



Miska Auvinen

**MATALAPERUSTUSTEN KYLMÄSILTA- JA LÄMPÖVIRTATAR-  
KASTELU COMSOL Multiphysics -OHJELMALLA**

**MATALAPERUSTUSTEN KYLMÄSILTA- JA LÄMPÖVIRTATAR-  
KASTELU COMSOL Multiphysics -OHJELMALLA**

Miska Auvinen  
Opinnäytetyö  
Lukukausi Syksy 2012  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikan koulutusohjelma, Talonrakennus

---

Tekijä: Auvinen Miska

Opinnäytetyön nimi: Matalaperustusten kylmäsilta- ja lämpövirtatarkastelu  
COMSOL Multiphysics- ohjelmalla

Työn ohjaaja: Lehtori Illikainen Kimmo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2012

Sivumäärä: 44 + 0 liitettä

---

Matalaperustus ja maanvarainen alapohja yleistyivät 1950-luvun loppupuolella. Nykyaikainen alapohjaneristys estää rakennuksen sisältä lämmön karkaamisen rakenteiden alle huomattavasti tehokkaammin kuin ennen. Tämän myötä routaeristyksen merkitys on kasvanut.

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia suomalaisia matalaperustusratkaisuja ja niiden lämpövirtaa COMSOL multiphysics -ohjelmalla. Työssä keskityttiin Comsol-ohjelmalla tehtyihin simulointeihin ja siitä saatujen tulosten vertailuun. Vertailtavia kohteita oli kuusi. Ne mallinnettiin samanlaisiin olosuhteisiin säädatan ja perusmaan osalta.

Yhdessä vertailtavista kohteista oli asennettu rakennusvaiheessa lämpötila-anturit perustuksiin ja niiden välittömään läheisyyteen. Lämpötila-antureista saatuja tuloksia verrattiin samasta kohteesta mallintamalla saatuihin tuloksiin. Loput kohteet mallinnettiin sen jälkeen, kun mitatut ja mallinnuksesta saadut lämpötilat olivat lähellä toisiaan.

Lämpötila-antureiden ja Comsol-ohjelmasta saatujen arvojen kesken oli isoja eroja tarkasteltaessa uloimpia mittauspisteitä, jonne lämmöneristys ei ulotu. Eroavaisuudet johtuivat mittauskohteen lumipeitteestä, jota ei mallinnettu ohjelmaan. Perustusten lähellä mitattujen ja mallinnettujen tulosten erot olivat 0,1 °C:sta 1,9 °C:seen.

Tulosten pohjalta voidaan todeta perusmuurin eristeen sijainnin merkitys sekä perusmuurin ja seinän liittymän merkitys. Eristeen ollessa ulkopinnassa olivat lämpövirrat jopa 47 % pienempiä kuin eristeen ollessa sisäpinnalla. Perusmuurin ja seinän liitoksessa havaittiin, että mitä ulompana perusmuurin lämmöneriste oli, sitä kauempana lämpögradientti 0 °C oli rakenteen sisänurkasta.

---

Asiasanat: perustus, kylmäsilta, lämpövirta, rakennusfysiikka, comsol

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Civil Engineering, House Building Engineering

---

Author: Auvinen Miska

Title of thesis: Measurements of Thermal Bridges and Heat Flux in Shallow Foundations by COMSOL Multiphysics Software

Supervisor: Lecturer Illikainen Kimmo

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2012

Pages: 44 + 0 appendices

---

In the late 1950's low foundation and ground floor solutions become more common. Modern ground insulation prevents the heat from escaping to the ground under the structures more efficiently than before resulting in higher importance for frost heave insulation.

This study concentrates on low foundation solutions in Oulu, Northern Finland. Six models were modeled to similar conditions based on weather data and soil.

The objective of the thesis was to study the Finnish solutions and heat flows for low foundations with COMSOL Multiphysics computer program. The work is focused on models created by Comsol and the comparison of the results.

One of the study object had temperature sensors installed in the foundations and its direct vicinity. The results from the temperature sensors were compared to the results gained from modeling. When the results were in harmony with each other remaining subjects were modeled and compared to the first object.

Big differences in the measures of temperature sensors and Comsol were found when examining the outermost measuring points, where there is no thermal insulation. The differences are due to the layers of snow in the measuring location which could not be modeled with the program. The differences of the results measured and model vary from 0, 1° to 1, 9° Celsius.

The results show that the location of the insulation for the foundation wall and the connection between the foundation and foundation wall are significant. When the insulation was installed on the outer edge of the foundation wall the results were 47% better than when installed in the inner side. In the connection of the foundation wall and wall the zero level was further from the inside corner the further the thermal insulation was.

---

Keywords: Comsol, thermal bridge, heat flux, shallow foundation

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
1 JOHDANTO	6
2 LÄMMÖN SIIRTYMINEN JOHTUMALLA	7
3 MALLINTAMINEN COMSOL MULTIPHYSICS -OHJELMALLA	8
4 KOHTEIDEN MALLINTAMINEN	16
4.1 Talon R:n mallintaminen	16
4.2 Teollisuushallin mallintaminen	21
4.3 Talon I:n mallintaminen	23
4.4 Talon H:n mallintaminen	25
4.5 Legalett-paaluperustuksen mallintaminen	26
4.6 Puurunkoisen esimerkkitalon mallintaminen	28
5 LÄMPÖVIRRAT PERUSTUKSISSA	31
5.1 Talon R:n perustusten lämpövirta	31
5.2 Teollisuushallin perustusten lämpövirta	32
5.3 Talon I:n perustusten lämpövirta	33
5.4 Talon H:n perustusten lämpövirta	34
5.5 Legalett-perustusten lämpövirta	35
5.6 Puurunkoisen esimerkkitalon perustusten lämpövirta	36
6 KOHTEIDEN VERTAILU	38
7 POHDINTA	43
LÄHTEET	44

# 1 JOHDANTO

Rakennuksien perustusten tutkiminen on yleistynyt, sillä jatkuvasti päivittyvät rakennusmääräykset velvoittavat eristämään rakenteet entistä paremmin. Lämpövuodot lattian kautta maahan ovat pienentyneet paljon, minkä vuoksi myös perustusten routaeristykseen ja kylmäsiltoihin tulee perehtyä. Markkinoilla on useita tietokoneohjelmia, joilla voidaan mallintaa monipuolisesti rakenteiden lämpövirta. Tulosten vertailua todellisiin mitattuihin tuloksiin on kuitenkin tehty melko vähän.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia matalaperustusratkaisuja nykyaikaisissa rakennuksissa. Erityisesti perehdyttiin perustusten lämpövirtoihin ja ongelmakohtiin.

Vertailukohteena oli vuonna 2010 valmistunut Talo R, joka sijaitsee Oulussa. Rakennuksen perustuksiin ja perustusten läheisyyteen maahan oli asennettu lämpöantureita, joista saatiin tarvittavat vertailuarvot mallinnetun Talo R:n tuloksien vertailuun. Nämä lämpöanturit tallentavat datan määräaikaisesti ja tarkasti. Talo R:ää verrattiin muihin mallinnettuihin kohteisiin, jotka mallinnettiin samoihin olosuhteisiin. Tämä työ keskittyi mallinnukseen COMSOL Multiphysics -ohjelmalla.

## 2 LÄMMÖN SIIRTYMINEN JOHTUMALLA

Johtuminen eli konduktio on molekyylien liike-energian siirtymistä toiseen molekyyliin. Enemmän liike-energiaa sisältävät molekyylit siirtävät molekyylien välisten voimien ja törmäysten välityksellä energiaa pienemmille. Siirtymisen vuoksi voidaan puhua lämmön virtauksesta, vaikka todellisuudessa mitään virtausta ei olekaan. Lämpö pyrkii tasoittumaan kylmempään päin eli se on siirtymätilassa olevaa sisäenergiaa. (1, s.42.)

Tasoittumisnopeus eli lämpövirta voidaan laskea kaavasta 1.

$$Q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{d} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{KAAVA 1}$$

jossa,

$$Q = \quad \text{lämpövirta} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\lambda = \quad \text{lämmönjohtavuus} \quad [\text{W/mK}]$$

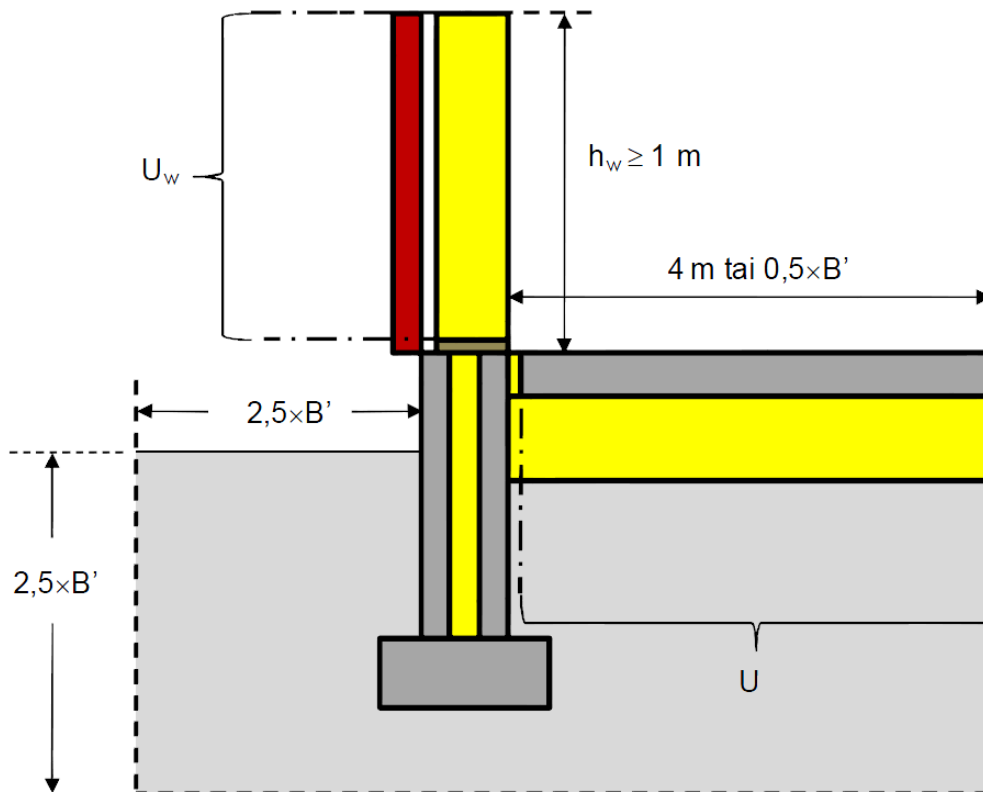
$$T_1 \text{ ja } T_2 = \quad \text{tasomaisen ja tasapaksun ainekerroksen isothermisten pintojen 1 ja 2 lämpötilat} \quad [\text{K tai } ^\circ\text{C}]$$

$$d = \quad \text{kappaleen / materian paksuus}$$

### 3 MALLINTAMINEN COMSOL MULTIPHYSICS -OHJELMALLA

COMSOL Multiphysics 4.2a on elementtimenetelmään (FEM) perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) numeeriseen ratkaisuun tarkoitettu ohjelma. Comsol-ohjelmistolla voidaan mallintaa laajasti fysikaalisia ilmiöitä. Ohjelmaan voidaan tuoda CAD-ohjelmalla luotu leikkauskuva, jonka päälle rakennetaan laskentamalli.

