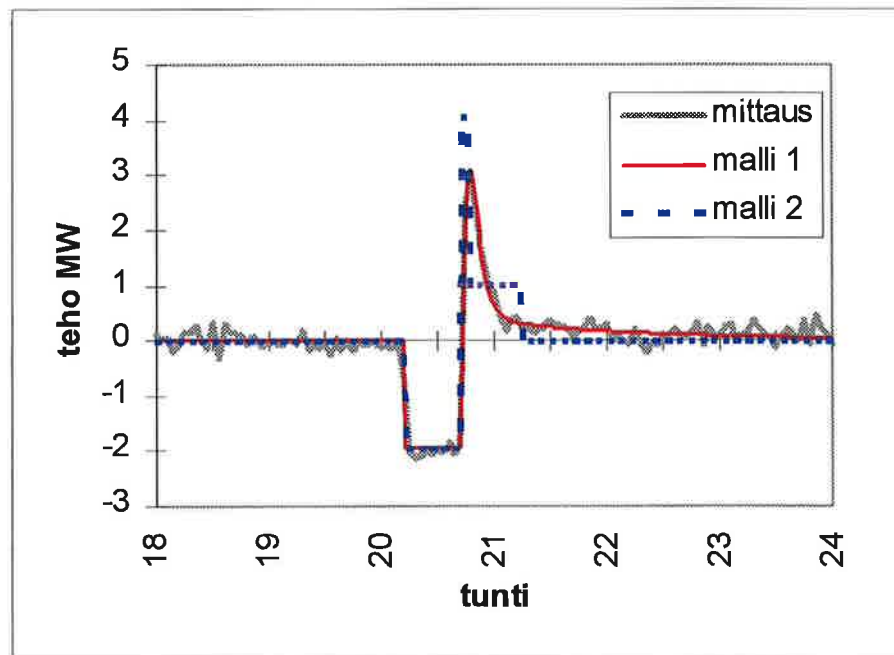


Sähkölämmityskuorman suoran ohjauksen mallit

Pekka Koponen

VTT Energia



Raportti ENE6/9/97

SÄHKÖLÄMMITYSKUORMAN SUORAN OHJAUKSEN MALLIT

Julkinen

Pekka Koponen

VTT Energia

PL 1606, 02044 VTT

puh. (09) 4561, telefax (09) 456 6538

Espoo, 19.6.1997

Suorittajaorganisaatio ja osoite VTT Energia, Energiajärjestelmät PL 1606 02044 VTT Projektipäällikkö Pekka Koponen Diaarinumero	Tilaaaja Tilaaajan yhdyshenkilö Tilaus- tai viitenumero	
Projektin nimi ja suoritettunus Kuormien ohjauksen optimointi (N6SU00142; KUORMA)	Raportin numero ja sivumäärä ENE6/9/97 47 s. + 4 s.	Päiväys 19.6.1997

Raportin nimi ja tekijät

SÄHKÖLÄMMITYSKUORMAN SUORAN OHJAUKSEN MALLIT
(Load response models for direct control of electric heating)
Pekka Koponen

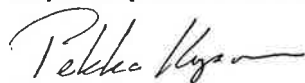
Tiivistelmä

Suoran sähkölämmityskuormien ohjauksen vasteita mallitetaan kenttäkokeiden avulla. Esitetään malli, jonka rakenne vastaa rakennuksen tärkeimpiä lämpövarastoja ja lämmönjohtavuuksia ja jonka parametrit on sovitettu kenttäkoetuloksiin. Saatuja tuloksia analysoidaan ja verrataan niitä kuormanohjauksen askelmalliin. Saadut tulokset ovat lupaavia, mutta lisää kenttäkoeaineistoa tarvitaan vielä.

Abstract

The responses of direct control of electric heating loads are modelled from field test measurements. A load control model structure that is based on the heat physics of a house is presented. The parameters of the model are fitted to identified field test responses. The results are analysed and compared with a step model. The results are promising but some more field tests are still needed.

Raportin päävastuullinen laatija



Tutkija Pekka Koponen

Hyväksynyt


Pekka Pirilä

Tutkimuspäällikkö, Energiajärjestelmät

Tarkastanut


Ryhmäpäällikkö Seppo Kärkkäinen

Julkisuus

Julkinen

TIIVISTELMÄ

Suoran sähkölämmityskuormien ohjauksen vasteita mallitetaan kenttäkokeiden avulla. Esitetään malli, jonka rakenne vastaa rakennuksen tärkeimpiä lämpövarastoja ja lämmönjohtavuuksia ja jonka parametrit on sovitettu kenttäkoetuloksiin. Saatuja tuloksia analysoidaan ja verrataan niitä kuormanohjauksen askelmalliin. Saadut tulokset ovat lupaavia, mutta lisää kenttäkoeaineistoa tarvitaan vielä.

ABSTRACT

The responses of direct control of electric heating loads are modelled from field test measurements. A load control model structure that is based on the heat physics of a house is presented. The parameters of the model are fitted to identified field test responses. The results are analysed and compared with a step model. The results are promising but some more field tests are still needed.

ALKUSANAT

Tämä työ on osa sähkölaitosautomaation tutkimusohjelmaa EDISON. Tutkimusohjelman vetäjä Matti Lehtonen on painottanut kuormienohjauskokeiden tarpeellisuutta ja siten motivoinut ja luonut puitteita kokeiden suorittamiselle. Kari Keränen ja Juha Rätty Enermet Oy:stä ovat auttaneet löytämään tarkoitukseen soveltuvat yhteistyökumppanit sähkölaitoksista. Arto Liikanen Koillis-Pohjan Sähkö Oy:stä, Heikki Ruikkala ja Kari Kuusela Oulun Seudun Sähköstä ja Juhani Öhman Keski-Suomen Valo Oy:stä ovat huolehtineet kenttäkokeiden toteutuksesta. Magnus Wistbacka VTT Energiasta määrittä vertailuaineistosta siirtofunktiot ulkolämpötilasta lämmitystehoon. Tutkimusprofessori Seppo Kärkkäiseltä sain kommentteja ja parannusehdotuksia tätä raporttia varten. Ilman heidän kaikkien panostaan tätä tehtävää ei olisi ollut mahdollista toteuttaa.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
SYMBOLILUETTELO	6
1 JOHDANTO	7
2 SUORAN KUORMIENOHJAUKSEN KENTTÄKOKEET JA VASTEMALLIT	8
2.1 KIRJALLISUUSKATSAUS	8
3.2 KENTTÄKOKEET TALVELLA 1996-97	11
2.3 FYSIKAALINEN MALLI	20
3 TULOSTEN TARKASTELU	25
3.1 MALLIN SOVITUS KENTTÄKOETULOKSIIN	25
3.2 MALLIN KYKY ENNUSTAA	29
3.3 MALLIN LÄMPÖTILARIIPPUVUUS	32
3.4 SAATUJEN PARAMETRIARVOJEN JÄRKEVYYDEN ARVIOINTI	38
3.5 FYSIKAALISEN MALLIN JA ASKELMALLIN VASTEIDEN VERTAILU	39
4 PÄÄTELMIÄ JA ARVIOINTEJA	41
4.1 TULOSTEN ARVIOINTI	41
4.2 TULOSTEN SOVELTAMINEN	42
4.3 JÄRJESTELMÄLLISEN TIETOJEN KERUUN TARVE	43
4.4 SÄHKÖKATKON JÄLKEISEN KUORMITUKSEN ENNUSTUS	44
4.5 KUORMAN LÄMPÖTILARIIPPUVUUDEN ENNUSTUS	44
5 YHTEENVETO	45
LÄHDELUETTELO	46
LIITTEET	
A Ohjausvasteen ennustusmallin rakennekaavio	
B Esimerkki kokeeseen sovitetuista parametrialarvoista	
C Kenttäkokeiden yhteenvetotaulukot	

SYMBOLILUETTELO

C	lämpökapasiteetti
k	lämpökonduktanssi
P	teho
P_{\max}	suurin lämmitysteho
t	aika
T	lämpötila
T_m	maan lämpötila
T_{out}	ulkolämpötila
T_{set}	sisälämpötilan asetusarvo
$x_i, i=1,2,3,4$	mallin tilavektori

1 JOHDANTO

Sähkökuormien ohjauksen kannattavuutta halutaan arvioida ja kuormien ohjaukset halutaan optimoida. Optimointi luo pohjan kannattavuuden arvioinnille. Sekä optimointi että kannattavuuden arviointi perustuvat puolestaan siihen, miten hyvin kuormien ohjausvaste tunnetaan. Sähkölämmityskuormien suoran ohjauksen kokeita on toki tehty jopa kymmeniä vuosia sitten. Mitattuja vasteita ohjaukskoikeista ei kuitenkaan ole ollut numeerisessa muodossa saatavissa. Rakennuskanta on myös lämmöneristävyydeltään parantunut. Näin ollen oli tarpeen mitata sähkölämmityskuormien suoran ohjauksen vasteita ja päivittää vastemallit.

Tämä selostus rajoittuu pelkästään sähkölämmityskuormien suoran ohjauksen vastemalleihin. Näitä vastemalleja käytetään hyväksi muissa osissa kuormien ohjauksen optimointiprojektia. Kyseisen projektin tavoitteena on kehittää kuormanohjauksen liitää sähköhankinnan optimointiin ja sähkömarkkinoihin. Se miten sähkölämmityskuormien suora ohjaus liitetään energialaitoksen sähköhankinnan optimointiin on yksi projektin keskeisiä tutkimuskohteita. Projekti ei kuitenkaan rajoitu siihen vaan muunlaisetkin ohjattavat kohteet sekä hintaohjaus kuuluvat projektiin. Projektin aluetta sekä joitakin esimerkitapauksia on kuvattu viitteessä (Koponen 1996).

Luvussa 2.1 tarkastellaan kirjallisuutta suoran kuormienohjauksen vastemalleista. Luvussa 2.2 kerrotaan projektissa suoritetuista kenttäkokeista ja kerätystä mittausaineistosta. Luvussa 2.3 esitetään rakennuksen fysikaalisiin ominaisuuksiin rakenteeltaan perustuva kuormienohjausmalli ja luvussa 3.1 se sovitetaan kenttäkoemittauksiin. Luvuissa 3.2, 3.3 ja 3.4 arvioidaan saatuja tuloksia. Luvussa 3.5 vertaillaan tuloksia Rouvalin (1993) askelmalliin. Luvussa 4 pohditaan tulosten merkitystä, vallitsevaa tilannetta ja kehitysmahdollisuuksia. Lopuksi on yhteenveto.

2 SUORAN KUORMIENOHJAUKSEN KENTTÄKOKEET JA VASTEMALLIT

2.1 KIRJALLISUUSKATSAUS

Jo Hannu Haasen diplomityö (1971) käsittelee sähkölämmityskuormien suoran ohjauksen mallintamisen kannalta keskeiset asiat. Itse tehtyjen sulkuajakokeiden lisäksi kerrotaan myös kolmen aikaisemman projektin kokeista. Yksi niistä oli tehty Suomessa ja kaksi 1960-luvun loppupuolella Ruotsissa. Sekä itse tehdyissä että kaikissa muissakin kokeissa on mitattu sulkuajan vaikutukset sekä sähkötehoihin että rakennusten sisälämpötiloihin. Haase on myös diplomityössään s. 49 - 56 sekä liitteissä 19-21 kuvannut simulointimallin huoneiston lämpövirroille ja sen avulla saanut hyvän kuvan eri tekijöiden vaikutuksesta suoran kuormienohjauksen lämpötiloihin ja lämmitystehoon aiheuttamiin vasteisiin.

Reijo Virtanen on diplomityössään (1977) tutkinut sähkölämmityksen verkkokäskyohjausta. Kuormanohjausvasteen mallittamiseen tarvittavia mittaustuloksia, taustatietoja sekä aikaisempia julkaisuja ja tutkimuksia on varsin yksityiskohtaisesti kuvattu sivuilla 15 - 48 sekä liitteissä. Mäntsälän kunnan sähkölaitoksella oli tehty kuormanohjauskokeita ja päämuuntoasemalta mitattu tehot. Liitteissä on piirturikäyrät seitsemän eri päivän mittauksista, joina eri pituisia ohjauksia on suoritettu eri ulkolämpötiloissa. Diplomityön sivulla 53a on lisäksi piirturikäyrä, jossa on kaksi ohjausta, joista toisessa ohjausryhmien porrastuksella on jälkihuippua madallettu. Ohjattavista kohteista on kerrottu tilastotiedot. Piirturikäyrissä kuormienohjausvasteet erottuvat hyvin. Varsinkaan aamupäivällä tehdyissä kokeissa ei häiritseviä ilmiöitä ole juuri havaittavissa. Kokeita on tehty eri aikoina mutta pelkästään päivällä. Lisäksi on kahdesta eri-ikäisestä koetalosta mitattu useasta eri pisteestä huonelämpötilojen vastetta kuormanohjauksiin. Mittaustulokset on esitetty diplomityön liitteissä 6-11. Kello 15-19 välillä on

ohjattavissa oleva lämmitysteho havaittu pienemmäksi kuin aamupäivällä. Huonelämpötilojen käyttäytymistä on myös vertailtu aikaisempien vastaavien tutkimusten mittaustuloksiin. Huonelämpötilojen käyttäytyminen kertoo hyvin sen, että jälkihuippu aiheutuu pääasiassa sisäilman lämmittämisestä asetusarvoonsa ja rakenteiden lämpiäminen takaisin tasapainotilaan vie paljon pitemmän ajan eli useita tunteja. Virtasen diplomityö (1977) sisältää siis iästään huolimatta edelleen varsin hyödyllistä tietoa. Pitää tuki ottaa huomioon, että sen jälkeen on tehty entistä paremmin eristettyjä rakennuksia.

Tamminen ja Aho-Mantila (1979) ovat tutkineet suoran sähkölämmityksen ohjaamisen kannattavuutta. Sivulla 9 ja 10 he ovat esittäneet käyttämänsä mallin, jonka aika-askel on 20 minuuttia ja joka on laadittu julkaisemattoman lähteen mittausten perusteella koskemaan noin -15°C ulkolämpötilaa. Jälkihuipun korkeutena mallissa on 0.8 x ohjattu teho ja kesto aika 20 minuuttia. Jälkihuipun jälkeen mallissa teho on 0.3 x ohjattu teho kunnes sulkuaikana toimittamatta jäänyt energia on lähes korvattu. Ulkolämpötilasta riippuvaa mallia ei siis ole esitetty eikä käytetty, joten kuormanohjausten optimointiin malli ei sovellu.

Martikainen ym. (1987) ovat esittäneet muunmuassa kenttämittauksia, laboratoriomittauksia ja simulointituloksia rakennusten vasteista sähkölämmityksen suoriin ohjauksiin. Osassa I on muunmuassa esitetty mittaustulokset asuntojen lämpöviihtyvyyden muuttumisesta tehonrajoitustilanteessa kolmesta omakotitalosta sekä vertailtu mittaustuloksia simulointilaskelmiin rakennuksen kahden aikavakion mallilla. Osassa II on simuloitu yksityiskohtaisemmalla tietokonemallilla rajoitusohjausten vaikutuksia sekä kerrottu kuormanohjauksen kenttämittauksista vuoden 1987 alussa, joissa sähköasema- ja sähkölaitostehojen lisäksi on samalla mitattu Nurmijärvellä tehot 17 talosta ja kahdesta muuntajasta. Myös runsaasti muiden tekemien kenttämittausten tuloksia on tarkasteltu. Simuloinnein on muunmuassa tarkasteltu sitä miten 80-luvun taloissa sisälämpötila laskee hitaammin kuin vanhemmissa taloissa. Taustatiedot simulointi- ja mittaustuloksista on esitetty.

On muunmussa tarkasteltu sitä miten jälkihuipun kesto on kokeissa riippunut rajoitusajasta ja ulkolämpötilasta. Osassa III on esitetty tulokset sähkökäyttäjille ja sähkölaitoksille suunnatusta tehonrajoituksia koskevasta mielipidekyselystä.

Rouvali (1993) on s.19-20 ja 24-28 käsitellyt kuormien mallintamista sekä s. 37-38 kertonut kokemuksia ja esittänyt piirturikäyrän toteutetuista ohjauksista. Hän on liitteessä 1 verrannut mallinsa parametreja lähdeaineistostaan saamiinsa mittaustuloksiin. Rouvalin käyttämä jälkihuipun malli koostuu kahdesta askelesta. Ensinnäkin on jälkihuippu ja sen jälkeen lisäjälkikulutus. Jälkihuipun kesto saadaan mallissa arvioimalla, että 1/4 ohjatusta energiasta korvataan jälkihuipun aikana ja että lämmittimet ovat tällöin täydellä teholla. Lisäjälkikulutus mallissa on teholtaan 1/4 jälkihuipun tehosta ja kesto määräytyy siten, että lisäjälkikulutuksen energia on 0,6 kWh (kun lämmittimien maksimiteho on 5 kW) paitsi pienempi, jos mallin korvattava energia olisi suurempi kuin ohjattu energia.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D5 (1985) on kerrottu kuinka rakennusten lämmitystehon tarve lasketaan tasapainotilassa. Lämmitysteho on yhtä suuri kuin rakennuksen erilaiset lämpöhäviöt, jotka koostuvat:

- johtumisesta rakenteiden läpi ulkoilmaan ja viereisiin tiloihin sekä maahan,
- ilmanvaihdon ja vuotoilman lämmityksestä,
- lämpimän käyttöveden valmistuksesta.

