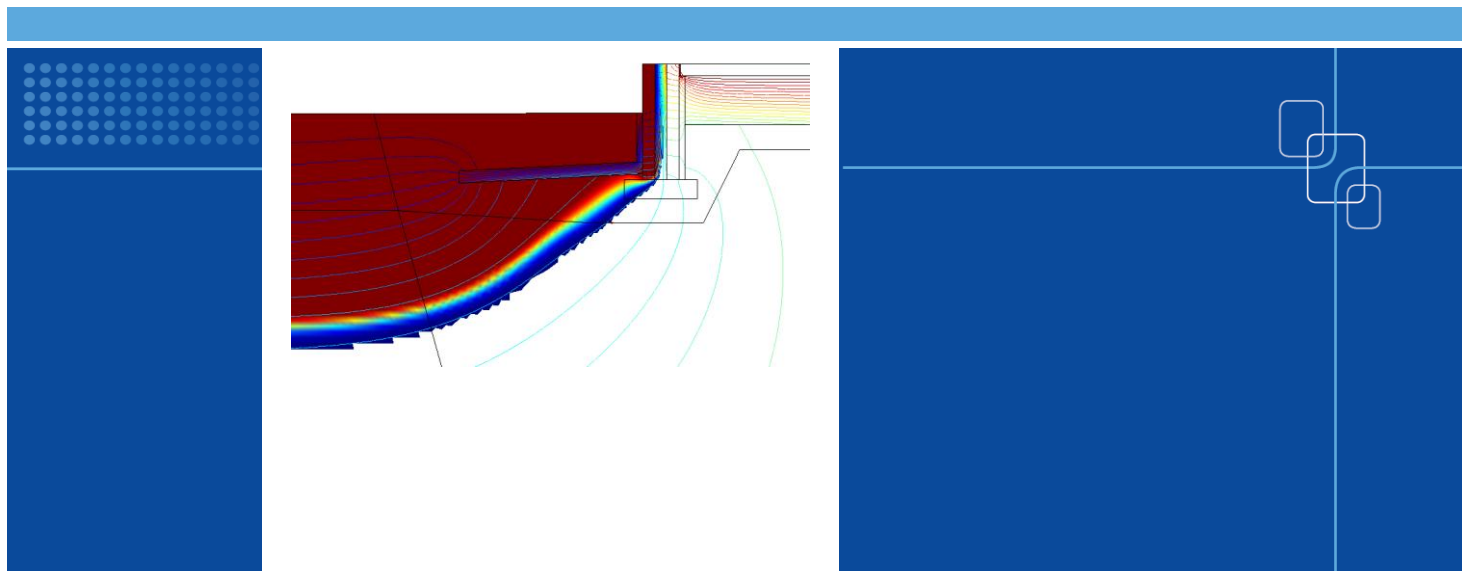
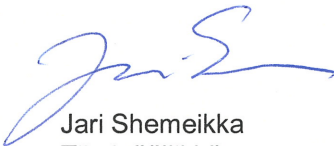




Maanvastaisen alapohjan routasuojaus

Kirjoittajat: Jorma Heikkinen, Miimu Airaksinen

Luottamuksellisuus: Luottamuksellinen

Raportin nimi	
Maanvastaisen alapohjan routasuojaus	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite
Tuuli Kunnas, EPS-rakennuseristeteollisuus, Muoviteollisuus ry., PL 4, 00131 Helsinki	
Projektin nimi	Projektin numero/lyhytnimi
Maanvaraisen alapohjan lämmöneristysratkaisut	73079/EPS lämmöneristys
Raportin laatija(t)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä
Jorma Heikkinen, Miimu Airaksinen	23 / 1
Avainsanat	Raportin numero
Lämmöneristys, routa, maanvastainen alapohja	VTT-R-04025-11
Tiivistelmä Energiatohokkuuden parantuessa maanvastaisen alapohjan lämmöneristävyys paranee. Sen seurauksena rakennuksen alla olevan maapohjan lämpötila laskee. Tämä lisää perustusten routasuojauksen tarvetta. Tässä tutkimuksessa on haettu laskennallisesti yhteys lattian eristepaksuuden ja routaeristuksen leveyden sekä paksuuden välille kun käytetään EPS-lämmöneristeitä. Lattian eristepaksuus vaihteli laajalla alueella 200 – 500 mm. Laskentaan valittu betoninen perusmuuri on routasuojauksen kannalta vaativampi kuin Talonrakennuksen routasuojausohjeissa (2007) oletetaan. Perusmuurin ulkopuolinen eristys vähentää routasuojauksen tarvetta merkittävästi. Nurkka-alueen lisäeristystarve on kolmiulotteisten, entistä tarkempien laskelmien mukaan suurempi kuin aikaisemmin on oletettu. Nurkka-alueella tarvitaan kaksinkertainen routaeristeen paksuus verrattuna seinälinjan eristyspaksuuteen Keski-Suomen sääoloissa. Tämän tutkimuksen perusmuurin betonirakenne ei ole esimerkillinen ja suositeltava mutta se on valittu laskelmiin koska se on tavallinen ja routasuojauksen kannalta kriittinen. Rakennetta voidaan parantaa pienentämällä perusmuurin kylmäsiltoja sekä perusmuurin lämpöhäviöitä suoraan ulkoilmaan. Paras perusmuurin lämmöneristeen paikka routasuojauksen kannalta on perusmuurin ulkopinnalla. Routasuojauksen tarkempi mitoitus vaatii tuekseen lisätutkimusta. Lisää tietoa tarvitaan lämpötilakriteereistä eri maalajeissa ja perustusrakenteissa sekä nurkan routaeristuksen toiminnasta.	
Luottamuksellisuus	Luottamuksellinen
Espoo 27.5.2011	
 Jorma Heikkinen Erikoistutkija	 Miimu Airaksinen Tutkimusprofessori
 Jari Shemeikka Tiimipäällikkö	
VTT:n yhteystiedot	
Jorma Heikkinen, VTT, PL 1000 02044 VTT, jorma.heikkinen @vtt.fi	
Jakelu (asiakkaat ja VTT)	
EPS-rakennuseristeteollisuus, Tuuli Kunnas, alkuperäinen VTT, alkuperäinen	

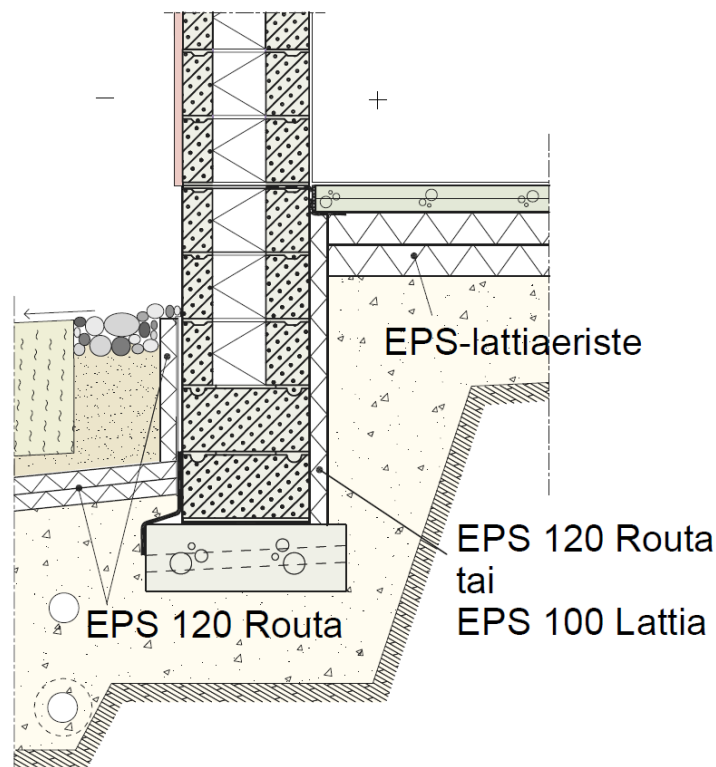
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	3
2	Tarkasteltava alapohjarakenne	3
3	Routasuojaus ja sen toimivuuskriteeri.....	5
4	Laskentamenetelmä.....	5
4.1	Säätiedot	7
5	Routalaskelmat rakennuksen pitkällä sivulla	9
5.1	Ulkoilmaan eristetyn ja eristämättömän perusmuurin ero	12
6	Routalaskelmat nurkan läheisyydessä	15
7	Routasuojauksen suositukset	20
8	Yhteenvedo	22

1 Johdanto

Energiatehokas rakentaminen kuten matala- ja passiivienergiarakennukset ovat yleistymässä, jolloin tyypillisesti myös maanvastaisen alapohjan lämmöneristävyyks paranee. Lisäksi lämmöneristysvaatimukset ovat viime vuosina kiristyneet, joka aiheuttaa muutoksia maanvastaisen alapohjan (kuva 1) rakenteisiin. Alapohjan lämmöneristävyyden parantuessa rakennuksen alla olevan maapohjan lämpötila laskee. Tämä parantaa alapohjan kosteusteknistä toimintaa mutta lisää perustusten routasuojauksen tarvetta.

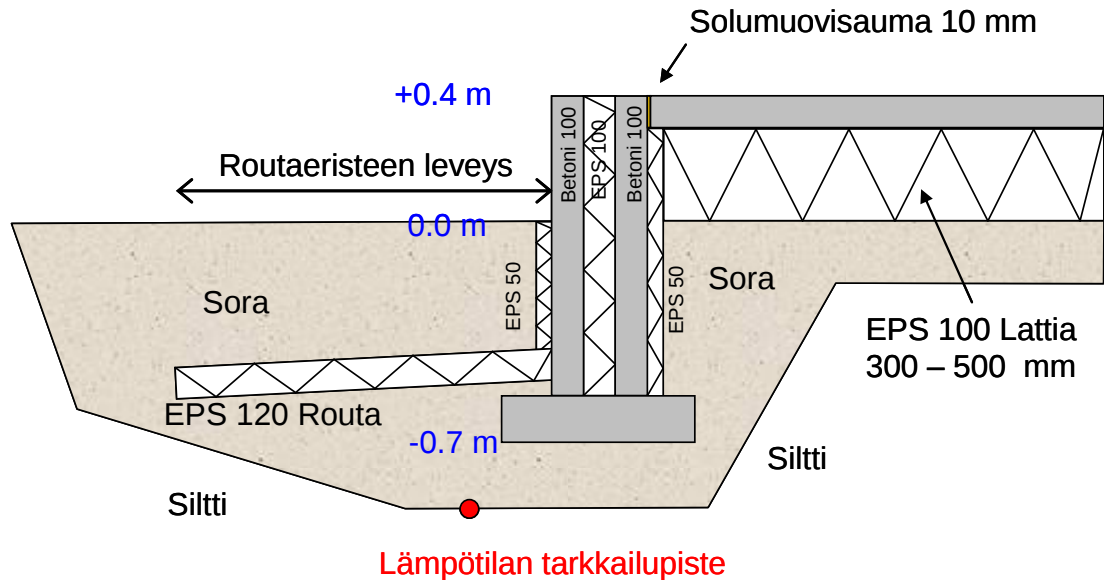


Kuva 1. Tyypillinen maanvastaisen alapohjan rakenne (RT 37790, 2009).

