjestelmää, johon sisältyisi virtauksensäätökaivo, hiekan- ja öljynerottimet, pienhiukkaserotus sekä näytteenottoaivo. Kyseinen järjestelmä erottaa 75 µm:n partikkelit, jolloin erotuskyky on riittävä pumpuille ja lämmönsiirtimille. (Kauppi 2014.) Kuvassa 20 on kuvattu suunnitellun järjestelmän prosessikaavio.

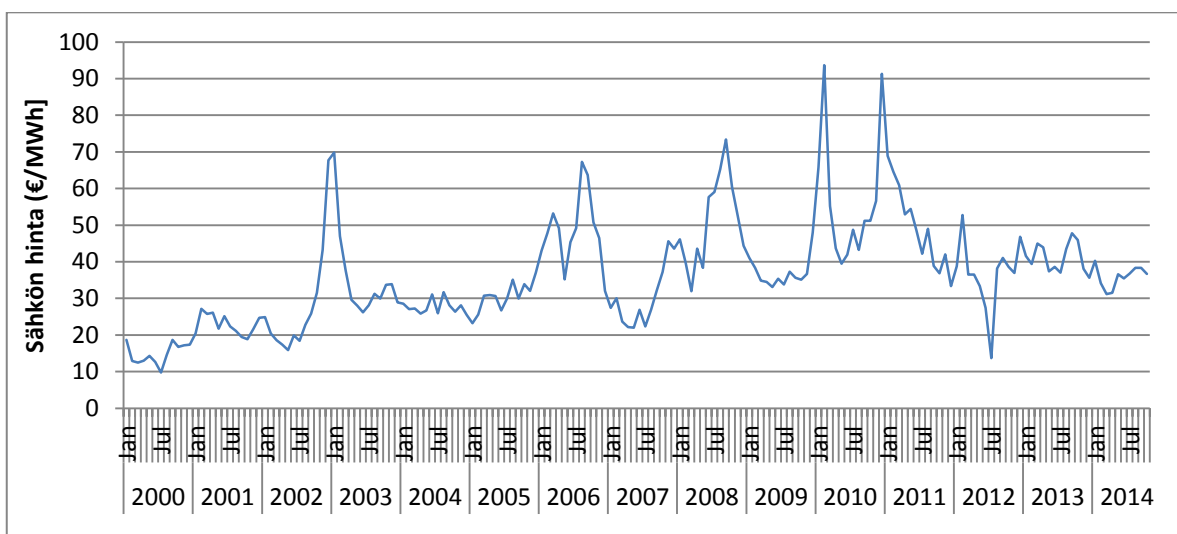


Kuva 20. Suunnitellun lumijäähdytysjärjestelmän prosessikaavio.

5.2 Lumijäähdytyksen taloudellisuus

Kappaleessa käydään läpi esiteltyyn lumijäähdytysjärjestelmään tarvittavat investointikustannus, käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä mahdolliset tukimuodot. Lopulliset kustannukset määräytyvät useista eri tekijöistä, jotka riippuvat pääasiassa hankkeen taloudellisista ja teknisistä reunaehdoista. Tekniset reunaehdot on esitelty aiemmissa kappaleissa kattavasti, mutta taloudellisiin reunaehtoihin ja sitä myöten hankkeen kannattavuuteen liittyy esimerkiksi uusiutuvan energian tukimuodot. Lumijäähdytysjärjestelmälle on ominaista kustannusten voimakas jakautuminen. Suurimmat kustannukset ajoittuvat rakennusajalle, jolloin käytönaikaiset kustannukset jäävät pienemmiksi.

Alueelle ostettava sähkö hankitaan suoraan sähköpörssistä, joten sähkölle ei ole kiinteää hintaa. Hankittavan sähkön hinta koostuu aluehinnasta sekä verosta. Siirtoverkkoyhtiönä alueella toimii Caruna Oy, jonka hinnoittelun mukaan siirtohinta koostuu huoltovarmuus-, kulutus- ja kuormitusmaksusta sekä valmisteverosta. Niistä koostuu kiinteähinta, joka on tällä hetkellä noin 12,21 €/MWh. Sähköpörssin hinta on noussut 2000-luvun alusta tähän hetkeen lähes 2,5-kertaiseksi, noin 15 eurosta/MWh hintaan 36 €/MWh. Kuvassa 21 on esitetty kuukausittaisen keskihinnan muutos 2000-luvulla. (Nordpool 2014.)



Kuva 21. Sähkön pörssihinnan kuukausittainen kehitys 2000-luvulla. (Nordpool 2014.)

Mahdollinen sähkön säästö ajoittuu kesäajalle, jolloin pitää ottaa huomioon kesäajan sähkönhinta. Kesäajan sähkönhinta on noussut keskimäärin 1,65 €/MWh vuodessa 2000-luvulla. Kyseistä arvoa käytetään myöhemmin kannattavuuslaskuissa, kun laskentaan otetaan huomioon tulevaisuuden sähkön hintoja. Myös siirtohinnan oletetaan nousevan samalla prosenttiosuudella. Tällä hetkellä sähköstä maksettava hinta on noin 48,58 €/MWh ja siirrosta 12,21 €/MWh, eli yhteensä 60,79 €/MWh. Myynti- ja siirtohinnoissa ei oteta huomioon kiinteitä perusmaksuja, koska mahdolliset säästöt sähkönkulutuksessa eivät niitä pienennä. Alueella maksettava vesimaksu on Hyvinkään Veden ilmoittama 1,75 €/m³ ja jätevesimaksu 2,8 €/m³ (Hyvinkään Vesi 2014). Veden kokonaishinnaksi saadaan 4,55 €/m³.

5.2.1 Investointi

Lumijäähdytysjärjestelmän investointikustannukset voidaan karkeasti jakaa varastoon, tekniikkaan ja muihin kustannuksiin. Varaston investointiin kuuluu pohjan, seinän, kallion ja teiden rakentaminen. Tekniikka jaetaan pumppuyksikköön ja muuhun tekniikkaan. Muut investointikustannukset koostuvat lopullisesta suunnittelusta sekä erilaisista asennuksista ja järjestelmistä. Liitteessä 6 on eriteltyä kunkin investointikomponentin kustannukset.

Lumijäähdytysjärjestelmän varaston pohjan rakennuskustannusten arvioidaan olevan noin 145 000 euroa. Kustannuksiin sisältyvät kaivaukset, pohjatyöt, eristys ja päällystys. Rakennetun seinän kokonaiskustannus on arviolta noin 195 000 euroa. Kallion louhimiseen ja pintakäsittelyyn kuluu arviolta noin 25 000 euroa. Uusien kulkureittien ja aitarakennelmien rakentamiseen kuluu arviolta noin 50 000 euroa. Yhteensä varaston rakentaminen kustantaa noin 415 000 euroa. Liitteessä 6 on esitetty kunkin osakokonaisuuden selitykset ja hintojen lähteet.

Pumppuyksikön rakentaminen kustantaa noin 42 000 euroa, johon sisältyvät itse rakennus, pumput ja muut tarvittavat komponentit asennuksineen. Pumppujen osuus tästä on 14 000 euroa. Muusta tekniikasta jäähdytysputket asennuksineen ovat arviolta noin 55 000 euroa, lämmönsiirtimet 13 000 euroa sekä erottimet 40 000 euroa. Yhteensä tekniikan

kustannukset ovat noin 200 000 euroa, johon sisältyy myös arviot asennuksista ja varaston sisäisestä tekniikasta. Varaston sisäiseen tekniikkaan kuuluvat esimerkiksi paluuveden putkijärjestelmä ja viemärointi.

Muut kustannukset koostuvat erilaisista asennuksista ja järjestelmistä sekä koko hankkeen tarkemmasta suunnittelusta. Muiden asennuksien kokonaiskustannuksen arvioidaan olevan noin 5 000 euroa, valvonta- ja automaatiojärjestelmien noin 15 000 euroa ja suunnittelun noin 65 000 euroa. Tarkemmassa suunnittelussa otetaan kantaa muun muassa varaston lopulliseen kokoon, komponenttien mitoitukseen ja asennustöihin. Yhteensä muiden kustannusten arvio on noin 85 000 euroa.

Investointikustannuksiin otetaan vielä huomioon toteutumismuotovaraus eli riskivaraus. Poikkeukselliselle hankkeelle riskivaraus on 3 % koko investointikustannuksista, joka tässä tapauksessa on noin 21 000 euroa. (Haahtela & Kiiras 2014, 333.) Investointikustannukseksi saadaan yhteensä noin 720 000 euroa. Liitteessä 6 on näkyvissä tarkempi erottelu, jossa on selitetty kunkin osakokonaisuuden tarkemmat selitykset kustannuksineen ja lähteineen. Lähteinä on käytetty valmistajia, rakennusalan ammattilaisia sekä muita asiantuntijoita.

5.2.2 Käyttö- ja ylläpitokustannukset

Käyttö- ja ylläpitokustannukset koostuvat lähinnä sähkökustannuksista, vesikustannuksista, mahdollisista lumen hankintakustannuksista, jäädytyskauden aikaisista kustannuksista sekä jäädytyskauden jälkeisistä kustannuksista. Sähkökustannukset syntyvät pumpuista ja muista sähkölaitteista, esimerkiksi automaatiojärjestelmästä. Vesikustannuksia syntyy mahdollisesta verkoston täytöstä sekä talviaikana lumen jäädyttämisestä. Lunta täytyy ajoittain jäädyttää, jotta varastoa pystyy täyttämään järkevästi. Lumenhankintakustannuksia syntyy mahdollisesta keinotekoisesta lumesta ja tuodusta lumesta. Kauden aikaiset kustannukset syntyvät yleisistä huolto- ja ylläpitokustannuksista, esimerkiksi tarvittavan eristeen hankinnasta. Kauden jälkeisiin kustannuksiin kuuluu esimerkiksi lumivaraston siivous. Kustannusarviot ovat peräisin kiinteistössä toimivalta

ARE-talotekniikan henkilöstöltä sekä muilta eri toimijoilta. Tietojen lähteet on esitetty kappaleen lopussa olevassa taulukossa 12.

Kiinteisiin käyttö- ja ylläpitokustannuksiin lasketaan vuosittaiset huoltokulut sekä kauden jälkeiset kustannukset. Vuosittaiset huoltokulut arvioidaan alueen aluelämpöverkoston avulla, koska järjestelmät ovat samankaltaiset. Huoltoon sisältyvät muun muassa teknisten tilojen ja lämmönsiirtimien tarkastukset ja tarvittavat voitelut. Huoltokuluiksi on arvioitu 1 500 €/vuosi. Kauden jälkeisiin kustannuksiin sisältyvät muun muassa hiekan ja muun aineksen haku, suodattimien tyhjennys sekä altaan pesu. Hiekan hausta ei tule kustannuksia, koska nykyiseen tilanteeseen verrattuna hiekka kerätään vain eri paikasta. Altaan pesutyön oletetaan sisältyvän hiekan keruuseen, mutta vesikustannukset otetaan myöhemmin huomioon. Suodattimien ja erottimien tyhjennysten ja huoltojen on arvioitu kustantavan 1 500 €/vuosi.

Muuttuviin käyttö- ja ylläpitokustannuksiin lasketaan lumen hankinta, eristeet sekä sähkö- ja vesikustannukset. Lumen hankinta voi olla kustannus, tulo tai ilmainen energianlähde, riippuen näkökulmasta. Alueelta hankitun lumen voidaan katsoa olevan ilmaista, koska sen kerääminen ja läjittäminen ei muutu verrattuna edellisvuosiin. Ongelmia syntyy, jos lunta ei saada alueelta riittäväksi. Yksi vaihtoehto on ilmoittaa kunnalle vapaasta lumenläjityspaikasta, jolloin varastoon tuotaisiin lunta kaduilta. Esimerkiksi Sundsvallissa yhdestä lumikuormasta saatiin tuloa keskimäärin 16 €/kuorma. Luonnollisen lumen puuttuessa voidaan lumitykeillä tehdä lunta pakkaskeleillä. Skogsbergin (2005) väitöskirjassa esitettiin laskelma, jonka mukaan 100 000 m³:n lumimäärän tuottamiseen lumitykeillä kuluisi aikaa noin 100–500 tuntia. 8,5 %:n korolla hinnaksi muodostuu noin 19 000–35 500 euroa. (Skogsberg 2005, 55.) Tässä työssä edellisissä kappaleissa olevien laskelmien ja pohdintojen perusteella oletetaan, että suunniteltu lumivarasto saadaan täyteen alueen lumesta, jolloin lumen hankinnasta ei tule kustannuksia. Herkkyystarkasteluissa pohditaan tarkemmin vähälumisia talvia ja niiden vaikutuksia tuotantokustannuksiin.

Lumialtaan päällä olevana eristeenä voidaan käyttää esimerkiksi metsähaketta tai kiinteitä eristepeittoja. Metsähaketta täytyy uusia tietyn väliajoin, jotta sen eristävyys säilyy hyvänä.

Esimerkiksi Sundsvallissa metsähaketta täydennetään vuosittain ja 2–4 vuoden välein uusitaan kokonaan (Skogsberg 2005, 55). Tämän työn laskuissa metsähakkeen määräksi on asetettu 800 m^3 . Näin metsähaketta riittää $4\,000 \text{ m}^2$:n alueelle ja 0,2 metrin paksuiseksi kerrokseksi. Uusimisen kierroksi arvioidaan 2 vuotta. Metsätähdehakkeen hintana käytetään arvoa 20 €/m^3 , joka sisältää hakkeen kuljetuksen lumivarastolle. Hakkeen levitykseen voidaan käyttää esimerkiksi kauhakuormaajaa. Kuormaajien tuntihinnat ovat keskimäärin 80 €/h . 800 m^3 :n hakemäärän levittämiseen menee arviolta yksi työpäivä, eli kahdeksan tuntia. (Eskelinen 2014.) Metsähaketta käytettäessä hakkeeseen kuluu ensimmäisenä vuotena $16\,000$ euroa. Seuraavina vuosina kuluu $8\,000 \text{ €/vuosi}$, kun hakkeen uusimisen kierto on kaksi vuotta. Hakkeen levitys maksaa vuosittain 640 euroa. Hakkeen siivoamiseen ja erotteluun jäähdytyskauden loputtua arvioidaan kuluvan saman verran aikaa, jolloin kustannuksia syntyy myös 640 euroa. Metsähaketta käytettäessä ensimmäisenä vuotena kustannukset ovat yhteensä $17\,280$ euroa ja siitä seuraavina vuosina $9\,280$ euroa. Tässä työssä ei ole otettu tarkempaa kantaa metsähakkeen varastointiin ja kuivaukseen, mutta niiden kuluksi arvioidaan karkeasti olevan noin $1\,000$ euroa.

Eristepeittoja käytettäessä mahdollisesti säästettäisiin vuotuisissa kustannuksissa pidemmän käyttöiän ansiosta. Mäkelän (2002) raportissa käytettiin eristepeitteiden käyttöikänsä viittä vuotta. Samassa raportissa peitteen hinta oli $12,6 \text{ €/m}^2$. Narut, tarvikkeet ja betonipainot kustantavat noin $1\,000$ euroa. $4\,000 \text{ m}^2$:n peitemäärän levitykseen ja purkuun kuluu arviolta yhteensä 64 miestyötuntia. Jäähdytyskauden jälkeiseen pesuun ja varastointiin kuluu arviolta $1\,000$ euroa. Vuosikulukuksi muutettuna eristepeittoihin kuluisi noin $10\,300$ euroa ja niiden levittämiseen, purkamiseen ja varastointiin noin $4\,200$ euroa, eli yhteensä noin $14\,500$ euroa vuodessa. Hinnat on sovellettu tähän kohteeseen Mäkelän (2002) raportista. Ne ovat yli 10 vuotta vanhoja, mutta antavat riittävän arvion tähän tutkimukseen. Tämänhetkisistä kustannuksista yritettiin kysyä valmistajilta, mutta tietoja ei saatu. Eristepeittojen vuokraaminen tulisi kyselyjen mukaan liian kalliiksi.

Kappaleessa 5.1.1 määriteltiin, että pumppujen tarvitsema teho on noin 20 kW . Grundfosin pumppumitoitusohjelmalla määritettiin erillinen kulutusprofiili erilaisilla virtaamilla. Jäähdytyskaudeksi oletettiin 120 päivää eli $2\,880$ tuntia. Siitä pumput toimivat 100 % :n virtaamalla 480 tuntia, 75 % :n virtaamalla 480 tuntia, 50 % :n virtaamalla 480 tuntia ja

lopun 1 440 tuntia 25 %:n virtaamalla. Tuntimäärät arvioitiin jäädytystarpeen mukaan. Esimerkiksi täystehoa oletettiin tarvitsevan neljä tuntia päivässä, joka on ollut edellisten kesien huipputehon määrä hellepäivinä. Mitoitusohjelma laskee tällä kulutusprofiililla pumppujen energiankulutukseksi noin 31 MWh vuodessa. Muita sähkökustannuksia tulee tietokoneista ja automaatiojärjestelmistä. Lumitykkien käyttö suljettiin pois, joten niihin ei kulu sähköä. Koko järjestelmän vuosittainen sähkönkulutus on arviolta 35 MWh. Kun sähkön hinta on 60,8 €/MWh, sähkön kustannuksiksi saadaan noin 2 130 €/vuosi.

Vesikustannuksia syntyy mahdollisista verkoston täytöstä ja lumitykkien käytöstä sekä talviaikaisesta lumen jäädyttämisestä ja kauden jälkeisestä altaan pesusta. Aikaisemmin oletettiin, että lumitykkeitä ei tarvita lumen tuottamiseen, joten niihin ei kulu vettä. Verkostoa ei välttämättä tarvitse erikseen täyttää, jos sulamisvettä on riittävästi ennen jäädytyskauden alkua. Kustannuslaskelmissa otetaan huomioon verkoston täyttöön kuluva vesi, joka lasketaan verkoston tilavuuden mukaan. Putkikokojen ja -etäisyyksien perusteella verkoston tilavuudeksi saadaan noin 19,2 m³. Nykyisin talviaikana lumen jäädyttämiseen tarvittava vesi kuljetetaan kauhakuormaajien kauhallalla. Jos oletetaan, että yhden kauhallisen tilavuus on 3 m³ ja kauhallisia viedään kahden kuukauden ajan kerran päivässä, saadaan jäädyttämiseen kuluvaksi veden määräksi noin 180 m³. Altaan pesuun oletetaan kuluvan noin 0,05 metriä vettä neliometriä kohden, eli noin 190 m³. Näillä arvoilla vettä kuluu yhteensä noin 390 m³ yhden jäädytyskauden aikana. Vertailun vuoksi Sundsvallissa vettä kului alkuvuosina lähes 7 000 m³. Siellä kuitenkin lunta tehdään merkittävä määrä lumitykkeillä, joka selittää suuren veden kulutuksen. Veden hinta on 4,55 €/m³, jolloin vesikustannukset ovat noin 1 775 euroa jäädytyskaudessa.

Lumijäädytysjärjestelmän arvioidut käyttö- ja ylläpitokustannukset lähteineen ovat näkyvillä taulukossa 12. Hakkeesta on kaksi hintaa: ensimmäisen vuoden ja siitä seuraavien vuosien hinnat. Eristepeittojen kokonaishinta on kokonaiskustannus jaettuna viiden vuoden käyttöiällä.