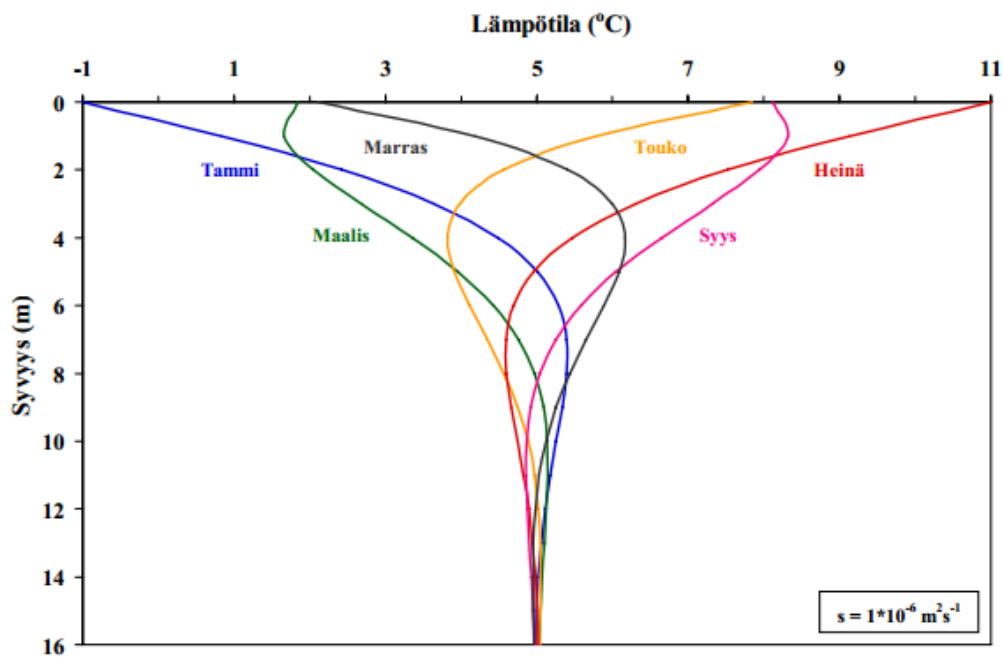
Mallin mittoihin vaikutti ympäristöministeriön laatima Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas (2, s.16), jonka ohjeiden mukaan luodaan laskentamalli Cad-ohjelmalla. Kuvasta 1 käyvät ilmi laskentamallin minimimitat.



KUVA 1. Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaisen rakennemallin minimimitat (2, s.16)



Rakennuksen pohjan ollessa säännöllinen suorakaide  $B' =$  lattian leveys. Muussa tapauksessa sitä voidaan tarkastella kaksiulotteisena tapauksena, jonka alapohjan karakteristinen leveys  $B' = A/(0,5 \times P)$ , jossa  $A$  on rakennuksen pohjan ala ja  $P$  on ulkoseinien muodostaman piirin kokonaispituus. (2, s.15.) Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaoppaan mukaan simuloinnin pitäisi ulottua myös maahan  $2,5 \times B'$ . Koska tässä työssä pyritään saamaan comsol-ohjelma antamaan vastaavia tuloksia kuin mitatut arvot ovat, rajataan maan syvyys 16 m:iin. GTK:n tutkimusten mukaan maa- ja kallioperän lämpötila on vuodenajoista riippumaton noin 15 m:n syvyydessä maanpinnasta, jossa lämpötila vakiintuu noin viiteen asteeseen (3, s.4). Kaaviosta 1 käy ilmi, kuinka lämpötila vakiintuu vuodenajasta riippumattomaksi, kun tarkastelupiste menee riittävän syvään maahan.



KUVA 2. Lämpötilan vakiintuminen 15 m:n syvyydessä maankamarassa (3, s.4)

Paikkakuntakohtaisen maankamaran lämpötilan voi laskea kaavasta 2 (3, s.4).

$$T_{(maa)} \approx 0,71 * T_{(ilma(a))} + 2,93$$

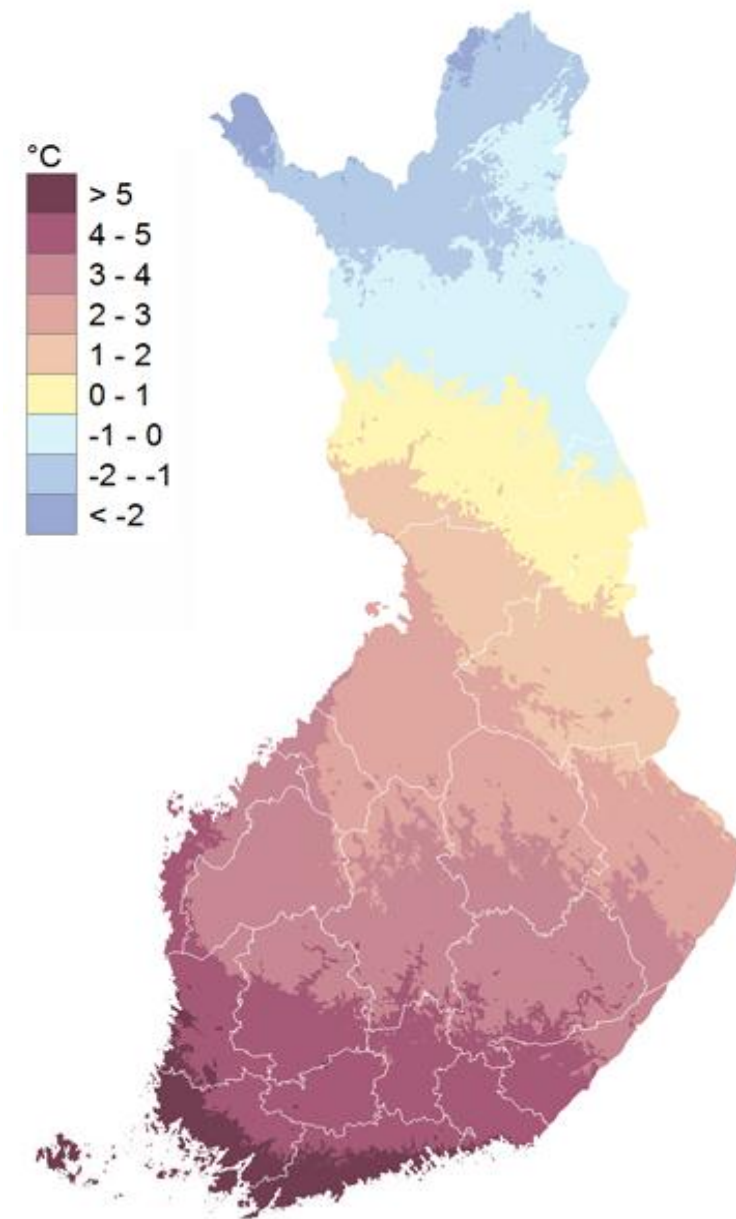
KAAVA 2

jossa,

$T_{(ilma(a))}$  = *paikkakunnan vuosittainen keskilämpötila*

Kuvassa 3 on vuoden keskilämpötila vuosilta 1981-2010 (4).

### **Vuoden keskilämpötila 1981-2010**

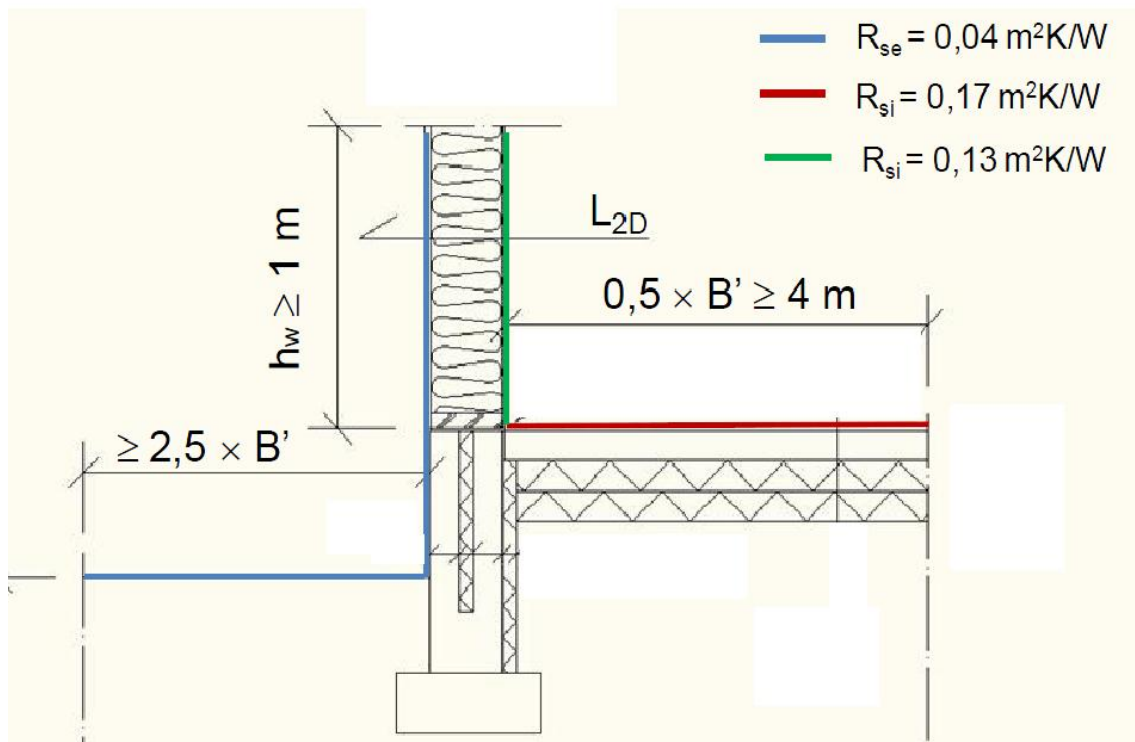


*KUVA 3. Keskilämpötila 1981-2010 (4)*

Oulun keskilämpötila on 2-2,5 °C (4), jolloin maan lämpötilaksi saadaan 4,5 °C. Jokaiselle materiaalille määritetään lämmönjohtavuus, lämpökapasiteetti ja ti-

heys. Nämä parametrit tarvitaan, kun Comsolilla tehty laskenta on aikariippuvainen.

Materiaalien lämmönjohtavuudet määritetään standardin SFS-EN ISO 10456 mukaisesti tai käytetään RakMk C4 annettuja taulukoituja lämmönjohtavuuden suunnitteluarvoja. Laskentamalliin lisätään pintavastukset pintoihin, jotka rajoittuvat ilmaan. Kuvassa 4 on esitetty pintavastukset.



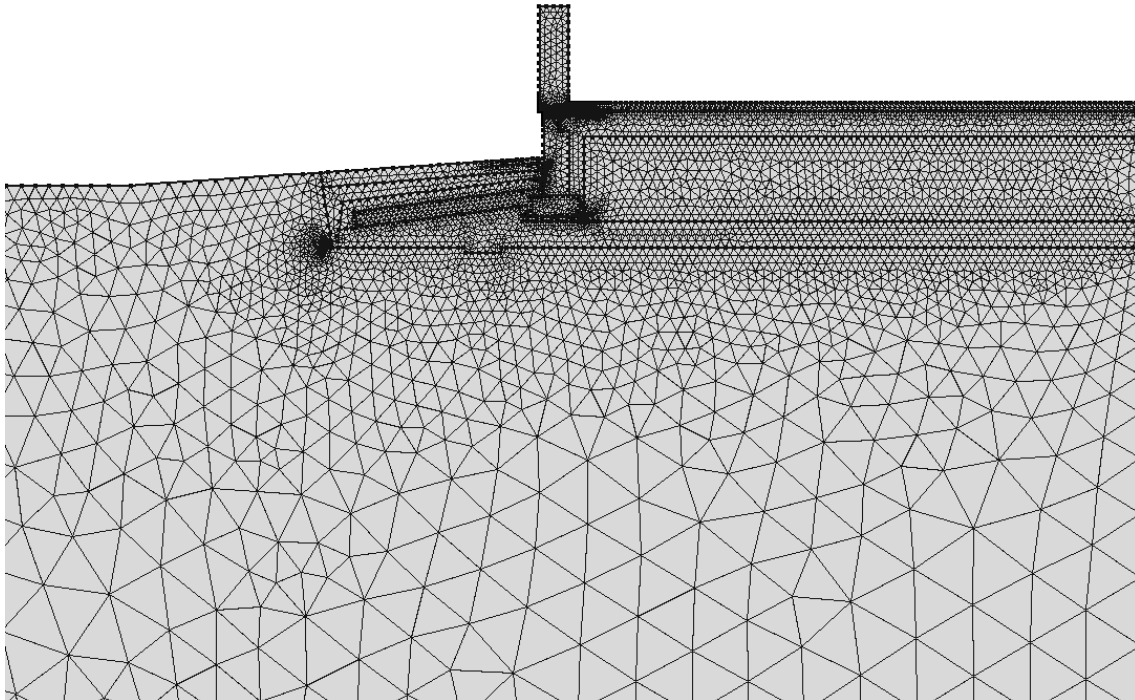
KUVA 4. Yksinkertaistettu laskentamalli, johon on esitetty pintavastukset (2, s.33)

Taulukosta 1 saadaan tarvittavat pintavastusten arvot.