Tässä raportissa tarkastellaan entistä paremmin eristettyjä alapohjarakenteita ja betonirakenteista perusmuuria, joka on tavallinen ja alttiimpi routavaurioille kuin ulospäin hyvin eristetty perusmuuri. Rakennuksen nurkka-alueen routasuojauksen tarvetta tutkitaan aikaisempaa kehittyneimmillä laskelmilla.

2 Tarkasteltava alapohjarakenne

Tarkasteltu maanvastainen alapohjarakenne (kuva 2) vastaa muuten kuvan 1 rakennetta mutta lattian lämpöeristekerros on paksu ja perusmuuri on betonia. Tämä perusmuurin betonirakenne ei ole esimerkillinen ja suositeltava mutta se on valittu laskelmiin koska se on tavallinen ja routasuojauksen kannalta kriittinen. Perusmuurin ulkokuori johtaa nimittäin lämpöä anturasta ulkoilmaan ja jäädyttää sen alla olevaa maata.



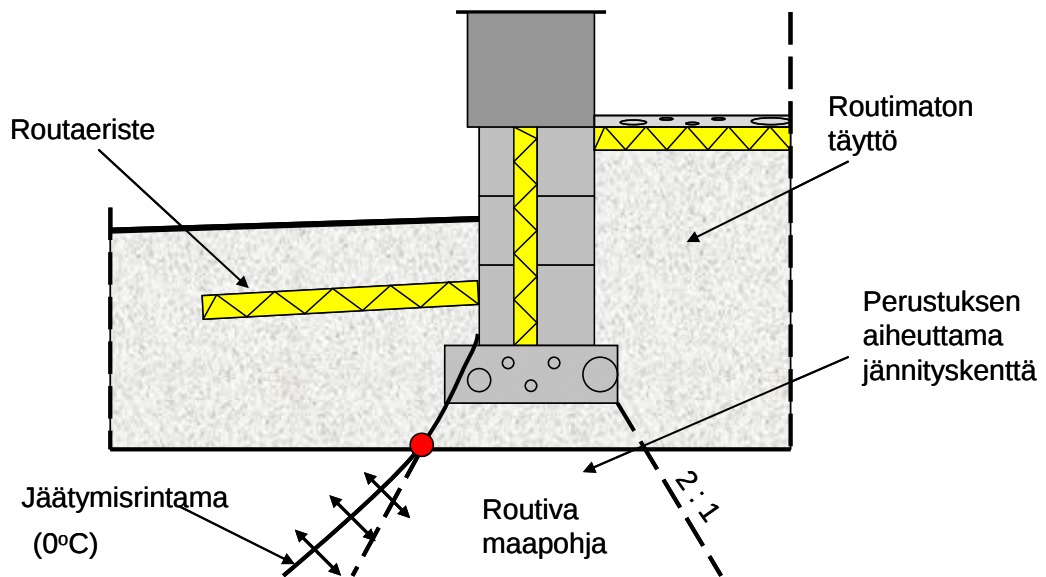
Kuva 2. Tutkittu maanvastainen alapohjarakenne. Pohjamaan lämpötilan ja routimisen tarkkailupiste on anturan alla olevan jännityskentän ulkoreunalla.

Routaeristeen leveydellä tarkoitetaan tässä raportissa kuvan 2 mukaisesti etäisyyttä perusmuurin ulkopinnasta toisin kuin Talonrakennusten routasuojausohjeissa (2007), jossa leveys lasketaan anturan ulkoreunasta. Kuvan 2 tapauksessa perusmuurin ulkopinnasta laskettu eristeen leveys on 0,15 m suurempi kuin anturan ulkoreunasta laskettu leveys.

Lattian ja anturan alla on 200 mm paksu routimaton täyttösorakerros ja pohjamaa on routivaa silttiä. Käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty laskentamenetelmän yhteydessä taulukossa 1. Lattian leveys oli 8 m, josta laskentaan otettiin symmetrian takia vain puolikas. Maassa laskenta-alue ulottui 10 metrin syvyyteen ja seinästä vaakasuunnassa 10 metrin etäisyydelle. Lattian pintalämpötila oli laskennassa 20 °C.

3 Routasuojaus ja sen toimivuuskriteeri

Routasuojauksella estetään pohjamaan jäätyminen perustuksen alla olevassa jännityskentässä. Kriteerinä Suomessa on (Talonstrakennusten routasuojausohjeet 2007), että lämpötila ei laske 0 °C alapuolelle jännityskentän reunalla (kuva 3). Standardissa EN ISO 13793 (2001) kriittinen lämpötila on ensi sijassa -1 °C mutta vaihtoehtona on 0 °C, jota siis Suomessa noudatetaan. Perusteena on, että maaperässä on havaittu jäälinssejä jo nollan ja miinus yhden asteen lämpötilavälillä.



Kuva 3. Routasuojauksen kannalta kriittinen lämpötilan tarkkailupiste (merkitty punaisella) on perustuksen jännityskentässä routivan maapohjan yläpinnassa (Talonstrakennusten routasuojausohjeet 2007).

4 Laskentamenetelmä

Maanvastaisen rakenteen ja maaperän lämpöteknistä käyttäytymistä kuvaa lämmönjohtumisyhtälö:

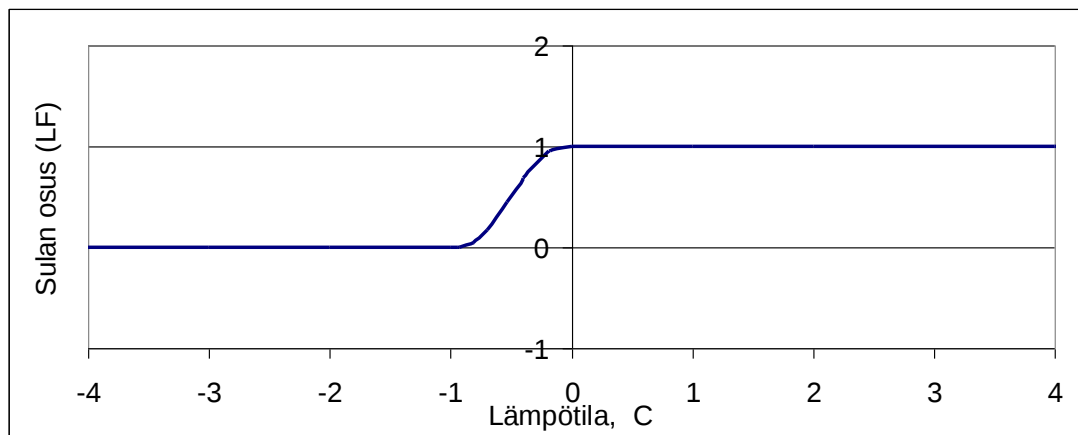
$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (1)$$

missä	T on lämpötila (K)
ρ	tiheys (kg/m ³)
c	tehollinen lämpökapasiteetti (J/kgK)
k	lämmönjohtavuus (W/Km)

Maalle on käytetty samoja aineominaisuuksia (taulukko 1) kuin Talonrakennuksen routasuojausohjeiden (2007) laskelmissa. Sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudelle on käytetty kaavaa

$$k = k_u LF + k_{fr} (1 - LF) \quad (2)$$

missä alaindeksi “u” viittaa sulaan ja “fr” jäätyneeseen tilaan. Muuttuja LF on maan olotilaa kuvaava suure, joka on 1 sulalle maalle ja 0 jäätyneelle maalle. Faasimuutoksen on oletettu käyttäytyvän kuvan 4 mukaisesti koska on tavallista olettaa maan faasimuutoksen tapahtuvan lämpötilojen $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä (SFS-EN ISO 13793 (2001)).



Kuva 4.. Maan faasimuutos jäätyneestä sulaan tapahtuu laskennassa $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä kuvan mukaisesti.

Tehollinen lämpökapasiteetti on muotoa

$$c = c_u LF + c_{fr} (1 - LF) + \frac{dLF}{dT} l \quad (3)$$

jonka viimeinen, maan jäätymis- tai sulamislämmön (l , J/kg) sisältävä termi ottaa huomioon faasimuutoksen.

Taulukko 1. Maaperän ja rakenteiden lämpötekniset materiaaliominaisuudet.

	k_u (W/mK)	k_{fr} (W/mK)	c_u (J/kgK)	c_{fr} (J/kgK)	ρ (kg/m ³)	l (J/kg)
Siltti	1,7	2,2	1 440	1 022	2 000	66 960
Sora	2,0	2,3	977	841	2 033	21 903
Betoni	2,0			1 000	2 400	
EPS Lattia, vaaka	0,036			1 300	20	
EPS Lattia, pysty	0,038			1 300	20	
EPS Routa, vaaka	0,041			1 300	22	
EPS Routa, pysty	0,039			1 300	22	
Solumuovi	0,05			1 500	70	

Lämmönsiirtokerroin perusmuurin ulkopuolella oli $25\text{ W/m}^2\text{K}$ (SFS-EN ISO 6946, 2008). Maan pinnalla lämmönsiirtokerroin oli pienempi ($10\text{ W/m}^2\text{K}$) koska tällä saatiin oikeampi routasyvyys häiriintymättömässä maassa. Lumen eristävää vaikutusta ei pidä standardin SFS-EN ISO 13793 (2001) mukaan ottaa huomioon. Maaperässä 10 metrin syvyydessä asetettiin lämpötilaksi vuoden keskilämpötila

lisättyä puolella asteella ja geotermiseksi lämpötilagradientiksi (K/m) 0,43 kertaa vuoden keskilämpötila ($^{\circ}\text{C}$) + 1 (Skaven-Haug, ref. Saarelainen 1992).

Yhtälöt (2) ja (3) implementoitiin Comsol Multiphysics 3.5a ohjelmistoon, joka ratkaisee yhtälön (1) elementtimenetelmää käyttäen. Yhden tilanteen kolmiulotteinen laskenta 10 vuoden jaksolla kesti noin 24 tuntia työasemakoneella (Dell Precision T7500, Intel X5570 prosessori).

Tärkein laskentatuloks oli roudan eteneminen erityisen kylmänä talvena, jollaisia esiintyy kerran 50 vuodessa. Tätä talvea edelsi laskennassa noin 8 tavallista talvea, joiden aikana maan lämpötila ehtii asettua vastaamaan pitkää normaalia sääjaksoa.