Kullekin niistä annetaan laskentakaavat. Rakennusten lämpöteknillisiä laskelmia varten on maa jaettu neljään vyöhykkeeseen, joille on ilmoitettu mitoittavat ja keskimääräiset ulkolämpötilat, kuukausittainen astepäiväluku sekä auringon kuukausittainen säteilyenergia.

Haapala ym. (1997) ovat tutkineet paljonko hyötyä päivittäisestä sisälämpötilan laskusta pientaloissa olisi. Sitä varten he ovat simuloineen määrittäneet pientalojen aikavakiot sekä lämpötilojen ja tehojen käyttäytymisen 8 tunnin sisälämpötilan laskun aikana. He ovat tarkastelleet kolmea erilaista tyypillistä pientaloa, uusi kevytrakenteinen, uusi raskasrakenteinen ja vanha kevytrakenteinen. Molemmissa uusissa taloissa oli lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen poisto- ja tuloilmanvaihto. Simulointien lähtötietoina ovat olleet muunmuassa talojen seinärakenteet.

Välisuo ym. (1994) ovat tarkastelleet erilaisia pientalojen lämmityksen säätötapoja. Tuota tarkoitusta varten on myös erilaiset lämmitysratkaisut ja niiden säätötekniset ominaisuudet kerrottu. Osmo Siirto (1989) on diplomityössään tutkinut regressioanalyysia käyttäen ulkolämpötilan, auringon säteilyn ja tuulen vaikutusta eri sähkönkäyttäjryhmien sähköntarpeeseen.

Tämä kirjallisuuskatsaus on vain valikoima pientalojen sähkölämmityksen ohjaukseen liittyvästä kirjallisuudesta. Kirjallisuuslähteistä löytyy lisää viittauksia aihetta käsitteleviin julkaisuihin. Muunlaisten lämmitystapojen ohjauksesta löytyy myös kirjallisuutta. Esimerkiksi Kekkonen (1988) sekä Ahlsted ja Koskelainen (1995) ovat tutkineet kaukolämmön kulutuksen ohjausta.

3.2 KENTTÄKOKEET TALVELLA 1996-97

Talvella 1996-97 suoran kuormienohjauksen kenttäkokeita tehtiin kolmessa jakelusähkölaitoksessa. Yhdessä niistä tosin tehtiin vain yksi koe, jonka tulokset eivät ole kovinkaan käyttökelpoisia johtuen epämääräisistä viiveistä, jotka valintainen puhelinverkko aiheutti ohjauksikäskyille. Kahdessa muussa sähkölaitoksessa kokeet onnistuivat paremmin. Niissä mitattiin kuormat sähköasemittain 3 minuutin keskitehoina. Sähköasemia oli yhteensä 14. Kahdessa oli kuormana pääasiassa loma-asuntoja ja kahdessatoista pääasiassa tavallisia asuntoja mutta myös toimistoja, kauppoja ynnä muuta. Jälkimmäisistä sähköasemista 3 jouduttiin kuitenkin hylkäämään analyysistä eri syistä. Yhden sähköaseman energiamittauksen pulssikoko oli liian suuri. Toisessa oli liian usein tiedonsiirto- tai kellonaikavirheitä. Yksi sähköasema oli puolestaan unohtunut aluksi pois tallennusohjelmasta. Yhteensä siis analysoitiin 11 sähköaseman mittaukset, joista 2 koski pääasiassa loma-asutusta. Näissä oli ohjattavia sähkölämmityskohteita noin 5670 ja 463 vastaavasti.

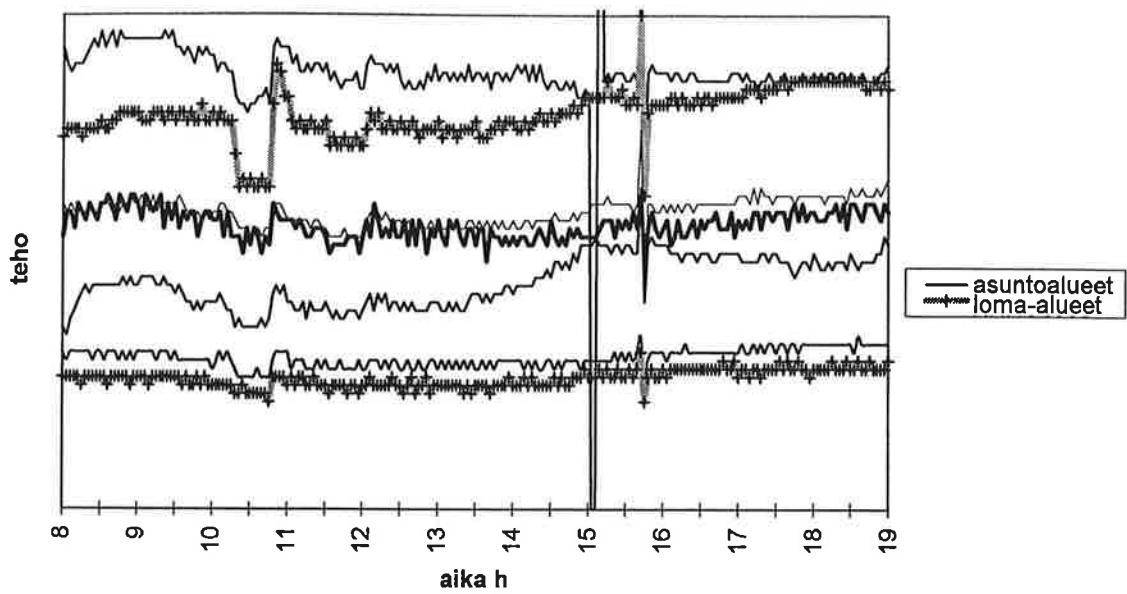
Kokeita tehtiin toisessa sähkölaitoksessa kolmena päivänä ja toisessa kahtena. Pieni kokeiden määrä johtui pääasiassa siitä, että talvi oli poikkeuksellisen huono kuormien ohjauksen kenttäkokeille. Pakkasjaksot olivat lyhyitä ja niitä oli vähän. Tästä johtuen ei kaikille koepäiville löytynyt olosuhteiltaan samanlaisia vertailupäiviä. Yleensä kokeiltiin ohjeista poiketen useita ohjausryhmiä samalla kertaa. Tämä vaikeutti mallien sovitusta. Mittauksissa esiintyvä nopea edestakainen heilahtelu johtuu siitä, että mittareiden pulssikoko oli tähän tarkoitukseen hieman liian suuri.

16.12.1996 kokeiltiin suoraa ohjausta kolmelle suoran tai lähes suoran sähkölämmityksen ryhmälle ja yhdelle varaavan sähkölämmityksen ryhmälle Koillis-Pohjan Sähkössä. Kokeet tehtiin päiväsaikaan, mikä osoittautui sikäli hyödylliseksi,

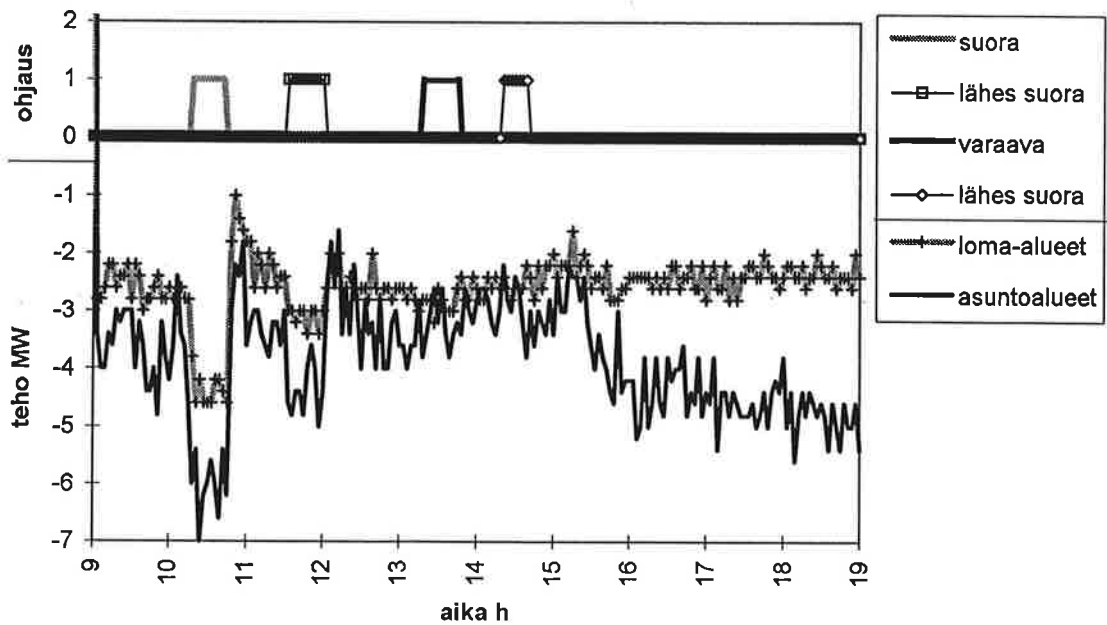
että häiritseviä ilmiöitä kuten saunomista ei ollut. Pakkasta oli Pudasjärvellä noin -20 °C ja Kuusamossa noin -17 °C. Mitatut tehot näkyvät kuvassa 1 ja kuvassa 2 on vaste, josta on vähennetty vertailupäivän (8.1.1997) vaihtelut. Kuvassa 1 hieman kello 15 jälkeen näkyy myös ensin tiedonsiirtohäiriön ja sitten tietojärjestelmähäiriön vaikutus talletettuihin tuloksiin. Nämä virheet korjattiin, koska ne olivat ilmeisiä ja myös lokitiedoista todennettavissa.

24.12.1996 kokeiltiin kymmenen ohjauksen sekvenssiä. Se edustaa tyypillistä rajoituksen toteuttamista käytännössä. Koe osoitti sen, miten kyseisellä sekvenssillä saatiin korkeimpia tuntitehoja leikattua huomattavasti. Sensijaan vastemallien määrityksessä tästä kokeesta ei ollut hyötyä, sillä yksittäisten ohjausten vasteet eivät erotu toisistaan ja jouluaatolle ei myöskään ole vertailupäivää. Naapurisähkölaitoksen saman ajankohdan tehoja jouduttiin käyttämään vertailuaineistona. Pakkasta oli Pudasjärvellä noin -23 °C ja Kuusamossa noin -29 °C. Mitatut tehot näkyvät kuvassa 3. Kuvassa 4 on valittujen sähköasemien tehosta vähennetty naapurisähkölaitoksella sijaitsevien vertailusähköasemien tehot. Toisessa käyrässä on verrattu kolmea ohjattua sähköasemaa ja toisessa neljää. Asemat vertailuun on pyritty valitsemaan sekä maantieteellisen läheisyyden että samankaltaisen tehoprofiilin perusteella. Oulussa pakkasta oli noin -26 °C. Pudasjärvellä ja etenkin Oulussa pakkasen laski sekä ennen koetta, että sen aikana huomattavasti.

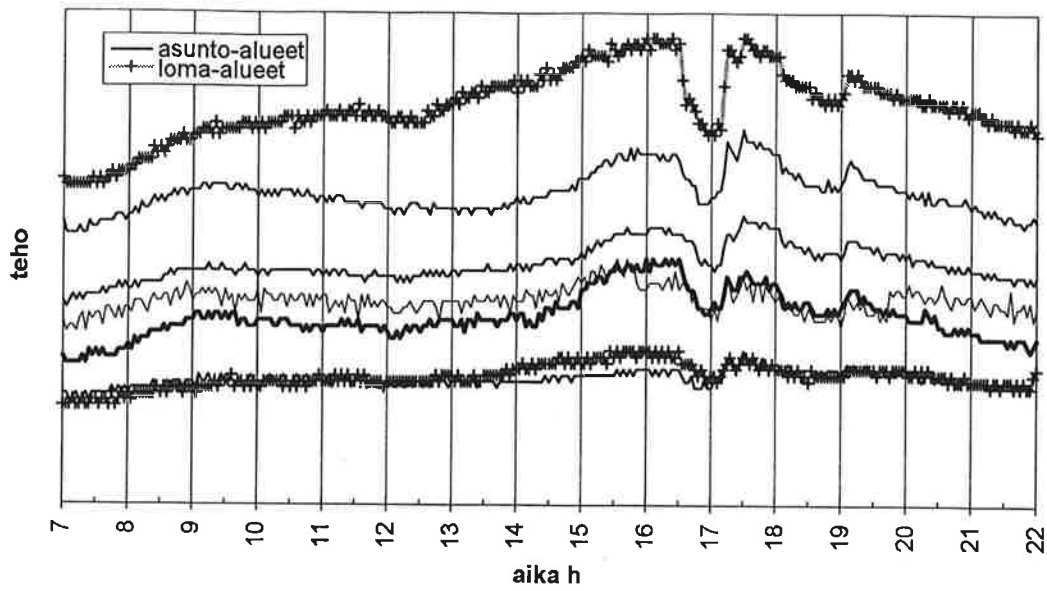
8.1.1997 tehtiin yhdellä sähkölaitoksella yksi kahden samantyyppisen ryhmän ohjaus ja toisella kolmen erilaisen ryhmän eriaikaiset ohjaukset. Ohjaukset tehtiin keskiviikkoiltana, joten saunomisesta aiheutuva sähkönkulutushuippu sekoittuu ohjausvasteeseen. Yhtä kylmää keskiviikkoa ei vertailupäiväksi löytynyt, joten saunomisen vaikutusta ei voitu eliminoida. Saunat on kytketty siten, että saunan päällä ollessa osa lämmitystehosta kytkeytyy pois. Loma-asuntojen alueella saunomishuippu jäi paljon pienemmäksi. Kuusamossa oli noin -29 °C, Pudasjärvellä noin -28 °C ja Oulussa noin -23 °C. Loppuillasta lämpötila kohosi nopeasti



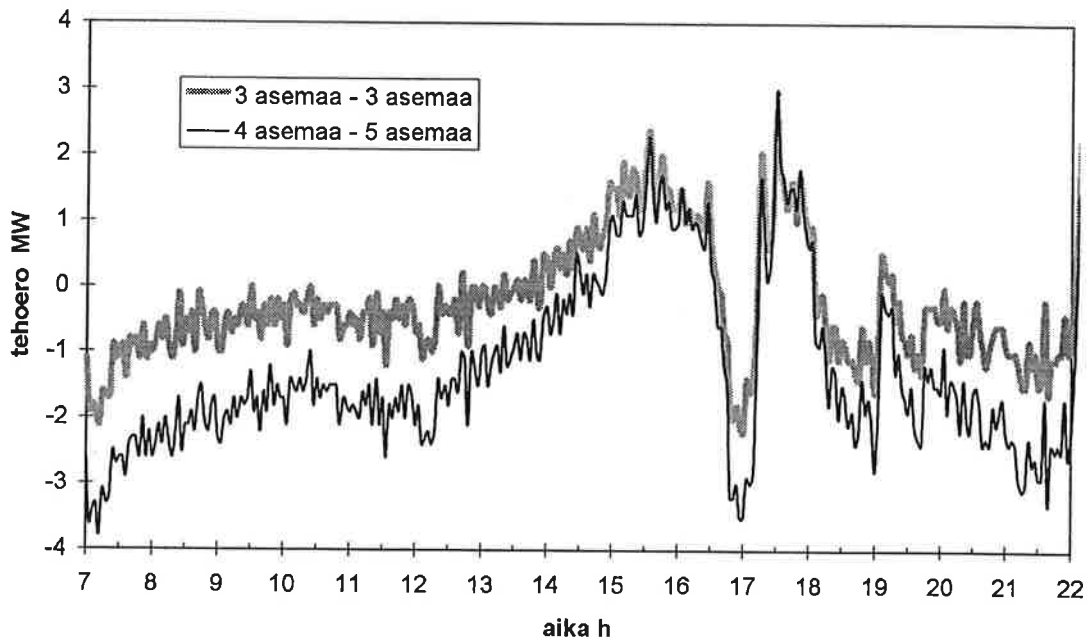
Kuva 1. Neljän eri ryhmän kuormanhäusvasteet 16.12.1996 sähköasemittain ryhmät kokeiltiin järjestyksessä: suora, pääosin suora, varaava, pääosin suora. Ohjaukset alkoivat kello 10:15, 11:30, 13:15 ja 14:20.



Kuva 2. Kuormienohjausvasteet 16.12.1996, kun vertailupäivän 8.1.1997 tehot on vähennetty; neljää eri ryhmää ohjattiin (0 ei ohjausta, 1 teho ohjattu pois).