Taulukko 12. Lumijäähdetyksen vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset.

	Selite	Kustannus [€]	Lähde
Kauden aikaiset kustannukset	Huolto- ja ylläpito	1 500	ARE talotekniikka
Kauden jälkeiset kustannukset	Hiekan poisto, altaan pesu, suodattimien tyhjennys	1 500	ARE talotekniikka
Lumen hankinta	Toimintatavat säilyvät ennallaan	0	Kone kiinteistöosasto
Eristeet	Hake, kuljetus, levitys	18 280 / 10 280	Hakevuori
	Eristepeatot, levitys, purku, pesu	14 500	Mäkelä (2002)
Sähkökustannukset	Pumppu, automaatio, yms.	2 130	Grundfos mitoitusohjelma
Vesikustannukset	Verkoston täyttö, lumen jäädytys, altaan pesu	1 775	Kone kiinteistöosasto

Kustannukset ovat karkeita arvioita, jotka saattavat vaihdella todellisuudessa merkittävästi. Arvioista puuttuvat tarkemmat tarkastelut esimerkiksi hakkeen käsittelystä jäähdityskauden jälkeen. Yhteensä vuosittaisiksi kustannuksiksi saadaan metsähakkeen kanssa ensimmäisenä vuotena noin 25 000 euroa ja sitä seuraavina vuosina 17 200 euroa. Eristepeatolla kustannukset ovat vuosittain noin 21 400 euroa. Eristeet aiheuttavat suurimmat epävarmuudet käyttö- ja ylläpitokustannuksiin. Esimerkiksi käyttöön vaikutus vuosittaisiin kustannuksiin on jopa tuhansia euroja.

5.2.3 Mahdolliset tukimuodot

Suomessa on mahdollista saada ELY-keskusten sekä työ- ja elinkeinoministeriön myöntämää investointitukea uusiutuvalla energialle. Tukea myönnetään sellaisiin ilmasto- ja ympäristömyönteisiin investointi- ja selvityshankkeisiin, jotka edistävät uusiutuvan energian tuotantoa tai käyttöä, energiansäästöä tai energiantuotannon tai -käytön tehostamista sekä vähentävät energiantuotannon tai -käytön ympäristöhaittoja. Energiatuella pyritään erityisesti edistämään uuden tekniikan käyttöönottoa. Näistä kohdista lumijäähditysjärjestelmä täyttää kaikki vaatimukset. Tuen ensisijaisena tavoitteena on parantaa hankkeen taloudellista kannattavuutta. Uuteen teknologiaan,

uusiutuviin energialähteisiin sekä energiatehokkuuteen liittyvien investointien suurin myönnettävä tuki on enintään 40 %. Vuonna 2014 myönnettiin tukia esimerkiksi pienvesivoimaloille, biomassalämpökeskuksille, aurinkovoimaloille sekä lämpöpumppuhankkeille, ja myönnetty tukiosuus vaihteli välillä 10–30 %. Tukihakemus tulee toimittaa paikalliseen ELY-keskukseen, jonka alueella investoitava hanke sijaitsee, ja tukea tulee hakea ennen hankkeen aloittamista. Yli viiden miljoonan euron ja uuden teknologian hankkeet käsitellään työ- ja elinkeinoministeriön energiaosastolla. (Energiatuki 2014.)

Innovaatorahoituskeskus Tekes rahoittaa yritysten, yliopistojen ja korkeakoulujen sekä tutkimusyksiköiden projekteja. Se on valtion virasto, joka on perustettu vuonna 1983. Rahoituksen kohteita ovat esimerkiksi tutkimus ja kehitys, kansainvälinen kasvu, demot ja pilotointi, nuorten innovatiivisten yritysten rahoitus sekä organisaation kehityksen rahoitus. Lumijähdytysjärjestelmä voitaisiin laskea tutkimus- ja kehityshankkeisiin sekä demoihin ja pilotointiin. Tutkimus- ja kehityshankkeissa rahoituksen tarkoituksena on parantaa tuotteiden ja palveluiden kilpailukykyä. Demot ja pilotointi on tarkoitettu uusien ratkaisujen kannattavuuden parantamiseen. Pilotointi voi olla esimerkiksi uuden prosessin testaamista. Tekesin rahoitus on avustusta tai lainaa. Nykyisin Tekes on yhä useammin lainarahoituksella mukana hankkeissa. Laina on matalakorkoista eikä siihen tarvita vakuuksia. Tarvittaessa osa lainasta voidaan muuttaa jälkikäteen avustukseksi. Rahoituksen tyyppi määräytyy lopulta hankkeen ja hakemuksen perusteella. (Tekes 2014.)

Haasteellista lumijähdytyksen rahoituksen hakemisesta tekee se, että se ei itsessään liity yrityksen tuotteisiin. Kuitenkin eri toimijoiden kanssa tekemä yhteistyö saattaisi vaikuttaa rahoituksen saamiseen. Lumijähdytysjärjestelmiä ei ole rakennettu Suomessa, mutta mielenkiintoa kyseistä tekniikkaa kohti varmasti löytyy. Eri toimijoiden avulla saataisiin apua esimerkiksi suunnitteluun, kunnossapitoon ja käytön optimointiin. Muiden toimijoiden osallistumista pohditaan tarkemmin kannattavuustarkasteluissa.

5.3 Tuotanto- ja käyttökustannukset

Tässä kappaleessa jäähdytysenergiantuotantokustannuksella tarkoitetaan omakustannehintaa, joka syntyy, kun tuotetaan tietty määrä jäähdytysenergiaa lumella. Omakustannehinnalla tarkoitetaan tämänhetkistä hintaa. Varsinaiset elinkaaritarkastelut tehdään kappaleessa 7.1. Tuotantokustannuksiin otetaan huomioon vuosittaiset käyttö- ja ylläpitokustannukset sekä investointikustannukset, jotka jaetaan hankkeen taloudelliselle käyttöajalle annuiteettimenetelmällä. Käyttökustannuksiin otetaan huomioon pelkästään käyttö- ja ylläpitokustannukset. Annuiteettimenetelmässä muutetaan investointikustannus tasasuuriksi eriksi tietyllä laskentakorolla ja pitoajalla käyttämällä annuiteettitekijää, joka määritellään yhtälön avulla.

$$c_{ni} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (13)$$

Missä

i	Laskentakorko, [-]
n	Pitoaika, [-]

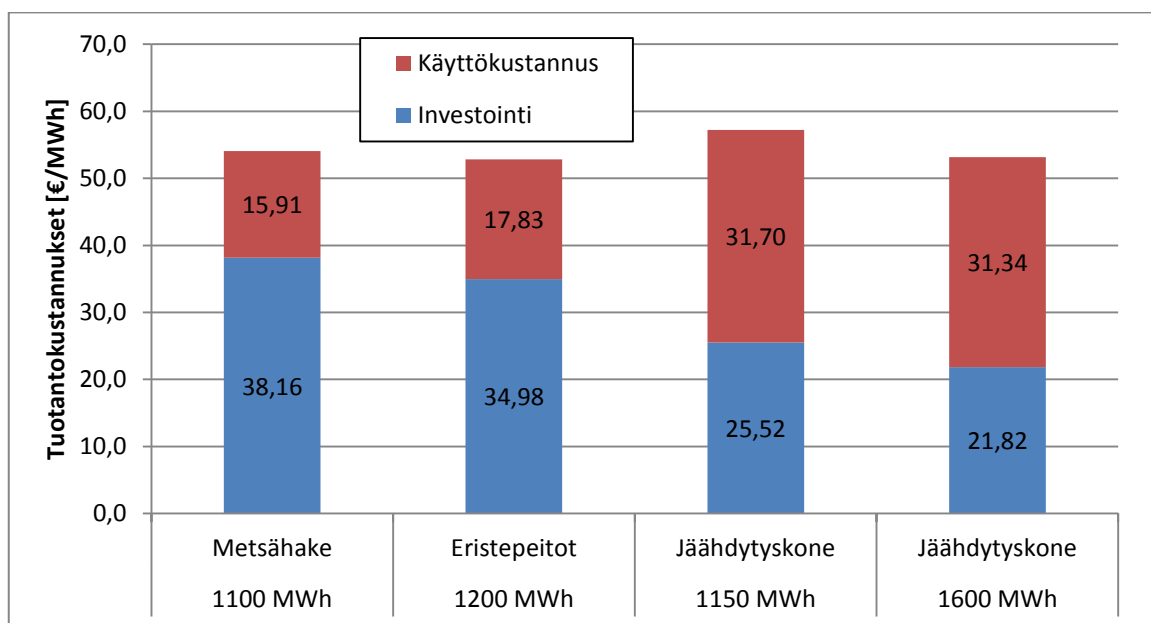
Uusille energiajärjestelmille voidaan käyttää laskentakorkona 5 %, ja lumijäähdytyksen pitoaikana käytetään 40 vuotta (Skogsberg 2005, 23). Kyseisillä arvoilla annuiteettitekijäksi saadaan 5,83 %. Edellisessä kappaleessa investointikustannukseksi saatiin noin 720 000 euroa, joka on 41 976 €/vuosi annuiteettimenetelmällä muutettuna. Vuotuisiksi käyttökustannuksiksi metsähakkeella saatiin ensimmäisenä vuotena noin 25 000 €/vuosi ja sitä seuraavina vuosina 17 200 euroa. Eristeitteiden käyttökustannukset ovat 21 400 euroa. Metsähakkeelle käyttökustannukset ovat 17 500 €/vuosi. Tämä on elinkaarikustannusten vuosittainen arvo 40 vuoden käyttöiällä. Yhteensä metsähakkeen vuosittaiset kustannukset ovat noin 59 500 euroa ja eristeitteiden noin 63 400 euroa, kun otetaan huomioon investointikustannuksen annuiteetti. Lumella tuotettua

jäähdytysenergiaa saadaan taulukon 11 mukaan 30 000 m³:n lumimäärällä eristepeitoilla noin 1 200 MWh ja metsähakkeella noin 1 100 MWh.

Tuotantokustannuksiksi saadaan metsähakkeen kanssa 54,07 €/MWh ja eristepeitoilla 55,99 €/MWh. Vastaavasti käyttökustannuksiksi tuotettua energiaa kohden saadaan metsähakkeella 15,91 €/MWh ja eristepeitoilla 17,83 €/MWh. Lumijäähdytysjärjestelmän tuotanto- ja käyttökustannukset ovat näkyvissä kuvassa 22.

Kuvaan on myös lisätty tämänhetkisten jäähdytyskompressoreiden käyttökustannukset ja arviot tuotantokustannuksista. Jäähdytyskompressoreista on kaksi kuvaajaa: yksi vastaa 1 600 MWh:n jäähdytysenergiaa ja toinen lumivaraston jäähdytysenergian keskimääräistä määrää 1 150 MWh. Nykyisten jäähdytyskompressoreiden huolto- ja ylläpitokustannukset ovat arviolta samat kuin lumijäähdytysjärjestelmässä eli 1 500 €/vuosi. Nykyisillä koneilla sähköä kuluu arviolta 800 MWh, jolloin sähkökustannukset ovat noin 48 640 €/vuosi. Käyttämällä COP-arvoa 2 saadaan 1 150 MWh:n jäähdytysenergiantuotannolla sähkökustannuksiksi noin 35 000 €/vuosi. Muita kustannuksia, esimerkiksi kylmäainevuotoja, pidetään vähäisinä eikä oteta tässä vaiheessa huomioon. Yhteensä jäähdytyskompressoreiden vuosittaisiksi käyttö- ja ylläpitokustannuksiksi saadaan 1 600 MWh:n tuotannolla noin 50 100 euroa ja 1 150 MWh:n tuotannolla noin 36 500 €/vuosi. Käyttökustannukset ovat tällöin 31,3 €/MWh ja 31,7 €/MWh.

Jäähdytyskompressoreiden tuotantokustannuksiin tarvitaan arvio jäähdytyskoneiden investoinnin suuruudesta. Investoinnin suuruus arvioidaan Heveksen uusittavien kompressoreiden, joissa tehoa kohden investointi on noin 475 €/kW, osalta (Saarela 2014). Käyttämällä pitoaikaa 25 vuotta, laskentakorkoa 5 % ja kylmäkoneiden kokonaistehona Heveksen ja Hissitehtaan vuoden 2015 tehoa, saadaan kompressorijäähdyttimien investoinnin vuosittaisiksi kuluiksi noin 41 500 €/vuosi. Käyttämällä 1 150 MWh:n jäähdytysenergiantuotantoa ja 1 160 tunnin käyttöaikaa, saadaan vuosittaisiksi kuluiksi noin 29 300 €/vuosi. Kuvassa 22 on näkyvillä lumijäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksien tuotantokustannukset.



Kuva 22. Lumi- ja kompressorijäähdytyksen tuotantokustannuksia eri jäähdytysenergian määrällä.

Kuvasta huomataan kustannuksien jakaantuminen eri järjestelmissä. Lumijäähdytyksessä kustannukset painottuvat investointivaiheeseen, kun taas kompressorijäähdyttimissä käyttökustannukset ovat merkittävämmät. Vertaamalla lumijäähdytystä ja jäähdytyskonetta 1 150 MWh:n jäähdytysenergiantuotannolla, on käyttökustannukset lumijäähdytyksen hyväksi 13,87–15,79 €/MWh ja investointikustannukset kompressorijäähdytyksen hyväksi 9,46–12,64 €/MWh.

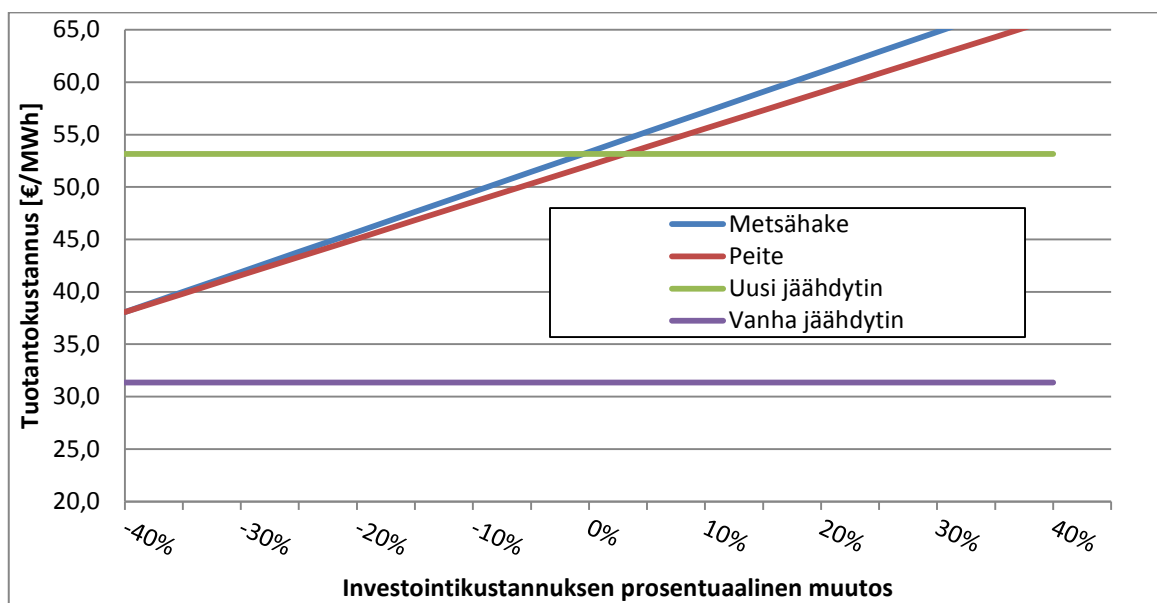
Tuotantokustannuksissa täytyy ottaa huomioon, että suunnitellulla lumivarastolla ei voida kattaa kokonaan Hissitehtaan ja Heveksen jäähdytystarpeita. Silloin täytyy ottaa huomioon käyttöasteet kummallekin järjestelmälle. Esimerkkinä tehdään laskelmat tämänhetkiselle jäähdytystarpeelle Hevekselle ja Hissitehtaalle aiemmin esitettyjen tietojen mukaan. Aiemmin esitettiin tämänhetkisen jäähdytysenergian kulutuksen olevan noin 1 600 MWh Heveksellä ja Hissitehtaalla. Eristepeittojen avulla lumivarastosta voidaan hyödyntää noin 1 200 MWh ja metsähakkeella noin 1 100 MWh. Tämä tarkoittaisi, että kompressoreilla pitäisi tuottaa jäähdytysenergiaa noin 25 ja 31,25 %. Kun otetaan huomioon lumijäähdytyksen tuotantokustannukset ja nykyisen järjestelmän käyttökustannukset, koko

jäähdytysjärjestelmän yhtenäiseksi tuotantokustannukseksi saadaan metsähakkeen kanssa 47,11 €/MWh ja eristepeittojen kanssa 47,59 €/MWh. Nämä ovat noin 16 €/MWh korkeammat kustannukset kuin nykyisen järjestelmän pelkät käyttökustannukset. Nämä ovat arvioita tuotantokustannuksista, mutta niissä ei ole tarkasteltu eri muuttujien ja elinkaaren vaikutusta. Eri muuttujien vaikutusta tarkastellaan seuraavassa kappaleessa ja elinkaaritarkastelu tehdään kappaleessa 7.1.

5.3.1 Herkkyystarkastelut

Projektin esisuunnitteluvaiheessa tehdyt arviot tuotantokustannuksista perustuvat aina jossain määrin epävarmoihin ja likimääräisiin laskentatietoihin. Herkkyystarkastelujen pohjalta pyritään arvioimaan eri kustannustekijöiden muutosten vaikutusta jäähdytysenergian tuotantokustannuksiin. Tässä tutkimuksessa tehtävät herkkyystarkastelut ovat yhden muuttujan tarkasteluja. Muuttujiksi pyritään valitsemaan arviolta epävarmimpia muuttujia. Alustavasti herkkyystarkastelut tehdään investointikustannusten ja lumen vaihtelevuuden suhteen.