4.1 Sää tiedot

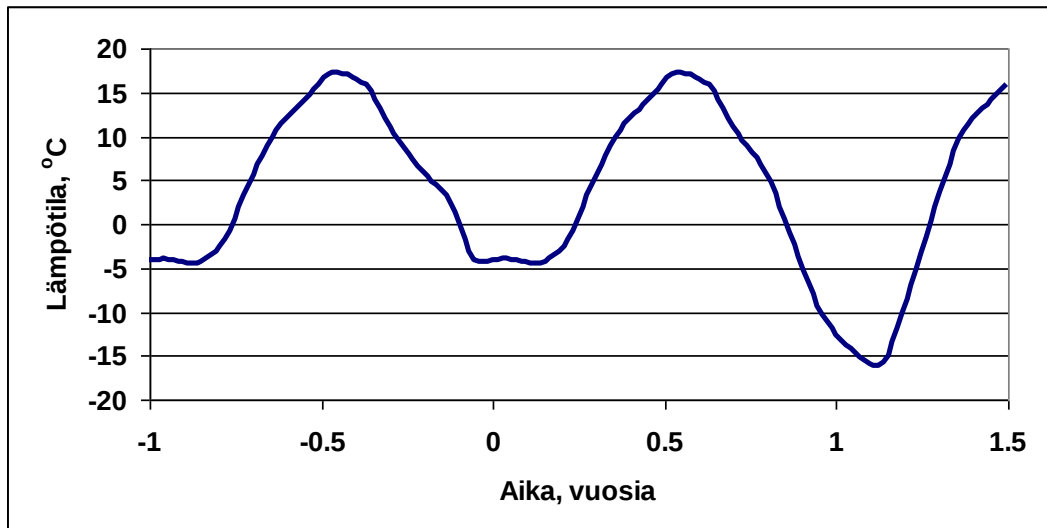
Normaalivuoden ulkolämpötilana käytettiin Suomen rakentamismääräyskokoelman D5 (Ohjeet 2012) mukaisia lämpötiloja Helsingille, Jyväskylälle ja Sodankylälle. Laskennassa käytettiin kuukauden keskilämpötilojen pohjalta tasoitettua ulkolämpötilaa (kuvat 5 - 7) koska esimerkiksi vuorokauden keskilämpötilojen käyttö johtaa kohtuuttoman pitkiin laskenta-aikoihin. Myös vuorokauden keskilämpötilojen käyttöä kokeiltiin (kuva 8) ja havaittiin, että pehmennetty ulkolämpötila antaa riittävän hyvän kuvan maaperässä olevan tarkastelupisteen lämpötilasta

Erityisen kylmän, kerran 50 vuodessa esiintyvän vuoden (merkintä F50) pakkasmäärä otettiin samoille paikkakunnille havainnointikauden 1961-1990 mukaan (RT 81-10590, liite 1). Laskentaan kylmä vuosi konstruointiin siten, että keskilämpötilat säilyivät normaalivuoden tasolla mutta talvikuukausien lämpötila laskettiin niin, että saavutettiin tavoiteltu pakkasmäärä. Pakkasmäärä on periaatteessa summa vuorokauden keskilämpötiloista pakkaskaudella kerrottuna -24:llä mutta tarkempi määritelmä on Talonrakennusten routasuojausohjeissa (2007). Normaalivuoden ja F50-vuoden sää tiedot on esitetty taulukossa 2 sekä kuvissa 5 - 7.

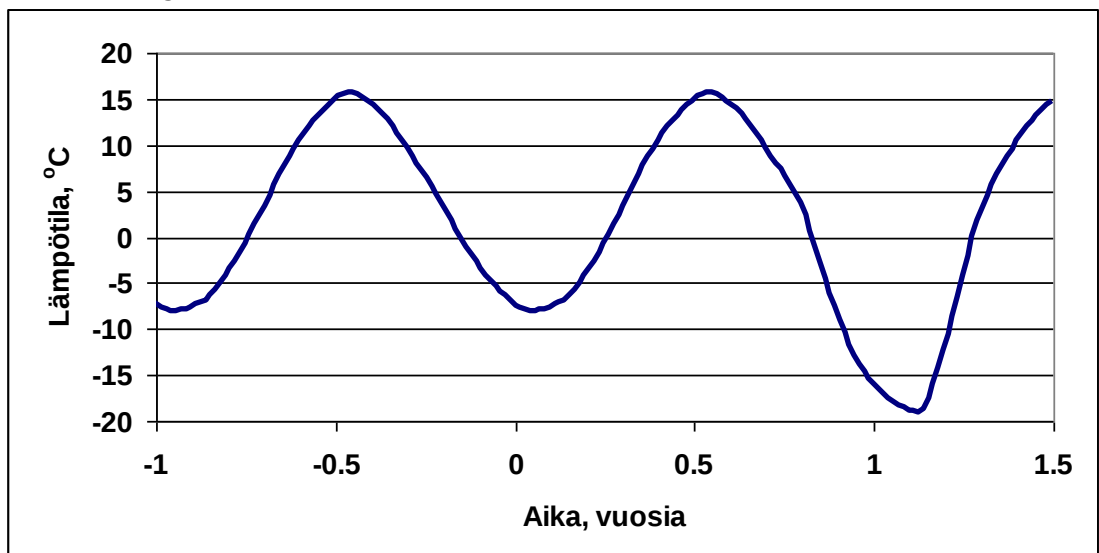
Taulukko 2. Vuoden keskilämpötila ja pakkasmäärä normaalivuodelle ja kerran 50 vuodessa esiintyvälle vuodelle (F50).

	Keskilämpötila, $^{\circ}\text{C}$		Pakkasmäärä, Kh	
	Normaali	F50	Normaali	F50
Helsinki	5,6	2,2	11 000	37 000
Jyväskylä	3,5	0,1	19 000	49 000
Sodankylä	0,1	-3,8	37 000	71 000

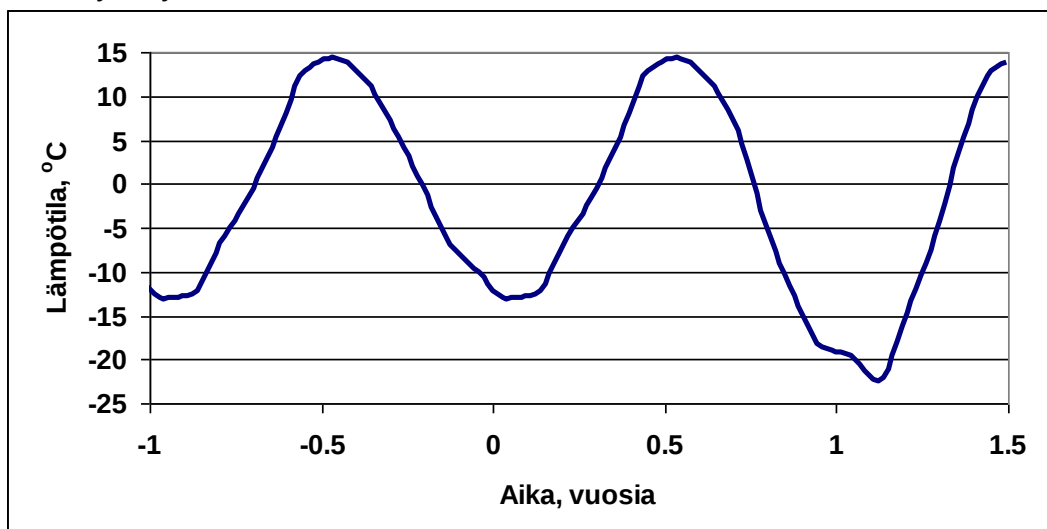
Rautateiden routamitoitusta varten (RATO, osa 3. 2008) on otettu käyttöön vuosien 1978-2007 havaintoihin perustuva pakkasmääräkartta, jossa pakkasmäärät ovat noin 4000 Kh aikaisempaa pienempiä. Kun tässä tutkimuksessa on kuitenkin käytetty paikkakuntakohtaisia normaalivuoden lämpötiloja, uutta pakkasmääräkarttaa ei voi suoraan soveltaa tämän tutkimuksen tuloksiin.



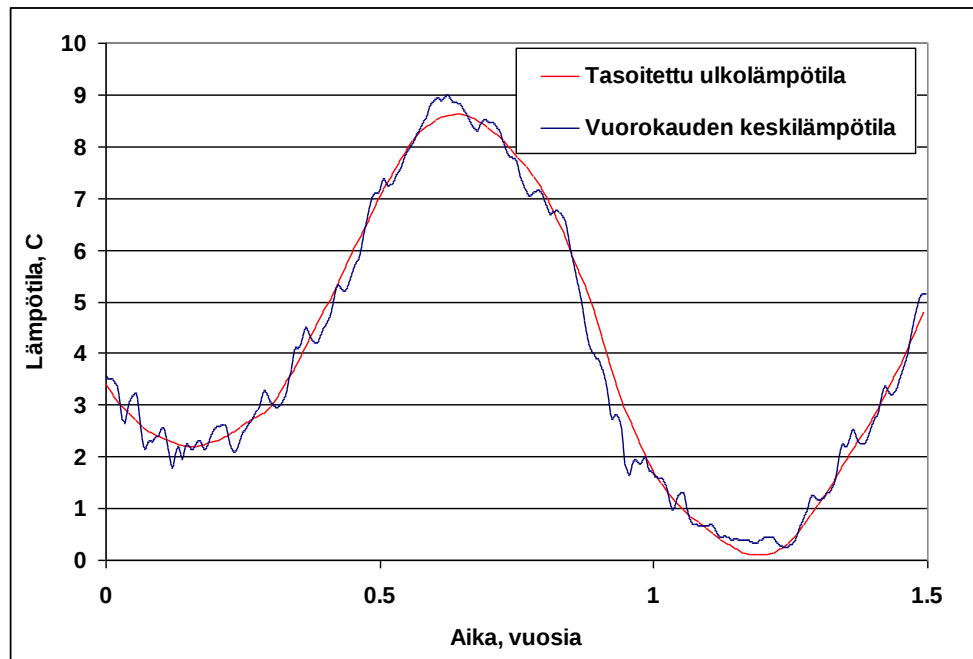
Kuva 5. Tasoitettu ulkolämpötila puolentoista normaalivuoden ja yhden kylmän vuoden aikana Helsingissä.



Kuva 6. Tasoitettu ulkolämpötila puolentoista normaalivuoden ja yhden kylmän vuoden aikana Jyväskylässä.



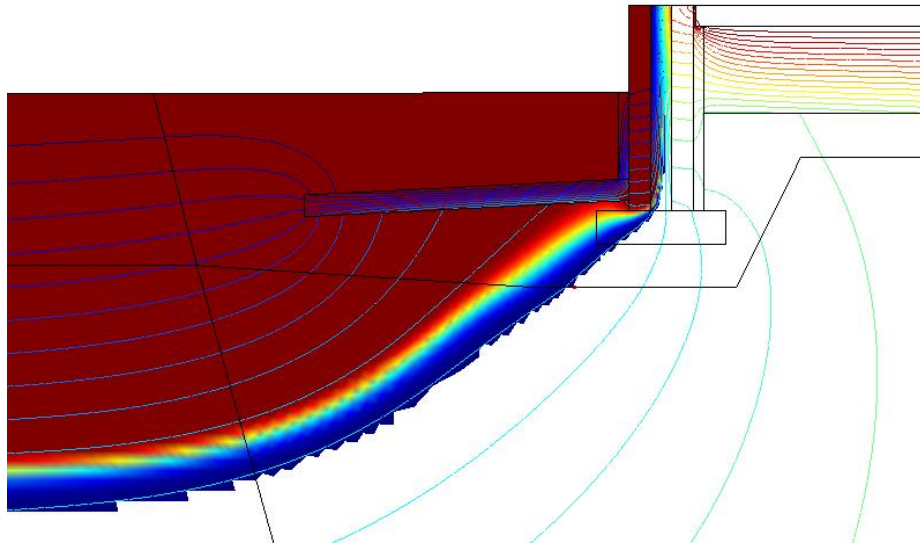
Kuva 7. Tasoitettu ulkolämpötila puolentoista normaalivuoden ja yhden kylmän vuoden aikana Sodankylässä.