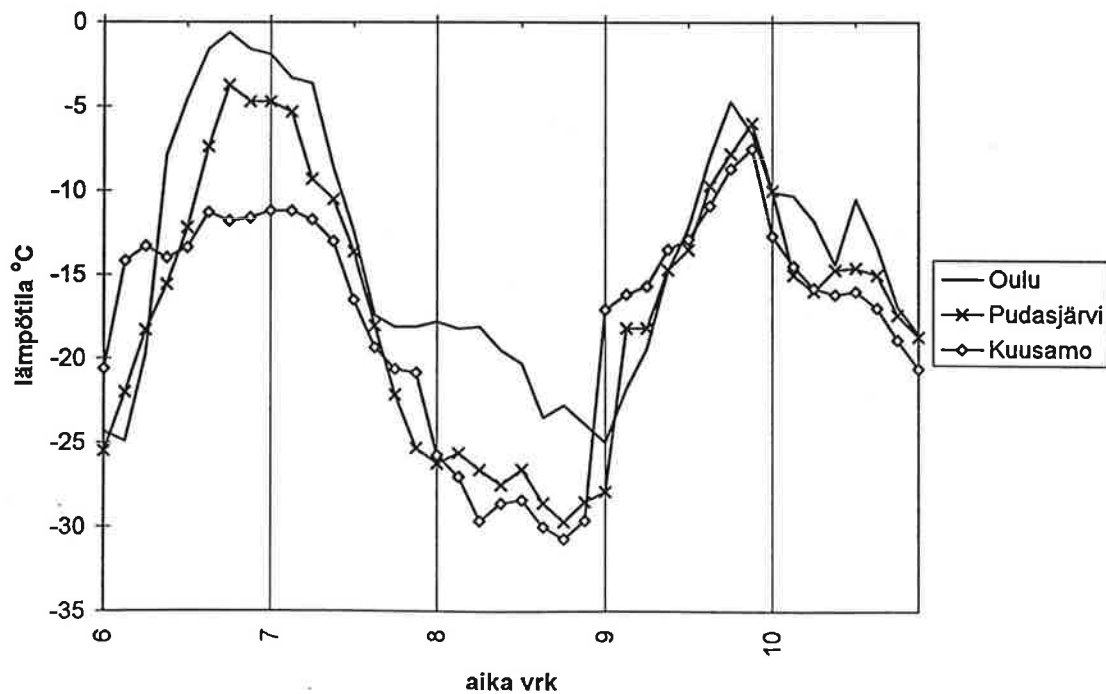


Kuva 3. Kymmenen ryhmäohjauksen sekvenssin vasteet 24.12.1996 sähköasemittain; ohjaukset alkoivat 1 ryhmä 16:30, 6 ryhmää 16:40, 3 ryhmää uudestaan 18:40.

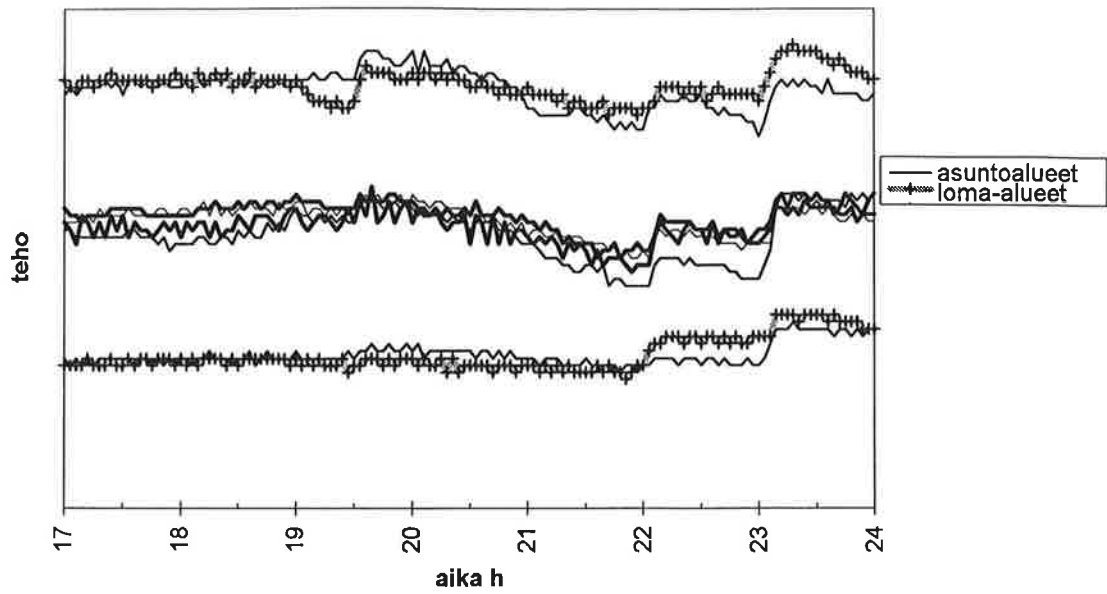


Kuva 4. Kuormienohjaussekvenssin vasteita 24.12.1996, kun naapurisähkölaitoksen vertailusähköasemien tehot on vähennetty.

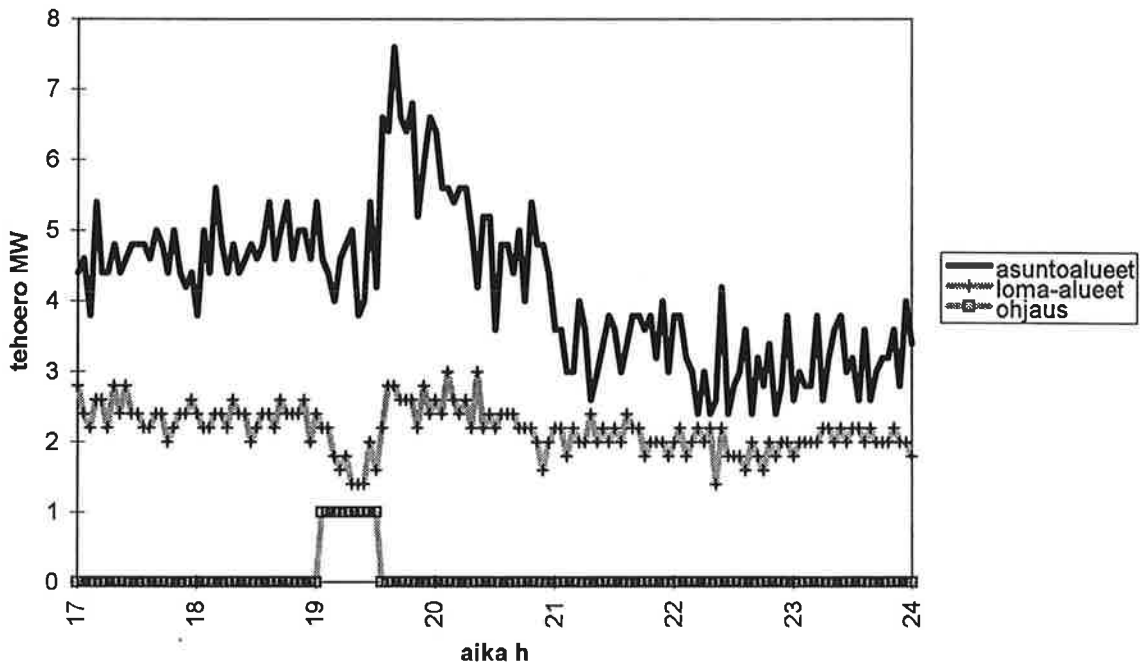
Kuusamossa. Kyseisen viikon arkipäivien lämpötilat näkyvät kuvassa 5. Mitatut tehot esitetään kuvassa 6 Koillis-Pohjanmaalta ja kuvassa 8 Oulun seudulta. Kuvassa 7 on esitetty kuvan 6 tehot vähennettynä vertailupäivän 16.12.1996 tehoilla. Kuvassa 9 on kuvan 8 tehoista vähennetty kahden saman viikon vertailupäivän keskiarvo. Kuvien 8 ja 9 kokeen aikana oli jostakin syystä järjestelmän kellonaika siirtynyt, ja tästä oli seurannut varaavan lämmityksen ennenaikaista kytkeytymistä ja poiskytkemistä kello 21 ja kello 22 välillä. Myös kuvassa 9 näkyvät varaajien päällekytketykset kello 22 jälkeen voimakkaasti. Tähän on ainakin kaksi syytä. Ensinnäkin koepäivä oli selvästi vertailupäiviä kylmempi ja toiseksi kellonaikojen tahdistus vertailupäiviin nähden on tavallista huonompi.



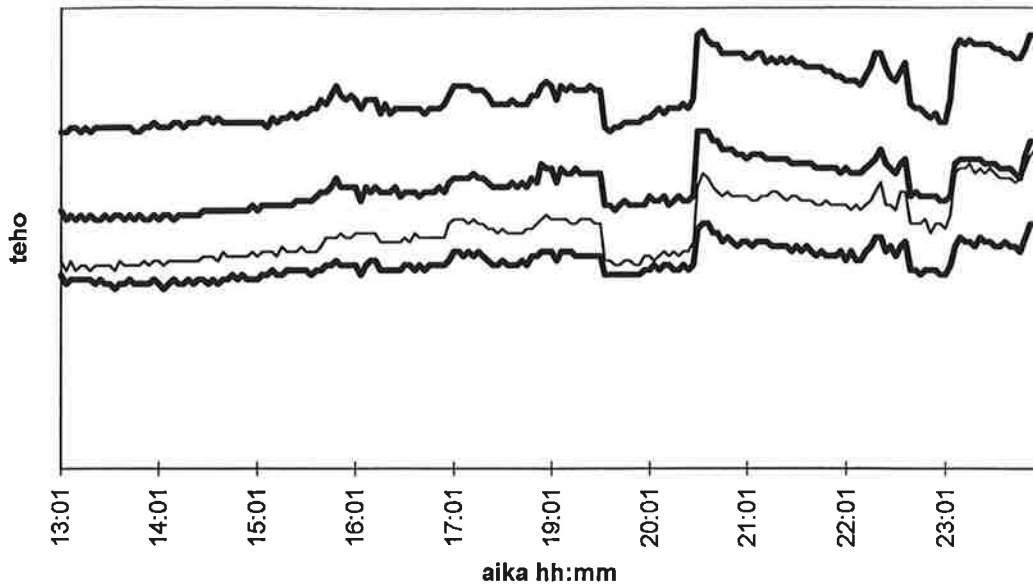
Kuva 5. Lämpötilat 6.1.1997 klo 00:00 - 10.1.1997 klo 24:00 (tiedot Ilmatieteen laitokselta).



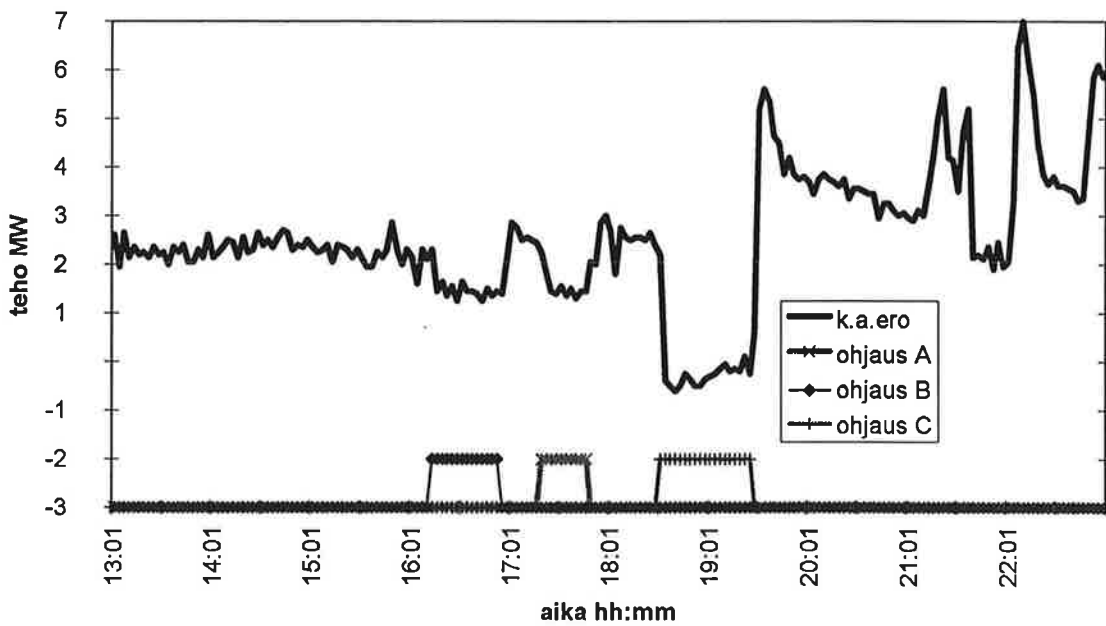
Kuva 6. Kuormanohjausvasteet 8.1.1997 sähköasemittain, pääosin varaavat ryhmät ohjattiin kello 19:00-19:30.



Kuva 7. Kuormienohjausvasteet 8.1.1997, kun vertailupäivän 16.12.1996 tehot on vähennetty; pääosin varaavat ryhmät (2 ryhmää) ohjattiin.



Kuva 8. Kuormanohjausvasteet 8.1.1997 sähköasemittain, ohjattiin kolmea ryhmää järjestyksessä B) suora keskivanha, A) suora vanha, C) uusi pääosin suora.



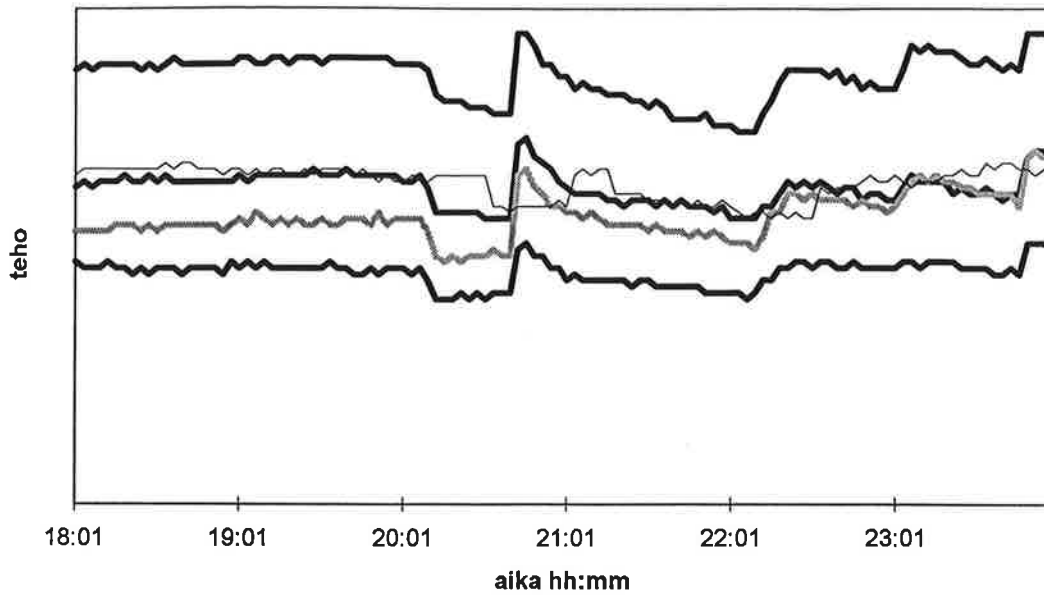
Kuva 9. Kuormienohjausvasteet 8.1.1997, kun kahden vertailupäivän keskiarvo on vähennetty; ryhmiä ohjattiin järjestyksessä: B) suora keskivanha, A) suora vanha, C) uusi pääosin suora sähkölämmitys.

24.1.1997 tehtiin yhden ryhmän koe. Lämpötila Oulussa oli noin -7°C . Tämä koe osoittautui korkeasta lämpötilasta huolimatta hyvin hyödylliseksi, koska sopivia vertailupäiviä löytyi ja kuormienohjauksen vaste saadaan selvästi esiin. Mitatut tehot näkyvät kuvassa 10. Kuvassa 11. on tehosta vähennetty kahden vertailupäivän keskiarvo.

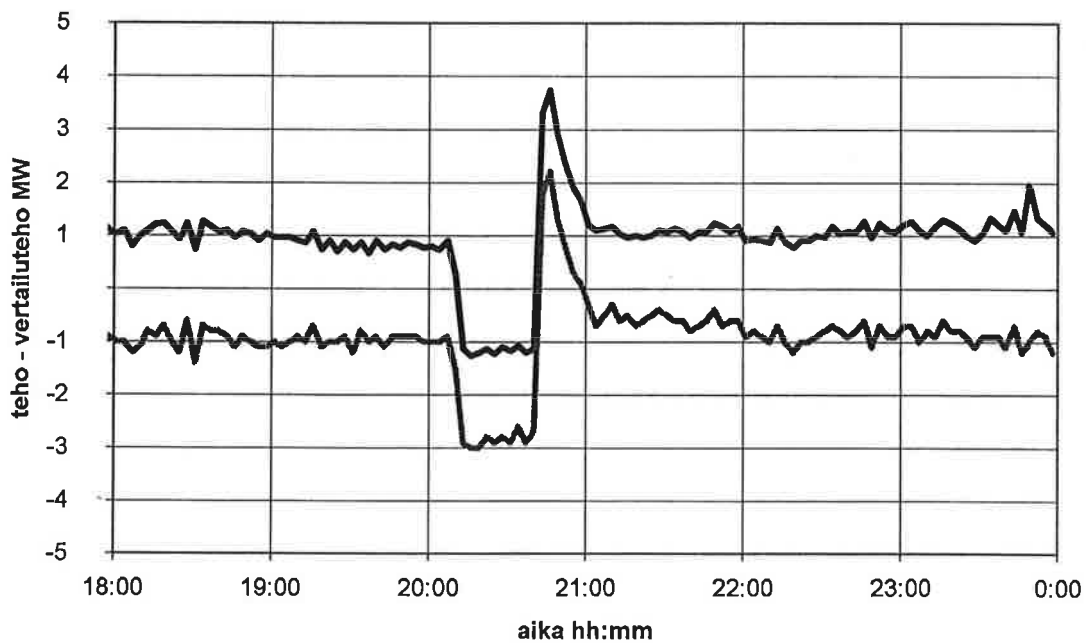
Koepäivien lisäksi talletettiin yleensä kolmen minuutin tehoarvot myös viereisiltä mahdollisilta vertailupäiviltä. Koko talven sähköasemittaisia tuntitehoja ja ilmatieteen laitokselta saadut paikkakuntakohtaiset säätiedot 3 tunnin välein olivat myös käytettävissä.

