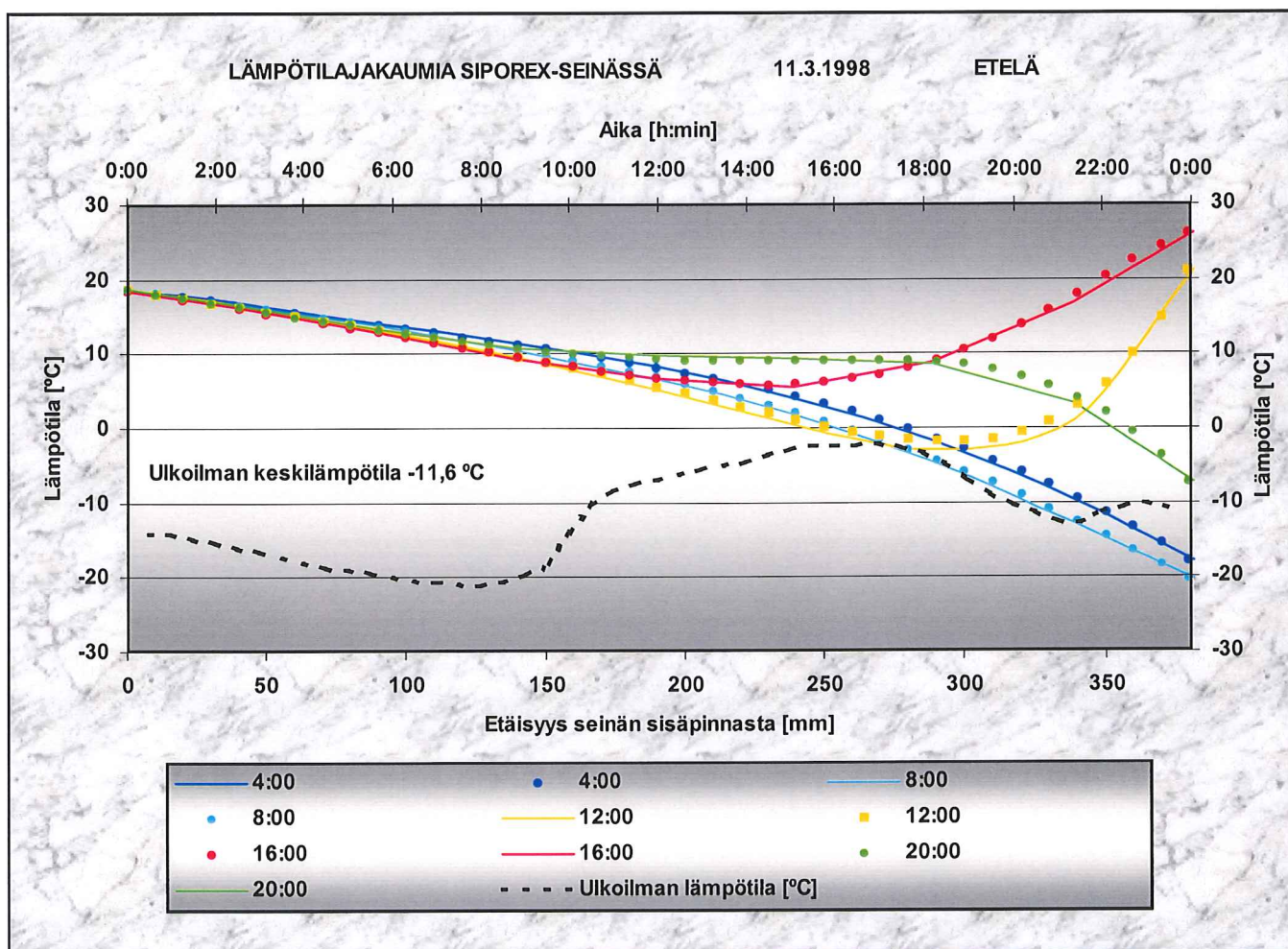


Ralf Lindberg - Hannu Keränen - Minna Teikari

ULKOSEINÄRAKENTTEEN VAIKUTUS RAKENNUKSEN ENERGIAANKULUTUKSEEN



Ralf Lindberg - Hannu Keränen - Minna Teikari

**ULKOSEINÄRAKENTTEEN VAIKUTUS
RAKENNUKSEN ENERGIANKULUTUKSEEN**

ALKUSANAT

Tämä tutkimus on tehty Tampereen teknillisen korkeakoulun (TTKK) Talonrakennustekniikan laboratoriossa. Tutkimus liittyy Teknologian Kehittämiskeskuksen (TEKES) tutkimusohjelmaan Rakentamisen ympäristöteknologia.

Tutkimusprojekti käynnistettiin syksyllä 1996 koerakennusten suunnittelulla ja rakentamisella. Tutkimuksessa on mukana kuusi erilaista ulkoseinärakennetta: polyuretaanieristeinen puurankaseinä, eristetty tiiliseinä, lisäeristetty hirsiseinä, 1½ -kiven tiiliseinä, siporex -harkkoseinä ja hirsiseinä. Koerakennusten lämmönkulutusta on mitattu yksi lämmityskausi 1997 - 1998. Tarkoituksena on ollut selvittää, miten erilaiset ulkoseinät lämpöteknisesti toimivat ja millä tarkkuudella ulkoseinien lämpöhäviöt voidaan nykyisillä laskentamenetelmillä määrittää.

Tutkimuksen rahoittivat Teknologian Kehittämiskeskus ja projektiin osallistuneet yritykset Honkarakenne Oy, Optiroc Oy, SPU-Systems Oy, Suomen Siporex Oy ja Tiileritehtaat.

Tutkimuksen tekivät dipl.ins. Minna Teikari ja dipl.ins. Hannu Keränen professori Ralf Lindbergin johdolla. Lisäksi tutkimukseen osallistuivat dipl.ins. Jommi Suonketo, laboratorioteknikko Kari Häyrinen ja dipl.ins. Tarja Hyypöläinen. Projektin toimintaa ohjasi johtoryhmä, johon kuuluivat

Eero Kalliokoski	Suomen Siporex Oy, puheenjohtaja
Markku Laine	Optiroc Oy
Ralf Lindberg	TTKK
Matti Pentti	TTKK
Lasse Pöyhönen	TEKES
Simo-Heikki Rosenström	Honkarakenne Oy
Tapani Tuominen	SPU-Systems Oy
Jari Valtonen	Tiileritehtaat

Kiitämme tutkimukseen osallistuneita.

Tampereella 30.11.1998

Ralf Lindberg

Hannu Keränen

Minna Teikari

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Koerakennukset ja mittaus- / säätöjärjestelmä	3
2.1	Yleistiedot	3
2.2	Rakenteet	3
2.3	Mittaus- ja säätöjärjestelmä	4
3	Ulkoseinän lämpötekkinen toiminta	7
4	Mitatun ja laskennallisen energiankulutuksen tarkastelu	12
4.1	Koerakennusten energiankulutusmittaukset	12
4.2	Laskennallinen energiankulutus	12
4.3	Energiankulutuksen mittaus- ja laskentatulokset	16
5	Auringon säteilyn vaikutus ulkoseinässä	19
6	Ilmanläpäisevyyden vaikutus rakennusosan lämmöneristyskykyyn ..	22
7	Lämmönkulutusta vähentävien toimenpiteiden tarkastelu	26
8	Johtopäätökset	29
	VIITELUETTELO	32

LIITE 1	Koerakennusalue	(1 s.)
LIITE 2	Koerakennuksen periaatekuva	(3 s.)
LIITE 3	Koerakennusten ulkoseinärakenteet	(2 s.)
LIITE 4	Ulkoseinien k-arvolaskelmat	(5 s.)
LIITE 5	Lämpötila-antureiden asennusperiaatteita	(2 s.)
LIITE 6	Ulkoseinien lämpötilajakaumia	(6 s.)
LIITE 7	Differenssilaskennan elementtiverkot rakennusten nurkissa	(4 s.)
LIITE 8	Ulkoseinien pinta-alan laskennassa käytetyt mitat	(1 s.)
LIITE 9	Lämmönsiirtyminen ulkopinnasta seinän sisäosiin	(1 s.)

1 Johdanto

Sisä- ja ulkoilman välinen lämpötilaero ja sen seurauksena lämmönsiirtyminen johtumalla ulkovaipan läpi sekä konvektiolla vuotoilman ja ilmanvaihdon virtauksen mukana saavat aikaan rakennuksen lämmitystarpeen. Lisäksi lämmitysenergiaa tarvitaan lämpimän käyttöveden lämmitykseen.

Tässä tutkimuksessa on selvitetty ulkovaipan osuutta lämmönkulutuksesta ja miten erilaiset ulkoseinät lämpöteknisesti toimivat. Tutkimuksessa on mukana kuusi erilaista ulkoseinärakennetta: alumiinifoliolla pinnoitetuilla polyuretaanilevyillä eristetty puurankaseinä (metriseinä), mineraalivillalla eristetty tiiliseinä, ruiskutetulla puukuituvillalla lisäeristetty hirsiseinä, 1½ -kiven tiiliseinä, siporex-harkkoseinä ja hirsiseinä. Ulkoseinien lämmöneristävyttä tutkitaan koerakennuksissa, jotka ovat muilta rakenteiltaan keskenään identtisiä. Lämmityskaudella sisäilman lämpötila pidetään +20 °C:ssa. Mittaus- ja sisäolosuhteiden säätöjärjestelmää ohjataan tietokoneella.

Ulkoseinän lämmönkulutuksen ja lämpötekni- sen toiminnan tutkimisessa koerakennuksissa voidaan saavuttaa seuraavia etuja verrattuna

- a) kenttäkohteisiin (käytössä olevat asuintalot)
 - rakennuksesta, rakenteista, rakenneyksityiskohdista, rakennustavasta ja työnsuorituksesta on tarkat tiedot
 - "kaikkea" voidaan mitata ja säätää
 - "muuttujien" määrää voidaan rajoittaa ja niitä voidaan muunnella tarvittaessa
 - häiriötön, jatkuva mittaus on mahdollista (myös rakenteiden sisältä)
- b) laboratoriokokeisiin
 - todelliset ja aina "oikeat" ilmasto- ja sääolosuhteet
 - todellisuutta vastaavat rakenteet
 - pitkäaikaiset mittaukset mahdollisia.

Vaipan läpäisemä lämpövirta jatkuvuustilassa lasketaan rakennusfysiikkaan vakiintuneella, lämmönläpäisykertoimiin perustuvalla menetelmällä, josta on annettu ohjeita viranomais määräyksissä. Koerakennusten ulkoseiniin asennetuilla antureilla mitatut lämpötilajakaumat poikkeavat jatkuvuustilatarkastelun lineaarisesta lämpötilajakaumasta varsinkin aurinkoisina päivinä ja eniten niissä seinissä, joiden julkisivuväri on suhteellisen tumma ja materiaaliin voi varastoitua lämpöä.

Vaipan lämpötilajakauma ja samalla sen läpäisemä lämpövirta voidaan ratkaista epästationaarisessa tapauksessa soveltaen Fourierin differentiaaliyhtälöä, kun lämmönsiirtyminen tapahtuu pääasiassa johtumalla. Yhtälö voidaan ratkaista analyyttisesti vain harvoissa erikoistapauksissa. Tutkimuksessa on koerakennusten ulkoseinien lämpötilajakaumia laskettu numeerisesti differenssimenetelmällä käyttäen lähtöarvoina mitattuja pintalämpötiloja, tyyppi- hyväksytyjä, mitattuja ja taulukkokirjoista saatuja materiaaliarvoja sekä tutkittavien ulkoseinien dimensioita. Rakenteen lämpötilajakaumaa käytetään lämmönsiirron selvittämiseen.

Auringon säteilyn vaikutus on selvimmin havaittavissa lämpöä varaavissa seinissä kylminä, aurinkoisina päivinä, jolloin lämpöä johtuu auringon säteilyn lämmittämistä, ulkopintaa lähellä olevista kerroksista viileämpiä sisäosia kohti, vaikka ulkoilman lämpötila on selvästi alhaisempi kuin sisäilman. Seinään kohdistuvalla auringon säteilyllä on vaikutusta lähinnä eteläseinän lämpötaseeseen. Sen sijaan varsinkin pohjoisseinällä auringon lämpösäteilyn merkitys on vähäinen.

Seinän lämpöteknisen toiminnan selvityksen perusteella tutkimuksessa arvioidaan myös, miten suuri vaikutus vaipparakenteiden lämmönläpäisykerrointen pienentämisellä ja muilla lämmönkulutusta alentavilla toimenpiteillä on rakennusten hyötylämmitysenergian tarpeeseen.

2 Koerakennukset ja mittaus- / säätöjärjestelmä

2.1 Yleistiedot

Koerakennukset sijaitsevat Tampereen teknillisen korkeakoulun pysäköintialueella Hervannassa. Koerakennukset on sijoitettu koerakennuskäyttöön myönnetylle alueelle siten, että ne mahdollisimman vähän varjostavat toisiaan tai muuten vaikuttavat toisiinsa ilmastollisesti (Liite 1). Koerakennusten ulkoseinät yhtyvät pääilmansuuntiin ja niiden värit on lueteltu taulukossa 2.1. Ulko-ovi on kaikissa koerakennuksissa itään ja pulpettikaton lape etelään päin. Koerakennuksissa ei ole ikkunoita.

Taulukko 2.1 Koerakennusten julkisivuvärit.

Koerakennus	Ulkoseinän väri (suluissa sisäpinnan väri)
K1 (polyuretaanierist. puurankaseinä)	harmaanvalkoinen (valkoinen)
K2 (tiili - min.villa - tiili)	punatiili (harmaa)
K3 (lisäeristetty hirsiseinä)	puu (puu)
K4 (1½-kiven tiiliseinä)	viljankeltainen (harmaa)
K5 (siporex-harkkoseinä)	vaalea rosa (valkoinen)
K6 (hirsiseinä)	puu (puu)

Koerakennuksen vapailla sisämitoilla 2,4 m × 2,4 m laskettu lattiapinta-ala on 5,76 m² ja tilavuus n. 15 m³, kun rakennuskorkeus on 2,6 m. Koerakennuksissa on 1500 W:n sähkölämmitin (lämpöpaneeli 1248 × 400 mm²) paitsi 1½- kiven tiilirakennuksessa, johon tehontarvelaskelmien perusteella valittiin kaksi 1200 W:n sähkölämmitintä (lämpöpaneeli 1008 × 400 mm²). Koneellinen poistoilmanvaihto on toteutettu koerakennuksiin asennetuilla kanavapuhaltimilla. Tuloilmaventtiili sijaitsee rakennuksen pohjoisseinällä ja poistoilmaventtiili länsiseinällä (Liite 2). Ilmanvaihtuvuudeksi on säädetty 0,5 1/h. Lämmityskaudella sisäilman kosteuslisä on 2 g/m³, joka saadaan aikaan höyrystävällä ilmankostuttimella.

2.2 Rakenteet

Ylä- ja alapohjarakenteena on kaksi päällekkäistä 100 mm:n polyuretaanilevykerrosta, joiden saumat on tiivistetty polyuretaanivaahdolla ja ilmastointiteipillä. Kevytsojarahkoista muuratun sokkelin tuuletusaukkojen kautta alapohjan ryömintätila tuuletuu tehokkaasti. Vesikaton katemateriaalina on kuumasinkity teräspoimulevy ja puuristikoidilla rakennetun pulpettikaton kaltevuus 1:7. Ulko-oviksi on asennettu peräkkäin kaksi polyuretaanilla eristettyä, kahdella tiivisteellä varustettua 9 × 21 ulko-ovea. Liitteeseen 3 on piirretty poikkileikkaukset koerakennusten kuudesta erilaisesta ulkoseinärakenteesta. Taulukkoon 2.2 on koottu vaipparakenteiden lämmönläpäisykertoimet (k-arvot, U-arvot) ja liitteessä 4 on esitetty, miten ne on laskettu.

Taulukko 2.2 Vaipparakenteiden lämmönläpäisykertoimet.

Rakenne	k-arvo [W/Km ²]
Yläpohja 200 mm	0,12
Alapohja 200 mm	0,12
Ulko-ovi 2 kpl	0,35
US 1 SPU - metriseinä	0,17
US 2 Eristetty tiiliseinä	0,27
US 3 Eristetty hirsiseinä	0,29
US 4 1½ -kiven tiiliseinä	0,86
US 5 Siporex -harkkoseinä	0,35
US 6 Hirsiseinä	0,67

2.3 Mittaus- ja säätöjärjestelmä

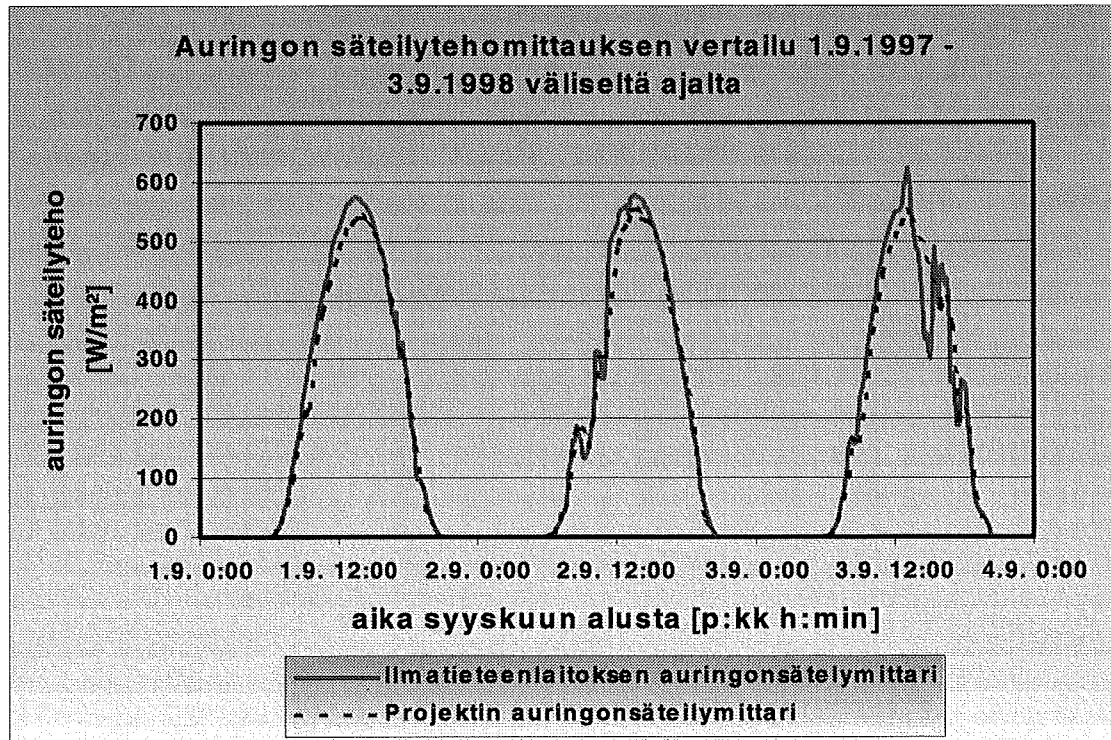
Mittaukset ulkona

Koerakennusalueelle rakennetussa säähavaintoasemassa mitataan ulkoilman lämpötilaa ja ilman suhteellista kosteutta. Siporex -koerakennuksen kattoräystänsä tasolle sijoitetulla pyranometrillä (solarimetri) mitataan auringon säteilyn intensiteettiä. Laite mittaa vaakasuoralle pinnalle tulevan kokonaissäteilyn, jossa ovat mukana auringon suorasäteily ja hajasäteily. Kuvassa 2.1 on verrattu koerakennusalueen auringon säteilymittauksia Ilmatieteenlaitokselta saatuihin mittaustuloksiin. Tuulen nopeutta ja suuntaa mitataan 10 m:n korkeudessa (maanpinnasta) teräsputkimastoon asennetulla tuulimittarilla. Tuulen nopeuden mittaamiseen käytetään 3-kuppianemometriä ja suunta määritetään tuuliviirillä.

Mittaukset koerakennuksissa

Koerakennuksissa mitataan ilman lämpötilaa kolmelta korkeustasolta ja ilman suhteellista kosteutta kahdella RH-mittarilla. Lisäksi ilman lämpötilaa mitataan katto-ontelosta ja ryömintätilasta.

Koerakennusten ilmanvaihdon säätöarvo on 0,5 1/h. Ilmanvaihdon tilavuusvirtaa ja poistoilman lämpötilaa mitataan jatkuvasti. Virtausmittauksessa käytetään poistoputkeen sijoitetun kuristuselimen aiheuttaman staattisen paine-eron mittaukseen perustuvaa menetelmää. Virtausmäärä voidaan määrittää mittauslaipan tulo- ja lähtöpuolen välisestä paine-erosta, kun virtaavan aineen (ilma) ominaisuudet ko. olosuhteissa tunnetaan.



Kuva 2.1 Auringon kokonaissäteily [W/m^2] 1.9.-3.9.1997. Säteilytiedot Tampereelta Ilmatieteenlaitoksen Länsi-Suomen aluepalvelusta ja koerakennusalueelta.

Höyrystettävän veden määrä (pinnan korkeus) mitataan avoimesta vesisäiliöstä hydrostaattiseen paineeseen perustuvalla menetelmällä, jossa käytetään nesteen mittausalueen nollakohtaan upotettua kuplimisputkea. Putkeen puhallettu ilma kuplii pintaan. Vastapaine kuplimisputkessa on yhtä suuri kuin nestekerroksen aiheuttama hydrostaattinen paine putken alapään tasolla. Painelähettimestä tieto vedenpinnan korkeudesta saadaan sähköisenä viestinä adda-kortille, joka muuntaa sen digitaaliseen muotoon tietokoneelle luettavaksi.

Koerakennusten seinistä mitataan lämpötiloja sisä- ja ulkopinnasta sekä rakenteen sisältä. Lämpötilanmittaukseen käytetään sähköistä mittaumenetelmää, jossa tuntoelimeltä saatava viesti on muokattavissa sähköiseksi standardiviestiksi. Lämpötiloja mitataan kolmessa lämpötilassa kalibroiduilla puolijohdeantureilla ja T-tyypin (Cu-Ko, Cu-CuNi) termoelementeillä.

Ensimmäisen lämmityskauden alussa ulkoseinien kosteuspuiteisuuden selvittämiseksi seiniin porattiin reikiä, joista suhteellinen kosteus voidaan mitata (taulukko 2.3). Rakenteiden kosteustilaa seurataan toistuvien mittauksin.

Taulukko 2.3 Ulkoseinien kosteusmittauksien tulokset.

Suhteellinen kosteus	Aika		Seinä		Lämmön-eriste	Tuuletusrako	
Koerakennus	[pp.kk.a]	Sisä- ilma	US Pohjoinen (+)	US Etelä (+)	US Länsi (+)	US Pohjoinen (-)	US Etelä (-)
K1 SPU	10.12.1997	43	32	33		73	68
	29.06.1998	47	46	47		69	64
	14.09.1998	57	48	50		48	50
K2 Tiili E	09.12.1997	39	32	33			
	29.06.1998	47	43	43			
	14.09.1998	51	47	45			
K3 Hirsi E	09.12.1997	45	34	36	41		
	29.06.1998	52	46	44	40		
	15.09.1998	57	62	50	46		
K4 Tiili	09.12.1997	45	92	78			
	29.06.1998	52	71	74			
	15.09.1998	66	66	71			
K5 Siporex	08.12.1997	38	43	40			
	29.06.1998	39	55	54			
	15.09.1998	57	60	53			
K6 Hirsi	09.12.1997	41	55	47			
	29.06.1998	42	53	54			
	16.09.1998	68	53	52			

Koerakennusten energiankulutusta mitataan perinteisillä kWh-mittareilla, jotka on sijoitettu rakennusten ulkopuolelle. Ne rekisteröivät koerakennuksissa olevien sähkölaitteiden sähkönkulutuksen. Tietokoneen muistiin tallennetaan puolen tunnin välein sähkölämmittimen ja kostuttimen päälläoloaika (käyttöaste).

Ohjaus- ja säätöjärjestelmä

Mittausanturit on kytketty kanavoitsijaan (mux), jonka avulla vuorotellen jokaiselta anturilta tuleva sähköinen viesti luetaan 20 sekunnin välein. Tietokoneen muistiin tallennetaan puolen tunnin aikana kunkin anturin lähettämien mittausarvojen minimi, keskiarvo ja maksimi. Sisäilman keskilämpötilana lämmityskaudella pidetään +20 °C. Sähkölämmittimiä ohjataan tietokoneella kolmelta sisäilman lämpötila-anturilta tulevien lämpötila-arvojen keskiarvon perusteella. Ilmankostuttimen käyttöastetta säädellään sisäilman suhteellisen kosteuden perusteella. Lämmityskaudella sisäilman kosteuslisäksi on asetettu 2 g/m³ /1/.

3 Ulkoseinän lämpötekniinen toiminta

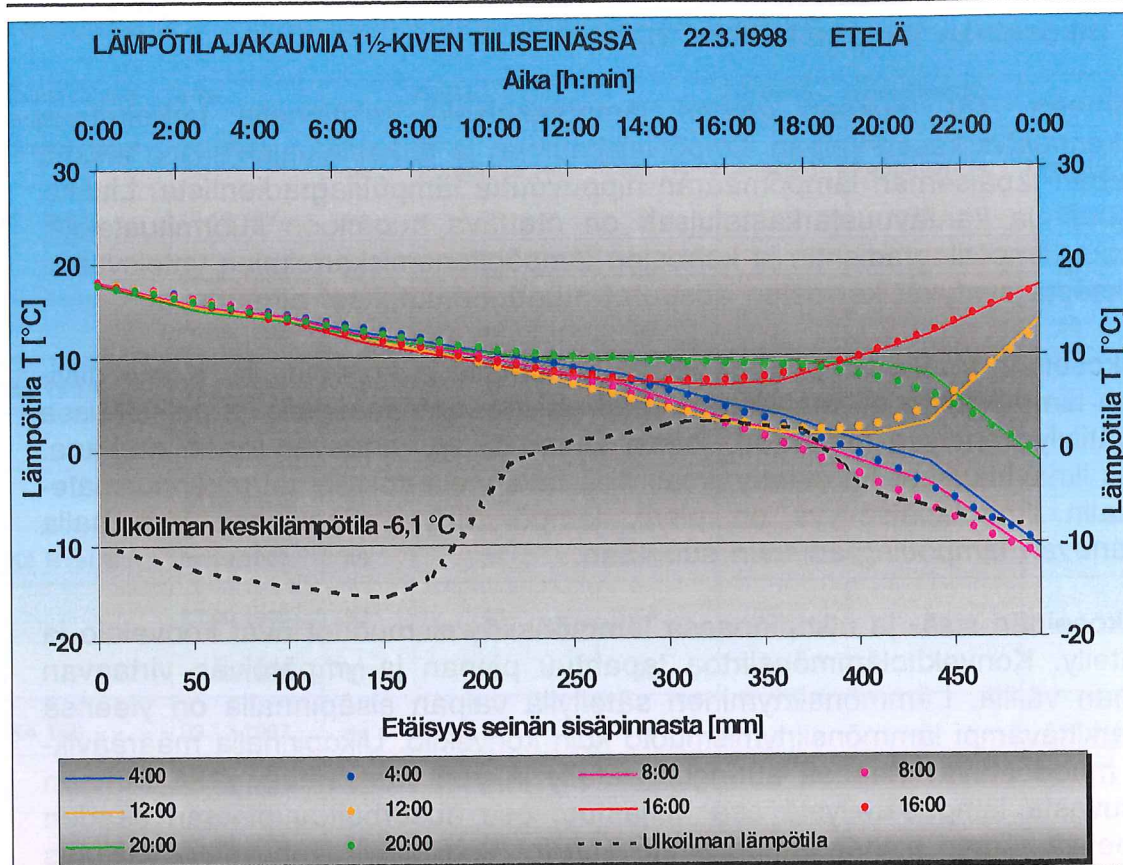
Lähteen /18/ mukaan vaipan lämpötekniisellä toiminnalla tarkoitetaan rakennusfysiikassa vaipan lämpötilajakauman ja tarkasteluajanjakson aikana vaipan läpäisemän lämpömäärän riippuvuutta lämpötilagradientista. Lisäksi lujuus- ja kantavuustarkasteluissa on otettava huomioon kuormitustekijä, jonka lämpötilagradientin ja kerrosten lämpöpitenemiskertoimien yhteisvaikutuksesta syntyvät kerrosten erisuuret muodonmuutokset aiheuttavat.