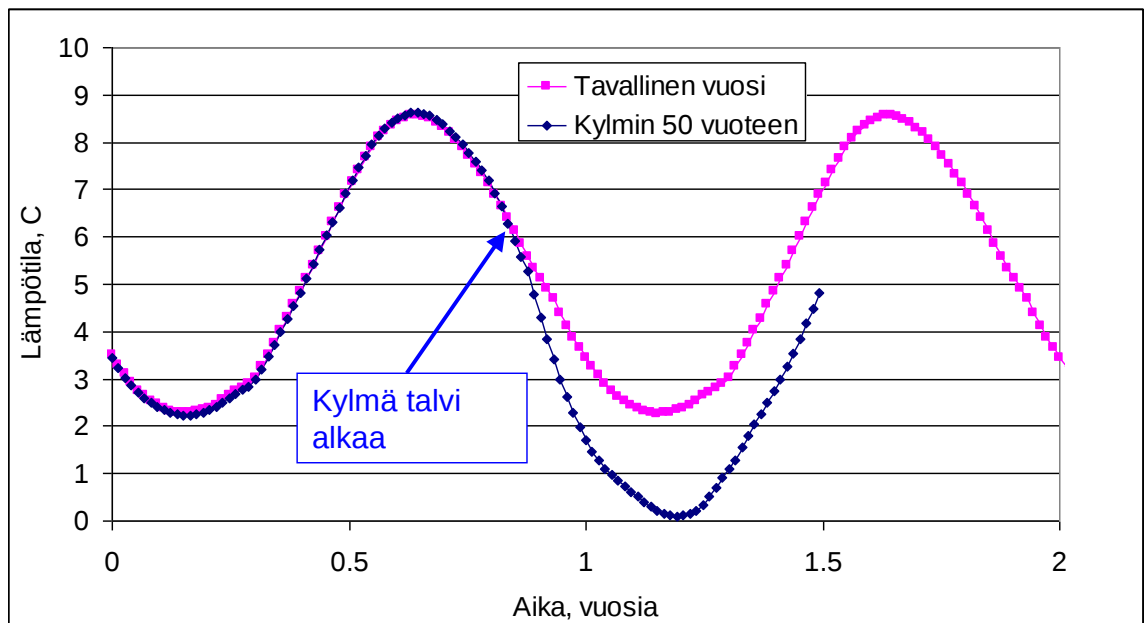
Kuva 8. Laskettu lämpötila anturan alla olevassa tarkkailupisteessä (kuva 2) kun ulkolämpötilana käytetään vuorokauden keskilämpötilaa tai tasoitettua Jyväskylän ulkolämpötilaa. Tilanne on sama kuin kuvassa 9.

5 Routalaskelmat rakennuksen pitkällä sivulla

Kaukana rakennuksen nurkista lämmön johtuminen rakennuksen pituussuunnassa on vähäistä ja siksi roudan etenemistä voidaan laskea 2-ulotteisella mallilla. Kuvassa 9 on esimerkki roudan etenemisestä perustuksen läheisyydessä kylmän talven kevättalvella. Ajanhetki vastaa alinta tarkkailupisteen lämpötilaa vuoden 1,2 kohdalla kuvassa 10. Todetaan, että routaeristys on juuri riittävä estämään tarkkailupisteen jäätyminen nolla-asteen kriteerin mukaan. On kuitenkin huomattava, että jäätyminen tapahtuu kuvan 4 mukaisesti asteittain lämpötilojen 0 °C ja -1 °C välillä, mitä kuvassa 9 esittää värin muuttuminen sinisestä punaiseen.

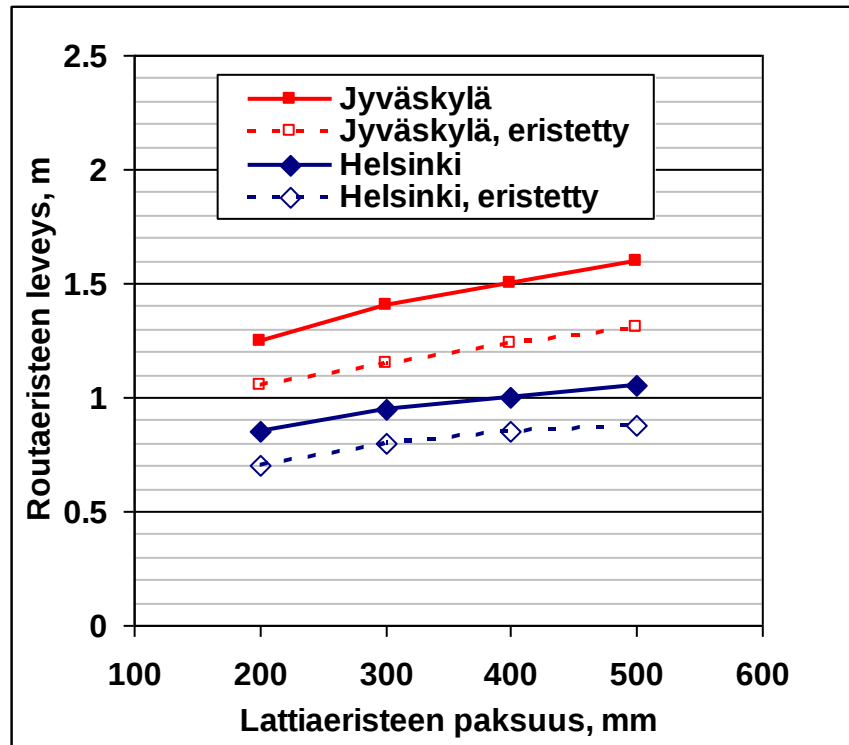


Kuva 9. Roudan eteneminen kylmänä talvena maaliskuun 12. päivänä Jyväskylässä. Väritetyn alueen lämpötila on nolla-asteen alapuolella. Kuvassa on myös isotermit yhden asteen välein. Lattiaeristeen paksuus on 400 mm, routaeristeen leveys 1,5 m ja paksuus 100 mm.

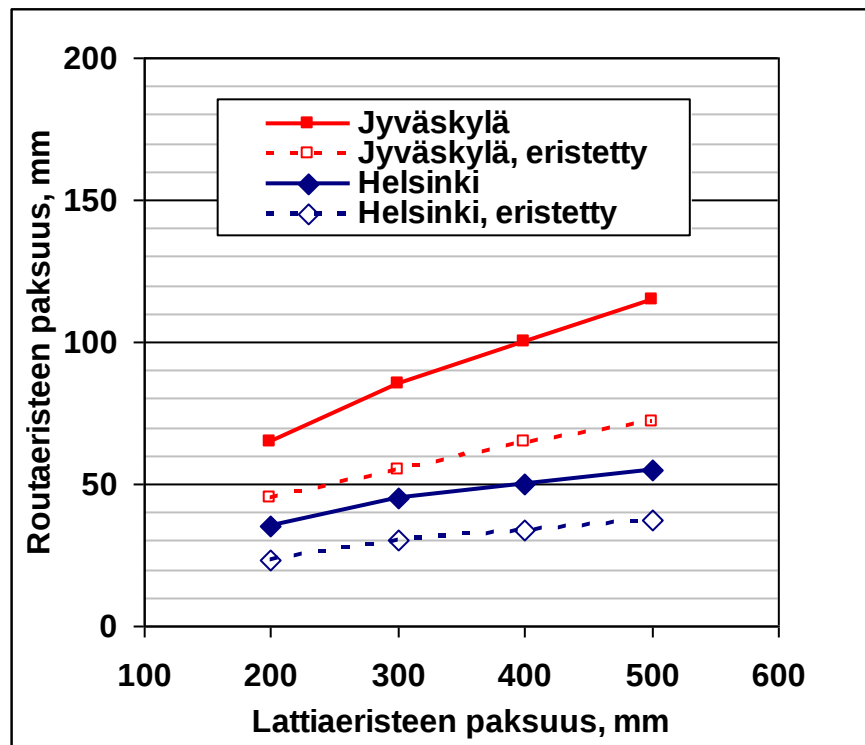


Kuva 10. Lämpötila kuvan 2 tarkkailupisteessä tavallisina vuosina ja yhtenä kylmänä talvena. Tilanne on sama kuin kuvassa 9.

Lattian lämpöeristekerroksen paksuuden vaikutus tarvittavaan routaeristykseen leveyteen Helsingin ja Jyväskylän ulkolämpötiloilla on esitetty kuvassa 11. Tässä routaeristeen paksuus on vakio. Kuvaan on laskettu myös tilanne, jossa perusmuuri on ulkopuolelta lämpöeristetty 50 mm paksulla eristeellä ylös asti. Nähdään, että perusmuurin ulkopuolisella eristämällä on sama vaikutus kuin lattian eristepaksuuden muutoksella 500 mm -> 200 mm. Vastaava riippuvuus routaeristeen leveyden ollessa vakio on kuvassa 12. Tästäkin nähdään, että perusmuurin ulkopuolisella eristämällä on suuri vaikutus routaeristykseen mitoittamiseen.



Kuva 11. Tarvittava routaeristeen leveys kun lattian eristyspaksuus muuttuu. Routaeristeen paksuus on Jyväskylässä 100 mm ja Helsingissä 50 mm. Katkoviiva esittää tapausta, jossa perusmuurin ulkopuolinen eriste (50 mm) jatkuu maan yläpuolelle perusmuurin yläosaan saakka.