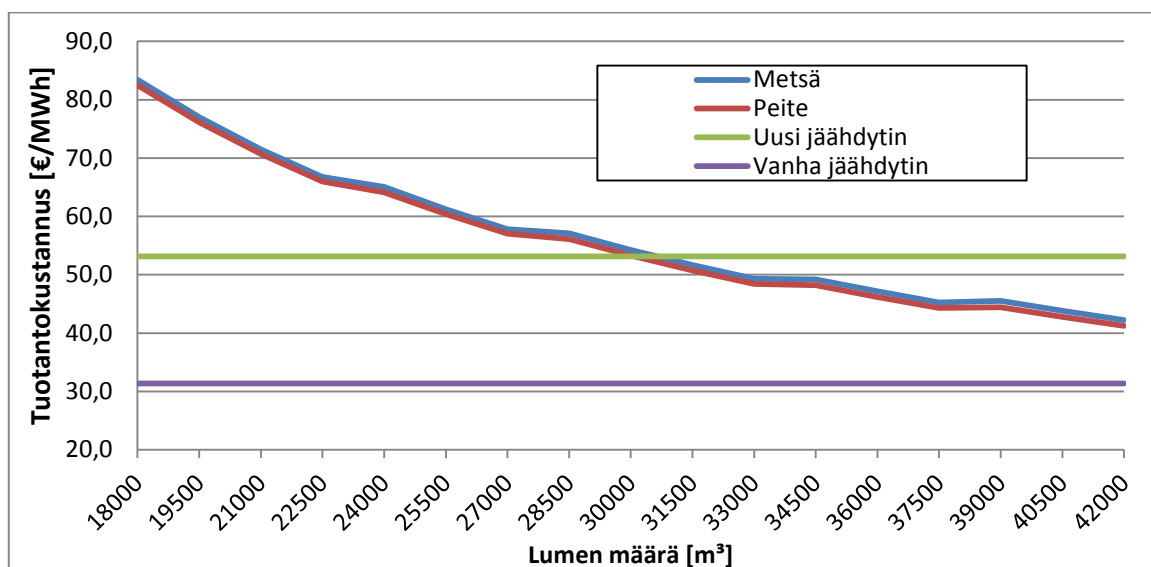
Investointikustannusten tarkastelussa tutkitaan investoinnin prosentuaalisen muutoksen vaikutusta lumijäähdytysjärjestelmän tuotantokustannuksiin. Niin sanotuksi nollatasoksi otetaan kappaleessa 5.2.1 esitetty investointikustannus, eli 720 000 euroa. Investointikustannuksen muutosta tutkitaan viiden prosenttiyksikön välein välillä -40–40 %, joka tarkoittaa rahallista vaihteluväliä 430 000–1 010 000 euroa. Käyttökustannukset pysyvät muuttumattomina kappaleen 5.2.2 mukaisesti. Kuvassa 23 on esitetty investointikustannusten muutoksen vaikutus lumijäähdytysjärjestelmän tuotantokustannuksiin. Kuvaan on myös lisätty mahdollisen uuden kompressorijäähdyttimen tuotantokustannukset sekä olemassa olevan kompressorijäähdyttimen käyttökustannukset. Kuvassa ”Metsähake” tarkoittaa metsähakkeellista eristystä, ”Peite” eristepeittöllistä eristystä, ”Uusi jäähdytin” uuden kompressorijäähdyttimen tuotantokustannuksia ja ”Vanha jäähdytin” olemassa olevan järjestelmän käyttökustannuksia.



Kuva 23. Lumijäähdytysjärjestelmän investointikustannuksien muutoksen vaikutus tuotantokustannuksiin.

Kuvaajan avulla voidaan pohtia järjestelmän kannattavuutta, jos järjestelmään saisi uusiutuvan energian investointituen. Esimerkiksi jos lumijäähdytysjärjestelmä saa 40 %:n tuen, kuvaajasta voidaan katsoa tuotantokustannukset -40 %:n kohdalta. Kuvasta huomataan, että vaikka investointikustannus olisi 40 % pienempi kuin alkuperäinen, ei varasto olisi taloudellisesti kannattava vanhaan järjestelmään verrattuna. Myös investointikustannusten pienentyessä eristeiden välisen kustannuseron vaikutus pienenee. Vastaavasti investointikustannusten kasvaessa kustannuseron vaikutus kasvaa.

Lumimäärän vaihtelun tarkastelussa määritetään kunkin lumimäärän energiasisältö sulamisenergian ja tiheyden arvolla 650 kg/m^3 . Lumesta hyödynnettävään jäähdytysenergiaan on otettu huomioon taulukon 11 tulokset. Hyödynnettävän osuuden oletetaan laskevan tasaisesti lumimäärän mukaan. Esimerkiksi käytettäessä metsähaketta eristeinä ja lumen määrän ollessa $40\,000 \text{ m}^3$, oletetaan lumesta hyödynnettävän jäähdytysenergiamäärän olevan 60 %. Muut arvot säilyvät alkuperäisinä. Kuvassa 24 on näkyvissä lumen määrän vaikutus tuotantokustannuksiin.



Kuva 24. Lumen määrän vaihtelu lumijäähdytysjärjestelmän kustannuksiin.

Kuvan käyrien portaisuus johtuu eri lumimäärien eri hyödyntämisasteesta. Kuvasta huomataan, että vähälumisina talvina lumijäähdytysjärjestelmää ei voi pitää lainkaan kannattavana. Kuvassa on kuitenkin tehty suuria oletuksia. Esimerkiksi lumen häviöt on oletettu säilyvän samanlaisina vaikka lumimäärä muuttuu. Kuvasta myös nähdään, että lumimäärän kasvaessa alkavat tuotantokustannukset vähentyä merkittävästi. Tämän perusteella lumijäähdyttäminen on kannattavaa suurilla lumimäärillä, jotka vaativat suuret jäähdytysenergiankulutuksetkin.

Taulukossa 13 on esitetty lumijäähdytyksen tuotantokustannuksia eri alkuarvoilla, kun sen rinnalla toimisi nykyinen kompressorijäähdytys. Taulukon laskelmissa on oletettu, että lumijäähdytyksen COP-kerroin on 20, vuotuiset huoltokustannukset 20 500 euroa ja lumesta hyödynnettävän jäähdytysenergian osuus vaihtelee tasaisesti lumimäärän mukaan. Sähkön hinta pysyy vakiona, koska sen vaikutus on melko vähäinen lumijäähdytyksen suuren COP-kertoimen ansiosta. Tuotantokustannuksiin on otettu huomioon myös investoinnin vaikutus. Investointikustannus pysyy vakiona kaikissa tapauksissa ja on sama kuin aikaisemmin mainituissa investointilaskelmissa.

Taulukko 13. Lumijäähdytyksen tuotantokustannuksia eri alkuarvoilla.

Jäähdytyksen tarve [MWh]	Lumimäärä [m ³]	Eriste [-]	Lumen osuus [MWh]	Lumen osuus [%]	Sähkönhinta [€/MWh]	Pitoaika [a]	Laskentakorko [%]	Tuotantokustannus [€/MWh]
1 500	10 000	Hake	421	28 %	60	20	7 %	213,26
1 600	40 000	Peite	1 443	90 %	60	40	3 %	38,80
1 800	20 000	Peite	782	43 %	60	40	5 %	82,93
1 900	30 000	Peite	1 172	62 %	60	40	3 %	47,06
2 100	50 000	Hake	1 203	57 %	60	40	5 %	54,96
2 400	40 000	Hake	962	40 %	60	30	5 %	73,02
2 700	20 000	Peite	782	29 %	60	40	3 %	69,10
2 700	50 000	Peite	1 503	56 %	60	40	5 %	44,57
3 000	60 000	Hake	1 082	36 %	60	20	5 %	75,35
3 000	60 000	Peite	1 443	48 %	60	40	7 %	54,65

Taulukosta huomataan, että huonoimmassa tapauksessa tuotantokustannukset nousevat yli 200 euroon/MWh. Kyseisessä tapauksessa lumimäärä olisi vähäinen ja laskentakorko korkea. Lumen osuus jäähdytyksessä olisi tällöin alle 30 %. Parhaassa tapauksessa lumijäähdytysjärjestelmän tuotantokustannukset olisivat hieman alle 40 €/MWh. Silloin vastaavasti lumimäärä olisi korkea ja käytetty laskentakorko matala. Lumen osuus jäähdytyksestä nousisi noin 90 prosenttiin. Taulukosta näkyy myös hyvin lumijäähdytyksen heikkous, eli lumimäärän vaihdella myös tuotantokustannukset vaihtelevat runsaasti. Tämä vaikeuttaa hankkeen kannattavuuden määrittelyä. Kompressorijäähdytykseen verrattuna tuotannon riskit ovat suuret vuosittain.

6 YMPÄRISTÖVAATIMUKSET

Kappaleessa käsitellään hankkeeseen liittyviä ympäristövaatimuksia. Ympäristövaatimukseen kuuluvat esimerkiksi ympäristölainsäädäntö, eri ryhmien näkökulmat, tarvittavat sopimukset ja luvat sekä vaikutukset ympäristöön. Tarkemmat luvat ja vaatimukset täytyy erikseen kysyä rakennuttajalta ja viranomaisilta, mutta tässä kappaleessa pohditaan olennaisimpia vaatimuksia. Ympäristövaatimuksista keskitytään tarkemmin käytön aikaisiin ilmastovaikutuksiin.

Suunniteltu lumijäähdytysjärjestelmä edistäisi uusiutuvan ja vihreän energian käyttöä vähentämällä sähköenergian käyttöä. Ympäristöministeriö tavoittelee vihreää kasvua, joka muun muassa vähentää ympäristökuormitusta, käyttää luonnonvaroja ja energiaa tehokkaasti sekä edistää uusiutuvien luonnonvarojen käyttöä. Maankäyttö- ja rakennuslain tavoitteena on muodostaa hyvät edellytykset elinympäristölle ja edistää ekologisesti, taloudellisesti, sosiaalisesti ja kulttuurillisesti kestävästä kehityksestä. (Ympäristöministeriö 2014.)

Suunnitellun hankealueen maa-alueet ovat yrityksen omistuksessa, joten niistä ei tarvitse tehdä erillisiä sopimuksia muuten kuin yrityksen sisäisesti. Rakennuslupaa tarvitsee todennäköisesti pumppuyksikön rakentamiseen, mutta ei varsinaisesti varaston seinämää varten. Seinä kuitenkin vaikuttaa merkittävästi maisemaan ja muodostaa kiinteän aidan, jolloin sitä varten vaaditaan todennäköisesti toimenpide- tai ilmoituslupa sekä maisematyölupa. Kohteen koosta riippuu kuuluuko se toimenpide- vai ilmoituslupan piiriin. Rakennuslupa haetaan Hyvinkään kaupungilta. (Hyvinkää 2014.)

Ympäristölupa tarvitaan toiminnoille, jotka aiheuttavat vaaraa ympäristölle. Suunniteltu lumijäähdytysjärjestelmän ei katsota aiheuttavan vaaraa ympäristölle, vaan päinvastoin. Tämän myötä myös ympäristövaikutuksen arviointimenettelyä (YVA) ei tarvita. Järjestelmän vaikutuksia ympäristöön pohditaan seuraavassa kappaleessa 6.1. (Ympäristö 2014.)

6.1 Vaikutukset ympäristöön ja niiden arviointi

Vaikutukset ympäristöön voidaan jakaa rakentamisen aikaisiin, käytön aikaisiin sekä käytöstä poiston aikaisiin vaikutuksiin. Lisäksi pohditaan ilmastovaikutuksia, erityisesti kasvihuonekaasuja.

Rakentamisvaiheessa ympäristövaikutuksia aiheuttavat liikenne, melu sekä yleiset rakentamisesta aiheutuvat melut. Alue sijaitsee yrityksen ulkotermiinalin läheisyydessä, joten liikenne ja melu eivät todennäköisesti aiheuta merkittävää lisäystä nykyisiin äänitasoihin. Jos työkoneet kulkevat Heveksen vierestä työmaa-alueelle, saattavat meluhaitat kulkeutua toimistotiloihin. Suurimmat meluhaitat todennäköisesti syntyvät mahdollisesta kallion lisälouhimisesta sekä putkivienneistä rakennuksiin. Putkiviennit kulkeutuvat todennäköisesti lähellä rakennuksia, jolloin niiden rakentamisesta aiheutuu meluhaittoja toimistoon. Työmaalta Hevekselle päin meluhaitat voidaan laskea vähäisiksi pitkän etäisyyden takia. Lähiasukkaita meluhaitat eivät myöskään haittaa suojaisen sijainnin ansiosta. Työaikana saattaa aiheutua tärinää mahdollisesta kallion louhinnasta ja pohjan tekemisestä. Rakennusmateriaalien ja -jätteiden ajosta ei aiheudu merkittävää haittaa, koska nykyisinkin alueen kautta kulkee rekkoja. Mahdollisia ympäristövaikutuksia aiheutuu vielä pölystä. Kuitenkin rakentamisvaiheessa ympäristöhaitat eivät ole merkittäviä verrattuna tavallisiin rakennusprojekteihin.

Käytön aikaiset ympäristövaikutukset ovat melu, varjostus ja visuaalinen vaikutus. Melua syntyy varaston täytöstä, joka ajoittuu talvelle. Nykyiseen tilanteeseen verrattuna haitta on vähäinen, johtuen ulkotermiinalialueesta sekä varaston suojaisesta rakenteesta. Ainoastaan Heveksen kautta tuotavat lumikuormat aiheuttavat vähäisiä meluhaittoja toimistotyöntekijöille. Lähiasukkaille ei synny melua käytön aikana. Varaston täyttö aiheuttaa lisäliikennettä ulkotermiinalialueella, jolloin liikennejärjestelyt on tehtävä uudelleen. Myös kallion päältä purettavat kuormat voivat aiheuttaa ruuhkaisia tilanteita Myllykadulle. Visuaalisesti rakennettu seinä muuttaa maisemaa pysyvästi, mutta se on pääasiassa näkyvillä vain Hissitehtaalta katsottuna, johtuen jälleen kallion tuomasta suojasta. Haitallisia varjostuksia rakennelmasta ei synny.

Lumivaraston rakentaminen vaikuttaa merkittävästi alueen käyttöön, koska laskennallinen käyttöikä varastolle on 40 vuotta. Varastoalue vie ulkotermiinalin vierestä noin 4 000 m² maa-alaa, jota voisi myös hyödyntää toisin. Maa-alueen lopullista käyttöä kannattaa pohtia tarkasti.

Lopettamisvaiheessa ympäristövaikutukset ovat samankaltaisia kuin rakentamisvaiheessa. Suurin osa lumivarastoon käytetyistä materiaaleista voidaan kierrättää hyötykäyttöön. Varsinaisia ongelmajätteitä varastosta ei jää.

6.1.1 Ilmastovaikutukset

Ilmastovaikutuksia syntyy käytön aikana sähkölukituksen pienentymisestä, epäpuhtauksien talteenotosta sekä kylmäaineettomuudesta. Mahdollisia säästöjä syntyy myös mahdollisesta hiekotushiekan talteenotosta, mutta siihen ei keskitytä tässä sen tarkemmin.

Sähkön kulutusta pienentämällä säästytään sähköntuotannon kasviuonekaasupäästöiltä, jotka käsitellään tässä tutkimuksessa hiilidioksidipäästöinä. Koko Suomen sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt ovat olleet edellisen kolmen vuoden aikana keskimäärin 140,5 g_{co2}/kWh. (CO₂-päästöt 2014, 13). Nykyiseen järjestelmään liitettynä sähköä säästyisi noin 600 MWh, joka on noin kuusi prosenttia koko Koneen Hyvinkään tehdasalueen vuosittaisesta sähkönkulutuksesta. Näillä arvoilla sähkön avulla säästetään hiilidioksidipäästöissä noin 84,3 t_{co2}. Kappaleessa 7.2 tehdään tarkemmat pohdinnat hankkeen ympäristöhyödyistä.

Lumen sisältämät epäpuhtaudet saadaan talteenotettua erilaisten suodattimien avulla. Lumeen kerääntyy saasteita muun muassa ilmasta, liikenteestä, eläimistä ja suoloista. Saasteiden määrä riippuu lumen sijainnista sekä sen maassaoloajasta. Lumen sulaessa suurin osa saasteista kulkeutuu sulamisveden kautta putkistoon, mutta osa myös jää varaston pohjalle. Turun kaupungin ympäristösuojelulautakunnan teettämässä tutkimuksessa (1985) selvitettiin kadulta kerätyn lumen sisältämiä epäpuhtauksia.

Sulamisvedessä kiintoainetta oli keskimäärin 32,9 g/l, josta hiekkaa oli 31,2 g. Vastaavasti yksi lumikuutio sisälsi kiintoainetta keskimäärin 15,6 kg, josta sulamisveteen siirtyi 0,85 kg. Öljyä oli 110 mg/l lumikuutiossa, mutta sulamisveteen sitä siirtyi ainoastaan 1,1 mg/l, eli noin 1 prosentin verran. Loput 99 % oletettiin haihtuvan sulamisen aikana. Raskasmetalleja, pääasiassa lyijyä, sinkkiä ja kadiumia oli alle 1 mg/l. Muista aineista typpiä ja fosforia löytyi keskimäärin 2–3 mg/l ja suoloja noin 26,6 g/l. (Ympäristönsuojelulautakunta 1985, 6–8.) Kyseiset tiedot ovat lähes 30 vuotta vanhoja ja eri käyttöalueelta, mutta ovat suuntaa-antavia. Lumen sisältämistä epäpuhtauksista pitäisi tehdä aina omat, aluekohtaiset mittaukset.

Lumijäähdytysjärjestelmällä voitaisiin myös hyödyntää hiekoitushiekan talteenottoa. Nykyisin talvisin käytetty ja keväällä kerätty hiekka sisältää epäpuhtauksia, jolloin se lasketaan ongelmajätteeksi. Ongelmajätteenä sitä ei voi käyttää uudelleen seuraavana vuonna, jolloin uudet hiekat pitää aina ostaa. Lumivarastoon jääneet hiekat ovat kerättävissä, jolloin erillisillä pesureille hiekat voitaisiin pestä. Pesun jälkeen hiekka olisi uudelleen käytettävissä. Säästöjä syntyisi hiekan uudelleenkäytöstä. Hiekan pesu voitaisiin järjestää joko tehdasalueella tai ulkopuolisella toimijalla. Käyttämällä ulkopuolista toimijaa, syntyisi suuret kustannukset hiekan kuljettamisesta. Tehdasalueella pesun voisi järjestää liikutettavalla pesuautolla tai hankkimalla oman pesurin. Hiekan pesun kannattavuuteen ei tässä tutkimuksessa tarkemmin puututa, vaan ilmoitettiin sen mahdollisuus.

Lumijäähdytysjärjestelmän muita ilmastohyötyjä ovat todennäköisesti vähentyvät kylmäainevuodot. Alueen kylmäkoneissa on pääasiassa vuoden 2015 jälkeen käytössä fluorihilivetyjä, eli HFC- ja PFC-kylmäaineita. Ne ovat otsonihaitattomia, mutta merkittäviä kasvihuonehaitallisuuden kannalta. Esimerkiksi Hissitehtaalla käytettävän R134a-kylmäaineen kasvihuonekaasuhaitallisuus on 1 300. Tämä tarkoittaa, että se on 1 300-kertaisesti haitallisempi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi. (Kianta 2008, 1–5.) Tarkemmin kylmäainevuotoihin ja niiden vähentymiseen ei puututa, koska vuotojen vähentymistä on haastavaa arvioida.

7 PROJEKTIN KANNATTAVUUS

Projektin kannattavuutta tarkastellaan taloudellisesta, ympäristöllisestä sekä yrityksellisestä näkökulmasta. Taloudelliseen kannattavuuteen liittyy edellisissä kappaleissa käytyt talouslaskelmat, joiden perusteella voidaan laskea lumijäähdytysjärjestelmälle takaisinmaksuaika eri menetelmillä. Taloudellisessa näkökulmassa otetaan kantaa myös lumijäähdytyksen ja kompressorijäähdytyksen tuotannon jakaantumiseen jäähdytyskauden aikana. Ympäristöllinen kannattavuus syntyy muun muassa ostoenergian vähentymisestä johtuvasta kasvihuonekaasupäästöjen pienentymisestä ja lumen epäpuhtauksien talteenotosta. Yrityksellistä kannattavuutta pohditaan työskentelyolosuhteiden parantumisen, maa-alueiden käytön ja lumijäähdytyksen valtakunnallisen käytön kannalta.