Ulkoseinän sisällä lämpöä voi siirtyä johtumalla ja konvektiolla. Konvektiivinen lämmönsiirto on mahdollista huokoisissa materiaaleissa ja paikallisissa epätiiviyskohdissa (ilmaraot), jolloin lämpö siirtyy virtaavan ilman mukana. Jos ilmavirtaukset on estetty ilmatiiviillä rakennekerroksilla tai rakennusmateriaalin ilmanläpäisevyys on pieni, lämpö siirtyy pääasiassa johtumalla alenevan lämpötilagradientin suuntaan.

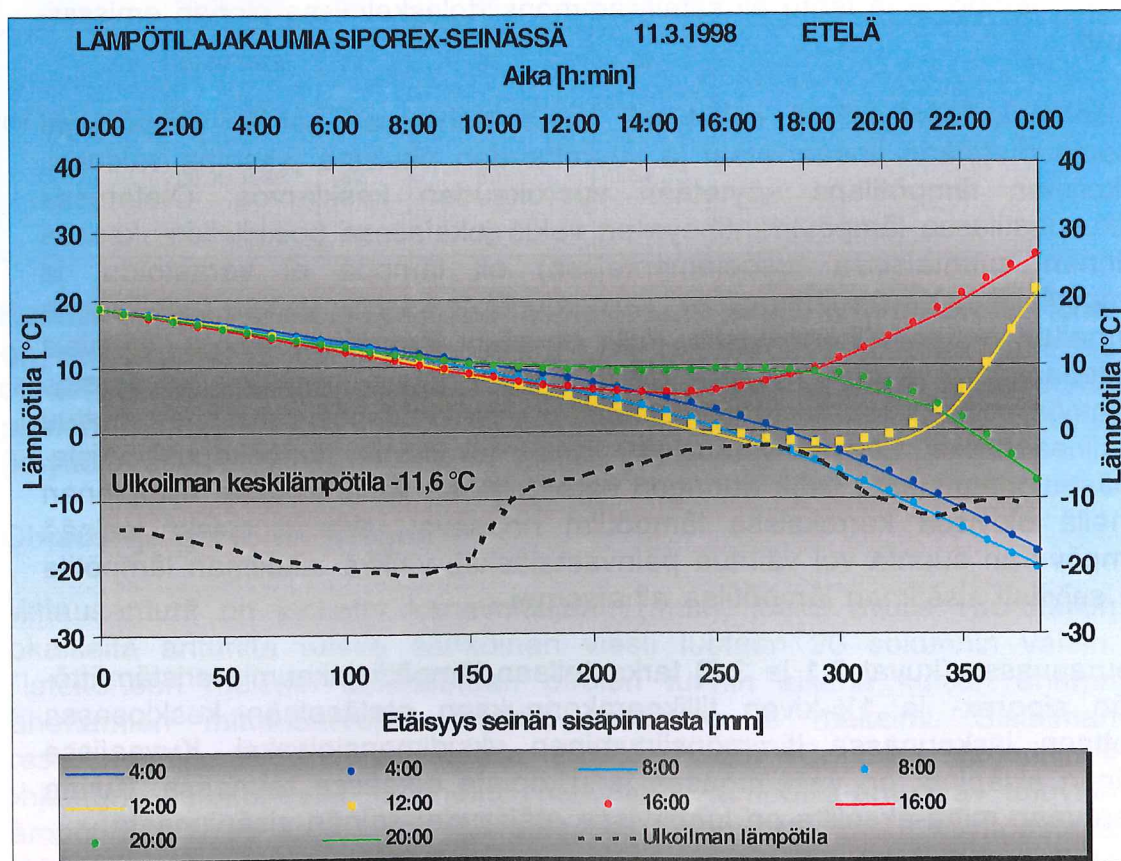
Ulkoseinän sisä- ja ulkopinnassa lämmönsiirtymismuodot ovat konvektio ja säteily. Konvektiolämmönsiirtoa tapahtuu pinnan ja ympäröivän virtaavan ilman välillä. Lämmönsiirtyminen säteilyllä vaipan sisäpinnalla on yleensä merkittävämpi lämmönsiirtymismuoto kuin konvektio. Ulkopinnalla määrittäviksi muodostuvat yleensä auringon säteily ja yön vastasäteily /18/. Pintaan osuvasta lämpösäteilystä osa heijastuu, osa absorboituu pintaan saaden yleensä aikaan pinnan lämpötilannousun (ol. konvektion jäähdyttävä vaikutus vähäinen) ja loppuosa säteilystä läpäisee pinnan, jos materiaali on lämpösäteilyä läpäisevää. Pinnan emittoimaan säteilytehoon vaikuttavat pinnan lämpötila ja laatu eli säteilylämmönsiirtolaskelmissa pinnan emissiiviteetti.

Viranomais määräyksissä esitetystä laskentaohjeesta seinän lämpötilajakauma oletetaan lineaariseksi ja vuorokauden pituisina jaksoina vakioksi. Ulkoilman lämpötilana käytetään vuorokauden keskiarvoa. Oletetussa jatkuvuustilassa lämpövirrantiheys on vakio jokaisessa poikkileikkauksessa (pinnan suuntaisissa tasoelementeissä) eli lämpöä ei varastoidu, ja lämpötilajakauma on lineaarinen. Jatkuvuustilataarkastelu vastaa todellisuutta parhaiten materiaalikerroksissa, joilla on pieni lämpökapasiteetti. Tällaisia materiaaleja ovat mm. kevyet lämmöneristeet, joissa konvektio on estetty. Lämmön varautuessa rakennusmateriaaliin seinän lämpötilajakauma muuttuu epälineaariseksi. Lämmönvarauskyky riippuu ulkoseinän lämpökapasiteetista. Epästationaarisuutta lisää auringon säteily, jonka vaikutuksesta ulkopinnan lähellä olevissa kerroksissa lämpötilat nousevat. Näissä osissa seinää lämpövirran suunta voi vaihtua päinvastaiseksi, vaikka ulkoilman lämpötila on selvästi sisäilman lämpötilaa alhaisempi.

Seuraavassa (kuvat 3.1 ja 3.2) tarkastellaan lämpötilajakaumia eristämättömän siporex- ja 1½-kiven tiilikoerakennuksen eteläseinän keskiosassa olettaen laskennassa lämmönsiirtyminen yksidimensioiseksi. Kuvaajissa seinän sisäpinta on vasemmalla ja ulkopinta oikealla reunassa. Kuvan alareunan mitta-akselilta on luettavissa etäisyydet seinän sisäpinnasta.

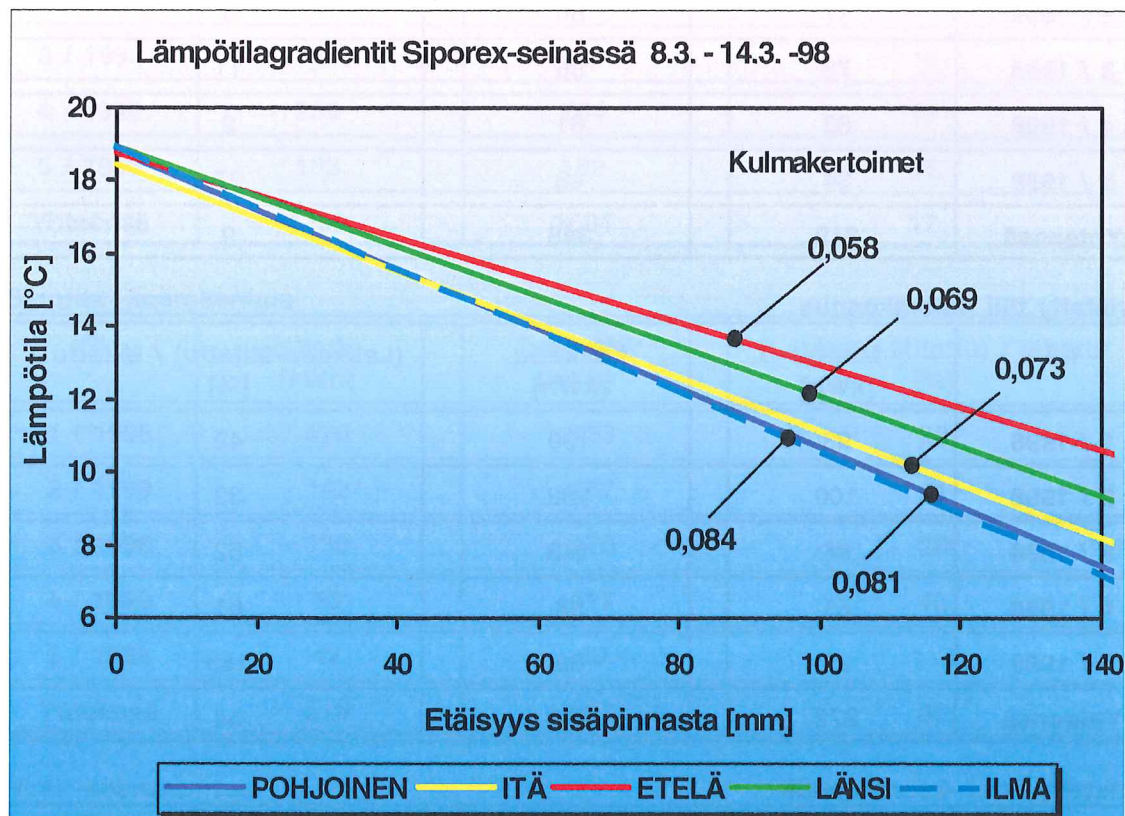


Kuva 3.1 Mitattuja ja laskettuja lämpötilajakaumia 1½ -kiven tiiliseinässä.



Kuva 3.2 Mitattuja ja laskettuja lämpötilajakaumia siporex-seinässä.

Mustalla katkoviivalla on esitetty ulkoilman lämpötila ja sitä vastaava ajankohta yläreunassa sijaitsevalla aika-akselilla. Seinärakenteesta mitatut lämpötilat on kuvattu jatkuvilla käyrillä ja vastaavana ajankohtana (4:00, 8:00, 12:00, 16:00, 20:00) differenssimenetelmällä lasketut lämpötilat yksittäisillä pisteillä. Vasemmassa ja oikeassa reunassa näkyvät lämpötilasteikot.



Kuva 3.3 Mitattujen lämpötilagradienttien kulmakertoimet siporex-seinän sisäpinnassa.

Kuvassa 3.3 on "suurennos" siporex-seinän sisäpinnasta, johon on piirretty tarkasteluajanjakson (8.3.98-14.3.98) aikana seinistä mitattujen lämpötilojen keskiarvoista kaikkien pääilmansuuntien lämpötilagradientit. Vaaleansininen katkoviiva kuvaa jatkuvuustilaa, ja se on piirretty käyttäen sisä- ja ulkoilman lämpötilojen keskiarvoista pintavastuksien avulla laskettuja pintalämpötiloja. Auringon lämmittäessä seinän ulkopintaa siirtyy lämpöä "viiveellä" kohti seinän sisäosaa, mikä vaikuttaa sisäpinnan lämpötilagradientin kulmakertoimeen ja vastaavasti ulos päin suuntautuvaan lämpövirtaan.

Taulukkoon 3.1 on laskettu ulkoseinien lämpöhäviöt (1.1.1998-31.5.1998) ns. jatkuvuustilassa sisä- ja ulkoilman puolen tunnin välein mitatuilla keskilämpötiloilla. Ulkoseinien pinta-alat on laskettu käyttäen tutkimuksessa määritettyjä p-kertoimia (Liite 8). Taulukossa on verrattu jatkuvuustilassa laskettua kulutusta koerakennuksista mitattuihin arvoihin.

Taulukko 3.1 Ulkoseinien mitatut ja jatkuvuustilassa lasketut lämpöhäviöt.**SPU -koerakennus**

K1	Mitattu [kWh]	Laskettu [kWh]	(Laskettu-Mitattu) / Mitattu [%]
1 / 1998	71	78	10
2 / 1998	77	80	4
3 / 1998	78	86	11
4 / 1998	60	61	2
5 / 1998	34	43	27
Yhteensä	319	348	9

Eristetty tiili -koerakennus

K2	Mitattu [kWh]	Laskettu [kWh]	(Laskettu-Mitattu) / Mitattu [%]
1 / 1998	93	130	40
2 / 1998	100	132	32
3 / 1998	94	143	52
4 / 1998	61	98	61
5 / 1998	24	69	183
Yhteensä	372	572	54

Eristetty hirsi -koerakennus

K3	Mitattu [kWh]	Laskettu [kWh]	(Laskettu-Mitattu) / Mitattu [%]
1 / 1998	103	121	17
2 / 1998	109	123	14
3 / 1998	115	133	16
4 / 1998	75	91	21
5 / 1998	41	61	47
Yhteensä	442	529	20

Taulukko 3.1 (jatkuu)

1½-kiven tiilikoerakennus

K4	Mitattu [kWh]	Laskettu [kWh]	(Laskettu-Mitattu) / Mitattu [%]
1 / 1998	331	369	12
2 / 1998	347	378	9
3 / 1998	350	411	18
4 / 1998	239	284	19
5 / 1998	133	192	45
Yhteensä	1399	1634	17

Siporex -koerakennus

K5	Mitattu [kWh]	Laskettu [kWh]	(Laskettu-Mitattu) / Mitattu [%]
1 / 1998	120	153	28
2 / 1998	142	157	11
3 / 1998	133	170	29
4 / 1998	83	117	42
5 / 1998	42	89	110
Yhteensä	519	687	32

Hirsi -koerakennus

K6	Mitattu [kWh]	Laskettu [kWh]	(Laskettu-Mitattu) / Mitattu [%]
1 / 1998	232	258	11
2 / 1998	239	267	12
3 / 1998	238	291	22
4 / 1998	155	197	28
5 / 1998	79	131	65
Yhteensä	943	1144	21

4 Mitatun ja laskennallisen energiankulutuksen tarkastelu

4.1 Koerakennusten energiankulutusmittaukset

Koerakennuksen lämmönlähteet ("lämmityslaitteet") ovat sähkölämmitin, tietokone ja ilmankostutin. Lisäksi lämmitysenergiassa on otettu huomioon mittauslaitteiden jännitelähteet ns. sisäisinä lämmönlähteinä. Tietokone, joka on jatkuvasti päällä, tuottaa koerakennukseen "peruslämmön". Sähkölämmittimen ja ilmankostuttimen käyntiajat tallentuvat tietokoneen muistiin. Ilmankostuttimen sähköenergiankulutuksesta vähennetään veden höyrystyslämpö.

Kokonaisenergiankulutusta mitataan kWh -mittareilla, jotka mittaavat kaikkien koerakennuksen sisäpuolella olevien sähkölaitteiden sähkönkulutuksen. Vaipan lämpöhäviöt lasketaan vähentämällä mittarilukemasta ilmanvaihdon ja veden faasimuutoksen osuudet. Ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia lasketaan kaavalla 4.1. Kohdassa 4.3 esitetään mitattujen kulutustietojen ja laskettujen lämmitysenergian kulutusennusteiden vertailu.

$$Q_{IV} = c_i \times \rho_i \times v_i \times (T_{IV} - T_U) \times \Delta t \quad (4.1)$$

Q_{IV}	ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia, kWh
c_i	ilman ominaislämpö, 0,281 kWh/kgK
ρ_i	ilman tiheys, n. 1,2 kg/m ³
v_i	ilmanvaihdon tilavuusvirta, m ³ /h (mittausvälin keskiarvo)
T_{IV}	ilmanvaihdon poistoilman lämpötila, °C (mittausvälin keskiarvo)
T_U	ilmanvaihdon tuloilman lämpötila, °C (= ulkoilman lämpötila, mittausvälin keskiarvo)
Δt	mittausväli, 0,5 h

4.2 Laskennallinen energiankulutus

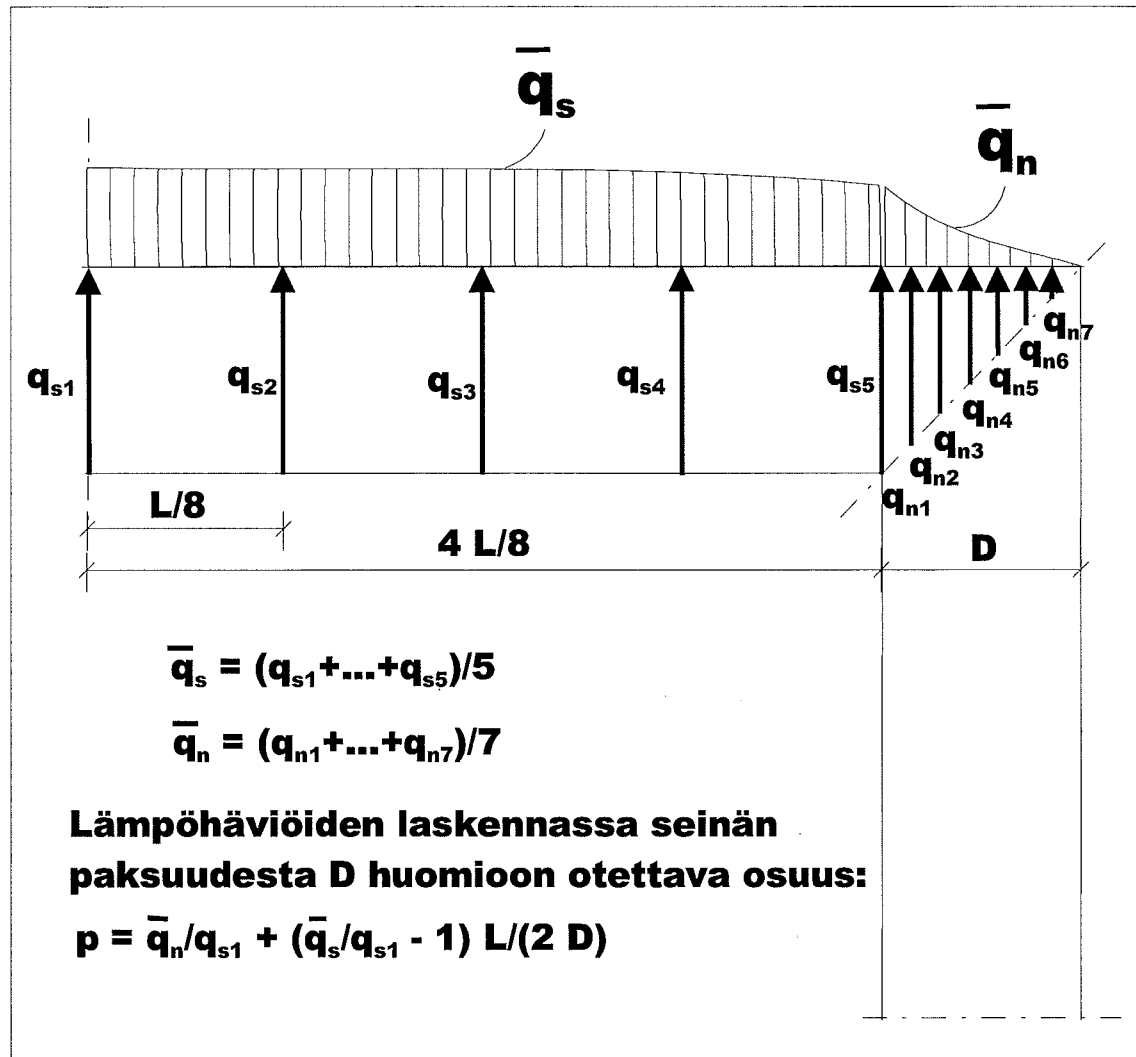
Nurkan johtumislämpöhäviöiden määrittäminen

Differenssilaskentaa sovelletaan rakennuksen nurkkien lämpöhäviöiden määrittämiseen. Laskennassa käytetään koerakennusten seinien keskeltä ja nurkista ulko- ja sisäpintoista sekä ylä- ja alapohjien ulkopinnoista mitattuja pintalämpötiloja. Neljässä koerakennuksessa lämpötila-antureita on asennettu sisä- ja ulkonurkan väliselle linjalle. Differenssimenetelmällä laskettuja lämpötiloja verrataan antureilla mitattuihin lämpötiloihin.

Nurkat on mallinnettu kaksiulotteisesti liitteessä 7 esitetyllä tavalla. Lämpöhäviöt lasketaan differenssilaskennasta saatuja laskentapisteen lämpötiloja ja tutkittavan rakenneosan lämmönjohtavuusarvoja käyttäen. Nurkan lämpövirta lasketaan seinän sisäpinnan tai sisä-ulkonurkkalinjan ja ulkopinnan lämpötila-erojen avulla (kuva 4.1).

Nurkan lämpöhäviöitä laskettaessa oletetaan seinän sisä- ja ulkopinnan lämpötilan muuttuvan lineaarisesti seinän keskiosasta ja nurkasta mitattujen lämpötilojen välillä. Ylä- ja alapohjan lämpövirran laskennassa lämpötilana käytetään ylä- ja alapohjan ulkopinnasta mitattua lämpötilaa ja koerakennuksen keskimääräistä sisälämpötilaa.

Kuvassa 4.1 esitetään nurkkakertoimien määrittystapa. Kuvan periaatteiden mukaisesti differenssimenetelmällä lasketaan suoran seinän ja nurkan lämpövirta sekä niiden suhde.



Kuva 4.1 Nurkkakertoimien määrittämisessä käytetty periaate.

Seinän tai ylä-/alapohjarakenteen keskimääräinen lämpöhäviö lasketaan kaavalla 4.2 (liite 7).

$$\bar{q}_s = - \sum_{i=1}^n (T_{spi} - T_{upi}) \lambda_i / d_i \quad (4.2)$$

Nurkan keskimääräinen lämpöhäviö lasketaan kaavalla 4.3 (liite 7).

$$\bar{q}_n = - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (T_i - T_{upi}) \lambda_i / d_i \quad (4.3)$$

n	laskentapisteparien lukumäärä seinässä tai ylä-/alapohjassa
m	laskentapisteparien lukumäärä nurkassa
T_{spi}	rakennekerroksen sisäpinnan lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
T_{upi}	rakennekerroksen ulkopinnan lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]
T_i	laskentapisteen lämpötila nurkassa [$^{\circ}\text{C}$]
λ_i	rakennekerroksen lämmönjohtavuus [$\text{W}/(\text{Km})$]
d_i	tarkasteltavien laskentapisteen välimatka [m]

Differenssilaskennalla saatujen nurkan ja muun seinän lämpöhäviöiden avulla voidaan määrittää kuinka suuri osuus risteävän seinän paksuudesta rakennuksen nurkassa tulee lämpöhäviöiden laskennassa ottaa huomioon. Tämä voidaan ratkaista kirjoittamalla taseyhtälö (kaava 4.4), jossa seinän ja nurkan keskimääräisillä lämpövirrantiheyksillä saatava lämpöhäviö asetetaan yhtä suureksi seinän keskiosan lämpövirrantiheydellä ja laskennallisilla mitoilla määritettävän lämpöhäviön kanssa.

$$Q' = \bar{q}_s \frac{L}{2} + \bar{q}_n d = q_{s1} \left(\frac{L}{2} + p d \right) \quad (4.4)$$

Q'	seinän tai yläpohjan lämpövirta pituusyksikköä kohden [W/m]
L	seinän sisämitta [m]
d	seinän paksuus [m]
q_{s1}	seinän keskiosan lämpövirrantiheys [W/m^2]
p	nurkasta huomioitava osuus

Laskennallisia pinta-aloja määritettäessä nurkasta otetaan siten huomioon kerrointa p vastaava osuus, joka voidaan laskea kaavasta 4.4 johdetulla kaavalla 4.5.

$$p = \left(\frac{\bar{q}_s}{q_{s1}} - 1 \right) \frac{L}{2d} + \frac{\bar{q}_n}{q_{s1}} \quad (4.5)$$

Laskennallisten pinta-alojen määrittäminen

Suhdeluvun p (kaava 4.5) avulla voidaan määrittää, kuinka suuri osuus risteävän rakenteen (ulkoseinä, ylä- tai alapohja) paksuudesta rakennuksen nurkissa tulee ottaa huomioon määritettäessä laskennallista vaipan pinta-alaa, jonka kautta lämpöhäviöiden voidaan olettaa tapahtuvan. Ko. pinta-alasta käytetään tämän raportin yhteydessä nimitystä "laskennallinen" pinta-ala. Laskennallinen pinta-ala määritetään lisäämällä rakennuksen sisämittoihin seinien sekä ylä- ja alapohjan paksuudesta edellä mainitun kohdan mukaan määritetty osuus.

Taulukossa 4.1 esitetään differenssimenetelmällä ja edellä mainituilla periaatteilla lasketut p -arvot eri koerakennuksille. Kertoimia p_1 ja p_2 käytetään arvioitaessa seinien laskennallista pinta-alaa. Tällöin seinän sisäpituuteen lisätään seinän paksuus kerrottuna $2 \times p_1$:llä ja sisäkorkeuteen ylä- ja alapohjan paksuus kerrottuna p_2 :lla (tässä tapauksessa y_p ja a_p samanlaiset). Yläpohjan tehollinen pinta-ala lasketaan lisäämällä sisämittoihin seinän paksuus kerrottuna $2 \times p_3$:lla.

Taulukko 4.1 Nurkille lasketut p-kertoimet laskennallisten pinta-alojen määrittämiseksi.

	SPU	Eristetty tiili	Eristetty hirsi	Tiili	Siporex	Hirsi
p1, seinän leveys	0,14	0,36	0,10	0,20	0,30	0,04
p2, seinän korkeus	0,40	0,18	0,20	0,01	0,07	0,07
p3, ylä- ja alapohja	0,25	0,52	0,34	0,48	0,49	0,41

Nurkan vaikutus vaipan lämpöhäviöissä otetaan huomioon laskennallisilla pinta-aloilla. Menetelmällä saavutettavaan laskentatarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti se, miten tarkasti p-kertoimet pystytään määrittämään. Taulukossa 4.1 esitetyt kertoimet on laskettu koerakennuksien rakenteille ja rakennerekaisuille, ja niitä voidaan käyttää vaipan lämpöhäviöiden määrittämiseen vain tämän tutkimuksen yhteydessä.