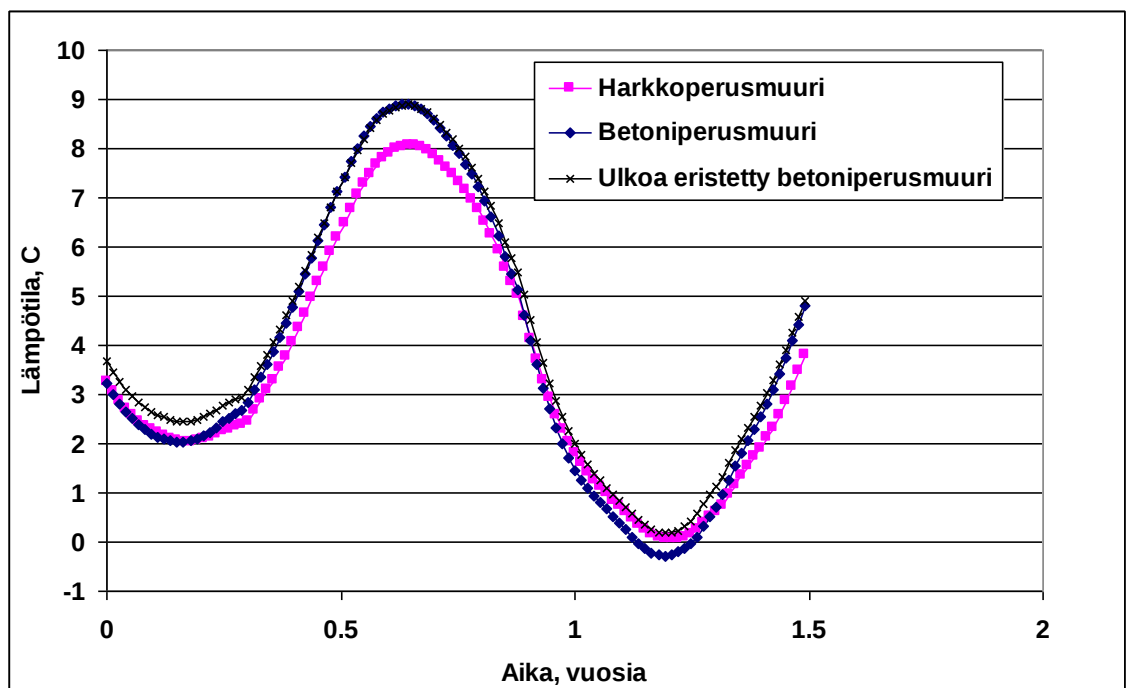


Kuva 12. Tarvittava routaeristeen paksuus kun lattian eristyspaksuus muuttuu. Routaeristeen leveys on Jyväskylässä 1,5 m ja Helsingissä 1 m. Katkoviiva esittää tapausta, jossa perusmuurin ulkopuolinen eriste (50 mm) jatkuu maan yläpuolelle perusmuurin yläosaan saakka.

Sodankylän ilmastossa kuvan 2 perusmuuria ei voi routasuojata kohtuullisella eristemäärällä. Vielä 300 mm paksulla ja 2 m leveällä routaeristeellä lämpötila tarkkailupisteessä on $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, jos lattian eristepaksuus on 400 mm. Jos perusmuuri lämpöeristetään maanpäälliseltä osaltaan 100 mm paksulla eristeellä (EPS 120 Routa), riittää 2 m leveän routaeristeen paksuudeksi $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kriteerin mukaan 130 mm. Tämäkin osoittaa miten paljon perusmuurin maanpäällisen osan eristäminen parantaa routasuojauksen toimintaa.

5.1 Ulkoilmaan eristetyn ja eristämättömän perusmuurin ero

Talonrakennuksen routasuojausohjeet (2007) perustuvat siihen, että perusmuuri on hyvin eristetty (eristys ulkopinnassa tai perusmuuri kevytsorabetonia tms.) routasuojauksen alapintaan asti. Kuvaan 13 on laskettu ohjeiden mukaan mitoitettu tilanne. Eristetyn betoniperusmuurin ja harkkoperusmuurin (lämmönjohtavuus $0,2\text{ W/mK}$) routasuojaus on kuvan mukaan riittävä mutta eristämättömälle betoniperusmuurille se ei riitä. Kuvan 2 betoniperusmuurilla routaeristeen paksuus täytyy kasvattaa laskelmien mukaan $65\text{ mm} \rightarrow 100\text{ mm}$, jotta routasuojaus olisi riittävä.

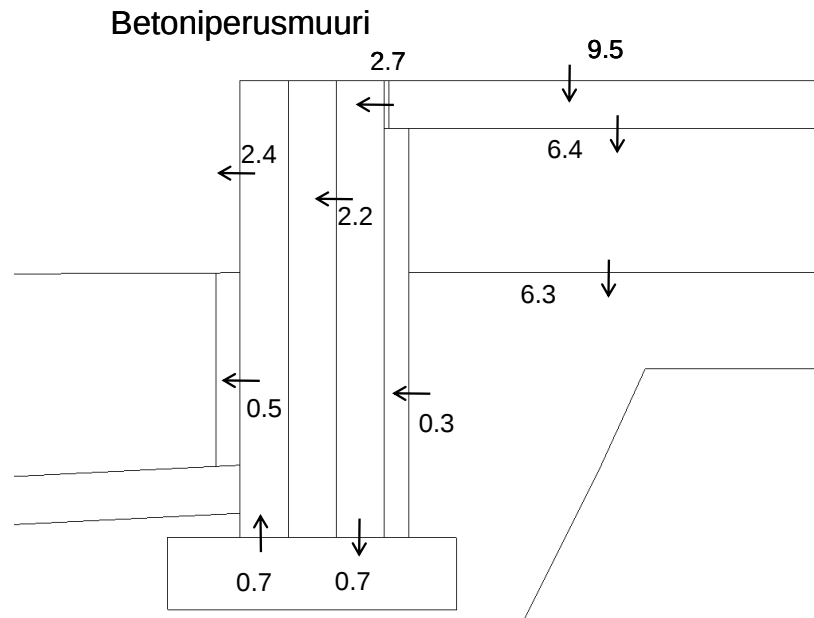


Kuva 13. Lämpötila kuvan 2 tarkkailupisteessä samalla tavalla routasuojatuissa betoni- harkkoperusmuurissa Jyväskylässä. Lattiaeristeen paksuus on 360 mm, routaeristeen leveys 1,4 m ja paksuus 65 mm.

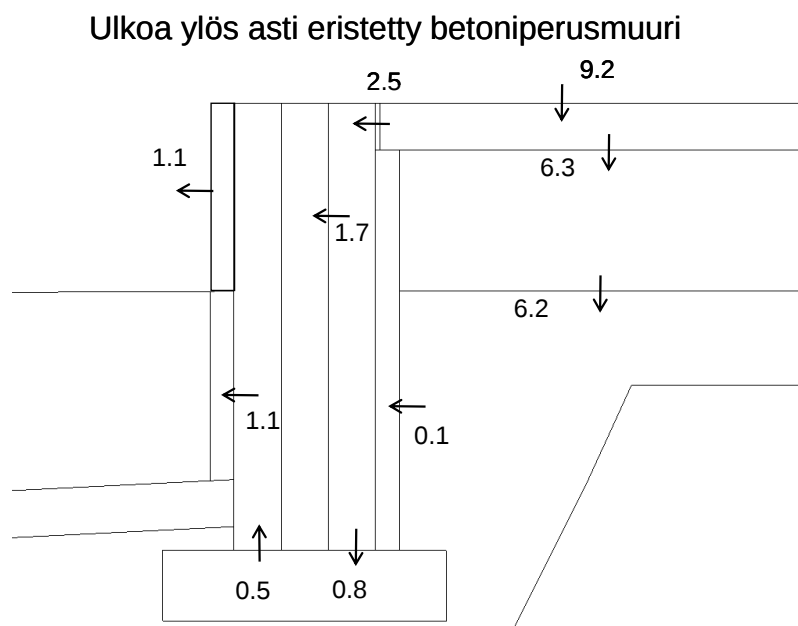
Jos tarkastellaan lämpövirtoja lämmönjohtumisen jatkuvuustilanteessa, jossa ulkolämpötila on koko ajan $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ei anturan jäähtymisessä ole kovin suurta eroa kolmen rakenteen välillä (kuvat 14, 15, ja 16). Anturasta tosin johtuu betoniulkokuoreen suurempi lämpövirta ($0,7\text{ W/m}$, kuva 14 ja $0,5\text{ W/m}$, kuva 15) kuin harkkoulukuoreen ($0,1\text{ W/m}$, kuva 16) mutta betonisisäkuoresta johtuu vähintään vastaavansuuruinen lämpövirta anturaan päin. Jatkuvuustilannetta paremmin todellisuutta kuvaavat vuoden mittaan muuttuvat lämpövirrat (kuva 17). Eristämättömän betoniperusmuurin anturaa jäähdyttää kylmänä talvena muita rakenteita

suurempi nettolämpövirta (kuva 17). Se selittää miksi eristämättömällä betoniperusmuurilla tarvitaan tehokkaampi routasuojaus.

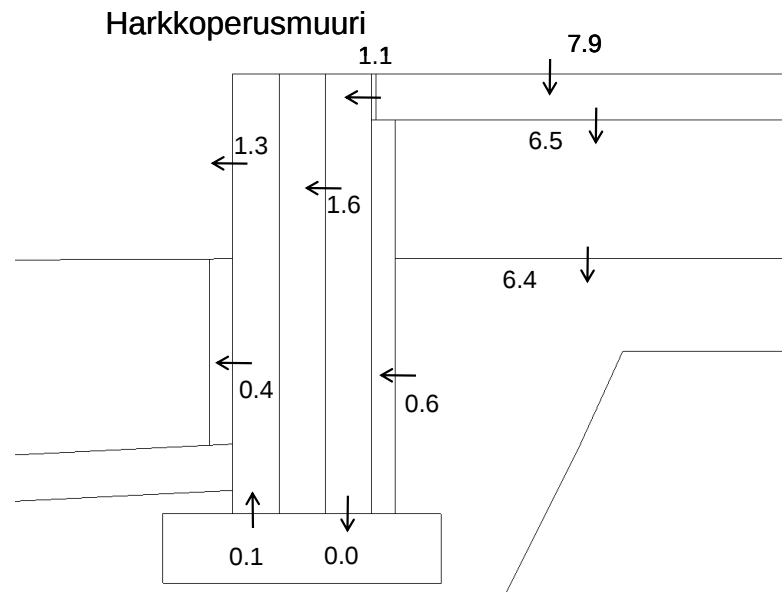
Kuvasta 14 näkyy myös, että rakenteessa on merkittävä kylmäsilta betonilaatasta perusmuurin sisäkuoreen. Tämä lisää lattian lämpöhäviötä harkkoperusmuuriin verrattuna 20 % (kuvista 16 ja 14 lattian lämpövirta 7,9 W/m $\rightarrow$ 9,5 W/m).