Kuudesta eri ohjattaviin ryhmiin kuuluneesta talosta mitattiin koejakson aikana sisälämpötilat. Tuloksista ei kuormien ohjauksen vaikutusta voi erottaa muista lämpötilan vaihteluista. Niiden mahdollisia syitä ovat ainakin takan käyttö, tuuletus, ruuanlaitto, saunominen sekä muut ihmisten toiminnot ja askareet, sillä taloissa asuttiin ja toimittiin mittausten aikana. Joissakin taloissa huoneilman lämpötilan vaihteluväli oli joskus jopa lähes 10°C ja korkeimmat lämpötilat havaittiin keskiyön tienoilla. Paremmalla lämmityksensäädöllä, kuten myötäkytkennöillä takan ja saunan lämpötiloista asumismukavuutta voitaisiin luultavasti parantaa ja samalla pienentää energian kulutusta illalla. Tämän asian tutkiminen ei kuulu tähän projektiin, jonka kannalta johtopäätös näistä vähistä huonelämpötilan mittauksista on, että kokeillut kuormienohjaukset eivät mitatuissa taloissa ole haitanneet asumismukavuutta.

Kuormanohjausryhmistä ja niille tehdyistä kokeista yhteenvetotaulukot ovat liitteessä C



Kuva 10. Yhden kuormanohjausryhmän vaste 24.1.1997 sähköasemittain; kyseessä on pääosin suora sähkölämmitys ja ulkolämpötila oli -7°C .



Kuva 11. Kuormienohjausvasteet 24.1.1997 (ulkona -7°C), kun vertailupäivien tehot on vähennetty; alemmassa käyrässä on vähennetty edellinen sama viikonpäivä (perjantai) ja ylemmässä sen sekä toisen vertailupäivän keskiarvo, pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmä.

2.3 FYSIKAALINEN MALLI

Malli kuvaa rakennuksen lämpötaseita differentiaaliyhtälön avulla. Se sisältää lämmittimien, sisäilman, seinien, lämpöä varaavien massojen ja ulkoilman lämpötilojen vuorovaikutukset rakenteiden ja ilmanvaihdon kautta. Koska mallia on tarkoitus käyttää vasteiden ennustamiseen, se on vahvasti yksinkertaistettu verrattuna Haasen (1971, s. 49 - 56 sekä liitteet 19-20) simulointimalliin.

Differentiaaliyhtälömuotoinen malli on

$$\begin{aligned}C_1 \frac{dx_1}{dt} &= -k_{12}(x_1 - x_2) + P \\C_2 \frac{dx_2}{dt} &= k_{12}(x_1 - x_2) \\&\quad + k_{23}(x_3 - x_2) \\&\quad + k_{24}(x_4 - x_2) \\&\quad + k_{2o}(T_{out} - x_2) \\C_3 \frac{dx_3}{dt} &= k_{23}(x_2 - x_3) \\&\quad + k_{3o}(T_{out} - x_3) \\C_4 \frac{dx_4}{dt} &= k_{24}(x_2 - x_4)\end{aligned}\tag{1}$$

missä

t	aika
$x_1(t)$	lämmityselementin lämpötila
$x_2(t)$	rakennuksen sisälämpötila
$x_3(t)$	lämpövaraston lämpötila
$x_4(t)$	seinän lämpötila
C_1, C_2, C_3, C_4	lämpötiloja vastaavat lämpökapasiteetit
$k_{12}, k_{23}, k_{24}, k_{20}, k_{30}$	lämmönsiirtokertoimia
$T_{out}(t)$	ulkolämpötila,

ja lämmitykseen käytetty sähköteho $P(t)$ määräytyy PI-säätimen avulla sisälämpötilan erosuureesta ja kuormanohjaussignaalista $u(t) = 0$ tai 1.

$$\begin{aligned} P(t) &= f_{PI}(T_{set} - x_2(t)) u(t) \\ 0 &\leq P(t) \leq P_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Todellisissa rakennuksissa on yleisin sellainen termostaattiohjattu säätö, joka kytkee lämmitystä päälle ja pois joko kokonaan tai isoin askelin. Sellainen säätö on liian nykivä käytettäväksi sellaisenaan mallissa, joka kuvaa suuren kohtalaisen

epähomogeenisen talojoukon käyttäytymistä. Useimmiten jo yksittäisten huoneiden termostaattisäätöiset kulutukset risteilevät niin paljon keskenään, että koko rakennuksen kulutuksessa ei enää erotu termostaattisäädölle tyypilliset heilahtelut.

Mallin parametrien lukumäärä on siis säätimen parametrit mukaan lukien 11. Kun mallissa on näin paljon parametreja se oletettavasti sovittuu hyvin mutta ennustamiskyky voi olla huono. Malli on kuitenkin pyritty laatimaan niin, että sen rakenne kattaa kaikkien kyseeseen tulevien rakennustyyppien keskeisimmät fysikaaliset ominaisuudet. Näin parametrien sallitulle alueelle on mahdollista asettaa tiukemmat rajat ennakkotietojen perusteella. Mahdollisia poistettavia tai kiinnitettäviä parametreja ovat periaatteessa C_4 ja k_{24} sillä suoran sähkölämmityksen elementin lämmönvarauskyky on useimmiten suuruusluokaltaan käytännössä merkityksetön. Joko ne tai viive tarvitaan kuitenkin vapaana parametrina, jotta mittauksen ja ohjauksen ajoituksen epätarkkuus ei aiheuta muiden parametrien huomattavaa vääristymistä.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D5 (1985) perusteella voidaan monille mallin parametreille määritellä alkuarvot sekä arvioida järkevyyserajat. On kuitenkin syytä muistaa, että malli (1) ei sisällä lämmön johtumista maahan ja lämpimän käyttöveden valmistusta. Lämmöntuoton hyötysuhteeksi on mallissa (1) oletettu 100% vaikka todellisuudessa se lienee talvella noin 90% ja kesällä hieman pienempi. Rakentamismääräyskokoelman mukaan maahan johtuu maavaraisten alapohjan kautta noin 5 W/m^2 (sisälämpötilasta, joka on yli 17°C) eli merkittävä teho. Mallin parametrien ei siis voi olettaa tarkkaan vastaavan todellisia.

Todellisessa rakennuksen säätimessä voi olla myötäkylä ulkolämpötilasta. Tätä malli ei ota huomioon. Malli ei siis välttämättä kerro oikein ulkolämpötilan muutoksien vaikutusta lämmitystehoon. Nyt tehdyissä kokeissa malliin ei ole

annettu syöttötietona simulointijakson aikana muuttuvaa ulkolämpötilaa. Yhtenä syynä tähän on lämpötilatiedot ovat kolman tunnin välein ja toisena se, että ensin saattaa olla aiheellista lisätä malliin (1) lämmön johtuminen maahan (1):

$$P_m = k_{2m} (T_m - x_2) \quad (3)$$

missä P_m on lämpöteho maan ja rakennuksen välillä, T_m on maan lämpötila, joksi oletetaan alueen vuotuinen keskilämpötila $+ 2^\circ\text{C}$ ja k_{2m} on lämmön siirtyvyyttä kuvaava kerroin.

Mallin (1) termi $k_{2o} (T_{out} - x_2)$ kuvaa ilmanvaihdon ja vuotoilman aiheuttamaa lämmönsiirtoa ulkolämpötilan ja sisälämpötilan välillä. Liitteessä A on kaavio, joka havainnollistaa mallin rakennetta.

Samantapaista mallia olen käyttänyt aikaisemmin sähkölämmitetyn rakennuksen hintaohjauksen optimointiin, kun tarkastelin sitä aihetta simuloinein (Koponen 1996). Kyseinen malli on hieman yksityiskohtaisempi, mutta ei sisällä mallin (1) lämpövarastoa x_3 eikä yhtälön (2) lämmönjohtumista maahan. Jompikumpi tai molemmat näistä piirteistä lienevät kuitenkin tarpeen myös hintaohjauksen optimoinnissa.

3 TULOSTEN TARKASTELU

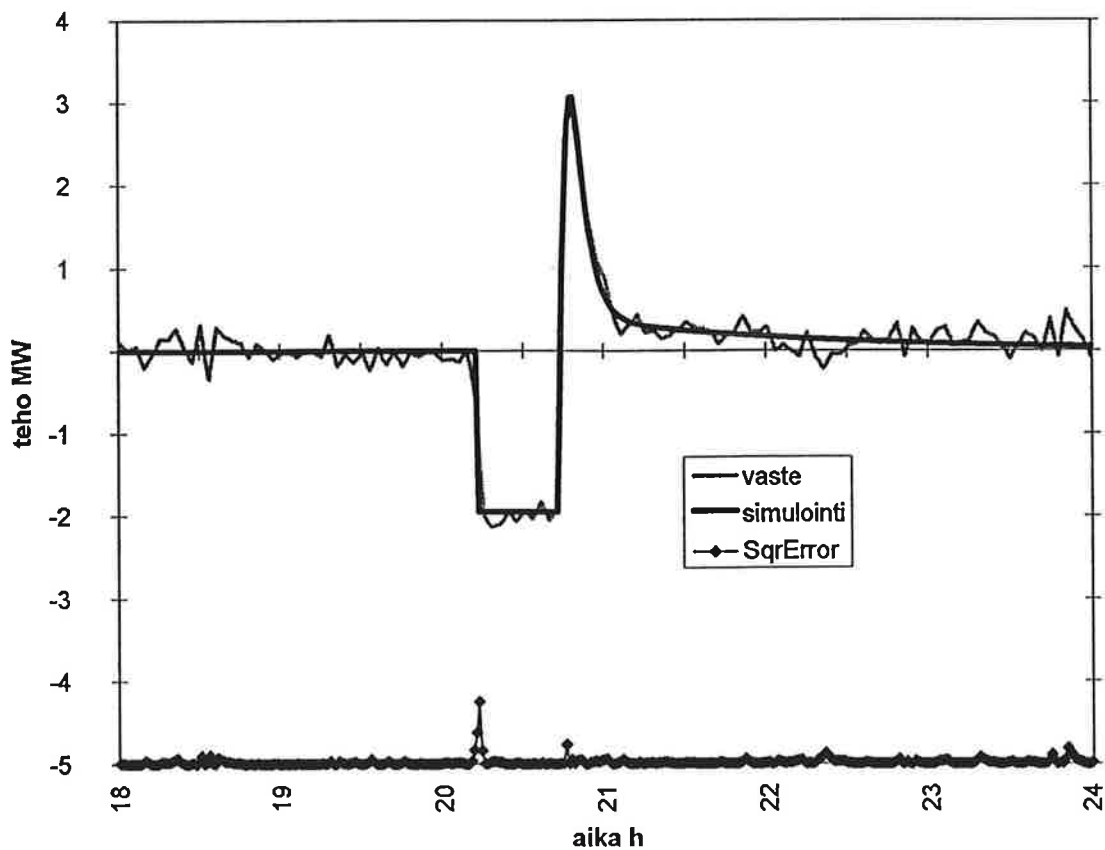
3.1 MALLIN SOVITUS KENTTÄKOETULOKSIIN

Malli (1,2) sovitettiin pienimmän neliösumman kriteerillä kenttäkokeissa mitattuihin vasteisiin. Sovitus tehtiin epälineaarisen rajoitetun optimoinnin ohjelmalla joka sisältyy Excel- taulukkolaskinohjelmaan. Järkevyysrajoitukset parametrien arvoille olivat tarpeen. Silti eri lähtöpisteistä saatiin usein eri ratkaisuja, jotka yleensä olivat kaikki kohtalaisen hyviä. Paras saatu ratkaisu valittiin. Myös ratkaisujen mielekkyyttä sekä suurimpien sovituserrojen sijaintia tarkkailtiin. Yksittäisen ryhmän vasteen sovitusta ei vaatinut kohtuuttomasti aikaa. Sensijaan useiden ryhmien saman päivän aikana tehtyjen ohjausten sovittaminen kasvatti sovitettavien parametrien määrää ja vaati usean päivän sovittamisen samalla kertaa. Seurauksena oli, että yksittäinen optimointiohjelman ajo kesti tyypillisesti useita tunteja NT-työasemalla. Tämän johdosta näissä tapauksissa jouduttiin tinkimään lähtöpisteiden määrän ja tulosten herkkyydentarkastelun laajuudessa. Eniten ohjausryhmiä käsittänyttä koetta ei edes yritetty sovittaa.

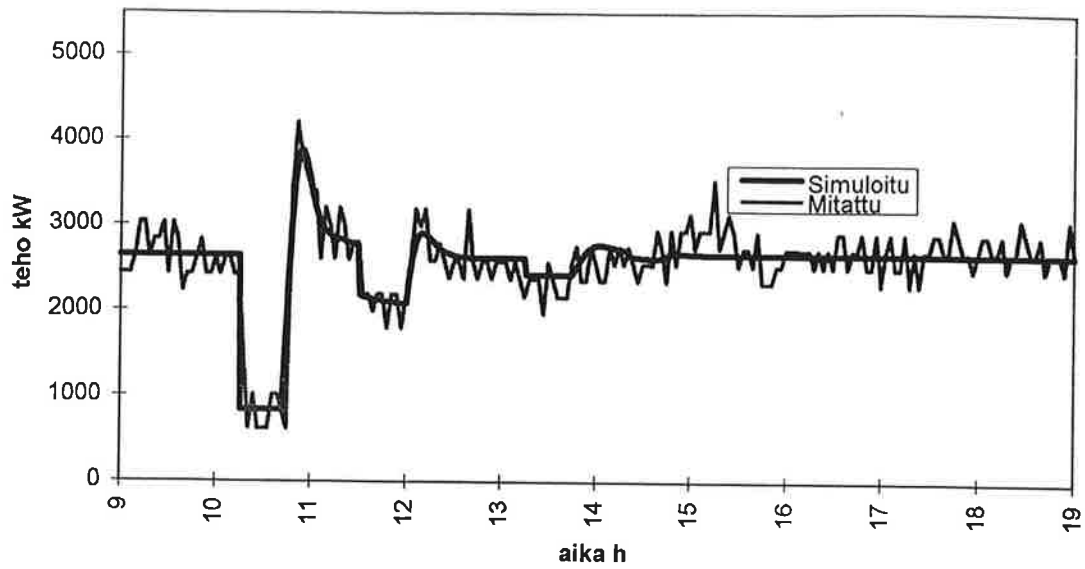
Kuvassa 12. nähdään että malli sovituu hyvin 24.1.1997 tehdyn kenttäkokeen tuloksiin. Kuvissa 13. ja 14. on vastaavasti esitetty miten malli sovituu yhtäaikaan sekä 16.12.1996 ja 8.1.1997 tehtyihin kenttäkokeisiin loma-asutusalueilla ja kuvissa 15. ja 16. tavallisilla sähköasemilla. Kuvien 13 ja 14 tapauksessa ilmeni, että sovituserro keskittyi 8.1.1997 tehdyn kokeen häntään. Syyksi osoittautui ainakin se, että ulkolämpötila oli kyseisenä aikana alkanut nopeasti kohota mutta mallin syöttötiedoissa ulkolämpötila oli oletettu vakioiksi. Niinpä kyseinen alue jätettiin pois sovituksesta, jotta se ei vääristä mallin parametrien arvoja.

Liitteessä B on kuvan 12 sovituksessa saadut parametriarvot ohjausyksikköä eli taloa kohti laskettuna. Tarkaa tietoa ohjattavien yksiköiden lukumäärästä tarkastelussa mukana olevien sähköasemien alueella ei ollut.

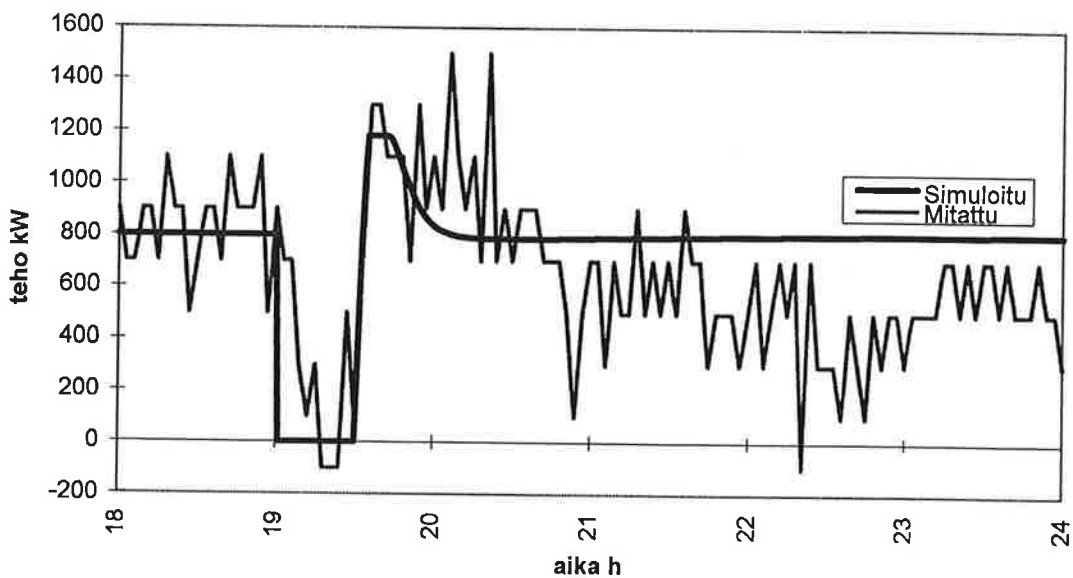
Kokeet kannattaisi siis tehdä yksittäisille ryhmille ja sovitettavien parametrien määrä tulisi pitää mahdollisimman pienenä. Nyt sovitukset kuitenkin tehtiin kaikille parametreille, jotta mallin ja sen sovitusmenetelmän käyttökelpoisuudesta saataisiin käsitys.



