

Erno Pennanen

Kaukojäähdytyksen hinnoittelu kulutushuippujen aikana

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö
Päivämäärä 28.4.2011

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Erno Pennanen Kaukojäähdytyksen hinnoittelu kulutushuippujen aikana 39 sivua + 5 liitettä 28.4.2010
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-tekniikka, suunnittelupainotteinen
Ohjaaja(t)	projektipäällikkö Tapani Muttonen yliopettaja Jukka Yrjölä
<p>Insinöörityön tavoitteena oli selvittää uutta mallia kaukojäähdytyksen hinnoitteluun. Uuden hinnoittelumallin tulisi ohjata vähentämään kaukojäähdytyksen kulutusta kaukojäähdytysverkoston kulutushuippujen aikana. Periaatteena oli, että vain hinnoittelun painopistettä siirretään. Kulutuksen pysyessä vakiona ovat jäähdytyksen kustannukset yhteneväiset vanhan hinnoittelun kanssa.</p> <p>Työssä tarkasteltiin kahta vaihtoehtoista mallia; tilausteho- ja säöpohjaista. Työn lähdemateriaalina käytettiin neljän toimistotalon kaukojäähdytyksen kulutustietoja kesältä 2010. Näiden rinnalla käytettiin kesän 2010 säätilatietoja Ilmatieteen laitoksen Kaisaniemen mitauspisteestä.</p> <p>Tutkituista hinnoittelumalleista paremmaksi vaihtoehdoksi huomattiin tilaustehopohjainen malli, jossa kaukojäähdytyksen käyttäjä maksaa kaukojäähdytysenergiastaan korkeampaa hintaa, kun tietty prosenttiosuus tilaustehosta ylittyy. Mallin ongelmaksi havaittiin kiinteistöjen tilaustehojen ylimitoitus. Kaikille kiinteistöille yhteistä leikkuriprosenttia ei ole löydettävissä.</p> <p>Säöpohjaisen mallin ongelmiksi havaittiin säätilan todettavuus sekä käyttäjän kyvyttömyys vaikuttaa sääolosuhteisiin. Säöpohjainen malli rankaisisi myös kulutustaan leikkaavaa käyttäjää.</p> <p>Kesän 2010 poikkeuksellisen lämpimän sään vuoksi työn tuloksena ei ollut mahdollista määrittää yleispäteviä rajoja uudelle hinnoittelumallille. Työ kuitenkin osoittaa kulutusta haluttuun suuntaan ohjaavan hinnoittelun mahdolliseksi ja tarjoaa lähtökohdan aiheen jatkoselvityksille.</p>	
Avainsanat	kaukojäähdytys, energiansäästö, absorptio

Author(s) Title	Erno Pennanen Pricing of District Cooling During the Height of Consumption
Number of Pages Date	39 pages + 5 appendices 28 April 2010
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering
Instructor(s)	Tapani Muttonen, Project Manager Jukka Yrjölä, Principal Lecturer
<p>The goal of this final year project was to define a new model for the pricing of district cooling. The new model was to cut down the consumption of district cooling during the peak use of the cooling network.</p> <p>The intention was not to change the bottom line of the bill, but to change the focus of pricing. Should the consumption remain the same, the bill should also remain the same. However, it is desirable that the users will decrease their consumption during the high-priced hours, and, thus, decrease their cooling bill.</p> <p>Two different models were examined: commission based and weather based. The commission based one turned out to be the better one. However, the commission based model was problematic due to the fact that none of the buildings used a full 100 % of their commission. Furthermore, no common formula for reductions applying all buildings could be formed.</p> <p>The problems of the weather based model were of a more fundamental nature. The user cannot affect the weather, but is still forced to pay a higher price during hot spells regardless of the consumption. Also, the verifiability of the weather proved to be difficult.</p> <p>Since the summer 2010 was unusually hot, no universal limits for pricing could be provided as the result of the project. The conclusion is, however, that district cooling can be priced in the intended way. This final year project functions as a starting point for further study on the subject.</p>	
Keywords	district cooling, energy saving, absorption

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kaukojäähdytys	2
2.1	Kaukojäähdytys Suomessa	2
2.2	Kaukojäähdytyksen kulutukseen vaikuttavat tekijät	3
2.3	Kaukojäähdytyksen tuotantokustannukset ja päästöt	4
2.4	Kaukojäähdytyksen tuotantotavat	5
2.4.1	Vapaajäähdytys	5
2.4.2	Lämpöpumppulaitos	6
2.4.3	Absorptiojäähdytys	8
2.5	Kaukojäähdytysenergian jakeluverkosto	10
3	Lähtötiedot	11
3.1	Jäähdytysenergian kulutustiedot	11
3.2	Sääolot	12
3.3	Kohderakennukset	14
3.4	Rakennusten ominaisjäähdytysenergiankulutus	16
4	Kaukojäähdytyksen hinnoittelu	19
4.1	Kaukojäähdytyksen hinnoittelun muutostarve	19
4.2	Kaukojäähdytyksen säästöpotentiaali	20
4.2.1	Rakennuksen sisäilman lämpötilan nostaminen	20
4.2.2	Jäähdytystehon varaaminen	20
4.3	Hinnan kausiporrastus	21
4.3.1	Teoria	21
4.3.2	Käytäntö	23
4.4	Tilaustehopohjainen jakomalli	25
4.4.1	Teoria	25
4.4.2	Käytäntö	26
4.5	Sääpohjainen jakomalli	29
4.5.1	Teoria	29
4.5.2	Käytäntö	31
5	Laskentataulukko	33
5.1	Taulukon peruslogiikka	33

5.2	Syötettävät lähtötiedot	33
5.2.1	Kaukokylmän tuntikohtaiset kulutustiedot	33
5.2.2	Kaukokylmän tilausteho ja kuukausikohtaiset kulutustiedot	34
5.2.3	Ulkoilman tiedot	34
5.3	Taulukon muuttajat	34
5.3.1	Kaukokylmän hinta sekä hintakertoimet talvi- ja välikaudelle	34
5.3.2	Tilaustehopohjaisen leikkurin asettaminen	35
5.3.3	Sääpohjaisten rajojen asettaminen	35
6	Yhteenveto	36
6.1	Työn aikana esiin nousseet ongelmat	36
6.2	Jatkoselvitysehdotukset	37
	Lähteet	38

Liitteet

Liite 1. Rakennusten kuukausikohtaiset kaukojäähdytyksen kulutustiedot

Liite 2. Kuukausikohtaiset keskilämpötilat 1990–2010, Kaisaniemi

Liite 3. Jäähdytystehon ja entalpian suhde tunneittain.

Liite 4. Vipubarren ja hintakertoimen välisiä suhteita.

Liite 5. Sääolosuhteiden esiintymisiä [h] 2007 ja 2010

1 Johdanto

Kaukojäähdytys on jäähdytysenergian keskitettyä tuotantoa. Sen käytön uskotaan laajenevan merkittävästi lähivuosina [1]. Nykyisin kaukojäähdytysenergian hinta on kiinteä, vaikka kaukojäähdytyksen tuotantokustannukset ja tuotannosta syntyvät päästöt vaihtelevat käytettävän tuotantotavan mukaan. Käytettävään tuotantotapaan vaikuttavat kaukojäähdytyksen kokonaistarve sekä vuodenaika. Insinööriyön aiheena on selvittää uutta hinnoittelumallia kaukojäähdytykselle. Lisäksi työssä esitellään kaukojäähdytyksen tuotantotapoja. Insinööriyö tehdään Taltec Oy:lle Senaatti-kiinteistöjen ja Helsingin Energian toimeksiannosta.

Senaatti-kiinteistöt on valtion kiinteistöjä hallinnoiva yritys. Helsingin Energia on Suomen suurin kaukojäähdytyksen tuottaja 100 MW:n liityntäteholla (vuonna 2010).

Molemmilla tilaajatahoilla on yhteinen intressi muuttaa nykyistä kaukojäähdytysenergian hinnoittelumallia siten, että kaukojäähdytysenergia olisi talvi- ja välikaudella nykyistä edullisempaa ja vastaavasti kesän kulutushuippujen aikana merkittävästi nykyistä kalliimpaa. Muuttunut hinnoittelu ohjaisi kaukojäähdytyksen käyttäjiä vähentämään kaukojäähdytysenergian kulutusta kulutushuippujen aikana. Tämä helpottaisi Helsingin Energian kaukojäähdytysverkon mitoittamista sekä sopisi yhteen Senaatti-kiinteistöjen energiansäästötavoitteiden kanssa. Vuositasolla saman energiankulutuksen tulee tuottaa sama kaukojäähdytyslasku kuin nykyisen hinnoittelumallinkin (ns. 1:1-periaate).

Työssä tarkastellaan kahta vaihtoehtoista hinnoittelumallia: tilaustehopohjaista sekä säähöpohjaista.

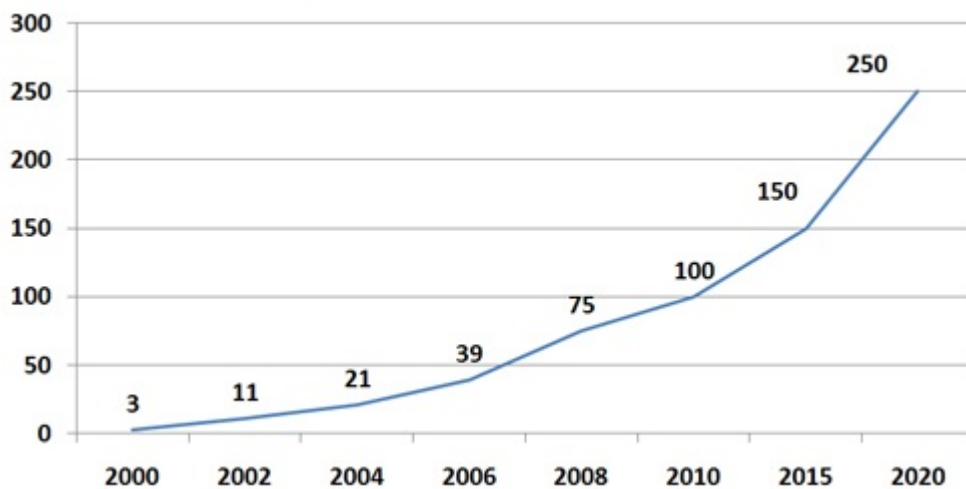
Hinnoittelumalleja rakennetaan neljän Senaatti-kiinteistöjen toimistorakennuksen vuoden 2010 toteutuneen kaukokylmäkulutuksen pohjalta. Tuntikohtaiset kulutustiedot saadaan Helsingin Energian datasta. Lisäksi työssä käytetään Ilmatieteen laitokselta hankittuja ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden tietoja. Insinööriyön ohessa laaditaan Microsoft Excel -laskentataulukko, jonka avulla hinnoittelumallien vaikutuksia voidaan edelleen selvittää.

2 Kaukojäähdytys

2.1 Kaukojäähdytys Suomessa

Kaukojäähdytys on Suomessa verrattain uusi ratkaisu kiinteistöjen jäähdyttämiseen. Toimistojen sekä teollisuuden prosessien jäähdytystarve on perinteisesti hoidettu kiinteistökohtaisilla jäähdytyskoneilla. Suomen ensimmäinen kaukojäähdytysverkko rakennettiin Helsinkiin vuonna 1998. Tämän jälkeen verkostoja on rakennettu Turkuun (vuonna 2000), Lahteen (2000) sekä Heinolaan (2002). [2.]

Perinteisiin jäähdytysratkaisuihin verrattuna kaukojäähdytyksen etuna ovat pienemmät ympäristöpäästöt, kulutuksen helpompi mitattavuus sekä elinkaarikustannusten ennakoitavuus. Kaukojäähdytys on kasvattanut suosiotaan nopeasti: Helsingissä sen markkinaosuus on vuonna 2011 noin 30 %. [1.] Kaukojäähdytyksen liittymistehon toteutunut ja arvioitu kehitys Helsingissä on esitetty kuvassa 1.

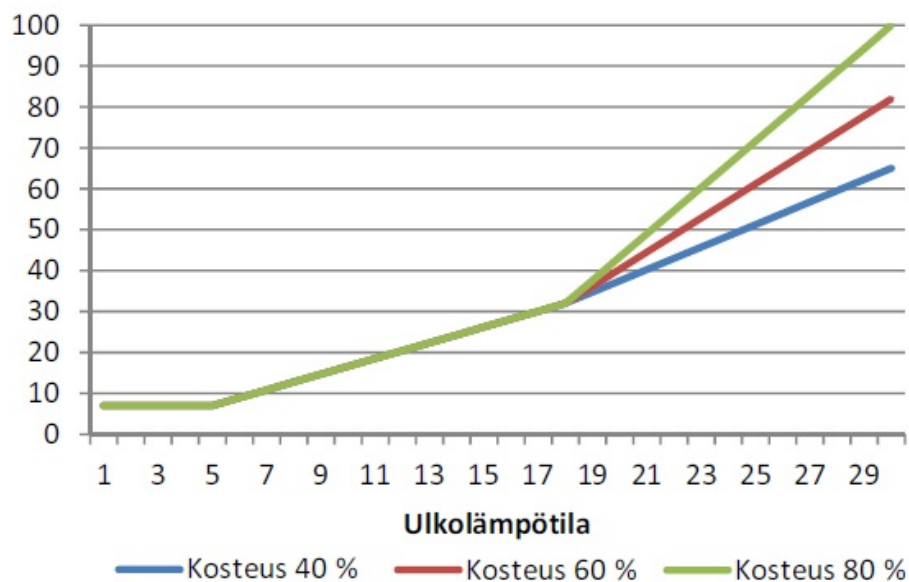


Kuva 1. Kaukojäähdytyksen liittymistehon arvioitu kehitys Helsingissä [MW] [3].

Helsingin kaukojäähdytysverkosto on noin 40 kilometrin pituudessaan Euroopan kolmanneksi laajin [1]. Laajempia verkostoja on rakennettu vain Tukholmaan ja Pariisiin [2].

2.2 Kaukojäähdytyksen kulutukseen vaikuttavat tekijät

Kaukojäähdytystä käytetään ympäri vuoden, mutta kulutuksen määrän ero talvi- ja kesäpäivän välillä saattaa olla yli kymmenkertainen. Kaukojäähdytyksen pohjakuorma muodostuu tiloista, joita on jäähdytettävä vuoden ympäri niiden sisäisen lämpökuorman vuoksi. Tällaisia tiloja ovat esimerkiksi serverihuoneet. Kaukojäähdytyksen kulutus kasvaa ulkolämpötilan noustessa tasaisesti. Tiloja, joissa ei ole suuria sisäisiä tai ulkoisia lämpökuormia, pystytään jäähdyttämään vapaajäähdytyksellä ilmanvaihdon kautta aina +17...+19 °C:n ulkolämpötilaan asti. Sen jälkeen kaukojäähdytyksen kulutus kasvaa voimakkaasti. [4] Ulkoilman lämpötilan ja kosteuden suhdetta kaukojäähdytyksen kulutukseen on hahmoteltu kuvassa 2.



Kuva 2. Ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden suhde kaukokylmän kulutukseen [4].

Ulkoilman kosteus alkaa vaikuttaa jäähdytystehontarpeeseen ulkoilman absoluuttisen kosteuden noustessa tasolle, jossa jäähdytetyn ilman kosteus ylittää miellyttävänä pidetyn rajan. Seppäsen [5, s. 24] mukaan sisäilmaa on syytä kuivattaa sen suhteellisen kosteuden ylittäessä 45 %. Kuivattaminen tapahtuu jäähdyttämällä ilmaa niin alhaiseen lämpötilaan, että osa sen kosteudesta kondensoituu jäähdytyspatterin pinnalle. Tämän jälkeen ilma on jälkilämmitettävä haluttuun lämpötilaan. [5, s. 195] Näin ollen ilman kuivattaminen jäähdytysprosessin yhteydessä kuluttaa enemmän energiaa kuin pelkkä ilman jäähdyttäminen.