TAULUKKO 1. Pintavastukset (2, s. 15)

Pintavastus m <sup>2</sup> K/W	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuuntaan	Alaspäin
Sisäpinta R <sub>si</sub>	0,10	0,13	0,17
Ulkopinta R <sub>se</sub>	0,04	0,04	0,04

Ohjelmaan määritetään sisälämpötila, ulkolämpötila sekä perusmaassa oleva peruslämpötila, joka pysyy vakiona ympäri vuoden. Laskentamalliin määritetään laskentaverkko, jonka avulla ohjelma laskee mallin eri kohtiin lämpötilan kullakin ajan hetkellä. Kuvassa 5 on esitetty laskennassa käytetty laskentaverkko.



*KUVA 5. Jokaiseen malliin määritetään laskentaverkko, joka määrittää, kuinka tarkasti ohjelma laskee mallin läpi*

Laskentaverkon sovittaminen malliin on erittäin tärkeä vaihe, koska liian harva laskentaverkko vääristää tuloksia ja liian tiheä verkko tekee mallista raskaan. Tässä tutkimuksessa lasketut mallit ovat 8-17 GB. Käytössä ollut laskentatietokone laski yhtä mallia 15-30 minuuttia.

Perusmaan merkitys tutkimuksessa ja mallinnuksessa on suuri, joten sen parametrien hienosäätö heti alkuvaiheessa on tärkeää. RakMk C4:n mukaan maalle annettaisiin lämmönjohtavuuden laskenta-arvo  $2,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ . (5, s.15.)

Laskennallinen roudan maksimisyvyys saadaan selville, kun tiedetään vuotuinen pakkasmäärä, joka on pakkaskauden vuorokausien keskilämpötilojen

summa [°Cvrk]. Vuotuinen pakkasmäärä astetunteina [°Ch] saadaan, kun tulos [°Cvrk] kerrotaan vuorokauden tunneilla. Roudan syvyyden arviointi lumesta ja kasvillisuudesta vapailla mailla saadaan kaavasta 2. (6, s.21.)

$$d = c\sqrt{F}$$

KAAVA 2

$d$  = roudan syvyys [cm]

$c$  = maalajikerroin

$F$  = pakkassumma [°Ch]

Maalajikertoimet saadaan taulukosta 2.

TAULUKKO 2. Maalajikertoimet (6, s.21)

<b>Maalajikerroin c</b>	
Sr, Hk, SrMr, HkMr	1,15-1,16
hiHk, SiMr	0,99
Si	0,92
Sa	0,83...0,91

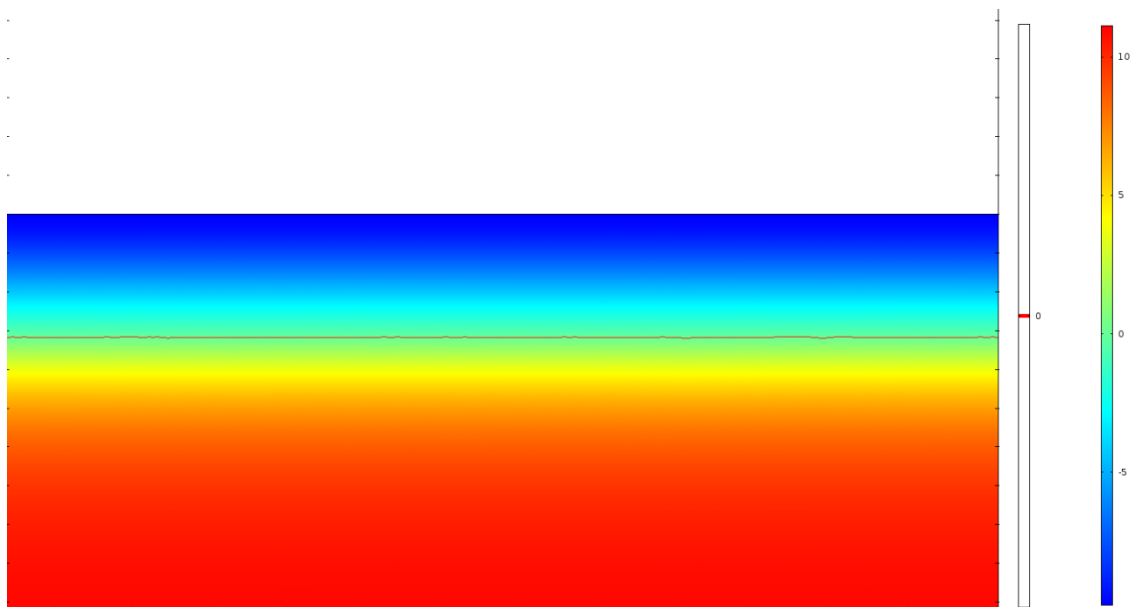
Käytössä olevasta Oulun säädatasta laskettu pakkassumma on 18 937 °Ch.

Laskennallinen roudan syvyys on kaavan mukaan laskettuna 1,58 m.

Kun COMSOL Multiphysics -ohjelmalla mallinnetaan pelkkää maata, haetaan sopiva lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteettiarvo perusmaalle siten, että kovimman pakkasjakson loppupuolella lämpötilagradientti 0 °C on mahdollisimman lähellä mitoitusroutasyvyyttä.

Lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti muuttuvat maan jäätyessä, jonka vuoksi sopivia arvoja piti hakea ja kokeilla useita kertoja, jotta tuloksista saatiin oikeanlaisia. Saksalaisessa Passiv haus institutin kirjassa Wärmeverluste durch das

Erdreich, Protocolband Nr. 27 (7, s.50) määrittelemän materiaalitulukon mukaan maan lämmönjohtavuus on 0,714 W/(mK) ja lämpökapasiteetti 2 226 J/kg K. Jäätäneen maan lämmönjohtavuudeksi tuli testaamalla 1,214 W/(mK) ja lämpökapasiteetiksi 1 626 J/kg K. Testi tehtiin mallintamalla pelkkää maata Comsol-ohjelmalla. Maan lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti asetettiin malliin muuttuviksi parametreiksi siten, että nollan lämpöasteen kohdalla arvot muuttuvat sen mukaan, onko maa pakkasella vai sulana kohdassa, jota ohjelma on laskemassa. Kuvassa 6 on perusmaan lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella.



KUVA 6. Perusmaan lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella

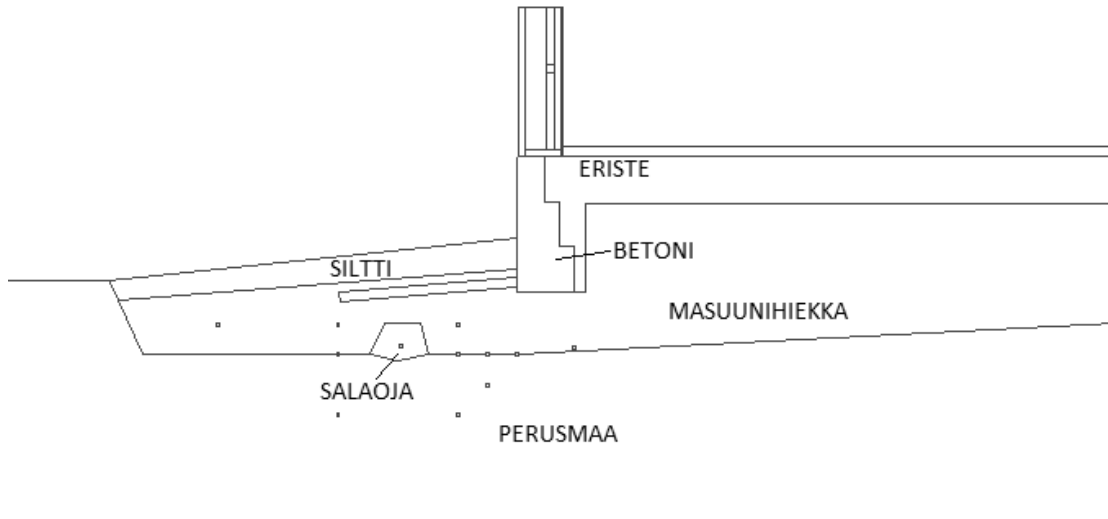
Routamitoitussyvyys saatiin oikeaksi kokeilemalla jäätäneen maan eri lämmönjohtavuusarvoja. Kun kaikki muuttuvat tekijät oli selvitetty, mallinnettiin Talo R, jonka perustuksissa on lämpötila-anturit. COMSOL Multiphysics -ohjelmalla saatuja tuloksia vertailtiin lämpötila-antureiden antamiin tuloksiin. Talo R:n tulosten oltua yhteneviä mitattuihin arvoihin mallinnettiin muut kohteet samoihin olosuhteisiin kuin Talo R. Näin saatiin vertailukelpoisia tuloksia erilaisista perusratkaisuista.

## 4 KOHTEIDEN MALLINTAMINEN

Tässä työssä käytiin läpi kuusi erilaista matalaperustusratkaisua. Ensimmäinen ratkaisu oli Talo R, jonka perustuksista löytyvät lämpötila-anturit. Kohde sijaitsee Oulussa ja se on rakennettu vuonna 2010. Neljä seuraavaa ratkaisua olivat olemassa olevia kohteita, joiden sijainnilla ei ole merkitystä, koska kaikki kohteet mallinnettiin samoihin olosuhteisiin kuin Talo R. Viimeinen ratkaisu oli opinäytetyössä laadittu suunnitelma puurunkoiselle omakotitalolle. Kaikki kuusi erilaista matalaperustusratkaisua mallinnettiin samoihin olosuhteisiin sään ja maan parametrien osalta, jotta niiden lämpövirtoja voitiin vertailla keskenään.

### 4.1 Talo R:n mallintaminen

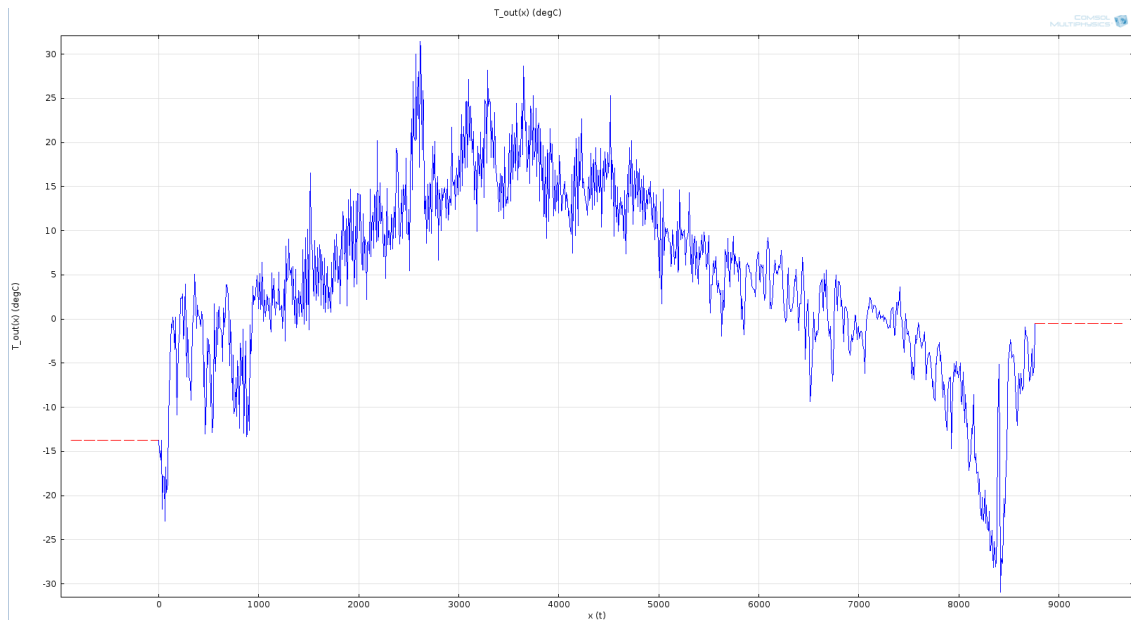
Mallinnus aloitettiin tekemällä rakennepiirustusten leikkauskuvasta pohja, joka lisättiin Comsol-ohjelmaan. Kuvassa 7 on yksinkertaistettu poikkileikkaus Talo R:n perustuksista.



*KUVA 7. Yksinkertaistettu poikkileikkauskuva Talo R:n perustuksista. Lämpötila-anturit näkyvät kuvassa pieninä pisteinä*



Ohjelmaan määritettiin sisälämpötila  $T_{in} = 20 \text{ °C}$ , maaperän alareunaan lämpötila  $4,5 \text{ °C}$  sekä ulkoilman lämpötila, joka saatiin sääaseman keräämästä datasta. Ulkoilman lämpötila tallennettiin kerran tunnissa vuoden ajan alkaen 21.2.2011 klo 15.00 ja päättyen 21.2.2012 klo 14.00. Näin saatiin vuoden sää Oulussa, joka lisättiin Comsol-ohjelmaan. Kuvassa 8 on esitetty Oulun lämpötilakäyrä kyseisen vuoden ajalta.