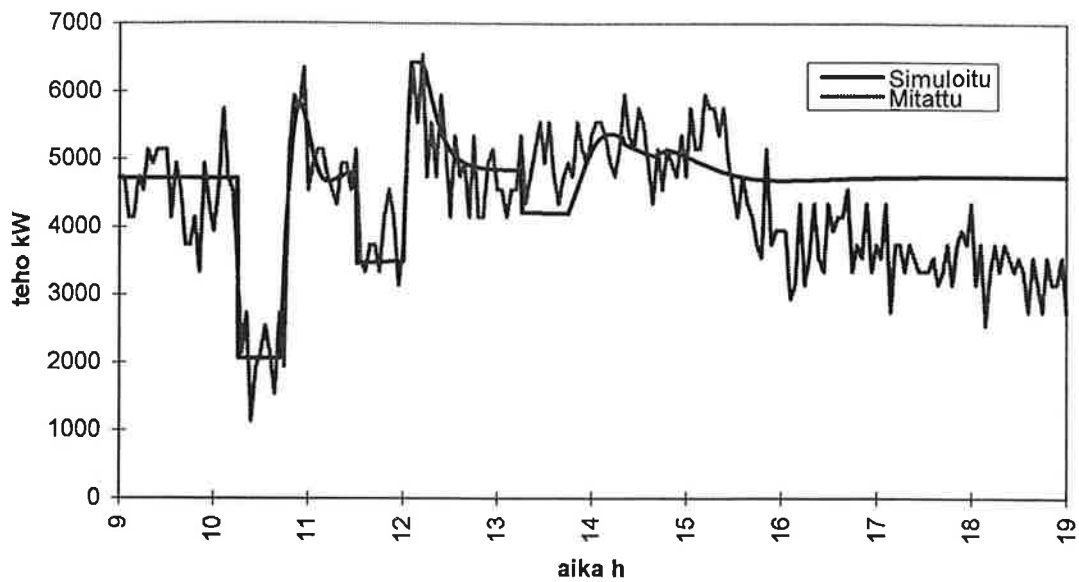
Kuva 12. Malli sovitettuna kuormanohjauskokeeseen 24.1.1997, jossa ulkona oli -7°C .



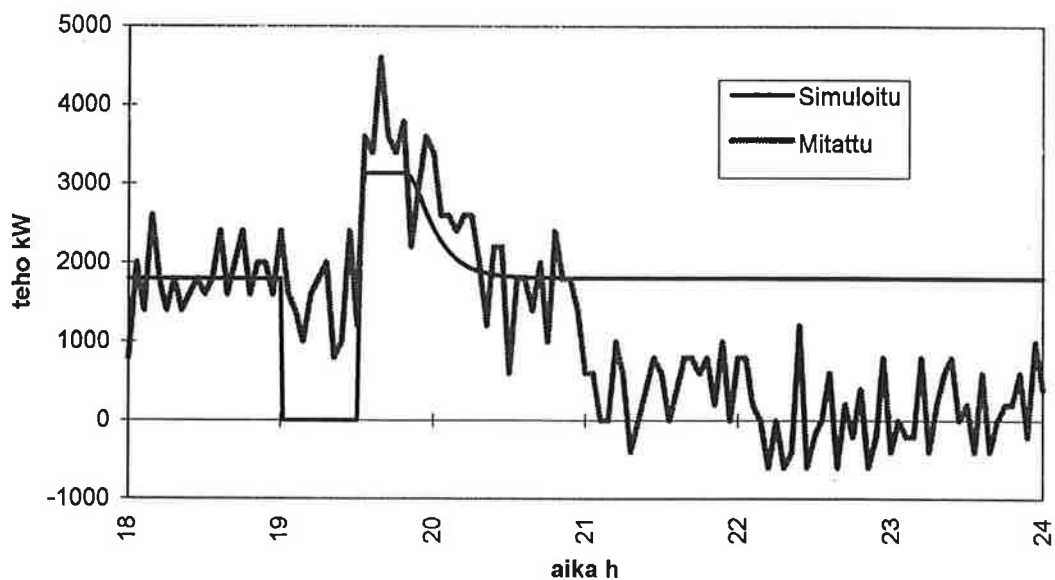
Kuva 13. Pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmien kuormanohjausvaste loma-alueilla 16.12.1996 sekä siihen ja 8.1.1997 kokeeseen sovitetun mallin vaste, 16.12.1996 lämpötila oli noin -19°C .



Kuva 14. Pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmien kuormanohjausvaste loma-alueilla 8.1.1997 sekä siihen ja 16.12.1996 kokeeseen sovitetun mallin vaste, 8.1.1997 lämpötila oli noin -29°C .



Kuva 15. Neljän eri ryhmän kuormanohjausvaste asunto-alueilla 16.12.1996 sekä siihen ja 8.1.1997 kokeeseen sovitetun mallin vaste, 16.12.1996 lämpötila oli noin -19°C , ryhmät vasemmalta alkaen, suora, pääosin suora, varaava, pääosin suora lämmitys.

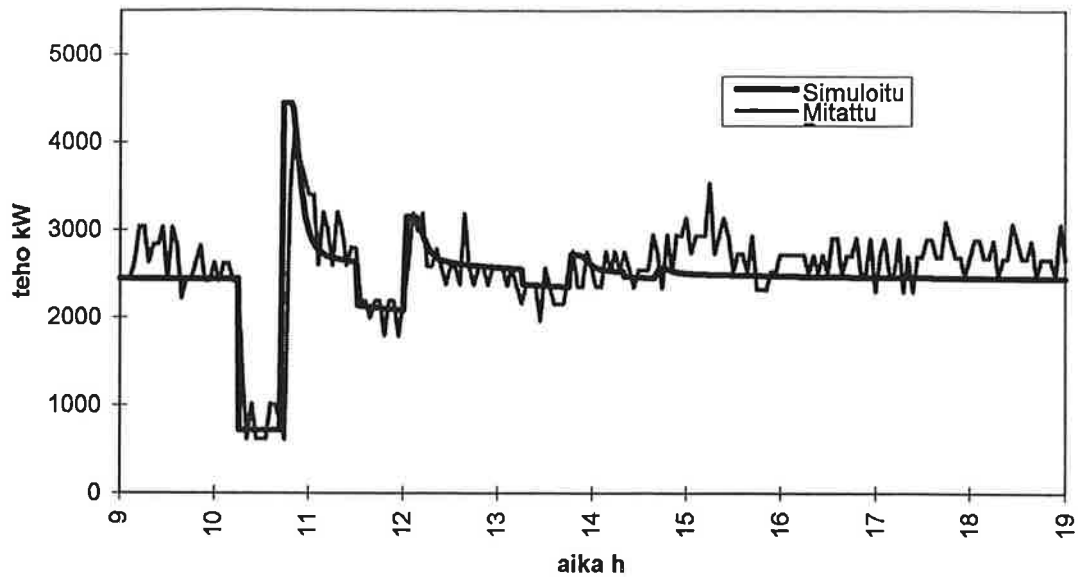


Kuva 16. Pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmien kuormanohjausvaste asunto-alueilla 8.1.1997 sekä siihen ja 16.12.1996 kokeeseen sovitetun mallin vaste 8.1.1997 lämpötila oli noin -29°C .

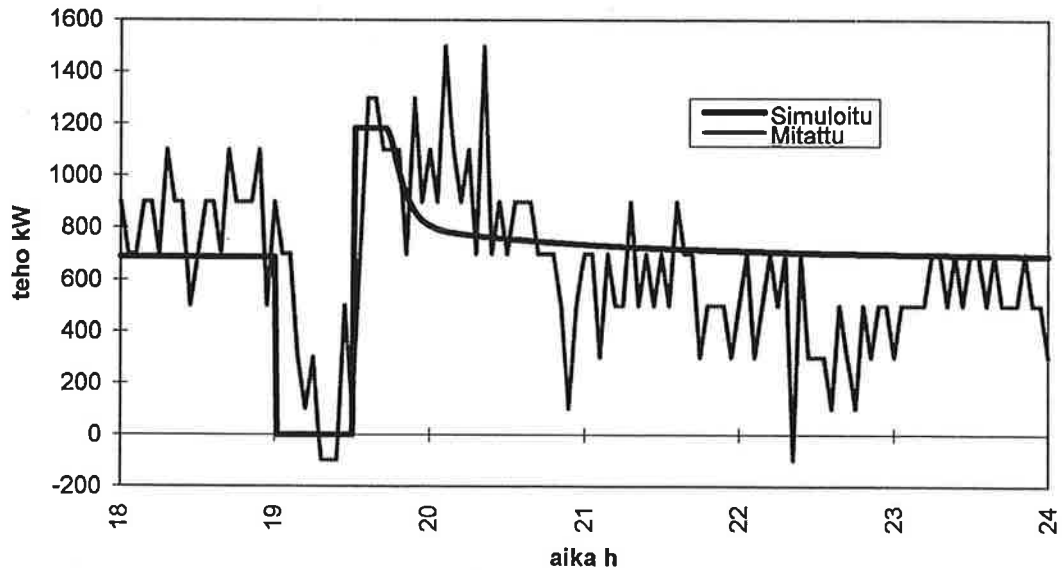
3.2 MALLIN KYKY ENNUSTAA

Tässä luvussa tarkastellaan sitä, miten hyvin malli on kyennyt ennustamaan kuormanohjauksen vasteita. Sensijaan tässä luvussa ei käsitellä sähkölämmityskuormien lämpötilariippuvuuden ennustamista, vaikka ehdotettua mallia on mahdollista käyttää myös siihen.

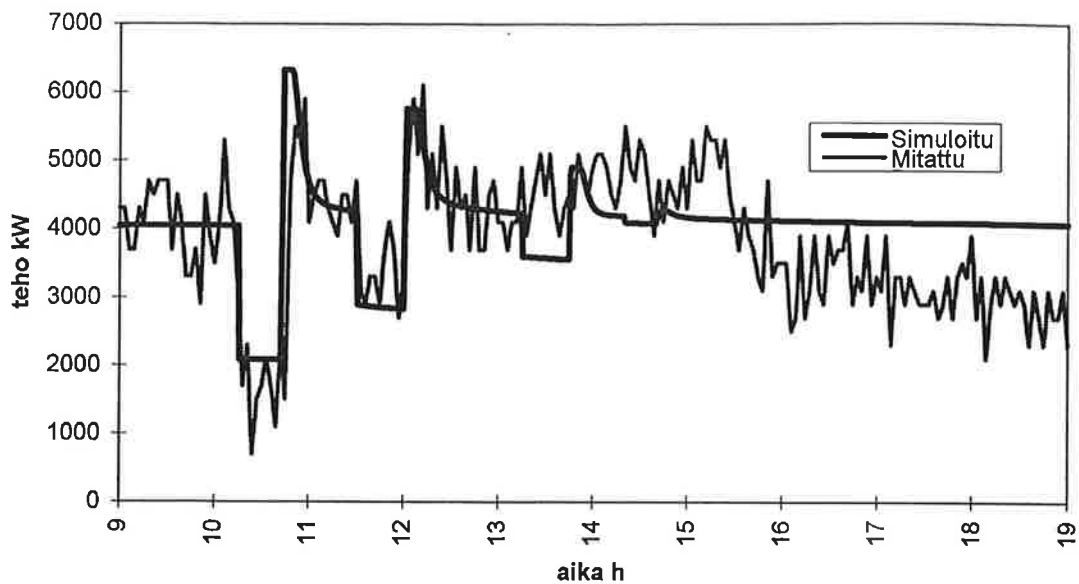
Kuvissa 17, 18, 19 ja 20 näkyy miten hyvin $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa 24.1.1997 mitattuun vasteeseen sovitettu malli tehoilla normeerattuna olisi ennustanut ohjausten vaikutukset noin $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen lämpötiloissa naapurisähkölaitoksella tehdyissä kenttäkokeissa. Kuvat 17 ja 18 edustavat niitä sähköasemia, joiden alueella on pääasiassa loma-asuntoja ja kuvat 19 ja 20 niitä joissa kuorma on pääosin sähkölämmitteisiä asuntoja. Simulointimalli edustaa uusia pääosin suoran sähkölämmityksen taloja, kuten myös kuvien 17 ja 19 toinen ja viimeinen ohjaus sekä kuvien 18 ja 20 ohjaus. Kuvien 17 ja 19 ensimmäinen ohjaus edustaa uusia suoran sähkölämmityksen taloja ja kolmas varaavia taloja. Kun varauksen lämpökapasiteettia kuvaavia parametreja kyseisten ohjausten simulointimalleissa muutettiin tuon tiedon perusteella, niin kyseisten ohjausten simuloitua jälkihuiput muuttuivat lähemmäksi mitattuja. Kuvassa 20 mitattu ja simuloitu vaste poikkeavat huomattavasti toisistaan, lukuunottamatta tehonmuutosta ohjauksen päättyessä. Erojen syynä lienee ainakin se, että ohjaus on tehty saunomisaikaan. Lisäksi kuvissa 19 ja 20 teho alkaa pudota mittausjakson loppua kohti. Syynä tähän on se, että 8.1.1997 lämpötila alkoi nopeasti kohota illalla.



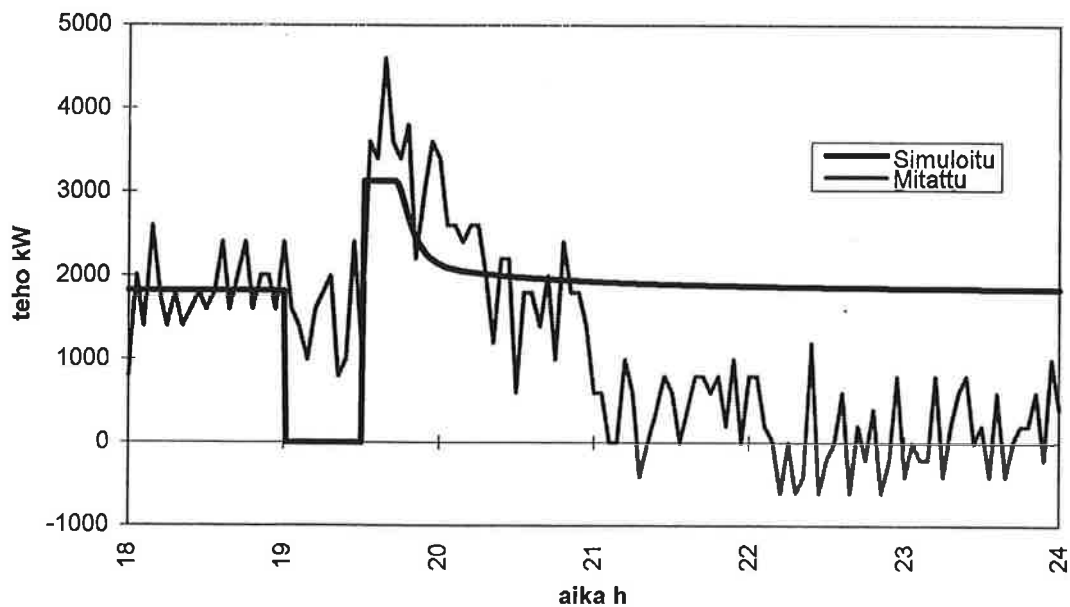
Kuva 17. Neljän eri ryhmän kuormanohjausvaste loma-alueilla 16.12.1996 ja simulointi pääosin suoran sähkölämmityksen vasteeseen 24.1.1997 sovitetulla normeeratulla mallilla (ryhmät vasemmalta alkaen, suora, pääosin suora, varaava, pääosin suora), lämpötila 24.1.1997 oli noin -7°C ja 16.12.1996 noin -19°C .



Kuva 18. Pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmien kuormanohjausvaste loma-alueilla 8.1.1997 sekä 24.1.1996 kokeeseen sovitetun normeeratun mallin vaste, lämpötila 24.1.1997 oli noin -7°C ja 8.1.1997 noin -29°C .



Kuva 19. Neljän eri ryhmän kuormanohjausvasteet 16.12.1996 ja simulointi pääosin suoran sähkölämmityksen vasteeseen eri laitoksessa 24.1.1997 sovitetulla normeeratulla mallilla (ryhmät vasemmalta alkaen: suora, pääosin suora, varaava, pääosin suora) lämpötila 24.1.1997 oli noin -7°C ja 16.12.1996 noin -19°C .