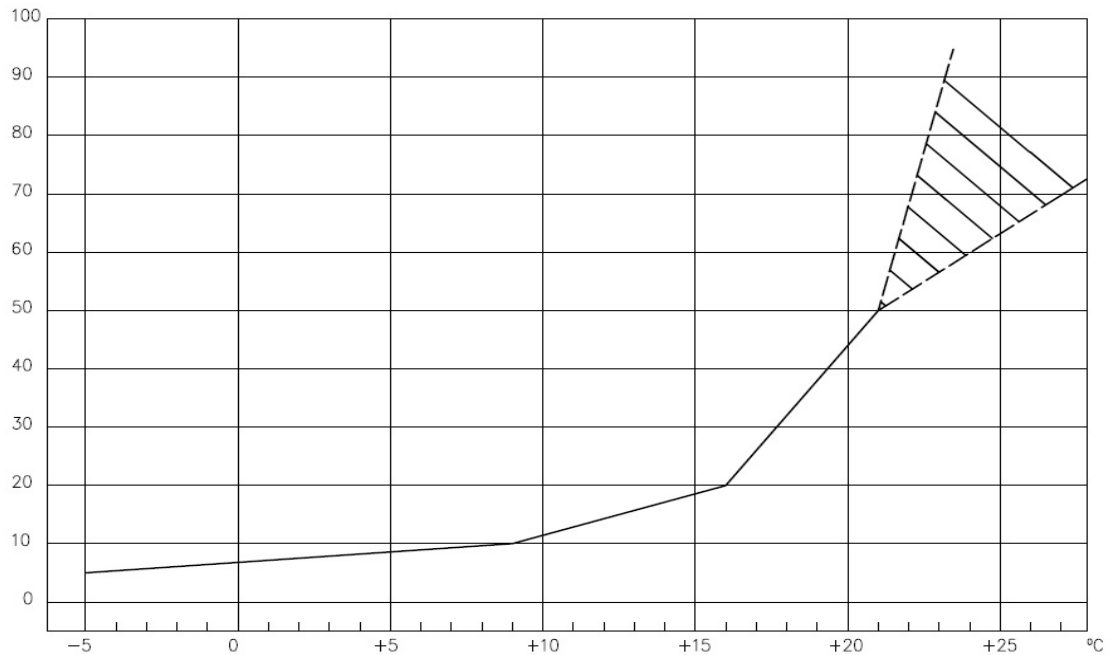
Helsingissä kaukojäähdytystä käytetään eniten toimistorakennuksista, joiden käyttö keskittyy päiväaikaan. Tästä johtuen kaukojäähdytyksen kulutus vaihtelee voimakkaasti vuorokaudenajan mukaan. Kesäpäivänä Helsingissä kaukojäähdytyksen kokonaiskulutus lähtee kasvamaan klo 6, saavuttaa huippunsa klo 14, kääntyy laskuun klo 18 ja saavuttaa yönaikaisen pohjatasonsa klo 23. Päiväaikainen kulutus on n. 2,5-kertaista yöaikaiseen verrattuna. [4.]

2.3 Kaukojäähdytyksen tuotantokustannukset ja päästöt

Kaukojäähdytystä tuotetaan vapaajäähdytyksellä, absorptiokoneikolla sekä lämpöpumpulla [6]. Kaukojäähdytyksen tuotannosta 80 % perustuu energiaan, joka muuten jäisi hyödyntämättä [7].

Kaukojäähdytysenergian tuotantokustannukset ja tuotannosta seuraavat päästöt riippuvat suuresti tuotantotavasta. Kaukojäähdytyksen tuotanto on edullisinta käytettäessä viileää merivettä vapaajäähdytykseen. Meriveden lämpötilan noustessa vapaajäähdytyksen osuus kaukojäähdytyksen tuotannossa pienenee.

Kaukojäähdytysenergian tuotantohinta on voimakkaasti lämpötilasidonnainen. Kesäaikaan jäähdytysenergian tuottaminen muodostaa 95 % kaukojäähdytyksen tuotantokustannuksista. Talviaikaan valtaosan muodostavat pumppauskustannukset. Tarkka kustannus riippuu monista tekijöistä, mutta nyrkkisääntönä voi sanoa tuotantokustannuksen vähintään nelinkertaistuvan lämpötilan noustessa +10 °C:sta +22 °C:n. Kaukokylmän tuottaminen on kaikista kalleinta ja epäekologisinta silloin, kun jäähdytysenergiaa joudutaan tuottamaan lämpöpumppulaitoksella, eikä prosessin sivutuotteena syntyvää lämpöä voida hyödyntää. [4] Kuva 3 esittää lämpötilan vaikutusta kaukokylmän tuotantokustannuksiin.



Kuva 3. Ulkoilman lämpötilan suhde kaukokylmän tuotantokustannuksiin [4].

2.4 Kaukojäähdytyksen tuotantotavat

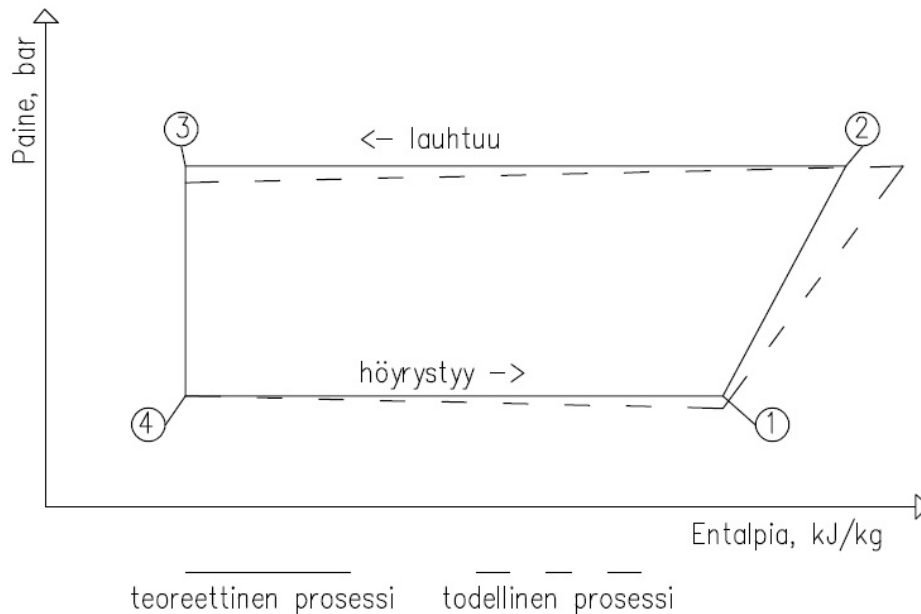
2.4.1 Vapaajäähdytys

Vapaajäähdytys on kaukojäähdytyksen tuotantotavoista energiatehokkain ja ympäristöystävällisin. Vapaajäähdytyksessä kaukojäähdytysverkon paluuvesi jäähdytetään pumppaamalla se verkoston menolämpötilaa viileämpään ympäristöön.

Helsingissä vapaajäähdytyksen lähteenä käytetään merivettä, joka on riittävän viileää huhtikuun loppuun saakka. Vielä toukokuussakin noin puolet käytettävästä kaukokylmästä saadaan merivedestä [4]. Lisäksi on tutkittu lumen varastoimista ja sen hyödyntämistä kaukojäähdytyksen tuotannossa kesällä. Jotta lumivarastosta saataisiin merkittävä teho, tulisi sen olla kooltaan valtava: esimerkiksi Finlandia-talon kokoinen lumivarasto riittäisi vain viikoksi kaukojäähdytyksen tuotantoon. [8.] Ruotsissa on käynnistymässä pilottikokeilu, jossa lunta kerätään varastoon yksittäisten rakennuksien jäähdyttämistä varten.

2.4.2 Lämpöpumppulaitos

Kaukokylmän koneellinen tuottaminen perustuu kylmäaineen kiertoprosessiin, jossa prosessissa kiertävä kylmäaine höyrystyy ja lauhtuu eri paineissa. Prosessin perusta on sama lämpöpumppulaitoksessa sekä absorptiojäähdytyskoneikossa. [9, s. 12] Teoreettinen kylmäprosessi on esitetty kuvassa 4:



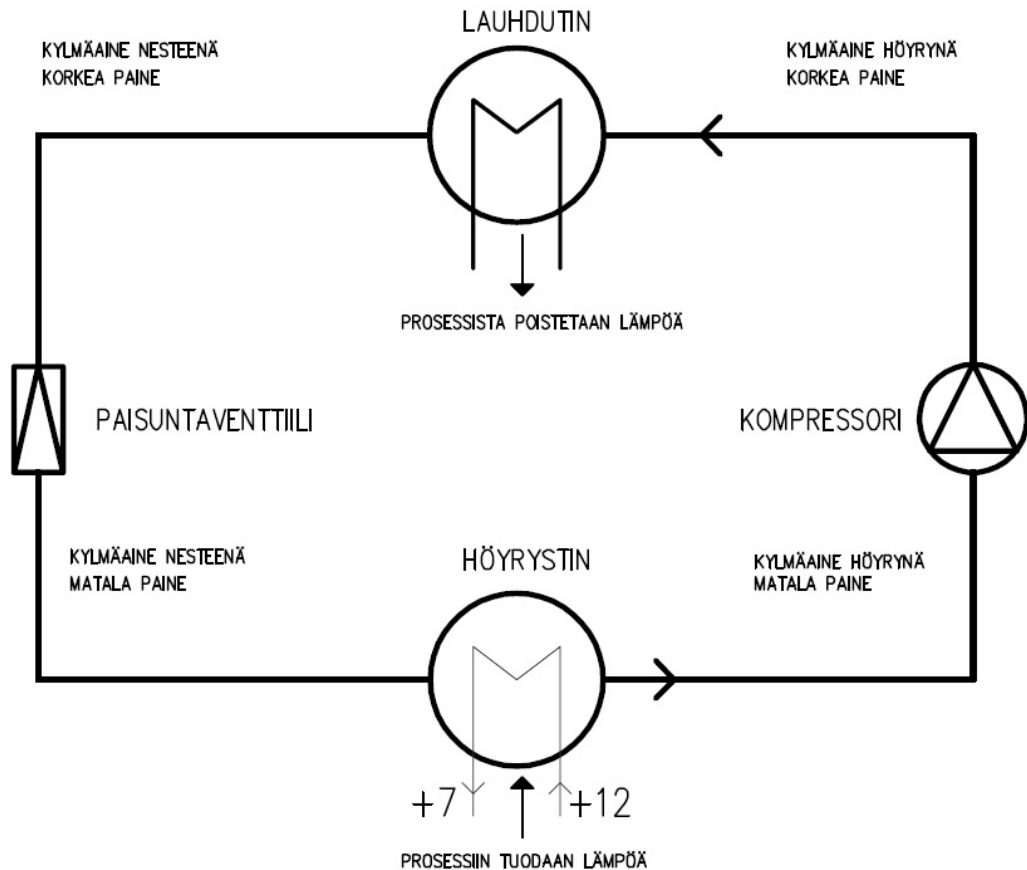
Kuva 4. Teoreettinen kylmäprosessi log p, h-tilapiirroksessa [9, s. 12].

Käytännössä prosessi kaartuu kompressorin häviöiden vuoksi oikealle välillä 1–2. Prosessissa tapahtuu myös painehäviöitä, jotka muuttavat välien 2–3 ja 4–1 suuntaa.

Lämpöpumppulaitoksessa prosessin pääkomponentit ovat höyrystin, lauhdutin ja kompressor. Kylmäaine kiehuu höyrystimessä hyvin matalassa paineessa sitoen itseensä lämpöä höyrystimen läpi virtaavasta kaukojäähdytysvedestä, jonka lämpötila laskee. [9, s. 10.]

Kuva 5 esittää kompressorilla toimivaa kiertoprosessia. Prosessin toiminta perustuu kompressorin imupuolella vallitsevaan hyvin matalaan paineeseen, jonka ansiosta kylmäaine kiehuu kaukojäähdytysverkoston menolämpötilaa matalammassa lämpötilassa. Kompressor nostaa kylmäaineen korkeaan paineeseen ja lämpötilaan. Lauhduttimessa

kylmäaine lauhtuu nesteeksi luovuttaen lämpöä ympäristöönsä. Nestemäisen kylmäaineen paine ja lämpötila laskevat edelleen paisuntaventtiilissä, josta jo osittain höyrystynyt kylmäaine jatkaa höyrystimelle. [9, s. 10.]

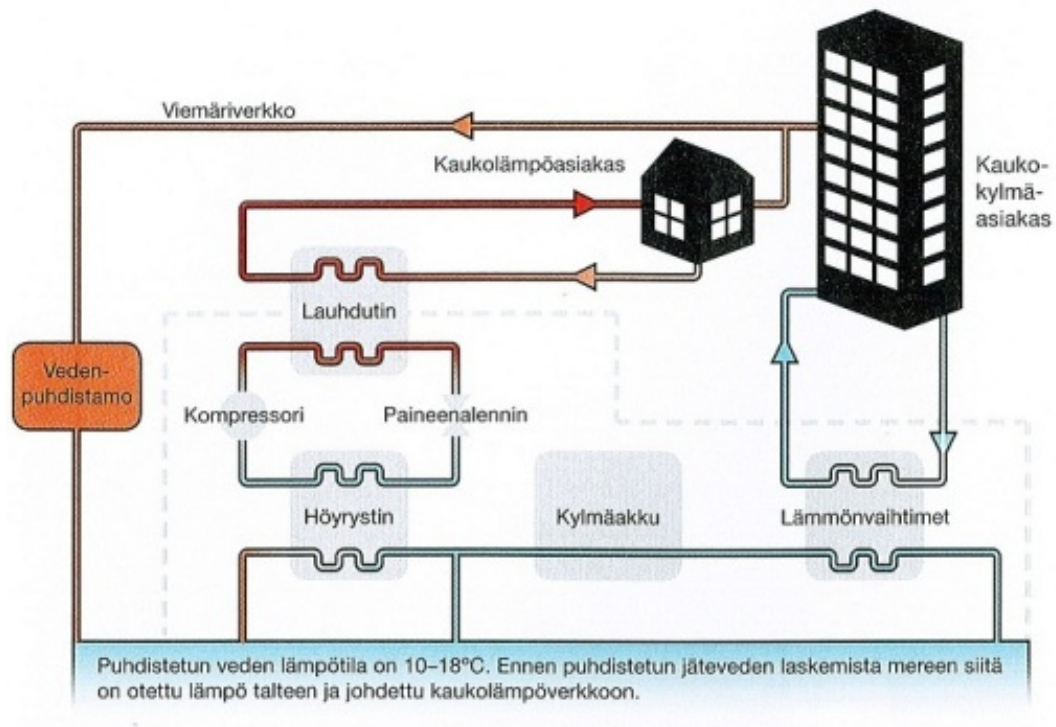


Kuva 5. Lämpöpumppulaitoksen periaatekaavio

Järjestelmän kokonaishyötysuhde paranee, mikäli samassa prosessissa tuotetaan sekä kaukolämmitystä että kaukojäähdytystä. Tällaisessa yhteistuotantolaitoksessa höyrystimellä jäähdytetään kaukojäähdytysverkon menovettä ja lauhduttimella nostetaan kaukolämmitysverkon paluuv veden lämpötilaa. [10, s. 539.] Maailman suurin kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen yhteistuotantolaitos on Helsingissä Katri Valan puiston alla kallioluolassa. Laitoksen tuotantoteho on 60 MW kaukojäähdytystä ja 90 MW kaukolämmitystä [11].

Kaukojäähdytyksen ja -lämmityksen yhteistuotantolaitos toimii myös Turussa, jossa Kakolan jätevedenpuhdistamon yhteyteen on rakennettu 20 MW:n lämpöpumppulaitos. Kakolan laitoksen toimintaa on selvitetty kuvassa 6. Puhdistetusta jätevedestä siirre-

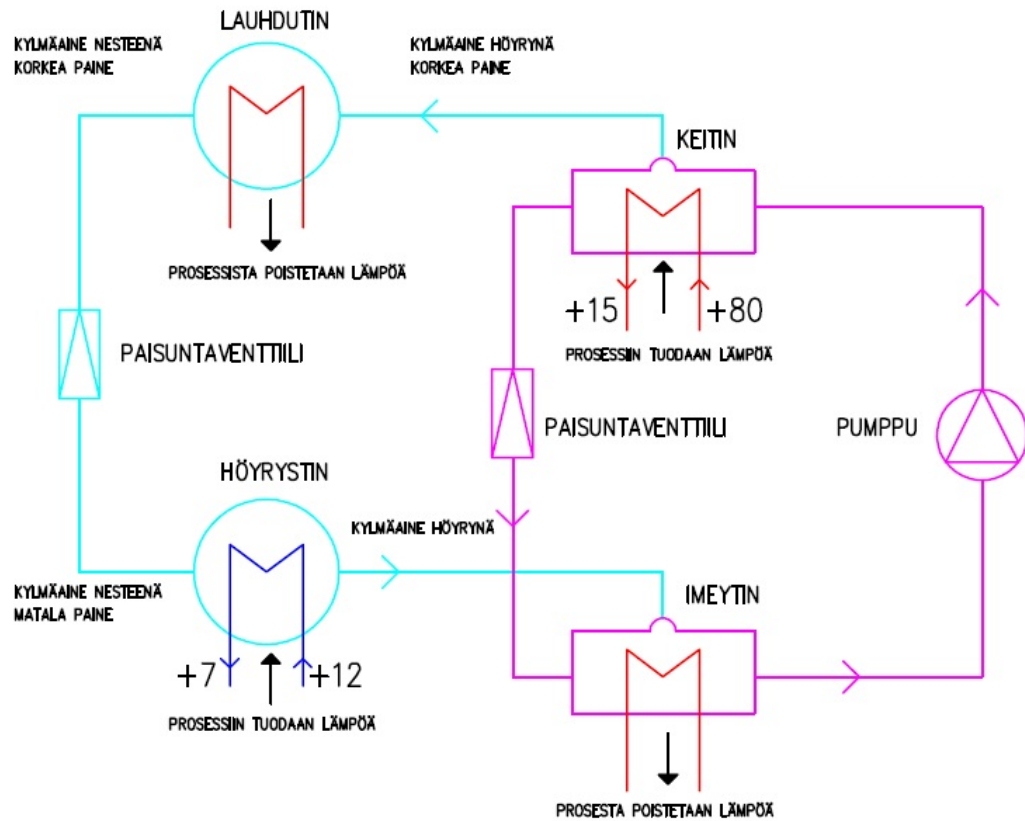
tään ensin lämpöenergiaa kaukolämpöverkoston veteen, minkä jälkeen jäähtyneellä jätevedellä lasketaan vielä kaukojäähdytysverkon paluuvettä ennen jäteveden purkamista mereen. Parhaimmalla hyötysuhteellaan laitos tuottaa yhdellä sähköenergiayksiköllä kolme yksikköä lämpöenergiaa ja kaksi yksikköä jäähdytysenergiaa. [12.]