Koerakennuksen lämpöhäviöitä lasketaan neljällä tavalla:

1. jatkuvuustilassa käyttäen todellisia ulko- ja sisäilman lämpötiloja
2. jatkuvuustilassa käyttäen astepäivälukuja
3. jatkuvuustilassa käyttäen todellisia ulko- ja sisäilman lämpötiloja ja laskennallisia pinta-aloja
4. differenssilaskennalla (luku 3).

RakMk D5 (Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiantarpeen laskenta) edellyttää, että seinän läpi johtumalla kuluva lämpöenergian laskennassa käytetään ulkopinta-aloja. Kolmas kohta eroaa tältä osin D5:n mukaisesta seinän läpi johtuvan energian laskennasta. Vaipan lämpöhäviöt lasketaan sekä astepäiväluvuilla että mitatuilla lämpötiloilla.

Rakenteiden läpi johtuva energia lasketaan D5:n mukaisesti rakennusosakohtaisesti ja summataan seuraavasti (kaava 4.6):

$$Q_{\text{joht}} = \sum (k A 24 S) / 1000 \quad (4.6)$$

Q_{joht} rakenteiden läpi johtuva energia, [kWh]
 k kunkin rakennusosan lämmönläpäisykerroin, [$W/(K m^2)$]
 A kunkin rakenneosan pinta-ala, [m^2]
 S paikkakunnan ko. jakson astepäiväluvu, [Kd]
24 kerroin, joka muuttaa astepäiväluvun astetunneiksi
1000 kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

Lämpöhäviöiden laskennassa käytetään eri materiaalien tyyppihyväksytyjä lämmönjohtavuusarvoja siltä osin kuin niitä on saatavilla. Muussa tapauksessa käytetään taulukkokirjoissa esitettyjä arvoja. Laskennassa käytettävät lämmönjohtavuudet ja niiden tyyppihyväksyntätiedot on koottu liitteeseen 4.

4.3 Energiankulutuksen mittaus- ja laskentatulokset

Kuvassa 4.2 esitetään eri koerakennuksista mitatut ja lasketut vaipan lämpöhäviöt. Koerakennusten energiankulutukset on mitattu kohdassa 4.1 ja laskennalliset energiankulutukset määritetty kohdassa 4.2 mainittujen periaatteiden mukaan. Kuvaajien yläpuolella esitetään laskennallisten ja mitattujen vaipan lämpöhäviöiden suhde ennen ja jälkeen nurkkien "pinta-alakorjauksia".

Kaikissa koerakennuksissa mitattu energiankulutus on pienempi kuin RakMk D5:ssä annetun laskentaohjeen mukaan määritetty lämmitysenergian tarve.

Seuraavassa on esitetty (todennäköisimpiä) syitä todettuun eroon:

- ns. nurkkavaikutus: D5:n mukaiset ulkomittoihin perustuvat laskentapinta-alat johtavat todellista suurempiin energiankulutusarvoihin
- materiaalien lämmönjohtavuusarvojen poikkeaminen todellisista
- seinän ulkopintaan absorboituvan auringon säteilyenergian eli ns. ilmaisenergian vaikutuksesta.

Jotta rakennusten energiankulutusta voitaisiin nykyistä tarkemmin arvioida myös yksinkertaistetuilla laskentamenetelmillä, tulisi seuraaviin asioihin kiinnittää huomioita:

- energiankulutuksen laskennassa käytettävien ulkoseinän johtumispinta-alojen määrittämiseen
- todellisia rakenteita ja käyttöolosuhteita vastaavien lämmönjohtavuusarvojen määrittämiseen
- menetelmien kehittämiseen auringon säteilyenergian vaikutusten arviointiin.

Koerakennuksissa ilmanvaihdon lämpöhäviö voidaan suhteellisen tarkasti määrittää, koska ilmanvaihdon tilavuusvirtaa mitataan jatkuvasti. Asutuissa rakennuksissa lämmitysenergian tarpeen laskentatarkkuuteen vaikuttavat em. ohella ilmanvaihdon säätöjärjestelmä ja asumistottumukset.

Nurkkavaikutuksella -sillä että energiaa kuluu nurkista johtumalla todellisuuksessa vähemmän kuin mitä ulkomitoilla laskettaessa- on sitä suurempi merkitys, mitä pienempi rakennus on kyseessä. Suhteellisen pienissä koerakennuksissa nurkan kautta johtuvan lämpöenergian vaikutus ylikorostuu nurkkien suuren osuuden vuoksi suhteessa muuhun seinäpinta-alaan. Nurkkien kautta johtuvan lämpöenergian osuus myös vaihtelee ajan funktiona suhteessa muun seinän kautta johtuvaan energiaan.

Mittaus- ja laskentatulokset koerakennuksittain

SPU-koerakennus

SPU-koerakennuksessa mittaus- ja koetulokset vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Ero vaipan mitatun ja lasketun lämpöhäviön välillä on ennen nurkkavaikutuksen korjausta 30 % ja sen jälkeen noin 8 % (kuva 4.2).

Eristetty tiilikoerakennus

Eristetyssä tiilikoerakennuksessa vaipan mitatun ja lasketun lämpöhäviön ero on ennen nurkkavaikutuksen korjausta 67 % ja sen jälkeen noin 31 % (kuva 4.2). Suuri ero johtunee ulkokuoren tummasta väristä ja lämmönvarauskyvystä, joiden ansiosta se voi absorboida ja varastoida auringon säteilyenergiaa.

Lisälämmöneristetty hirsikoerakennus

Lisälämmöneristetyn hirsikoerakennuksen vaipan laskennallisen ja mitatun lämpöhäviön välinen ero on ennen nurkkakorjausta 57 % ja sen jälkeen noin 14 % (kuva 4.2).

1½-kiven tiilikoerakennus

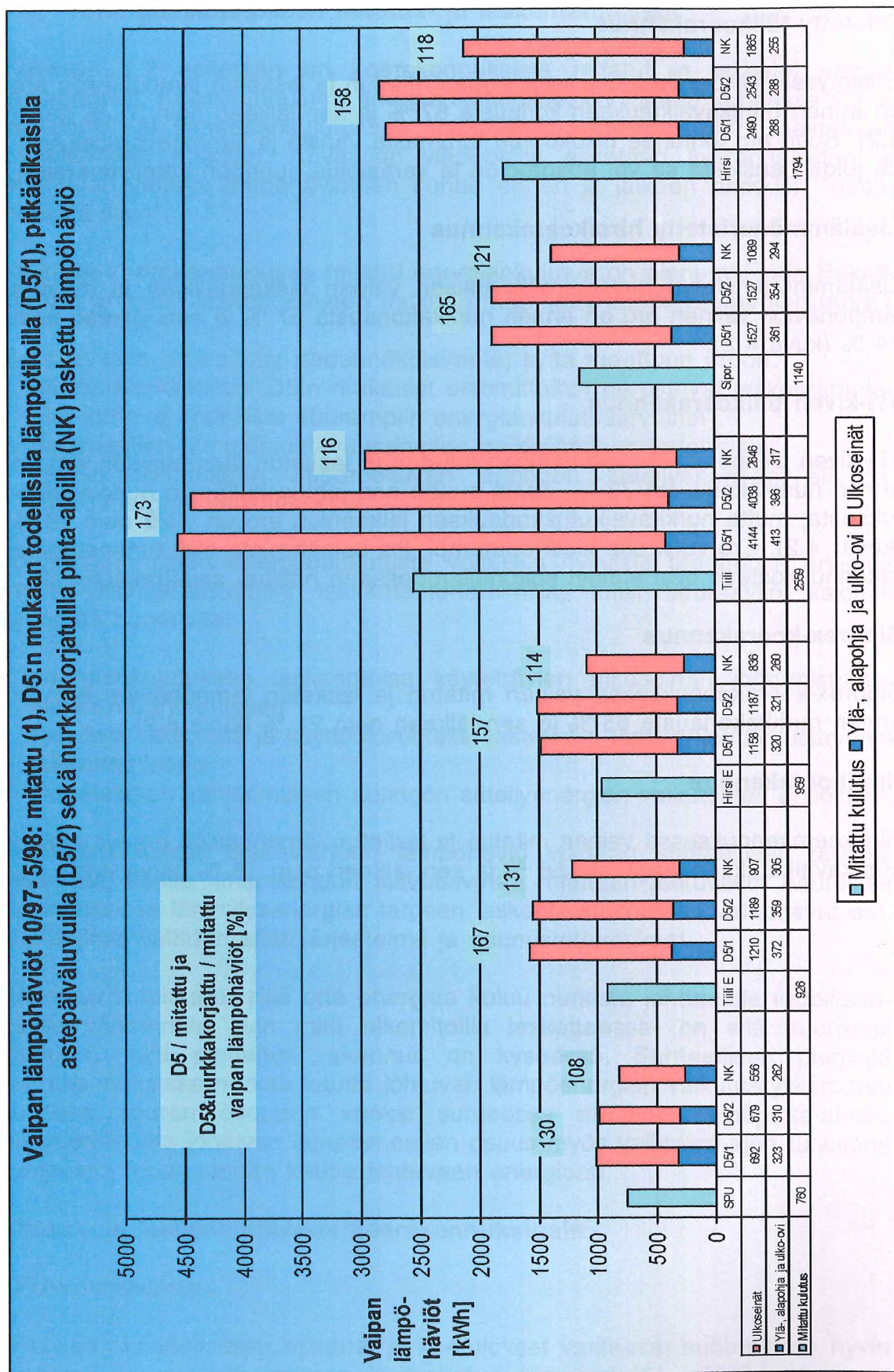
1½-kiven tiilikoerakennuksen vaipan mitatun ja lasketun lämpöhäviön ero on ennen nurkkakorjausta 73 %. Tästä suurin osa johtuu kuitenkin nurkkavaikutuksesta, mutta nurkkavaikutuskorjauksen jälkeenkin ero on vielä noin 16 % (kuva 4.2). Ero voisi olla vielä suurempi, jos seinän pinta olisi tummempi ja rakennuskosteus olisi ehtinyt kokonaisuudessaan poistua seinärakenteesta.

Siporex-koerakennus

Siporex-koerakennuksessa vaipan mitatun ja lasketun lämpöhäviön ero on ennen nurkkakorjausta 65 % ja sen jälkeen noin 21 % (kuva 4.2).

Hirsikoerakennus

Hirsikoerakennuksessa vaipan mitatun ja lasketun lämpöhäviön ero on ennen nurkkavaikutuksen korjausta 58 % ja sen jälkeen noin 18 % (kuva 4.2).



Kuva 4.2 Mitatut ja lasketut energiankulutusarvot.

5 Auringon säteilyn vaikutus ulkoseinässä

RakMk D5:ssa ei arvioida auringon säteilyn vaikutusta seinän lämpöhäviöihin, vaan siinä otetaan huomioon vain ikkunoiden kautta rakennukseen tuleva auringon säteily.

CEN:n standardiluonnoksen /17/ mukaan läpinäkymättömälle seinäpinnalle tulevan auringon säteilyenergian merkitys on vähäinen, ja se voidaan yleensä jättää huomioonottamatta. Jos läpinäkymättömän vaipan energiatase halutaan määrittää ottaen huomioon auringon säteilyenergian ja yön vastasäteilyn vaikutus, voidaan käyttää kaavaa 5.1.

$$Q_s = U A R_e (\alpha q_{sj} - F_f \alpha_r \Delta\theta_{er} t) \quad (5.1)$$

Q_s	nettosäteilyenergia, [Wh]
U	rakenneosan lämmönläpäisykerroin, [W/Km ²]
A	rakennusosan pinta-ala, [m ²]
R_e	rakenteen pinnan lämmönvastus, [Km ² /W]
α	rakenteen pinnan auringon säteilyn absorptiokerroin
q_{sj}	auringon kokonaissäteily tarkasteltavassa suunnassa, [Wh/m ²]
F_f	rakenteen suuntauksesta johtuva kerroin (vaakapinnalle 1, pystypinnalle 0,5)
α_r	säteilylämmönsiirtokerroin, [W/Km ²]
$\Delta\theta_{er}$	keskim. ulkolämpötilan ja yön vastasäteilylämpötilan välinen ero, [K]
t	tarkastelujakson pituus, [h]

Kaava 5.1 voidaan johtaa tehotaseyhtälöstä.

$$\alpha I (1) + h_e g (2) + \alpha_{cv} (T_u - T_{up}) (3) + \alpha_r (T_v - T_{up}) (4) + \frac{T_s - T_{up}}{R_T - R_e} (5) = 0$$

(5.2)

α	pinnan absorptiosuhde
I	auringon säteilyteho [W/m ²]
h_e	veden höyrystymislämpö [J/kg]
g	kosteusvirrantiheys [kg/m ² s]
α_{cv}	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin, [W/Km ²]
T_u	ulkolämpötila, [K]
T_{up}	rakenteen ulkopinnan lämpötila, [K]
T_v	vastasäteilylämpötila, [K]
T_s	sisälämpötila, [K]
R_T	rakenteen lämmönvastus, [Km ² /W]
α_e	rakenteen pinnan lämmönsiirtokerroin, [W/Km ²], ($\alpha_e = \alpha_{cv} + \alpha_r$)

Kaavassa 5.2 ensimmäinen termi ottaa huomioon sen osan (α) pinnalle osuvasta lämpösäteilystä, joka absorboituu seinäpintaan (muuttuu sisäenergiaksi). Toinen termi ottaa huomioon kosteuden tiivistyessä vapautuvan faasimuutosenergian, kolmas termi seinäpinnalta konvektiolla ja neljäs termi säteilemällä siirtyvän lämmön. Viides termi määrittää lämpövirran rakenteen läpi.

Kaavassa 5.2 esiintyvä seinän ulkopinnan lämpötila T_{up} voidaan laskea kaavalla 5.3.

$$T_{up} = T_{ee} + \frac{R_e}{R_T} (T_s - T_{ee}) \quad (5.3)$$

- T_{up} rakenteen ulkopinnan lämpötila, [K]
 T_{ee} ekvivalentti ulkolämpötila, joka voidaan laskea kaavalla 5.4.
 R_e rakenteen pinnan lämmönvastus, [Km²/W]
 R_T rakenteen lämmönvastus, [Km²/W]
 T_s sisälämpötila, [K]

$$T_{ee} = T_u + \frac{\alpha_r}{\alpha_e} (T_v - T_u) + \frac{\alpha l}{\alpha_e} + \frac{h_e g}{\alpha_e} \quad (5.4)$$

- T_{ee} ekvivalentti ulkolämpötila, [K]
 T_u ulkolämpötila, [K]
 α_r säteilylämmönsiirtokerroin, [W/Km²]
 α_e pinnan kokonaislämmönsiirtokerroin, [W/Km²], ($\alpha_e = \alpha_{cv} + \alpha_r$)
 T_v yön vastasäteilylämpötila, [K]
 α rakenteen pinnan auringon säteilyn absorptiokerroin
 l auringon säteilyteho [W/m²]
 h_e veden höyrystymislämpö [J/kg]
 g kosteusvirrantiheys [kg/m²s]

Kaavoista 5.2, 5.3 ja 5.4 päädytään kaavaan 5.1 eliminoimalla osa termeistä. Kaavan 5.2 viimeisestä termistä, joka määrittää rakenteen läpi johtuvan lämpövirran, vähennetään sisä- ja ulkolämpötilan mukaan laskettu lämpövirta, jolloin jäljelle jää seinäpinnan absorboima auringon säteilyteho. Laskennassa oletetaan, että lämpötilajakauma seinän sisällä on lineaarinen ulko- ja sisäpinnan välillä.

Kaava 5.1 perustuu tarkasteluun, jossa auringon säteilyenergia määritetään lämpöhäviöiden erotuksena laskemalla lämpövirrat seinän ulkopinnan ja sisäilman lämpötiloilla sekä ulko- ja sisäilman lämpötiloilla. Tehotaseyhtälöstä 5.2 johdetun auringon säteilyenergiaa arvioivan kaavan 5.1 puutteena voitaneen pitää sen lineaarista lämpötilajakaumaoletusta, jossa ei oteta huomioon lämmön varautumista seinärakenteeseen.

Todellisuudessa lämpötilajakauma on varsinkin eteläseinässä auringon säteilyn vaikutuksesta epälineaarinen (luku 3) seinän ulkopinnan ollessa muuta rakennetta huomattavasti lämpimämpi. Pintaan absorboituneen lämpösäteilyn aiheuttama lämpötilan nousu muuttaa lämpövirran suunnan kohti alemmassa lämpötilassa olevia seinän sisäosia. Seinärakenteeseen varautuu lämpöä, mikä hidastaa lämmönjohtumista rakennuksen sisältä ulos.

Myös kaavan 5.4 mukaista **ekvivalenttilämpötilaa** on käytetty energiankulutuksen laskennassa ulkolämpötilan sijasta. Tässäkin menetelmässä lämpötilajakuma oletetaan lineaariseksi (jatkuvuustila).

Jos auringon säteilyn merkitys vaipan lämpötekniseen toimintaan halutaan ottaa tarkasti huomioon, auringon säteilyenergian vaikutusta tulisi arvioida epäjatkuvuustilassa esimerkiksi differenssi- tai elementtimenetelmän avulla mahdollisimman lyhyttä aika-askelta käyttäen. Ulkoseinän johtumislämpöhäviöt voidaan siten laskea tarkemmin seinärakenteen sisältä saatavien mitattujen ja laskettujen lämpötila-arvojen avulla edellyttäen, että laskennassa käytetyt materiaalien lämmönjohtavuudet ovat riittävän tarkasti tiedossa.

6 Ilmanläpäisevyyden vaikutus rakennusosan lämmöneristyskykyyn

Ilmanläpäisevyys voi heikentää merkittävästi rakenteen lämmöneristyskykyä. Varsinkin hyvin eristetyissä rakenteissa huolimaton työnsuoritus tai virheellinen rakennustapa saattavat vaikuttaa vaipan tiiviyyteen ja lämmönkulutukseen oleellisesti. Rakennuksen vaipan ilmatiiviyttä mitataan mm. painekokeella. Ilmatiiviyysvaatimus on saavutettavissa lämmöneristeen lämpimälle puolelle asennettavalla muovikalvolla, joka estää ilman läpivirtauksen, mutta sen lisäksi lämmöneriste tulisi suojata ulkopuolelta, koska ilmavirtaukset eristetilassa alentavat lämmöneristysten eristysominaisuuksia. Lämmöneristysten suojaaminen tuulelta on erityisen tärkeää rakennuksen nurkissa, räystäillä ja yleensä niissä osissa vaippaa, joissa paineen vaihtelut ovat suuria /13/.

Rankaseinät

Yleisimmin puu- ja teräsrankaseinien lämmöneristeenä käytetään huokoisia, ilmanläpäiseviä materiaaleja kuten mineraalivilloja ja puupohjaisia materiaaleja, joiden lämmöneristyskyky perustuu paikallaan pysyvään ilmaan.

Jos lämmöneristysten ulkopuolella oleva rakennekerros ei ole riittävän ilmatiivis (esim. hyvin huokoinen, ohut puukuitulevy) tai jos julkisivumateriaalin saumojen tai sen ja kantavan rungon liittymien ilmavuodot ovat suuria, tuulenpaine pääsee vaikuttamaan huokoisen lämmöneristysmateriaalin ilmahuokosiin /8/. Lämmöneristävyys heikkenee myös lämmöneristystilassa tapahtuvan rakennevirtauksen vuoksi, jos lämmöneristysmateriaali ei täytä sille varattua tilaa. Huokoisissa lämmöneristysmateriaaleissa rakennevirtaus on mahdollista lämmöneristysten sisällä, vaikka se täyttäisikin tiiviisti koko eristetilan. Hyvän lämmöneristävyyden saavuttamiseksi ilmanläpäisevä lämmöneriste on suojattava ilmatiiviillä, huolellisesti saumatulla rakennekerroksella ja lisäksi paikallisia paine-eroja tulisi tasata rakenteellisin keinoin /8/, /11/, /13/.

Jos lämmöneristyskerroksen ulkopuolella oleva ilmatiiviskerros ei ole riittävän jäykkä (esim. rakennuspaperi), tuulenpaineen muutokset voivat aiheuttaa tuulensuojassa edestakaista liikettä, joka saa lämmöneristyskerroksessa olevan ilman vuorotellen puristumaan ja laajenemaan. Lämmöneristysten läpi vaakasuunnassa liikkuva ilma lisää lämmönsiirtymistä sisältä ulos. Jos seinän sisäpinta ei ole riittävän ilmatiivis (materiaalin ilmanläpäisevyys, saumat, läpiviennit), tuulensuojan liikkeet saavat aikaan läpivirtauksen ja siihen liittyvän lämmönsiirtymisen sisäilman ja lämmöneristyskerroksen välillä /8/.

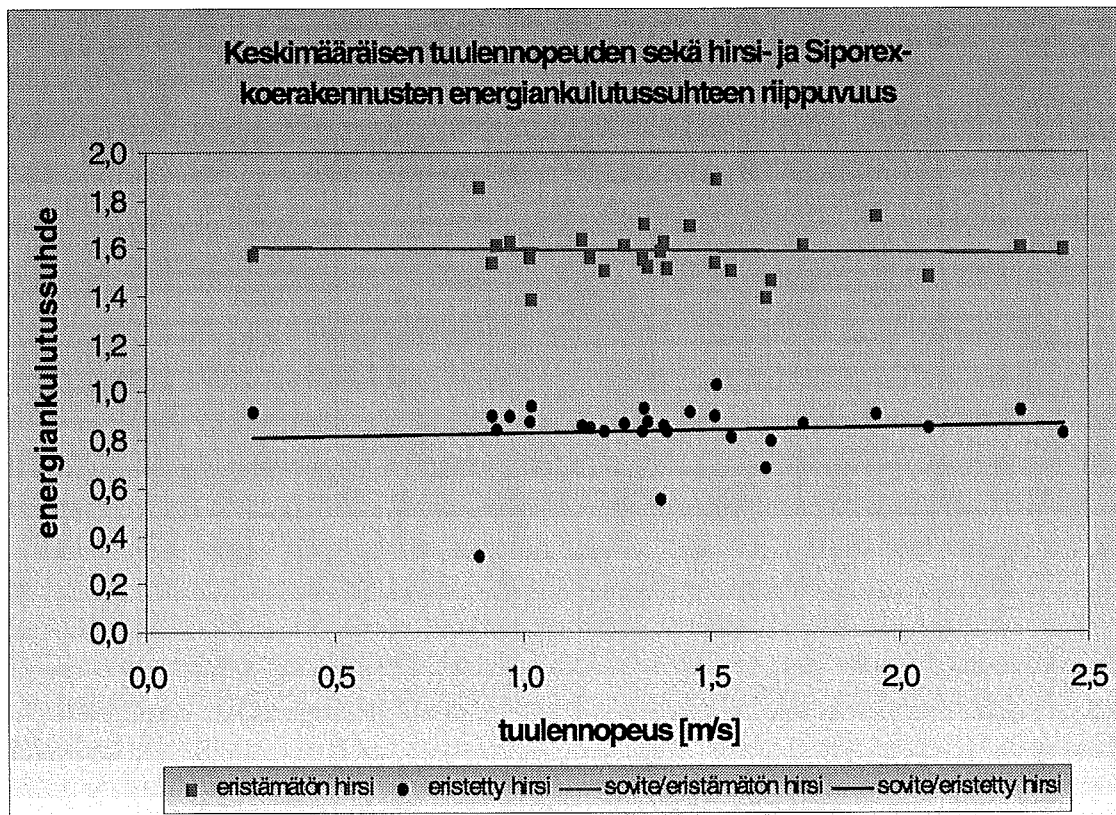
Rankaseinän lämmöneristeenä käytetään nykyään myös hyvin ilmatiiviitä materiaaleja, kuten alumiinifoliolla pinnoitettua polyuretaania. Polyuretaanilevyistä koostuvan lämmöneristeen saumat tiivistetään tavallisesti paisuvalla polyuretaanivaahdolla, jolloin rakennekerros toimii tehokkaana ilmansulkuna, eikä erillistä höyrynsulkua tai tuulensuojaa tarvita.

Tiiliseinät

Tiiliseinissä käytetyt kevyet mineraalivillaeristeet suojataan tuulenpaineen aiheuttamilta ilmvirtauksilta erillisellä tuulensuojalla samoista syistä kuin rankaseinissäkin.

Lämmöneristämättömät seinät

Harkoista muurattu siporex-seinä ja kevytsoralaastilla muurattu 1½-kiven tiiliseinä ovat suhteellisen ilmatiiviitä koerakennuksissa tehtyjen tiiviyskokeiden perusteella. Paineekokeen tuloksia arvioitaessa on kuitenkin otettava huomioon, että koerakennusten ylä- ja alapohjarakenteet ovat erittäin tiiviitä. Tiiviyskokeen aikana ulko-ovien kohdalla havaittiin ilmavuotoja, joita voitaneen vähentää tiivistystoimenpitein. Tarvittaessa ulko-ovien epätiiviyys mitataan rakennekohtaisella tiiviyskokeella. Hirsikoerakennusten ilmatiiviysmittauksessa hirsien saumojen ja etenkin nurkkien vuotoilmamäärät olivat niin suuria, ettei koerakennukseen asennetulla kanavapuhaltimella 50 Pa:n painekokeessa saatu sisä- ja ulkoilman väliseksi paine-eroksi kuin 10 Pa, kun mitattu poistoilmamäärä vastasi ilmanvaihtuvuutta 4 1/h. Hirsikoerakennuksissa osa ilmanvaihdon korvausilmasta tulee sisälle epätiiviyden seinärakenteiden kautta. Tuuliolosuhteiden vaikutusta hirsikoerakennusten lämmönkulutukseen ei mittaustuloksista kuitenkaan ole nähtävissä (kuva 6.1).