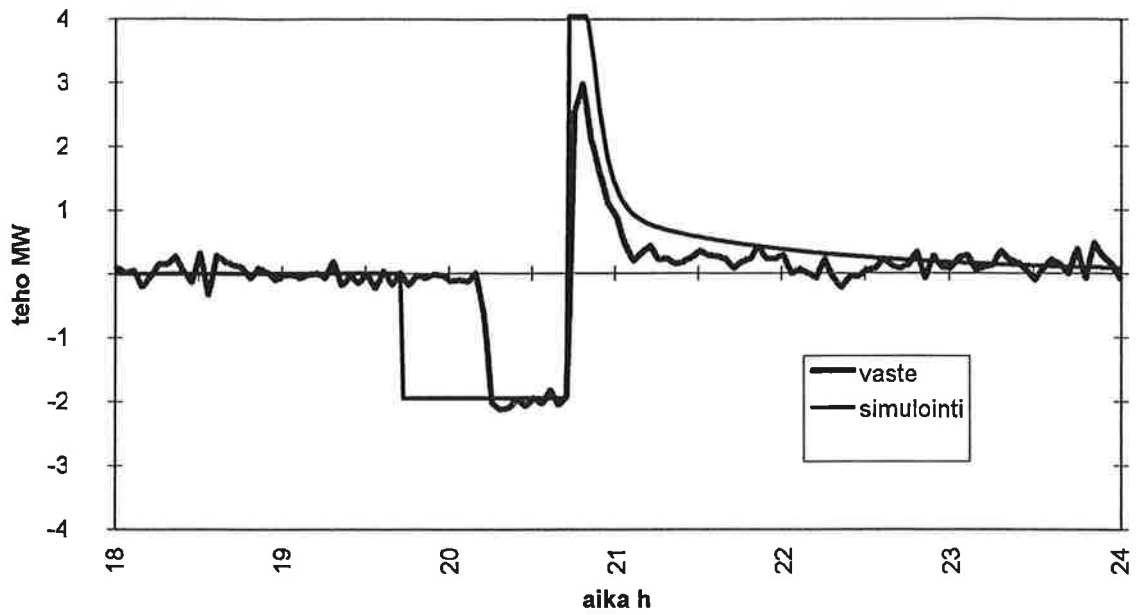


Kuva 20. Pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmien kuormanohjausvaste 8.1.1997 sekä eri sähkölaitoksen vastaavan ryhmän 24.1.1996 kokeeseen sovitetun normeeratun mallin vaste, lämpötila 24.1.1997 oli n. -7°C ja 8.1.1997 n. -29°C .

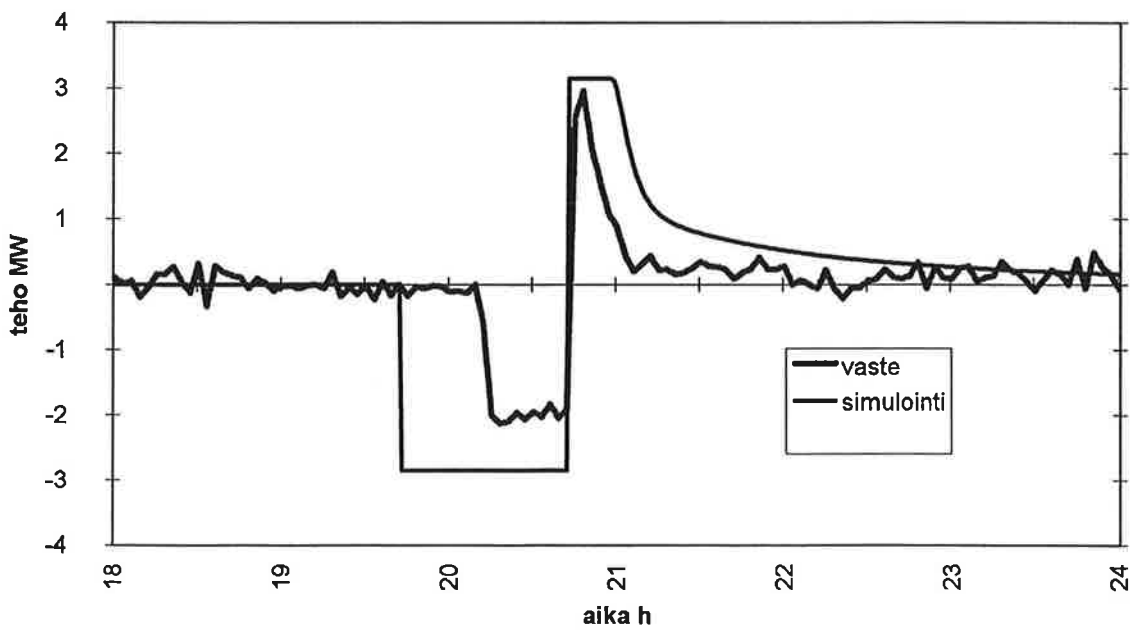
3.3 MALLIN LÄMPÖTILARIIPPUUUS

Laadittu malli, yhtälöt (1) ja (2), sisältää riippuvuuden ulkolämpötilasta. Mallille annetaan ohjausten lisäksi lähtötiedoksi lämpötila tai vaikkapa lämpötilaprofiili ja malli laskee vasteen. Edellä esitetyissä simuloinneissa on lähtötietona ollut ainoastaan koeajankohdan arvioitu keskimääräinen lämpötila. Lämpötilaprofiilia ei ole käytetty, koska mahdolliset myötäkytkennät ulkolämpötilasta rakennuksien lämpötilan säätöön puuttuvat mallista. Kuvissa 21, 22, 23 ja 24 esitetään miten mallin antama vaste muuttuu syöttötietona annettavan ulkolämpötilan vaikutuksesta. Kuten pitääkin, kylmemmässä pois ohjattava teho on suurempi ja jälkihuiipun korkeus rajoittuu lämmittimien maksimitehoon. Nämä pidentävät jälkihuiipun kestoa ja kasvattavat huiipun jälkeistä lisäkulutusta. Mainituissa kuvissa malli on edustanut pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmää neljän sähköaseman osalta. Kaikkiaan kyseisessä ryhmässä on viiden sähköaseman alueella 2465 taloa joiden kunkin lämmittimien maksimiteho on arvioitu 3,5 kW suuruiseksi. Tämän perusteella on arvioitu, että jäljelle jääneillä neljällä sähköasemalla taloja oli noin 1972 ja niiden yhteinen ohjattava maksimiteho oli noin 6,9 MW. Kyseisen ryhmän ohjaukseen vasteessa havaittiin 5,7 MW maksimitehomuutos ohjauksen päättyessä. Kaikissa kuvissa tällä ryhmällä mallin maksimitehona on 6 MW.

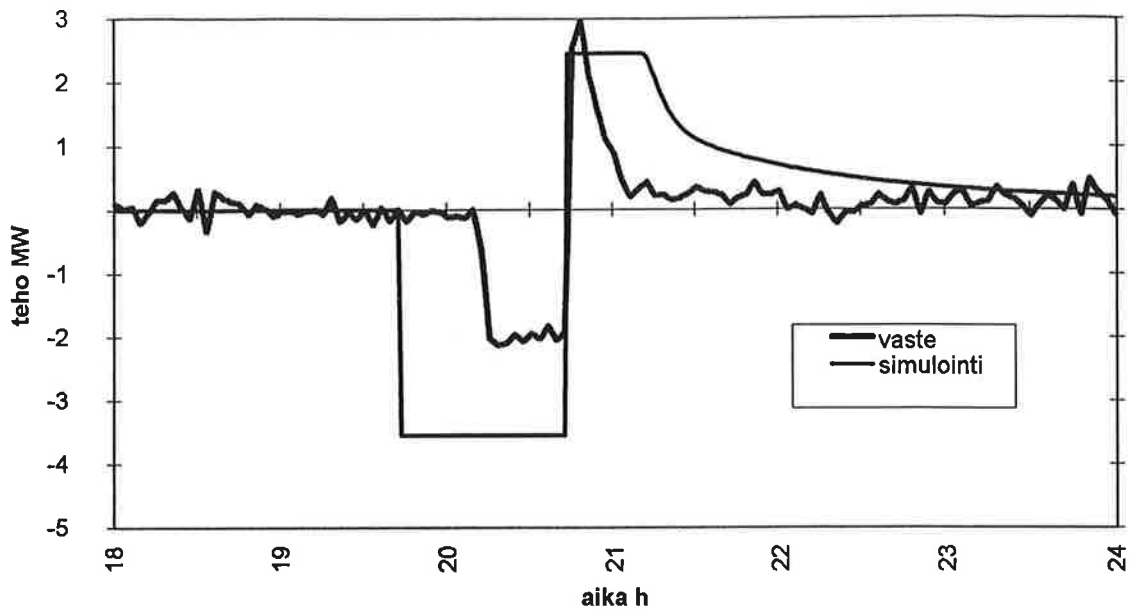
Kuvassa 25 puolestaan näkyy saman ryhmän mallin askelvaste ulkolämpötilasta T_{out} lämmitystehoon. Tasapainotilan lämpötilariippuvuudeksi mallilla tulee $P = 1,46 \text{ MW} - T_{out} 0,07 \text{ MW}/^{\circ}\text{C}$ eli karkeasti arvioiden taloa kohti noin $P = 0,74 \text{ kW} - T_{out} 36 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$.



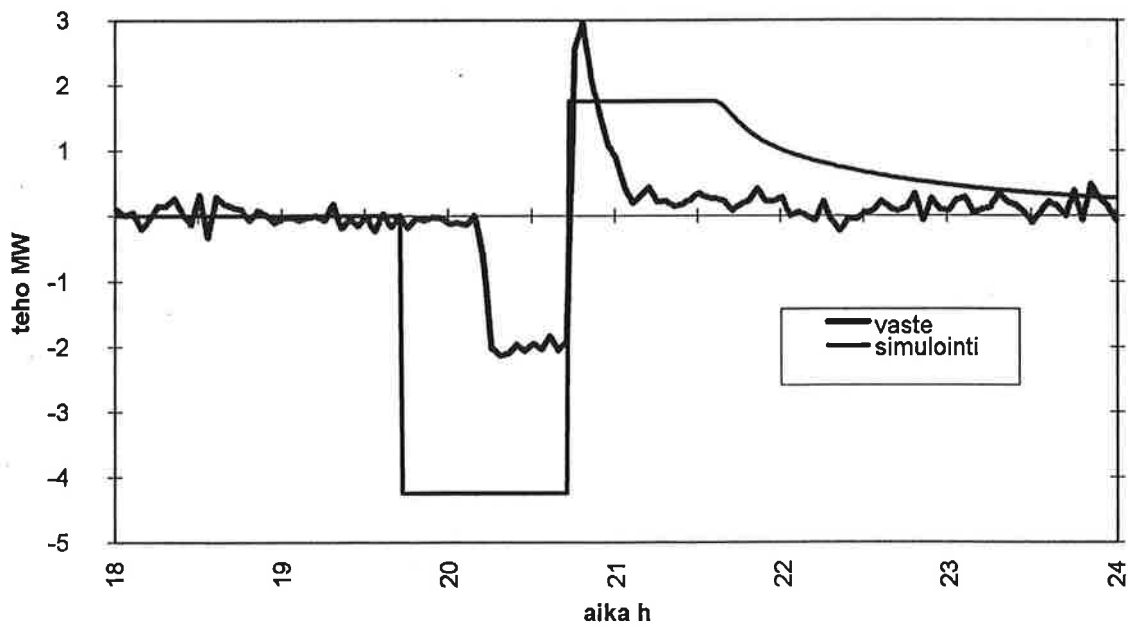
Kuva 21. Simulointi kuvan vasteeseen (24.1.1997 ulkona -7°C) sovitetulla mallilla, kun simuloinnissa ohjauksen kesto on lisätty tuntiin ja ulkolämpötila on -7°C .



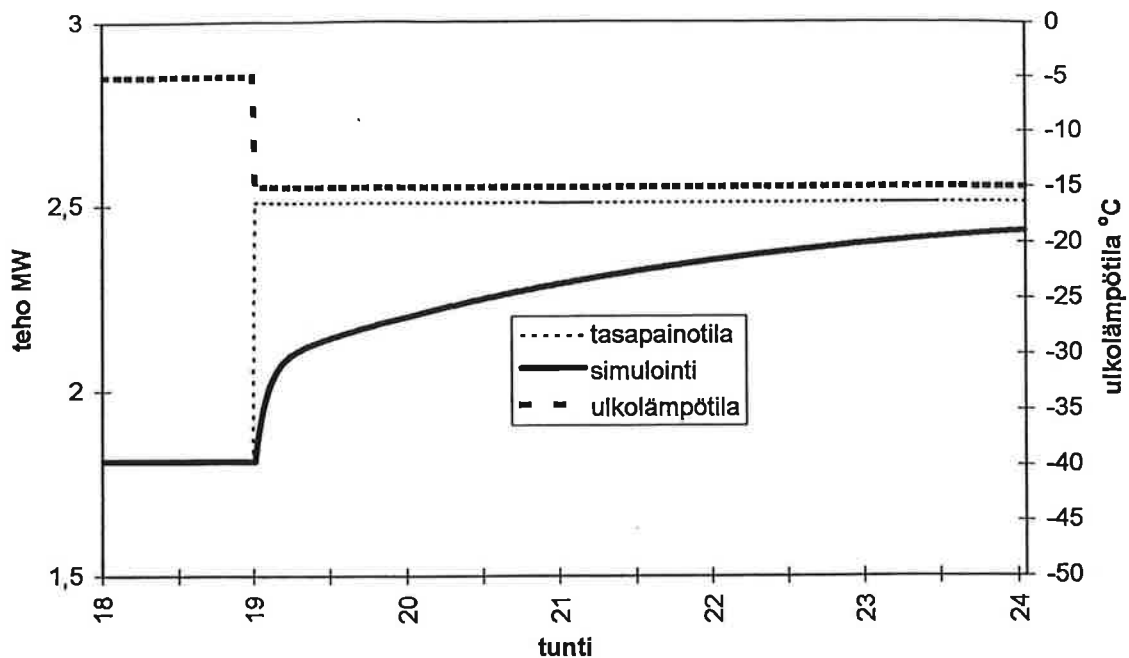
Kuva 22. Simulointi kuvan vasteeseen (24.1.1997 ulkona -7°C) sovitetulla mallilla, kun simuloinnissa ohjauksen kesto on lisätty tuntiin ja ulkolämpötila on -20°C .



Kuva 23. Simulointi kuvan vasteeseen (24.1.1997 ulkona -7°C) sovitetulla mallilla, kun simuloinnissa ohjauksen kesto on lisätty tuntiin ja ulkolämpötila on -30°C .



Kuva 24. Simulointi kuvan vasteeseen (24.1.1997 ulkona -7°C) sovitetulla mallilla, kun simuloinnissa ohjauksen kesto on lisätty tuntiin ja ulkolämpötila on -40°C .



Kuva 25. Sovitetun mallin tyypillinen vaste ulkolämpötilaan, pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmä.

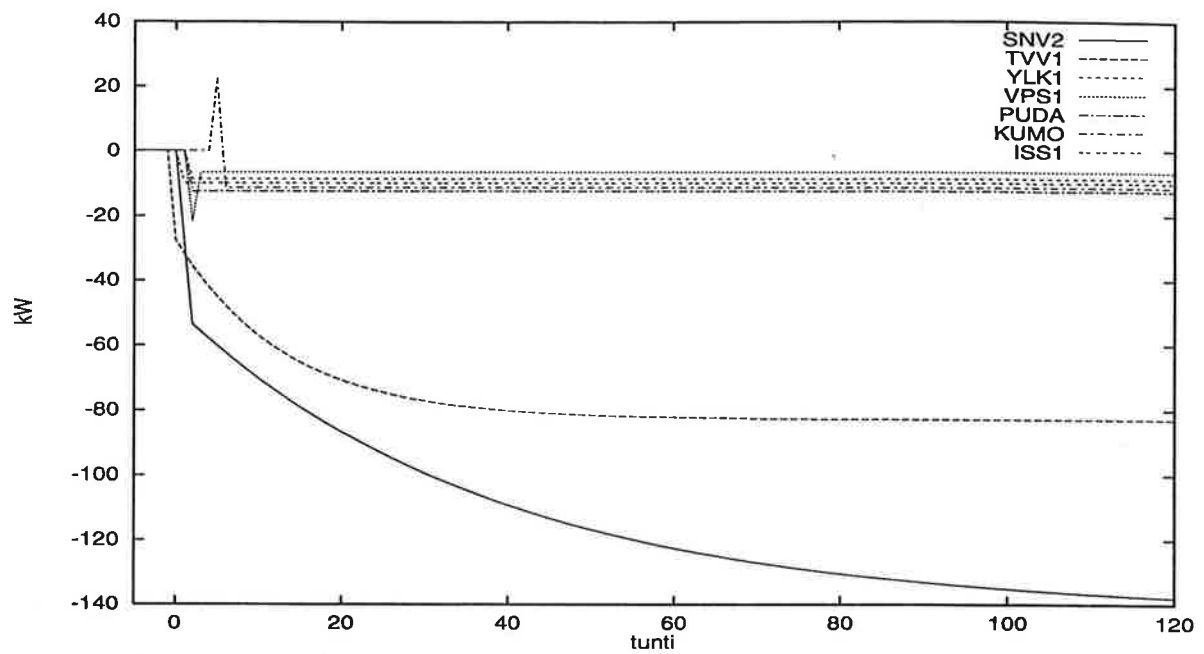
Koska malli on sovitettu vasteesta vain sille osalle, joka vielä erottuu häiriöistä, eli muutamalle ensimmäiselle tunnille, se varmaankin aliarvioi mahdollisten pitkäaikaisten lämpövarastojen suuruuden ja näinollen myös tasapainotilan lämpötilariippuvuuden. Kuormien ohjauksen vasteiden ennustuksessa tästä ei liene merkittävää haittaa edes varaavan lämmityksen ryhmässä. Sähkölämmityskuorman ulkolämpötilariippuvuuden ennustus mallilla vaatii sensijaan oikeamman arvion pitkäaikaisista lämpövarastoista. Jos ne halutaan varmemmin oikein, pitää sovitusta tehdä useista pelkästään kyseiselle ryhmälle tehdyistä kokeista. Vaihtoehtoisesti voidaan selvittää tarkasteltavan ryhmän ominaisuudet muilla tavoin. Haapala ym. (1997) s. 19-20 ovat simuloineen määrittäneet pientalojen lämpenemisen ja jäähtymisen aikavakiot. Tapauksesta riippuen aikavakiot olivat 1 - 9 vuorokautta. Samalla tavoin kuormanohjauksen vasteen ennustusmallin pitkäaikaiset lämpövarastot voitaisiin määrittää tarkemmin kuin kuormienohjauksoikeista.