7.1 Taloudellinen

Hankkeen taloudellista kannattavuutta tarkastellaan pohtimalla lumijäähdytysjärjestelmän soveltuvuutta nykyiseen jäähdytysjärjestelmään ja mahdolliseen tulevaisuuden jäähdytysjärjestelmään. Nykyiseen jäähdytysjärjestelmään liitettynä säästöjä syntyy sähkön käytön vähenemisestä. Myös mahdollinen jäähdytyskauden piteneminen on lumijäähdytysjärjestelmän hyväksi elinkaaritarkastelussa. Nykyiseen järjestelmään verrattessa taloudellinen tarkastelu tehdään nykyarvomenetelmällä. Nykyarvomenetelmässä mahdolliset säästöt diskontataan nykyhetken tietyllä korkokannalla. Investointi katsotaan kannattavaksi, jos nettotuotot ovat suuremmat kuin investointi riittävässä ajassa. Nettotuotoiksi lasketaan lumijäähdytyksen mahdolliset säästöt kompressorijäähdytysjärjestelmään verrattuna. Nykyarvo lasketaan yhtälöllä. (Ranta 2012, 19–22.)

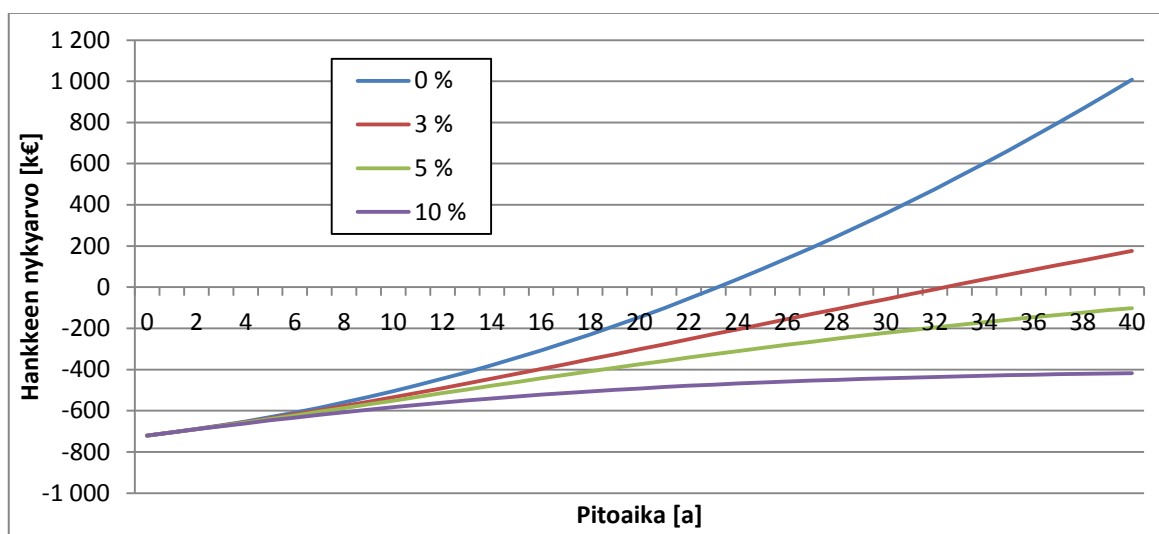
$$NA = I + \frac{q_1}{(1+i)^1} + \frac{q_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{q_n}{(1+i)^n} \quad (14)$$

Missä

I investointi, [€]

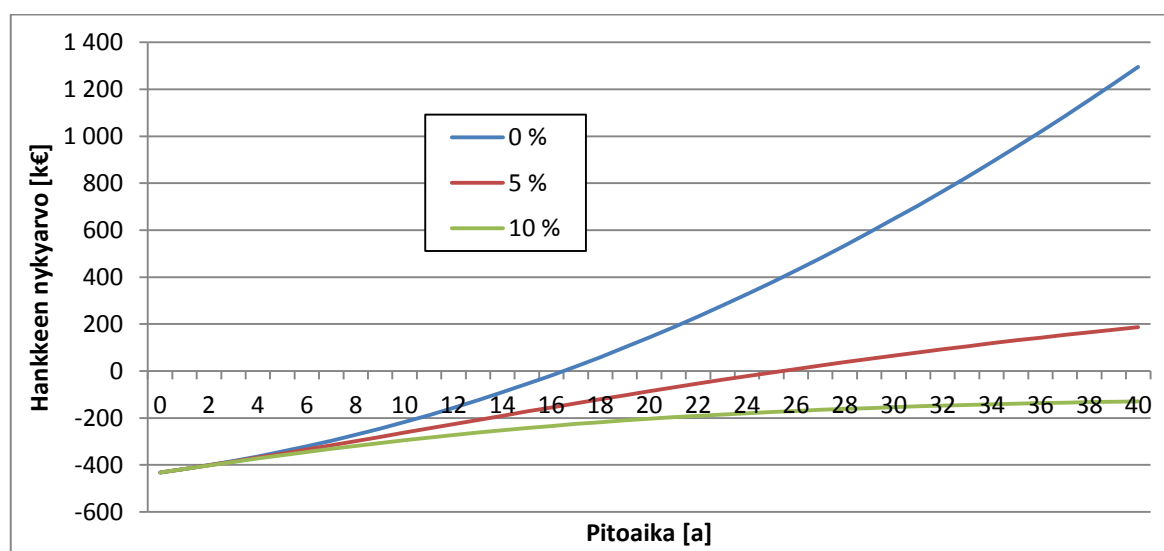
q nettotuotto, [€]

Nykyarvomenetelmässä sähkön hinnan oletettiin kasvavan kappaleen 5.2 mukaisesti. Tämän myötä vuotuiset nettotuotot vaihtelevat, koska kustannukset sähkön hankinnasta muuttuvat. Jäähdytysenergiatarve pysyy koko pitoajan 1 600 MWh:ssa, josta 1 200 MWh saadaan lumesta. Yhteensä sähkönkulutus lumijäähdytysjärjestelmän kanssa on aikaisempiin laskuihin perustuen 235 MWh. Nykyisen järjestelmän sähkönkulutus on 800 MWh. Kiinteiden kustannuksien arvioidaan pysyvän samoina koko pitoajan. Lumijäähdytykselle se on keskimäärin 18 500 €/vuosi, kun siitä on vähennetty sähkönkulutus. Kompressorijäähdytyksellä kiinteät kustannukset ovat 1 500 €/vuosi. Laskuihin ei ole otettu huomioon mahdollisia laitevikoja kummassakaan järjestelmässä. Laskuun ei ole myös huomioitu kompressorijäähdyttimien mahdollista uusimista, vaan tarkastellaan ainoastaan lumijäähdytysjärjestelmän nykyarvoa. Kuvassa 25 on esitettyä lumijäähdytysjärjestelmän nykyarvo 720 000 euron investoinnilla neljällä eri korkokannalla.



Kuva 25. Hankkeen nykyarvo neljällä eri korkokannalla investoinnin ollessa 720 000 euroa.

Kuvasta huomataan, että hanke maksaisi itsensä vasta 20 vuoden jälkeen nollakorolla. Perinteistä 5 %:n korkoa käytettäessä hanke ei maksaisi itseään koskaan takaisin, eli 40 vuoden pitoajalla hankkeen nykyarvo jäisi negatiiviseksi. Kuvassa 26 on esitettyinä hankkeen nykyarvo kolmella eri korkokannalla, kun hankkeen oletetaan saavan 40 %:n investointituki.



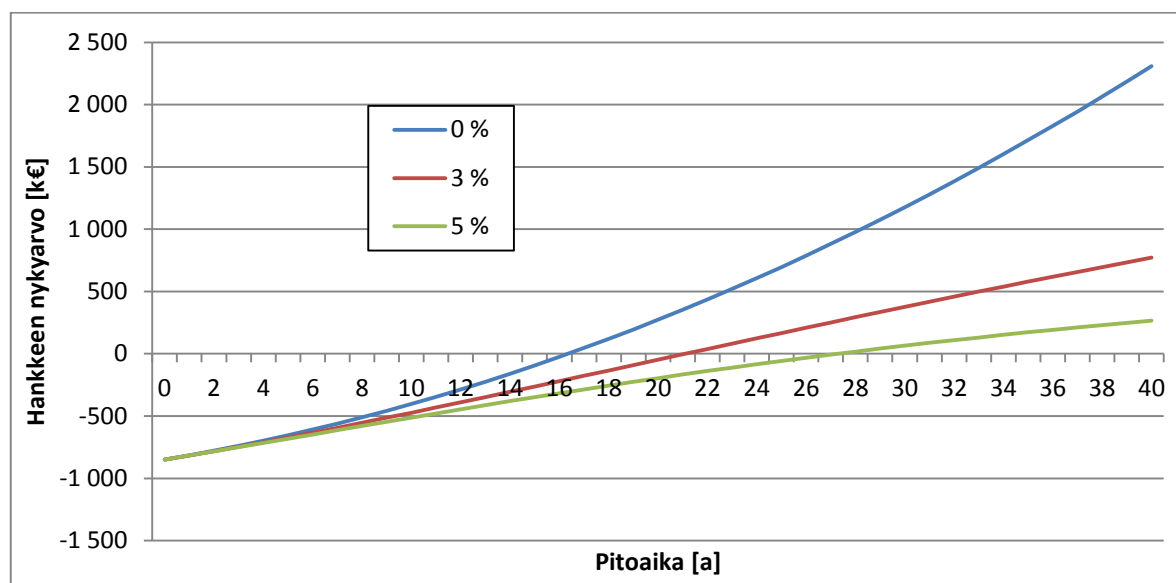
Kuva 26. Hankkeen nykyarvo 40 %:n investointituella kolmella eri korkokannalla.

Kuvasta huomataan, että nyt 5 %:n korolla hanke maksaisi itsensä takaisin noin 25 vuodessa. Nollakorollakin hankkeen takaisinmaksuaika olisi noin 16 vuotta, joka on melko pitkä ottamalla huomioon hankkeen epävarmuudet. Edellisten kuvien perusteella voidaan sanoa, että 1 600 MWh:n jäähdytysenergian käytöllä ja sen kattaminen 75 %:sti lumella ei ole kannattavaa.

Tarkastelemalla samaa jäähdytysenergiankäyttöä, mutta lumen kattamisprosentin ollessa 90 %, saadaan tulokset hieman paremmiksi. Tällöin lumesta hyödynnettävän jäähdytysenergian määrä olisi 1 440 MWh. Vaadittava lumimäärä olisi noin 40 000 m³, josta voitaisiin hyödyntää jäähdytykseen arviolta noin 60 %. Tämä lumimäärä olisi todennäköisesti mahdollinen vielä suunniteltuun varastoon, mutta häviöt myös kasvaisi lumen pinnanalan kasvaessa. Alkuperäisellä 720 000 euron investoinnilla saadaan

nollakorolla takaisinmaksuajaksi noin 18 vuotta, 3 %:n laskentakorolla 25 vuotta ja 5 %:n korolla noin 33 vuotta. Investointituen kanssa nollakorolla takaisinmaksuajaksi saadaan noin 13 vuotta ja 5 %:n laskentakorolla noin 18 vuotta.

Tulevaisuuden tilannetta arvioidaan 2 500 MWh:n jäähdytysenergiankulutuksella. Jos tästä haluaisi kattaa 75 % lumella, tarvittaisiin lunta kerätä varastoon noin 56 700 m³. Lukemaan on oletettu, että varaston lumimäärästä voidaan hyödyntää 55 % jäähdytyskäyttöön. Vastaava lumimäärä vaatisi varaston laajentamista, esimerkiksi kalliota louhimalla, syvyyttä kasvattamalla tai seinämän siirtämistä Hissitehtaalle päin. Varaston laajennus toisi lisäkustannuksia, joten laskelmissa on käytetty investointikustannuksen arvona 850 000 euroa. Muuten edellisiä vastaavilla arvoilla hankkeen nykyarvo on esitettyä kuvassa 27.



Kuva 27. Hankkeen nykyarvo jäähdytysenergiankulutuksen ollessa 2 500 MWh, lumella katettu 75 % ja investoinnin ollessa 850 000 euroa.

Nyt hankkeen takaisinmaksuaika nollakorolla olisi noin 17 vuotta, 3 %:n korolla noin 22 vuotta ja 5 %:n korolla noin 28 vuotta. Jos otetaan huomioon mahdollinen 40 %:n investointituki, saadaan takaisinmaksuajaksi nollakorolla 12 vuotta ja 5 %:n korolla 16 vuotta. Investointituen avulla hankkeen nykyarvo kääntyisi positiiviseksi jopa 10 %:n korolla hankkeen 40 vuoden pitoajalla. Jälleen takaisinmaksuajat venyisivät turhan pitkiksi

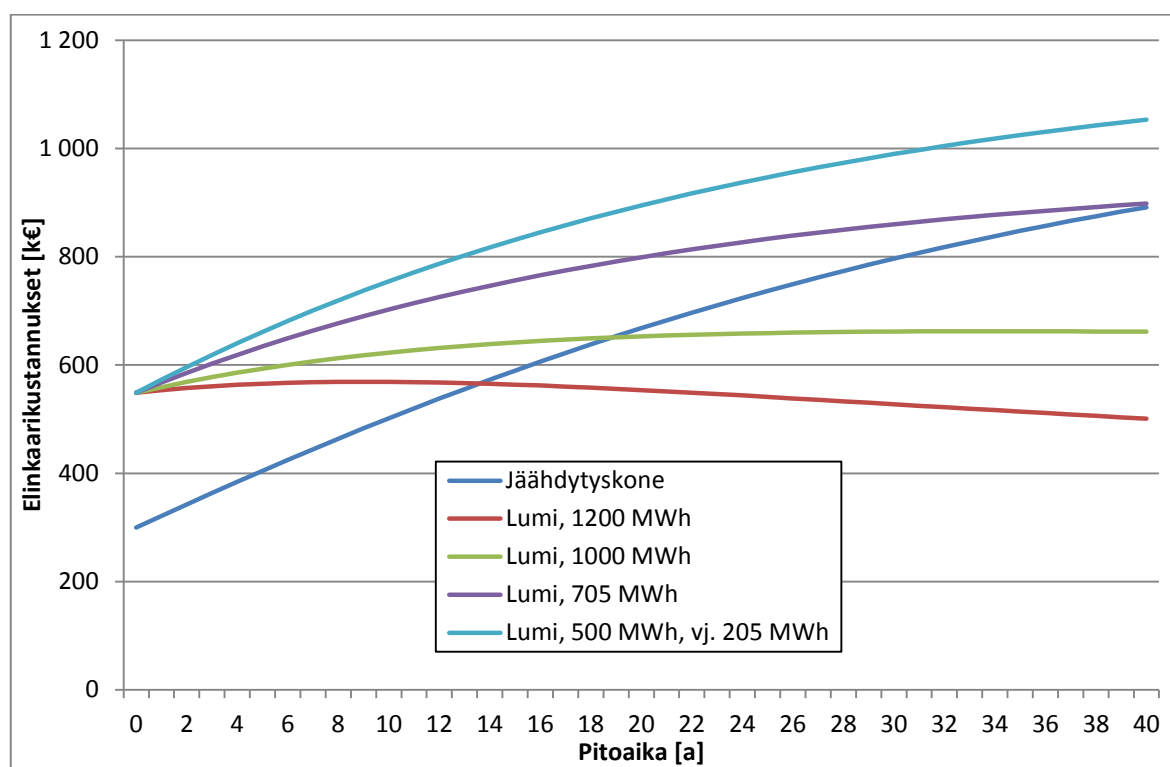
ottaen huomioon hankkeen riskitason. Jos 2 500 MWh:n jäädytysenergiankulutuksesta haluttaisiin kattaa 90 % lumella, tarvittaisiin lunta vähintään 68 000 m³. Tätä ei mitenkään saisi mahdutettua järkevästi suunnitellulle kallioalueelle.

Viimeisenä tutkitaan tilannetta, jossa lumijäädytysjärjestelmää sovellettaisiin kokonaan ennalta jäädyttämättömään tilaan, esimerkiksi Hissitehtaan tuotantotiloihin. Vertailu tehdään elinkaaritarkasteluna, jossa pohditaan eri järjestelmien koko elinkaaren kustannuksia. Lumijäädytysjärjestelmään investointikustannuksiin säästöjä syntyi tekniikan vähentymisestä, mutta niitä lisääntyisi pakollisen varajäädyttimen hankinnasta. Myös pumppauskustannukset hieman pienentyisivät, koska Heveksen putkihaara jäisi kokonaan pois. Vertailut tehdään tilanteeseen, jossa Hissitehtaan jäädytys tapahtuisi kokonaan kompressorijäädytyksellä.

Aikaisemmissa laskuissa todettiin, että Hissitehtaan tuotantotilojen arvioitu jäädytysteho olisi noin 750 kW ja jäädytysenergiankulutus 705 MWh. Lumivaraston investointikustannus säilyy samana, mutta säästöjä syntyy tekniikan osalta. Pumppuyksikön, pumppujen, lämmönsiirtimien ja siirtoputkien määrän vähentymisestä johtuen kokonaisinvestointikustannuksen arvioidaan olevan noin 660 000 euroa. Pumppauskustannukset vähenevät, koska siirtomatka lyhentyy ja veden massavirta pienenee. Lumijäädytyksen sähkönkulutuksen arvioidaan olevan 20 MWh. Kiinteät kustannukset vähenevät arvoon 17 000 euroa, koska Heveksen lämmönsiirtimen tarkastukset jäävät pois.

Varajäädyttimen ominaisinvestointikustannuksen arvioidaan olevan 400 €/kW. Varajäädytin mitoitetaan puolitehoiseksi, eli sen teho on 375 kW. Investointikustannukseksi muodostuu 150 000 euroa. Vertailukohteeksi asetetaan kompressorijäädytin, joka mitoitetaan täydelle teholla. Tämän investointikustannukseksi muodostuu 300 000 euroa ja kiinteiksi ylläpitokustannuksiksi 1 500 euroa. Sähkönkulutuksen arvioidaan olevan noin 350 MWh. Kustannuksissa ei otettu huomioon jäädytysenergian jakoa rakennuksen sisällä, koska se olisi sama kustannus molemmissa vaihtoehtoissa.

Vertailut tehtiin eri lumimäärillä, joista hyödynnettäväksi energiaksi saadaan 1 200 MWh, 1 000 MWh ja 705 MWh, laskentakoron ollessa 5 %. Ylijäämäenergia, eli Hissitehtaan tuotantotilojen jäähdytystarpeen ylijäänyt jäähdytysenergia, hyödynnetään Hissitehtaan muissa tiloissa. Siitä saadaan säästöä vanhan jäähdytyskoneen pienentyneen sähkönkulutuksen takia. Vertailukohtana on aikaisemmin mainittu kompressorijäähdytys. Lumijäähdytyksen investointikustannuksiin on huomioitu 40 %:n investointituki. Kuvassa 28 on näkyvissä edellä mainituilla arvoilla hankkeen elinkaaren nykyarvo. Elinkaareen ei ole otettu huomioon mahdollisia tekniikan uusimisia. Tekniikan uusimisella olisi todennäköisesti positiivinen vaikutus lumijäähdytyksen kannalta pidemmän käyttöiän vuoksi.