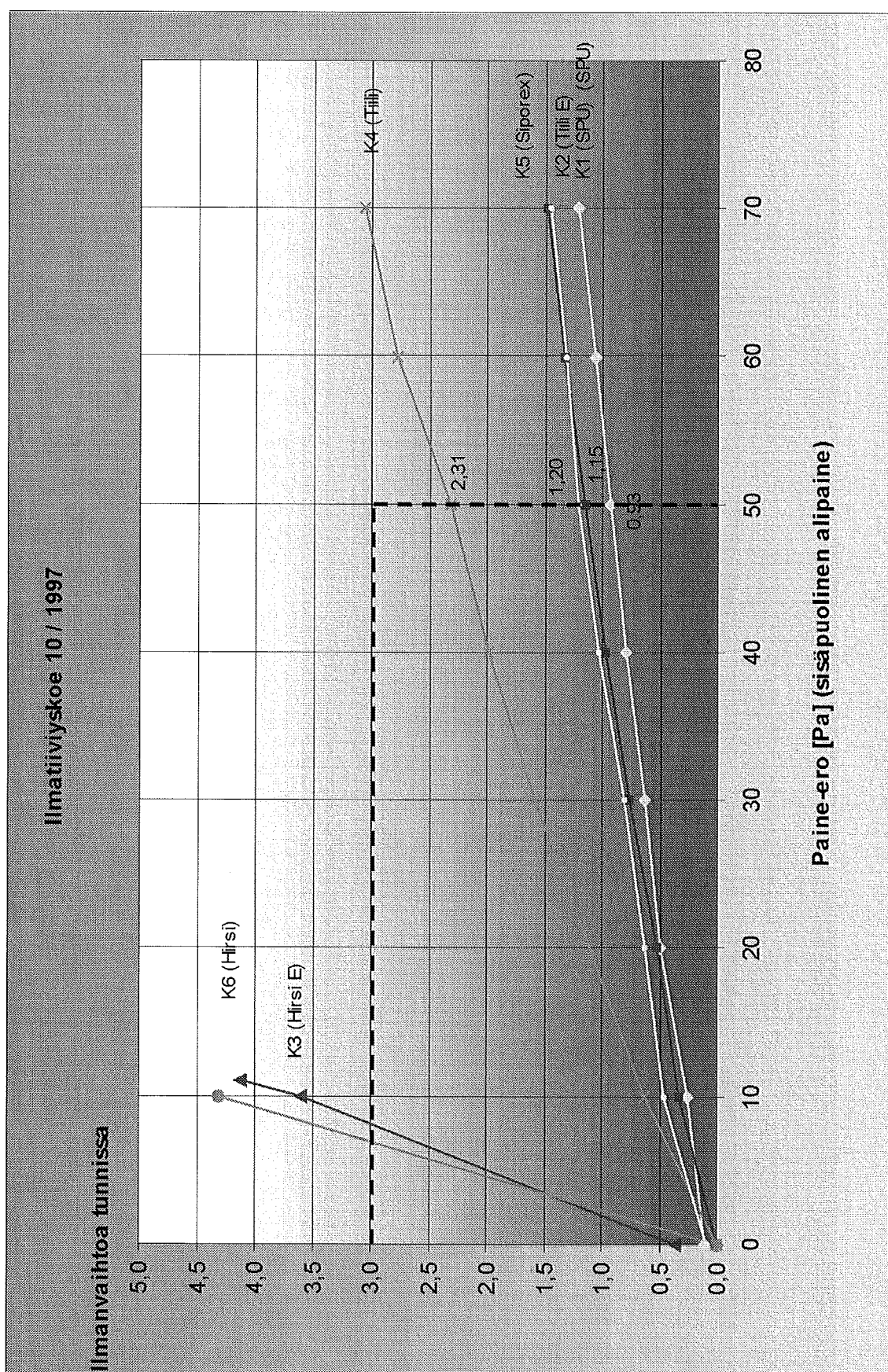
Kuva 6.1 Tuulisuuden vaikutus hirsi- ja siporex -koerakennuksen lämmitysenergiankulutuksen suhteeseen.

Koerakennusten ilmatiiviysmittaukset

Koerakennusten ulkovaipan ilmatiiviys mitattiin painekokeella, jossa kanavapuhaltimella poistettiin ilmaa rakennuksen sisältä aiheuttaen paine-ero sisä- ja ulkoilman välille. Kokeessa mitattiin aikayksikössä poistuva ilmamäärä [l/s] ja sitä vastaava paine-ero. Tuloilmaventtiili tiivistettiin ilmastointiteipillä kokeen ajaksi. Yleensä tilavuusvirta mitataan 10, 20, 30, 40 ja 50 Pa:n paine-eroilla. Ulkovaipan vuotoilmavirta saadaan, kun mitattuun tilavuusvirtaan tehdään ns. lämpötilakorjaus. Tiiviyskokeen tulos ilmoitetaan tavallisesti 50 Pa:n ali- ja ylipaineella mitattujen ilmavuotolukujen n_{50} keskiarvona. Ilmavuotoluku on vuotoilman (m^3/h) ja mittauskohteen tilavuuden suhde (= vaihtoa tunnissa). Tässä mittauskohteen tilavuus on koerakennuksen ulkovaipan sisäpintojen rajoittama tila ($V = 15 m^3$). Ilmavuotoluvun n_{50} ylärajaksi on kirjallisuudessa /10/ esitetty omakoti- ja rivitaloille arvoja 3,0-4,0, muille enintään kaksikerroksisille rakennuksille arvoja 2,0-3,0 ja yli kaksikerroksisille rakennuksille arvoja 1,0-1,5. Sisäpuolinen ylipaine antaa ylärajan ja alipaine alarajan mittauskohteen ilmanläpäisevyydelle. Taulukossa 6.1 ja kuvassa 6.2 on esitetty koerakennuksien ilmatiiviyskokeen tulokset. Ilmatiiviyyden muutoksia seurataan jatkossa määrääjain toistuvien tiiviyskokein.

Taulukko 6.1 Koerakennusten ilmatiiviyskokeen tulokset (sisäpuolinen alipaine).

Koerakennus	K1 SPU	K2 Tiili E	K3 Hirsi E	K4 Tiili	K5 Siporex	K6 Hirsi
Paine-ero [Pa]	1 / h	1 / h	1 / h	1 / h	1 / h	1 / h
0	0,10	0,00	0,36	0,00	0,09	0,00
10	0,25	0,33	3,60	0,62	0,46	4,32
20	0,49	0,53	ei mittaustulosta	1,11	0,63	ei mittaustulosta
30	0,63	0,76	ei mittaustulosta	1,58	0,81	ei mittaustulosta
40	0,79	0,97	ei mittaustulosta	1,98	1,03	ei mittaustulosta
50	0,93	1,15	ei mittaustulosta	2,31	1,2	ei mittaustulosta
60	1,06	1,33	ei mittaustulosta	2,78	1,32	ei mittaustulosta
70	1,20	1,48	ei mittaustulosta	3,05	1,45	ei mittaustulosta



Kuva 6.2 Koerakennusten ilmatiiviyyskokeen mittaustulokset.

7 Lämmönkulutusta vähentävien toimenpiteiden tarkastelu

Seuraavassa tarkastellaan, miten erilaiset energiansäästöön tähtäävät toimenpiteet vaikuttavat koerakennuksia seinärakenteiltaan vastaavien normaalikokoisten rakennusten energiatalouteen. Laskenta perustuu D5:n mukaiseen energiankulutuksen laskentaan. Rakenteiden lämpöhäviöitä arvioidaan myös mittaustulosten perusteella. Ylä- ja alapohjan lämpöhäviöiden laskennassa on käytetty koerakennusten ylä- ja alapohjista mitattuja lämpötiloja. Energiankulutuksen arvioinnissa käytettävät laskenta-oletukset on esitetty taulukossa 7.1. Laskenta tehdään Excel-tilukkolaskentaohjelmalla siten, että kaikkia laskentaoletuksia voidaan tarvittaessa muuttaa D5:n ohjeiden mukaisesti.

Taulukko 7.1 Lämmönkulutuksen laskennassa käytetyt oletukset.

Rakennuksen mitat	sisämitta itä-länsisuunnassa	15 m
	sisämitta pohjois-eteläsuunnassa	7 m
	lattiapinta-ala	105 m ²
Alapohja	tyyppi	maanvarainen
	energiankulutuksen laskentamenetelmä	D5:n yksinkertaistus
Yläpohja	k-arvo	0,17 W/Km ²
Ikkunat	tyyppi	3-lasinen, kirkas
	k-arvo	1,5 W/Km ²
	osuus rakennuksen kerrosalasta	15 %
	jakauma PO/IT/ET/LÄ	20/25/30/25 %
Ovet	k-arvo	0,7 W/Km ²
Lämmitys	lämmitysjärjestelmä	suora sähkölämmitys
Ilmanvaihto	ilmanvaihtuvuus	0,5 1/h
	vuotoilman vaihtuvuus	0,2 1/h
	energian talteenoton hyötysuhde	0 %

Lämmönkulutuksen tarkastelussa erotellaan:

- seinien johtumislämpöhäviöt
- ylä- ja alapohjan johtumislämpöhäviöt
- ikkunoiden ja ovien johtumislämpöhäviöt
- ilmanvaihdon ja
- lämpimän käyttöveden lämmityksen energiankulutus.

Tarkastelussa kaikkia lämmönkulutusmuotoja oletetaan vähennettävän vuorollaan kymmenen prosenttia toisten kulutusmuotojen pysyessä ennallaan ja lasketaan, kuinka paljon tämä vähentää hyötylämmitysenergian tarvetta.

Lämmönkulutukseen sisältyvät hyötylämmitysenergian lisäksi ilmaisenergiat, joita ovat sisäisistä lämmönlähteistä ja auringon säteilystä hyödynnettävä energia.

Kuvissa 7.1 ja 7.2 esitetään kunkin lämmönkulutusmuodon 10 % pienentämisen vaikutus hyötylämmitysenergiatarpeeseen.

Seinärakenteet

Seinärakenteiden lämpöhäviöiden pienentyminen 10 %:lla vähentää laskelman mukaan koerakennuksia vastaavissa normaalikokoisissa, lämmöneristetyissä rakennuksissa hyötylämmitysenergian tarvetta 1,4-2,0 %. Lämmöneristämättömissä rakennuksissa hyötylämmitysenergian tarve vähenisi vastaavasti 2,1-4,0 %.

D5:n ohjeiden mukaan ja mittaustulosten perusteella laskettaessa ero seinärakenteen lämmöneristävyysparantamisen vaikutuksella lämmönkulutukseen on merkittävä. Suurin osa tästä aiheutuu ns. nurkkavaikutuksesta ja seinäpintaan tulevasta auringon säteilystä.

Muut rakennuksen vaipparakenteet

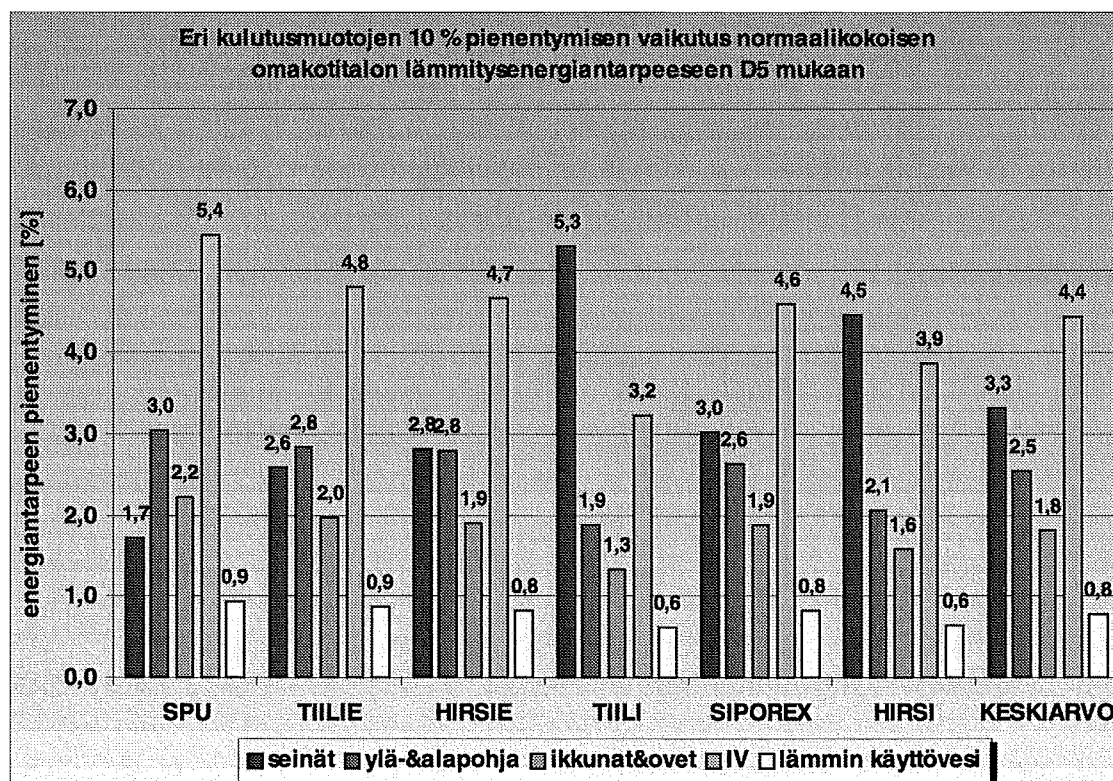
Yläpohjan lämpöhäviöiden pienentyminen 10 %:lla puolestaan vähentäisi hyötylämmitysenergian tarvetta 2,2-3,1 %. Sama koskee ryömintätilaisia alapohjia. Ero on eri menetelmillä laskettaessa pieni (D5/mittaustulokset). Ikkunoiden ja ovien lämpöhäviöiden pienentyminen 10 %:lla vähentäisi hyötylämmitysenergian tarvetta 1,7-2,3 %.

Ilmanvaihto

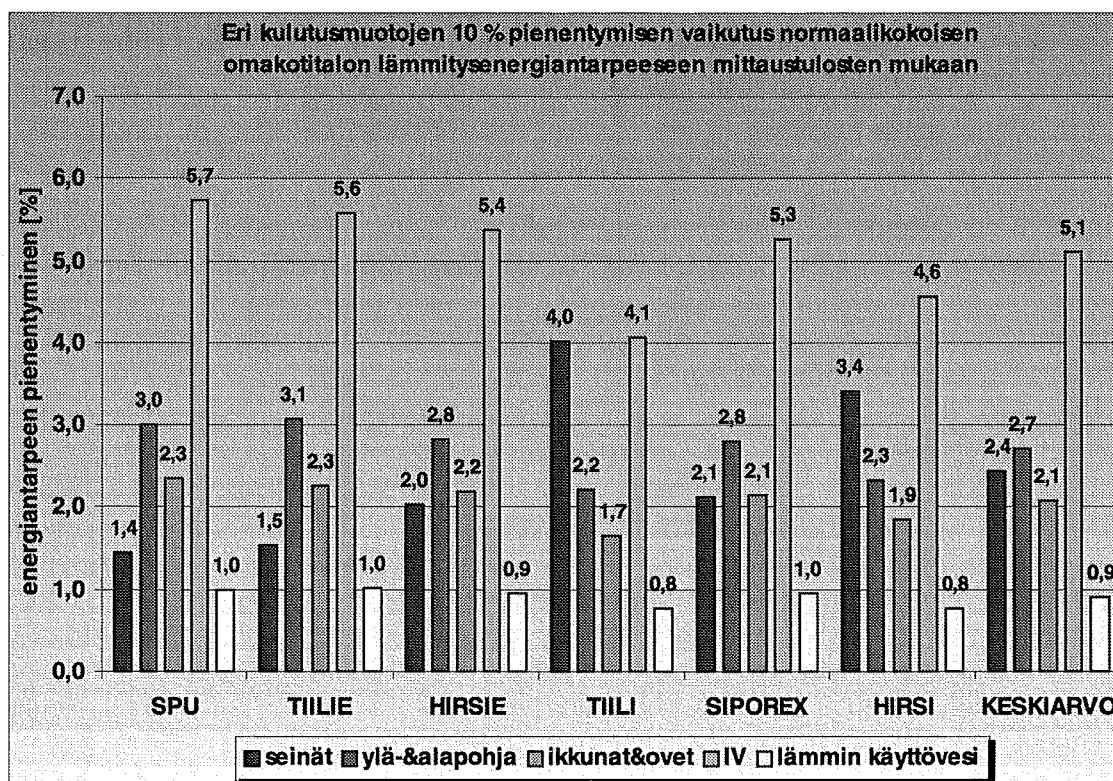
Ilmanvaihdon lämpöhäviöiden pienentäminen 10 %:lla vähentäisi energiankulutusta kaikkein selvimmin, noin 4,1-5,7 %. Ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton parantaminen 10 %:lla saattaa kuitenkin olla vaikeaa. Poistoilman lämmöntalteenottojärjestelmä voi hyötysuhteella 50 % alentaa hyötylämmitysenergian tarvetta jopa 20-30 %.

Lämmin käyttövesi

Lämpimän käyttöveden kulutuksen vähentyessä 10 % hyötylämmitysenergian tarve laskee noin prosentti. Osa lämpimän käyttöveden lämpöenergiasta saadaan hyödynnettyä rakennuksen lämmityksessä.



Kuva 7.1 Eri energiankulutuslajien 10 % pienentymisen vaikutus hyötylämmitysenergiankulutukseen D5:n mukaan laskien.



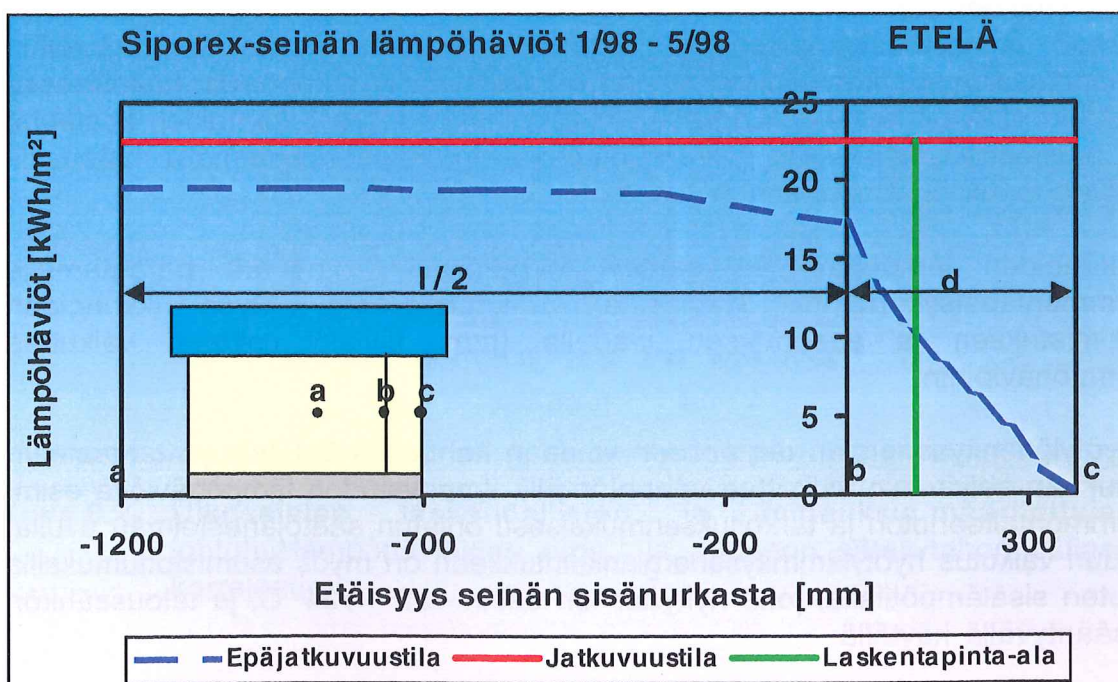
Kuva 7.2 Eri energiankulutuslajien 10 % pienentymisen vaikutus hyötylämmitysenergian kulutukseen mittaustulosten mukaan laskien.

8 Johtopäätökset

Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, miten erilaiset ulkoseinät lämpötekniisesti toimivat ja mikä osuus rakennuksen lämmitysenergiasta poistuu ulkoseinien kautta. Tutkimuksen seinäraketeet voidaan jakaa kahteen tyyppiin: lämmöneristettyihin ja -eristämättömiin. Energiankulutuslaskelmissa ulkoseinien ja muiden vaipparakenteiden lämmönläpäisykertoimina (k-arvo, u-arvo) on käytetty seuraavia arvoja:

US 1	puurankaseinä (lämmöneristeenä polyuretaani)	0,17 W/Km ²
US 2	tiiliseinä (lämmöneristeenä mineraalivilla)	0,27 W/Km ²
US 3	hirsiseinä (lämmöneristeenä puukuituvilla)	0,29 W/Km ²
US 4	1½-kiven tiiliseinä	0,86 W/Km ²
US 5	siporex-harkkoseinä (höyrykarkaistu kevytbetoni)	0,35 W/Km ²
US 6	höylähirsiseinä	0,67 W/Km ²
Ylä- ja alapohja	(polyuretaanilevyt yht. 200 mm)	0,12 W/Km ²
Ulko-ovi	(2 kpl peräkkäin)	0,35 WK/m ²

Ulkoseinien lämpöhäviöt (lokakuun alusta 1997 toukokuun loppuun 1998) määritettiin koerakennuksissa tehtyjen energiankulutusmittausten perusteella. Vaipan lämpöhäviöiden laskennassa käytettiin sekä puolen tunnin välein mitattujen sisä- ja ulkoilman lämpötilojen keskiarvoja että RakMk:n osassa D5 annettuja astepäivälukuja S20. Jos vaipan johtumislämpöhäviöiden laskennassa käytetään rakennusosien ulkomittojen mukaan laskettuja pinta-aloja (vrt. RakMk D5), laskennallisesta lämmitysenergian tarpeesta tulee selvästi suurempi verrattuna mitattuun kulutukseen. Kuvassa 8.1 on esitetty jatkuvuus-tilassa sisä- ja ulkoilman lämpötiloilla lasketut seinän johtumislämpöhäviöt punaisella viivalla ja sinisellä katkoviivalla mitatuista pintalämpötiloista differenssimenetelmällä lasketut johtumislämpöhäviöt. Kuvan perusteella rakennusosien ulkomitoilla laskettaessa nurkan lämpöhäviöt otetaan huomioon todellisuutta suurempina.



Kuva 8.1 Lämpöhäviöt ulkoseinänurkassa.

Differenssimenetelmällä lasketun nurkan ja muun seinän lämpöhäviöiden suhteen avulla voidaan määrittää, miten suuri osuus risteävän seinän paksuudesta tulisi lämpöhäviöiden laskennassa ottaa huomioon. Laskennallinen pinta-ala saadaan lisäämällä rakennuksen sisämittoihin seinien sekä ylä- ja alapohjan paksuudesta tutkimuksessa määritetyillä kertoimilla laskettu osuus. Koerakennuksille lasketut kertoimet on esitetty taulukossa 4.1.

Pienikokoisissa koerakennuksissa ulkoseinänurkan lämpöhäviöiden laskennan epätarkkuus korostuu, jos käytetään ulkomitoilla laskettuja pinta-aloja. Lattiapinta-alaltaan 100 m²:n suorakaiteen muotoisissa rakennuksissa rakennusosien ulkomitoilla lasketut vaipan johtumislämpöhäviöt ovat eristetyillä seinillä keskimäärin 16 % ja eristämättömillä seinillä 22 % suurempia suhteessa em. laskentapinta-aloilla määritettyihin lämpöhäviöihin. Kun lämmönkulutuslaskelmissa käytetään nurkan lämpöteknisen toiminnan huomioonottavia laskentapinta-aloja, saadaan vaipan lämpöhäviöiksi sekä lämmöneristetyillä että -eristämättömillä seinillä keskimäärin 18 % suuremmat arvot mitattuihin verrattuna. Näin ollen 100 m²:n rakennuksen laskennallinen lämmitysenergian tarve on lämmöneristetyillä seinillä n. 37 % ja -eristämättömillä n. 44 % suurempi kuin mitattu, kun käytetään rakennusosien ulkomitoilla laskettuja pinta-aloja. Laskennan epätarkkuuden arvioidaan aiheutuvan materiaalien laskennallisten lämmönjohtavuusarvojen poikkeamisesta todellisista ja auringon säteilyn vaikutuksesta lämpöhäviöihin. Jatkotutkimuksessa tulisi selvittää, miten edellä mainitut tekijät huomioonottaen laskentatarkkuutta olisi mahdollista parantaa.

Asuinrakennuksen energiankulutusta vähentävien toimenpiteiden vaikutuksia on arvioitu kohdassa 7.1. Vaipparakenteiden lämpöhäviöitä voidaan vähentää parantamalla rakenteiden lämmöneristysominaisuuksia. Lämmönläpäisykertoimien alentaminen nykyisestä viranomais määräyksissä annetusta tasosta lisäämällä eristyspaksuutta on taloudellisinta ja käytännössä helpoimmin toteutettavissa yläpohjissa ja ryömintätilaisissa alapohjissa. Vaipan lämpöhäviöitä voidaan vähentää myös suunnittelemalla ja toteuttamalla käytännössä lämpö- ja kosteusteknisesti hyvin toimivia rakenteita, koska lämpöhäviöihin vaikuttavat myös konvektiovirtaukset eristetilassa ja rakenteisiin haitallisessa määrin päässyt kosteus. Lämpöhäviöiden laskennassa rakenteiden kosteutta ja puutteellista ilmatiiviyttä pyritään ottamaan huomioon käyttämällä materiaalien normaalisia lämmönjohtavuusarvoja (λ_n).

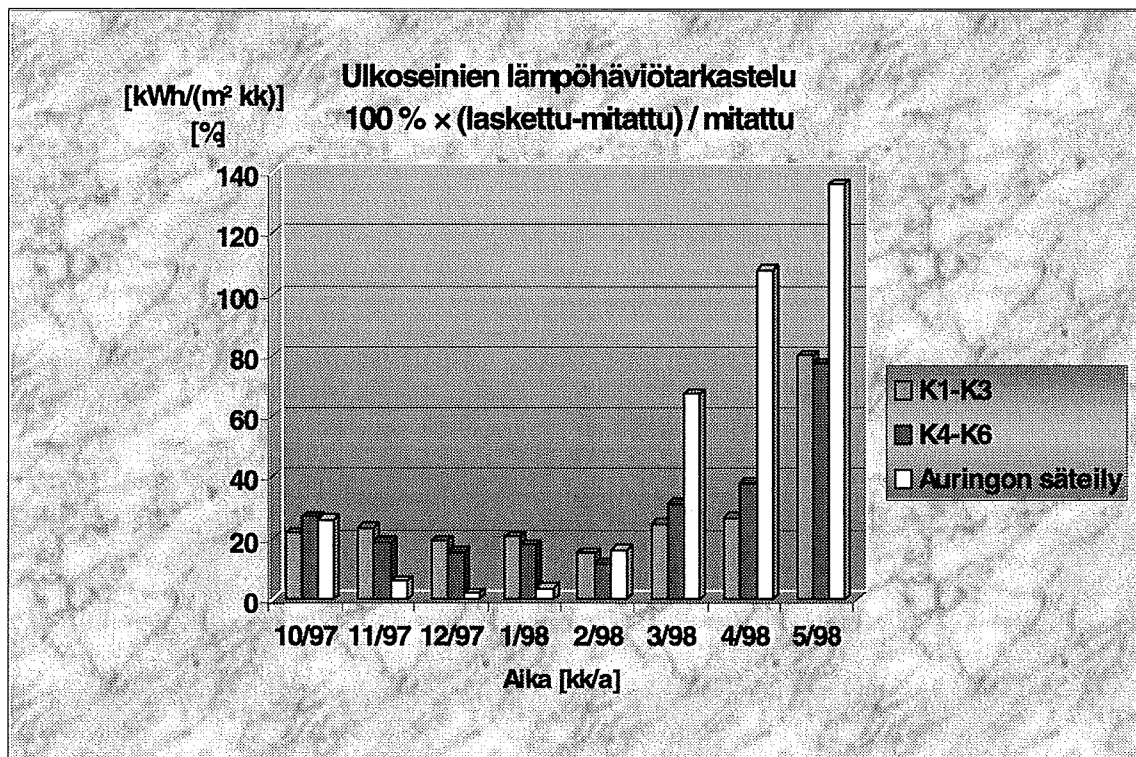
Ikkunoiden lämpöhäviöitä voidaan merkittävästi vähentää parantamalla lämmönläpäisykerrointa nykyisestä vaatimustasosta. Myös ikkunoiden valmistuksen ja asennuksen laadulla (mm. tiiviys) voidaan vaikuttaa lämpöhäviöihin.