Rakennusten tehonkäytön riippuvuuteen ulkolämpötilasta voi aiheuttaa voimakasta epälinearisuutta se, että kovilla pakkasilla ilmanvaihtoa pienennetään. Jos tämä

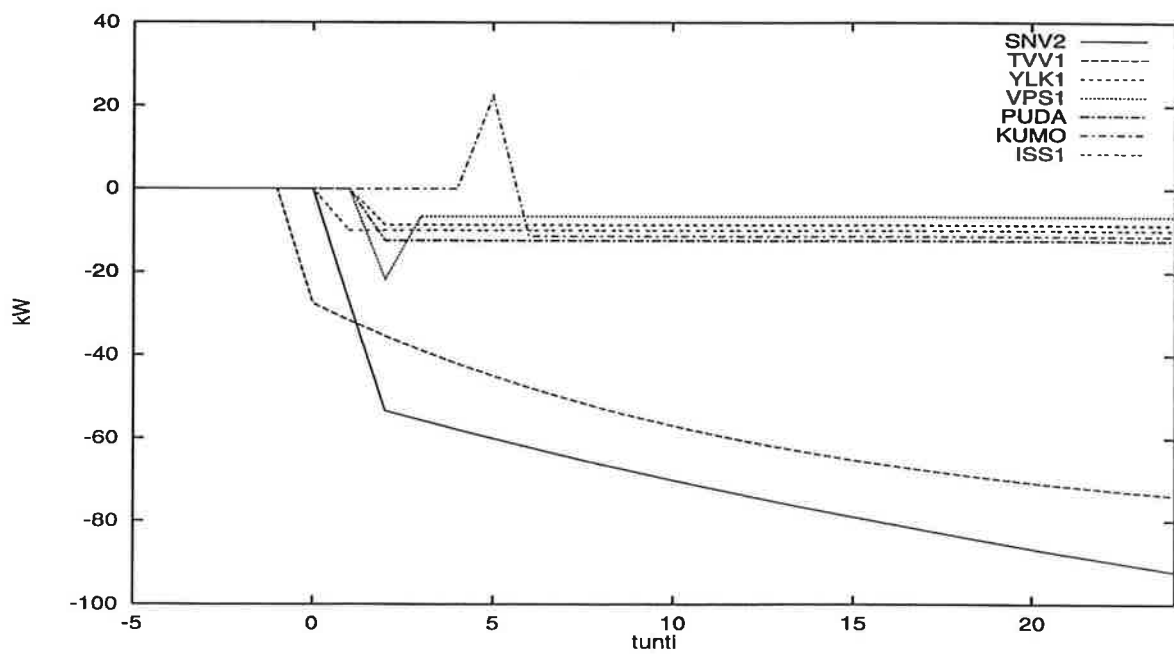
tehtäisiin useimmissa rakennuksissa suurinpiirtein samalla tavalla joka olisi tiedossa, niin mallissa voitaisiin lämpöhäviöitä suoraan ulkoilmaan eli kerrointa k_{20} vastaavasti päivittää.

Vertailun vuoksi tarkasteltiin ulkolämpötilan vaikutusta tehoon myös muilla tavoin. Koko talven sähköasemittaisista tuntitehoista ja Ilmatieteen laitokselta saaduista paikkakuntaakohtaisista 3 tunnin välein olevista lämpötiloista tehtiin aikasarja-analyysi. Näin saadut mallit olivat varsin epävarmoja ja poikkesivat toisistaan runsaasti kuten näkyy kuvissa 26 ja 27 esitetyistä sähköasemakohtaisista tehon vasteista 1°C lämpötilan nousuun. Talokohtaisia mittauksia toisesta varaavien uunien vaikutusta tutkivasta projektista viereisestä sähkölaitoksesta (Kainuussa) analysoimalla päädyttiin puolestaan eri taloissa (8 kpl) ulkolämpötilan vaikutukseen lämmitystehoon (toteutunut sähkölämmitysteho + takan korvaama sähkölämmitysteho) noin väleiltä $-20 - -40 \text{ W}^{\circ}\text{C}$, $-0,2 - -0,3 \text{ W}^{\circ}\text{Cm}^2$ ja $0,05 - 0,1 \text{ W}^{\circ}\text{Cm}^3$ sekä tyypillisen viiveen olleen 4 tuntia (pienin 0 ja suurin 12 tuntia). Kyseisissä kohteissa takkaa lämmitettiin pakkasten aikana runsaasti. Virtasen (1977, s. 31) Mäntsälässä, ulkolämpötiloissa välillä $0 - 22^{\circ}\text{C}$, tekemissä kokeissa suoran sähkölämmitystehon P riippuvuus ulkolämpötilasta T_{out} ja rakennuksen lämmitetystä asuntotilavuudesta V oli noin $P = V (8,5 \text{ Wm}^{-3} - T_{\text{out}} 0,46 \text{ W}^{\circ}\text{Cm}^3)$. Martikainen ym (1987, Osa II, s.30-39 ja liite 5) ovat analysoineet koeaineistostaan sitä, miten ulkolämpötilan vaikuttaa tehoon. Niiden väliseksi viiveeksi he ovat saaneet 2 - 6 tuntia kulloisestakin mittausaineistosta riippuen. Ohjattavissa olevan tehon riippuvuutta ulkolämpötiloissa he ovat tarkastelleet myös kohteittain. Talokohtaiseksi tehoksi oli saatu Nurmijärvellä noin $P = 1,8 \text{ kW} - T_{\text{out}} 63 \text{ W}^{\circ}\text{C}$ ja Jyvässeudulla noin $P = 0,9 \text{ kW} - T_{\text{out}} 53 \text{ W}^{\circ}\text{C}$.

Siirto (1989) on saanut suoran sähkölämmityksen ryhmän talojen koko sähköntarpeeksi noin $P = 2,57 \text{ kW} - T_{\text{out}} 87 \text{ W}^{\circ}\text{C}$ ja viiveeksi alku- ja keskitalvella 6 tuntia mutta keväällä vain 0 - 2 tuntia. Sähkölämmityksen lisäksi tähän koko sähköntarpeeseen sisältyy talon muukin kulutus. Osittain varaavalla ja varaavalla



Kuva 26. Sähköasemien tehojen vasteet ulkolämpötilan + 1 °C askeleeseen niillä siirtofunktioilla, jotka saatiin aikasarja analyysillä talven tuntitehoista ja 3 tunnin välein talletetuista lämpötiloista.



Kuva 27. Askelvasteiden alku kuvassa 26.

sähkölämmityksellä kulutuksen lämpötilariippuvuus on yöllä paljon suurempi kuin päivällä ja edellisen päivän lämpötila vaikuttaa huomattavasti. Keskimäärin lämpötilariippuvuus on karkeasti samaa suuruusluokkaa kuin suoran sähkölämmityksen taloillakin. Tulokset on saatu regressionalyysillä 1970-luvun lopulla rakennetuilla taloilla tehdyistä kuormitusmittauksista. Siirron (1989) mukaan sähkölämmityskuormalla lämpötilan laskiessa 1 °C kuorma kasvaa noin 4% suhteessa vuoden keskitehoon.

Sovitetun mallin tehon lämpötilariippuvuus vastaa siis kohtalaisen hyvin aikaisempien tutkimusten tuloksia. Mäntsälässä 1977 kulutus rakennustilavuutta kohti oli tosin noin 4 - 5 kertainen kaikissa lämpötiloissa. Erot ovat myös oikean suuntaisia siihen nähden mitä tiedetään rakennusten lämmöneristävyiden eroista rakennusajan ja -paikan suhteen sekä siitä, että sovitettu malli aliarvioi pitkäaikaiset lämpötilariippuvuudet.

3.4 SAATUJEN PARAMETRIARVOJEN JÄRKEVYYDEN ARVIOINTI

Vaikka mallin sovitetut parametrit eivät päätyisikään todellisiin arvoihin, malli voi silti kyetä ennustamaan varsin hyvin. Saatuja parametrien arvoja on kuitenkin syytä tarkastella. Yleensä muttei aina parametrien arvot ovat hyvin niiden vertailutietojen puitteissa, joita on ollut käytettävissä.

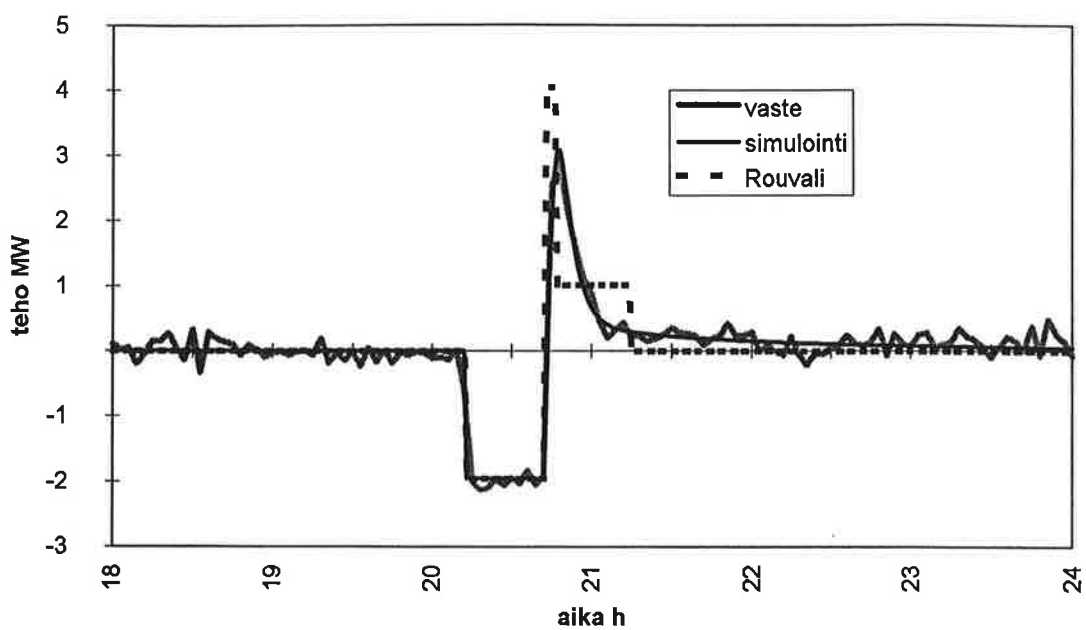
Parametri C_2 on ollut aina suuruudeltaan lähellä todellista rakennuksen sisäilman lämpökapasiteettia. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 (1985) perusteella arvioituihin ilmanvaihdon ja ilmavuotojen aiheuttamiin lämpöhäviöihin verrattuna ovat sovitetut parametrin arvot k_{20} pienehköjä, jos oletetaan että

poistoilmasta ei oteta lämpöä talteen. Lämmöntalteenotto on yleistymässä. Tosin sovitettaessa on toisinaan päädytty varsin hyviin paikallisiin optimeihin, joissa kyseinen parametri on selvästi suurempi. Toisaalta sovitetun mallin askelvaste ulkolämpötilasta tehoon, kuva 25, asettuu sivulla 7 kerrottuihin aikasarja-analyyseissa saatujen talokohtaisten ja sähköasemakohtaisten siirtofunktioiden väliin. Yhdessä tapauksessa on yhdelle ryhmälle saatu seinän lämpökapasiteetti C_4 mennyt maksimirajoitukseen eli arvon järkevyyden on kyseenalainen. Muutoin seinän lämpökapasiteetille saadut arvot ovat olleet todellista pienempiä.

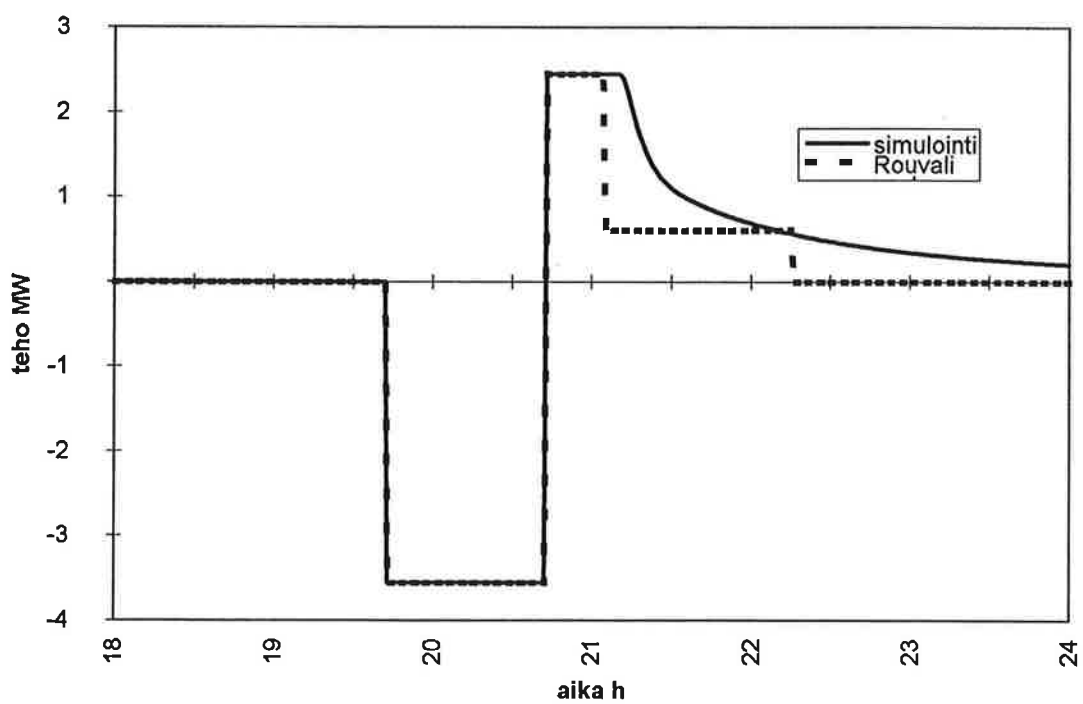
Kokeiden perusteella rakennusten suurinta lämmitystehoa kuvaava parametri on suurehko verrattuna rakentamismääräyskokoelmassa esitettyyn alueen mitoittavaan ulkolämpötilaan, $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lämmön johtavuutta kuvaaviin parametreihin. Mahdollisia syitä tähän ovat muuten muassa: 1) mallista (1) puuttuu tehohäviö lattian kautta maahan, 2) mitoittava arvo on minimivaatimus, 3) saatavissa olevien lämpöpattereiden mitoitus, 4) varsinkin Kuusamon olosuhteita ajatellen $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ on käytännössä liian pieni mitoituslämpötila, 5) lämmitystehon lievä ylimitoitus ja 6) kokeiden pieni määrä ja kokeita häirinneet tekijät.

3.5 FYSIKAALISEN MALLIN JA ASKELMALLIN VASTEIDEN VERTAILU

Fysikaalisen mallin ja Rouvalin (1993) esittämän askelmallin vasteita verrattiin. Kuvissa 28 ja 29 on kaksi esimerkkiä. Havaittiin, että askelmalli on varsin karkea, mutta muuten vastaa tuloksiltaan varsin hyvin pienillä pakkasilla ja lyhyillä sulkuajoilla sekä kokeita että niiden perusteella identifioitua fysikaalista mallia. Kovilla pakkasilla Rouvalin malli antaa pienemmän jälkihuipun ja jälkikulutuksen, kuva 29.



Kuva 28. Vertailu Rouvalin (1993) askelmalliin.



Kuva 29. Vertailu Rouvalin (1993) askelmalliin, kun ulkolämpötila on -30°C .

4 PÄÄTELMIÄ JA ARVIOINTEJA

4.1 TULOSTEN ARVIOINTI

Pääasiassa leudon talven takia kenttäkokeiden määrä jäi vähäiseksi. Niidenkin perusteella voitiin havaita ehdotetun mallin (1,2) käyttökelpoisuus. Muutamia kenttäkokeita kuitenkin tarvitaan vielä lisää.