Kuva 28. Lumijäähdytys pelkästään Hissitehtaalte.

Kuvasta huomataan, että lumijäähdytysjärjestelmän pienempien käyttökustannuksien myötä käyrät ovat tasaisempia. Parhaassa tapauksessa, eli kun lunta on paljon hyödynnettävissä, käyrä on jopa laskeva johtuen saaduista säästöistä Hissitehtaan muihin tiloihin. Parhaassa tapauksessa käyrät kohtaavat noin 13 vuoden kohdalla, jonka jälkeen lumijäähdytyksellisestä järjestelmästä tulee halvempi. Tällöin 40 vuoden pitoajalla lumijäähdytysjärjestelmän elinkaaren kustannukset ovat lähes 400 000 euroa vähemmän kuin perinteisen kompressorijäähdyttimen. Kompressorijäähdyttimen mahdollisesti pienempi käyttöikä kasvattaisi tätä eroa entisestään. Kuvaajaa lukiessa täytyy muistaa, että siihen on huomioitu 40 %:n investointituki. Ilman tukea käyrät kohtaavat vasta 30 vuoden kohdalla ja eroa elinkaarikustannuksissa 40 vuoden pitoajalla on enää 125 000 euroa.

Tehtyihin laskelmiin täytyy muistaa suuret epävarmuudet. Lumijäähdytyksen toiminnan varmuutta ei voi pitää samanlaisena kuin kompressorijäähdyttimen. Mahdolliset laiteviat, lumimäärän muutokset, sähkön hinnan muutokset ja muut epävarmuudet voivat muuttaa laskelmia oleellisesti.

Tehtyjen laskelmien pohjalta voi todeta ettei ole taloudellisesti kannattavaa liittää järjestelmää pelkästään nykyiseen jäähdytysverkostoon, koska takaisinmaksuajat venyisivät liian pitkiksi. Parhaimmillaan investointituen kanssa takaisinmaksuajat olivat noin 15 vuotta matalilla laskentakoroilla. Hyödyntämällä lumijäähdytystä uuden alueen jäähdytysverkkoon, on hanke hieman kannattavampi. Investointituen kanssa ja suurilla lumimäärillä hanke maksaa itsensä takaisin noin 13 vuodessa verrattuna kompressorijäähdyttimeen. Koko elinkaarelta järjestelmien väliselle nykyarvolle tulee eroa noin 400 000 euroa ilman laitevikoja ja -uusintoja. Vielä suuremmilla lumimäärillä lumijäähdytyksen kannattavuus parantuisi entisestään. Kuitenkin täytyy vielä korostaa laskelmien epävarmuus, jolloin kannattavuudet voivat vaihdella molempiin suuntiin. Suurimmat epävarmuudet syntyvät lumimäärän vaihteluista sekä lumijäähdytyksen huoltokuluista.

7.2 Ympäristöllinen

Ympäristöllinen kannattavuus perustuu pääasiassa ostosähkön vähentymiseen, lumen epäpuhtauksien talteenottoon ja kylmäainevuotojen vähentymiseen. Rakentamisesta ja käytöstä poistosta aiheutuvat päästöt ovat huomattavasti alhaisemmat verrattuna käytön aikaisiin hyötyihin. Ympäristötarkastelussa ei oteta huomioon rakennusmateriaaleista aiheutuvia päästöjä.

Suunnitellulla varastolla, joka pystyisi hyödyntämään 1 200 MWh jäädytysenergiaa lumesta, säästettäisiin nykyisellä kulutuksella noin 600 MWh ostosähköä vuodessa. Kyseinen määrä vastaa hiilidioksidipäästöissä noin 80 tonnia vuodessa. Lukemat vastaavat esimerkiksi noin 20 sähkölämmitteisen rintamamiestalon vuosittaista kulutusta. Saatavat säästöt sähköstä ja päästöistä voidaan pitää merkittävänä.

Järjestelmässä olevat erottimet keräävät tehokkaasti lumeen sitoutuneet epäpuhtaudet. Sulamisvedestä saadaan erotettua öljyt, raskasmetallit, suolot sekä typpi- ja fosforipartikkelit. Verrattuna nykyiseen tilanteeseen erottimista saadaan vain hyötyä. Nykyisellään lumen annetaan sulaa suoraan maaperään, kuten kaikkialla muuallakin. Kerätyt epäpuhtaudet voidaan laskea positiiviseksi ympäristöhyödyksi, mutta ei kovinkaan merkittäväksi. Väite perustuu siihen, että huomattavasti suurempien lumimäärien annetaan sulaa vapaasti esimerkiksi alueen ulkopuolella. Myös kerätyt määrät saattavat olla vähäiset kuten kappaleessa 6.1.1 Ilmastovaikutukset on esitetty.

Lumijäädytysjärjestelmän myötä kompressorijäädyttimien käyttö vähentyy, jolloin todennäköisesti kylmäainevuodotkin vähentyvät. Kylmäaineet ovat ympäristöön päästessä vaarallisia, mutta vuodot ovat alueella maltilliset. Myös Heveksen uusittavan jäädytyskompressorin myötä vaarallinen R22 poistuu käytöstä ja todennäköisesti vuodot vähentyvät entisestään uuden laitekannan ansiosta. Saatuja hyötyjä voidaan pitää ympäristön kannalta hyvänä asiana, mutta hyödyt ovat vähäiset.

Ympäristöllisiä hyötyjä on vielä mahdollista saavuttaa lumen keräämisestä. Kalliolouhokseen on esimerkiksi lyhempi matka Hevekseltä nykyiseen paikkaan

verrattuna, jolloin työkoneiden kulkumatka ja käyttö vähenevät. Tähän ei kuitenkaan tässä tutkimuksessa sen tarkemmin paneuduttu ja hyödyt todennäköisesti jäävät vähäisiksi.

Ympäristön kannalta hanke on kannattava. Suurimmat säästöt saadaan ostosähkön vähentymisestä ja muut pienet osatekijät tekevät siitä entistä ympäristöystävällisemmän. Ympäristön kannalta hankkeessa ei ole haitallisia tekijöitä.

7.3 Yrityksellinen

Yrityksellisesti Koneen kannalta suurimmat hyödyt tulevat lisääntyneestä jäähdytyksestä, joka todennäköisesti heijastuu suoraan työtehokkuuteen. Tähän pitää muistaa, että lumijäähdytys ei ole ainut tapa toteuttaa jäähdytystä. Jäähdytyksen myötä varsinkin Hissitehtaan tuotantotilojen fyysiseen työhön saataisiin lisää mielekkyyttä ja tehokkuutta. Tarkempaa kustannus-hyötyanalyysiä tässä tutkimuksessa ei tehdä, mutta jäähdytyksen lisääminen katsotaan olevan yrityksen kannalta positiivinen asia kustannuksista huolimatta.

Koneen Hyvinkään alueen kannalta kannattaa tarkkaa pohtia onko järkevää ottaa käytettävästä maa-alueesta lähes 4 000 m² tilaa lumivarastolle noin 40 vuodeksi. Kyseinen tila voitaisiin käyttää toisin, esimerkiksi parantamaan ulkologistiikkaa. Myös jos Hissitehdas laajentuisi kallioulouhokseen päin, täytyisi ulkologistiikan laajentua lumivaraston paikalle. Maa-alueiden käytön kannalta hanke on epäilyttävä, joten pohdinta kannattaa tehdä tarkkaan.

Lumen hyödyntäminen jäähdyttämiseen olisi varmasti helppo markkinointikeino mainostaa tuotantoa ympäristöystävälliseksi pohjoisissa oloissa. Tämän myötä Kone kasvattaisi entisestään mainetta yrityksenä, joka ottaa huomioon ympäristön toimintatavoissaan. Vaikka lumijäähdytyksen tuoma hyöty olisi vähäinen ottaen huomioon koko Koneen, olisi se silti merkittävä järjestelmä ja varmasti hyödynnettävissä markkinoinnissa. Yrityksen imagon kannalta hankkeella olisi positiivinen vaikutus.

8 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä diplomityössä tarkasteltiin lumen varastoinnin ja siitä saatavan jäädytysenergian hyödyntämistä tilojen jäädytyksen kannattavuutta Koneen Hyvinkään tehdasalueella. Työssä käytiin läpi lumen varastoinnin ja siitä hyödynnettävän jäädytysenergian periaatteet, mallinnettiin tilannetta kohdealueelle, pohdittiin kustannusrakennetta ja tarkasteltiin kannattavuutta taloudellisesta, ympäristöllisestä ja yrityksellisestä näkökulmasta. Hankkeen ongelmaksi tuli investointikustannuksien suuruus verrattuna saatuihin säästöihin. Säästöjä sähkönkulutuksen vähentymisestä voidaan pitää merkittävänä niin taloudellisesti kuin ympäristöllisesti, mutta ne eivät maksaneet investointia takaisin riittävässä ajassa käytetyillä arvoilla. Ongelmaksi myös syntyivät lumijäädytysjärjestelmän suuret käyttökustannukset, varsinkin eristeiden osalta.

Taloudellista kannattavuutta pohdittiin useilla eri menetelmillä ja arvoilla. Korolliset takaisinmaksuajat olivat pääasiassa ilman investointitukea yli 30 vuotta, kun lumijäädytysjärjestelmä liitettäisiin nykyiseen jäädytysjärjestelmään. Investointituen kanssa korolliset takaisinmaksuajat ovat noin 25 vuotta. Suuremmilla lumimäärillä ja jäädytysenergian kulutuksella 40 %:n investointituen kanssa takaisinmaksuaika saataisiin noin 15 vuoteen. Rakentamalla täysin uusi jäädytysjärjestelmä, jossa lumi hyödynnettäisiin Hissitehtaan tuotantoalueeseen, takaisinmaksuajaksi 40 %:n investointituella ja 5 %:n laskentakorolla saadaan noin 13 vuotta. Ilman investointitukea takaisinmaksuaika venyy jälleen 30 vuoteen. Näihin tilanteisiin liittyi oletus, että ylijäämäenergia voidaan hyödyntää Hissitehtaan muihin tiloihin. Elinkaarikustannuksissa säästöä perinteiseen kompressorijäädytykseen verrattuna saadaan lähes 400 000 euroa 40 vuoden pitoajalla investointituen avulla. Taloudellisesti hanketta en pidä kannattavana johtuen pitkistä takaisinmaksuajoista ja suurista epävarmuuksista. Ympäristön ja yrityksen kannalta hanketta voidaan pitää kannattavana. Lumijäädytys vähentäisi sähkön hankintaa ja talteenottaisi epäpuhtauksia. Yrityksen kannalta jäädytys kasvattaisi tuottavuutta ja kohentaisi työilmapiiriä. Lisäksi lumijäädytyksen tuomaa imagoa voidaan pitää merkittävänä.

Skogsbergin (2005) väitöskirjassa esitetyissä mallinuksissa eri järjestelmien takaisinmaksuajat vaihtelivat noin vuodesta jopa 84 vuoteen. Parhaimmat takaisinmaksuajat olivat lumiluolissa, ja lumimäärät olivat tyypillisesti lähellä $100\,000\text{ m}^3$. Tällöin hyödynnettävä jäädytysenergian määräkin oli merkittävästi suurempi kuin tässä tutkimuksessa käytetyt arvot. Yhtenäistä kannattavimmille lumivarastoille olivat suuret kapasiteetit niin lumen määrässä kuin jäädytysenergian tarpeessa. (Skogsberg 2005, 9, 53–54.)

Lumen hyödyntämistä jäädyttämiseen en pidä kannattavana Koneen Hyvinkään alueella. Suurimmat syyt ovat pitkät takaisinmaksuajat, epävarmuudet järjestelmän täydellisestä toimivuudesta ja kustannuksista sekä jäädytysjärjestelmän huoltotöiden lisääntyminen. Kannattavuus paransi, jos nykyisen kompressorijäädyttimen käyttökustannukset kasvaisivat. Tämä tarkoittaa lähinnä sähköhinnan voimakasta nousua. Sähköhinnasta tehtiin kasvuennusteita tulevaisuuteen, mutta niidenkään avulla takaisinmaksuajat jäivät kohtuuttoman suuriksi. Myös jäädytystarpeen kasvun myötä lumijäädytysjärjestelmän kannattavuus paransi pienempien käyttökustannuksien takia. Se kuitenkin vaatisi lisää työtiloja sekä lisää rakennustilaa lumivarastolle. Suunnitellun lumivaraston kapasiteettina voidaan pitää maksimissaan noin $50\,000\text{ m}^3$. Silloinkin lumen pinnan ala kasvaisi merkittävästi, jolloin luonnolliset häviötkin kasvaisivat. Jos halutaan panostaa merkittävästi uusiutuvan energian hyödyntämiseen ja ajatellaan hanketta pelkästään ympäristön kannalta, on hanke kannattava ja toteutettavissa. Taloudellisen ja ympäristöllisen kannattavuuksien suhdetta kannattaa pohtia tarkkaan.

Yleisesti investointikustannuksista suurimmaksi kustannukseksi tulee varaston rakentaminen. Tämän työn investointikustannuksista suurin yksittäinen osa oli seinän rakentaminen, joka kustantaisi arvioiden mukaan noin $200\,000$ euroa. Tekniikan osalta lämmönsiirtimet ja pumput ovat suhteellisen pieniä kustannuksia, mutta jäädytysputket ja tarvittavat erottimet suuria kustannuksia. Tekniikan pienen osuuden vuoksi ne kannattaa mitoittaa tarkkaan, jotta ne eivät rajoita hyödynnettävän jäädytysenergian määrää tulevaisuudessa varaston lumimäärän kasvaessa. Investointikustannuksia voidaan alentaa hyödyntämällä luonnon omia rakenteita ja rakentamalla varasto lähellä jäädytyskohdetta.

Pinnalta avoimissa malleissa investointikustannus on pienempi kuin kiinteissä kattorakenteissa, mutta käyttökustannukset ovat vastaavasti suuremmat eristeiden osalta.

Käyttökustannuksista suurimman osan tekee päällimmäiset eristeet. Tässä tutkimuksessa pohdittiin kahta eri eristettä. Metsähakkeen vuosittaisen uusimisen kustannukset koko 40 vuoden käyttöiällä olisi noin 11 000 €/vuosi ja eristepeittojen viiden vuoden käyttöiällä vuosittaiset kustannukset ovat noin 14 500 €/vuosi. Muita merkittäviä kustannuksia syntyy järjestelmän kunnossapidosta. Eristeiden osalta kustannukset voisivat olla pienemmät erillisillä sopimuksilla toimijoiden kanssa. Eristeeksi voidaan myös hyödyntää metsäteollisuuden ylijäämätuotteita, esimerkiksi sahanpurua. Hankalaksi tekee myös jäähdytyskauden jälkeiset työt, jolloin pitää karkeat kiintoaineet kerätä varastosta ja erotella esimerkiksi hiekka mahdollisesta metsähakkeesta.

Tästä työstä voidaan havainnoida, että yleisesti lumijäähdytyksestä voidaan saada kannattavaa suurilla jäähdytysmäärillä ja kohtuullisen suurilla sähkön hinnalla. Näiden myötä säästöt käyttökustannuksissa perinteisiin järjestelmiin verrattuna kasvavat. Investointikustannuksia pitäisi pyrkiä vähentämään hyödyntämällä luonnon omia rakenteita. Suurissa lumivarastoissa lumen luonnollisen sulamisen takia eristämisen merkitys kasvaa.

Lumijäähdytyksen kannattavuuteen liittyy olennaisesti mahdolliset taloudelliset tuet. Näistä investointituki on merkittävin. Myös mahdolliset yhteistyöt eri yhtiöiden avulla voisivat parantaa hankkeen kannattavuutta. Tekemällä lumijäähdytyksestä pilottihankkeen voitaisiin hyötyä antamalla tutkimustietoja muille toimijoille. Tämän myötä kustannukset jakaantuisivat, jolloin jäähdytysenergian hyödyntävä yritys saisi hankkeesta itselleen kannattavamman.

Yleisesti jäähdytyksen kannalta jäähdytysenergian käyttöä kannattaa tehostaa. Esimerkiksi huonekohtaisilla palkkiverkostoilla kehitetty jäähdytysenergia voidaan hyödyntää tehokkaammin, jolloin tilojen lämpötilaongelmat saataisiin paremmin kuriin. Jos Hissitehtaalle rakennetaan jäähdytysverkko, kannattaa miettiä samalla koko lämmitysverkon uusimista. Uudella tekniikalla lämmitys- ja jäähdytysverkostossa voidaan

käyttää samoja laitteita, jolloin säästetään kustannuksissa ja tilassa. Myös uuden tekniikan tuoma hyöty säästäisi häviöissä varsinkin lämmityskäytössä.

Jos lumijäähdytysjärjestelmä toteutetaan Hyvinkään Koneen alueelle, tulee pohtia rakentamisalueen tulevaisuuden käyttöä. Lumijäähdytysjärjestelmillä on noin 40 vuoden käyttöikä, ja yleisesti ottaen tilantarve on suuri. Täten investointi veisi myös pitkäksi aikaa alueelta tilaa, jota voisi hyödyntää esimerkiksi rakennuksien laajentumisella.

Lopuksi täytyy muistuttaa, että työssä jouduttiin tekemään paljon oletuksia aina jäähdytysenergian kulutuksesta lumivaraston investointikustannuksiin. Oletuksien tekemiseen lisäsi haastetta lumijäähdytysjärjestelmien harvinaisuus, varsinkin Suomen oloissa. Oletukset pyrittiin perustelemaan järkevästi lähinnä kirjallisuuslähteiden ja asiantuntijoiden avulla. Oletuksien myötä todellinen tilanne saattaa aina hieman poiketa lasketuista arvoista, joten oletuksien poistaminen mahdollisilla mittauksilla olisi erittäin suotavaa.

8.1 Jatkotutkimus

Jos lumijäähdytys päätetään toteuttaa, suosittelen tehdä mittauksia jäähdytysenergian todellisesta kulutuksesta. Tässä tutkimuksessa on esitetty vain arvioita, koska mitään tarkkoja mittauksia ei ole ollut saatavilla edellisiltä jäähdytyskausilta. Todellisen kulutuksen mukaan voidaan arvioida tarkemmin jäähdytysenergian kulutusta ja sen myötä laskelmat lumijäähdytysjärjestelmän taloudellisesta kannattavuudesta tarkentuvat. Myös tarkempi selvitys Hissitehtaan tuotanto-osan jäähdytystarpeesta olisi paikallaan.

Lumen luonnollista sulamista kannattaa myös kokeilla pienen kokoluokan kenttäkokeessa. Esimerkiksi kalliolouhokseen voisi rakentaa mittakaavassa huomattavasti pienemmän mallin lumivarastosta, johon suhteuttaisi seinien, kallion ja katon osuudet oikeiksi. Tämän avulla voitaisiin arvioida lumen luonnollista sulamista oikeassa ympäristössä ja saataisiin teoreettisen tiedon pohjalle myös käytännön tuloksia.