Hyötylämmitysenergian tarpeeseen voidaan kohdassa 7.1 tehdyn tarkastelun mukaan selvimmin vaikuttaa vähentämällä ilmanvaihdon lämpöhäviöitä esim. lämmöntalteenoton ja tarkoituksenmukaisesti ohjatun säätöjärjestelmän avulla. Suuri vaikutus hyötylämmitysenergiankulutukseen on myös asumistottumuksilla kuten sisälämpötilalla, joka nykyään on usein +23 - +24 °C, ja taloussähkön lisääntyvällä käytöllä.

Seinään kohdistuvalla auringon säteilyllä on vaikutusta lähinnä eteläseinän lämpötaseeseen, sen sijaan varsinkin pohjoisseinällä sen merkitys on vähäinen. Auringon säteilyn vaikutus seinän lämpöhäviöihin riippuu oleellisesti pinnan väristä (tummuudesta).

Auringon lämmittäessä seinän ulkopintaa siirtyy lämpöä "viiveellä" kohti seinän sisäosaa, mikä vaikuttaa sisäpinnan lämpötilagradientin kulmakertoimeen ja vastaavasti ulos päin suuntautuvaan lämpövirtaan.

Kuvassa 8.2 on esitetty laskennallisesti ja mittaustulosten perusteella määritettyjen vaipan johtumislämpöhäviöiden suhteellinen ero eristettyjen ja eristämättömien koerakennuksien keskiarvona. Diagrammin vaaleat pylväät kuvaavat auringon kokonaissäteilyä vaakapinnalle. Kuvasta nähdään, että laskennan ja mittausten välinen ero kasvaa auringon säteilytehon lisääntyessä, koska seinäpinnalle tulevaa auringon säteilyä ei laskennassa oteta huomioon. Vaikka suhteellinen ero on pienimmillään joulukuusta helmikuuhun, on huomattava, että lämmitysenergian kulutus on näinä kylmimpinä kuukausina suurimmillaan. Mitattujen ulkolämpötilojen perusteella laskettujen astetuntien summa oli suurin maaliskuussa, mutta energiankulutus oli lähes sama tai alempi kuin esimerkiksi helmikuussa. Ilmatieteen laitokselta saatujen tietojen mukaan maaliskuu oli kylmin kymmeneen vuoteen, mutta myös poikkeuksellisen aurinkoinen.

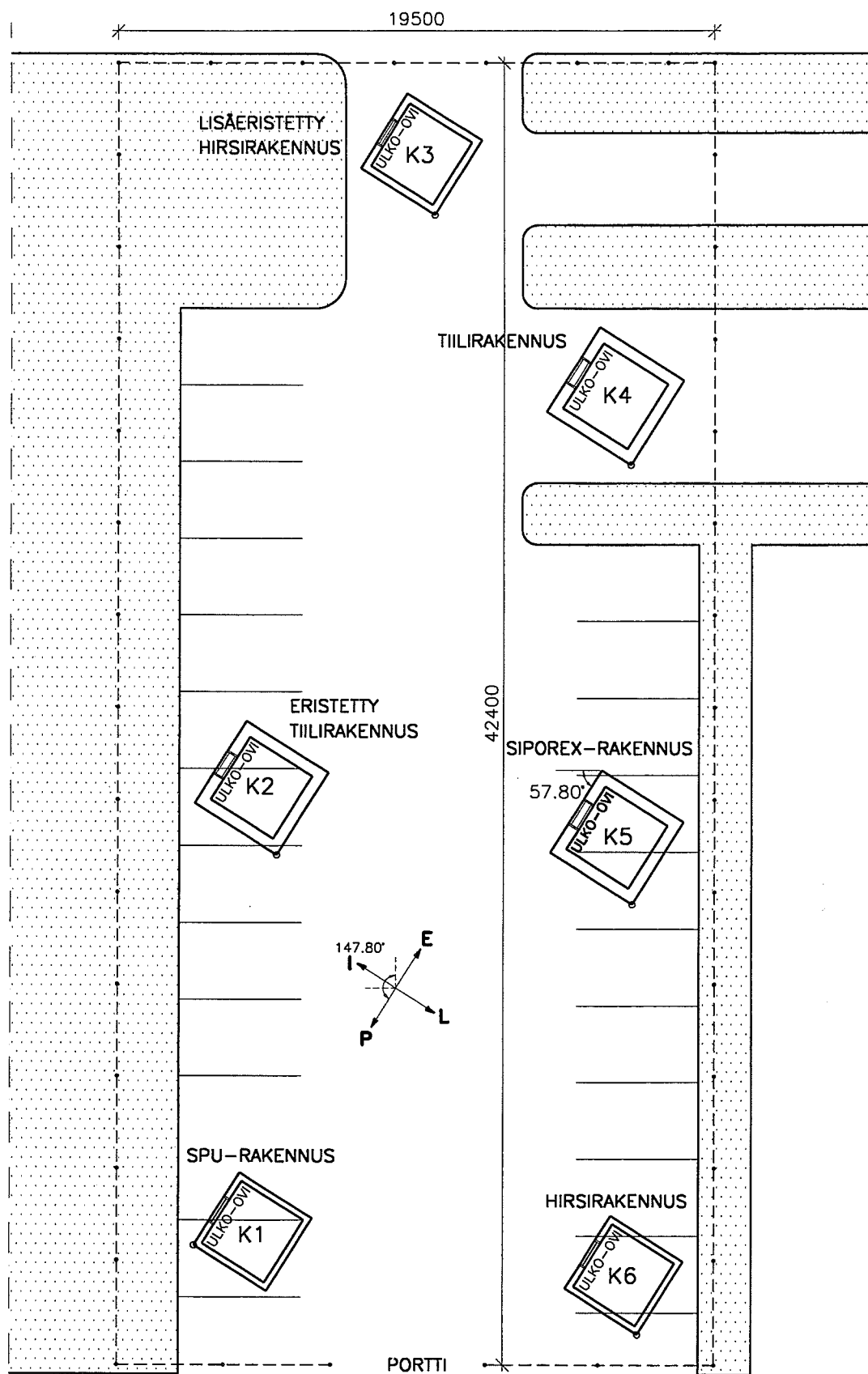


Kuva 8.2 Ulkoseinien laskennallisten ja mittauksin määritettyjen johtumislämpöhäviöiden eron ja auringon säteilytehon välinen korrelaatio.

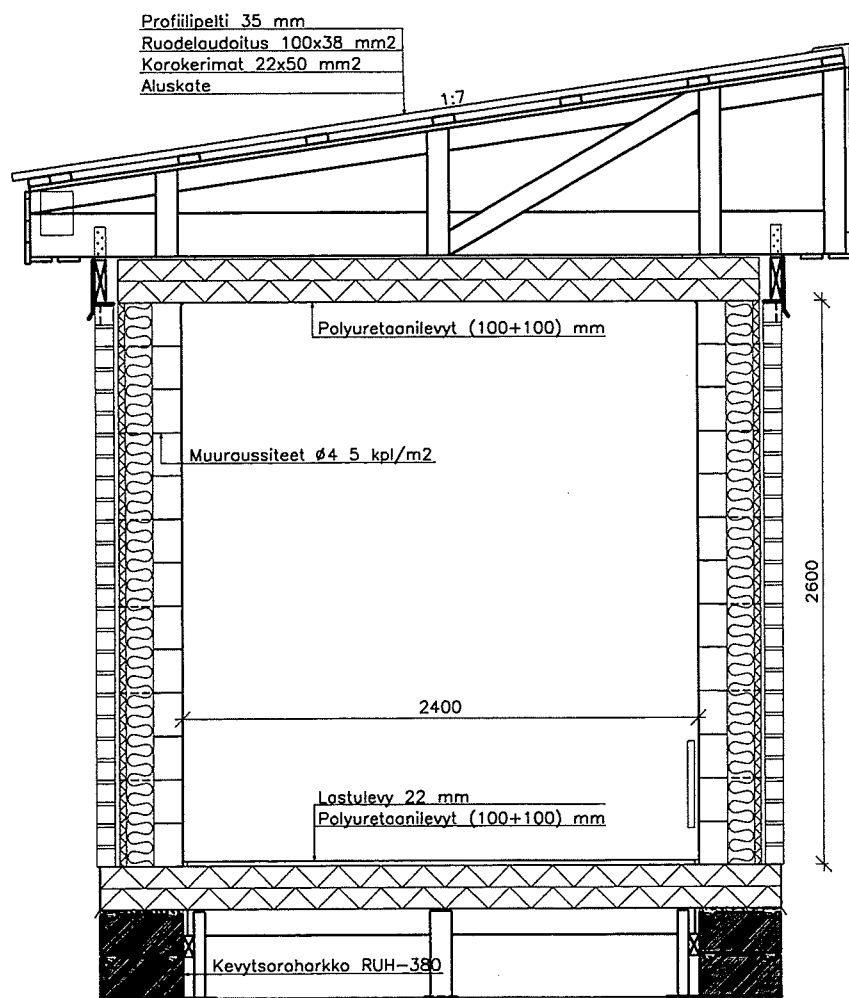
VIITELUETTELO

1. Björkholtz, Dick: Lämpö ja kosteus. Rakennusfysiikka, Rakentajain Kustannus Oy, Helsinki 1987, 155 s.
2. Blomberg, Thomas: Heat Conduction in two and three dimensions. Computer Modelling of Building Physics Applications, Lund University, Sweden, Department of Building Physics, Lund 1996, 188 s.
3. C3 Lämmöneristys. Määräykset 1985, Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö, Kaavoitus- ja rakennusosasto, Helsinki 1983, 3 s.
4. C4 Lämmöneristys. Ohjeet 1978, Suomen rakentamismääräyskokoelma, Sisäasiainministeriö, Helsinki 1978, 9 s.
5. D5 Rakennusten lämmityksen tehon- ja energiantarpeen laskenta. Ohjeet 1985, Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriö, Helsinki 1984, 14 s.
6. Halko, Pekka; Härkönen, Sakari; Lähteenmäki, Ilkka; Välimaa, Taisto: Teollisuuden mittausmekaniikka. Perusmittauksia, Ammattikasvatushallitus, Helsinki 1990, 143 s.
7. Harryson, Christer: Småhusets energiomsättning, Analys med särskild hänsyn till ingående delposters variationer, Publikation 88:2, Chalmers Tekniska Högskola, Avd. för byggnadskonstruktion, Göteborg 1988, 280 s.
8. Holmqvist, Nils: Värme- och fuktproblem i byggnadskonstruktioner med speciell hänsyn tagen till väggar, Chalmers Tekniska Högskola, doktorsavhandlingar nr 15, Göteborg 1957, 96 s.
9. Jóhannesson, Gudni: Active Heat Capacity, Models and Parameters for the Thermal Performance of Buildings, Report TVBH - 1003, Lund Institute of Technology, Division of Building Technology, Lund 1981, 165 s.
10. Kauppi, Ari: Pientalojen tiiviys ja sen pysyvyys, Forssan asuntomessualue, tiedote 440, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo 1985, 46 s. + liitteet
11. Kohonen Reijo; Kokko Erkki; Mähönen, Timo; Ojanen, Tuomo: Mineraalivillaaeristyksen ilmavirtaukset ja tuulensuojaukset, tutkimus 431, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Espoo 1986, 119 s.
12. Kokko, Erkki; Pohjalainen, Pekka: Tuulensuojan vaikutus pakotettuun nurkkakonvektioon ja lämmöneristuksen toimintaan, tutkimus 9 / 1981, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Espoo 1981, 59 s. + liitteet
13. Kronvall, Johnny: Building Physics in the Nordic Countries, Symposium and Day of Building Physics in Lund, Sweden, August 24 - 27 1987, proceedings, Swedish Council for Buildings Research, Bygghälsningsrådet, Stockholm 1988, 488 s.
14. Lämpötilan mittaukset, Suomen Sääntöteknillinen Seura ry, Helsinki 1981, 215 s.
15. SFS-ISO 5167-1:1991, Virtausmittaus paine-eroon perustuvilla laitteilla. Osa 1: Mittauslaipat, mittaussuuttimet ja venturiputket asennettuna poikkileikkaukseltaan pyöreisiin, täynnä virtaaviin putkiin.
16. Siitonen, Veijo: Rakenteiden tiivyyden mittaaminen kenttäolosuhteissa, tiedonanto 33, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, LVI-tekniikan laboratorio, Espoo 1978, 27 s.
17. Thermal Performance of Buildings - Calculation of energy use for heating, European Standard, CEN / TC89 / WG4 N 174, Brussels August 1997, 52 s.

-
18. Viljanen, Martti: Lämmön siirtyminen säteilyllä rakennuksen vaipan pinnoilla, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto, Rakennetekniikan laitos, Otaniemi 1984, 130 s.

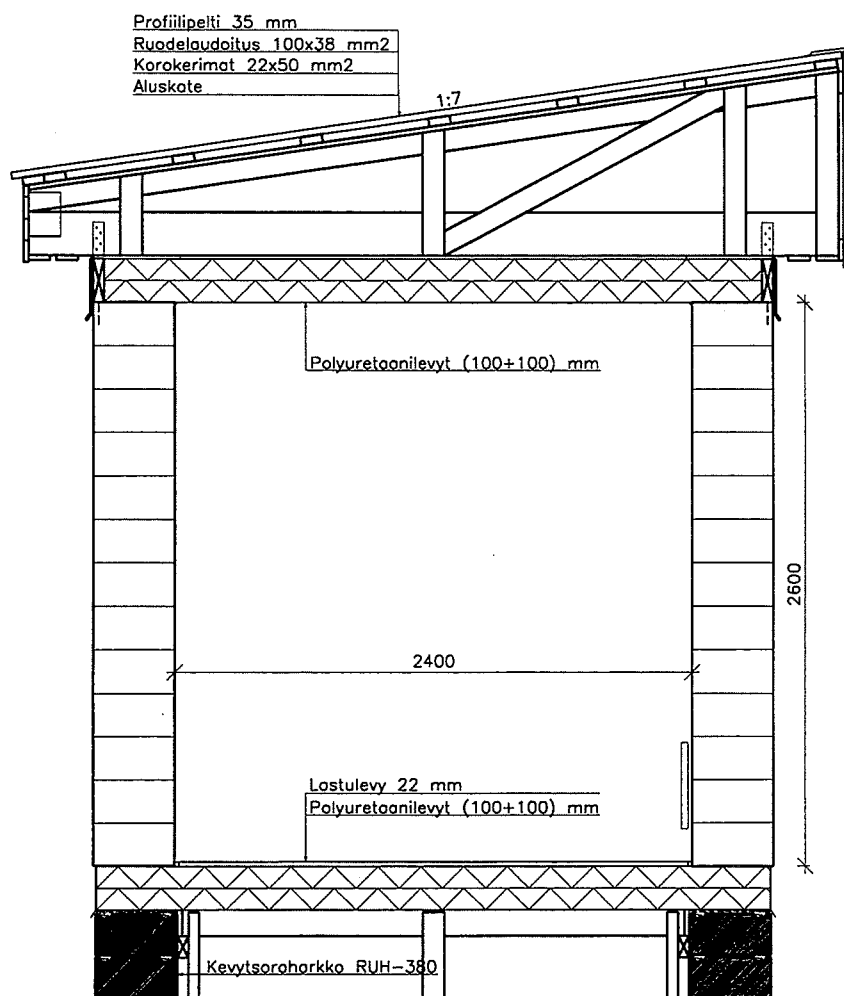


TTKK/RAKENNUSTEKNIikka 24.8.1998 : MT,HK



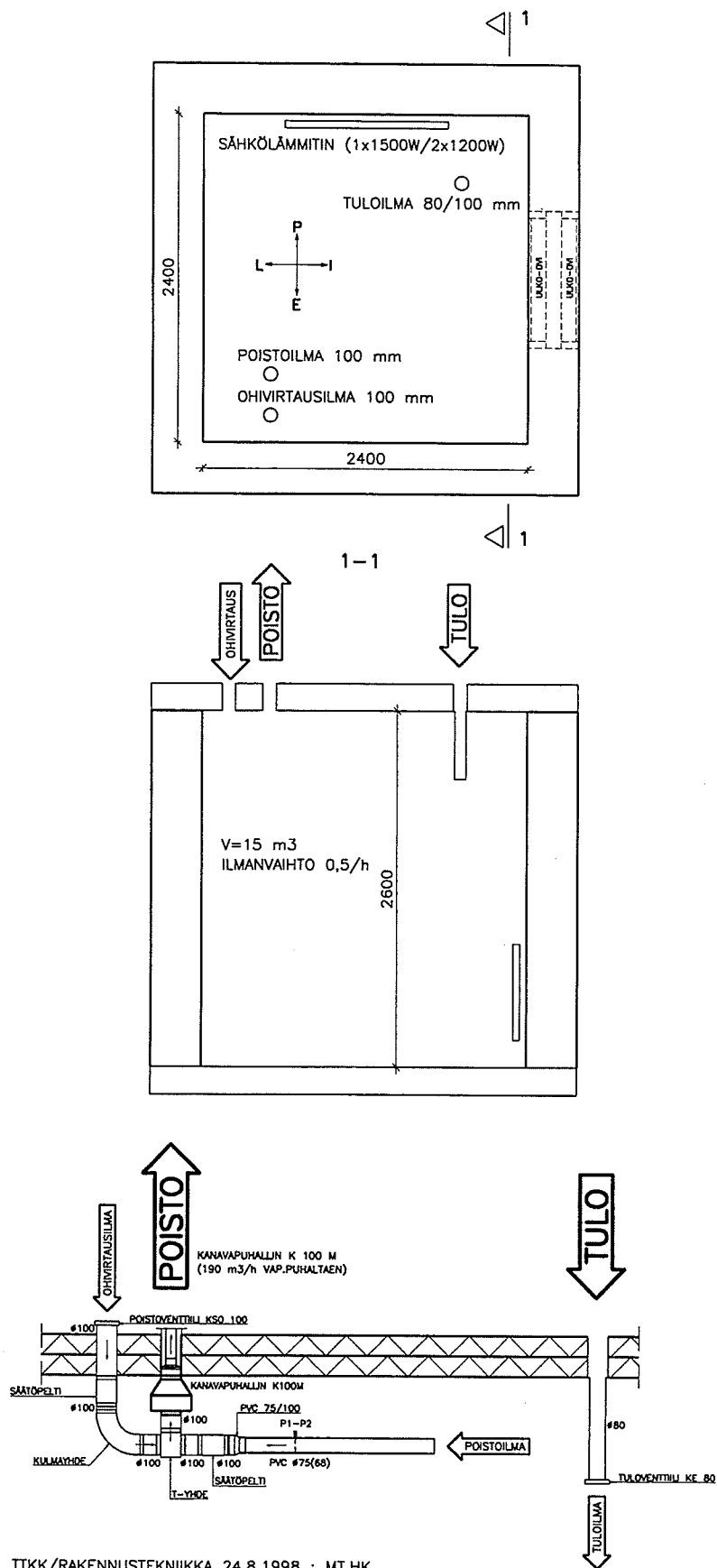
TTKK/RAKENNUSTEKNIikka 24.8.1998 : MT,HK

L2.1 Eristetty koerakennus (tiili-min.villa-tiili).



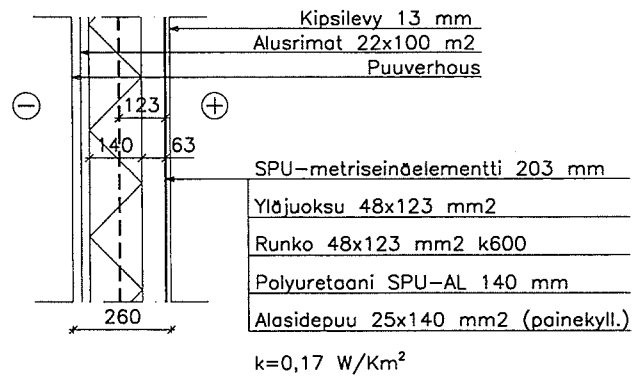
TTKK/RAKENNUSTEKNIikka 24.8.1998 : MT,HK

L2.2 Eristämätön koerakennus (siporex).

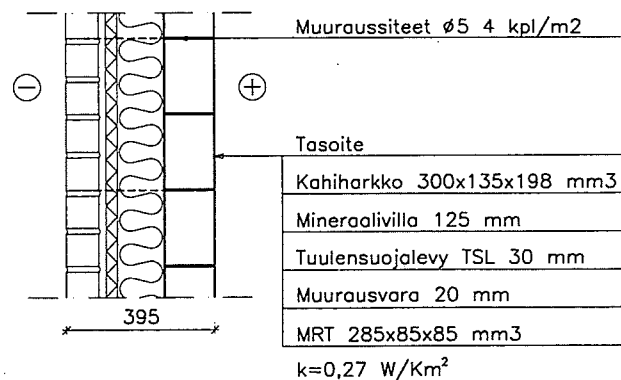


L2.3 Koerakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä.

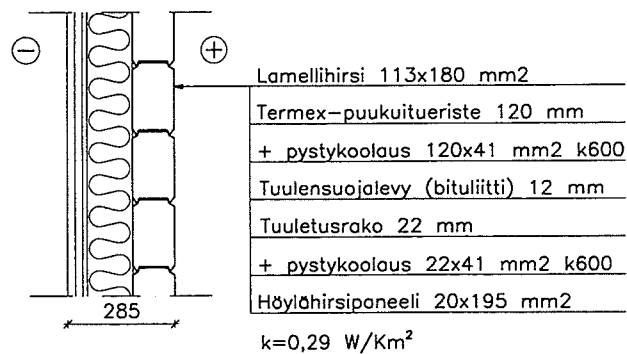
US 1: SPU - metriseinä



US 2: Eristetty tiiliseinä



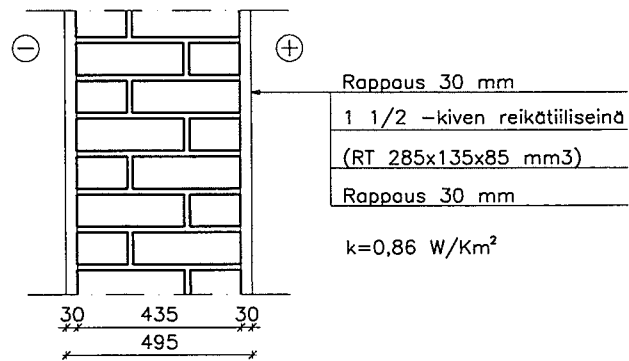
US 3: Eristetty hirsiseinä



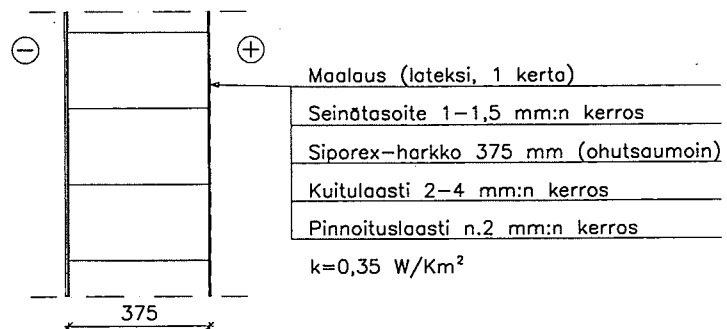
TTKK/RAKENNUSTEKNIikka 24.8.1998 : MT,HK

L3.1 Eristetyt ulkoseinätyypit.