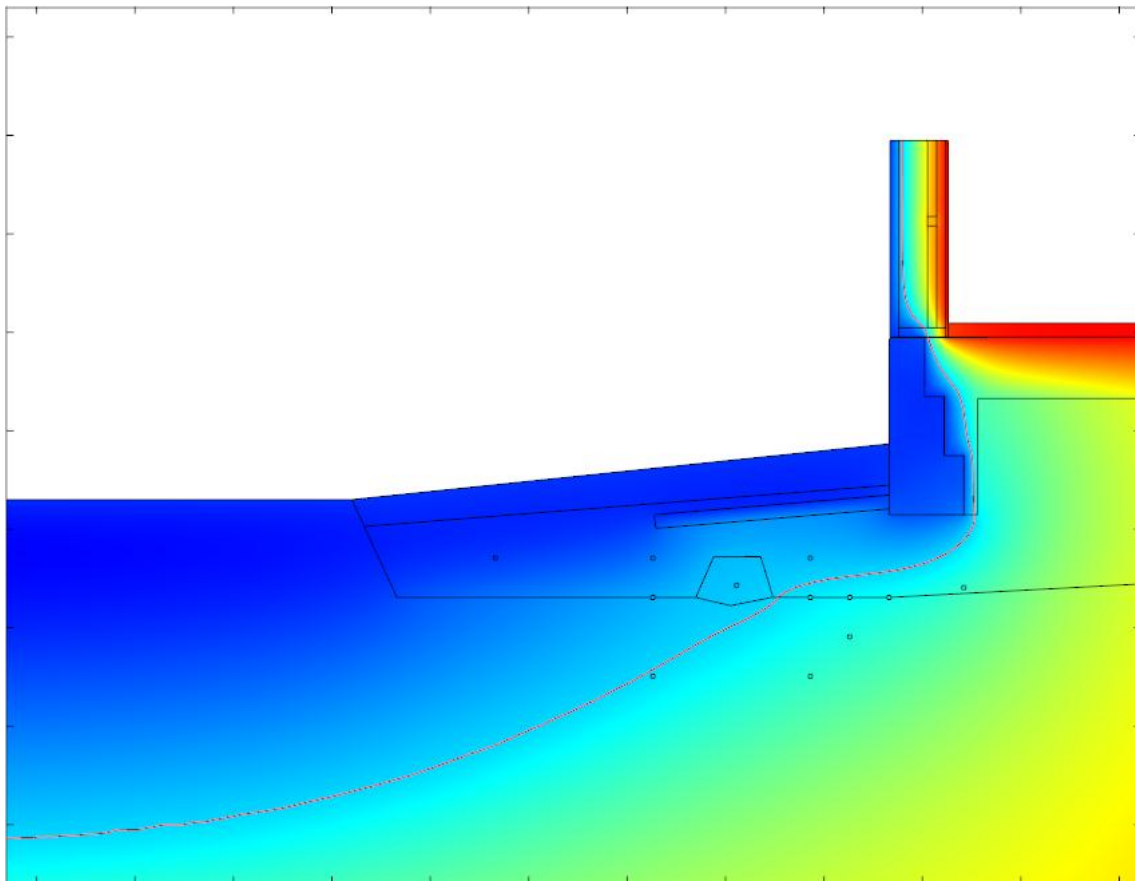
*KUVA 8. Oulun lämpötiläkäyrä vuoden ajalta*

Materiaalien vaaditut arvot saatiin pääosin valmistajien ilmoittamina ja ne lisättiin ohjelmaan. Taulukossa 3 on esitetty materiaalien parametrit.

TAULUKKO 3. Materiaalien parametrit

MATERIAALI	LÄMMÖNJOHTAVUUS [W/(mK)]	MATERIAALIN TIHEYS [J/kg K]	LÄMPÖ-KAPASITEETTI [kg/m <sup>3</sup> ]
Perusmaa	0,714–1,214 (sulana-jäässä)	1626–2226 (sulana-jäässä)	1700
Masuunihiekka	0,41	900	1500
Sora/moreeni	2,00	1000	2033
Siltti	1,50	1022	2000
Betoni	2,00	1000	2000
Tuulensuojalevy RKL-A45	0,031	1030	28
Mineraalivilla	0,033	1030	30
EPS, vaaka	0,036	1300	20
EPS, pysty	0,038	1300	20
EPS, routa	0,036	1300	22
SPU AL	0,023	1300	20
Puu (runko)	0,12	1600	500
Bitumikaista	0,23	1000	1100
Kipsilevy	0,25	1000	900
Vaneri	0,17	1600	700
Polyuretaanivahto	0,050	1500	70
Runkoleijona	0,052	1600	250
Kevytsoraharkko	0,22	300	650
Reikätiili	0,50	900	1500

Malliin lisättiin laskentaverkko, jonka jälkeen malli voitiin laskea Comsol-ohjelmalla. Tässä tapauksessa laskettiin malli ensin stationäärisessä tilassa, jolloin saatiin lämpötilat jakautumaan kaikkialle siten, ettei lähtötilanteessa ollut joka puolella mallia sama lämpötila, vaan se oli jakautunut lähemmäksi todellisuutta. Säädataa muokattiin siten, että simulointi alkoi kesäkuun ensimmäisenä päivänä ja loppui toukokuun viimeisenä päivänä. Näin tehtiin siksi, että saatiin katkeamaton talvi simulointiin. Ohjelmaan syötettiin säädataa edellä mainittu vuoden jakso kaksi kertaa peräkkäin, jolloin lämpötilat saatiin jakautumaan malliin tarkemmin. Kuvassa 9 nähdään Talo R:n lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella.

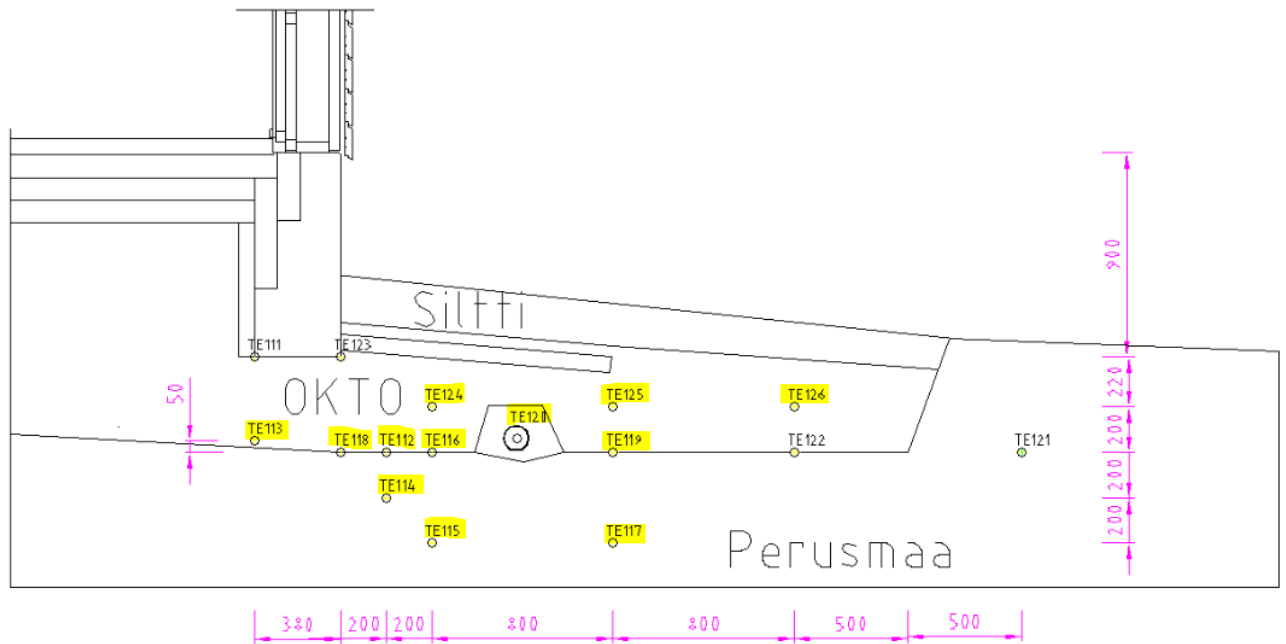


*KUVA 9. Talo R:n lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella*

Punainen viiva osoittaa lämpötilagradientti  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  sijainnin. Malli on simuloitu Oulussa vallinneen sään mukaan, jolloin pakkasmäärä on ollut  $18\ 937\text{ }^{\circ}\text{Ch}$ , mikä on

merkittävän pieni verrattuna mitoituspakkasmäärään, joka on Oulussa 55 000 °Ch.

Mallista saatiin lämpötilakäyrät jokaisen lämpöanturin kohdalta. Niiden avulla voidaan vertailla mitattuja ja laskettuja arvoja keskenään. Kuva 10 osoittaa, miten anturit on sijoitettu perustuksiin ja niiden lähialueille.



KUVA 10. Lämpötila-anturien sijoittelu Talo R:n perustuksissa

Osa asennetuista lämpötila-antureista oli rikkoontunut. Toimivat lämpötila-anturit on korostettu kuvassa keltaisella värillä. Taulukossa 4 on vertailtu Comsol-ohjelmasta saatuja arvoja mitattuihin arvoihin ja näistä on laskettu poikkeamat. Lämpötila-antureiden valmistajan ilmoittama virhemarginaali on  $\pm 0,5$  °C.

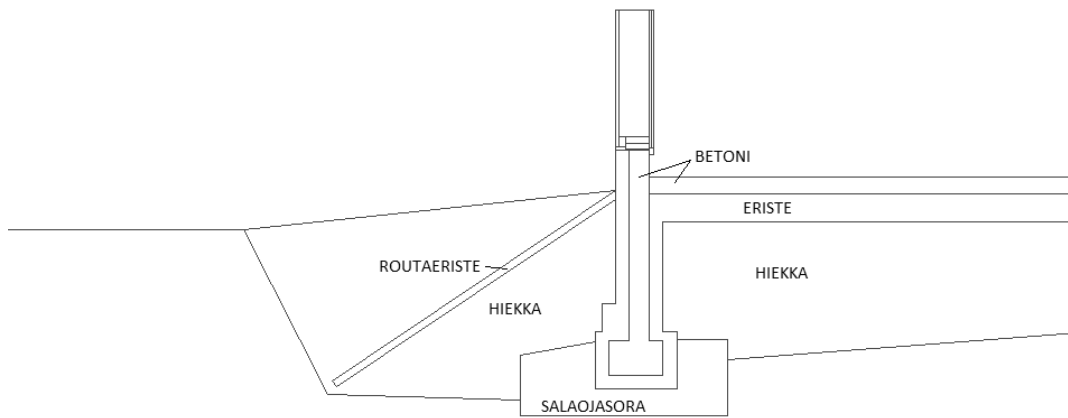
TAULUKKO 4. Comsolista saadut tulokset lämpötila-antureiden kohdalta sekä mitatut arvot samoista kohdista

Anturi	Cmsol	Mitattu	Poikkeama	Anturi	Cmsol	Mitattu	Poikkeama
TE 112	0	1,4	1,4	TE 118	0,35	1,4	1,1
TE 113	1,5	1,6	0,1	TE 119	-2,95	0,5	3,0
TE 114	2,3	2	0,3	TE 120	-2	-0,2	1,8
TE 115	2,95	1,9	1,1	TE 124	-4,1	0	4,1
TE 116	-0,4	1,2	1,6	TE 125	-8,5	-1,1	7,4
TE 117	0,1	1,2	1,1	TE 126	-14,35	-2	12,4

Simuloitujen ja mitattujen arvojen muutamat suuret poikkeamat johtuvat pääosin siitä, että kohteessa oli talvella lumi eristämässä maata. Anturit TE\_119, TE\_124, TE\_125 ja TE\_126 antoivat suurimman poikkeaman mallinnuksessa. Comsol-malli oli tehty lumettomana, jonka vuoksi varsinkin kauimpana olevat mittauspisteet antoivat kylmempiä tuloksia kuin todelliset mittaustulokset. Simuloinnista saadut tulokset lähellä perustusta olivat selvästi lähempänä mitattujen tulosten kanssa. Mikäli rakennuksen seinustalla olisi suuri alue, joka pidettäisiin talven ajan lumettomana, olisivat mitatut lämpötilat lähempänä Comsol-ohjelmasta saatuja tuloksia.