Kuva 6. Kakolan lämpöpumppulaitoksen periaatekaavio [12].

2.4.3 Absorptiojäähdytys

Absorptiojäähdytysprosessi (kuva 7) eroaa kompressorikoneikon voimalla toimivasta prosessista siten, että se saa toimintaenergiansa prosessiin tuotavasta lämpöenergias- ta, esimerkiksi kaukolämpöverkostosta. Prosessin toimivuus perustuu käytettävän kyl- mäaineliuoksen (absorbentin) käyttäytymiseen aineparina: prosessissa kiertävän kaa- sun (tai höyryn) ja nesteeseen absorboituneen kaasun välillä vallitsee tasapaino tietys- sä paineessa ja lämpötilassa. Kaasua vapautuu tai sitoutuu lämpötilaa tai painetta muuttaessa. [13; 14, s. 12.]



Kuva 7. Absorptiojäähdytyskoneikon periaatekaavio [14, s. 534–537; 17; 18, s. 12–14.]

Prosessin käyttämä lämpöenergia tuodaan keittimeen, jossa se höyrystää veden pois kylmäaineliuksesta. Matalamman höyrystymispisteen saavuttamiseksi prosessin kylmäaineliuos tuodaan keittimeen alipaineisena.

Keittimessä höyrystynyt, korkeassa paineessa oleva vesihöyry johdetaan lauhduttimelle, jossa se palautuu takaisin nestemäiseen olomuotoon luovuttaen lämpöä ympäristöönsä. Painehäviöiden vuoksi painetaso on lauhduttimessa hieman keitintä matalampi. Lauhtunut vesi johdetaan paisuntaventtiin kautta höyrystimelle.

Höyrystimelle saapuessaan vesi on erittäin alhaisessa paineessa (Helsingissä 8 mbar), minkä ansiosta sen kiehumispiste on matala, jopa +4 °C. Matalassa paineessa kiehuva vesi imee lämpöä ympäristöstään ja jäädyttää prosessin läpi virtaavan kaukojäähdytysverkon paluuvettä. Höyrystynyt vesi ohjataan imeyttimeen.

Imeyttimessä höyrystyneen, matalalämpöisen veden päälle ruiskutetaan keittimeltä palautettua, väkevöitynyttä työainetta, joka lauhduttaa höyryn takaisin vedeksi. Vesi-höyryn tiivistyminen vedeksi vapauttaa lämpöä, joka on lauhdutettava pois prosessista. [14, s. 534–537; 17; 18, s. 12–14.]

Helsingissä Salmisaaren voimalaitoksen absorptioprosessissa käytettävä liuospari on vesi-litiumbromidi, joka edellyttää keittimeltä vähintään 80 °C:n toimintalämpötilaa [13]. Absorptioprosessissa voidaan käyttää myös ammoniakki-vesi-liuosta. Tämä vaatii käyttövoimakseen yli 100 °C:n lämmönlähteen, eikä prosessin hyötysuhde ole yhtä hyvä kuin vesi-litiumbromidilla. Ammoniakki-vesi-liuosparin etuna on, että se ei ammoniakkin matalan kiehumispisteen (–33,4 °C NTP) ansiosta vaadi höyrystyäkseen höyrystimeltä yhtä alhaista käyttöpainetta kuin vesi-litiumbromidi. [14, s. 537.]

2.5 Kaukojäähdytysenergian jakeluverkosto

Kaukojäähdytysverkosto koostuu kaukojäähdytyslaitokselta rakennukseen kulkevasta ensiöpiiristä ja rakennuksen sisällä kulkevasta toisiopiiristä. Molemmissa piireissä lämmönsiirtonesteinä toimii vesi, ja piirien välissä on lämmönsiirrin. Mitoitusolosuhteissa ensiöpuolen tulolämpötila on 8 °C ja paluulämpötila vähintään 16 °C, toisiopuolen menolämpötila vähintään 10 °C ja paluulämpötila vähintään 17 °C. [15, s. 11.]

Ensiöpuolen tuloveden lämpötila vaihtelee hieman jäähdytyksen tuotantotavasta riippuen, toimituslämpötila on liu'utettavissa ulkolämpötilasta riippuen +12 °C:seen asti. Toimituslämpötilan liukuminen ylöspäin parantaa vapaajäähdytyksen käyttömahdollisuuksia ja nostaa kaukojäähdytyksen tuotannon hyötysuhdetta. Kaukojäähdytysverkon tulolämpötilan noustessa jäähdytyslaitteiden jäähdytysteho laskee. [14, s. 534.]

Kaukojäähdytyksen siirtonesteinä voidaan käyttää Kaukolämmityksen käsikirjan [14, s. 542–543] mukaan myös jäähilevettä, kalsiumkloridia, etanolia, propyleeniglykolia, etyleeniglykolia, hiilidioksidia, Kemira Oy:n Freeziumia ja Fortum Oy:n Thermeraa. Vaihtoehtoiset siirtonesteet toimivat vettä alhaisimmissa lämpötiloissa, mikä mahdollistaa suuremman jäähdytystehonsiirtokapasiteetin samalla virtaamalla. Varjopuolena kylmäkoneen on toimittava matalammalla lämpötilalla. Vaihtoehtoisten siirtonesteiden pumpauskustannukset ovat myös vettä suuremmat.

3 Lähtötiedot

3.1 Jäähdytysenergian kulutustiedot

Insinööriyön päämateriaalin muodostaa data neljän kohderakennuksen toteutuneesta jäähdytysenergiankulutuksesta. Helsingin Energian tietokannasta saadaan tiedot kaukojäähdytysverkkoon kytkettyjen rakennusten kaukojäähdytysenergiankulutuksesta 15 minuutin tarkkuudella vuodesta 2010 lähtien. Vanhemmista kulutustiedoista ei ole olemassa näin tarkkaa dataa, vaan kulutustiedot ovat viikkokohtaiset. Tämän työn laajuudessa katsottiin tunnin olevan riittävän tarkka tarkasteluväli. Puhuttaessa tehosta tarkoitetaan tässä työssä oikeastaan tunnin keskimääräistä tehoa [kWh/h].

Tarkasteltava ajanjakso rajattiin keskikesään, välille 26.6.–13.8.2010, jolloin jäähdytystehontarve yleensä saavuttaa huippunsa [4]. Helsingin Energian toimittamasta datasta ilmenee rakennusten tuntikohtaisen kaukojäähdytysvirtaan [m^3/h] ja rakennuksessa aikavälillä tapahtuneen keskimääräisen jäähdytysvirtaaman laskennallisen lämpötilanousun. Virtaaman tulo- ja menolämpötilat eivät siis välttämättä ole todellisia, mutta virtaamien välinen lämpötilaero on. Kaukojäähdytyksen kulutus voidaan laskea kaavalla (1).

$$P = (t_{meno} - t_{paluu}) * \left(\frac{q_v}{3,6}\right) * c_v \quad (1)$$

jossa P on [kWh], t on kaukojäähdytysveden lämpötila [$^{\circ}\text{C}$], q_v on kaukojäähdytysvirtaama [m^3/h], c_v on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,18 [kJ/kg] ja 3,6 yksikkömuunnokseen tarvittava kerroin.

Virtaamien tarkkuus on Hakaniemenkatu 2–4:n kohdalla 0,1 m^3/h ja muiden rakennusten kohdalla 1,0 m^3/h . Veden meno- ja paluulämpötilan tarkkuus on 0,1 $^{\circ}\text{C}$. Näillä lähtötiedoilla tuntikohtainen kulutus voidaan laskea Hakaniemenkadun kohdalla 0,5 kW:n ja muissa kohteissa 5 kW:n tarkkuudella.

Kulutuslukemia tarkasteltaessa on pidettävä mielessä, että kesä 2010 oli poikkeuksellisen lämmin. Esimerkiksi kesällä 2010 jäähdytyslaitteistojen mitoituspiste $t=25^{\circ}\text{C}$, $\Phi=60\%$ [16, s. 6; 15, s. 11] saavutettiin 90 kertaa. Keskilämpötiloiltaan normaalina

kesänä 2007 piste saavutettiin kahdesti. Vuosien 2010 ja 2007 lämpötilatietoja on vertailtu myöhemmin kuvassa 17.

Tuntikohtaisen energiankulutuksen lisäksi käytettävissä on kuukausikohtainen energiankulutus vuosilta 2009 ja 2010. Taulukko kuukausikohtaisesta kulutuksesta on liitteessä 1. Vuotta 2009 voidaan pitää jäähdytystehontarpeen kannalta varsin normaalina: kesäkuukausien keskilämpötila on 0,1–0,8 astetta pitkän aikavälin keskiarvoa matalampi. Kuukausikohtaisia keskilämpötiloja on esitetty liitteen 2 taulukossa.

Käytössä oleva data on osittain vaillinaista. Sörnäisten rantatie 13:n sekä Eteläesplanadin 10:n kohteissa kulutustiedoissa on jaksoja, joiden kulutuslukemat ovat nolla. Nämä tunnit on karsittu pois laskettaessa keskimääräisiä kulutuksia; tästä seuraa pientä epätarkkuutta huippukulutustuntien esiintymismäärissä. Sörnäisten rantatien kuukausikohtaisissa lukemissa on myös aukkoja välillä elokuu 2009 – tammikuu 2010. Puuttuvat kulutuslukemat sisältyvät seuraavan kuukauden lukemaan, joka on huomattavan suuri. Liitteen 1 taulukossa kulutustiedottomien kuukausien jälkeisen kuukauden kulutusluku on jaettu aiempien kuukausien kesken.

Vuonna 2010 kaukokylmän hintana (alv 0 %) on ollut 19,08 €/MWh. Kaukokylmän hinta nousee tulevaisuudessa energiaverotuksen muutoksen myötä. Oletuksena tulevasta hintatasosta on tässä työssä käytetty hintaa 22,00 €/MWh (alv 0%). [4.] Työssä esitettävät hintatiedot ja -arviot perustuvat tähän hintaan.

3.2 Sääolot

Jäähdytysenergian kulutuksen ja sääolojen yhteyden hahmottamiseksi sekä sääpohjaisen hinnoittelumallin lähtödataksi tilattiin Ilmatieteen laitokselta tuntikohtaiset tiedot Kaisaniemen mittauspisteen ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta vuosilta 2007 ja 2010. Kaisaniemen mittauspiste on toista Helsingin seudun mittauspistettä, Helsinki-Vantaata, perustellumpi valinta, sillä kaukojäähdytysverkko ulottuu toistaiseksi lähinnä kantakaupungin alueelle.

Vertailuvuodeksi valittiin vuosi 2007, koska sen kesäkuukausien lämpötilat ovat lähellä pitkän aikavälin keskiarvoja. Kuukausittaisia keskilämpötiloja eri vuosilta on koottu liitteen 2 taulukkoon 1.

Ilmatieteen laitoksen toimittamassa datassa esitetään ilman lämpötila sekä suhteellinen kosteus vuoden jokaisen tunnin osalta. Lukema on hetkittäinen arvo, ei koko tunnin keskiarvo. Seppäsen Ilmastointitekniiikan käsikirjan [5, s. 188–189] mukaan ilman entalpian likiarvo voidaan laskea lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella. Likiarvolaskennan tulosten ero taulukkokirjan arvoihin on noin prosentin luokkaa.

Kylläisen vesihöyryn ominaispaine tietyssä lämpötilassa voidaan laskea kaavasta (2):

$$p_{hs} = \frac{\exp\left(77,345 + 0,0057 * T - \frac{7235}{T}\right)}{T^{8,2}} \quad (2)$$

jossa p_{hs} on [Pa] ja T on [K]

Ei-kylläisen vesihöyryn osapaine saadaan jakamalla kaavan 2 tulos ilman suhteellisella kosteudella:

$$p_h = \frac{p_{hs}}{RH} \quad (3)$$

jossa RH on [%]

Ilman absoluuttinen kosteus saadaan vesihöyryn ominaispaineen kautta:

$$x = 0,6220 * \left(\frac{p_h}{(p - p_h)}\right) \quad (4)$$

jossa x on [kg/kg], p on kostean ilman kokonaispaine, 101 325 Pa

Ilman entalpia lasketaan ilman lämpötilan ja absoluuttisen kosteuden kautta:

$$h = 1,006 * t + (2501 + 1,85 * t) * x \quad (5)$$

jossa h on [kJ/kg k.i.], t on [°C] ja x on [kg/kg k.i.].

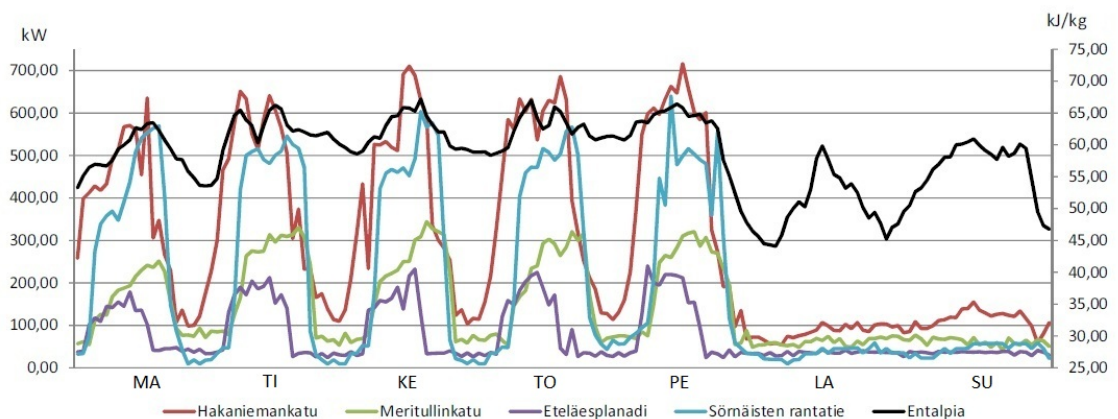
3.3 Kohderakennukset

Kaukojäähdytyksen uudet hinnoittelumallit rakennetaan olemassa olevien rakennusten toteutuneen kulutuksen pohjalta. Työssä tarkasteltavat kiinteistöt ovat Senaatti-kiinteistöjen toimistorakennuksia osoitteissa Hakaniemenkatu 2–4, Meritullinkatu 10, Sörnäisten rantatie 13 ja Eteläesplanadi 10. Taulukkoon 1 on koottu rakennusten perustietoja.

Taulukko 1. Rakennusten perustiedot.

Kiinteistö	Hakaniemenkatu 2-4	Meritullinkatu 10	Eteläesplanadi 10	Sörnäisten rantatie 13
Rakennusvuosi	1975	1910	1909	1984
Rakennustilavuus [m ³]	79500	32440	29500	54040
Tilausteho [kW]	900	450	450	800
Tilausvirtaama [m ³ /h]	96,7	48,4	48,4	86
Tilausteho [W/m ³]	11,32	13,87	15,25	14,8

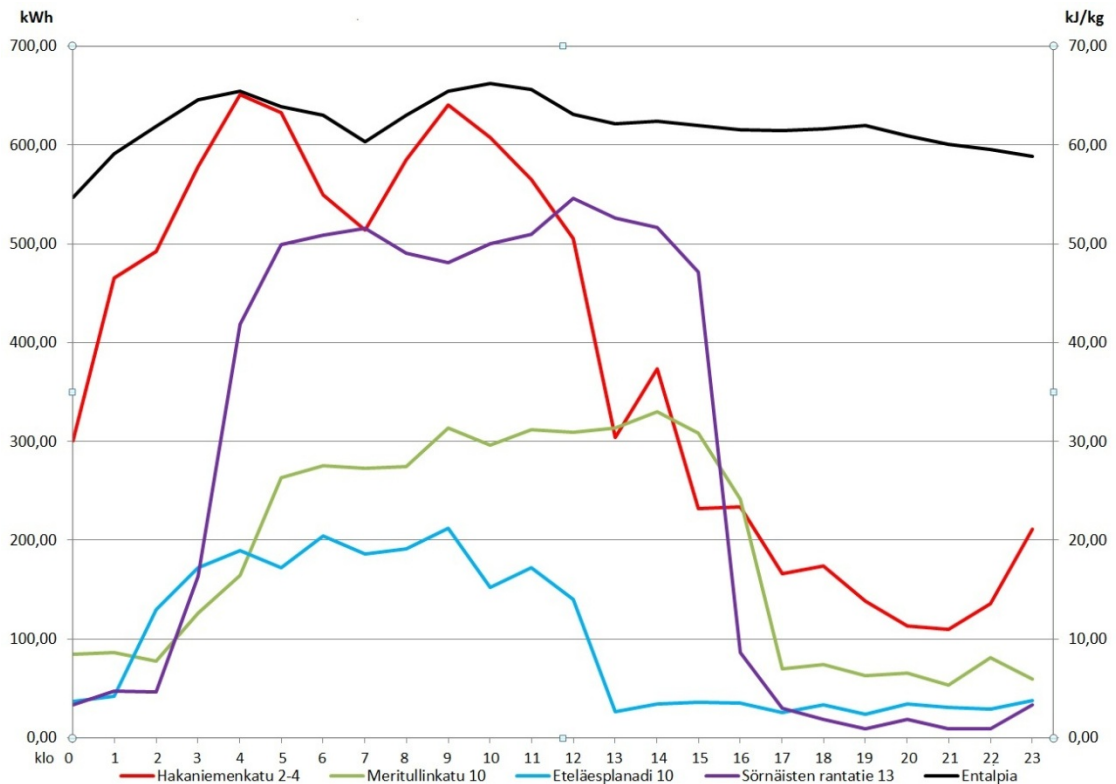
Rakennusten jäähdytysenergiankulutuksesta ja sen suhdetta ulkoilman lämpötilaan sekä kosteuteen havainnollistaa viikon 28/2010 kulutusprofiilia esittävä kuva 8. Entalpiakäyrää seurattaessa on hyvä pitää mielessä, että energialaitoksen [15, s. 11] sekä Suomen rakentamismääräyskokoelman [16, s. 6] mukainen jäähdytystehon mitoitus-piste on 55 kJ/kg.