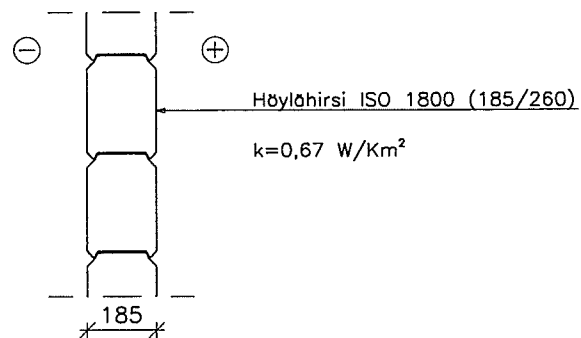
US 4: 1½ -kiven tiiliseinä



US 5: Siporex -harkkoseinä



US 6: Hirsiseinä



**ULKOSEINÄRAKENTTEEN VAIKUTUS RAKENNUKSEN
ENERGIANKULUTUKSEEN**

ULKOSEINÄRAKENNETYYYPIT

Lämmönläpäisykertoimet (k-arvot, U-arvot)

1. SPU -elementtiseinä (SPU -Systems Oy)

- sisäverhouslevy Gyproc GN 13 mm
- puurunko $48 \times 123 \text{ mm}^2$ k 600 + lämmöneriste: SPU-AL -seinälevy 140 mm
- tuuletusväli, pysty alusrimoitus k 600, kiinnitys runkotolppiin
- ulkoverhous (vaakalaudoitus)
- seinän $\sum d = 260 \text{ mm}$
- k-arvo: $k \approx 0,17 \text{ W/Km}^2$

k-arvolaskelma ($\lambda_n = 0,024 \text{ W/Km}$):

- Kipsilevy 13 mm $\lambda_n = 0,23 \text{ W/Km}$ (C4)
- Ilmarako 63 mm $m = 0,46 \text{ Km}^2/\text{W}$ (C4)
(Huom. D. Björkholtz: $m = 0,34 \text{ Km}^2/\text{W}$)
- Polyuretaani 140 mm $\lambda_n = 0,024 \text{ W/Km}$
(YM:n tyyppihyväksyntäpäätös no 172 / 5331 / 91)

Pintavastukset: $m_s + m_u = 0,20 \text{ Km}^2/\text{W}$ (C4)

Kokonaislämmönvastus $M [\text{Km}^2/\text{W}]$ ilman puurankaa:

$$M = 0,20 + 0,013 / 0,23 + 0,46 + 0,14 / 0,024 = 6,55 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$k_o = 1 / M = 0,15 \text{ W/Km}^2$$

Puurungon (huom. läpimenevä kylmäsilta) vaikutus lisäkonduktanssimenetelmällä:
(Björkholtz D.: Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka, 2.1.3, s. 21, taulukko 5)

$$\Delta k_{jmin} = (1 / 0,6) \times 0,023 \text{ W/Km} = 0,04 \text{ W/Km}^2$$

$$\Delta k_{jmax} = (1 / 0,6) \times 0,035 \text{ W/Km} = 0,06 \text{ W/Km}^2$$

$$k_{min} \text{-arvo: } k = 0,15 + 0,04 = 0,19 \text{ W/Km}^2$$

$$k_{max} \text{-arvo: } k = 0,15 + 0,06 = 0,21 \text{ W/Km}^2$$

Puurungon vaikutus M_Y / M_A -menetelmällä:

(Björkholtz D.: Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka, 2.1.2, s. 16)

$$M_a = 0,20 + 0,013 / 0,23 + 0,123 / 0,14 + 0,08 / 0,024 = 4,47 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$M_b = 0,20 + 0,013 / 0,23 + 0,46 + 0,14 / 0,024 = 6,55 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$M_Y = [0,6 / (0,048 / 4,47 + 0,552 / 6,55)] = 6,31 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$m_{1a} = 0,063 / 0,14 = 0,45 \text{ Km}^2/\text{W} \quad m_{1b} = 0,46 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$m_1 = 0,6 / (0,048 / 0,45 + 0,552 / 0,46) = 0,46 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$m_{2a} = 0,06 / 0,14 = 0,43 \text{ Km}^2/\text{W} \quad m_{2b} = 0,06 / 0,024 = 2,50 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$m_2 = 0,6 / (0,048 / 0,43 + 0,552 / 2,50) = 1,80 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$M_A = 0,20 + 0,013 / 0,23 + 0,46 + 1,80 + 0,08 / 0,024 = 5,85 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$(C4: k = 1 / M_A = 1 / 5,85 = 0,17 \text{ W/Km}^2)$$

$$M = (M_Y + 2 \times M_A) / 3 = (6,31 + 2 \times 5,85) / 3 = 6,00 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$k\text{-arvo: } k = 1 / M = 0,17 \text{ W/Km}^2$$

$$\text{Maksimivirhe: } E_m = 100 \times (M_Y / M_A - 1) / 2 \% = 100 \times (6,31 / 5,85 - 1) / 2 \% = 3,9 \%$$

$$k_{max} \text{-arvo: } k = 1,039 \times 0,17 = 0,18 \text{ W/Km}^2$$

2. Lämmöneristetty tiiliseinä (Optiroc Oy, Tiileritehtaat)

- kantava muuraus $300 \times 135 \times 198$
- mineraalivilla 125 mm
- tuulensuoja TSL 30 mm
- julkisivumuuraus $270 \times 85 \times 85$ + muurausvara 20 mm
- seinän $\sum d = 395$ mm
- k-arvo: $k \approx 0,27 \text{ W/Km}^2$

k-arvolaskelma:

Kahi-harkko 135 mm $\lambda_n = 0,70 \text{ W/Km}$ (C4)

Mineraalivilla 125 mm $\lambda_n = 0,045 \text{ W/Km}$

Tuulensuoja 30 mm $\lambda_n = 0,041 \text{ W/Km}$

Ilmarako 20 mm

Reikätiili 85 mm

Pintavastukset: $m_s + m_u = 0,20 \text{ Km}^2/\text{W}$ (C4)

Kokonaislämmönvastus $M [\text{Km}^2/\text{W}]$:

$$M = 0,20 + 0,135 / 0,7 + 0,125 / 0,045 + 0,03 / 0,041 = 3,90 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$k_o = 1 / M = 0,256 \text{ W/Km}^2$$

Muuraussiteiden ($\phi 5$ 4 kpl / m^2) vaikutus lisäkonduktanssimenetelmällä:

(Björkholtz D.: Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka, 2.1.3, s. 20, taulukko 4)

$$\Delta k_p = 4 \times 0,002 \text{ W/Km}^2 = 0,008 \text{ W/Km}^2$$

$$\text{k-arvo: } k = 0,256 + 0,008 = 0,26 \text{ W/Km}^2$$

$$\text{C4: } \Delta k_p = (5 / 4)^2 \times 0,01 = 0,0156 \text{ W/Km}^2$$

$$\text{k-arvo: } k = 0,256 + 0,0156 = 0,27 \text{ W/Km}^2$$

3. Lisäeristetty hirsiseinä (Honkarakenne Oy)

- lamellihirsi LH 113 × 180 mm², $d_{\text{kesk}} = 111$ mm
- Termex -puukuitueriste 120 mm + pystykoolaus 41 × 120 mm² k 600
- tuulensuojalevy 12 mm
- tuuletusrako 22 mm + pystykoolaus 22 × 41 mm² k 600
- höylähirsipaneeli 20 × 195 mm²
- seinän $\sum d = 287$ mm
- k-arvo: $k \approx 0,29$ W/Km²

k-arvolaskelma:

Hirsi 111 mm $\lambda_n = 0,14$ W/Km (C4)

Termex 120 mm $\lambda_n = 0,045$ W/Km
(YM:n tyypihyväksyntäpäätös no 15 / 6121 / 95)

Bituliitti 12 mm $\lambda_n = 0,065$ W/Km (C4)

Hirsipaneeli 20 mm

Pintavastukset: $m_s + m_u = 0,20$ Km²/W (C4)

Kokonaislämmönvastus M [Km²/W]:

$$M = 0,20 + 0,111 / 0,14 + 0,120 / 0,045 + 0,012 / 0,065 = 3,84 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$k_o = 1 / M = 0,26 \text{ W/Km}^2$$

Puurungon vaikutus lisäkonduktanssimenetelmällä:

(Björkholtz D.: Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka, 2.1.3, s. 21, taulukko 5)

$$\Delta k_{j\min} = (1 / 0,6) \times 0,023 \text{ W/Km} = 0,04 \text{ W/Km}^2$$

$$\Delta k_{j\max} = (1 / 0,6) \times 0,035 \text{ W/Km} = 0,06 \text{ W/Km}^2$$

$$k_{\min} \text{-arvo: } k = 0,26 + 0,04 = 0,30 \text{ W/Km}^2$$

$$k_{\max} \text{-arvo: } k = 0,26 + 0,06 = 0,32 \text{ W/Km}^2$$

Puurungon vaikutus M_Y / M_A -menetelmällä:

(Björkholtz D.: Lämpö ja kosteus, rakennusfysiikka, 2.1.2, s. 16)

$$M_a = 0,20 + 0,111 / 0,14 + 0,120 / 0,14 + 0,012 / 0,065 = 2,03 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$M_b = 0,20 + 0,111 / 0,14 + 0,120 / 0,045 + 0,012 / 0,065 = 3,84 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$M_Y = [0,6 / (0,042 / 2,03 + 0,558 / 3,84)] = 3,61 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$m_{1a} = 0,120 / 0,14 = 0,85 \text{ Km}^2/\text{W} \quad m_{1b} = 0,120 / 0,045 = 2,67 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$m_1 = 0,6 / (0,042 / 0,85 + 0,558 / 2,67) = 2,32 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$M_A = 0,20 + 0,111 / 0,14 + 2,32 + 0,012 / 0,065 = 3,50 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$(C4: k \approx 1 / M_A = 0,29 \text{ W/Km}^2)$$

$$M = (M_Y + 2 \times M_A) / 3 = (3,61 + 2 \times 3,50) / 3 = 3,54 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$k\text{-arvo: } k = 1 / M = 0,28 \text{ W/Km}^2$$

$$\text{Maksimivirhe: } E_m = 100 \times (M_Y / M_A - 1) / 2 \% = 100 \times (3,61 / 3,50 - 1) / 2 \% = 1,57 \%$$

$$k_{\max} \text{-arvo: } k = 1,0157 \times 0,28 = 0,284 \text{ W/Km}^2$$

4. 1½ -kiven tiiliseinä (Optiroc Oy, Tiileritehtaat)

- tiiliseinä, $d = 435 \text{ mm}$ ($285 \times 135 \times 85 \text{ mm}^3$)
- ulko- ja sisäpinnassa rappaus n. $30 \text{ mm} + 30 \text{ mm}$
- seinän $\sum d = 495 \text{ mm}$
- k-arvo: $k \approx 1,02 \text{ W/Km}^2$

k-arvolaskelma ($\lambda_n = 0,6 \text{ W/Km}$):

Rappaus	30 mm	$\lambda_n = 1,0 \text{ W/Km}$	(C4)
Reikätiili	435 mm	$\lambda_n = 0,6 \text{ W/Km}$	(C4)
Rappaus	30 mm	$\lambda_n = 1,0 \text{ W/Km}$	(C4)

Pintavastukset: $m_s + m_u = 0,20 \text{ Km}^2/\text{W}$ (C4)

Kokonaislämmönvastus M [Km^2/W]:

$$M = 0,20 + 0,435 / 0,6 + 0,06 / 1,0 = 0,985 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$\text{k-arvo: } k = 1 / M = 1,02 \text{ W/Km}^2$$

Huom. k-arvo: $k \approx 0,86 \text{ W/Km}^2$

(seinän $\sum d = 460 \text{ mm}$, VTT Rakennustekniikka, testausselostus no RTE10496 / 96)

5. Siporex-harkkoseinä (Suomen Siporex Oy)

- Siporex-harkko, $d = 375 \text{ mm}$ (kuivatiheys $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$)
- sisäpinnassa seinätasoite
- ulkopinnassa kuitulaasti + ohutpinnoite
- seinän $\sum d = 380 \text{ mm}$
- k-arvo: ohutsaumoin (3 mm) $k \approx 0,35 \text{ W/Km}^2$

k-arvolaskelma:

Seinätasoite	1,5 mm	$\lambda_n = 1,00 \text{ W/Km}$	(C4)
Siporex	375 mm	$\lambda_n = 0,14 \text{ W/Km}$	(C4)
Kuitulaasti + pinnoituslaasti	5 mm	$\lambda_n = 1,00 \text{ W/Km}$	(C4)

Pintavastukset: $m_s + m_u = 0,20 \text{ Km}^2/\text{W}$ (C4)

Kokonaislämmönvastus M [Km^2/W]:

$$M = 0,20 + 0,375 / 0,14 + 0,0065 / 1,0 = 2,89 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$\text{k-arvo: } k = 1 / M = 0,35 \text{ W/Km}^2$$

6. Massiivinen hirsiseinä (Honkarakenne Oy)

- höylähirsi ISO1800 ($185 / 260$) $d_{\text{kesk}} = 182 \text{ mm}$
- seinän $\sum d = 185 \text{ mm}$
- k-arvo: $k \approx 0,67 \text{ W/Km}^2$

k-arvolaskelma:

Hirsi 182 mm $\lambda_n = 0,14 \text{ W/Km}$ (C4)

Pintavastukset: $m_s + m_u = 0,20 \text{ Km}^2/\text{W}$ (C4)

Kokonaislämmönvastus M [Km^2/W]:

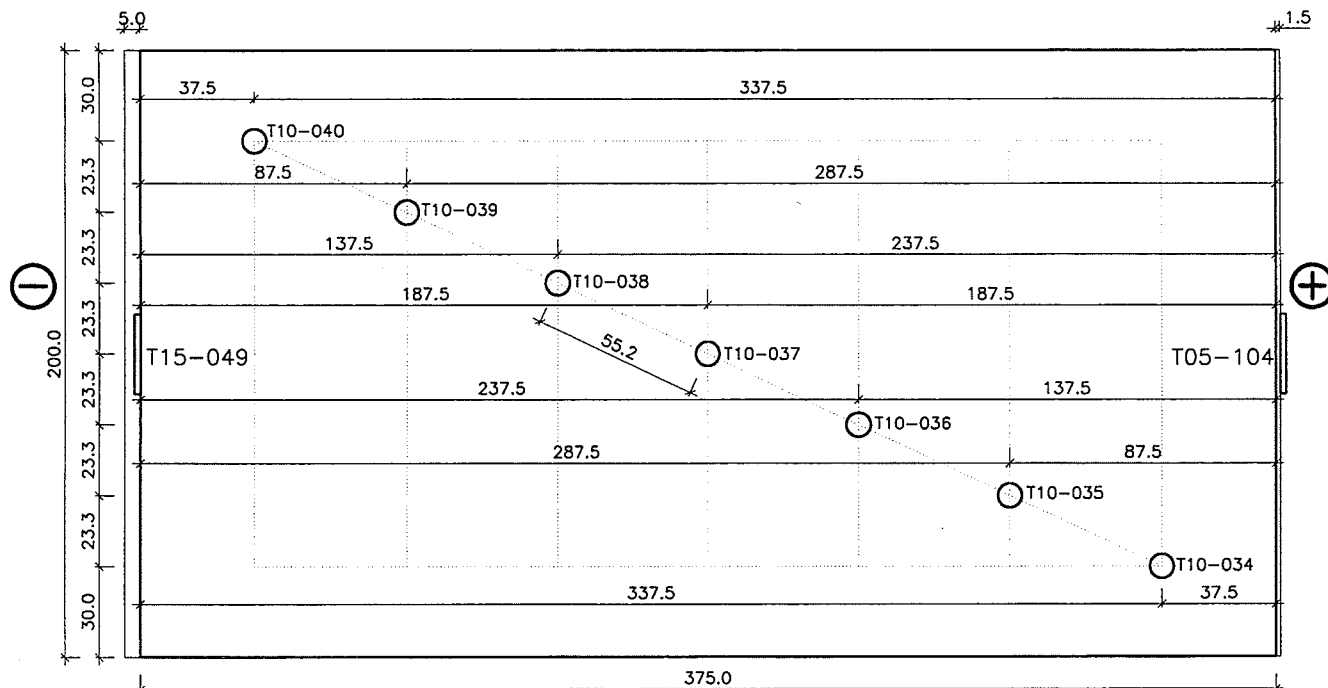
$$M = 0,20 + 0,182 / 0,14 = 1,50 \text{ Km}^2/\text{W}$$

$$\text{k-arvo: } k = 1 / M = 0,67 \text{ W/Km}^2$$

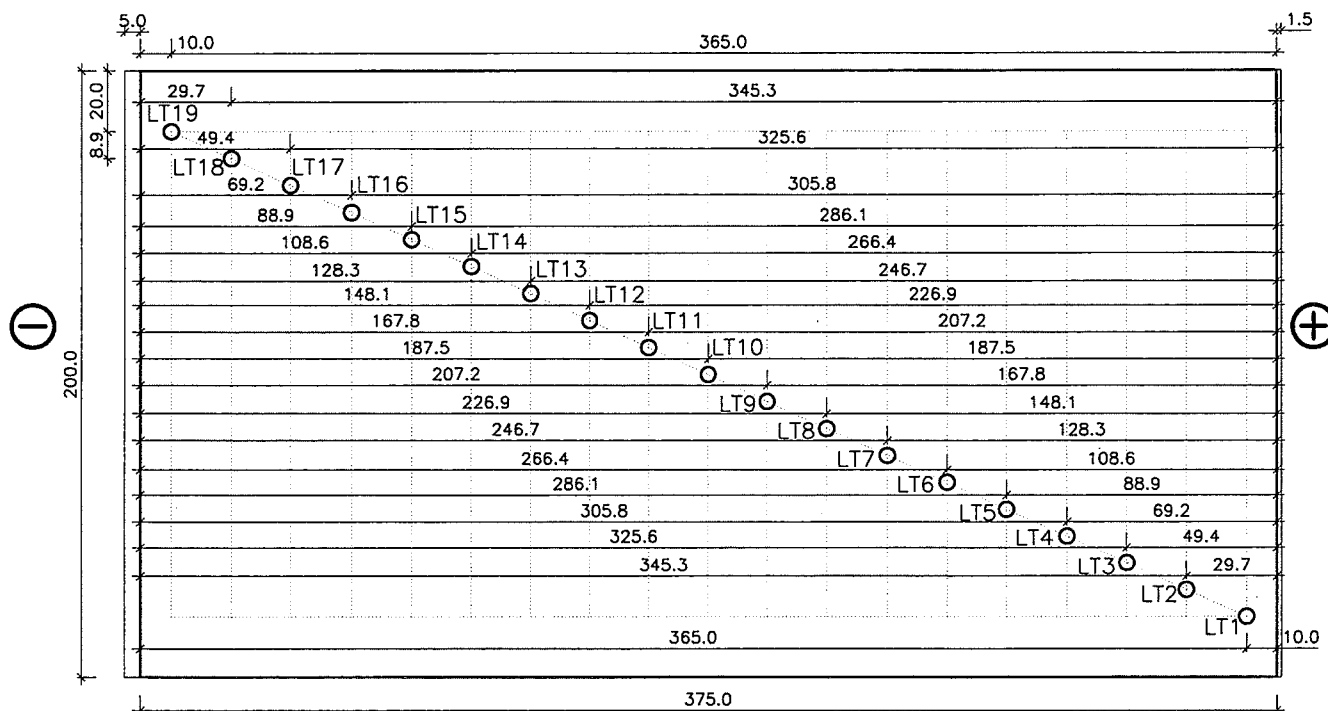
SIPOREX-HARKKO 375x200x600 1:2.5

ULKOSEINÄ LÄNTEEN

PUOLIOHDEANTUREIDEN (9 KPL) SIJAINTI (HARKKO KUVATTU PÄÄDYSTÄ)

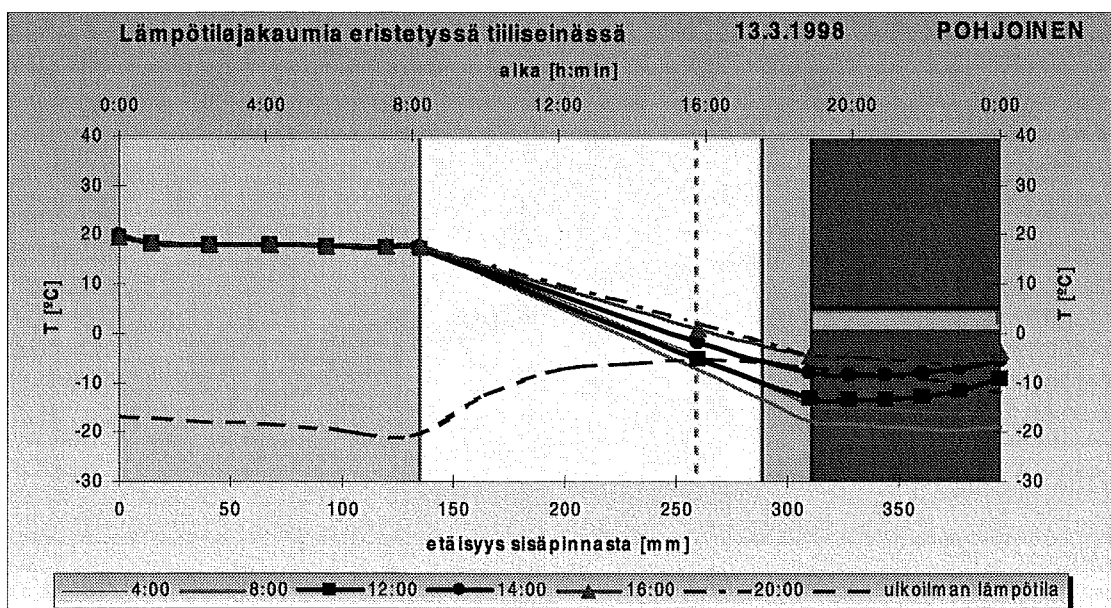
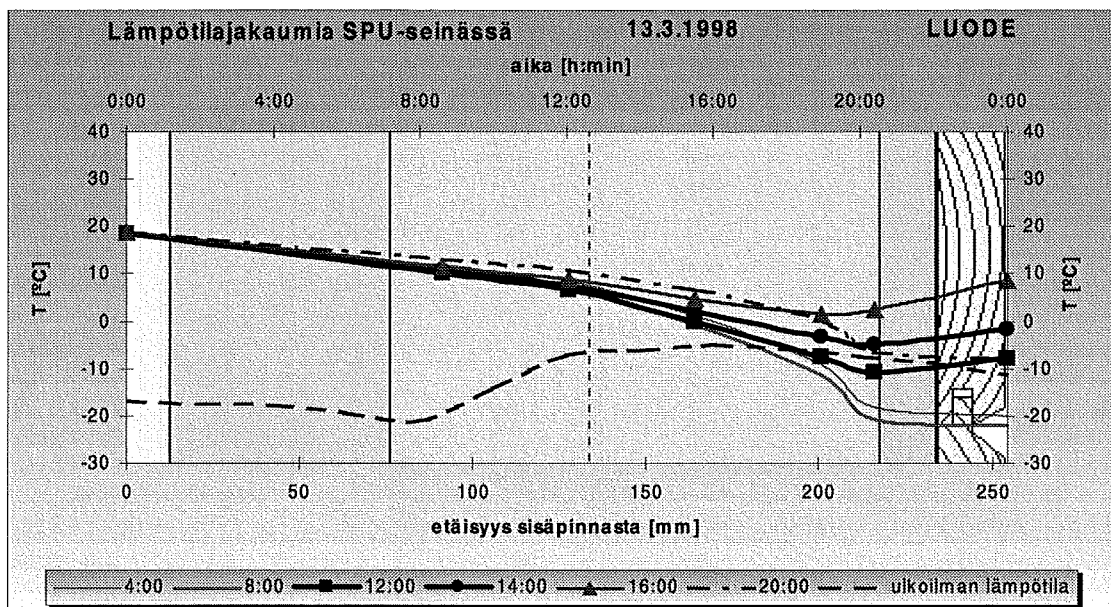
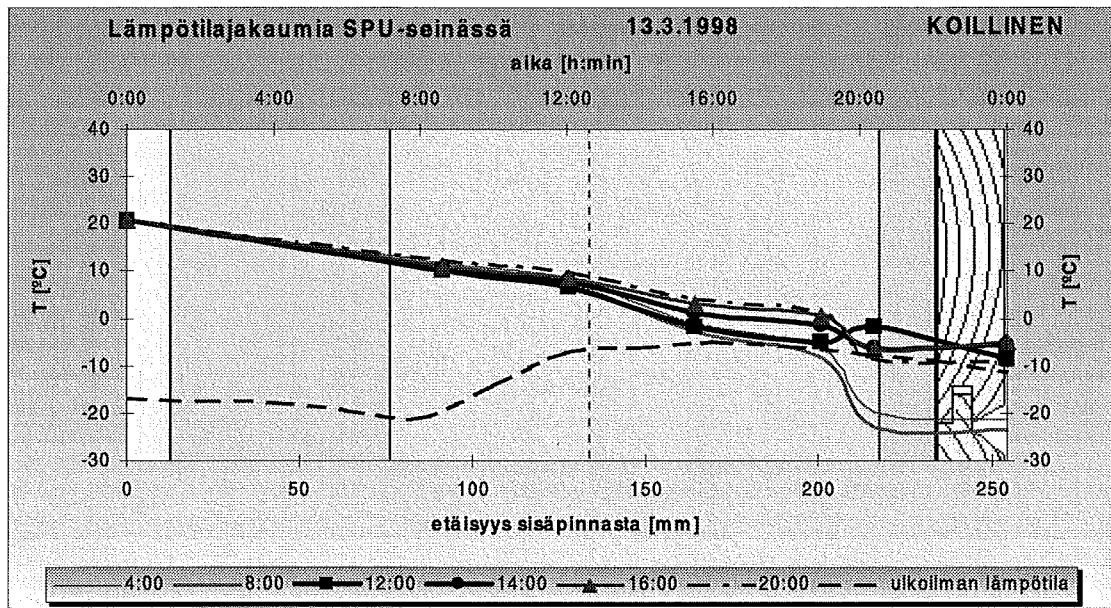


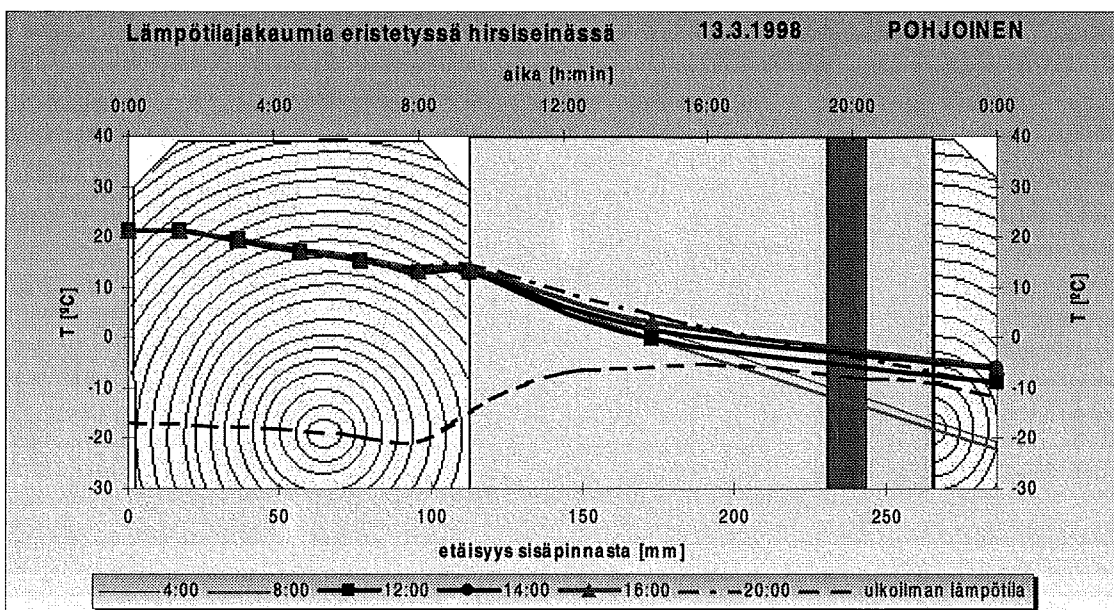
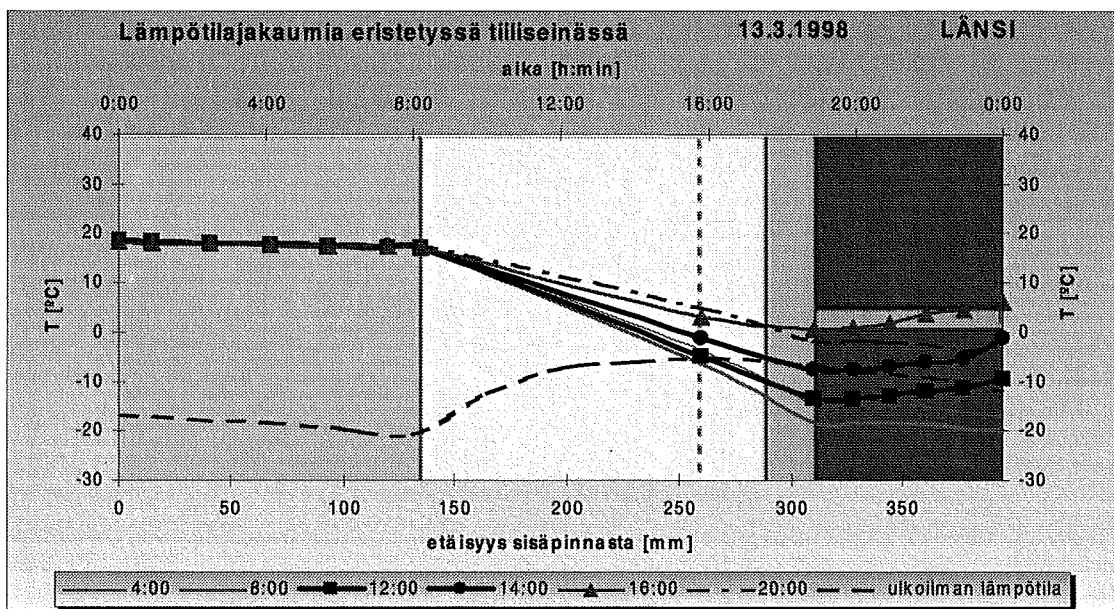
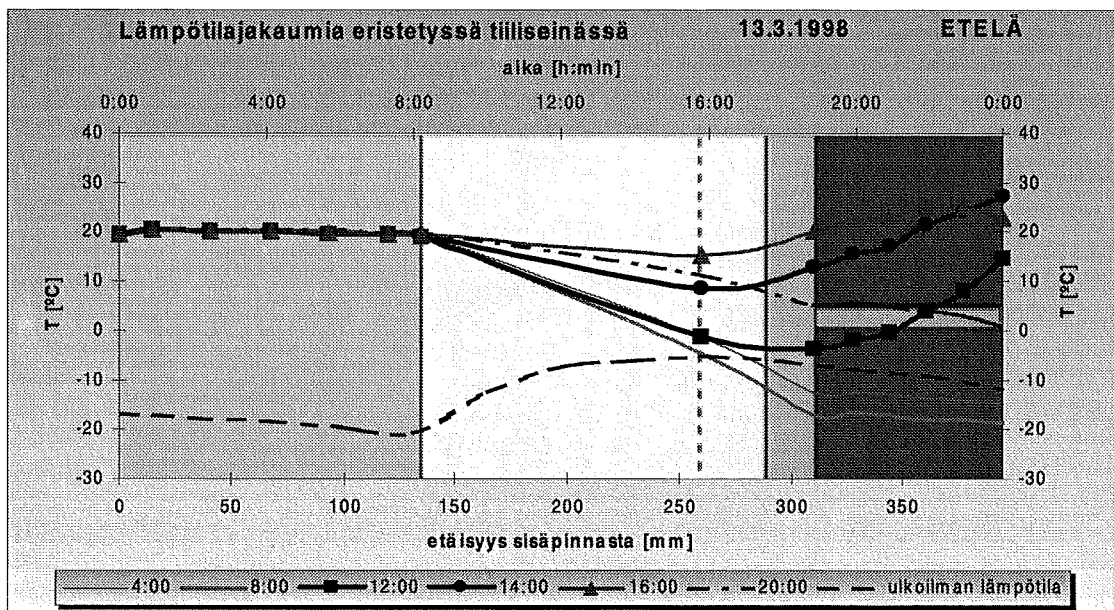
TERMOLANKOJEN (19 KPL) SIJAINTI (HARKKO KUVATTU PÄÄDYSTÄ)