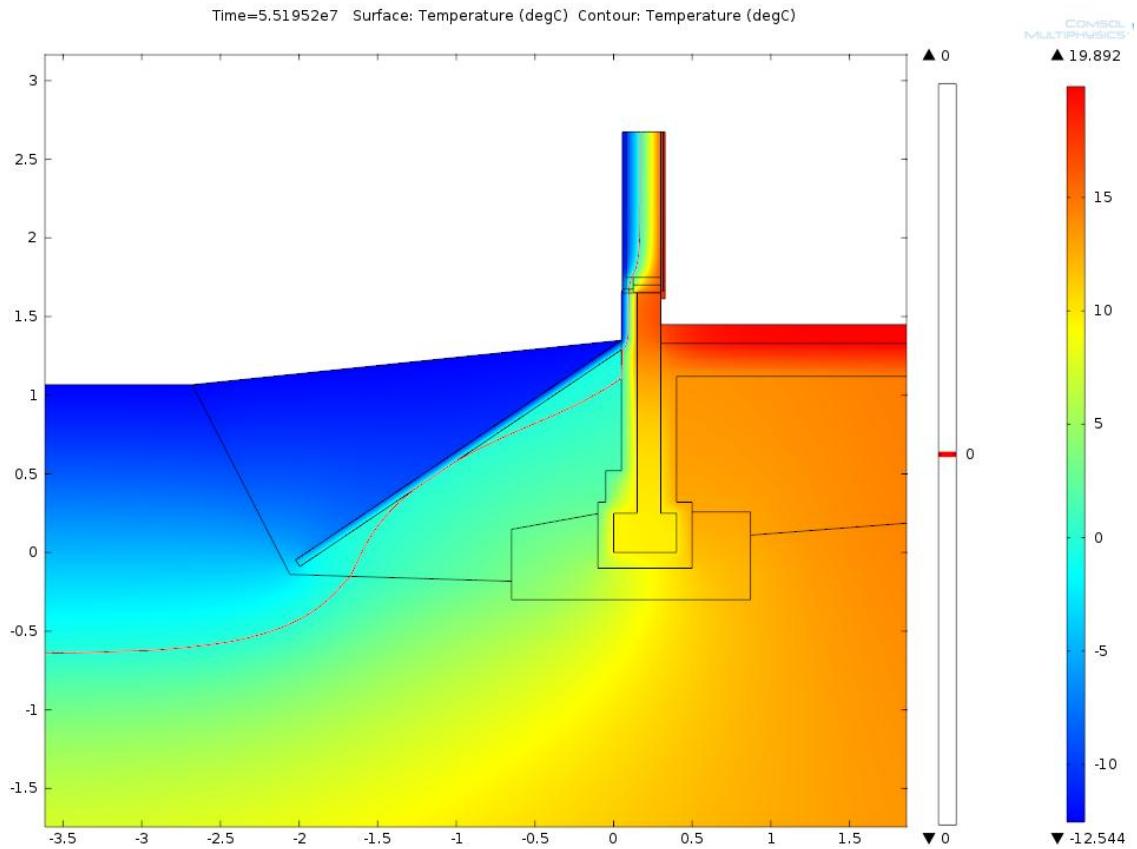
#### 4.2 Teollisuushallin mallintaminen

Toisena kohteena oli teollisuushalli, jossa perustukset oli toteutettu eri tavalla kuin perinteisesti. Hallin sisältä perustuksiin oli tehty tietoinen kylmäsilta, jolloin sisältä hallista pääsee lämpö karkaamaan hallitusti perusmuuriin. Tämän seurauksena perustukset pysyvät lämpimämpänä kuin tyypillisessä perustusratkaisussa kovemmillakin pakkasilla. Tässä kohteessa ei lähdetty tavoittelemaan pienintä energian kulutusta, vaan turvaamaan perustukset hallitulla lämpövuodolla. Toinen normaalista poikkeava ratkaisu on routaeriste, joka on asennettu poikkeuksellisen jyrkkään kulmaan ja joka ulottuu perustussyvytyteen asti. Kuvassa 11 on poikkileikkaus hallin perustuksista.



*KUVA 11. Teollisuushallin perustusten yksinkertaistettu poikkileikkauskuva*

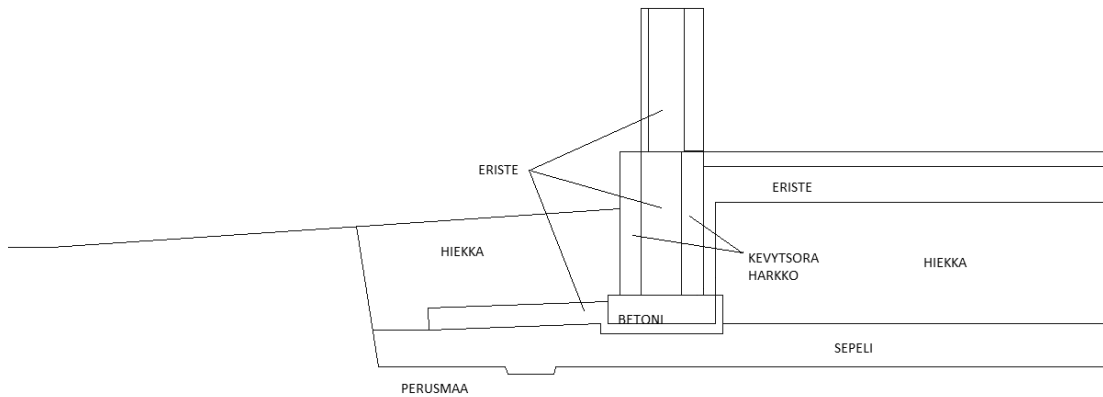
Puu-ulkoverhous jätettiin mallista pois, koska sen takana on hyvin tuulettuva ilmarako. Teollisuushallista luotiin Comsoliiin samanlainen malli kuin Talo R:stä. Malliin asetettiin samat lämpöolosuhteet, maaperä ja materiaalit (taulukko 3), jolloin malleja voitiin vertailla keskenään. Kuvassa 12 nähdään teollisuushallin perustusten lämpöjakauma ja lämpötilagradientti 0 °C pakkasjakson aikana.



KUVA 12. Teollisuushallin perustusten lämpöjakauma

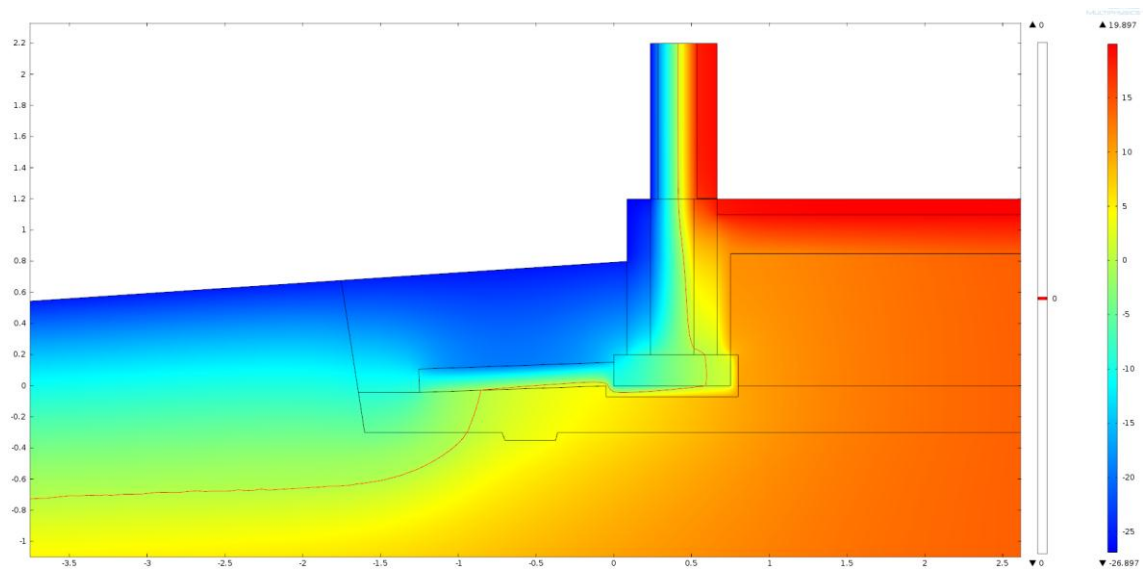
### 4.3 Talo I:n mallintaminen

Talo I on kesällä 2012 valmistunut omakotitalo, jonka perustusmalli on sama kuin Talo R:ssä, mutta anturan alle on laitettu eristettä. Eristeiden paksuuksissa oli paljon eroavaisuuksia. Routaeristettä on Talo I:ssä 150 mm, kun taas Talo R:ssä sitä on 70 mm. Talo R:ssä routaeristeen lisäksi on laitettu masuunihiekka, joka toimii myös eristeenä. Talo I:ssä perusmuurin eriste on keskellä, Talo R:ssä se on sisäreunassa. Talo I:n ulkovuoraus on muurattu tiilistä, mutta sitä ei otettu mukaan malliin hyvin tuulettuvan ilmanraon takia. Kuvassa 13 on Talo I:n perustusten yksinkertaistettu poikkileikkauskuva.



*KUVA 13. Talo I:n perustusten yksinkertaistettu poikkileikkauskuva*

Talo I:stä tehtiin myös malli Comsol-ohjelmalla samoilla materiaalien parametreilla kuin Talo R:ssä (taulukko 3). Kuvassa 14 nähdään Talo I:n lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella.



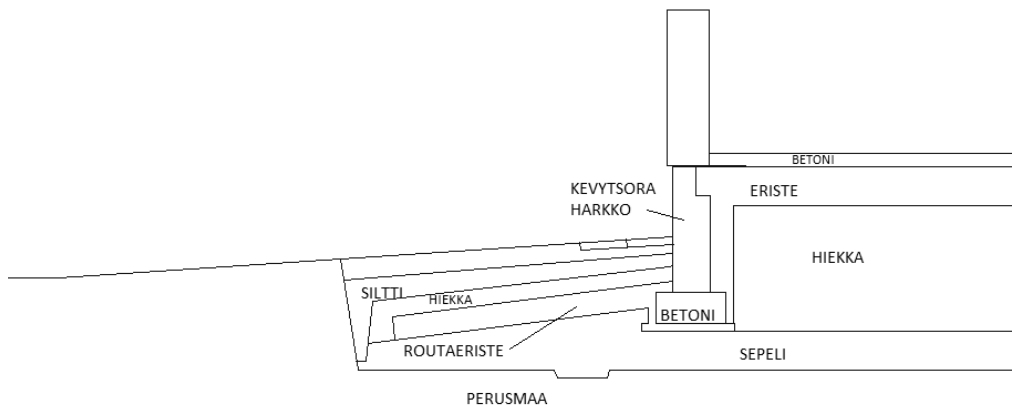
*KUVA 14. Talo I:n perustusten lämpöjakauma*

Tässä ratkaisussa maassa oleva lämpö ei pääse siirtymään anturan kautta ylöspäin anturan alla olevan eristeen takia.



#### 4.4 Talo H:n mallintaminen

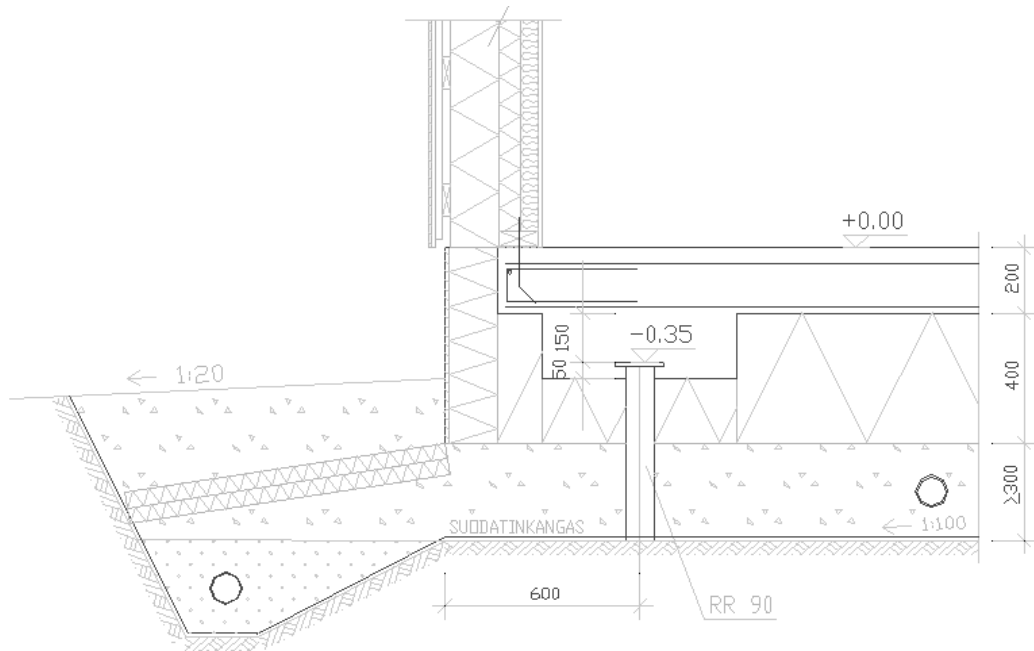
Talo H on hirsitalo, jonka routaeristysratkaisut ovat hyvin samanlaiset kuin Talo I:ssä. Suurin eroavaisuus on perusmuurin eristys, joka on muurin sisäpinnalla samoin kuin vertailukohteessa Talo R:ssä. Kuvassa 15 on Talo H:n perustusten yksinkertaistettu poikkileikkauskuva.