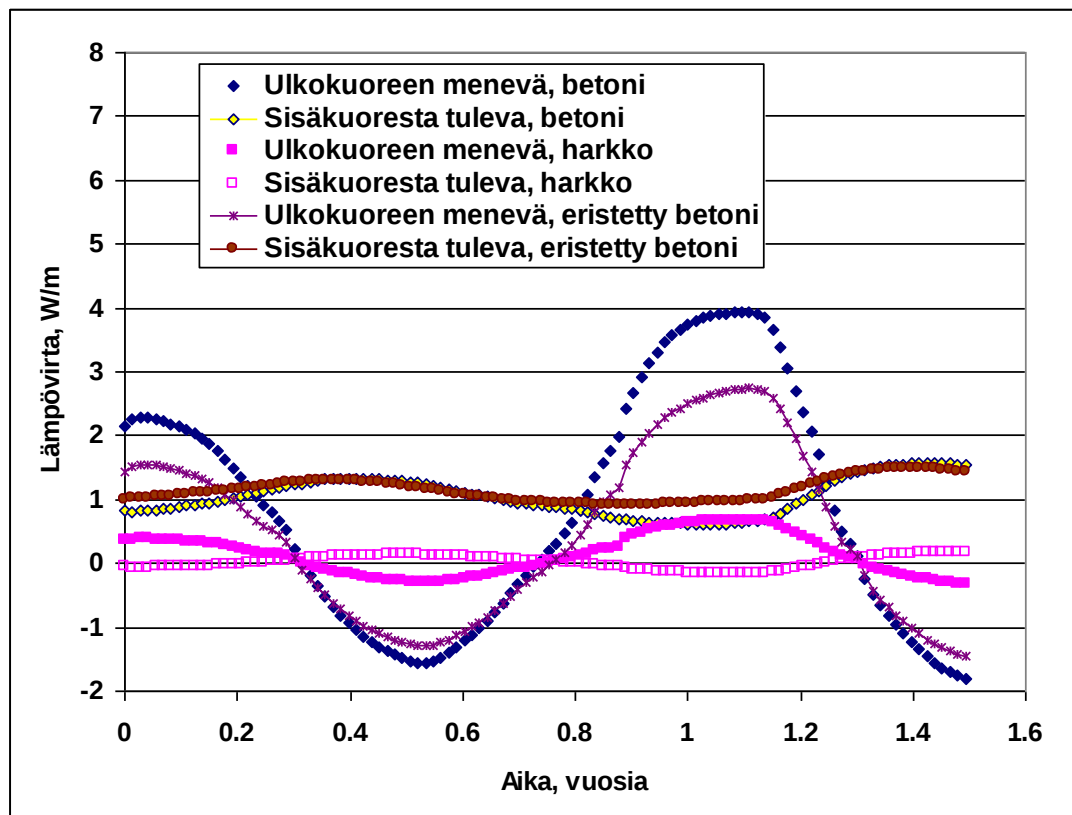
Kuva 14. Lämpövirrat (W/m) jatkuvuustilanteessa rakenteiden rajapinnoissa kun ulkolämpötila on 0 °C ja lattian pintalämpötila 20 °C. Perusmuuri on betonia.



Kuva 15. Lämpövirrat (W/m) jatkuvuustilanteessa rakenteiden rajapinnoissa kun ulkolämpötila on 0 °C ja lattian pintalämpötila 20 °C. Perusmuuri on betonia ja se on eristetty ulkopuolelta ylös asti 50 mm EPS Routa-eristeellä.



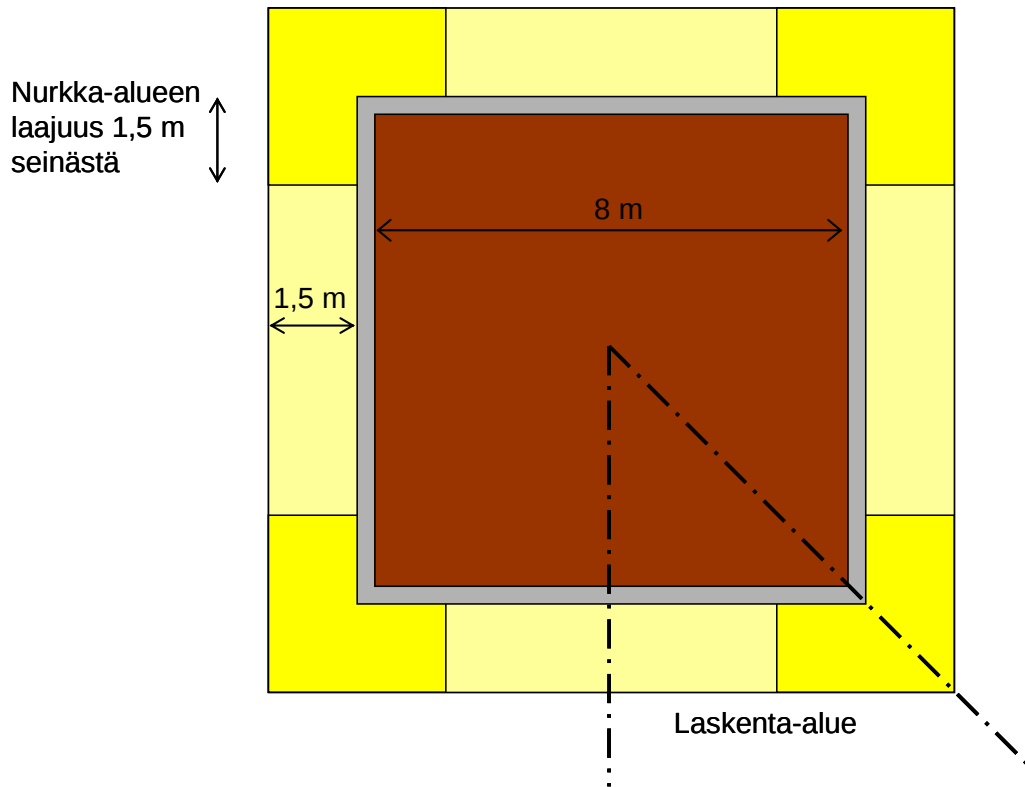
Kuva 16. Lämpövirrat (W/m) jatkuvuustilanteessa rakenteiden rajapinnoissa kun ulkolämpötila on 0 °C ja lattian pintalämpötila 20 °C. Harkkoperusmuuri.



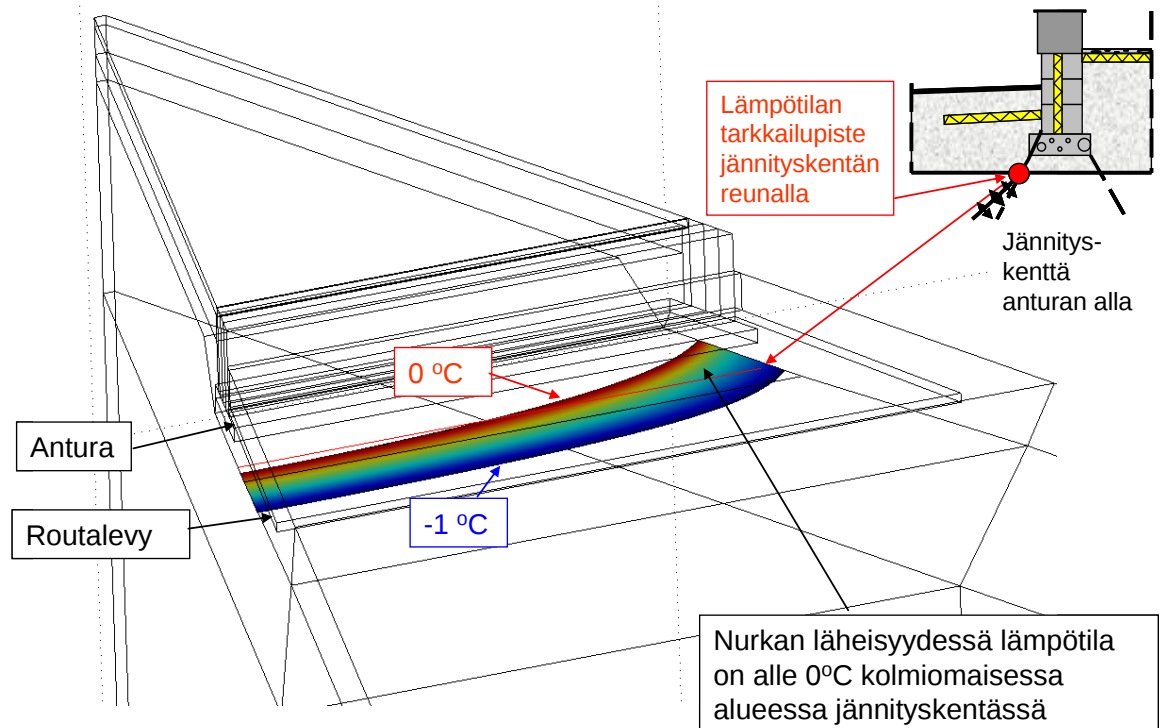
Kuva 17. Anturasta perusmuurin sisä- ja ulkokuoreen siirtyvät lämpövirrat (W/m) ulkoilmaan betoniperusmuurissa sekä harkkoperusmuurissa. Eristetty betoni tarkoittaa ulkopuolelta ylös asti 50 mm EPS Routa-eristeellä eristettyä perusmuuria. Laskentatilanne on sama kuin kuvassa 13.

6 Routalaskelmat nurkan läheisyydessä

Kolmiulotteiset routalaskelmat tehtiin neliömäiselle rakennukselle, jolloin symmetrian takia riittää tarkastella vaakatasosta vain 1/8-osaa (kuva 18). Kuvassa 19 on lämpötila kyseisellä alueella lämpötilan tarkkailupisteen tasossa anturan alapuolella. Laskentatapaus on sama kuin aikaisemmin kuvassa 9 esitetty ja nurkka-alueella ei ole lisäeristystä. Nähdään, että nolla-asteen isotermi kaareutuu anturan alle nurkkaa lähestyttäessä, joten tasapaksu routaeristys ei ole riittävä.

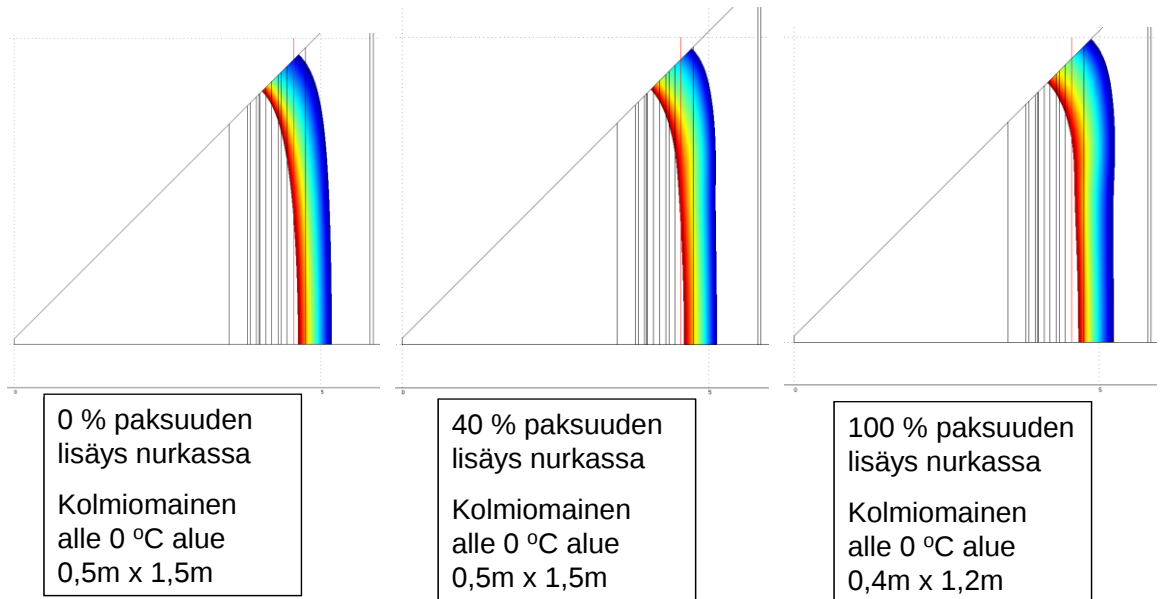


Kuva 18. Kolmiulotteisen laskennan lattia ja routasuojaus. Routaeristys on paksumpi nurkka-alueilla. Symmetrian takia alueesta on laskettu vain 1/8-osa.