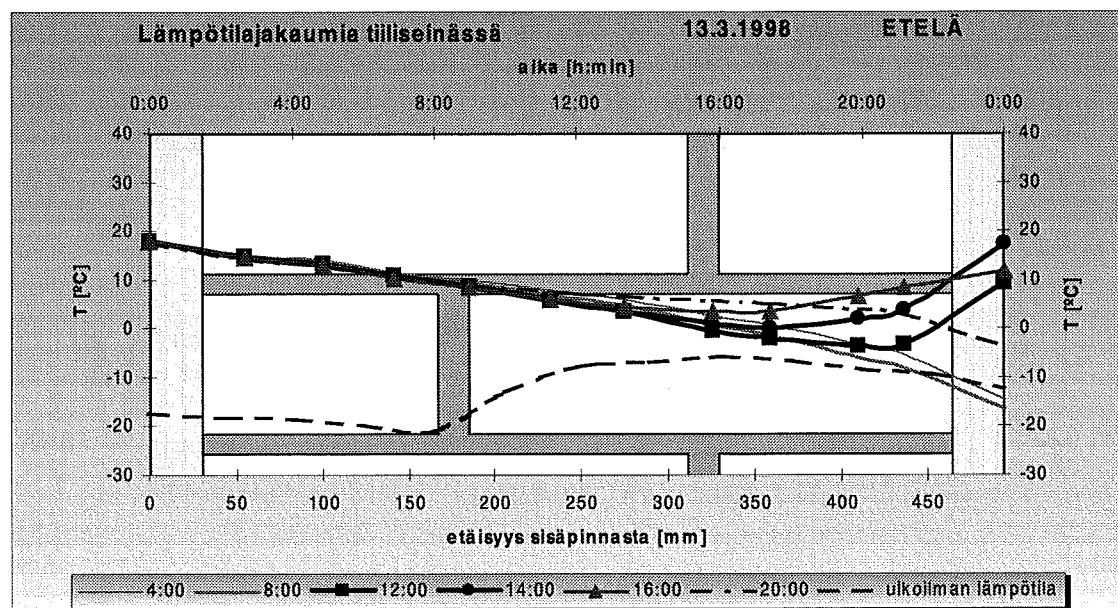
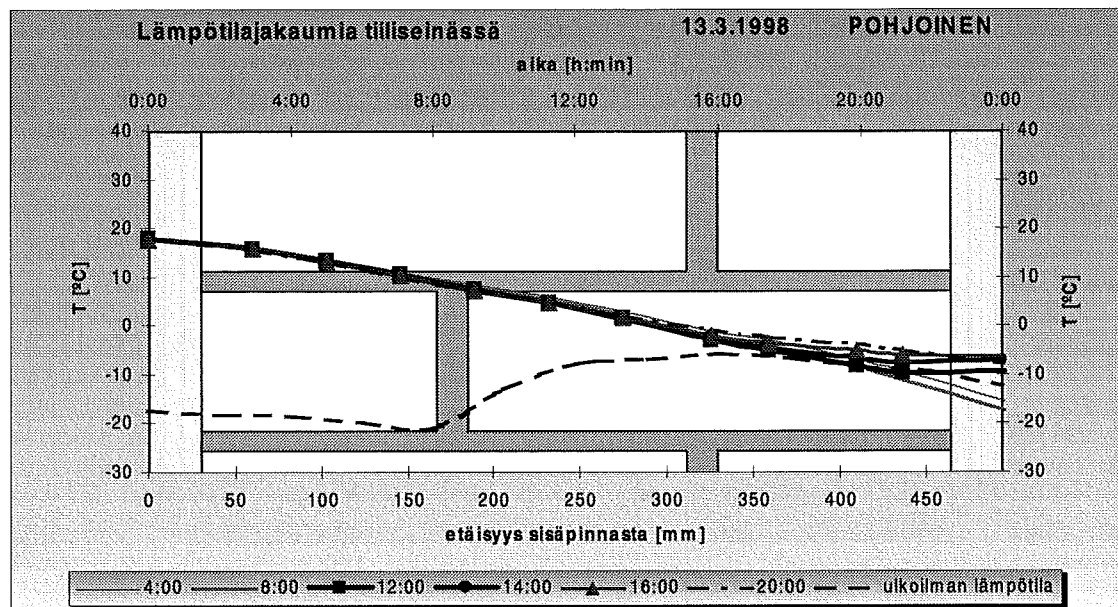
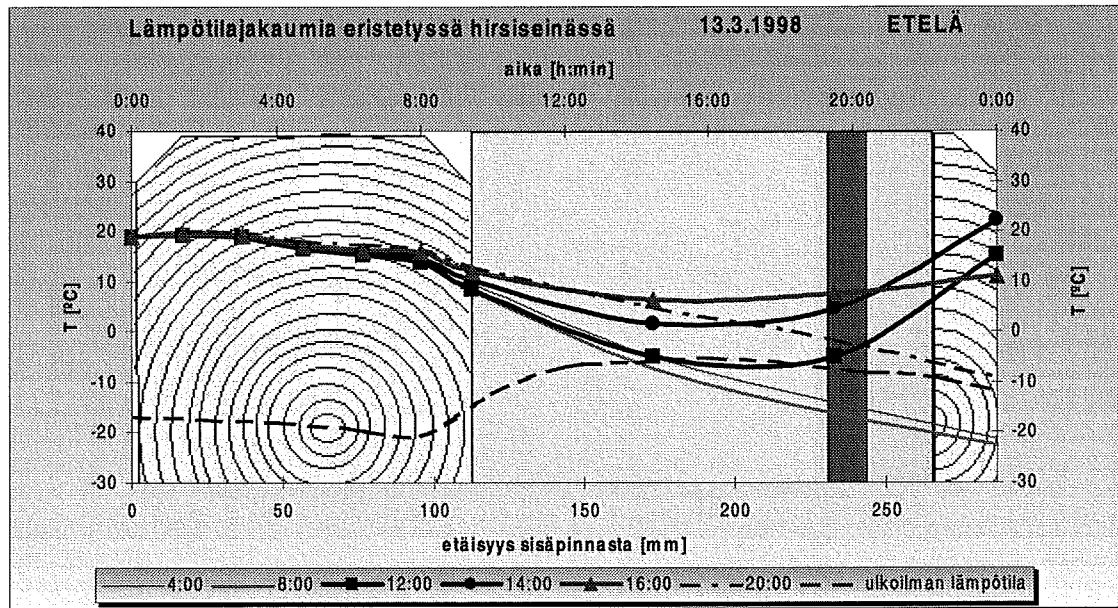


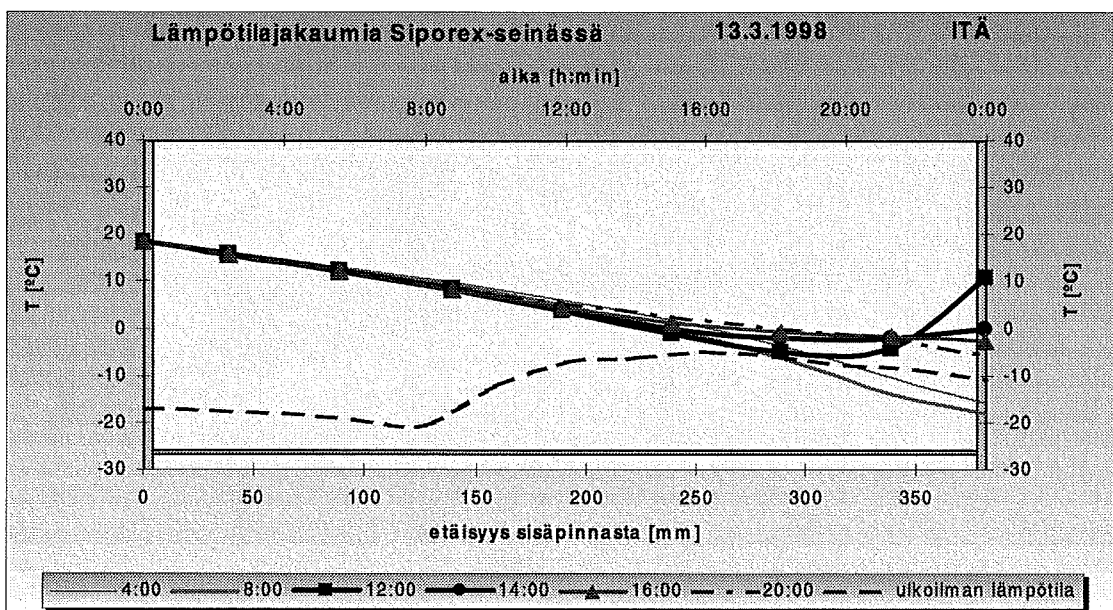
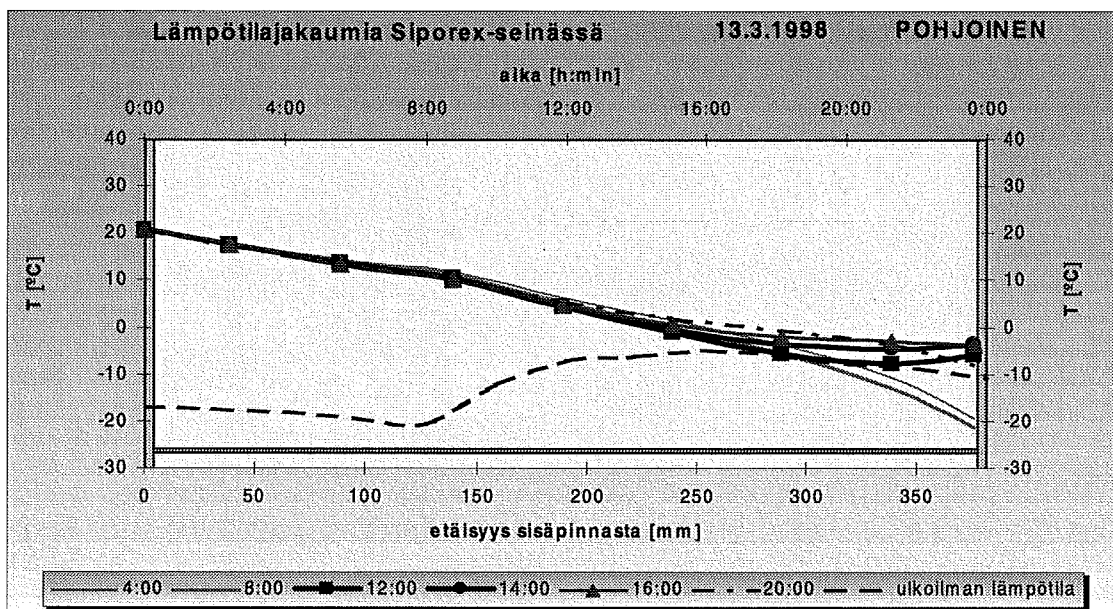
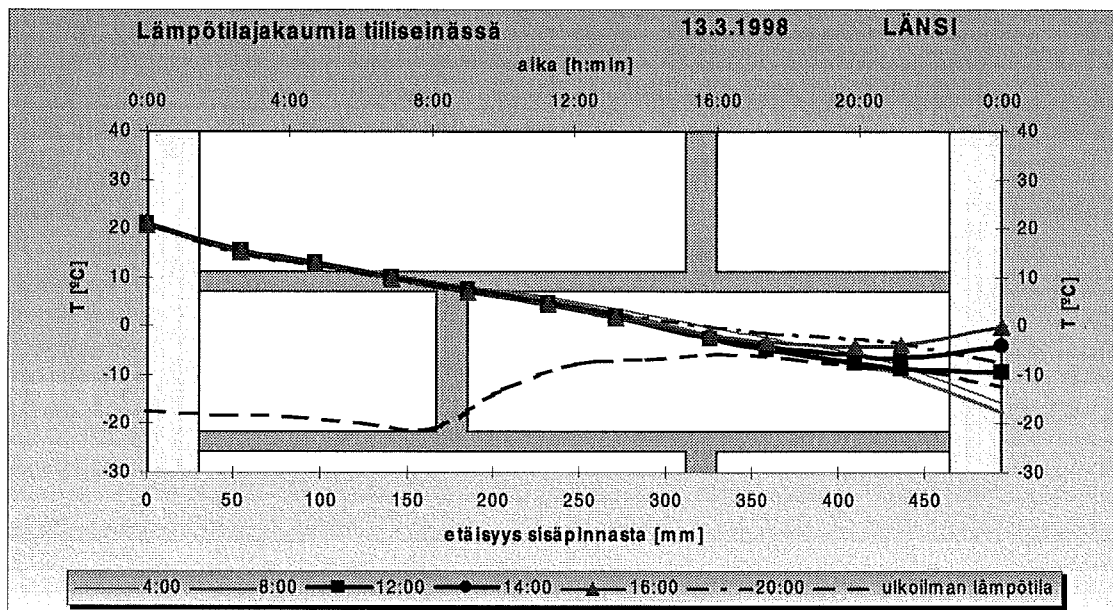
TTKK/RAKENNUSTEKNIikka 24.8.1998 : MT,HK

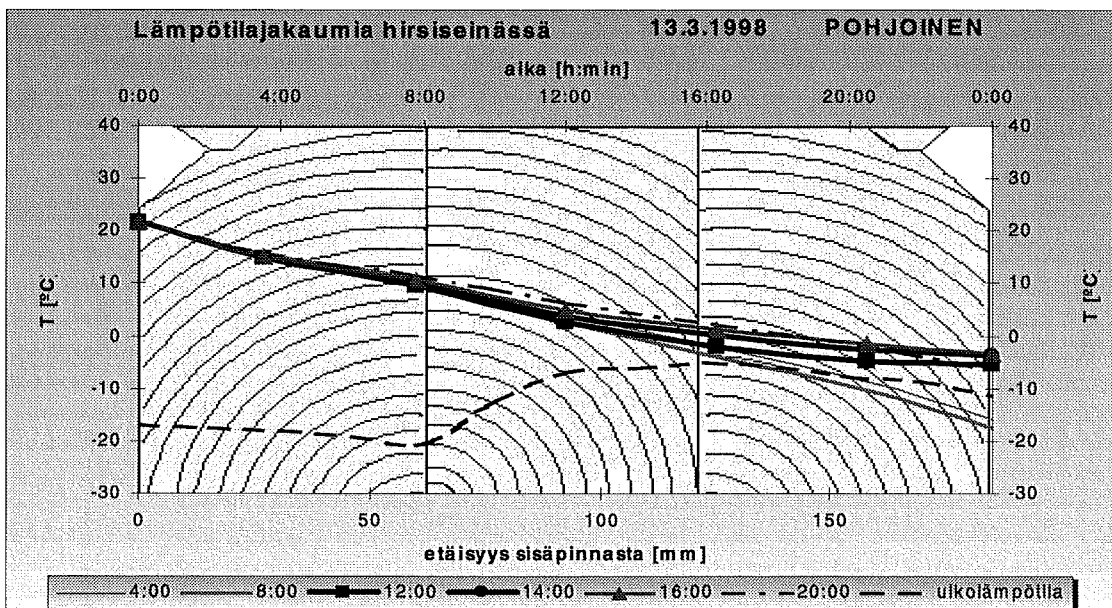
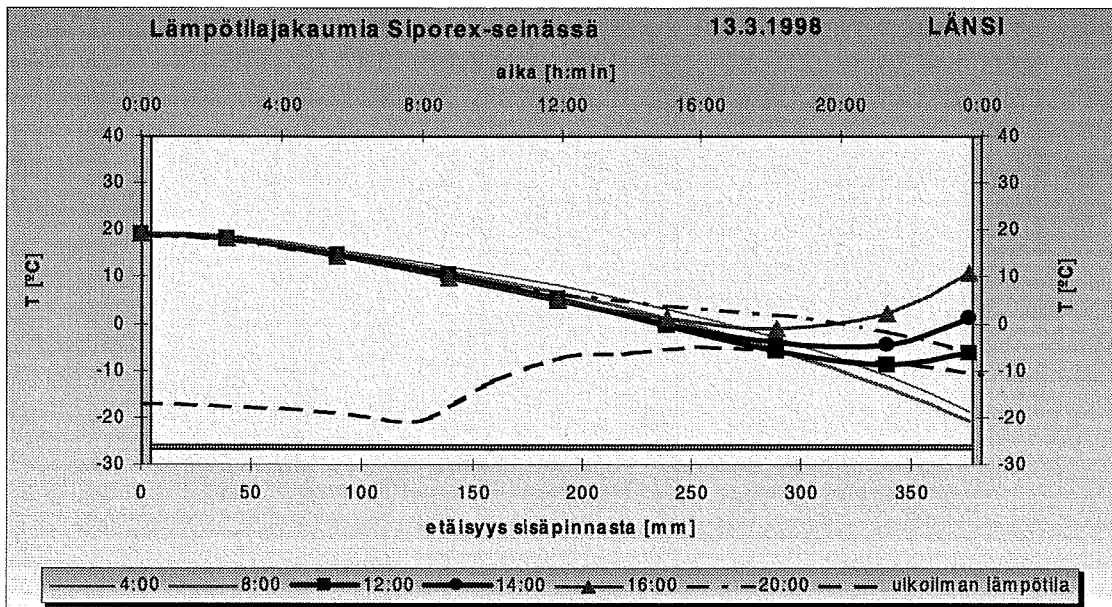
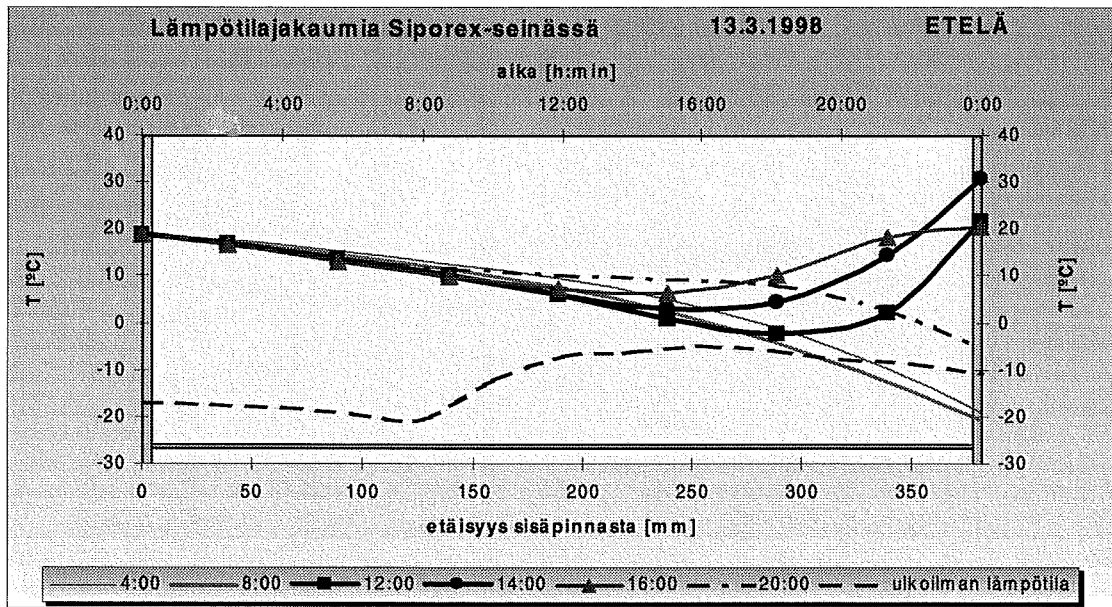
L5.2 Lämpötila-antureiden sijaintipiirustus (K5).

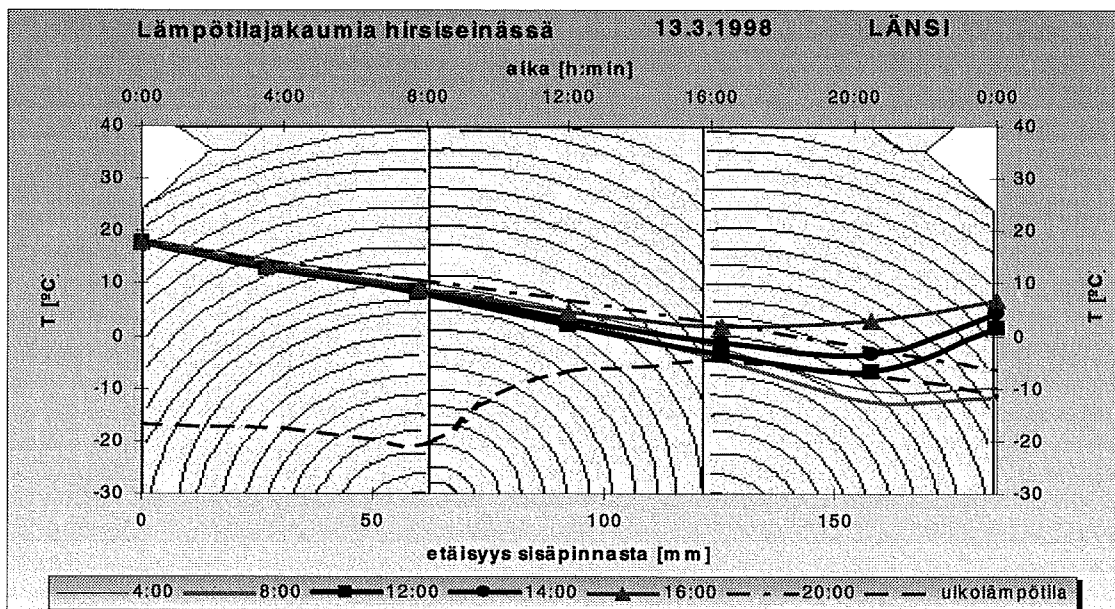
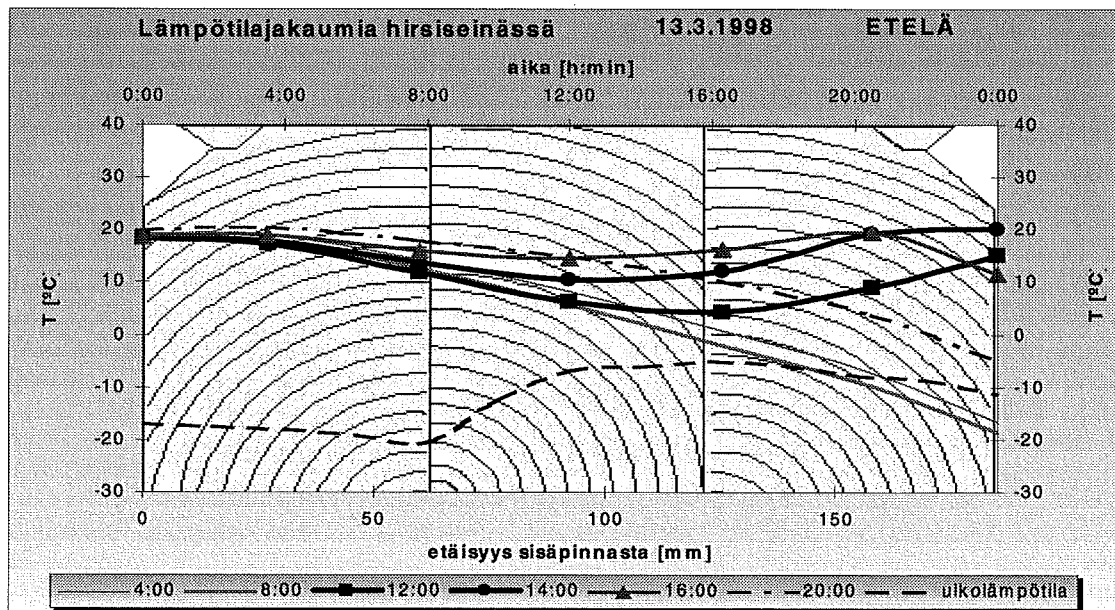