*KUVA 15. Talo H:n perustusten yksinkertaistettu poikkileikkauskuva*

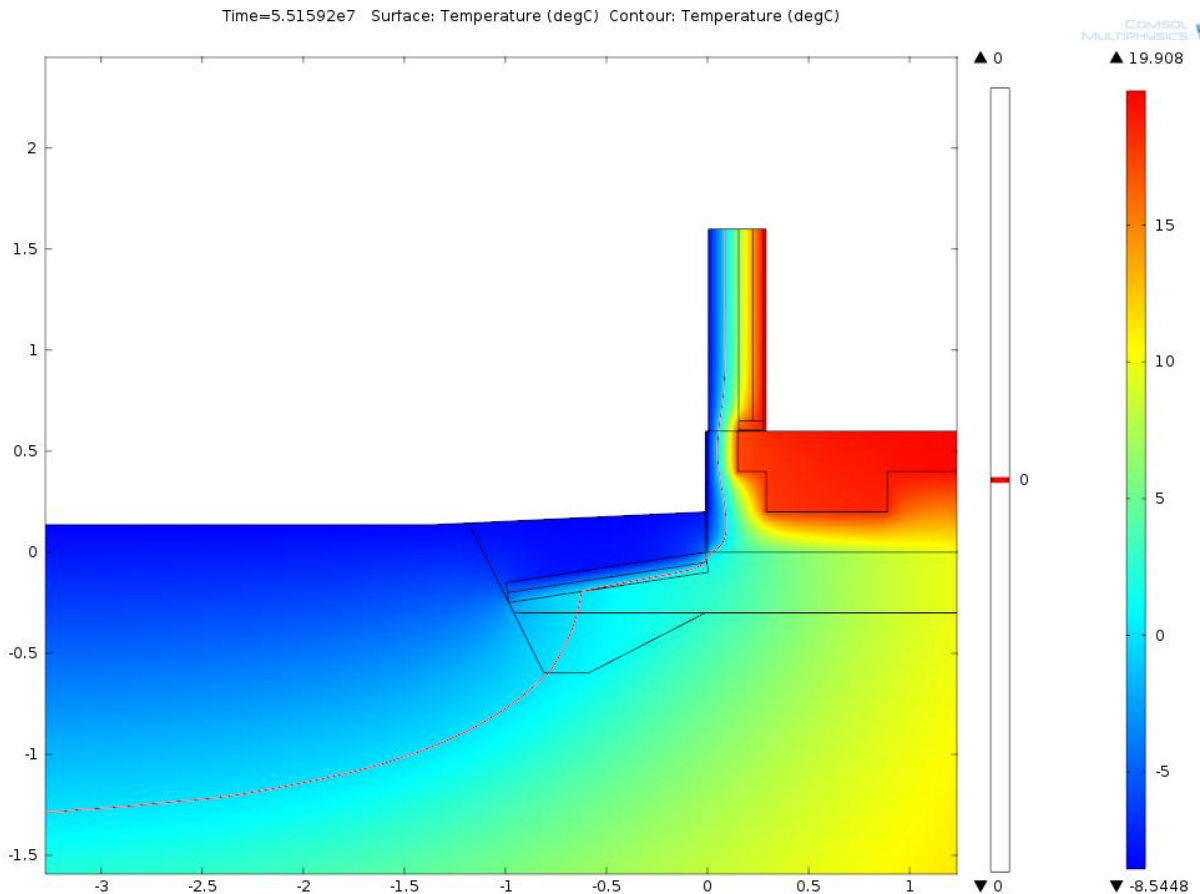
Talo H:sta tehtiin myös Comsol-malli, jonka avulla osoitettiin anturan alle tulevan eristeen merkitystä nykyaikaisessa rakentamisessa. Alapohjan eriste on paksumpi nykyaikaisessa rakentamisessa, jolloin lämpövuoto maahan on pienempi. Tämän vuoksi routaeristyksen merkitys kasvaa. Kuvassa 16 näkyy Talo H:n lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella.





*KUVA 17. Legalett-paaluperustusratkaisu*

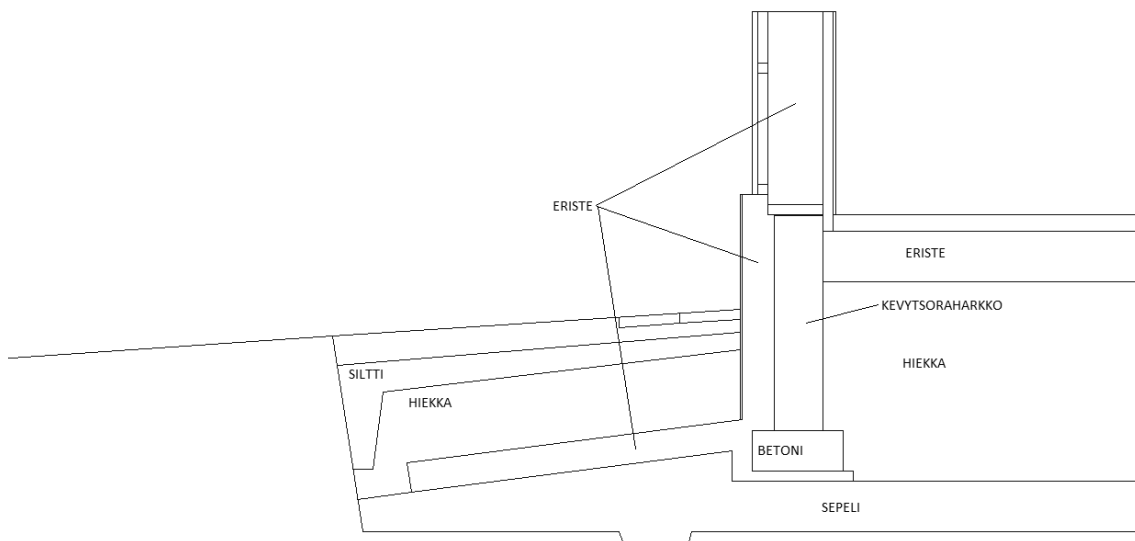
Tästä ratkaisusta havaitaan, että routaeristeen ja lattian eristeen rajaan syntyy lämpövuotoriski. Simuloinnilla voidaan helposti nähdä tämänkaltaiset tilanteet. Tämän perustusratkaisun lämpövuotoriskiä voidaan vähentää pienellä muutoksella: routaeristeen nostaminen ylemmäksi tai pystyeristeen tuominen pidempänä routaeristeen alareunan tasalle. Simuloinnissa ei otettu huomioon paaluja. Kuvassa 18 nähdään Legalett-perustusten lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella.



KUVA 18. Legalett-talon perustusten lämpöjakauma

#### 4.6 Puurunkoisen esimerkkitalon mallintaminen

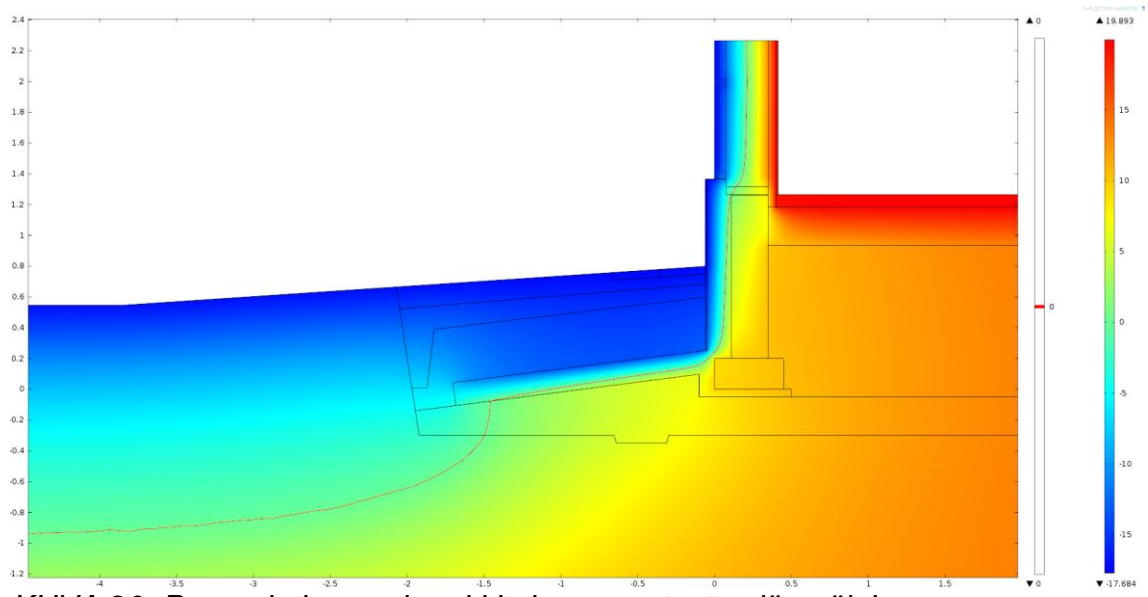
Puurunkoinen esimerkkitalo on malleista ainoa, joka on toteutettu vain suunnitelutasolla. Opinnäytetyössä suunniteltiin perusratkaisu, joka voisi olla hyvä vaihtoehto nykyisille perustuksille. Mallissa on pyritty yhdistämään parhaimmiksi todetut ominaisuudet edellä mainituista perusratkaisuista sekä osoittamaan perusmuurin ulkopuolelle sijoitetun lämmöneristeen edut. Kuvassa 19 esitetään yksinkertaistettu leikkauskuva puurunkoisen esimerkkitalon perustuksista.



*KUVA 19. Puurunkoisen esimerkkitalon perustusten yksinkertaistettu poikkileikkauskuva*

Perusmuuria vasten oleva lämmöneriste on sijoitettu rakenteen ulkopintaan, toisin kuin monissa niin kutsutuissa grynderi-perustuksissa, joissa lämmöneriste on sijoitettu perusmuurin sisäpintaan. Perusmuurin eriste nousee seinän ja perusmuurin liitoksen yli, joka estää suoran kylmäsilan liitoskohdassa. Seinän sisäpinnan eriste on kova SPU AL -eriste, joka jatkuu lattiabetonin ohi lattian alla olevaan eristeeseen asti.

Edellä kuvatulla ratkaisulla estetään perusmuurin ja seinän liitoksen kylmäsilan muodostuminen rakennuksen sisäpuolelta. SPU AL -eriste toimii höyrünsulkuna ja varmistaa rakenteen tiiviyyden (7). Kuvassa 20 on puurunkoisen talon perustusten lämpöjakauma kovimman pakkasjakson loppupuolella.