Jos Hissitehtaalle päätetään tehdä jäähdytys, kannattaa miettiä koko lämmönjaon uusimista tehdashallissa. Nykyaikaisemmilla järjestelmillä häviöt saadaan paremmin kuriin ja lämmön- ja jäähdytyksensiirtyminen tehostumaan. Myös ei tarvitse rakentaa erillistä jäähdytysverkostoa, vaan voidaan käyttää samoja putkia ja päätelaitteita niin lämmityksessä kuin jäähdytyksessäkin. Esimerkiksi kattosäteilijöiden avulla voidaan vielä käyttää jäähdytyksen suhteen suhteellisen korkeita lämpötila, jolloin lumijäähdytyksen matalat lämpötilat pääsevät oikeuksiinsa.

Metsäalueen hyödyntäminen jäi tässä työssä vähäisemmäksi. Jos kallioulouhoksen tila käytetään yrityksen muuhun käyttöön, olisi metsäalue yksi vaihtoehto lumivaraston paikalle. Tätä varten kannattaa tehdä tarkemmat laskelmat. Allasmallisen lumivaraston toteuttamiseen alue soveltuu hyvin, mutta taloudellisen kannattavuuden kannalta jäähdytysenergian kulutusta täytyisi olla enemmän. Tämä vaatisi esimerkiksi uutta toimitilaa esimerkiksi juuri metsäalueelle. Allasmallisen varaston etuina olisi lumimäärä, jolloin isonkin varaston rakentaminen on mahdollista. Heikkoutena on lumen luonnollisen sulamisen lisääntyminen.

Suomessa ei ole toteutettu lumijäähdytysjärjestelmiä, mutta sopivia sijaintivaihtoehtoja varmasti olisi. Valtakunnallisella tasolla jatkotutkimus olisi suotavaa, jolloin aiheesta saataisiin lisätietoa. Sopivalla paikalla lumijäähdytys voitaisiin saada kannattavaksi suurilla lumimäärillä ja suurella jäähdytysenergiankulutuksella.

LÄHDELUETTELO

Aaltonen, Ali 2014. Sähköpostikeskustelu, haastattelu 24.11.2014. Tekninen myyjä. Wilo Nordic.

Backman, Jari. 2012. Putkivirtauksen laskenta. Virtaustekniikka 1 luentomateriaali: luku 6. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kevät 2012.

CO₂-päästöt. 2014. Sähköntuotannon polttoaineet ja CO₂-päästöt. [Energiateollisuuden www-sivuilta]. [viitattu 20.11.2014]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/a_sahkontuotannon_kk_polttoaineet_lokakuu.pdf

Cowi. 2012. Snow will cool Oslo airport in the summer heat. [verkkoartikkeli]. [viitattu 23.12.2014]. Saatavissa: <http://www.cowi.com/menu/NewsandMedia/News/Newsarchive/Pages/Snow-will-cool-Oslo-airport-in-the-summerheat.aspx>

D2. 2012. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. [viitattu 23.7.2014]. Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf

D5. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta. [viitattu 22.7.2014]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/29520-D5-190607-suomi.pdf>

Energiateollisuus ry. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Helsinki: Kirjapaino Libris Oy. 566 s. ISBN 952-5615-08-1

Energiateollisuus ry. 2013. Kaukojäähdytys. [energiateollisuuden www-sivuilta]. [viitattu 23.7.2014]. Saatavissa: <http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/kaukolampotilastot/kaukojaahdytys>

Energiatuki. 2014. Energiatuki. [Työ- ja elinkeinoministeriön www-sivuilta]. [viitattu 6.11.2014]. Saatavissa: <http://www.tem.fi/energia/energiatuki>

Eskelinen, Markku 2014. Sähköpostikeskustelu 24.11.2014. Toimialajohtaja. Hakevuori Oy.

Haahtela Yrjänä, Kiiras Juhani 2014. Talonrakennuksen kustannustieto. Tampere: Haahtela-kehitys Oy. ISBN 978-952-5403-22-0.

Helsingin Energia. 2013. Kaukojäähdytyksen alkuperä. [viitattu 18.7.2014]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/Kotitalouksille/Neuvoa-ja-tietoa/Energia-ja-ymparisto/>

Hyvinkää. 2008. Nimien historiallinen tausta. Kaavoitusyksikkö.[Hyvinkään kaupungin www-sivuilla]. [viitattu 24.9.2014]. Saatavissa: http://www.hyvinkaa.fi/Tiedostot/kulttuuri/Historia/nimien_hist_tausta.pdf

Hyvinkää. 2009. Energia- ja ilmastostrategia 2009–2016 ja energiatehokkuusohjelmat 2009–2013. [Hyvinkään kaupungin www-sivuilta]. [viitattu 17.10.2014]. Saatavissa: http://www.hyvinkaa.fi/Tiedostot/AYR_Ymp%C3%A4rist%C3%B6_luonnonsuojelu/Energia_Ilmasto/Energiastrategia%20julkaisu.pdf

Hyvinkää. 2014. Rakennusvalvonta. [Hyvinkään kaupungin www-sivuilta]. [viitattu 12.11.2014]. Saatavissa: http://www.hyvinkaa.fi/fi/Asuinymparisto_rakentaminen/Tontit-ja-rakentaminen/Rakennusvalvonta/#.VGNHiWf4LTo

Hyvinkään Vesi. 2014. Veloitushinnat. [Hyvinkään Veden www-sivuilta]. [viitattu 24.11]. Saatavissa: http://www.hyvinkaa.fi/Tiedostot/AYR_Hyvink%C3%A4n%20Vesi/Hinnasto/Hinnasto%202015%20alvillinen.pdf

Ilmatieteenlaitos. 2014a. Talven 2013–2014 sää. [Ilmatieteenlaitoksen www-sivuilta]. [viitattu 27.10.2014]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/talvi-2013-2014>

Ilmatieteenlaitos. 2014b. Talven 2012–2013 sää. [Ilmatieteenlaitoksen www-sivuilta]. [viitattu 27.10.2014]. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/talvi-2012-2013>

Incropera Frank P., DeWitt David P., Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S. 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th edition. New York. John Wiley & Sons Inc. 997 sivua. ISBN: 978-0-471-45728-2

Iso-Herttua Pekka. 2011. Katri Valan lämpö- ja jäähdytyslaitos. [viitattu 18.7.2014]. Saatavissa: http://www.cewic.fi/cewic/materiaalit/katri_valan_lampo-_ja_jaahdytyslaitos_p_iso-herttua_08022011_oulu.pdf

JFS. 2009. Winter Snow to Cool Hokkaido Airport in Summer. [verkkoartikkeli]. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: http://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id028815.html

Junnila, Olavi & Dönner, Joakim. 1989. Hyvinkään seudun historia. Hyvinkään kaupunki. 627 s.

Kauppi, Markku 2014. Sähköpostikeskustelu 17.11.2014. Tuoteryhmäpäällikkö. Wavin-Labko Oy.

Keskinen, Anna. 2012. Lumilogistiikan tehostaminen kaupungeissa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka. Tietekniikka. Espoo. 113 sivua.

Kianta, Jani. 2008. Kylmäainetilanne 2008. [Kylmäyhdistyksen www-sivuilla]. [viitattu 21.11.2014]. Saatavissa: <http://www.skll.fi/yhdistys/www/att.php?type=2&id=37>

Kobiyama, Masayoshi. 2008. Introduction of Snow Air-Conditioning System Used in Press Center of Hokkaido-Toya Lake Summit in 2008. Muron Institute of Technology. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: https://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_8_3%20Snow_and_Ice%20Applications/74.pdf

Kone kiinteistöosasto. 2013. Alueen ilmakuvat. Arkisto.

Kone Oyj. 2014a. Kone lyhyesti. [Kone Oyj:n www-sivuilla]. [viitattu 23.9.2014]. Saatavissa: <http://www.kone.com/fi/yhtio/kone-lyhyesti/>

Kone Oyj. 2014b. Koneen brändi. [Kone Oyj:n www-sivuilla]. [viitattu 24.9.2014]. Saatavissa: <http://www.kone.com/fi/yhtio/koneen-brandi/>

Landstinget Västernorrland. 2011. Snow cooling in Sundsvall. Päivitetty 24.1.2011. [viitattu 19.5.2014]. Saatavissa: <http://www.lvn.se/v1/In-english1/In-english/Environment-and-energy/Energy-Factor-2/Snow-cooling-in-Sundsvall/>

Lappeenrannan teknillinen yliopisto 2014. Teknillinen termodynamiikka [verkko-oppimismateriaali]. [viitattu 16.10.2014] Saatavissa: <http://www.kurssit.lut.fi/040301000/>

Larjola, Jaakko. 2012. Energianmuuntoprosessit. Luku 3: Kylmäkoneet. Kurssimateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Mäkelä, Markku 2002. Kylmävarastointitekniikan kehittäminen. Metsätehon raportti 140. Helsinki 2002. Metsäteho Oy.

Nordell Bo, Grein Mohamed, Kharseh Mohamad. 2007. Large-Scale Utilisation of Renewable Energy Requires Energy Storage. Luleå University of Technology, Division of Architecture and Infrastructure. Sweden. [viitattu 26.5.2014]. Saatavissa: http://www.ltu.se/cms_fs/1.13362!/bn-mg-mk%20tlemcen.pdf

Nordell, Bo, Skogsberg Kjell. 2000. Snow Storage for Cooling of Hospital. Luleå University of Technology. Division of Water Resources Engineering. Sweden. [viitattu 26.5.2014]. Saatavissa: ftp://mail.tech-env.com/pub/ENERGY/Eces14/Nordell_Skogsberg.PDF

Nordell, Bo. 2000. Large-scale Thermal Energy Storage. Division of Water Resources Engineering. Luleå University of Technology. Sweden. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: https://pure.ltu.se/portal/files/1172884/Large-scale_TES__WC2000.pdf

Nordell, Bo. 2012. Underground Thermal Energy Storage (UTES). Luleå University of Technology, Division of Architecture and Infrastructure. Sweden. Innostock 2012, the 12th International Conference on Energy Storage. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/lim1/docs/UTES_Nordell.pdf

Nordell, Bo. 2014. Using ice and snow in thermal energy storage systems. Teoksessa Cabeza, Luisa F. (toim.) *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing. 187–200.

Nordpool. 2014. Elspot Prices, Market Data. [Nordpoolin www-sivuilta]. [viitattu 18.11.2014]. Saatavissa: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/FI/Monthly/?view=table>

Nurmi, Aleksi. 2013. Lumen sulatus kaukojäähdytyksen ja kaukolämmön paluuedellä Helsingissä. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Energiatalous ja voimalaitostekniikka. Energiatekniikan laitos. Espoo. 77 sivua.

Nylund, Johanna. 2010. Kalliolämpö osana uusiutuviin energioihin perustuvaa arktista lämmitysjärjestelmää. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Energiatekniikka. Espoo. 93 sivua.

Oinonen Teemu, Soimakallio Sampo. 2001. HFC- ja PFC-yhdisteiden sekä SF₆:n päästöjen tekniset vähentämiskeinot ja niiden kustannukset Suomessa. VTT. 174 s. [viitattu 18.7.2014]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2001/T2099.pdf>

Onnelainen, Markku. 2014. Sähköposti ja suullinen tiedonanto. 22.9.2014-22.1.2015. Kiinteistöpäällikko. KONE Industrial Oy.

Paksoy. Ö. Halime. 2005. *Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption: Fundamentals, Case Studies and Design*. Dordrecht, Alankomaat. Springer. ISBN-10 1-4020-5290-1.

Pöyry. 2012. Energiakatselmusraportti, Kone Industrial Oy, Hyvinkään hissitehdas, H-rakennus. Työ- ja elinkeinoministeriön tukema energiakatselmushanke. 28.6.2012. 69 s.

Ranta, Tapio. 2012. Investointilaskelmamenetelmät. Energiatalouden johdantokurssi luento 2. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kevät 2012.

Saarela, Matti 2014. Suullinen tiedonanto 22.9.2014-22.1.2015. Kiinteistöasiantuntija. KONE Industrial Oy.

Seppänen O., Fisk W. J., Lei Q. H. 2006. Room Temperature and Productivity in Office Work. Lawrence Berkeley National Laboratory. [viitattu 18.7.2014] Saatavissa: <http://escholarship.org/uc/item/9bw3n707>

Sipilä, Juha. 2013. Minne Helsingin lumet menevät. Tekniikka & Talous. [verkkoartikkeli]. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/blogit/energia/minne+helsingin+lumet+menevat/a872373>

Sipilä, Juha. 2014. Haastattelu 23.10.2014. Asiantuntija. Telatek Oy

Skogsberg K, Lundberg A. 2005. Wood chips as thermal insulation of snow. Paper III. Accepted for publication in Cold Regions and Science Technology, Elsevier Science B.V., April 25. 2005. [viitattu 4.11.2014].

Skogsberg, Kjell. 2005. Seasonal Snow Storage for Space and Process Cooling. Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Architecture and Infrastructure. Sweden.

Skogsberg, Kjell, Nordell, Bo. 2001. The Sundsvall hospital snow storage. Luleå University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Architecture and Infrastructure. Sweden. [viitattu 16.10.2014]. Saatavissa: <https://pure.ltu.se/portal/files/433286/LTU-LIC-0151-SE.pdf>

Skogsberg, Kjell. 2014. Sähköpostikeskustelu. 13.10.2014. Perustaja. Snowpower AB

Snowpower. 2014a. Benefits of Snowcooling. [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa: http://www.snowpower.se/fordelar-snokyla_en.asp

Snowpower. 2014b. Results for the Sundsvall snowcooling plant. [viitattu 21.7.2014].
Saatavissa: http://www.snowpower.se/resultat_sundsvalls-kylanlaggning_en.asp

Snowpower. 2014c. Snowpower AB. [viitattu 8.10.2014]. Saatavissa:
http://www.snowpower.se/historik_en.asp

Suomen Kaukolämpö ry. 2004. Kaukojäähdytys. Raportti J1/2004. ISSN 1795-0635.
[viitattu 2.10.2014]. Saatavissa: http://energia.fi/sites/default/files/raporttij1_2004.pdf

Suominen, Harri. 2014. Sähköposti ja suullinen tiedonanto. 22.9.2014-22.1.2015.
Kiinteistöasiantuntija. KONE Industrial Oy.

Sääpalvelu. 2014. Klaukkalan kuukausitilastot. [Sääpalvelun www-sivuilta]. [viitattu
29.10.2014]. Saatavissa: <https://www.saapalvelu.fi/klaukkala/tilastot/kuukausitilastot/>

Tarboton, David G. Luce, Charles H. 1996. Utah Energy Balance Snow Accumulation
and Melt Model (UEB). Computer model technical description and users guide. Utah
Water Research Laboratory, Utah State University, USDA Forest Service,
Intermountain Research Station. 64 s.

Tekes. 2014. Rahoitusta yritysten kehitysprojekteihin. [Tekesin www-sivuilta]. [viitattu
11.11.2014]. Saatavissa: <http://www.tekes.fi/rahoitus/rahoitusta-yritysten-kehitysprojekteihin/>

Vitikainen, Juuso 2014. Sähköpostikeskustelu, haastattelu 27.11.2014. Tekninen myyjä.
Oy Danfoss Ab.

Yle Helsinki. 2012. Helsinki aikoo säilöä lumiröykkiöt kesän viilennykseen.
[verkkoartikkeli]. Päivitetty 5.6.2012 [viitattu 21.7.2014]. Saatavissa:
http://yle.fi/uutiset/helsinki_aikoo_sailoa_lumiroykkiot_kesan_viilennykseen/5303026

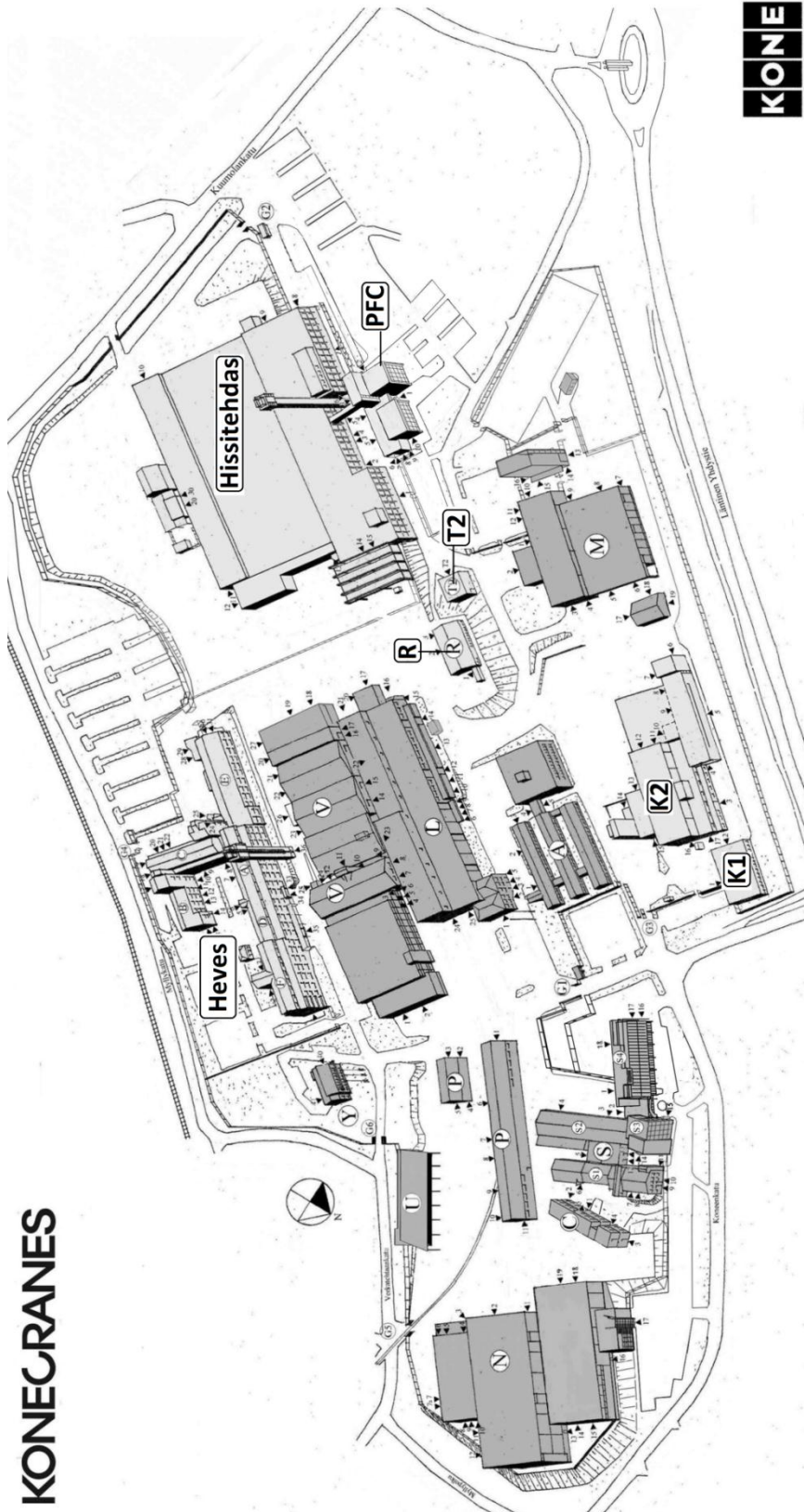
Yle Turku. 2012. Lunta voisi hyödyntää kaukokylmään. [verkkoartikkeli]. [viitattu 21.7.2014]. Päivitetty 5.6.2012 Saatavissa: http://yle.fi/uutiset/lunta_voisi_hyodyntaa_kaukokylmaan/5301563

Ympäristö. 2014. Ympäristölupa. [Ympäristöhallinnon yhteisen verkkopalvelun www-sivuilta]. [viitattu 12.11.2014]. Saatavissa: http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa

Ympäristöministeriö. 2014. [Ympäristöministeriön www-sivuilta]. [viitattu 12.11.2014]. Saatavissa: <http://www.ym.fi/fi-FI>

Ympäristönsuojelulautakunta. 1985. Lumenkaatopaikkojen ympäristövaikutukset. Turun kaupungin ympäristönsuojelulautakunta. 41 sivua.