Mallin (1,2) kyky ennustaa ohjausvasteet perustuu siihen, että saatavissa oleva ennakkotieto ohjausryhmän rakennusten lämpövarastoista ja lämmönjohtavuuksista yhdistetään mitattuihin ohjausvasteisiin. Toisaalta ennakkotiedot ovat kyseistä mallia sovellettaessa välttämättömiä parametrien suurehkosta lukumäärästä johtuen. Tarkoitukseen riittävän hyvät ennakkotiedot ovat kuitenkin helposti saatavissa. Lämmönjohtavuudet ja pitkäaikaiset lämpövarastot voitaneen määrittää ennakkotiedoista. Sovitus ohjauskokeisiin saattaa näin ollen olla parasta rajata niihin parametreihin, joiden vaikutus erottuu selvästi ohjauskokeiden vasteissa. Näitä ovat ainakin sisäilman lämpövarastoihin, vaihtuvuuteen ja sen lämpötilansäätön liittyvät parametrit.

Hyvin eristetyissä taloissa ilmanvaihto on tärkein tekijä, joka vaikuttaa tehorajoituksen aiheuttaman jälkihupun muotoon. Ilmanvaihtoa ei nykyisestä voi juuri pienentää sisäilman laadun merkittävästi kärsimättä. Poistoilman lämmöntalteenoton runsas lisääntyminen lienee siis ainoa tekijä, joka voisi aiheuttaa isompaa mallin parametrien päivitystarvetta. Vastaavasti tilapäisesti suuri ilmanvaihto voi muuttaa yksittäisen talon jälkihupun muista saman ryhmän taloista poikkeavaksi. Ilmanvaihto voi johtua esimerkiksi takan peltien, ovien tai ikkunoiden aukiolosta.

4.2 TULOSTEN SOVELTAMINEN

Ehdotetun mallin avulla on jälkihuipun energia ja muoto helppo ennustaa erilaisille rakennuksille ja erilaisille lämpötiloille. Samalla saadaan myös entistä parempi arvio ohjausten vaikutuksesta rakennusten sisälämpötiloihin. Jos mallissa pitkäaikaisiakin lämpövarastoja kuvaavat parametrit ovat riittävän tarkasti, voidaan sillä ennustaa myös toistuvien ohjausten vaikutus ja jälkihuipun jälkeinen korvausenergia ja teho.

Nykyisin käytettävät säännöt siitä, miten paljon ja miten usein sähkölämmitystä saa suoraan ohjata pois päältä, eivät sisällä lämpötilariippuvuutta. Niiden tarkoituksena on kuitenkin estää liiallinen sisälämpötilan lasku kuitenkaan tarpeettomasti vähentämättä mahdollisuuksia ohjata kuormia pois päältä. Tähän tulokseen olisi mallin avulla mahdollista päästä tarkemmin. Ulkolämpötila ja rakennustyyppin ominaisuudet voitaisiin ottaa huomioon ja ohjauksen ehdoksi asettaa mallin antama sisälämpötila ja sen muutokset. Ensin on kuitenkin syytä varmistua siitä, että mallin antama sisälämpötila vastaa riittävän tarkasti todellista efektiivistä sisälämpötilaa (, joka vastaa sisäilman ja lämpöä säteilevien pintojen lämpötilojen yhteisvaikutuksen tuottamaa lämmön tunnetta.) Jos säännöstö korvattaisiin mallilla, joka ennustaa sisälämpötilan, olisi myös suoran kuormienohjauksen käyttö nykyistä helpompi optimoida ja liittää sähkön hankinnan optimointiin.

Lämpimissä maissa kuormitushuippuja ei aiheuta rakennusten lämmitys talvella vaan niiden ilmastointi ja jäähdytys kuumalla kaudella. Mallin (1,2) kaltaista mallia on mahdollista soveltaa myös ennustamaan jäähdytyskuormia sekä niiden ohjauksen aiheuttamaa sisälämpötilan nousua. Asian tarkempi tarkastelu jätetään nyt toiseen kertaan.

4.3 JÄRJESTELMÄLLISEN TIETOJEN KERUUN TARVE

Jakeluverkoston automaatiojärjestelmien kehitys on tehnyt mahdolliseksi kerätä ja tallettaa numeerisessa muodossa entistä enemmän tietoa. Myös kuormien ohjausvasteiden määrittämiseksi tarvittava aineisto saadaan haluttaessa helpommin talteen. Nyt ongelman on pikemminkin se, että mittaustiedon keruu ja kokeiden toteutus ei ole vielä aina riittävän järjestelmällistä. Toimintatavat ja rutiinit kehittyvät kokeilujen ja kokemusten kautta koko ajan.

Järjestelmien kehityksen ansiosta mittareita voidaan hyödyntää uusilla tavoilla. Mittarit sekä niiden mittaus- ja tietoliikenneominaisuudet muodostavat rajan sille mitä tietoa voidaan saada. Niinpä on tarvetta päivittää mittareita. Samoin tarvitaan entistä helpompaa asiakastietojen yhdistämistä verkkotietoihin. Tälle kehitykselle on tärkeämpiäkin syitä kuin kuormienohjausten tutkimus. On odotettavissa, että kuormienohjauksen vasteet ja vertailumittaukset saadaan taustatietoineen nykyistä vaivattomammin ja tarkemmin.

Sähköasemakohtainen tehon mittaus osoittautui tarpeelliseksi. Sen avulla voitiin eliminoida monien häiriöiden vaikutus tuloksiin ja käyttää paikkakuntaakohtaisia eroja hyväksi tuloksien tarkastelussa. Energiamittareiden pulssikoko oli häiritsevän suuri tehojen mittauksessa. Talokohtaisia mittauksia olisi tarvittu enemmän ja paremmin valmisteltuina. Tavallinen asuminenkin häiritsee sisälämpötilamittausten tuloksia huomattavasti.

4.4 SÄHKÖKATKON JÄLKEISEN KUORMITUKSEN ENNUSTUS

Kuormanohjausmallia voidaan käyttää myös ennustamaan sähkölämmityskuormien ottamaa tehoa sähkökatkoksen jälkeen. Tällöin on otettava vain malliin mukaan myös ne sähkölämmitystalot jotka eivät kuulu ohjattaviin ryhmiin.

Vastaavasti on hyödyllistä tallettaa mahdollisten sähkökatkojen aikaiset tehot. Niiden avulla voidaan malleja tarkentaa ilman erityisiä kokeita.

4.5 KUORMAN LÄMPÖTILARIIPPUVUUDEN ENNUSTUS

Ehdotettua kuormituksen ohjausvasteen mallia (1,2) on mahdollista käyttää myös ennustamaan sähkölämmityskuormien lämpötilariippuvuutta. Tämä edellyttäisi kuitenkin sitä, että rakennuksen rakenteiden lämpövarastoja kuvaavat parametrit olisivat tarkemmin oikein. Mahdollisesti myös mallin rakenteeseen olisi tarvetta tehdä pieniä tarkennuksia, jos sitä on tarkoitus käyttää tähän tarkoitukseen. Myös muiden ympäristötekijöiden kuten tuulen ja auringon säteilyn tunnetut vaikutukset rakennuksen lämmöntarpeeseen on mahdollista sisällyttää malliin. Saman mallin käyttäminen useisiin eri tarkoituksiin helpottaisi muunmuassa ylläpitoa, joten tämä mahdollisuus kannattaisi selvittää.

5 YHTEENVETO

Tehtyjen kenttäkokeiden analyysin perusteella näyttää siltä, että fysikaalispohjaisen mallin käyttö suoran kuormienohjauksen vasteiden ennustamiseen on perusteltua. Tulosten varmistamiseksi mittausaineistoa kuormien ohjauksen vasteista tarvitaan kuitenkin lisää. Ehdotettua mallia on mahdollista käyttää myös sähkölämmityskuormien lämpötilariippuvuuden ennustamiseen, mutta tämä olisi jo erillisen tutkimuksen aihe.

LÄHDELUETTELO

Ahlstedt Kalle, Koskelainen Lasse. 1995. Kaukolämmön kulutuksen ohjaus. Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto, Energiatekniikan laitos, Raportti 65, 99 s + liitteet 17 s.

Haapala Tapio, KalemaTimo ja Martikainen Lasse. 1997. Pientalojen tarpeenmukainen sähkölämmitys. Imatran Voima Oy, IVO teknologiakeskus, tutkimusraportti IVO-A-03/97. Vantaa 1997. liitteineen 87 s.

Haase Hannu. 1971. Sulkuajallisen suoran sähkölämmityksen käyttömahdollisuuksien tutkiminen. Espoo 1971. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto. 69 s. + liitteet 47 s.

Kekkonen Veikko. 1988. Kaukolämmön kulutuksen ohjaus, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 565, Espoo 1988, 76 s. + liitteet 3 s.

Koponen Pekka. 1996. The interaction of the utility and its customers in load control, Proceedings of the 12th Power Systems Computation Conference, Dresden, August 19 - 23, 1996, Vol II, s. 749 - 756.

Martikainen Lasse, Eerola Pekka, Remes Matti, Sivukari Matti, Kalevi Juhani ja Kananoja Risto. 1987. Sähkölämmityksen tehonrajoituksen vaikutukset asumisviihtyvyyteen ja taloudellisuuteen. Imatran Voima Oy, tutkimusraportti IVO-A10/87, Helsinki 1987, liitteineen noin 70 s.

Rouvali Juhani. 1993. Sähkökuormien ohjauksen mallintaminen ja erityyppisten ohjaustapojen arviointi, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Sähkö- ja automaatiotekniikan laboratorio, raportti SÄH-1/93, Espoo, tammikuu 1993. 76 s. + liitteet 9 s.

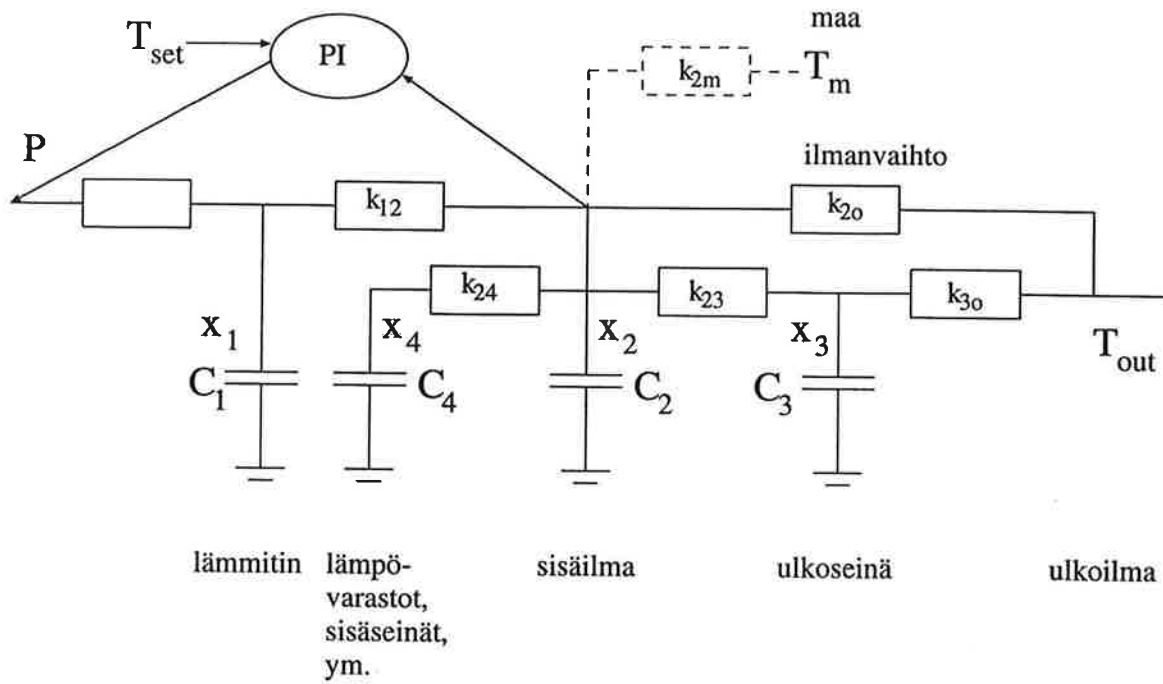
Siirto Osmo. 1989. Sähkön tarpeen lämpötilariippuvuuden tutkiminen. Espoo 1989. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniillinen osasto. 73 s. + liitteet 9 s.

Tamminen Eero ja Aho-Mantila Jorma. 1979. Suoran sähkölämmityksen ohjaamisen kannattavuus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Sähkötekniikan laboratorio, Tiedonanto 44, Espoo, syyskuu 1979. 87 s. + liitteet 14 s.

Virtanen Reijo. 1977. Verkkokäskyohjauksen käyttö sähkölämmityksen kustannusten optimointiin. Espoo 1977. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniillinen osasto. 66 s. + liitteet 15 s.

Välisuo Martti, Martikainen Lasse ja Ikonen Kari. 1994. Pientalojen sähkölämmityksen säätö, Imatran Voima Oy tutkimusraportti IVO-A-02/94. Vantaa 1994, 167 s. + liitteet 10 s.

Ympäristöministeriö. 1985. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiatarpeen laskenta, Ohjeet 1985. 14 s.



B Esimerkki kokeeseen sovitetuista parametriarvoista

LIITE B

Seuraavissa taulukoissa ovat kuormanohjaukseen 24.1.1997 sovitetun mallin parametrit taloa kohti esitettynä. Kyseessä on pääosin suoran sähkölämmityksen ryhmä. Taulukoissa on kaksi hyvin sovittunutta erillistä ratkaisua, joihin sovitusten menetelmä on eri lähtöpisteistä päätynyt. Ylempänä esitetty on parhaiten sovittunut ratkaisu. Sovitusmenetelmällä oli kuitenkin vaikeuksia löytää se eli useimmista lähtöpisteistä päädyttiin muualle. Alemmassa ratkaisussa ilmanvaihtoa kuvaava parametri k_{2o} on epärealistisen pieni.

		Wh/oC		W/oC		W
lämmittimet	C1	12,7	k12	1014	Pmax	3043
sisäilma	C2	148	k23	139		
			k2o	18,25		
ulkoseinä	C3	469	k3o	19,5		
lämpövarastot	C4	153	k24	205		
sovituskriteeri	70791					

		Wh/oC		W/oC		W
lämmittimet	C1	12,7	k12	1014	Pmax	3043
sisäilma	C2	147	k23	209		
			k2o	0,51		
ulkoseinä	C3	322	k3o	41,8		
lämpövarastot	C4	147	k24	153		
sovituskriteeri	70997					

(Käytetty malli voi siis sovitua monella eri tavalla saatuun mittausaineistoon.)

C Yhteenvetotaulukot

LIITE C

sähkölämmitys	ikä	eristys	jake- lu- yhtiö	max raja- aika	tunnus	Yksikköä			ilmoitettu		
						Yhteensä	Mökki- alueella	Valituilla asemilla	Hylytyillä asemilla	ryhmä	ohjattava teho /yksikkö
Pääosin suora	uusi	hyvä	KPS	1h	C3*K221H	1220	164	652	404		
Pääosin suora	uusi	hyvä	KPS	1h	MX31H	91	18	45	28		
Pääosin suora	uusi	hyvä	OuSe	1h	C	2465	0	1972	493	8627,5	3,5
Suora	uusi	hyvä	KPS	1h	G3A S231H	1418	186	772	460		
Suora	keskink.	keskink.	KPS	45 min	G3B S045H	251	9	163	79		
Suora	keskink.	keskink.	OuSe		B	476	0	380,8	95,2	1904	4
Suora	vanha	huono	KPS	30 min	G3C S030H	179	8	126	45		
Suora	vanha	huono	OuSe		A	676	0	540,8	135,2	3042	4,5
Varaava			KPS	3 h	G3DV233H	683	74	364	245		
Varaava			KPS	3 h	MX33H	36	4	20	12		
Varaava			OuSe		F	788	0	630,4	157,6	1576	2

Taulukko C.1 Kuormanohjauksokokeiden ohjausryhmät

sähkölämmitys	ikä	jakelu- yhtiö	havaittu jälkiteho		havaittu jälkiteho yksikköä kohti		havaittu jälkiteho mökkialueilla		hav jälkiteho mökkial yksiköille		8.1. tunnus
			16.12.	24.12.	16.12.	24.12.	16.12.	24.12.	16.12.	24.12.	
Pääosin suora	uusi	KPS	2900		4,45	5,98	1200	1250	7,32	7,62	C3*K221H
Pääosin suora	uusi	KPS	200		4,44		100	110	5,56	6,11	MX31H
Pääosin suora	uusi	OuSe				2,89	2,48				C
Suora	uusi	KPS	4000		5,18		3500		18,82		G3A S231H
Suora	keskink.	KPS									G3B S045H
Suora	keskink.	OuSe				3,94					B
Suora	vanha	KPS									G3C S030H
Suora	vanha	OuSe				2,96					A
Varaava		KPS									G3DV233H
Varaava		KPS									MX33H
Varaava		OuSe									F
Lämpötilat		KPS	-19	-26							
		OuSe		-26							
											-7

Taulukko C.2 Yhteenveto kuormanohjauksokkeiden perusteella arvioituista ohjauksen päättyessä tapahtuvasta tehonmuutoksesta. Arviot ovat karkeita. Huomautus! 24.12 ohjauksokkeilu koostui 10 erillisestä ryhmäohjauksesta, joten vasteista ei voi erotella yksittäisten ryhmien vasteita.