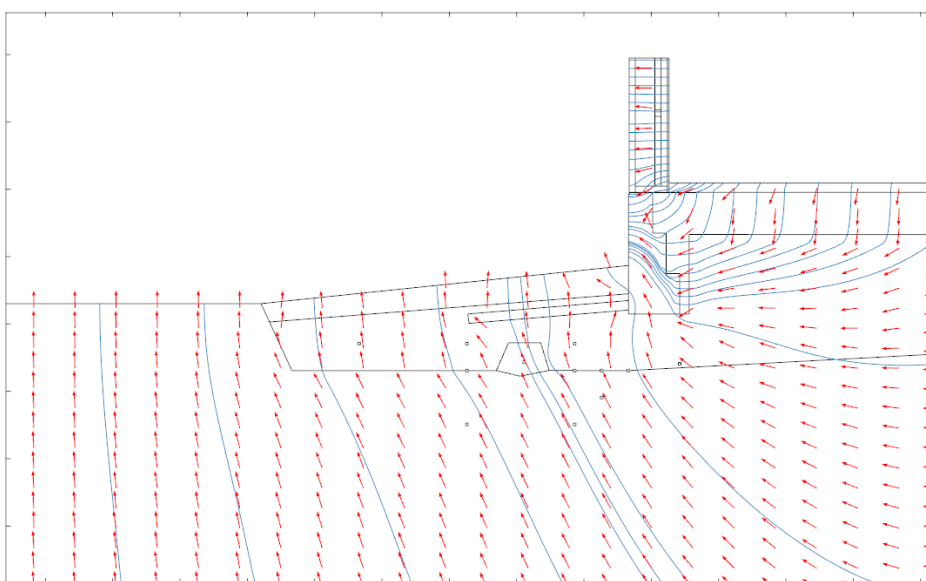
*KUVA 20. Puurunkoisen esimerkkitalon perustusten lämpöjakauma*

## 5 LÄMPÖVIRrat PERUSTUKSISSA

Comsol-ohjelman laskettua kohteet läpi voitiin saaduista tiedoista tarkastella lämpövirtoja. Lämpövirtojen käyttäytymisen seuraaminen voitiin toteuttaa parhaiten luomalla malliin nuolia ja viivoja, jotka kuvaavat lämpövirran suuntaa ja reittiä, joita pitkin lämpövirta siirtyy kylmempään materiaan. Perustusten alla oleva maa on lähes kokonaan kesäaikana varastoituneen ja syvemmältä maasta nousevan lämmön turvin sula ympäri vuoden. Tämän takia on erittäin tärkeää panostaa perustusten eristykseen siten, ettei lämpö pääse karkaamaan perustusten läheltä pois.

### 5.1 Talo R:n perustusten lämpövirta

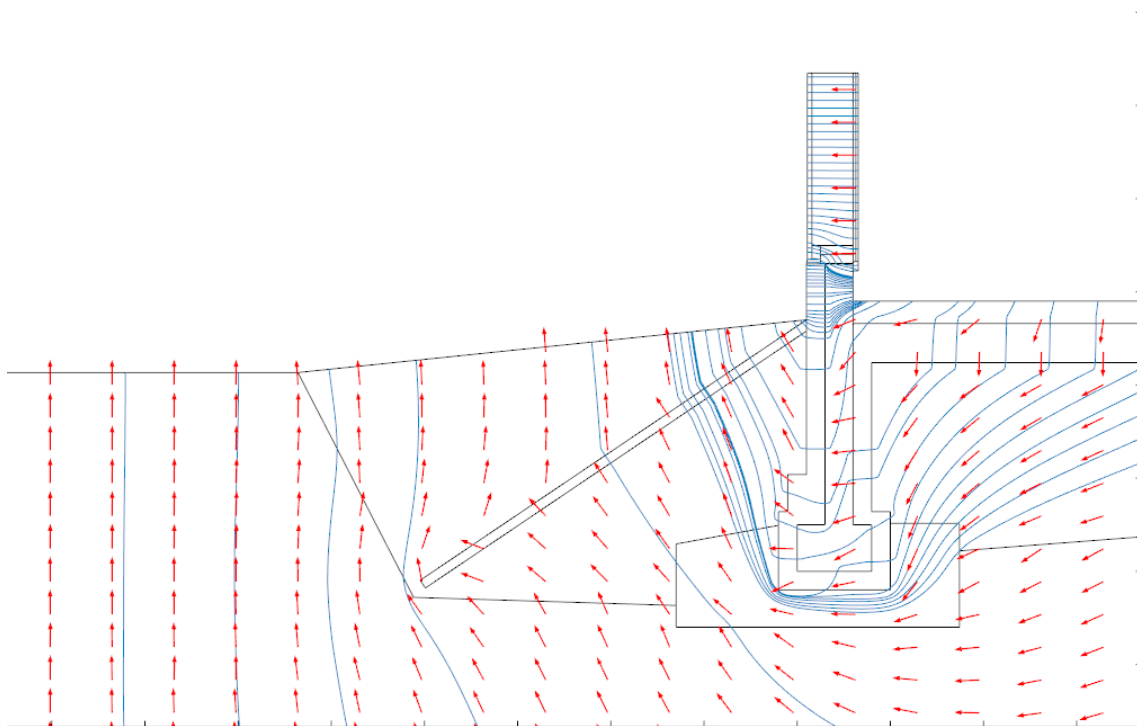
Työssä perehdyttiin Oulussa sijaitsevaan Talo R:ään, joka on perusratkaisultaan hyvin tyypillinen omakotitalo Suomessa. Lattian alla oleva eristys on nykyaikainen, mutta perustusten eristyksessä ei ole otettu riittävästi huomioon sitä, miten vähän rakennuksesta pääsee vuotamaan lämpöä rakennuksen alle. Tässä tapauksessa valettu betoniperusmuuri toimii kylmäsihtana ulkoilmasta perustusten alle. Kuvasta 21 käy ilmi, miten merkittävästi lämpö siirtyy maasta perustuksen kautta pois.



KUVA 21. Talo R:n lämpövirtauskuva

## 5.2 Teollisuushallin perustusten lämpövirta

Teollisuushallin perustusten lämpövirtoja tarkasteltaessa huomataan, että lämpö joutuu kiertämään perustukset lähes kokonaan. Lisäämällä vinoon routaeristeen yläosaan eristettä saataisiin lämpövirta kulkemaan vielä enemmän routaeristeen alareunan kautta, mikä vähentäisi routimisriskiä. Kuvassa 22 on esitetty lämpövirta Teollisuushallin perustuksissa.

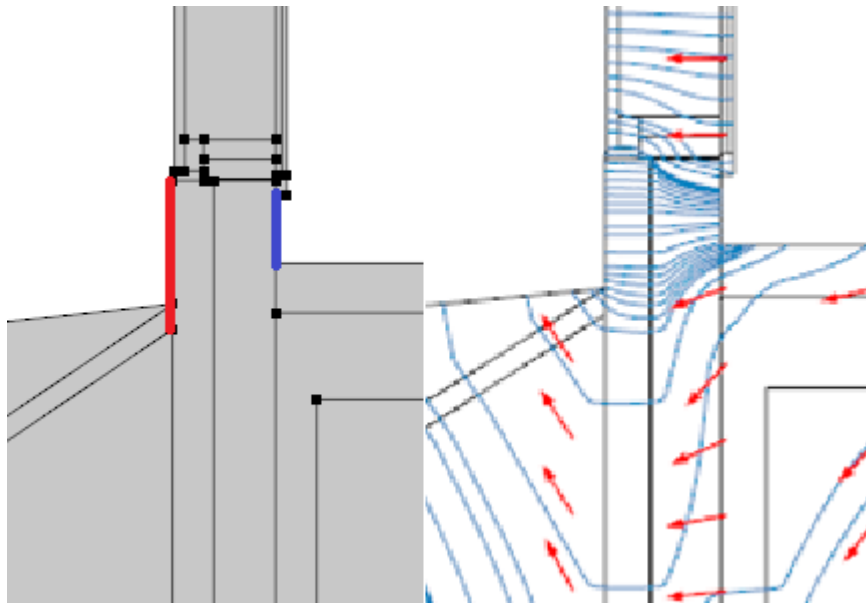


KUVA 22. Teollisuushallin perustuksen lämpövirta

Lämpöjakaumakuvan perusteella routimisriski tällaisessa perustuksessa on melko pieni, joten tarvetta lisäroutaeristeelle ei ole.

Alkualettamus siitä, että lämmön annetaan siirtyä hallitusti sisätilasta perusmuurin kautta perustuksiin, osoittautui oletettua vähäisemmäksi. Lämpövirtakuva nähdään, että suurin osa lämmöstä siirtyy suoraan ulkopinnassa olevan eristeen kautta ulkoilmaan eikä perusmuurin kautta anturaan. Kuvassa 23 on esitetty ne kohdat, josta Comsol-ohjelman lämpövirta-arvot on laskettu.



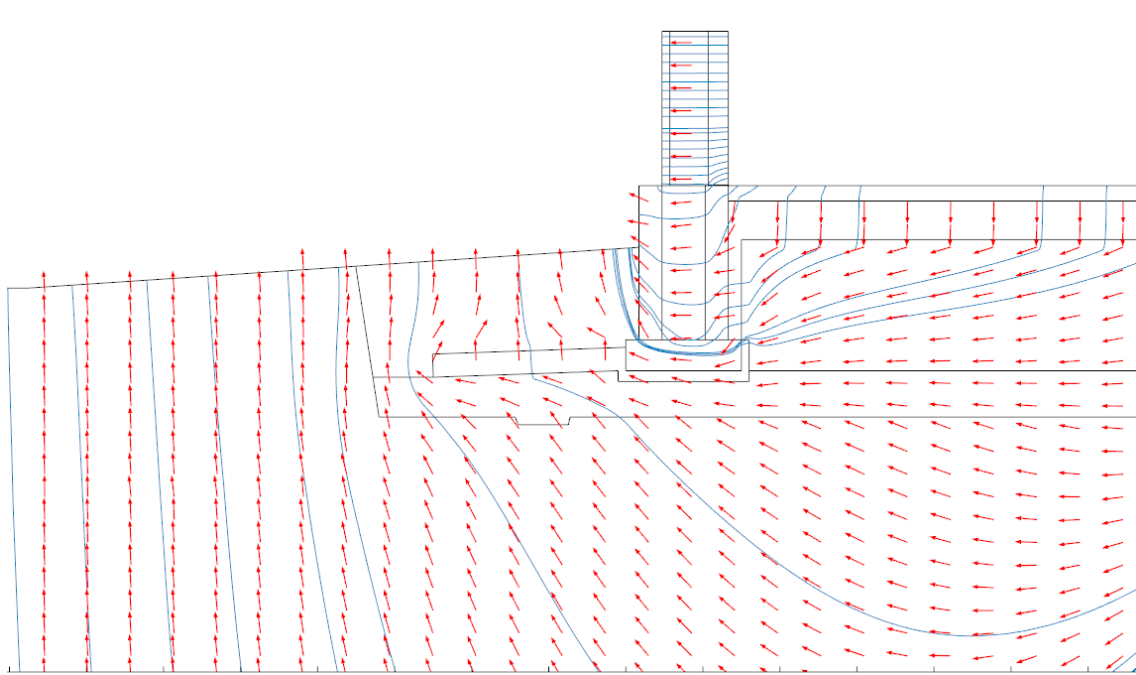


*KUVA 23. Lämpövirran vuotoalue Teollisuushallissa*

Sinisellä esitetään sisäpinnan lämpövirran laskentapinta, jonka tulos on 5,11 W/m<sup>2</sup>. Punaisella esitetään ulkopinnan lämpövirran laskentapinta, jonka tulos on 4,04 W/m<sup>2</sup>. Lisäämällä eristettä ulkopintaan saataisiin suurempi osa lämmöstä siirtymään tasaisemmin perustuksiin.

### **5.3 Talo I:n perustusten lämpövirta**

Perusmuurin keskellä oleva eriste osoittaa toimivuutensa, mikä näkyy tasaisena lämpövirtana perusmuurin läpi. Anturan ja perusmuurin sisäpinnalla eristeiden olisi ollut hyvä limittyä keskenään, koska siihen syntyi pieni lämpövuotokohta muuten niin hyvin toimivaan perustusratkaisuun. Kuvassa 24 on esitetty lämpövirta Talo I:n perustuksissa.