Liite 1: Hyvinkään tehdasalueen aksometrikuva



KONECRANES

KONE

Liite 2: Hissitehtaan jäähdytysenergian tarve ja -tehon määrittäminen

Laskennallinen jäähdytysenergian tarve on se osa lämmityksessä hyödyntämättömän lämpökuormaenergian määrästä, joka rakennuksesta täytyy poistaa, jotta haluttu keskimääräinen sisälämpötila toteutuu. Rakennuksen tilojen jäähdytyksen nettoenergian tarve lasketaan yhtälöllä.

$$\begin{aligned} Q_{\text{jäähdytys,tilat,netto}} &= (1 - \eta_{\text{lämpö}}) Q_{\text{lämpökuorma}} \\ &\quad - \frac{(T_{s,\text{lask,keskim.}} - T_u)^{1,1}}{(T_s - T_u)} Q_{\text{lämpöhäviö}} \end{aligned} \quad (15)$$

Missä

$\eta_{\text{lämpö}}$	lämpökuormien kuukausittainen hyödyntämisaste, [-]
$Q_{\text{lämpökuorma}}$	lämpökuormaenergia, eli rakennuksen sisälle vapautuva lämpöenergia, [Wh]
$T_{s,\text{lask,keskim.}}$	jäähdytyksen asetusarvo, [°C]
$Q_{\text{lämpöhäviö}}$	rakennuksen lämpöhäviöenergia, [Wh]

Lämpöhäviöt:

Rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia lasketaan yhtälöllä.

$$Q_{\text{joht}} = \frac{\Sigma H_{\text{joht}}(T_s - T_u)\Delta t}{1000} \quad (16)$$

Missä

ΣH_{joht} rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö, [W/K]

Δt ajanjakson pituus, [h]

Rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö lasketaan rakennuskohtaisesti yhtälöllä.

$$\begin{aligned}\Sigma H_{\text{joht}} = & U_{\text{ulkoseinä}} A_{\text{ulkoseinä}} + U_{\text{yläpohja}} A_{\text{yläpohja}} \\ & + U_{\text{alapohja}} A_{\text{alapohja}} \\ & + U_{\text{ikkuna}} A_{\text{ikkuna}} + U_{\text{ovi}} A_{\text{ovi}}\end{aligned}\quad (17)$$

Rakenteiden epätiiviyksien kautta sisään ja ulos virtaavan vuotoilman lämmityksen tarvitsema energia lasketaan yhtälöllä.

$$Q_{\text{vi}} = \frac{H_{\text{vi}}(T_s - T_u)\Delta t}{1000}\quad (18)$$

Missä

H_{vi} vuotoilman ominaislämpöhäviö, [W/K]

Vuotoilman ominaislämpöhäviö lasketaan yhtälöllä.

$$H_{\text{vi}} = \frac{\rho_i c_{\text{pi}} n_{\text{vuotoilma}} V}{3600}\quad (19)$$

Missä

$n_{\text{vuotoilma}}$ rakennuksen vuotoilmakerroin, [1/h]

V rakennuksen tilavuus, [m³]

Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia lasketaan yhtälöllä.

$$Q_{iv} = \frac{H_{iv}(T_s - T_u)\Delta t}{1000} \quad (20)$$

Missä

H_{iv} ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö, [W/K]

Ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö lasketaan yhtälöllä.

$$H_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{v,p} t (1 - \eta_a) \quad (21)$$

Missä

$q_{v,p}$ poistoilmavirta, [m³/s]

η_a ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde, [-]

t käyntiaika, [-]

Esimerkkilaskuna lasketaan rakennuksen tilojen lämpöhäviöenergiat heinäkuulle. Rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö lasketaan yhtälöllä 17.

$$\begin{aligned} \Sigma H_{joht} &= 0,45 \frac{W}{m^2 K} \cdot 2\,300 \, m^2 + 0,15 \frac{W}{m^2 K} \cdot 23\,000 \, m^2 + 2,1 \frac{W}{m^2 K} \cdot 600 \, m^2 \\ &+ 3 \frac{W}{m^2 K} \cdot 80 \, m^2 = 5\,985 \, W/K \end{aligned}$$

Vuotoilman ominaislämpöhäviö lasketaan yhtälöllä 19. Ilman tiheydelle käytetään arvoa $1,2 \text{ kg/m}^3$ ja ilman ominaislämpökapasiteetille 1000 J/kgK , vuotoilmakertoimena $0,16 \text{ 1/h}$ ja tilavuudeksi on merkitty $184\,000 \text{ m}^3$.

$$H_{\text{vi}} = \frac{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,16 \frac{1}{\text{h}} \cdot 184\,000 \text{ m}^3}{3600} = 9813 \text{ W/K}$$

Ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö lasketaan yhtälöllä 21. Poistoilmavirta tehdashallissa on noin $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ja lämmöntalteenoton katsotaan olevan pois päältä jäähdytyskaudelle. Lämmöntalteenoton huomioiminen monimutkaistaisi laskentaa, sillä se on rakennettu vain osaan hallin ilmanvaihtokoneeseen. Lisäksi se on nestekiertoinen, jolloin sen hyöty jäähdytyskauden pienillä lämpötilaeroilla jäisi vielä matalammaksi. Käyntiaste on vuorokausittain $12\text{h}/24\text{h}$ ja viikoittain $5\text{d}/7\text{d}$.

$$H_{\text{iv}} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1000 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 30 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{12\text{h}}{24\text{h}} \cdot \frac{5\text{d}}{7\text{d}} = 12\,857 \text{ W/K}$$

Lämpöhäviö saadaan kun rakennusosien, vuotoilman ja ilmanvaihdon ominaislämpöhäviöt lasketaan yhteen ja kerrotaan ajanjakson pituudella sekä lämpötilaerolla. Ajanjakson pituutena käytetään heinäkuun tunteja, eli 744 h ja sisälämpötilana 20 °C ja ulkolämpötilana heinäkuun keskiarvoa $19,6 \text{ °C}$. Yhteensä lämpöhäviöksi saadaan.

$$Q_{\text{lämpöhäviö}} = \frac{\left((5\,985 + 9818 + 12\,857) \frac{\text{W}}{\text{K}} \right) \cdot (20 - 19,6)\text{K} \cdot 744 \text{ h}}{1000} = 7\,792 \text{ kWh}$$

Hissitehtaan heinäkuun rakennuksen tilojen lämpöhäviöenergiat yhteensä ovat 7 792 kWh, eli 7,79 MWh.

Lämpökuormat:

Lämpökuormien katsotaan johtuvan henkilöistä, sähkö- ja muista työlaitteista sekä auringon säteilystä. Henkilöiden luovuttama lämpöenergia lasketaan ominaislämpöenergian, henkilöiden lukumäärän ja rakennuksen käyttöasteen mukaan. Henkilöiden luovuttamaan lämpöenergiaan käytetään yhtälöä.

$$Q_{\text{henk}} = \varphi_{\text{henk}} nka\Delta t \quad (22)$$

Missä

φ_{henk} yhden henkilön luovuttama keskimääräinen lämpöteho, [W]
 ka rakennuksen käytönaikainen käyttöaste, joka kuvaa ihmisten keskimääräistä läsnäoloa rakennuksessa, [-]

Sähkölaitteista tuleva lämpökuorma on haastava arvioida tehtaan suuren koon takia ja mittaroinnin puuttumisen takia. Esimerkiksi loisteputkivalaisimia on noin 2 000 hallin katossa, lukuisia muita valaisimia työtasossa, sähkötrukkeja noin 20, muita ulkotrukkeja noin 5–10, taukotiloja keittiöineen noin 10, työnjohtajien lämpöpumppuja noin 5 ja katossa liikkuvia erikokoisia nostimia noin 10. Näiden lisäksi eri linjojen työskentelylaitteet latureineen, tietokoneet näyttöineen sekä muut linjakohtaiset laitteet. Myös on erilaisia isoja automaattikoneistoja, joiden lämpökuormaa on haastava arvioida.

Sähkönenergian kulutus hallissa pyritään arvioimaan käsiluentaraporttien avulla, joista erotellaan hallin energiakäyttö. Koko Hissitehtaan sähköenergiankulutus on ollut keskimäärin 11 280 kWh/vrk, joka on noin 0,353 kWh/vrk,m² neliometriä kohti.

Vastaavat arvot Heveksen toimistorakennukselle on 9 878 kWh/vrk, joka on noin 0,447 kWh/vrk,m² neliometriä kohti. Olettamalla, että Hissitehtaan toimisto- ja muu käyttö on samanlaista kuin Heveksessä, voidaan Hissitehtaan toimistopinta-alalla kertoa Heveksen toimiston ominaissähköenergian kulutus, eli 0,447 kWh/vrk,m². Tällöin saadaan Hissitehtaan toimisto-osan kulutukseksi noin 4 023 kWh/vrk, ja vastaavasti tehdashallille jäisi noin 7 257 kWh/vrk. Tämä on noin 0,316 kWh/vrk,m², joka olisi kokonaiskulutukseltaan noin 220 MWh kuukaudessa. Hieman on vaihtelua talvi- ja kesäaikana, talvella vastaava arvo on noin 170 MWh kuukaudessa ja kesällä noin 285 MWh kuukaudessa. Keskimääräisenä arvona laskuissa käytetään 250 MWh, joka muuntuisi myös lämpökuormaksi.

Lisälämpökuormaa syntyy varsinkin trukkien ajamisesta. Tehdashallissa on käytössä noin 20 sisätrukkia ja noin 5–10 ulkotrukkia. Trukeista ja muista prosessilaitteista oletetaan tulevan lisälämpökuormaa noin 50 MWh kuukaudessa.

Ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteilyenergia sisältää sekä ikkunoista rakennuksen sisälle suoraan tulevan että välillisesti ikkunaan absorboituneena lämpönä sisälle rakennukseen tulevan energian. Auringosta tuleva säteilyenergia lasketaan seuraavalla yhtälöllä.

$$Q_{\text{aur}} = \Sigma G_{\text{säteily,pystypinta}} F_1 A_{\text{ikk}} x \quad (23)$$

Missä

$G_{\text{säteily,pystypinta}}$	pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikkö kohti, [Wh/m ²]
F_1	säteilyn läpäisyn kokonaiskorjauskerroin, [-]
x	valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin, [-]

Säteilyn läpäisyn kokonaiskerroin lasketaan seuraavan yhtälön mukaan.

$$F_1 = F_k F_{\text{ver}} F_{\text{var}} \quad (24)$$

Missä

F_k	kehäkerroin, [-]
F_{ver}	verhokerroin, [-]
F_{var}	varjostusten korjauskerroin, [-]

Kertoimet on luettavissa Suomen rakentamismääräyskokoelman D5 taulukoista. Myös auringon kokonaissäteilyenergiat löytyy Suomen rakentamismääräyskokoelman D5 liitteestä 1 ilmansuunnittain ja kuukausittain eri säävyöhykkeille.

Laskuesimerkkinä esitetään heinäkuun lämpökuormat. Laskuissa yhden henkilön keskimääräisenä lämpötehona käytetään arvoa 100 W, joka on hieman suurempi kuin ohjearvo, koska tehtaassa tehdään fyysistä työtä. Henkilömäärä tehtaassa on keskimäärin jäähdytyskauden aikana, eli kesäisin noin 482,7 henkilöä. Käyntiasteena käytetään samaa arvoa kuin aikaisemmin, eli 12h/24h ja 5d/7d. Käyttöasteena käytetään arvoa 1, koska työaikana työntekijöiden oletetaan olevan hallissa. Henkilöiden luovuttamaan lämpöenergiaksi saadaan yhtälön 22 mukaan.

$$Q_{\text{henk}} = 100 \text{ W} \cdot 482,7 \cdot \frac{12\text{h}}{24\text{h}} \cdot \frac{5\text{d}}{7\text{d}} \cdot 744 \text{ h} = 12\,826 \text{ kWh}$$

Sähkölaitteista ja muista lämpökuormia tuottavista laitteista arvioitiin aiemmin, että lämpökuormiksi vapautuu noin 300 MWh kuukaudessa.

Valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroin määritetään ikkunalasituksen tyypin mukaan. Tehdashallin ikkunat ovat yksinkertaista lasitusta, joissa on aurinkokalvot ulkopuolella. Ikkunan valoaukon kohtisuoran auringon kokonaissäteilyn läpäisykerroimen arvioidaan olevan 0,8 ja vastaavasti ikkunan valoaukon läpäisykerroimen 0,72.

Heinäkuun auringon säteilyn kokonaisläpäisyn arvoksi rakennuksen ikkunoille saadaan yhtälöstä 24.

$$F_1 = 0,8 \cdot 0,99 \cdot 0,5 = 0,396$$

Pystypinnalle tuleva auringon kokonaissäteilyenergia pinta-alan yksikkö kohden heinäkuun rakennuksen kaakkoispuolelle on 82,6 kWh/m². Auringosta tulevaksi säteilyenergiaksi rakennuksen kaakkoispuolelle saadaan yhtälön 23 mukaan.

$$Q_{\text{aur,kaakko,heinäkuu}} = 82,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 0,396 \cdot 340 \text{ m}^2 \cdot 0,72 = 8\,007 \text{ kWh}$$

Vastaavat arvot lasketaan jokaiselle kuukaudelle tarvittavilta ilmansuunnilta. Heinäkuun lämpökuormiksi saadaan yhteensä:

$$\begin{aligned} Q_{\text{lämpökuorma}} &= 12\,826 \text{ kWh} + 250\,000 \text{ kWh} + 50\,000 \text{ kWh} + 13\,513 \text{ kWh} \\ &= 326,34 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Lämpöenergian hyödyntämisaste:

Lämpöenergian hyödyntämisaste lasketaan yhtälöllä.

$$\eta_{\text{lämpö}} = \frac{1 - \gamma^a}{1 - \gamma^{a+1}} \quad (25)$$

Missä

γ lämpökuorman ja lämpöhäviöiden suhdeluku, [-]

a numeerinen parametri, [-]

Numeerinen parametri määritetään seuraavalla yhtälöllä.

$$a = 1 + \frac{\tau}{15} \quad (26)$$

Missä

τ aikavakio, [h]

Aikavakio määritetään seuraavalla yhtälöllä.

$$\tau = \frac{C_{\text{rak}}}{H} \quad (27)$$

Missä

C_{rak} rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti, [Wh/brm²K]

H rakennuksen ominaislämpöhäviö, [W/K]

Rakennuksen ominaislämpöhäviö lasketaan seuraavan yhtälön mukaan.

$$H = \frac{Q_{\text{lämpöhäviö}}}{(T_s - T_u)\Delta t} \quad (28)$$

Esimerkkilaskuna lasketaan heinäkuun lämpöenergian hyödyntämisaste. Rakennuksen tehollisen lämpökapasiteetin arvioidaan olevan $160 \text{ Wh/brm}^2\text{K}$, joka vastaa raskasrakenteisen toimistorakennuksen arvoa. Tämä tarkoittaa ulko- ja väliseinien sekä alapohjan olevan betonia. Rakennuksen ominaislämpöhäviöksi saadaan yhtälön 28 mukaan.

$$H = \frac{7\,792 \text{ kWh}}{(20 - 19,6) \text{ K} \cdot 744 \text{ h}} = 28\,655,5 \text{ W/K}$$

Aikavakioksi yhtälöstä 27 saadaan.

$$\tau = \frac{160 \frac{\text{Wh}}{\text{brm}^2\text{K}} \cdot 20\,500 \text{ brm}^2}{28\,655,5 \text{ W/K}} = 114,46 \text{ h}$$

Numeeriseksi parametriksi yhtälöstä 26 saadaan.

$$a = 1 + \frac{114,46}{15} = 8,63$$

Lämpökuormien heinäkuun hyödyntämisasteeksi saadaan yhtälöstä 25 mukaan.

$$\eta_{\text{lämpö}} = \frac{1 - \left(\frac{326\,339 \text{ kWh}}{7\,792 \text{ kWh}}\right)^{8,63}}{1 - \left(\frac{326\,339 \text{ kWh}}{7\,792 \text{ kWh}}\right)^{8,63+1}} \approx 0,024$$

Jäähdytyksen nettoenergian tarve:

Jäähdytyksen nettoenergian tarve lasketaan yhtälöllä 15 jokaiselle kuukaudelle erikseen. Taulukossa 14 on näkyvissä laskennan tulokset.