Kuva 8. Rakennusten kulutusprofiili 12.7.-18.7.2010

Kuvasta erottuu selvästi jäähdytystehon kulutuksen vaihtelu päivä- ja yöajan välillä. Energialaitoksen kannalta erityisen rasittavia ovat aamutunnit, jolloin kaukojäähdytyksen kulutus kasvaa voimakkaasti, sekä iltapäivän kulutushuiput [4].

Huomioimisen arvoista on, että korkein jäähdytysenergiankulutus ei kaikissa kohteissa osu normaaliin toimistoaikaan. Kuvasta 9 nähdään, että Hakaniemenkatu 2–4:n kulutus on korkeimmillaan klo 1–15, Meritullinkatu 10:n klo 6–17, Eteläesplanadi 13:n klo 4–12 ja Sörnäisten rantatie 10:n klo 6–16. Toimistoajan ulkopuolelle osuva kulutus viittaa joko viallisesti toimivaan aikaohjelmaan tai virheeseen kulutusdataa keräävän ohjelman kellossa. Jäähdytys yöaikaan on normaalioloissa avuksi aamun kulutuspiikin taittamisessa, sillä rakennukset ovat yöllisen jäähdytyksen jäljiltä valmiiksi viileitä, eikä jäähdytyslaitteiston tarvitse toimia täydellä teholla heti aamusta lähtien. Näin ei tapahdu kuvaan 8 piirretyn viikon 28/2010 olosuhteissa, sillä ulkoilma on hyvin kuumaa ja kosteaa – yli jäähdytystehon mitoituspisteen – myös yöllä.



Kuva 9. Rakennusten kulutusprofiili 13.7.2010

Kuumana ja kosteana päivänä kulutus on korkea koko jäähdytykseen käytettävän ajan. Sata korkeimman kulutuksen tuntia jakaantuu 12–18 vuorokaudelle ja viisikymmentä korkeinta tuntia 10–14 vuorokaudelle (taulukko 2). Kulutuspiikkejä esiintyy yhtä lailla aamu- kuin iltapäivälläkin.

Taulukko 2. Jäähdytyksen huipputehon esiintymisvuorokaudet

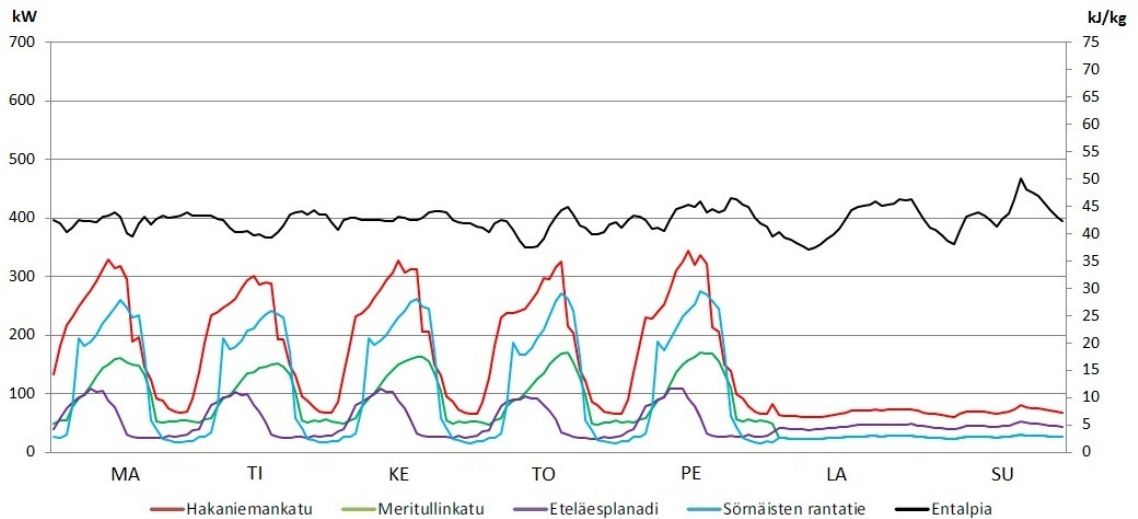
Kiinteistö	50 suurinta jäähdytystehoa	100 suurinta jäähdytystehoa
Hakaniemenkatu 2-4	11 vrk	15 vrk
Meritullinkatu 10	10 vrk	12 vrk
Eteläesplanadi 10	14 vrk	18 vrk
Sörnäisten rantatie 13	10 vrk	12 vrk

Jäähdytyksen huipputehon esiintymistiheys ei kasva kuin kahdella – neljällä vuorokaudella, vaikka tarkasteltavaa huippua kasvatetaan viidestäkymmenestä sataan tuntiin. Vaikka kuvasta 8 erottuu kulutuspiikkejä, on jäähdytystehontarve suuri koko vuorokauden ajan.

3.4 Rakennusten ominaisjäähdytysenergiankulutus

Koska tuntikohtaiset kaukokylmän kulutuslukemat ovat saatavilla vain vuodelta 2010, on työssä pyritty arvioimaan rakennusten jäähdytysenergiankulutusta vuoden 2007 olosuhteissa. Arvio pohjautuu ulkoilman entalpian ja rakennuksen toteutuneen jäähdytysenergiankulutuksen suhteeseen [$\text{kWh}/(\text{kJ}/\text{kg})$]. Rakennusten kulutusprofiilista (kuvat 8 ja 9) voidaan havaita, että arkisin rakennusten jäähdytysenergiankulutus vaihtelee suuresti kellonajan mukaan. Tämän huomioimiseksi ominaiskulutus on laskettu jokaiselle työpäivän tunnille erikseen.

Liitteen 3 taulukkoon 1 on koottu rakennusten ominaisjäähdytystehonkulutus vuorokauden jokaista tuntia kohden (arkipäivät) sekä viikonloppuisin yleisesti. Koko vuoden jäähdytysenergiankulutuksesta ei tämän perusteella voida sanoa mitään, sillä normaalien toimistotilojen jäähdytys pystytään yleensä alle 20 °C:n lämpötilalla tyydyttämään ulkoilmalla. Kesäkauden huippukulutuslukemien hahmottamiseen menetelmä on kuitenkin suuntaa antava, sillä jäähdytysenergian kulutushuiput ajoittuvat kuumiin ja kosteisiin kesäpäiviin. Kuva 10 esittää yllä olevalla tavalla mallinnettua viikon kulutusprofiilia kesältä 2007.

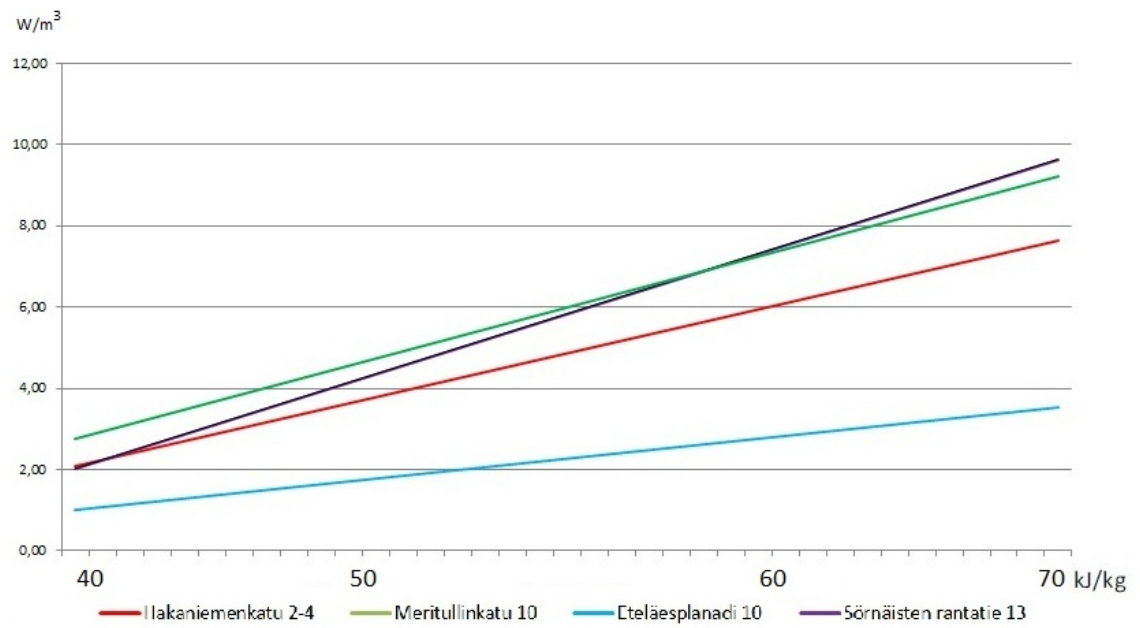


Kuva 10. Rakennusten kulutusprofiili 9.7.–16.7.2007

Tarkastelujaksolla 9.7.–16.7.2007, jota voi pitää lämpötilaltaan tyypillisenä kesän 2007 viikkona, ilman entalpia on noin 2/3 ja jäähdytystehontarve noin 1/2 kuvan 8 profiiliviikon tasosta.

Ilman lämpötilan ja kosteuden lisäksi rakennuksen jäähdytystehontarpeeseen vaikuttavat rakennuksen sisäiset kuormat ja auringon paiste [17], joita tässä käytetty menetelmä ei huomioi. Tarkka jäähdytysenergian kulutuksen ennustaminen vaatisi rakennuksen mallintamista MagiCAD Roomin tai Ida Icen kaltaisen ohjelman avulla. Mallintamiseen ei kuitenkaan tämän työn laajuudessa ole mahdollista ryhtyä.

Karkean mallinnuksen pätevyys arvioimiseksi kuvaan 11 on koottu kohderakennusten jäähdytysenergiankulutuksia tarkastelujakson jokaiselta arkipäivältä kello 11 ja jäsennetty ne tarkasteluhetken entalpian mukaiseen järjestykseen. Saman kellonajan valitseminen tasaa auringon paisteesta ja sisäisistä kuormista johtuvaa jäähdytystarpeen vaihtelua.



Kuva 11. Kohderakennusten jäähdytystehontarpeen ja ulkoilman entalpian suhde.

Trendikäyrinä esitetystä kuvasta 11 nähdään kaikkien rakennuksien jäähdytystehontarpeen kulkevan samansuuntaisesti ulkoilman entalpian kasvaessa.

4 Kaukojäähdytyksen hinnoittelu

4.1 Kaukojäähdytyksen hinnoittelun muutostarve

Kaukokylmän hinta koostuu tilaustehon mukaan määräytyvästä perusmaksusta ja kulu-
tuspohjaisesta energiamaksusta. Perusmaksun ja energiamaksun suhde on noin 2:1.
Nykyisin kaukojäähdytysenergian hinta on vakio tuotantokustannusten vaihtelusta riip-
pumatta. Vakiohintaan perustuva hinnoittelu ei heijasta jäähdytyksen tuotantoon käy-
tettyä energiaa eikä kannusta säästämään jäähdytyksen käytössä silloin, kun verkon
rasitus on korkein sekä jäähdytysenergian tuotanto epäekologisinta ja kalleinta.

Kaukojäähdytyksen tuotantokustannuksia paremmin peilaava hinnoittelumalli on sekä
energialaitoksen että käyttäjän etu. Tällainen hinnoittelumalli kannustaisi säästämään
kaukojäähdytyksen käytössä silloin, kun kaukojäähdytysverkon rasitus, kaukojäähdy-
tyksen tuotantokustannus sekä tuottamisesta johtuvat päästöt ovat korkeimmat. Jääh-
dytystehontarpeen laskeminen kulutushuippujen kohdalla voi tapahtua antamalla ra-
kennuksen sisäilman lämpötilan nousta hetkittäisesti tai varaamalla jäähdytystehoa
yöaikaan, jolloin verkon rasitus on luonnostaan matalampi.

Nykyisin käytössä olevan hinnoittelumallin äärimmäisenä vastakohtana on malli, jossa
jäähdytysenergian hinta määräytyy kulutushetken tuotantokustannusten perusteella.
Käytännössä kuitenkin kaukokylmän tuotantokustannuksiin vaikuttaa niin moni seikka
(tuotantotapa, sähkön hinta energiamarkkinoilla, lauhdelämmön hyötykäyttö), ettei
edes energialaitoksella ole tarkkaa tietoa hetkittäisistä tuotantokustannuksista [4].

Kaukokylmän hinnoittelua uudistettaessa lähtökohtana on, että sama vuotuinen ener-
giankulutus johtaa samaan vuotuiseseen energialaskuun kuin vanhassa hinnoittelussakin.
Hinnoittelun painopistettä siirretään laskemalla energian hintaa matalan tuotantokus-
tannuksen jaksolla ja siirtämällä hintarasiitetta korkeimpien kulutushuippujen kohdalle,
jolloin myös tuotantokustannukset ovat korkeimmillaan.

Kulutushuippujen hintatavoitteena pidetään kesähintaan verrattuna noin kymmenker-
taista energian hintaa, jonka tilaajat arvelivat riittäväksi kannusteeksi jäähdytysenergi-
an säästämiseen. [4; 18.]

4.2 Kaukojäähdytyksen säästöpotentiaali

4.2.1 Rakennuksen sisäilman lämpötilan nostaminen

Helpoin tapa leikata kaukojäähdytyksen hetkittäistä kulutusta on laskea jäähdytystehoa ja antaa rakennuksen sisälämpötilan nousta. Nykyinen lainsäädäntö ei juuri rajoita toimistorakennusten sisäilman enimmäislämpötilaa. Suomen rakentamismääräyskokoelman osa D2 [16, s. 6] määrää, ettei rakennuksen käyttöaikana oleskeluvyöhykkeen lämpötila saa *yleensä* olla korkeampi kuin 25 °C. Kohta 2.2.1.3. antaa kuitenkin mahdollisuuden poiketa tästä:

Ulkoilman lämpötilan viiden tunnin enimmäisjakson keskiarvon ollessa korkeampi kuin 20 °C voi huoneilman lämpötila ylittää tämän arvon korkeintaan 5 °C. [16, s. 6.]

Työsuojelulaki [19] määrittää työnantajan teknisin toimenpitein huolehtimaan, että lämpötila työpaikalla pysyy alle +28 °C:ssa ulkoilman lämpötilan ollessa alle +25 °C. Työpaikan lämpötilan ylittäessä helteellä +28 °C ovat työntekijät oikeutettuja ylimääräisiin taukoihin.

4.2.2 Jäähdytystehon varaaminen

Jäähdytystehon varaaminen erilliseen kylmävarastoon tai talon rakenteisiin leikkaa rakennuksen jäähdytysenergiankulutuksen huippua koko toimistoajalta, aiheuttamatta työntekijöiden epämiellyttäväksi kokemaa sisälämpötilan nousua.

Rakennuskohtainen kylmävarasto tarkoittaa suurta, eristettyä vesisäiliötä, jota jäähdytetään yöaikaan kaukokylmällä ja josta päiväaikaan puretaan jäähdytysenergiaa (esimerkiksi ajamalla talon jäähdytysvesiverkoston vesi säiliön lävitse) tasaamaan kaukojäähdytyksen kulutusta. Varastoa ei kuitenkaan ole mahdollista jäähdyttää kaukojäähdytysverkoston tulovirtaaman lämpötilaa kylmemmäksi, ja sen jäähdytysteho tippuu merkittävästi lämpötilan noustessa lähemmäksi toisoverkoston paluulämpötilaa. Teoriassa 8 °C:n lämpötilaerolla toimiva (8–16 °C) kylmävarasto pystyy luovuttamaan n. 9 kWh jäähdytysenergiaa kuutiota kohti. Kylmävaraston suuri tilantarve on ilmeinen ongelma vanhoissa kiinteistöissä.

Rakennuksen päiväaikaisen jäähdytystehonkulutuksen piikkiä voidaan tasata myös jäähdyttämällä rakennusta voimakkaasti yöaikaan. Tämä tasaisi erityisesti aamuista, toimistojen aukeamisaikaan kohdistuvaa voimakasta kaukojäähdytyksen kysynnän nousua (ks. kuva 8). Yöaikainen jäähdytys ei kuitenkaan ole erityisen tehokasta. Jotta järjestely olisi käyttäjän kannalta taloudellista, täytyisi kaukojäähdytyksen hinnan olla yöaikaan päiväaikaa edullisempaa [18].