Kuva 19. Lämpötila-alue -1°C ... 0°C 200 mm anturan alapuolella nurkan läheisyydessä 24. maaliskuuta Jyväskylässä. Rakenne ja eristykset ovat samat kuin kuvan 9 kaksiulotteisissa laskelmissa. Laskenta-alue selviää kuvasta 18.

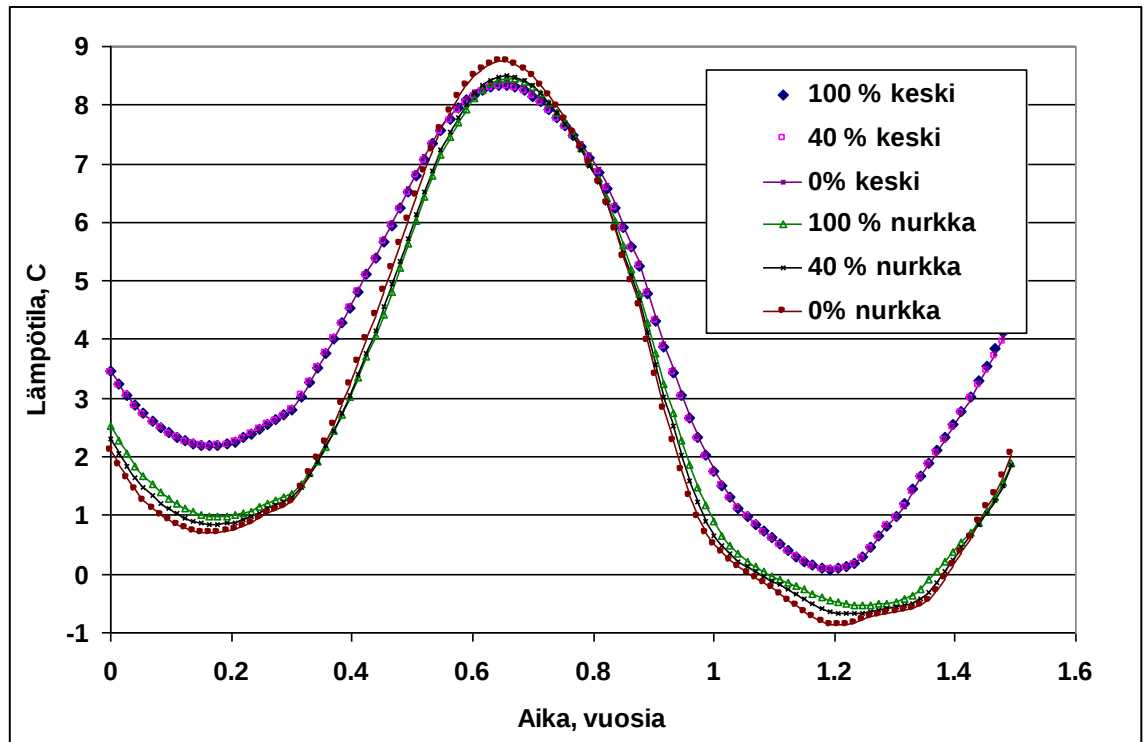
Kuvassa 20 on vastaavat lämpötilat tilanteissa joissa nurkka-alueen eristyspaksuutta on kasvatettu. Nykyisen suosituksen (Talonrakennusten routasuojausohjeet 2007) mukainen 40 % eristyspaksuuden lisäys parantaa tilannetta vain vähän. 100 % paksuuden lisäyksellä jäänyt alue jännityskentässä jo selvästi pienenee mutta jännityskentän kylmimmässä pisteessä lämpötila on yhä noin $-0,5^{\circ}\text{C}$ ja siten perusmaasta on 50 % jäässä. Tätä tilannetta nurkassa voitaneen pitää hyväksyttävänä koska kokemukset nykyisten routasuojausohjeiden toimivuudesta ovat hyviä ja lisäksi standardissa SFS-EN ISO 13793 (2001) hyväksytään myös matalampi lämpötilakriteeri -1°C . Nurkan routasuojauksen toimivuuskriteereistä tarvitaan joka tapauksessa lisää tutkimusta.



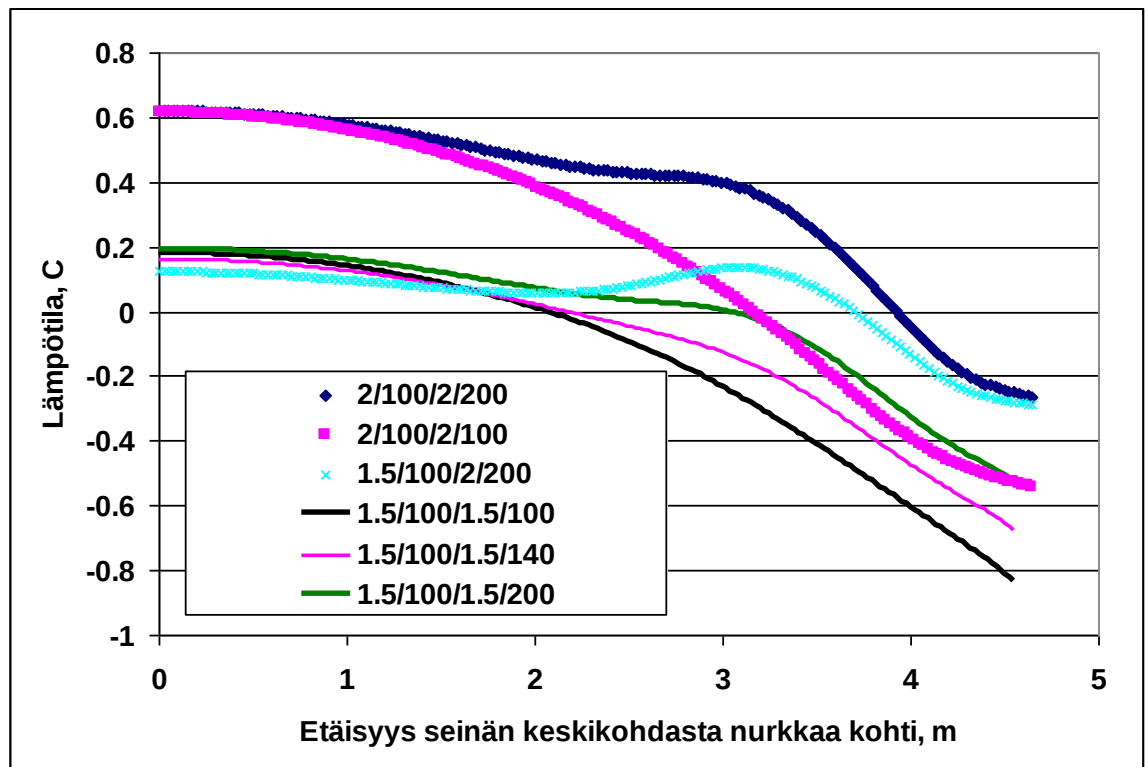
Kuva 20. Lämpötila-alue $-1^{\circ}\text{C} \dots 0^{\circ}\text{C}$ 200 mm anturan alapuolella nurkan läheisyydessä 24. maaliskuuta Jyväskylässä ylhäältä katsottuna. Rakenne ja eristykset ovat muuten samat kuin kuvan 9 2-ulotteisissa laskelmissa mutta nurkassa eristyspaksuutta on lisätty 0 %, 40 % tai 100 %.

Tarkastelupisteen lämpötila nurkassa ja seinän keskellä on esitetty ajan funktiona kuvassa 21, josta havaitaan jälleen, että nurkan eristepaksuuden lisäyksellä on vain vähäinen vaikutus lämpötilaan. Vaikutus perusmaan jäätymisasteeseen jäätyiskäyrän (kuva 4) kautta on kuitenkin merkittävä. Kuvasta 21 havaitaan myös, että lämpötilan minimihetki on nurkassa myöhemmin kuin keskellä seinää.

Kun tarkastellaan lämpötilaa tarkkailupisteessä seinän suunnassa (kuva 22), näkyy eri routaeristysvaihtoehtojen ero selvemmin. Kuvaan on laskettu myös tilanteita, jossa routaeristeen leveys on 2 m. Näilläkään ei voida täysin välttää nurkkapisteen jäätymistä.

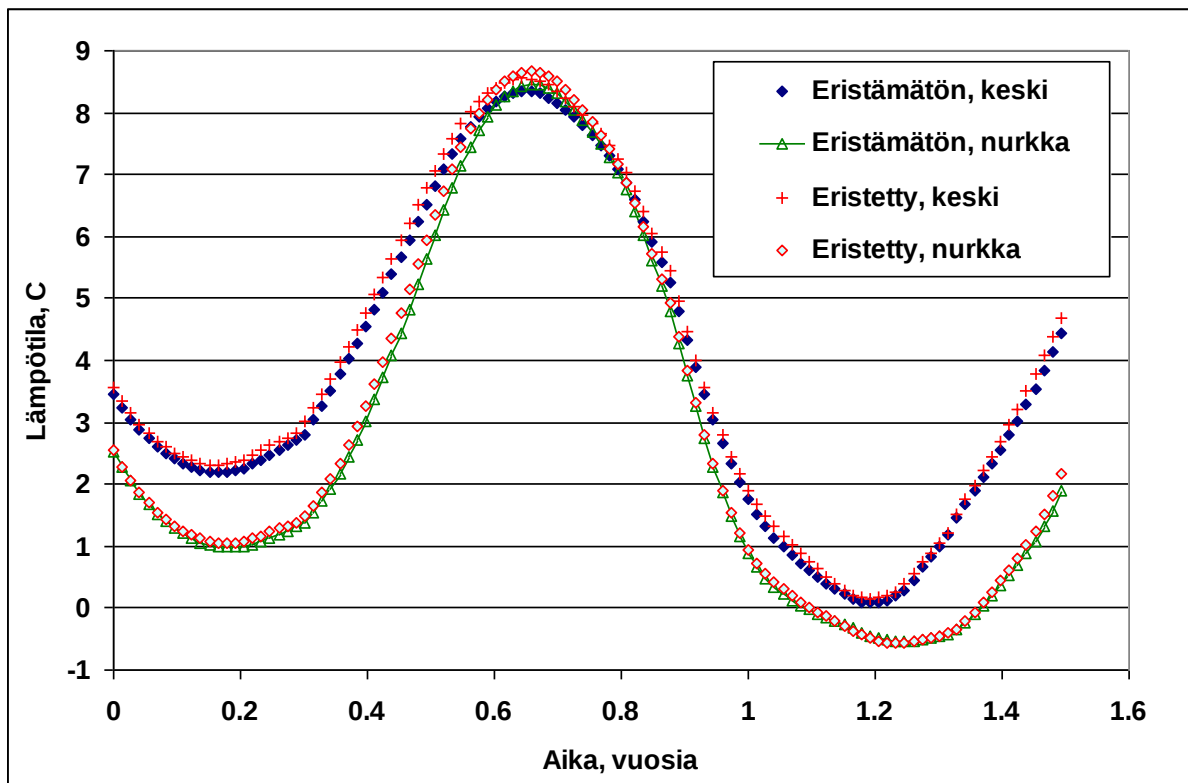


Kuva 21. Tarkastelupisteen lämpötilat seinän keskellä ja nurkassa. Rakenne ja eristykset ovat muuten samat kuin kuvan 9 kaksikulotteisissa laskelmissa mutta nurkassa eristyspaksuutta on lisätty 0 %, 40 % tai 100 %.