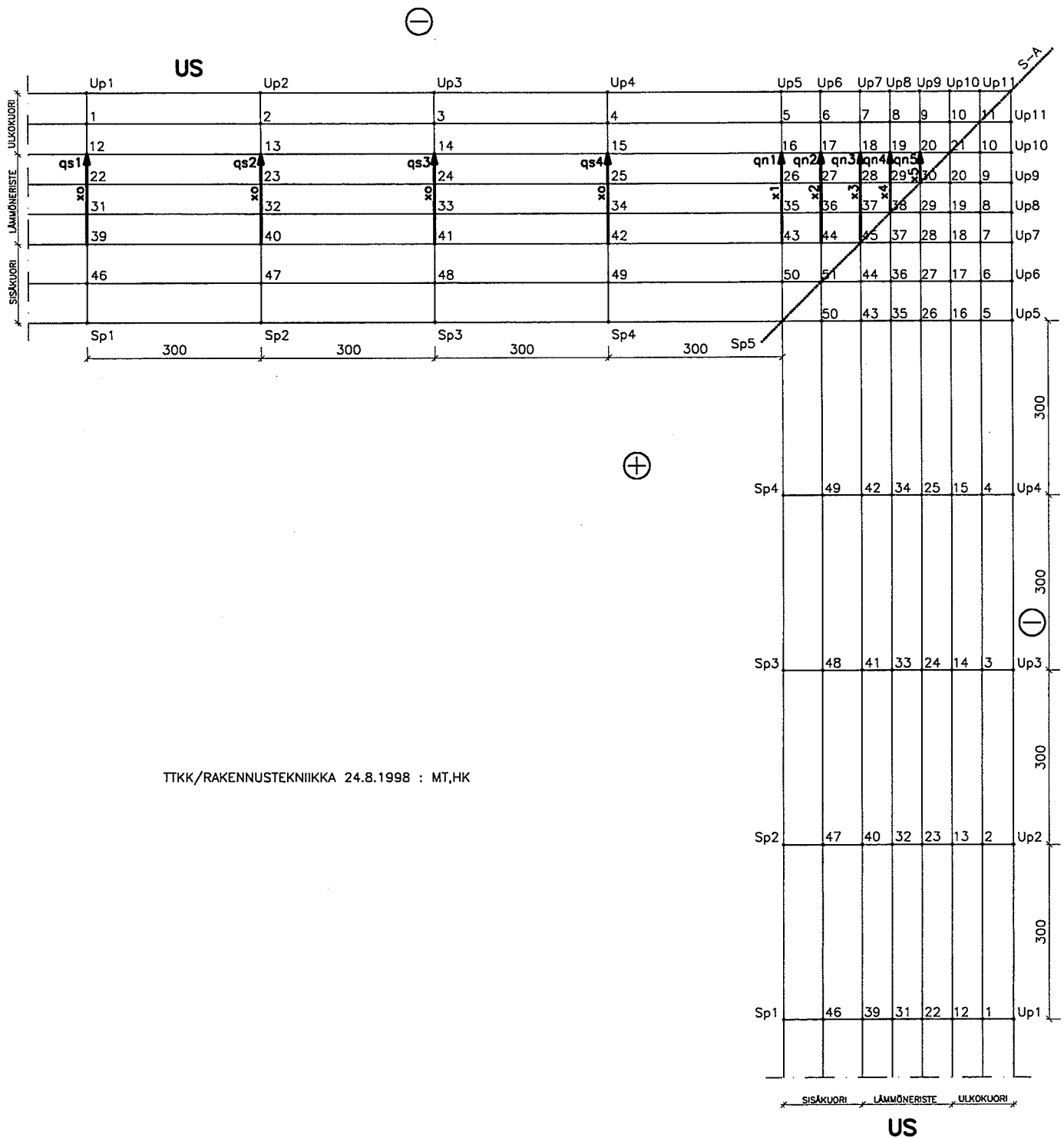




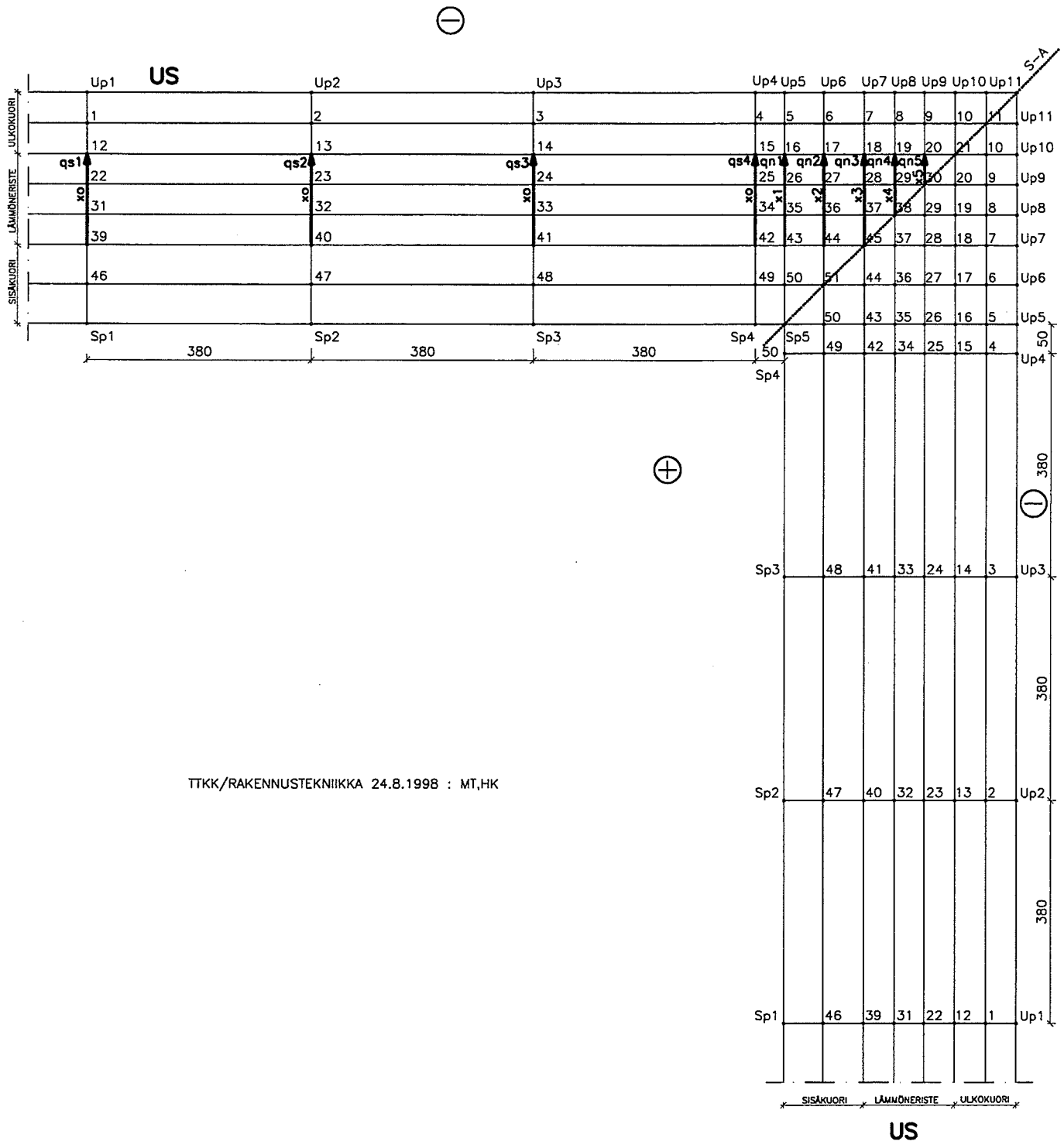


US/US-NURKAN LASKENNASSA KÄYTETTY ELEMENTTIVERKKO

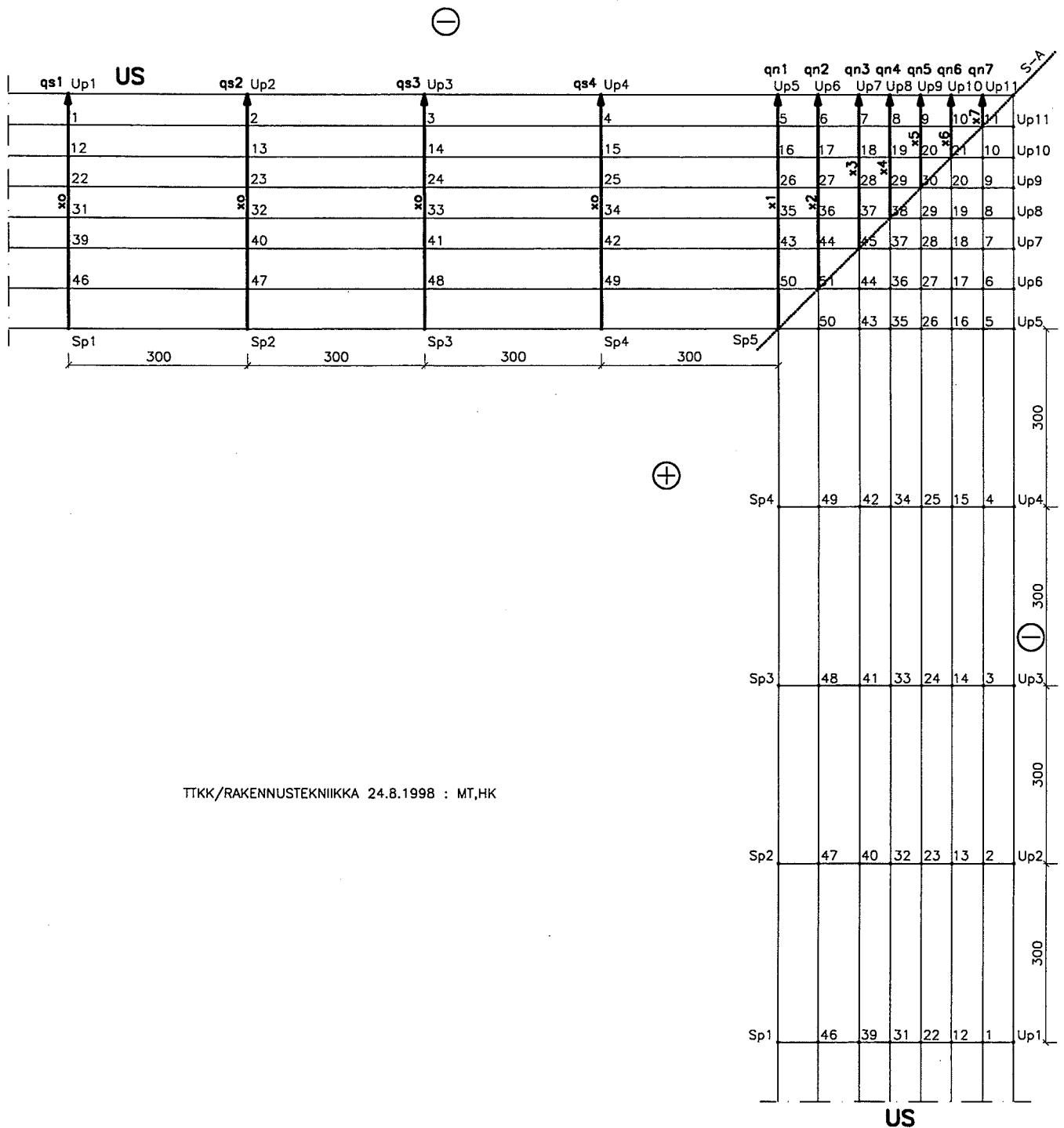
ERISTETTY SEINÄRAKENNE (TIILI-VILLA-TIILI)



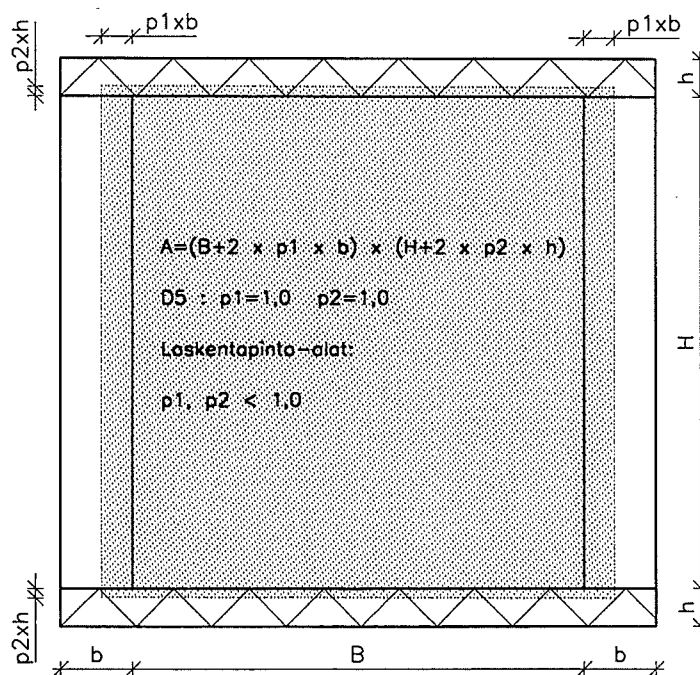
US/US-NURKAN LASKENNASSA KÄYTETTY ELEMENTTIVERKKO
ERISTETTY SEINÄRAKENNE (SPU,HIRSI)



US/US-NURKAN LASKENNASSA KÄYTETTY ELEMENTTIVERKKO
ERISTÄMÄTÖN SEINÄRAKENNE (TILI,SIPOREX,HIRSI)

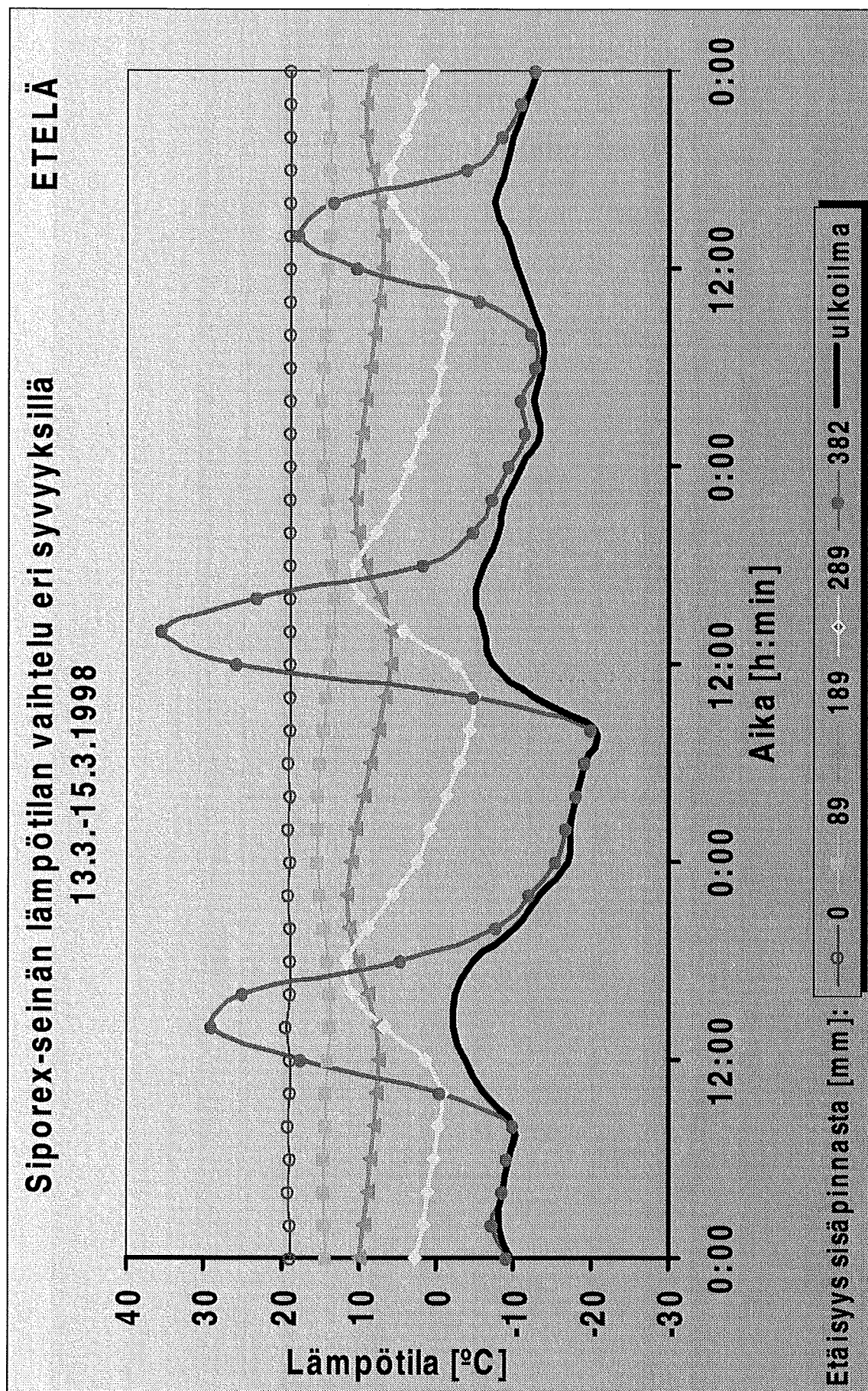


Ulkoseinän laskentapinta-ala (kuvassa varjostettu alue)



KOERAKENNUS	p1	p2
K1	0,14	0,40
K2	0,36	0,18
K3	0,10	0,20
K4	0,20	0,01
K5	0,30	0,07
K6	0,04	0,07

(Huom. p-kertoimien arvot muuttuvat vähän vuodenaikojen mukaan.)



9.1 Lämmönsiirtyminen ulkopinnasta seinän sisäosiin.

Talonrakennustekniikan julkaisuja (1990 - 1999)

- 42 Valta, M., Rakennusalan ammattitaitojen oppimisprosessi. TTKK 1990.
- 43 Pynnönen, J., Teräsrungot. Tutkimus. Runkovertailu, rungon rakenteita ja rakennustyön toteutus. TTKK 1990. 175 s.
- 44 Asp-Lehtinen, M., Tuuliniemi, V., Pentti, M., Julkisivumaaleista ja niiden kestävydestä betonialustalla. TTKK 1990. 138 s., hinta 90,-
- 45 Keronen, A., Mastojäykistetty, matalaperustuksinen teräsbetonikehäsystemi. TTKK 1990. 156 s.
- 46 Pynnönen, J., Levanto, R., Elementtien käytöstä liittopalkeissa. TTKK 1990. 95 s. + 10 liites.
- 47 Pynnönen, J., Toivonen, J., Betonitäytteisten teräspuikipilareiden palotekniset mitoitukset. TTKK 1990. 121 s. + 3 liites.
- 48 Pynnönen, J., Kärkäs, K., Teräsrunkoisen talon kevyet ulkoseinät. TTKK 1990. 89 s.
- 49 Pynnönen, J., Syrjynen, J., Siporex-laatastion sisäinen teräsbetoniliittopalkki. TTKK 1990. 125 s. + 53 liites.
- 50 Pynnönen, J., Leppänen, T., Teräsrunko monikerroksisessa toimisto- ja liikerakennuksessa. TTKK 1990. 113 s.
- 51 Pynnönen, J., Laavola, M., Kevyiden välipohjien värähtelyt. TTKK 1990. 92 s. + 31 liites.
- 52 Pynnönen, J., Suvanto, J., Teräsrakenteiden kerrostalon suunnittelun ja rakentamisen seuranta. TTKK 1990. 115 s. + 43 liites.
- 53 Pynnönen, J., Aro, J., Betonielementtiteollisuuden teräsosat. TTKK 1990. 87 s. + 4 liites.
- 54 Pynnönen, J., Sensio, K., Pultti- ja hitsausliitosten yhteistoiminta teräspalkin jatkoksessa. TTKK 1991. 59 s. + 20 liites.
- 55 Inha, T., Mattila, J., Teräsrakenteiden palosuojauksen suunnittelu. TTKK 1991. 105 s.
- 56 Mehto, L., Lindberg, R., Keronen, A., Koivula, U., Lapinniemen kehräämön seurantatutkimus: Rakenteiden tekninen toimivuus. TTKK 1991. 37 s.
- 57 Lindberg, R., Vinha, J., Myllyviita, S., Hellman, H., Beam-to-Column Connections in Story-Height Concrete Frame. TTKK 1992. 94 s. + 9 liites.
- 58 Pynnönen, J., Poukka, T., Teräsrunkoinen aravakerrostalo ja suunnitteluratkaisuvaihtoehtoja. TTKK 1992. 96 s. + 49 liites.
- 59 Tawast, I., Perustusten vahvistusmenetelmät korjausrakentamisessa. TTKK 1993. 199 s. + 11 liites., hinta 150,-
- 60 Kokko, P., Pentti, M., Ruostumattomien raudotteiden käyttö julkisivuelementeissä. TTKK 1993. 27 s.
- 61 Vinha, J., Lindberg, R., Kerrospilarirungon pilari-palkki -liitokset (Suunnitteluohje). TTKK 1994. 35 s.
- 62 Vinha, J., Lindberg, R., Mastopilari kehärakenteessa (Suunnitteluohje). TTKK 1994. 26 s. + 5 liites.
- 63 Lindberg, R., Suonketo, J., Hassinen, P., Test Report Long-Term Tests on Isora-Elements. TTKK 1994. 55 s. + 67 liites.
- 64 Laasonen, M., Betonirakenteiden analysointi elementtimenetelmällä. TTKK 1994. 72 s. + 8 liites., hinta 150,-
- 65 Kärkäs, K., Sähkömagneettisen luotauksen mahdollisuuksista rakenneaurioiden tutkimuksessa. Julkaisematon.
- 66 II Korjausrakentamisen tutkimusseminaari. TTKK 1995. 161 s.
- 67 Niemelä, T., Vinha, J., Lindberg, R., Puukuitueristeisen seinärakenteen hengittävyys. TTKK 1996. 35 s. + 9 liites.
- 68 Majahalme, T., Modeling in Construction Technology; A Literature Review. TTKK 1996. 42 s. + 2 liites.
- 69 Keronen, A., Effect of Semi-rigid Connections in RC Portal Frame: Load Tests. TTKK 1996. 94 s. + 6 liites.
- 70 Puska, A., Korjausrakentamisen valvonta. TTKK 1996. 68 s. + 32 liites.
- 71 Wahlman, J., Betonijulkisivujen säilyvyys ja korjaaminen - aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. TTKK 1997. 143 s. + 47 liites., hinta 180,-
- 72 Inha, T., Iso-Mustajärvi, P., Teräsrakenteiden palosuojaus. TTKK 1997. 71 s.
- 73 Huttunen, I., Pentti, M., Julkisivukorjaushankkeen laadunvarmistus. TTKK 1997. 30 s. + 39 liites.
- 74 Huttunen, I., Pentti, M., Vesikattokorjaushankkeen laadunvarmistus. TTKK 1997. 26 s. + 27 liites.
- 75 Leivo, V. (toim.), Koulujen kosteus- ja homeauriokorjaukset. Kokemuksia Ylöjärven kunnasta. TTKK 1997. 83 s. + 6 liites.

- 76 Berg, P., Rätty, H., Rakentamisen ympäristöteknologiaohjelman väliarvio. TTKK 1997. 51 s. + 23 liites.
- 77 Keronen, A., Kylliäinen, M., Sound Insulating Structures of Beam-to-Column Framed Wooden Apartment Buildings. TTKK 1997. 23 s. + 44 liites., hinta 200,-
- 78 Koski, T., Lindberg, R., Vinha, J., Lisäeristettyjen hirsiseinien kosteustekninen kunto. TTKK 1997. 107 s. + 51 liites.
- 79 Hietala, J., Keränen, H., Pentti, M., Betonisandwich-ulkoseinän muodonmuutokset ja halkeilu. TTKK 1997. 48 s. + 6 liites.
- 80 Berg, P., Malinen, P., Appraisal for The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries - Rapid Programme. TTKK 1997. 69 s. + 56 liites.
- 81 Berg, P., Puurakentamisen teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1997 - 1998 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1997. 57 s. + 32 liites.
- 82 Berg, P., Appraisal of The Wood in Construction Technology Programme. TTKK 1997. 37 s. + 35 liites.
- 83 Lahdensivu, J., Viljakainen, M., Avoin puurakentamisjärjestelmä, esiselvitys. TTKK 1998. 35 s. + 19 liites.
- 84 Pihlajamaa, J., Berg, P., Puurakentamisen teknologiaohjelman väliarvio. Puurakentamisen teknologiaohjelman loppujakson toimenpiteiden määrittäminen. TTKK 1998. 67 s. + 45 liites.
- 85 Keronen, A., (toim.), Puukerrostalo: Rakenteet. TTKK 1998. 105 s.
- 86 Berg, P., Rätty, H., Appraisal of The Environmental Technology in Construction Technology Programme. TTKK 1998. 37 s. + 23 liites.
- 87 Pentti M., Mattila, J., Wahlman, J., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa I rakenteet, vauriot ja kunnon tutkiminen. 156 s. TTKK 1998. 250,-
- 88 Osa II (valmistumassa)
- 89 Pentti, M., Huttunen, I., Vepsäläinen, K., Olenius, K., Betonijulkisivujen ja parvekkeiden korjaus. Osa III Korjaushanke. TTKK 1998. 124 s. + 23 liites. 250,-
- 90 Lindberg, R., Keränen, H., Teikari, M., Ulkoseinärakenteen vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. TTKK 1998. 34 s. + 26 liites.
- 91 Berg, P., Salminen, K., Leivo, V., Nopeat tuotantjärjestelmät teknologiaohjelman painoalueet vuosille 1998-2000 sekä ohjelman arviointi- ja ohjaussuunnitelma. TTKK 1998. 55 s. + 37 liites.
- 92 Berg, P., Malinen, P., Leivo, V., Internal Monitoring of The Technology Programme for Improving Product Development Efficiency in Manufacturing Industries - Rapid Programme. TTKK 1998. 81 s. + 93 liites.
- 93 Lepo, K., Laatuja järjestelmän kelpoisuus. TTKK 1998. 101 s. + 50 liites.
- 94 Pentti, M., Hyypöläinen, T., Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. TTKK 1999. 150 s. + 40 liites. 250,-
- 95 Leivo, V. (toim.), Opas kosteusongelmiin - rakennustekninen, mikrobiologinen ja lääketieteellinen näkökulma. TTKK 1998. 157 s. 150,-
- 96 Vinha, J., Käkälä, P., Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. TTKK 1999. 81 s. + 29 liites. 200,-
- 97 Kylliäinen, M., Keronen, A., Lisärakentamisen rakennetekniset mahdollisuudet lähiöiden asuinkeuhkaloissa. TTKK 1999. 59 s. + 37 liites. 200,-

Julkaisun hinta: 120,- + alv 8 %, ellei toisin ole mainittu. Oikeus hinnanmuutoksiin pidätetään.
 Myynti: Tietokirjakauppa Juvenes/Julkaisumyynti, PL 527, 33101 Tampere,
 puh. (03) 365 2351, telefax (03) 365 2191



**TALONRAKENNUS-
 TEKNIikka**
TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
 Korkeakoulunkatu 3, PL 600, 33101 Tampere
 Puh. (03) 365 4804, Telefax (03) 365 2811

ULKOSEINÄRAKENTTEEN VAIKUTUS RAKENNUKSEN ENERGIAANKULUTUKSEEN

Julkaisussa esitellään koerakennustutkimus, jossa selvitettiin ulkovaipan lämpöhäviöiden osuutta rakennuksen lämmönkulutuksesta. Tutkimuksessa oli mukana kuusi erilaista ulkoseinä rakennetta, jotka voidaan jakaa kahteen tyyppiin: lämmöneristettyihin (1. polyuretaanieristeinen puurankaseinä, 2. mineraalivillalla eristetty tiiliseinä, 3. ruiskutetulla puukuituvillalla lisäeristetty hirsiseinä) ja eristämättömiin (4. 1½ -kiven tiiliseinä, 5. siporex -harkkoseinä, 6. hirsiseinä). Koerakennusten lämmönkulutusta mitattiin lämmityskausi 1997-1998. Tavoitteena on antaa tietoa siitä, miten erilaiset ulkoseinät lämpöteknisesti toimivat ja millä tarkkuudella ulkoseinien lämpöhäviöt voidaan nykyisillä laskentamenetelmillä määrittää. Julkaisussa tarkastellaan myös seinäpinnoille tulevan auringon säteilyn vaikutusta lämpöhäviöihin.

Julkaisun hinta: 120,- + alv 8 %



**TALONRAKENNUS-
TEKNIikka**

TAMPEREEN TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Korkeakoulunkatu 3, PL 600, 33101 Tampere
Puh. (03) 365 4804, Telefax (03) 365 2811
Email: makipaa@cc.tut.fi