4.3 Hinnan kausiporrastus

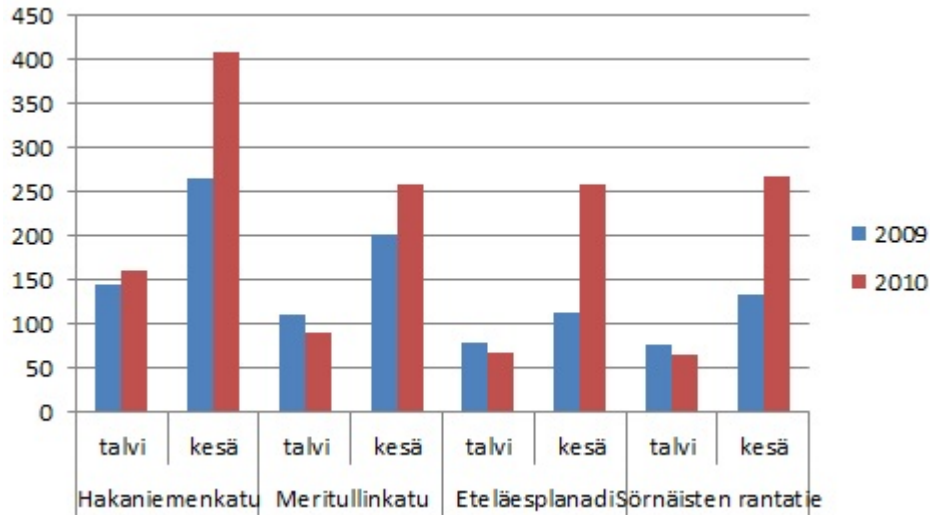
4.3.1 Teoria

Kaukojäähdytyksen uusissa hinnoittelumalleissa käyttäjää kannustetaan energian säästämiseen asettamalla määrätyt ehdot ylittävälle kulutushetkille (tunti) korkeampi energian hinta. Tämä vipuvarreksi kutsuttava lisähinta ”kerätään” porrastamalla energian hinnoittelua siten, että se on keväällä, syksyllä ja talvella kesää edullisempaa. Porrastusmalleja otettiin tutkittavaksi kaksi erilaista: kaksiporraisessa mallissa vuosi jaetaan kesä- ja talvikauteen, kolmiportaisessa kesä-, talvi- ja välikauteen. Kesähinta pysyy nykyisellä hintatasolla, muiden vuodenaikojen hinnoittelua lasketaan. Vanhan ja uuden hinnoittelutavan erotus jaetaan lisähinnaksi määrätyt ehdot ylittävälle tunneille.

Talvi- ja välikauden hintataso on asetettava sellaiseksi, että lisähinnaksi muodostuu aidosti energiansäästämiseen kannustava summa. Kriittinen kysymys on, miten lisähinta jaetaan huippukulutustunneille. Jakotavan on oltava sekä selkeä että motivoiva. Lisäksi lisähinnallisten olosuhteiden esiintymismäärän ja siten euromääräisen lisähinnan on oltava järkevä. Liian pieni lisähinta ei motivoi käyttäjää, liian suuri ylikorostaa sään ääri-ilmiöiden osuutta kaukojäähdytyslaskussa.

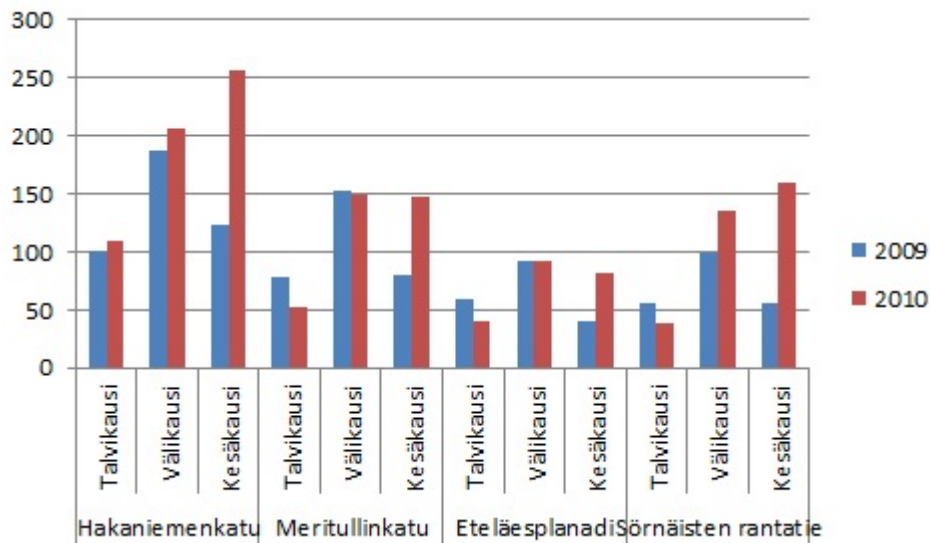
Kaksiporraisesta mallin talvikaudeksi sovittiin 1.11.–30.4. Kolmiportaisesta mallin talvikausi on 1.12.–31.3. ja välikaudet 1.4.–30.6. sekä 1.9.–30.11. Kausijako heijastaa karkeasti kaukokylmän tuotantokustannuksia [4]. Kausien hinta ilmoitetaan prosentteina kesäkauden hinnasta.

Vuotuinen kaukokylmänkulutus jakautuu kausien välillä niin, että kaksiporraisessa mallissa (kuva 12) kesäkauden kulutus on noin kaksinkertainen talvikauteen verrattuna.



Kuva 12. Kulutuksen kausittainen jakautuminen [MWh] kaksiporrasmallissa

Kolmiportaisessa mallissa (kuva 13) kulutus jakautuu talvi-, väli- ja kesäkauden välille likimäärin suhteessa 1:2:1.



Kuva 13. Kulutuksen kausittainen jakautuminen [MWh] kolmiportasmallissa.

Vaikka kolmiportasmallissa suurin osa normaalin vuoden kulutuksesta osuukin välikauden kohdalle, ovat tuotantokustannukset silloin keskikesää edullisemmalla tasolla vapaajäähdytyksen hyödyntämismahdollisuuden ja matalamman huippukulutuksen ansiosta.

Energialaitoksen kannalta poikkeuksellisen lämmin alkukesä on riskitekijä kolmiportaisessa mallissa, sillä kesäkuu kuuluu mallissa edullisempaan välikauteen. Liitteen 2 taulukon perusteella kesäkuun pitkän aikavälin keskilämpötila on kuitenkin yli 3 °C heinäkuuta ja yli 2 °C elokuuta matalampi. Lisäksi kesäkuussa ilman suhteellinen kosteus ei vielä ole yhtä raskaalla tasolla kuin myöhemmin kesällä [4], eivätkä talojen rakenteet ole vielä kokonaan lämmenneet.

Väli- ja talvikausien kaukojäähdytyksen kulutuksissa ei ole merkittävää vaihtelua vuosien 2009 ja 2010 välillä. Kesäkausien osalta kesän 2010 kulutus on jopa kaksinkertaista vuoteen 2009 verrattuna. Liitteen 2 taulukosta 1 käy ilmi, että vuoden 2010 hellejaksot ajoittuivat heinä- ja elokuulle. Kesäkuun 2010 keskilämpötila on täsmälleen pitkäaikaisen keskiarvon tasolla.

4.3.2 Käytäntö

Talvi- ja välikauden hintakerroin määrittää huippukulutustunneille jaettavissa olevan vipuvarren. Vipuvarsi on talvi- ja välikauden edullisemman hinnoittelun perusteella syntyvä, kesälle siirtyvä lisähinta. Vipuvarsi voidaan laskea yksinkertaisesti kaavalla 6.

$$(1 - x) * \textit{kaukojäähdytyksen hinta} * \textit{kaukojäähdytyksen kulutus} \quad (6)$$

jossa x on hintakerroin (0...1)

Kolmiportaisessa hinnoittelumallissa vipuvarsi on talvi- ja välikauden erotusten summa.

Esimerkiksi Hakaniemenkadun kiinteistön talvikauden kulutus oli vuonna 2010 161,5 MWh (liite 1). Jos talvikauden kaukojäähdytysenergian hinta on 35 % kesäkauden hinnasta, saadaan vipuvarreksi $(1 - 0,35) * 22 \text{ €/MWh} * 161,5 \text{ MWh} = 2309 \text{ €}$.

Kolmiporrasmallissa Hakaniemenkadun kulutus jakautuu kausien kesken talvikaudelle 108,8 MWh, välikaudelle 206,4 MWh ja kesäkaudelle 256,1 MWh. Mikäli talvikauden hintataso on 35 % ja välikauden hintataso 80 % kesäkauden hintatasosta,

saadaan vipuvarreksi $(1 - 0,35) * 22 \text{ €/MWh} * 108,85 \text{ MWh} + (1 - 0,80) * 22 \text{ €/MWh} * 206,4 \text{ MW} = 2918 \text{ €}$.

Ylläolevan esimerkin hintakertoimia (talvikausi 0,35, välikausia 0,8) käyttämällä saadaan vipuvarreksi kohteittain 950–2300 €, joka on 12,9–20,7 % rakennusten vuoden 2010 kaukokylmän kulutus pohjaisesta laskusta. Kolmiporrasmallissa samoihin lukemiin päästään talviajan hintakertoimella 0,35 ja välikauden hintakertoimella 0,8. Taulukkoon 3 on koottu vipuvarsi näillä tiedoilla.

Taulukko 3. Vipuvarret [€] ja niiden suhteellinen osuus kulutus pohjaisista maksuista [%], kun talvikauden hintakerroin on 0,35 ja välikauden 0,8.

Kohde	Vipuvarsi							
	2-porrasmalli				3-porrasmalli			
	2009		2010		2009		2010	
	€	%	€	%	€	%	€	%
Hakaniemenkatu	2072	22,9	2309	18,4	2267	25,1	2464	19,6
Meritullinkatu	1574	23,0	1286	16,7	1789	26,1	1412	18,4
Eteläesplanadi	1144	27,0	965	20,7	1262	29,8	968	20,8
Sörnäisten rantatie	1090	23,5	949	12,9	1244	26,8	1160	15,8

Mikäli vipuvarresta halutaan voimakkaampi, voidaan kolmiportaisen hintamallin välikauden hintakertoimeksi asettaa 0,7 ja pitää talvikauden hintakerroin 0,35:ssä. Näin vipuvarren osuudeksi saadaan 20–25 % kokonaislaskusta. Tarkemmat luvut on kerätty taulukkoon 4.

Taulukko 4. Vipuvarret [€] ja niiden suhteellinen osuus kulutus pohjaisista maksuista [%], kun talvikauden hintakerroin on 0,35 ja välikauden 0,7.

Kohde	Vipuvarsi							
	2-porrasmalli				3-porrasmalli			
	2009		2010		2009		2010	
	€	%	€	%	€	%	€	%
Hakaniemenkatu	2072	22,9	2309	18,4	2678	29,6	2918	23,2
Meritullinkatu	1574	23,0	1286	16,7	2127	31,1	1739	22,6
Eteläesplanadi	1144	27,0	965	20,7	1465	34,5	1170	25,1
Sörnäisten rantatie	1090	23,5	949	12,9	1461	31,5	1459	19,9

Euromääräisesti tarkasteltuna vuoden 2010 perusteella lasketut vipuvarret ovat hieman vuoden 2009 perusteella laskettuja suurempia. Suhteellisesti vipuvarren merkitys on kuitenkin pienempi vuonna 2010 johtuen kesäkauden korkeasta kulutuksesta (ks. kuvat 12 ja 13). Euromääräiset erot vuosien 2009 ja 2010 välillä ovat kuitenkin niin pieniä, ettei ole suurta merkitystä, minkä vuodelle perusteella vipuvarsi määritetään.

Hintakertoimilla 0,35 ja 0,8 vipuvarsi on kaikkien rakennusten kohdalla yli 20 % vuoden 2009 ("normaalivuoden") kulutus pohjaisista maksuista. Tätä voidaan pitää riittävässä kannustinvaikutuksena. Jatkossa työssä käytetään yksinkertaisuuden vuoksi vain vuoden 2010 tietojen perusteella hintakertoimilla 0,35 ja 0,8 laskettuja vipuvarsi-summia.

Tässä esitetyt arvot ja laskelmat ovat pelkkiä esimerkkejä, muita arvoja on mahdollista hakea työn ohessa syntyneen Excel-tilin avulla tai liitteen 4 kuvien perusteella. Käytettyjä lukuja voi kuitenkin pitää realistisena: talvikaudella kaukojäähdytyksen tuotanto muodostuu lähinnä pumppauskustannuksista (ks. luku 2.3). Kaukokylmän tuotantokustannukset lähtevät jyrkkään nousuun vasta ulkolämpötilan ylittäessä 19 °C (ks. kuva 2). Näin lämmintä on vain harvoin välikauden aikana; silloinkin kun lämpötila nousee yli 19 °C:n, ei ilman kosteus yleensä ole ratkaisevan korkea.

4.4 Tilaustehopohjainen jakomalli

4.4.1 Teoria

Tilaustehopohjaisessa jakomallissa käyttäjä maksaa lisähintaa niiltä tunneilta, jolloin *keskimääräinen tehonkulutus* ylittää etukäteen sovitun osuuden [%] rakennuksen tilaustehosta.

Tilaustehopohjaisen jakomallin läheinen vaihtoehto on tilausvirtaamapohjainen jakomalli. Lisähinnan jakaminen tilaustehon perusteella tilausvirtaaman sijaan on perusteltavissa jäähdytysenergian tuotannon kriittisellä osuudella kaukojäähdytyksen tuotantokustannuksista ja -päästöistä: kesällä noin 95 % kaukokylmän tuotannon kustannuksista tulee jäähdytysenergian tuottamisesta [4]. Suuren, mutta vähän jäähtyvän virtaaman pumppaaminen verkostossa on energialaitokselle suhteessa edullista, erityisesti kun huomioidaan tilaustehopohjaisen perusmaksun suuri osuus kaukojäähdytyksen kokonaishinnasta.

Tilaustehoon pohjautuva jakomalli ei ole erityisen selkeä käyttäjälle. Jäähdytystehon tarpeeseen vaikuttaa ilman lämpötilan lisäksi voimakkaasti ilmassa olevan veden määrä

(ks. luku 2.2), joten käyttäjän saattaa olla hankala hahmottaa kulutustaan. Käytännössä rakennuksen huoltomiehen tulisi manuaalisesti tarkastaa jäähdytystehonkulutus ulkolämpötilan ylittäessä tietyn arvon ja laskea jäähdytysverkon säätökäyrää, mikäli kulutus on ylittämässä asetetun arvon.

Leikkuriprosenttia ei voi asettaa kaikille kiinteistöille samaksi, sillä kuten seuraavassa luvussa osoitetaan, on osa kiinteistöistä ylimitoitettu. Tilaustehosta ei käytetä mitoitusolosuhteissakaan täyttä 100 %:a. Ylimitoitus voi johtua huonosti toimivasta talotekniikasta: toisiopuolen vesi ei jäähdy riittävästi rakennuksessa liian nopeasta virtauksesta tai verkoston kondensoimisen välttämiseksi korkealla pidettävästä menolämpötilasta johtuen. Ylimitoitusta esiintyy myös, mikäli rakennusta liitetään kaukojäähdytyksen piiriin asteittain tehtävien remonttien myötä.

Oletettavaa siis on, ettei kaikille rakennuksille ole löydettävissä yhteistä leikkuriprosenttia. Jonkinasteisen selkeyden ylläpitämiseksi kullekin rakennukselle ei voida laatia omaa leikkuriprosenttiaan, vaan vaihtelut huippukulutuksen lisähinnoissa on hyväksyttävä.