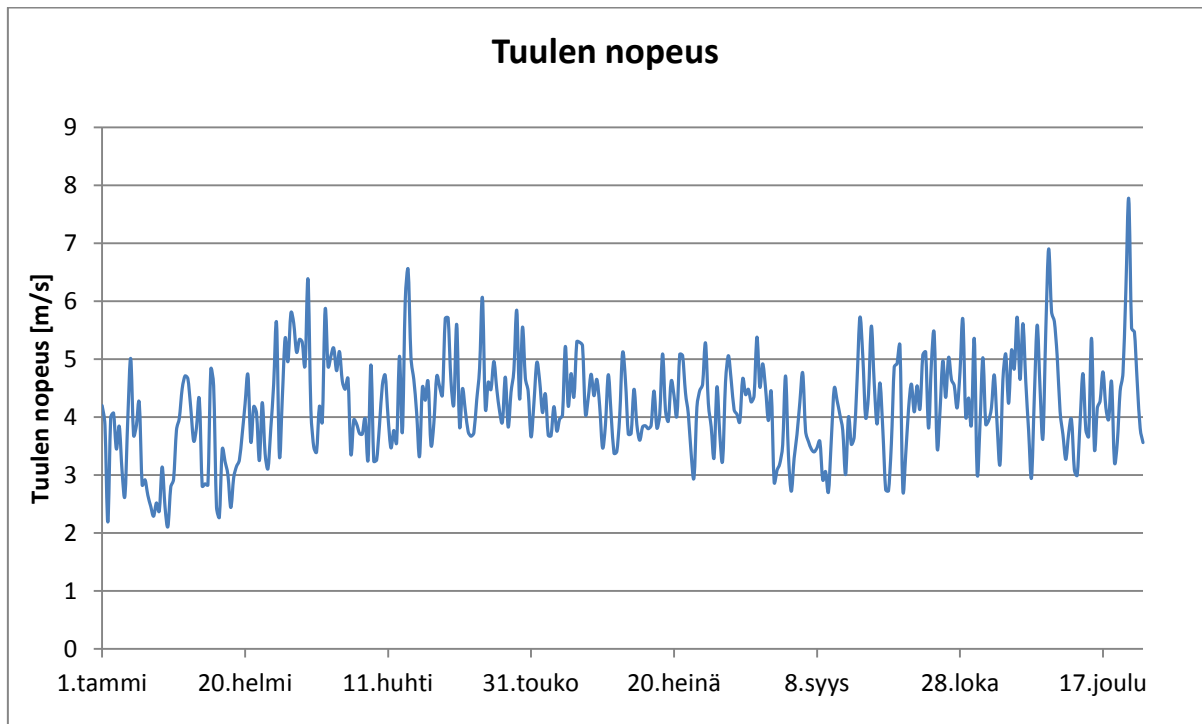
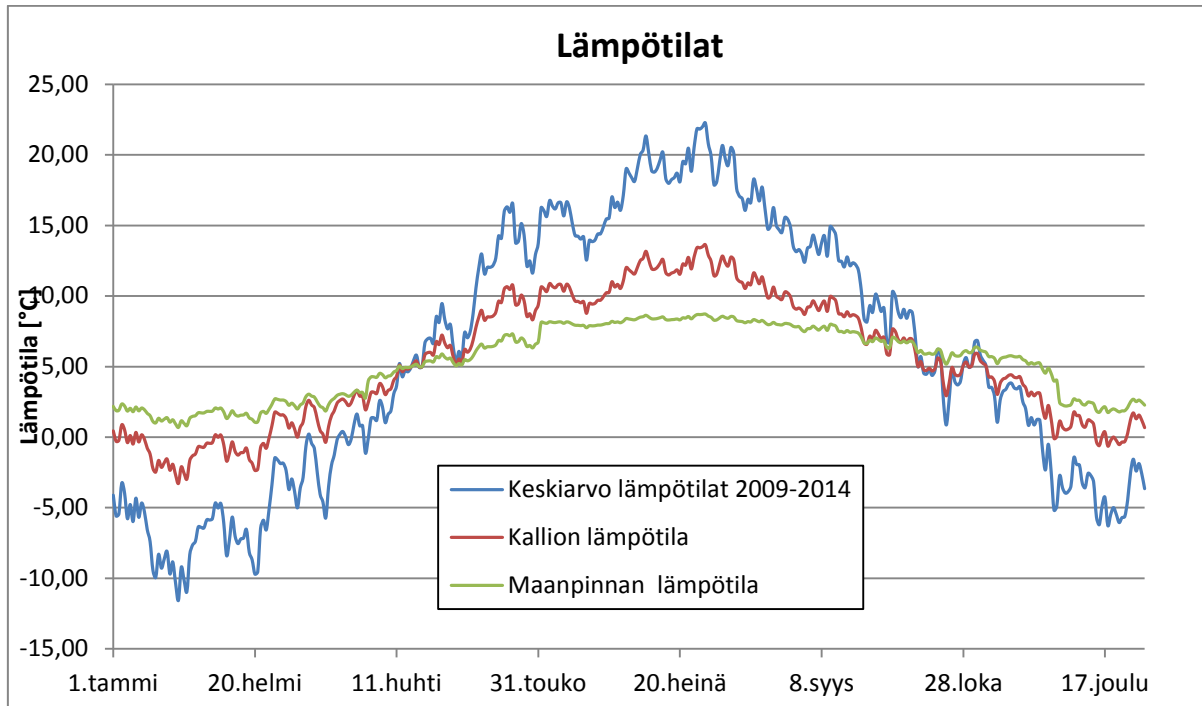
Taulukko 14. Jäähdytyksen nettoenergian tarve.

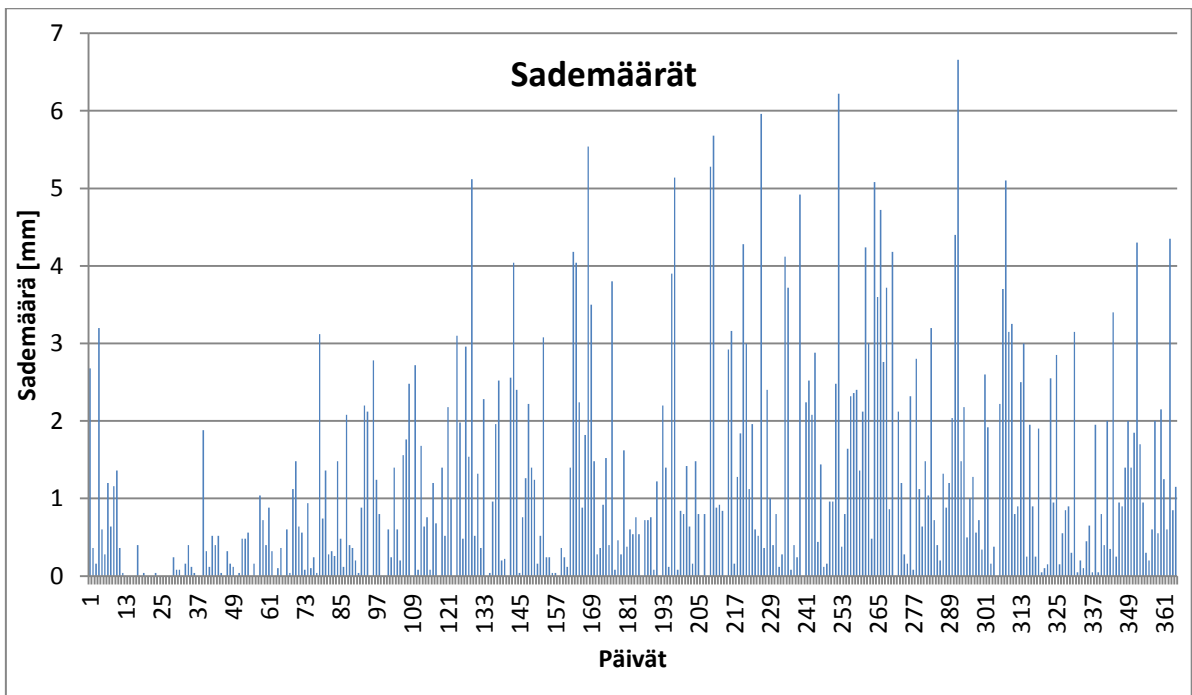
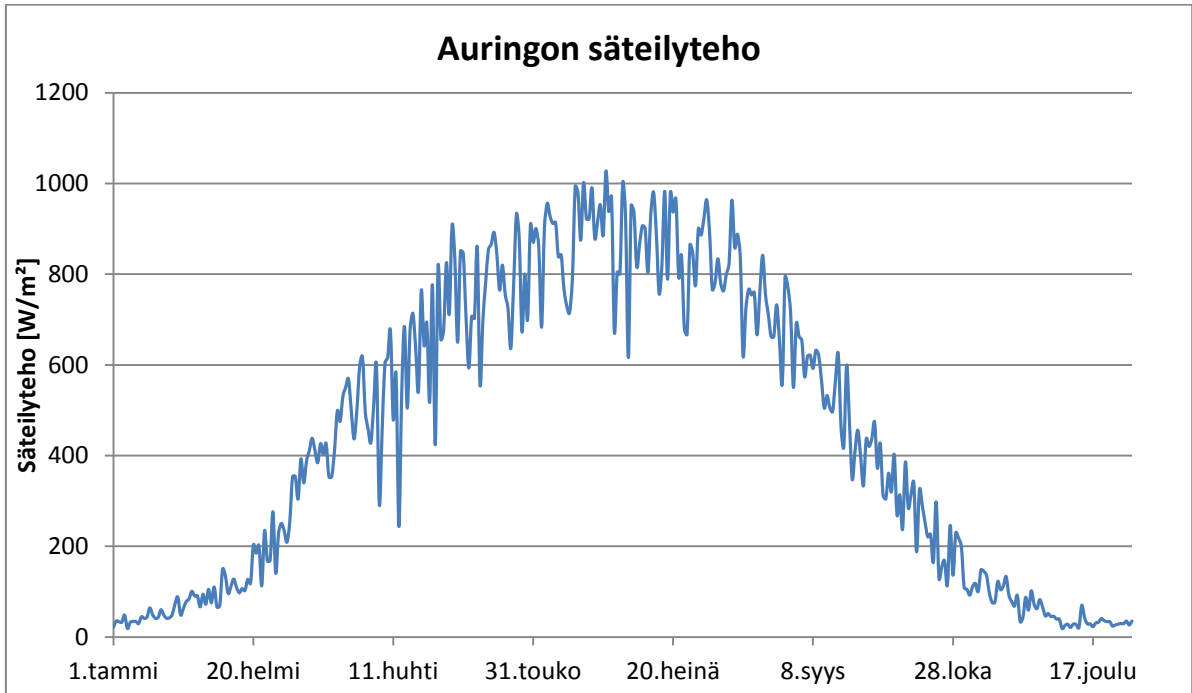
	Δt [h]	T_u [°C]	T_s [°C]	T_{aset} [°C]	$Q_{l.häviö}$ [MWh]	$Q_{l.kuorma}$ [MWh]	$\eta_{lämpö}$ [-]	$Q_{jäähdytys}$ [MWh]
Tammikuu	744	-7,3	20	25	582	314	1,00	0
Helmikuu	672	-6,2	20	25	505	319	0,99	0
Maaliskuu	744	-1,6	20	25	461	323	0,99	0
Huhtikuu	720	4,7	20	25	315	326	0,88	0
Toukokuu	744	11,7	20	25	177	331	0,53	38
Kesäkuu	720	15,4	20	25	94	332	0,28	152
Heinäkuu	744	19,6	20	25	8	326	0,02	251
Elokuu	744	16,8	20	25	69	329	0,21	175
Syyskuu	720	12,0	20	25	166	324	0,51	49
Lokakuu	744	5,9	20	25	301	319	0,87	0
Marraskuu	720	2,1	20	25	370	314	0,95	0
Joulukuu	744	-3,8	20	25	508	315	0,99	0

Laskennassa sisäilman lämpötilaksi, eli lämmityksen asetusarvoksi on laitettu 20 °C ja jäähdytyksen asetusarvoksi 25 °C. Laskennan mukaan jäähdytyskausi alkaisi toukokuussa ja kestäisi syyskuuhun asti. Yhteensä jäähdytysenergiaa kuluisi noin 665 MWh. Laskuihin on otettu huomioon myös 1,3 korjauskerroin.

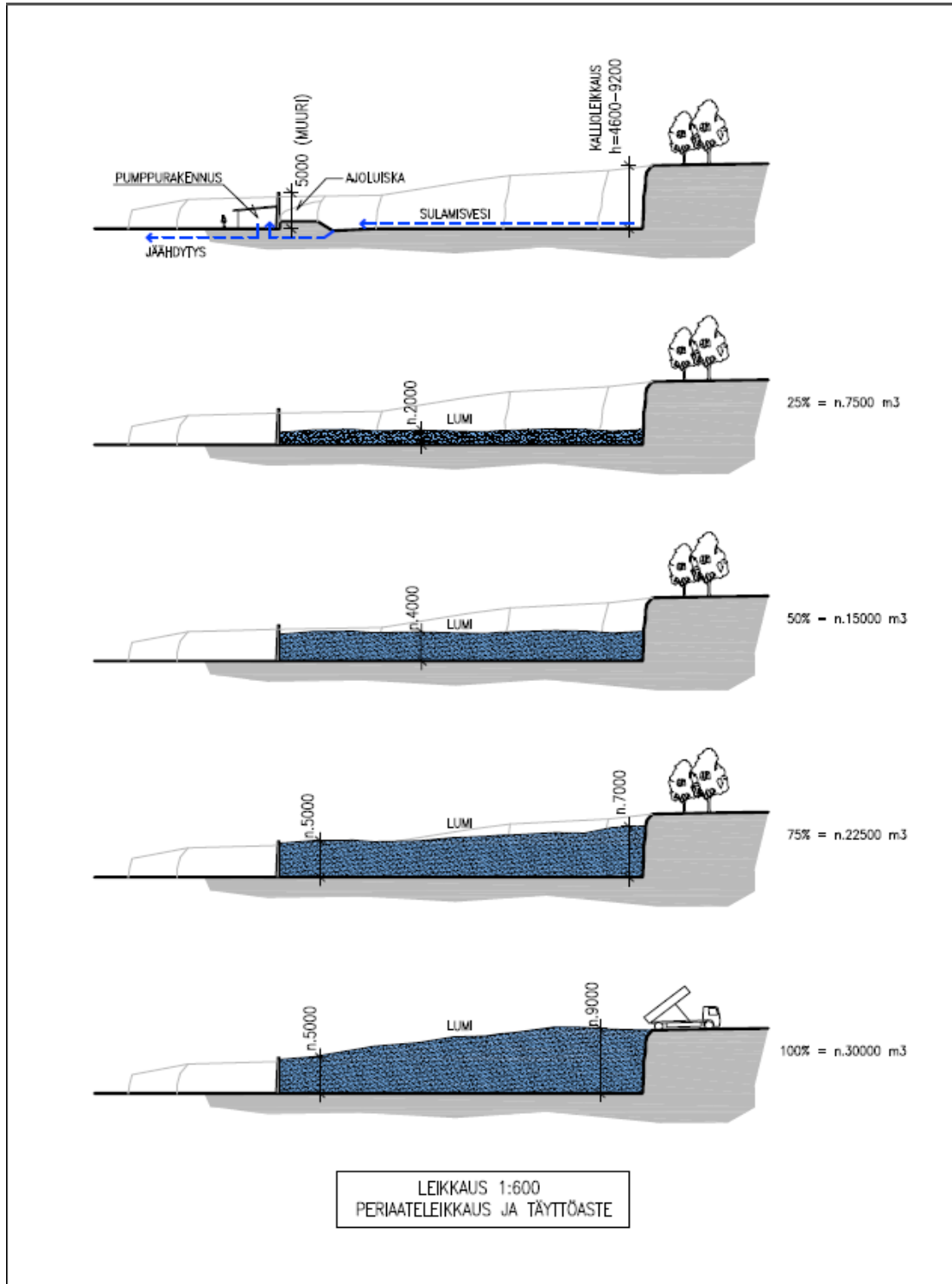
Jäähdytysteho määritellään käyttötuntien perusteella. Nyt päivittäisenä käyttöaikana pidetään 16h/24h ja viikoittaisena 5d/7d. Tämän perusteella esimerkiksi heinäkuussa jäähdytyksen käyttöaika olisi noin 350 tuntia, jolloin keskimääräiseksi jäähdytystehoksi saadaan noin 700 kW. Tämä vastaisi huipunkäyttöaikaa 940 tuntia.

Liite 3: Säätilastojen keskiarvot Klaukkalan sääasemalta vuosilta 2009–2014





Liite 5: Lumivaraston leikkauskuvat



Liite 6: Investointikustannukset

Yksikkö	Selite	Esimerkki komponentit / mitoitus	Ominaiskustannus [€/m ²]	Kokonaiskustannus [€]	Muuta	Lähde
Varasto				416136		
Pohja				145920		
-Kaivaukset	Tasokaivu	1,0 metri, noin 3 800 m ²	6,3 €/m ²	23940		Haahtela 2014, 195
-Pohjatyöt	Täyttö ja muotoilu	Kaivuumaalla, noin 5 000 m ³	3 €/m ³	14820		Haahtela 2014, 199
-Eristys	Routaeristys	Noin 3 800 m ²	11,2 €/m ²	42560		Haahtela 2014, 199
-Päällystys	Asfaltointi	Asfaltti (5 cm), routimaton, noin 3 800 m ²	17 €/m ²	64600		Haahtela 2014, 205
Seinä	Maanpaineseinä	Teräsbetoni 250 mm, raud., veden ja lämmöneristys, korkeus 5 000 mm, noin 560 m ²	350 €/m ²	194950		Haahtela 2014, 229
Kallio	Pintakäsittely	Kallioseinän käsittely ruiskubetonilla, noin 1250 m ²	20 €/m ²	25000		Kone kiinteistöosasto
Tietyöt				50266		
-Kulkureitit	Betoniluiska varastoon, ajoneuvoportti	Luiskan kaltevuus 1:8, noin 130 m ² ; 1 kpl ajoneuvoportti	Luiska: 205 €/m ² ; Portti: 6 730 €/kpl	32970		Haahtela 2014, 208
-Aitarakennelmat	Aita kallion reunukselle	Verkkoaita, 3 m, kevyt, noin 160 m	67 €/m	17296		Haahtela 2014, 208
Tekniikka				199870		
Pumppuyksikkö				42 000		
-Pumput	Kiertopumput, 2 kpl rinnankytketty	2 * IKL-E 80/170-15/2-R1, integroitu taajuusmuuttaja	7 000 €/kpl	14 000	Ei sisälly asennustöitä	Wilo

-Rakennus	Tekninen tila, 25 m ²	Rakennuksen rakentaminen, pumppujen asennus 20 h	1 080 €/m ² ; 50 €/h	28000		Haahtela 2014, 168; Talotekniikan TES 2014, 103; ARE
Muu tekniikka				157870		
-Putket	2-putkielementti	Eristetty lämpöjohto, noin 500 m	113 €/m	55370		Haahtela 2014, 263; ARE
-Lämmönsiirtimet	2 kpl, 700 kW/kpl	2*XGC-X042-L-5-PR-117 D, asennus 20 h	Siirrin 6 000 €/kpl; Asennus: 50 €/h	13000	Ei sisällä siirtimen eristyksiä	Danfoss, Talotekniikan TES 2014, 111
-Eroittimet	Hiekan ja öljyn erotus, erotuskyky 75 µm	Hiekkanerotin Eurohek Certaro 80/8000, Öljynerotin Europek Roo NS 80, Näytteenottokaivo Euronok D400, Asennus 80 h	36000 €/järjestelmä; 50 €/h	40000		Wavin-Labko Oy
-Muut	Sisääntulo varastoon, asennukset, viemäröinti	Putki Ø38mm; 1 600 m, asennus 620 h	Putki: 11,4 €/m; Asennus: 50 €/h	49 500	Karkea arvio varaston sisäisestä tekniikasta	Onninen 2014, 4; Talotekniikan TES 2014, 103
Muut				83315		
-Muut asennukset	Loput LVI- ja sähköasennukset	Arviolta 100 h	50 €/h	5000	Esim. tarvittavat eristykset yms.	ARE; Talotekniikan TES 2014
-Valvonta- ja automaatiojärjestelmä	Kamerat ja automaatio	Karkea arvio: 4 ulkokameraa, 50 pisteen automaatiojärjestelmä	560 €/kamera; 250 €/piste	14740		Haahtela 2014, 295–296
-Suunnittelu	Lopullinen suunnittelu	Sähkö, LVI, automaatio, rakennus, arkkitehti	10 % muista	63575		Haahtela 2014, 311
Yhteensä				699320		
-Toteutusmuotovaraus	Riskivaraus	Poikkeuksellisen hankkeen riskivaraus	3 % kustannuksista	20980		Haahtela 2014, 333
Lopullinen				720300		