Kuva 22. Lämpötila seinän suunnassa 24. maaliskuuta Jyväskylässä erilaisilla rouaeristysten vaihtoehdoilla. Selitteen lukuarvot ovat leveys seinä-alueella (m)/paksuus seinä-alueella (mm)/leveys nurkka-alueella (m)/paksuus nurkka-alueella (mm).

Routaeristeen paksuuden kasvattaminen kaksinkertaiseksi nurkassa näyttää toimivan myös silloin kun perusmuuri eristetään ulkopuolelta 50 mm eristeellä. Kuvan 23 mukaan lämpötilat tarkkailupisteissä ovat hyvin lähellä toisiaan vaikka eristysratkaisut poikkeavat toisistaan.



Kuva 23. Tarkastelupisteen lämpötilat seinän keskellä ja nurkassa kun nurkassa on kaksinkertainen eristyspaksuus seinä-alueeseen verrattuna. Perusmuuri on joko kuvan 2 mukainen, tai ulkopuolelta ylös asti 50 mm eristeellä eristetty. Routaeristeen paksuudet ovat vastaavasti 100 mm tai 65 mm ja leveys on 1,5 m.

Helsingin ilmastossa ja lattian eristepaksuudella 400 mm nurkan tarkastelupisteen lämpötila on $-0,2^{\circ}\text{C}$, kun routaeristeen paksuus nurkassa on 100 mm ja leveys 1,5 m. Jos perusmuuri eristetään ulkopuolelta ylös saakka 50 mm eristeellä (EPS 120 Routa) riittää kapeampi 1,2 metrin routaeristys. Tällöin alin lämpötila nurkkapisteessä on $-0,4^{\circ}\text{C}$.

7 Routasuojauksen suositukset

Nykyisillä Talonrakennuksen routasuojausohjeilla (2007, edelliset painokset 1997, 1987) on pitkä perinne ja ne ovat osoittautuneet käytännössä toimiviksi. Rakenteissa jotka on toteutettu ohjeiden mukaan, ei ole havaittu routavaurioita. Ohjeessa perusmuuri oletetaan hyvin eristetyksi (eristys ulkopinnassa tai perusmuuri kevytsorabetonia tms.) routasuojauksen alapintaan asti. Lattiarakenteen lämmöneristys vastaa enintään 360 mm paksua EPS-lämmöneristettä (EPS 100 Lattia), lämmönvastus $10 \text{ m}^2\text{K/W}$). Ohjeessa painotetaan sitä, että routasuojauksen kannalta paras perusmuurin lämmöneristeen sijoituspaikka on perusmuurin ulkopinnalla.

Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu entistä paremmin eristettyjä alapohjarakenteita ja betonirakenteista perusmuuria, joka on tavallinen ja alttiimpi routavaurioille kuin ulospäin hyvin eristetty perusmuuri. Lisäksi rakennuksen nurkka-alueen routasuojauksen tarvetta tutkittiin entistä kehittyneemmillä laskelmilla. Laskettujen nurkkatapausten määrää rajoitti laskentaan kuluva aika mutta tulosten perusteella voidaan silti todeta, että nurkka-alueella tarvitaan tehokkaampi routasuojaus kuin aikaisemmin on suositeltu Talonrakennuksen routasuojausohjeissa (2007). Keski-Suomen sääoloissa nurkan routaeristykseen paksuuden tulee olla noin kaksinkertainen seinä-alueeseen verrattuna. Etelämpänä nurkan routaeristykseen merkitys seinä-alueeseen verrattuna korostuu koska tarpeeksi lämpimässä ilmastossa seinä-alueen routaeristystä ei edes tarvita vaikka nurkka-alueella routaeristystä vielä tarvitaan.

Tämän tutkimuksen perusmuurirakenteelle suositellaan taulukoiden 3 ja 4 mukaista routaeristystä, jossa nurkka-alueella eristeen paksuus on kaksinkertainen seinä-alueeseen verrattuna yhtenäisyyden vuoksi kaikissa ilmastovyöhykkeissä. Etelä-Suomessa seinä-alueella riittää kapeampikin routaeristys (kuva 11) mutta suositustaulukossa 3 on pitäydytty Suomessa totuttuun tapaan, jossa routaeristeen leveys on sama seinä-alueella ja nurkissa. Pohjois-Suomessa perusmuuri tulee eristää ulkopuolelta kokonaisuudessaan 200 mm paksulla eristeellä (taulukko 4).

Taulukko 3. Routaeristykseen (EPS 120 Routa) suositus kuvan 2 rakenteelle. Taulukon lukuarvot ovat paksuus seinä-alueella millimetreinä (leveys metreinä)/paksuus nurkka-alueella millimetreinä. Mitoituspakkasmäärä F50 on kerran 50 vuodessa toteutuva pakkasmäärä.

Pakkasmäärä F50 (Kh)	Lattiaeristeen (EPS 100) paksuus			
	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
37 000	50(1,2)/ 100	50(1,4)/ 100	50(1,5)/ 100	50(1,6)/ 100
49 000	100(1,2)/ 200	100(1,4)/ 200	100(1,5)/ 200	100(1,6)/ 200

Taulukko 4. Routaeristykseen (EPS 120 Routa) suositus kuvan 2 rakenteelle, joka on lisäksi eristetty ulkopuolelta 200 mm EPS Routa-eristeellä. Taulukon lukuarvot ovat paksuus seinä-alueella millimetreinä (leveys metreinä)/paksuus nurkka-alueella millimetreinä. Mitoituspakkasmäärä F50 on kerran 50 vuodessa toteutuva pakkasmäärä.

Pakkasmäärä F50 (Kh)	Lattiaeristeen (EPS 100) paksuus			
	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
71 000	100(1,5)/ 200	120(1,7)/ 240	130(2,0)/ 260	150(2,0)/ 300

Eristetyn perusmuurin routaeristys seinä-alueella voidaan mitoittaa Etelä- ja Keski-Suomessa kuvien 11 ja 12 perusteella. Nurkka-alueen routasuojaukseen eristetyille seinälle ei ole tarpeeksi paljon tutkittu, että siitä voisi antaa kattavia suosituksia. Taulukossa 5 on kuitenkin annettu eräs suositus, joka vastaa 400 mm lattiaeristettä.

Taulukko 5. Nurkan routaeristeen suositus kuvan 2 rakenteelle, joka on lisäksi eristetty ulkopuolelta 50 mm EPS Routa-eristeellä. Lattiaeristeen (EPS 100) paksuus enintään 400 mm.

Pakkasmäärä F50 (Kh)	Leveys metreinä/paksuus millimetreinä
37 000	1,2/100
49 000	1,5/130

Nurkan routasuojauksen laajuudeksi riittää aikaisempi routasuojausohjeiden suositus (taulukko 6).

Taulukko 5. Nurkan routasuojauksen laajuus (etäisyys nurkasta seinälinjalle) mitoituspakkasmäärän F50 mukaan (Talonrakennuksen routasuojausohjeet 2007).

Pakkasmäärä F50 (Kh)	Nurkan routasuojauksen laajuus Lc
35 000 ... 55 000	1,5
55 000 ... 65 000	2,0
65 000 ... 75 000	2,5

Äärimmäisen hyvin eristetyn alapohjan routasuojaus voidaan mitoittaa myös kuten kylmän rakennuksen routasuojaus

Taulukoiden pakkasmäärät vastaavat Helsingin, Jyväskylän ja Sodankylän pakkasmääriä havainnointikauden 1961-1990 mukaan (liite 1). Uudemman aikajakson mukaiset pakkasmäärät (RATO, osa 3, 2008) ovat näitä noin 4000 Kh pienempiä, joten uusia pakkasmääriä käytettäessä tulokset soveltuvat mainittuja paikkakuntia hieman kylmemmille paikkakunnille.

8 Yhteenveto

Energiatohokkuusvaatimusten kiristyessä maanvastaisen alapohjan lämmöneristävyyden paraneen. Sen seurauksena rakennuksen alla olevan maapohjan lämpötila laskee. Tämä lisää perustusten routasuojauksen tarvetta. Tässä tutkimuksessa on haettu laskennallisesti yhteys lattian eristepaksuuden ja routaeristykseen leveyden sekä paksuuden välille kun käytetään EPS-lämmöneristeitä. Lattian eristepaksuus vaihteli laajalla alueella 200 – 500 mm. Laskentaan valittu betoninen perusmuuri on routasuojauksen kannalta vaativampi kuin Talonrakennuksen routasuojausohjeissa (2007) oletetaan. Perusmuurin ulkopuolinen eristys vähentää routasuojauksen tarvetta merkittävästi. Nurkka-alueen lisäeristystarve on kolmiulotteisten, entistä tarkempien laskelmien mukaan suurempi kuin aikaisemmin on oletettu. Nurkka-alueella tarvitaan kaksinkertainen routaeristeen paksuus verrattuna seinälinjan eristyspaksuuteen Keski-Suomen sääoloissa.

Tämän tutkimuksen perusmuurin betonirakenne ei ole esimerkillinen ja suositeltava mutta se on valittu laskelmiin koska se on tavallinen ja routasuojauksen kannalta kriittinen. Rakennetta voidaan parantaa pienentämällä perusmuurin kylmäsiltoja sekä perusmuurin lämpöhäviöitä suoraan ulkoilmaan. Paras perusmuurin lämmöneristeen paikka routasuojauksen kannalta on perusmuurin ulkopinnalla.

Routasuojauksen tarkempi mitoitus vaatii tuekseen lisätutkimusta. Lisää tietoa tarvitaan lämpötilakriteereistä eri maalajeissa ja perustusrakenteissa sekä nurkan routaeristykseen toiminnasta.

Lähdeviitteet

Comsol Multiphysics Modeling Guide. 2008. Version 3.5a. Comsol AB.

RATO, osa 3. 2008. Ratatekniset ohjeet. Ratahallintokeskus.

RT 81-10590. 1995. Routasuojusrakenteet.

RT 37790. 2009. EPS-lämmöneristeet. EPS-rakennuseristeteollisuus.

Saarelainen, S. 1992. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. VTT Publications 95.

SFS-EN ISO 6946. 2008. Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation method

SFS-EN ISO 13770. 2008. Thermal performance of buildings. Heat transfer via the ground. Calculation methods.

SFS-EN ISO 13793. 2001. Thermal performance of buildings. Thermal design of foundations to avoid frost heave.

Suomen rakentamismääräyskokoelma, Osa D5 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet. 2012.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet. 2007. Rakennustieto Oy.

Kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä F50 jaksolta 1961-1990

Lähde: Talonrakennuksen routasuojausohjeet. 2007. Rakennustieto Oy.