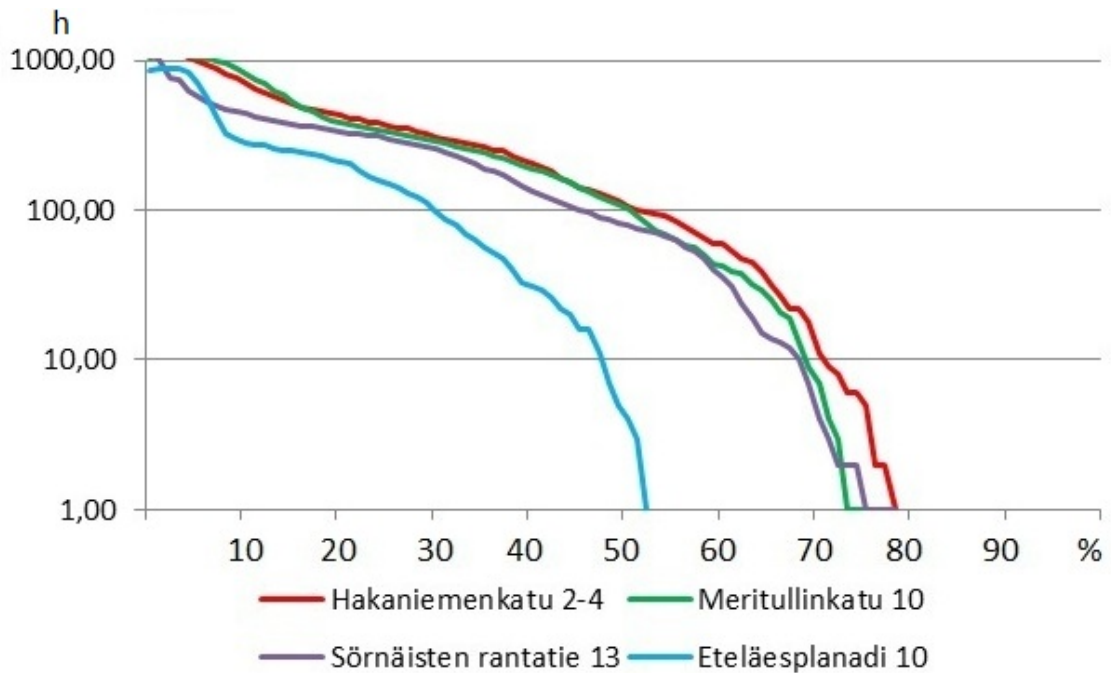
Laajamittainen ylimitoitus aiheuttaa ongelman hinnoittelumallin perustalle. Matalalle asetettu leikkuriprosentti rankaisee optimaalisesti toimivaa jäähdytysjärjestelmää, jossa tilausteho ja tilausvirtaama toteutuvat sataprosenttisesti mitoitusolosuhteissa. Lisäksi leikkuriprosentti tulee asettaa uudestaan jokaisen jäähdytysverkon laajennuksen tai vaillinaisesti toimivan järjestelmän korjauksen myötä.

Liian korkeat tilaustehot eivät kuitenkaan ole hinnoittelumallin porsaanreikä, sillä ylimitoittaminen tai vaillinaisesti toimiva talotekniikka on käyttäjälle epäedullista kaukokylmän hinnan muodostuessa suurimmalta osaltaan tilaustehopohjaisesta perusmaksusta. Päinvastoin tilaustehopohjainen jakomalli karsisi tarkoituksellista alimitoittamista, sillä alimitoitettu kiinteistö on oikein mitoitettua suuremman osan vuodesta tilaustehonsa ylärajalla.

4.4.2 Käytäntö

Työn kohderakennuksien tilaustehot ovat runsaasti ylimitoitettuja. Kuva 14 esittää rakennusten jäähdytysenergiankulutusta suhteessa tilaustehoon. Vaaka-akselilla on te-

hankulutus prosentteina tilaustehosta, pystyakselilla tämän keskimääräisen tehon ylittävien tuntien lukumäärä.



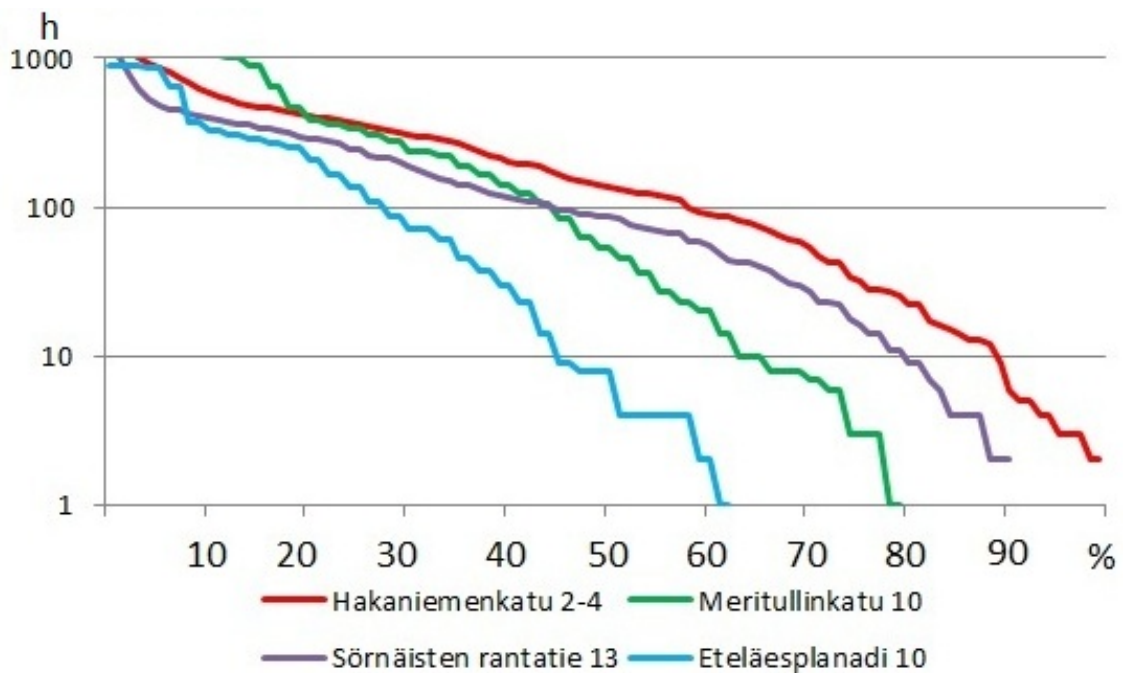
Kuva 14. Tehonkulutuksen esiintyminen [h], % tilaustehosta.

Rakennuksissa käytettiin kesän 2010 raskaissa olosuhteissa enimmillään 55–80 % tilaustehosta. Jäähdytystehon kulutuksen tarkastelu tunnin keskiarvona häivyttää hetkittäiset kulutuspiikit, muttei riitä selittämään näin suuria eroja todellisen kulutuksen ja tilaustehon välillä.

Suurimman osan tarkastelujaksosta kulutus on Eteläesplanadin kohdalla alle 20 % ja muissa kiinteistöissä alle 40 % tilaustehosta. Sadan tunnin raja tulee vastaan noin 50 %:n kohdalla (Eteläesplanadi 10:ssä 30 %:n kohdalla). Korkeimmillaan rakennusten kulutus on yli puolet suurempi kuin sadan kulutustunnin rajan kohdalla.

Kaukojäähdytysverkon ensiöpuolen virtaamissa (kuva 15) täyteen 100 %:iin päästiin vain Hakaniemenkatu 2–4:n kiinteistöissä. Hakaniemenkadun lisäksi Sörnäisten rantatie 13:n virtaama on merkittävästi tilaustehoa suuremmissa lukemissa. Näiden kiinteistöjen talotekniikan toimivuutta on syytä epäillä puutteelliseksi – asian analysointi menee tämän työn aihepiirin ulkopuolelle. Meritullinkatu 10 ja Eteläesplanadi 10 kiinteistöissä

tilaustehosta ja tilausvirtaamasta on käytössä yhtä suuri osuus, mikä viittaa rakennusten tilaustehon ylimitoitukseen.



Kuva 15. Ensiöpiirin virtaamien esiintyminen [h], % tilausvirtaamasta

Kaikille kohderakennuksille sopivaa, yhteistä leikkuriprosenttia ei ole löydettävissä. Eteläesplanadi 10:n ylittää 30 % tilaustehostaan 112 tunnin kohdalla ja 50 % tilaustehostaan vain viiden tunnin kohdalla. Muut rakennukset ylittävät 50 % 83–115 tunnin ja 70 % 7–18 tunnin aikana. Niiden tuntien, jolloin ylitetään 50 % (Eteläesplanadi 10:ssä 30 %) tilaustehosta, tarkemmat kulutustiedot selviävät taulukosta 5. Taulukossa mainittu ylitys tarkoittaa tilaustehoprosentin ylittävää osuutta kulutuksesta, yhteensä koko tunnin kulutusta.

Taulukko 5. Kiinteistöjen kulutus tuntien aikana, jolloin käytetään 50 % (30 %) tilaustehosta.

	Raja [%]	Ylitys [h]	Ylitys [MWh]	Ylitys [%/kok]	Yht [MWh]	Yht [%/kok]
Hakaniemenkatu 2-4	50	115	12	2,1	64	11,1
Meritullinkatu 10	50	108	5	1,3	29	8,3
Sörnäisten rantatie 13	50	83	7	2,1	40	12,0
Eteläesplanadi 10	30	112	4	1,8	19	9,0

Tuntien aikana, jolloin keskimääräinen jäähdystehonkulutus on 50 (30) % tilaustehosta, käytetään n. 10 % vuoden jäähdystenergiasta. Mainitun prosenttirajan ylittävä kulutus on 4–12 MWh, joka on 1–2 % koko vuoden kulutuksesta. Jos kohdan 4.3.2 mukaisesti laskettu vipuvarsi jaetaan lisähinnaksi näiden tuntien kulutukselle (vain %-rajan ylittävälle kulutukselle), ovat lisähinnat kaksiporrasmallissa 137–278 €/MWh ja kolmiporrasmallissa 168–306 €/MWh. Lisähinta on kaikkien kiinteistöjen kohdalla moninkertainen normaaliin hintaan, 22 €/MWh, verrattuna. Pienin lisähinta on Sörnäisten rantatiellä, johtuen rakennuksen muita pienemmästä vipuvarresta (taulukko 6).

Taulukko 6. Lisähinta [€/MWh] taulukon 3 lähtöarvojen perusteella

	Hakaniemen- katu 2-4	Meritullin- katu 10	Sörnäisten rantatie 13	Eteläespla- nadi 10
2-porrasmalli	194	278	137	247
3-porrasmalli	207	306	168	297

Normaalina kesänä (mallinnettu 2007) jäähdystenergiaa tarvitaan vielä vähemmän suhteessa tilaustehoon. Sadan tunnin raja rikkoutuu Eteläesplanadilla n. 25 %:n kohdalla, muilla kiinteistöillä hieman yli 30 %:ssa.

4.5 Säähöjainen jakomalli

4.5.1 Teoria

Säähöjaisessa lisähinnan jakomallissa talvelta "varastoon" kertyvä vipuvarsi jaetaan lisähinnaksi niiden tuntien energiankulutukseen, jolloin ulkoilman lämpötila- ja kosteus ylittävät ennalta sovitut raja-arvot.

Ennalta määrättyihin sääräjoihin perustuvan mallin suurimpana etuna on selkeys. Säätötilan vaikutus hintaan on selkeä ja käyttäjän on helppo havaita milloin jäähdystenergian kulutusta kannattaa leikata. Malli ei kuitenkaan motivoi säästämiseen erityisen vahvasti: käyttäjä ei voi vaikuttaa lainkaan säätötilaan, mutta joutuu kuitenkin maksamaan korkeampaa hintaa säätötilan ylittäessä asetetut rajat.

Säähöjaisessa hinnoittelumallissa lisähinnallisten tuntien määrä vaihtelee voimakkaasti vuodesta riippuen. Helsingissä (Kaisaniemi) hellepäiviä on keskimäärin seitsemän. Mää-

rä moninkertaistuu poikkeuksellisen kuumina kesinä: vuonna 1997 helleraja rikkoutui 19 päivänä, kesänä 2010 25 päivänä. Helteisimpien ja vähiten helteisten kesien tilastot käyvät selville kuvasta 16. [20.]

	Helsinki Kaisaniemi					Helsinki-Vantaa					Turku la							
eniten hellepäiviä	vuosi	5	6	7	8	yht.	vuosi	5	6	7	8	yht.	vuosi	5	6	7	8	yht.
	2010	0	0	20	5	25	2010	3	1	24	8	36	1997	0	7	13	17	37
	1997	0	1	8	10	19	1997	0	5	14	14	33	2010	4	0	20	8	32
	1988	1	8	9	0	18	2002	0	1	10	17	28	2002	0	5	12	14	31
	1972	0	6	9	2	17	1988	2	11	15	0	28	1989	0	10	8	10	28
	2003	0	0	11	4	15	1973	0	7	17	4	28	1994	0	0	21	4	25
1971-2000	ka	0	2	3	2	7	ka	1	4	6	3	14	ka	1	4	6	3	14
kesä 2010		0	0	20	5	25		3	1	24	8	36		4	0	20	8	32
kesä 2009		0	2	1	2	5		2	4	2	2	10		1	8	3	3	15
vähiten hellepäiviä	kesinä 1962,1974,1976,1979, 1990 ja 1993 0 hellepäivää						1974	0	0	0	0	0	1962	0	0	0	0	0
							1962	0	0	0	0	0	1998	0	2	1	0	3
							1998	0	1	0	0	1	1987	0	0	4	0	4
							1976	0	1	0	0	1	1974	0	4	0	0	4
							1990	0	1	0	2	3	1993	3	0	2	0	5
	Lappeenranta					Tampere-Pirkkala					Kauhava							
eniten hellepäiviä	vuosi	5	6	7	8	yht.	vuosi	5	6	7	8	yht.	vuosi	5	6	7	8	yht.
	2010	5	1	24	11	41	2010	5	1	22	6	34	2010	7	1	17	5	30
	1972	1	10	14	9	34	1997	0	8	10	15	33	2008	0	5	9	14	28
	1997	0	7	14	11	32	2002	0	2	10	18	30	2002	1	2	9	16	28
	1988	2	13	17	0	32	1973	0	7	17	5	29	1972	0	9	14	5	26
	1999	0	15	11	4	30	2006	0	7	11	8	26	1997	0	6	11	9	23
1971-2000	ka	1	4	6	3	14	ka	1	5	6	3	15	ka	1	4	5	2	12
kesä 2010		5	1	24	11	41		5	1	22	6	34		7	1	17	5	30
kesä 2009		1	2	3	1	7		1	3	2	1	7		1	5	1	3	10
vähiten hellepäiviä	1962	0	0	0	0	0	1962	0	0	0	0	0	1998	0	2	1	0	3
	2008	0	0	0	0	0	1998	0	2	0	0	2	1990	0	1	0	2	3
	1993	2	0	0	0	2	1976	0	2	1	0	3	1987	0	0	3	0	3
	1976	0	0	2	0	2	1974	0	3	0	0	3	1962	0	1	2	0	3
	1971	0	2	1	0	3	1987	0	0	4	0	4	1993	3	0	1	0	4

Kuva 16. Hellepäivätalasto vuodesta 1961 lähtien [20].

Sääpohjaisen jakomallin ongelmana on myös säätilan todettavuus: kenen mittauksen mukaan sääolosuhteet määritetään? Verrattaessa kuvan 16 tilastoa Kaisaniemen ja Helsinki-Vantaan osalta havaitaan hellepäivien esiintymismäärissä merkitsevä ero. Kysymys on kriittinen, sillä lisähinta olisi tuntuva heti rajan ylittävältä ajanjaksolta.

Tämän työn lähdemateriaalina käytetyt säätiedot ja kuvan 16 tilastot ovat yksittäisten hetkien lukemia. Luotettavampia tuloksia saadaan, jos käytettävissä on lämpötilan tunnikohtaiset keskiarvot. Näin säätilan hetkellinen vaihtelu ei pääsisi vaikuttamaan kaukojäähdytyksen hintaan.

Sääpohjainen hinnoittelumalli siirtää liiketoiminnan riskiä kaukokylmän tuottajalta kaukokylmän käyttäjälle. Hyvin kylmä kesä laskee kaukojäähdytyslaskua enintään vipuvarren verran, poikkeuksellisen lämpimän kesän näkyessä huomattavan korkeana piikkinä laskussa.

4.5.2 Käytäntö

Erittäin lämpimän ja kostean sään osuus on merkittävä koko vuoden jäähdytysenergiankulutuksesta. Kohderakennusten vuoden 2010 jäähdytysenergiankulutuksesta 6–13 % kulutettiin niiden 90 tunnin aikana, jolloin ulkoilman olosuhteet vastasivat jäähdytystehon mitoituspistettä (taulukko 7). Kulutuslukemassa on mukana myös toimistoajan ulkopuolinen aika, jolloin rakennuksia ei jäähdytetä päiväaikaa vastaavalla teholla (ks. kuva 8).

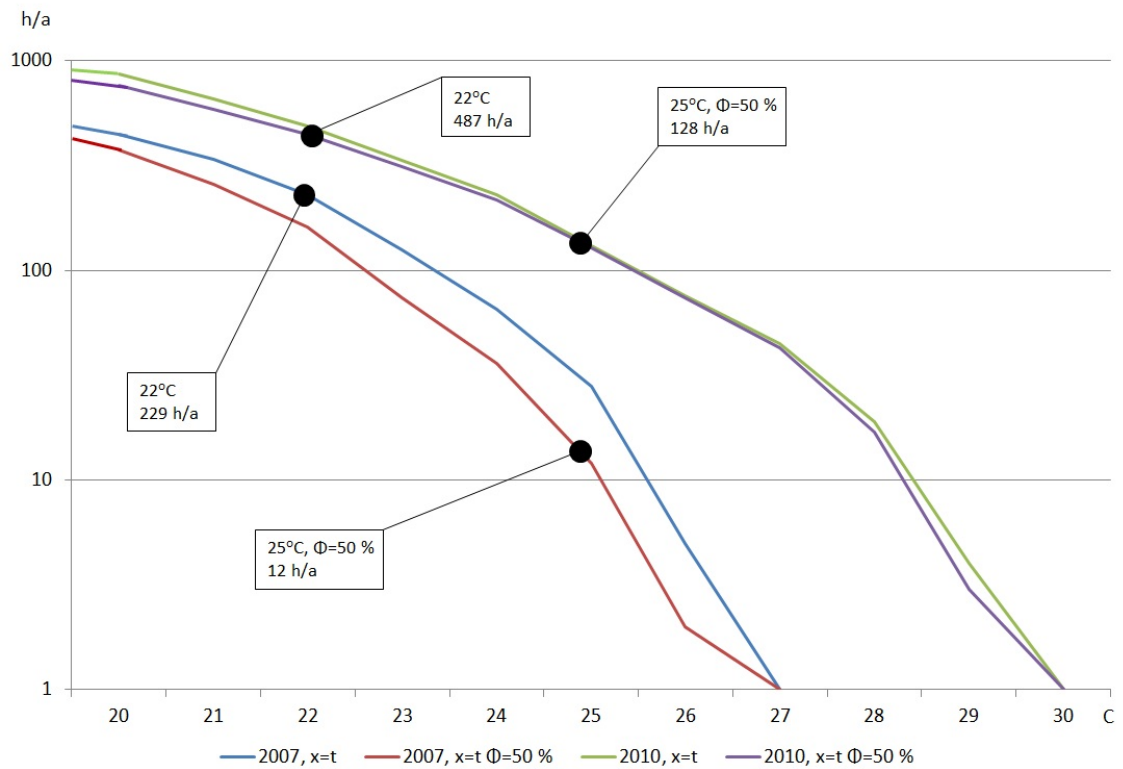
Taulukko 7. Jäähdytysenergian kulutus mitoitusolosuhteissa.

	Hakaniemen- katu 2-4	Meritullin- katu 10	Sörnäisten rantatie 13	Eteläespla- nadi 10
Kulutus MWh	48	25	43	13
Kulutus %	8,4	7,2	12,9	6,3
Lisähinta €/MWh, 2-p	48	51	22	72
Lisähinta €/MWh, 3-p	61	69	26	65

Erotuksena tilaustehopohjaisesta jakomallista sääpohjaisessa jakomallissa lisähinta määräytyy lisähinnallisen tunnin koko kulutukselle, ei vain tietyn kW-ajan ylittävälle osuudelle. Lisähinta jakautuu siis huomattavasti suuremmalle MWh-määrälle kuin tilaustehopohjaisessa jakomallissa, mikä madaltaa MWh-kohtaista lisähintaa. Aiemmin luvussa 4.3.2 esitetyllä vipuvarren laskutavalla saadaan kuitenkin lisähinta 1–3,5-kertaiseksi normaalihintaan nähden.

Yllä oleva sääraja ja kulutus on laskettu poikkeuksellisen vuoden 2010 perusteella. Kuvaan 15 on piirretty lämpötilaolojen esiintymistä vuosina 2007 ja 2010. Tarkka numeraalinen data on liitteen 5 taulukoissa. Lämpötilan ollessa 22 °C ero esiintymistiheyksissä on kolminkertainen. Mitoitusolosuhteita lähestyttäessä ero vuosien välillä kasvaa kymmenkertaiseksi. Jotta normaalivuotena päästäisiin noin sataan rajan ylittävään tun-

tiin, täytyisi raja laskea pisteeseen $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Phi = 60\%$. Näissä olosuhteissa normaalin toimistorakennuksen jäähdytystehontarve ei vielä ole merkittävän suuri (ks. kohta 2.2.). Paremmin perusteltava leikkuripiste olisi esimerkiksi $t = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Phi = 50\%$, joka esiintyy normaalivuonna n. neljäkymmenen ($x=36$) tunnin aikana. Vuonna 2010 piste ylitettiin kuusi kertaa useammin, yli kaksisataa kertaa ($x=218$).



Kuva 17. Sääolojen esiintyminen 2007 ja 2010.

5 Laskentataulukko

5.1 Taulukon peruslogiikka

Työn ohessa laadittu Excel-taulukko on tehty Helsingin Energian tietokannasta saatavien kaukokylmän kulutustietojen sekä Ilmatieteen laitokselta saatavien säätietojen pohjalta. Kulutus- ja säätiedot voidaan syöttää taulukon lähtötiedoiksi sellaisinaan.

Välttämättömät lähtötiedot on merkitty taulukkoon keltaisella värillä. Muuteltavissa olevat arvot on korostettu oranssilla värillä.

Taulukkoon on tehty tulostusta varten erilliset välilehdet tulostettaville kaavioille sekä numeraalisten arvojen yhteenvetosivulle. Myös muut sivut on pyritty asettelemaan niin, että niistä on mahdollista ottaa A4-kokoisia tulostuksia.

5.2 Syötettävät lähtötiedot

5.2.1 Kaukokylmän tuntikohtaiset kulutustiedot

Kaukokylmän tuntikohtaiset kulutustiedot syötetään taulukon välilehdelle 'Tuntikohtaiset tiedot'. Tiedot voi täyttää kopioimalla ne suoraan Helsingin Energian datasta. Taulukko laskee energiankulutuksen kaukokylmän ensiöpuolen vesivirran [m^3/h] sekä veden $\Delta t:n(t_{\text{meno}}$ ja t_{paluu} [$^{\circ}\text{C}$]) perusteella luvussa 3.1 esitetyllä tavalla. Käytettäessä muunlaista lähtötietoa, voidaan energian kulutustiedot kopioida suoraan sarakkeeseen E_{tunti} [kWh].

Mikäli datarivejä tarvitaan useampia kuin niitä taulukkoon on valmiiksi luotu (rivit 10–1182), on kaukokylmän kulutuksen (sarake E) ja entalpian (sarake I) kaavoja kopioitava vastaavasti lisää taulukon alareunaan. Laskutaulukkoon voi syöttää enintään yhden vuoden tuntien (8760 aikaleiman) tiedot.

5.2.2 Kaukokylmän tilausteho ja kuukausikohtaiset kulutustiedot

Kaukokylmän kuukausikohtaiset kulutustiedot syötetään taulukon välilehdelle 'Lähtötiedot' kohtaan Kaukokylmän kulutustiedot. Laskutaulukko laskee kausikohtaiset kulutuksen sekä vipuvarren jakovaran näiden tietojen ja syötetyn kaukokylmän hinnan [€/MWh] perusteella.

Rakennuksen perustiedot syötetään kohdan 'Rakennuksen tiedot' alle. Oleellinen tieto on kaukokylmän tilausteho, muut tiedot ovat merkitykseltään lisätiedonomaisia. Tilausvirtaama lasketaan tilaustehon perusteella olettaen mitoitusvesivirtaaman lämmönnouksi rakennuksessa kahdeksan astetta. Tilaustehoa tarvitaan tilaustehopohjaisen hinnoittelumallin lisähinnan hahmottamisessa.

5.2.3 Ulkoilman tiedot

Tiedot ulkoilman lämpötilasta [°C] ja suhteellisesta kosteudesta [%] syötetään taulukon välilehdelle 'Tuntikohtaiset tiedot'. Taulukko laskee ulkoilman entalpian ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden kautta luvussa 3.2 esitetyllä tavalla. Laskentaa varten taulukossa on piilotettu apusarake suhteellisen kosteuden ja entalpian sarakkeiden välissä.

Käytettäessä lähtötietoina Ilmatieteen laitoksen säätietoja on huolehdittava tietojen asettamisesta oikean kulutushetken kohdalle, sillä Ilmatieteen laitoksen säädata on oletusarvoisesti UTC-ajan mukaisessa järjestyksessä. Suomen talviaika on kaksi tuntia ja kesäaika kolme tuntia UTC-aikaa edellä.

5.3 Taulukon muuttujat

5.3.1 Kaukokylmän hinta sekä hintakertoimet talvi- ja välikaudelle

Rakennuksen lähtötiedot ja hinnoittelun perustana olevat parametrit syötetään laskentataulukon välilehdelle 'Lähtötiedot'. Kaukokylmän hintakerroin talvi- ja välikaudelle määrittää, mikä on kaukokylmän hinta [€/MWh] edullisempien kausien aikana suhteessa kesäkauteen. Kannustimena käytetty vipuvarsi määräytyy hintakertoimien mukaan.

Vipuvarsi näkyy 'Kulutukset kausittain' -kohdasta Erotuksen [€] kohdalta vihreällä värillä korostettuna.

Talvi- ja välikausien hintakertoimien ja vipuvarren suhteesta on myös tulostettava kaavio.

5.3.2 Tilaustehopohjaisen leikkurin asettaminen

Tilaustehopohjainen leikkuri asetetaan Excel-taulukon kohtaan 'Kulutuksen jakautuminen suhteessa tilaustehoon'. Laskutaulukko porrastaa leikkurin oletusarvoisesti kahden prosenttiyksikön välein, mutta kenttiin on mahdollista syöttää myös manuaaliset arvot. Välittömästi taulukon alapuolella on graafinen esitys leikkurin ja lisähinnan [€/MWh] suhteesta. Kaavion tulostusmuoto löytyy kohdasta 'TULOSTUS Leikkuri ja lisähinta'.

5.3.3 Sääpohjaisten rajojen asettaminen

Sääolosuhteiden ja kulutetun kaukokylmän suhdetta voi tarkastella kohdan 'Kulutuksen jakautuminen suhteessa ulkoilman lämpötilaan ja kosteuteen' -avulla. Laskutaulukko laskee määrättyjen sääolosuhteiden kaukokylmäkulutuksen [MWh] ja jakaa aiemmin kausihintakertoimien avulla saadun vipuvarren näiden kesken [€/MWh].

Laskutaulukko piirtää kaavion selventämään kaukokylmän kulutusta suhteessa ulkoilman lämpötilaan ja kosteuteen. Kaavion tulostusmuoto löytyy kohdasta 'TULOSTUS Ulkoilman olosuhteiden'.

Kulutuksen jakautumista voi tarkastella viiden ilman suhteellisen kosteuden ja seitsemän ilman lämpötilan raja-arvon kautta. Haluttaessa nähdä rajan *ylittäneiden* olosuhteiden kulutus, on lukuarvon eteen laitettava suurempi kuin -merkki [$>$]. Ilman merkkiä laskutaulukko ilmoittaa kulutuksen hetkiltä, jolloin sääolosuhde on *juuri* ilmoitetun arvon kaltainen. Mikäli halutaan tarkastella pelkästään ilman lämpötilan ja kaukokylmän kulutuksen suhdetta, merkitään suhteellisen kosteuden sarakkeeseen >0 .

6 Yhteenveto

6.1 Työn aikana esiin nousseet ongelmat

Insinööriyössä selvitettiin kaukojäähdytyksen hinnoittelun uudistamista siten, että hinnoittelu ohjaisi vähentämään kaukojäähdytyksen kulutusta kulutushuippujen aikana. Suurin työn aikana esiinnoussut haaste on 1:1-periaatteesta kiinni pitäminen käytettäessä lähtötietoina vuoden 2010 kulutustietoja. Vuosi 2010 oli lämpötiloiltaan hyvin poikkeuksellinen. Malli, joka tuottaa kesän 2010 kulutustiedoilla järkeviä lisähintoja, menettää kannustusvaikutuksensa kokonaan normaalimman kesän olosuhteissa. Tämän vuoksi työn päätteeksi ei ole mahdollista esittää konkreettisia arvoja leikkuriprosentille tai säätilan raja-arvoille. Työ kuitenkin osoittaa kausiporrastetun, huippukulutuspiikkien leikkaamiseen tähtäävän hinnoittelun olevan mahdollinen tietyin varauksin.

Tilaustehopohjaisen lisähinnan jakomallin suurin haaste on rakennuksien kaukojäähdytystilaustehon ylimitoitus. Jäähdytystehoa ei käytetä mitoitusolosuhteissa mitoitusohjeen verran – kulutus ei ole tasaisesti suhteessa tilaustehoon, eikä kaikille rakennuksille yhteistä tilaustehoprosenttia löydy. Mikäli mitoitusohjeesta myöhemmin lasketaan lähemmäksi toteutunutta kulutusta tai rakennuksen kaukojäähdytykseen kytkettyä jäähdytyslaitteistoa laajennetaan, joudutaan tilaustehopohjainen leikkuri asettamaan uudestaan.

Sääpohjaisen lisähinnan jakomallin ongelmat ovat periaatteellisemmalla tasolla. Lisähinta määräytyy kulutuksesta riippumatta, eikä siten tunnu yhtä reilulta niitä kiinteistöjä kohtaan, joissa kulutusta pienennetään yleisen kulutushuipun aikana. Erittäin ongelmallista on säätilan todettavuus. Raja-arvon ylitys nostaa jäähdytysenergian hintaa merkittävästi, mutta pelkästään Ilmatieteen laitoksen Kaisaniemen ja Helsinki-Vantaan mittapisteiden välillä on suuri ero lämpötilaolojen esiintymiskerroissa. Onko kohtuullista nostaa koko pääkaupunkiseudun jäähdytysenergian hintaa yhden kantakaupungissa sijaitsevan mittauspisteen tuloksen myötä?

Edellä mainittujen syiden perusteella tilaustehopohjainen hinnoittelumalli vaikuttaa paremmalta vaihtoehdolta kaukojäähdytyksen hinnoittelun jatkoselvityksiä ajatellen.

Työn sivutuotteena laadittua Microsoft Excel -laskentataulukkoa voidaan hyödyntää lisähintojen laskemiseksi tulevien kesien tietojen pohjalta. Laskentataulukon avulla myös tilaustehopohjaista leikkuri on mahdollista laskea uusiksi muuttuneelle tilausteholle tai kulutusprofiilille.

6.2 Jatkoselvitysehdotukset

Työn aikana nousi esiin ajatus hinnoittelun porrastamisesta kausiporrastuksen lisäksi erilliseen yö- ja päivähintaan. Yöhinnan porrastus ei voi kesäisin olla erityisen suuri, sillä vaikka kaukojäähdytyksen kulutus laskee yöajaksi matalalle, eivät kosteat kesäyöt ole sääolosuhteiltaan erityisen edullisia kaukojäähdytyksen tuotannon kannalta (ks. kuva 8). Edullisempi yöhinta toimisi kuitenkin kannustimena jäähdyttää rakennusta yöaikaan, mikä suhteellisesta tehottomuudesta huolimatta auttaisi leikkaamaan aamun jyrkkää nousua tehonkulutuksessa [4].

Pohjamateriaalia uudelle hinnoittelumallille on välttämätöntä lisätä kesän 2010 kulutustiedoista. Koska aiemmilta vuosilta ei ole olemassa yhtä tarkkaa kulutustietoa, on odotettava kesän 2011 kulutustietoja. Mikäli kesä 2011 on kesän 2010 lailla poikkeuksellisen lämmin, joudutaan pohjamateriaalia odottamaan kauempaa tulevaisuudesta.

Koska kaukojäähdytyksen kulutus vaihtelee merkittävästi vuosittain, eikä mikään vuosi tule tuottamaan täsmälleen samaa energiankulutusta kuin laskennan pohjana käytetty vuosi, on sama kulutus – sama hinta (1:1) -periaatteesta luopuminen harkitsemisen arvoista. Muutaman vuoden kulutustietojen perusteella tai mallintamalla aiempien vuosien kulutustietoja, kuten tässä työssä on tehty vuoden 2007 osalta, olisi mahdollista interpoloida lisähinta sopiviksi arvioidut raja-arvot ylittävälle energiankulutukselle.

Lähteet

- 1 Kaukojäähdytys Helsingissä. 2011. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/pdf/kj/ fi/Yleisesitys_01_2011.pdf>. Luettu 5.3.2011.
- 2 Orkoneva, Olli. 2010. Jäähdytysverkosto laajenee ja kehittyy. Promaint 7/2010, s. 42–43.
- 3 Kaukojäähdytyksen liittymistehon arvioitu kehitys. 2010. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/images/kjkehitys_fi.jpg>. Luettu 7.3.2011.
- 4 Wirgentius, Niko. 2011. Kaukojäähdytystoiminnan johtaja, Helsingin Energia. Sähköpostit 26.11.2010, 1.12.2010, 5.1.2011, 21.2.2011, 7.3.2011. Haastattelut 5.11.2010, 2.3.2011.
- 5 Seppänen, Olli. 1988. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI-kustannus.
- 6 Kaukojäähdytyksen tuotanto. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://helen.fi/energia/kj_tuotanto.html>. Luettu 26.1.2011.
- 7 Kaukojäähdytys. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <<http://helen.fi/slj/kaukojaahdytys.html>>. Luettu 26.1.2011.
- 8 Helsinki aikoo säilöä lumiröykkiöt kesän viilennykseen. 2010. Verkkodokumentti. YLE. <http://yle.fi/alueet/helsinki/2011/01/helsinki_aikoo_sailoa_lumiroykkiot_kesan_viilennykseen_2269362.html>. Luettu 15.3.2011.
- 9 Hakala, Pertti. 2007. Kylmälaitoksen suunnittelu. Helsinki: Opetushallitus.
- 10 Kaukolämmön käsikirja. 2006. Helsinki: Energiateollisuus.
- 11 Katri Valan lämpö- ja jäähdytyslaitos. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/energia/katri_vala.html>. Luettu 25.2.2011.

- 12 Välimäki, Matti. 2010. Kakolassa tehdään jätevesistä kaukolämpöä. Energia 1/2010, s. 32–33.
- 13 Absorptiojäähdytys. Verkkodokumentti. Helsingin Energia. <http://www.helen.fi/energia/kj_absorbtiio.html>. Luettu 25.2.2011.
- 14 Koljonen, Tiina. 1998. Uudemman absorptiojäähdystekniikan soveltaminen kaukojäähdytyksessä. VTT tiedotteita no. 1926. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- 15 Rakennusten kaukojäähdytys. KJ1/2010. Yhtenäiset laatuvaatimukset, suositukset ja ohjeet. 2010. Helsinki: Helsingin Energia.
- 16 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Suomen rakentamismääräyskokoelma osa D2. 2008. Helsinki: Ympäristöministeriö.
- 17 Jalonen, Olli. 2008. Ilmastoinnin jäähdytystarpeen laskenta. Opetusministeriö. Espoo: Metropolia ammattikorkeakoulu.
- 18 Malm, Teppo. 2011. Talotekniikan asiantuntija, LVI, Etelä-Suomen alue, Senaatti-kiinteistöt. Haastattelu 2.3.2011.
- 19 Lämpöolot. Verkkodokumentti. Työsuojeluhallinto. <<http://www.tyosuojelu.fi/fi/lampoolot>>. Luettu 25.2.2011.
- 20 Helletilastot. Verkkodokumentti. Ilmatieteen laitos. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/helletilastot>>. Luettu 18.2.2011.

Rakennusten kuukausikohtaiset kaukojäähdytyksen kulutustiedot

Taulukko 1: Rakennusten kuukausikohtaiset kaukokylmän kulutustiedot [MWh]

Kuukausi	Kiinteistö			
	Hakaniemenkatu 2-4	Meritullinkatu 10	Eteläesplanadi 13	Sörnäisten rantatie 10
1/2009	20,3	20,2	18,3	14,4
2/2009	28,5	17,8	15,5	18,7
3/2009	23,2	18,8	15,2	8,6
4/2009	18,5	14,7	9,5	4,8
5/2009	31,3	30,5	18,4	10,9
6/2009	48,4	33	19,1	34,9
7/2009	68	45,4	22,4	37,1
8/2009	55,5	34,6	18,5	18,55
9/2009	32,1	29,7	15,3	18,55
10/2009	31,1	27,9	19,1	14,85
11/2009	25,3	17,4	10,5	14,85
12/2009	29,1	21,2	11	14,85
1/2010	26,9	15,2	10,1	14,85
2/2010	24,9	10	9,7	4,7
3/2010	30,6	9,6	10,5	7
4/2010	24,5	17,9	18,8	8,3
5/2010	44,3	30,2	18,4	27,7
6/2010	42,9	27,9	19	30,6
7/2010	136,4	69,1	37,9	86,3
8/2010	119,7	78,4	43,1	72,5
9/2010	34,3	28,1	14,9	24,7
10/2010	32,2	25,5	11,2	25,8
11/2010	28,2	19	9,1	18,7
12/2010	26,4	18,2	9,3	12,8
Vuosi 2009	411,3	311,2	192,8	211,05
Vuosi 2010	571,3	349,1	212	333,95

Kuukausikohtaiset keskilämpötilat 1990-2010, Kaisaniemi

Taulukko 1: Kuukausikohtaiset keskilämpötilat 1990-2010, Kaisaniemi

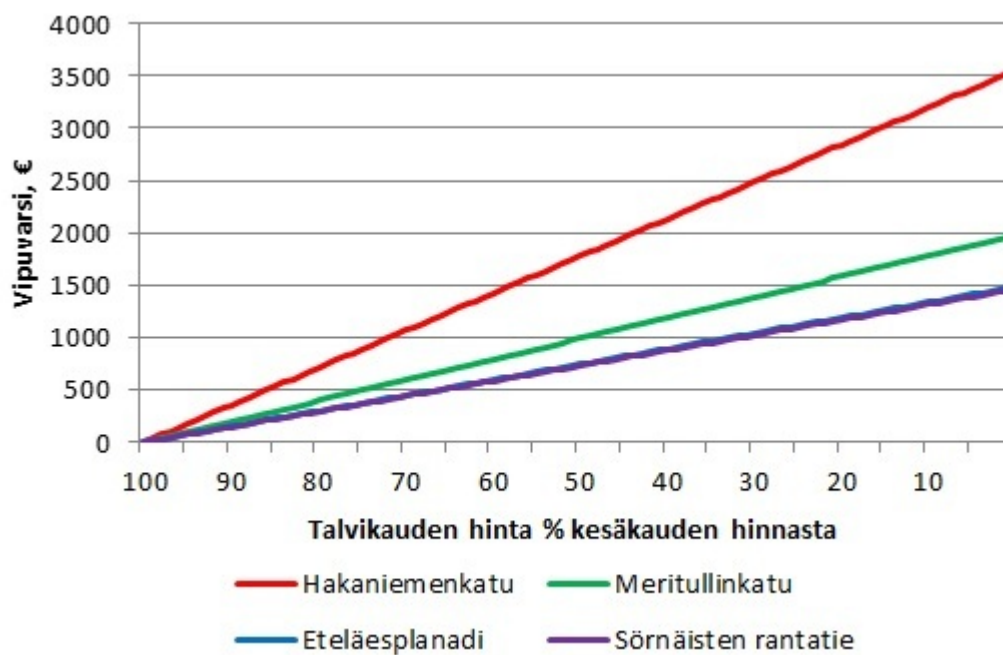
	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
1990	-2,7	1,6	1,8	6,3	10,3	14,7	16,3	16,4	9,6	6,2	0,3	0
1991	-2	-5,2	0	3,7	8,2	12,7	18	17,3	10,8	6,8	4,2	-0,1
1992	-0,7	-1,4	1,5	2,4	10,9	16	16,7	15,3	13	2,1	-0,1	1,3
1993	-0,7	-1,7	-0,2	3,7	13	12,6	16,2	14,5	7,7	4,9	-1,6	-2
1994	-3	-11,1	-2,1	4,6	8,8	12,5	19,8	16,4	12	5,6	0,5	0,3
1995	-2,1	0,2	0,7	3,7	8,8	17,3	15,8	16,3	11,9	8,7	-1,1	-6,3
1996	-5,2	-9,2	-3,2	2,7	8,6	13,3	15	18,1	9,8	7,7	4,4	-3,9
1997	-3,2	-2,6	-0,3	2,4	8,5	16,5	19,2	18,9	11,7	3,8	1,2	-2,1
1998	-1	-3,6	-3,3	2,8	9,9	14	16,4	14,1	12,2	6,7	-2,1	-1,4
1999	-5,1	-6,3	-1,1	5,4	8	17,6	18,7	15,6	13,4	7,4	3,4	-1,2
2000	-2,2	-1,8	-0,2	5,8	10,2	13,9	17	15,9	10,5	9,5	5,5	2
2001	-1	-6,8	-2,8	5	9,7	13,8	20,2	16,4	12,8	8,7	0,9	-8
2002	-2,8	-0,4	0,8	5,3	11,4	16	19,1	19,4	11,6	1,5	-1,9	-7,1
2003	-8,6	-5,1	-1,2	2,6	9,1	13,2	20,7	16,8	12,1	4,4	3,7	0,2
2004	-5,7	-4	-0,5	4,9	10,3	13,3	16,6	17,3	12,8	6,8	1,1	1,1
2005	-0,1	-4,4	-5	4,5	10,3	14,4	19,2	16,7	13,1	8,3	4,6	-2,2
2006	-3,6	-7,9	-5,4	3,6	10,5	15,9	18,9	18,7	14	8,5	2,7	4
2007	-1,1	-7,9	3,1	5,5	10,5	15,6	17,5	17,6	11,9	7,3	1,2	2,4
2008	0,6	1,1	0,2	6,1	10,9	14,4	17,6	15,5	10,4	9,3	3,7	1,3
2009	-2,8	-3,6	-0,9	4,5	11	14,1	17,2	16,7	13,5	4,2	3,6	-3,6
2010	-10,4	-8,1	-1,8	4,6	11,5	14,6	21,7	18,1	12,2	6	-0,5	-7,5
keskiarvo	-3,0	-4,2	-0,9	4,3	10,0	14,6	18,0	16,8	11,8	6,4	1,6	-1,5
	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu

Jäähdytystehon ja entalpiain suhde tunneittain

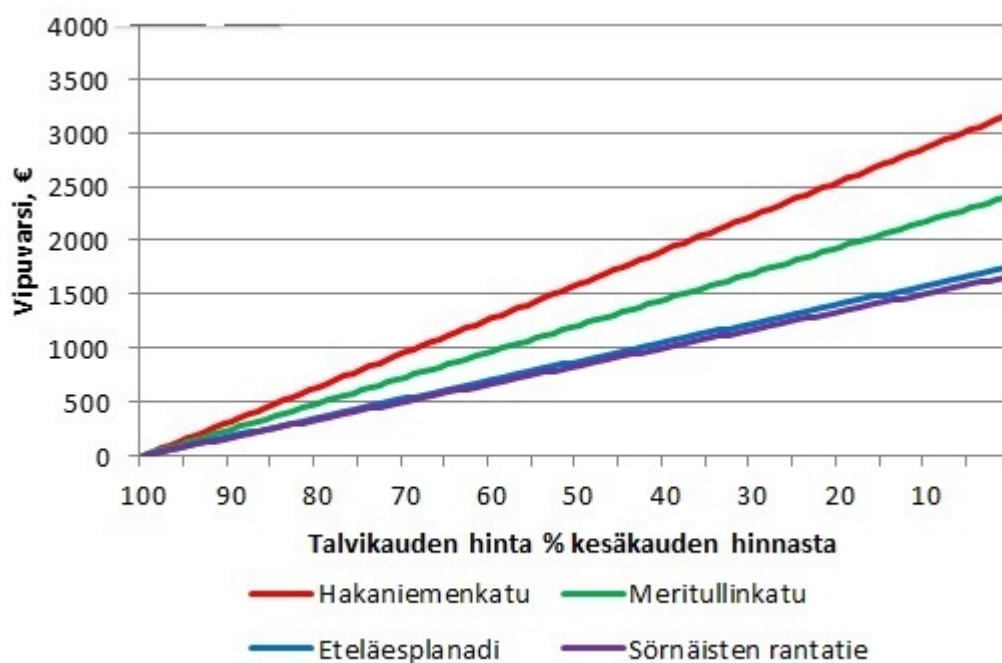
Taulukko 1: Jäähdytystehon ja entalpiain suhdeluvut tunneittain [kW/(kJ/kg)]

klo	Hakaniemen- katu 2-4	Meritullin- katu 10	Eteläespla- nadi 10	Sörnäisten rantatie 13
0:00	3,14	1,17	0,92	0,61
1:00	4,33	1,29	1,39	0,61
2:00	5,40	1,35	1,87	0,77
3:00	5,61	1,85	2,04	1,87
4:00	5,84	2,16	2,20	4,59
5:00	6,21	2,37	2,32	4,30
6:00	6,53	2,71	2,56	4,48
7:00	6,96	3,07	2,45	4,76
8:00	7,26	3,33	2,44	5,15
9:00	7,59	3,47	2,05	5,34
10:00	7,16	3,62	1,74	5,63
11:00	7,36	3,72	1,31	6,02
12:00	7,36	3,82	0,75	6,15
13:00	4,79	3,79	0,66	5,83
14:00	4,68	3,52	0,59	5,56
15:00	3,39	3,07	0,58	3,92
16:00	2,97	2,37	0,61	1,33
17:00	2,17	1,23	0,59	0,94
18:00	2,02	1,17	0,58	0,54
19:00	1,74	1,24	0,66	0,48
20:00	1,61	1,22	0,61	0,42
21:00	1,58	1,28	0,65	0,39
22:00	1,60	1,26	0,68	0,45
23:00	2,11	1,24	0,87	0,45
viikonloppu	1,60	1,04	0,61	0,61

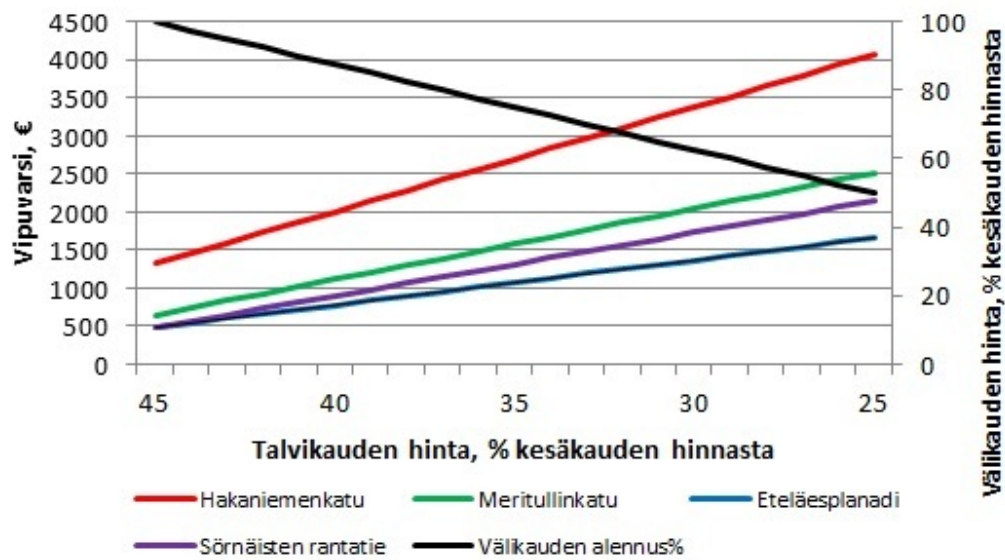
Vipubarren ja hintakertoimien välisiä suhteita



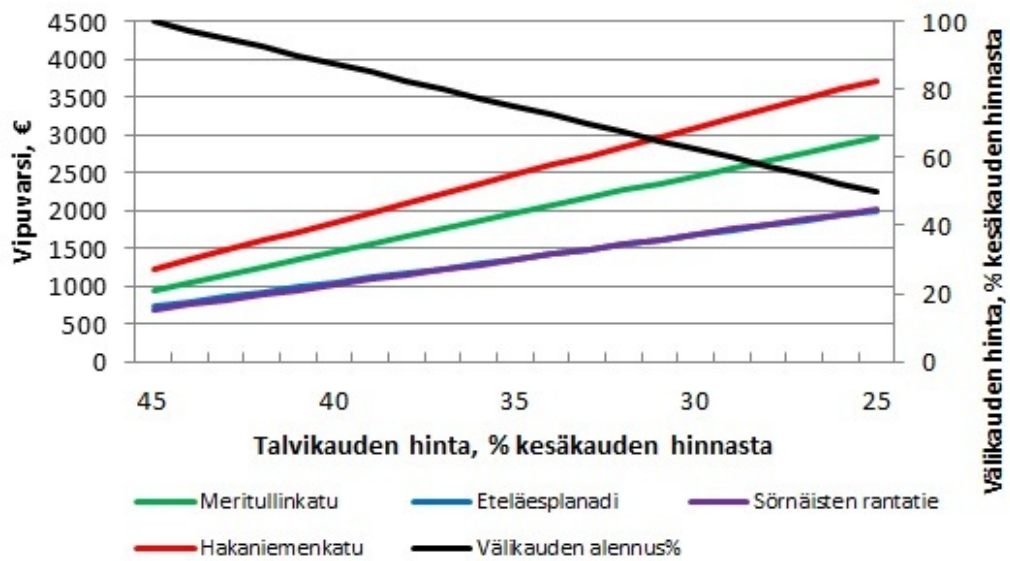
Kuva 1. Vipubarren ja hintakertoimen suhde, kaksiporrasmalli, 2010



Kuva 2. Vipubarren ja hintakertoimen suhde, kaksiporrasmalli, 2009



Kuva 3. Vipuvarren ja hintakertoimien suhde, kolmiporrasmalli, 2010



Kuva 4. Vipuvarren ja hintakertoimien suhde, kolmiporrasmalli, 2009

Sääolosuhteiden esiintymisiä [h] 2007 ja 2010

Taulukko 1: Sääolosuhteiden esiintymisiä [h] 2007

Vuosi 2007								
	Lämpötila [°C]							
Φ [%]	>22	>23	>24	>25	>26	>27	>28	>29
>40	193	97	45	15	2	0	0	0
>45	179	84	38	14	2	0	0	0
>50	161	74	36	12	2	0	0	0
>55	121	53	19	3	0	0	0	0
>60	90	40	13	2	0	0	0	0
>65	50	21	7	0	0	0	0	0
>70	17	7	2	0	0	0	0	0
>75	6	2	0	0	0	0	0	0
>80	1	0	0	0	0	0	0	0

Taulukko 2: Sääolosuhteiden esiintymisiä [h] 2010

Vuosi 2010								
	Lämpötila [°C]							
Φ [%]	>22	>23	>24	>25	>26	>27	>28	>29
>40	467	323	225	131	76	45	19	4
>45	458	320	224	131	76	45	19	4
>50	446	312	218	128	74	43	17	3
>55	415	285	202	114	63	34	9	1
>60	366	245	171	90	44	17	1	0
>65	303	197	132	63	25	8	0	0
>70	197	112	66	24	4	0	0	0
>75	124	59	29	7	0	0	0	0
>80	71	26	12	0	0	0	0	0