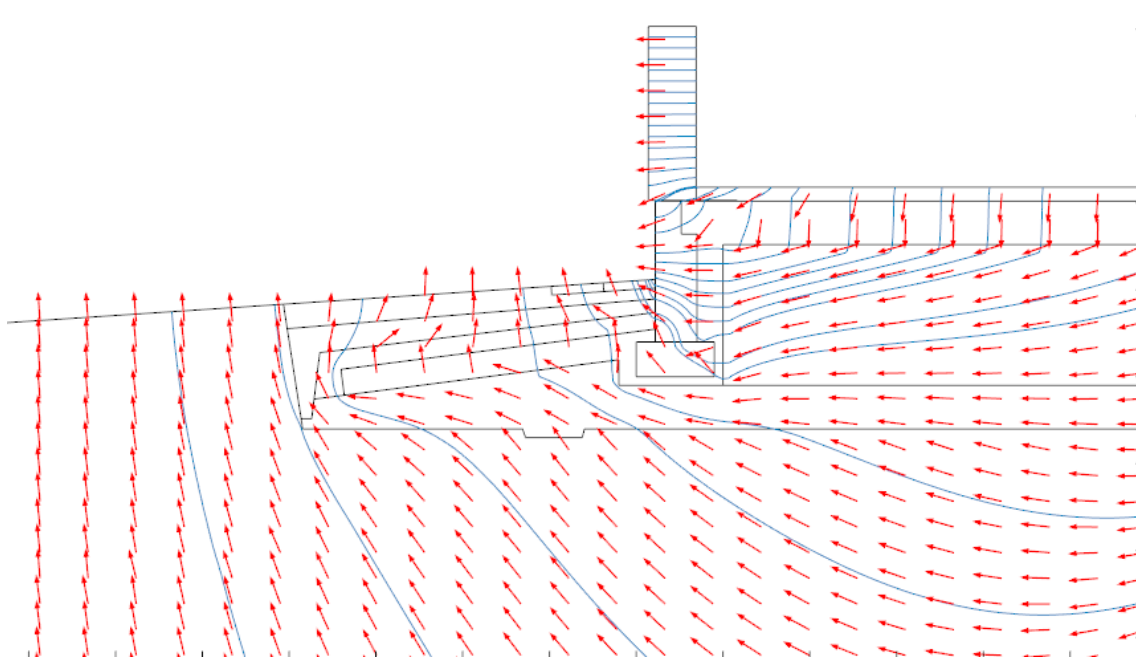


*KUVA 24. Talo I:n perustuksen lämpövirta*

Perusmuurin ja seinän eristeet ovat samalla linjalla, jolloin lämpövirta rakenteiden läpi on tasainen eikä liitoksessa ole kylmäsiltaa.

#### **5.4 Talo H:n perustusten lämpövirta**

Talo H:n perustuksista näkee hyvin anturan alla olevan eristeen merkityksen ja eron Talo R:ään verrattaessa, jossa ei ole eristettä anturan alla. Molemmissa kohteissa perusmuurin eristys on sisäreunassa. Kuvassa 25 on esitetty lämpövirta Talo H:n perustuksissa.

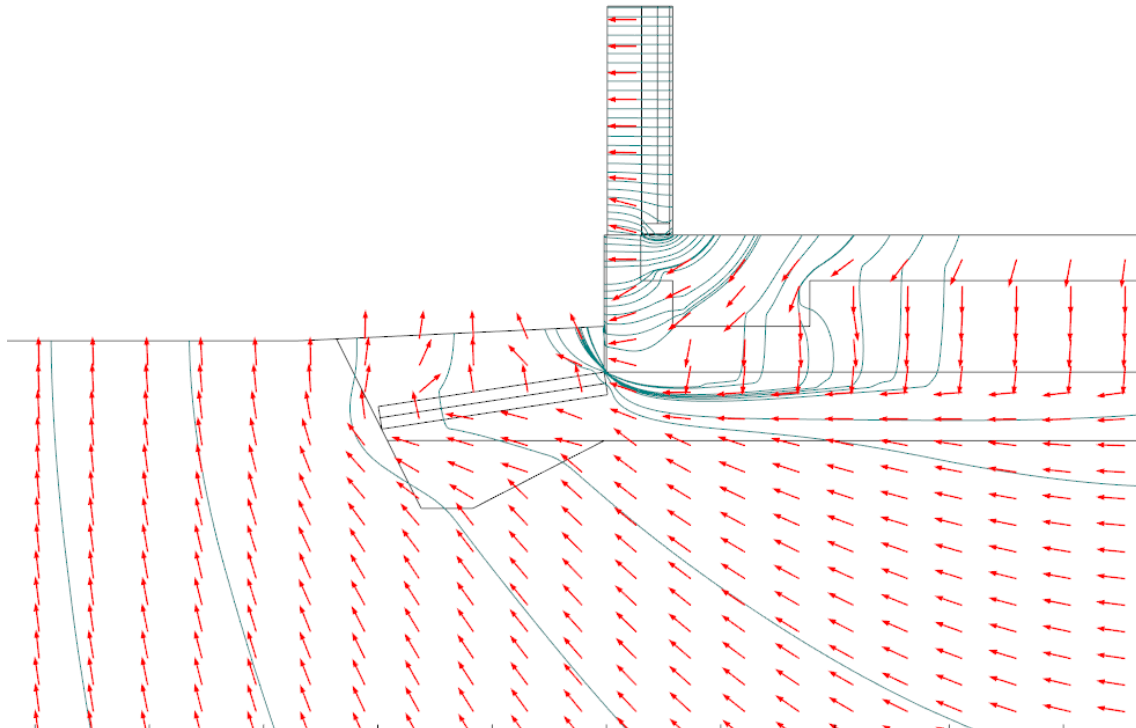


KUVA 25. Lämpövirta Talo H:n perustuksissa

Tällaisessa ratkaisussa ei tule esille suurempia ongelmia lämpövuotojen ja routimisriskin suhteen. Seinän ja perusmuurin liittymän kannalta olisi hyvä ratkaisu siirtää perusmuurin pystyeristys ulkopintaan, jolloin lämpötilagradientti  $0\text{ °C}$  ei tulisi niin lähelle sisänurkkaa.

### 5.5 Legalett-perustusten lämpövirta

Legalettin kohteen routaeristeen ja lattiarakenteen eristeen liitosalue aiheuttaa lämpövuotoriskin. Routaeristeen olisi voinut nostaa ylemmäksi tai pystyeristeen olisi voinut tuoda pidempänä routaeristeen alareunan tasalle. Kuvassa 26 on esitetty lämpövirta Legalett-talon perustuksissa.

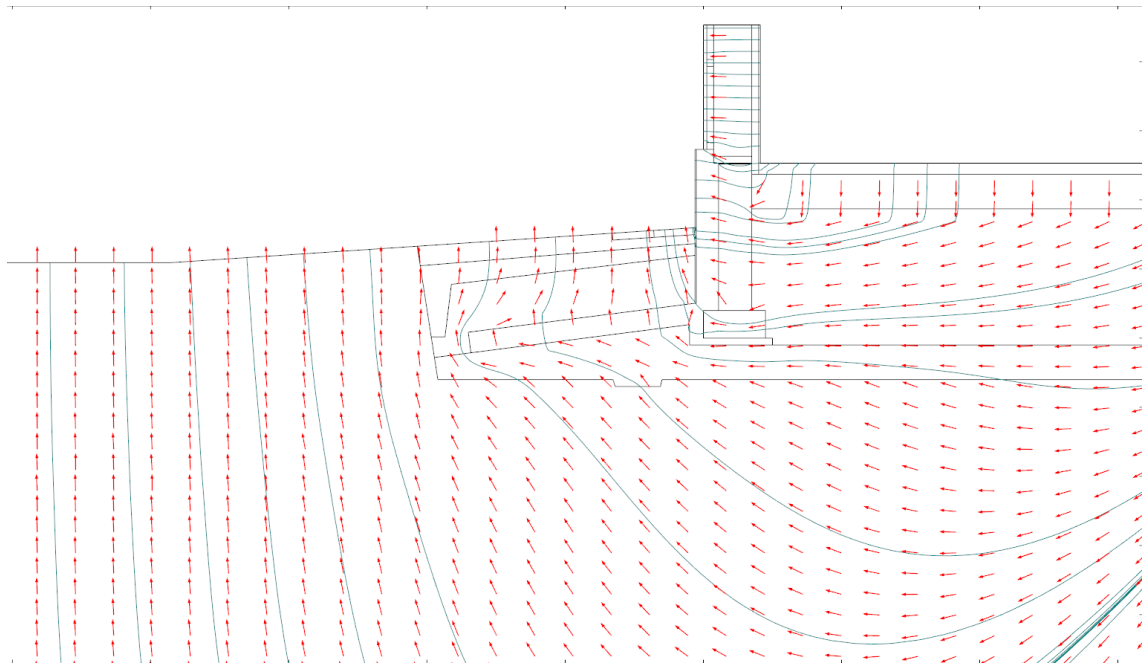


KUVA 26. Lämpövirta Legaletin perustuksissa

Legaletin ratkaisun niin sanottu perustussyvyys on hyvin pieni, josta seuraa se, ettei seinän vierellä oleva maa-aines eristä kylmää ja routaeristeen ja laatan väliin syntyvä kylmäsilta korostuu. Kuvasta (kuva 26) näkyy hyvin, miten lattian läpi virtaava lämpö pyrkii heti eristeen läpäistyään kohti reunaa, jossa vuotoalue sijaitsee.

### 5.6 Puurunkoisien esimerkkitalon perustusten lämpövirta

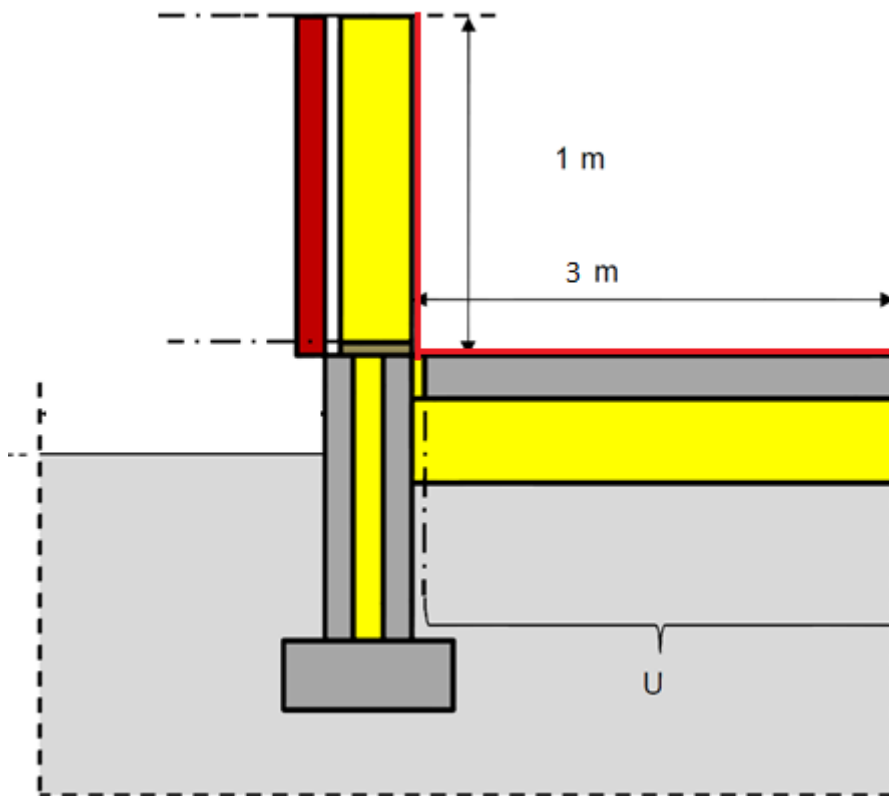
Puurunkoisessa esimerkkitalossa perusmuurin eristeen ollessa ulkopinnassa lämpövirta on hyvin samankaltainen kuin seinän läpi menevä lämpövirta. Lisäksi virta on tasainen eikä kohdistu yksittäisiin kohtiin. Kuvassa 27 on esitetty lämpövirta puurunkoisien esimerkkitalon perustuksissa.



*KUVA 27. Lämpövirta puurunkoisen esimerkkitalon perustuksissa*

## 6 KOHTEIDEN VERTAILU

Jokainen kohde mallinnettiin samanlaisiin olosuhteisiin ulkolämpötilan, sisälämpötilan ja maankamaran lämpötilan suhteen, lisäksi maan parametrit olivat kaikissa kohteissa samat, jolloin kohteita voitiin vertailla keskenään. Jokaisesta kohteesta otettiin mukaan lämpövirtalaskentaan metri seinää lattiasta ylöspäin ja kolme metriä lattiaa nurkasta poispäin, josta laskettiin sisältä poistuva lämpövirta. Kuvassa 28 on esitetty punaisella värillä ne pinnat, mistä lämpövirta-arvot ovat laskettu.



KUVA 28. Lämpövirta-arvojen laskentapinnat

Comsol-ohjelmasta saatiin lämpövirta-arvoja [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], joita voitiin vertailla keskenään. Taulukossa 5 on esitetty rakennuksen sisältä seinän ja lattian kautta poistuvan lämpövirran arvot kohteissa kovimman pakkasjakson loppupuolella.

TAULUKKO 5. Tutkittujen kohteiden numeeriset lämpövirta-arvot seinässä ja lattiassa

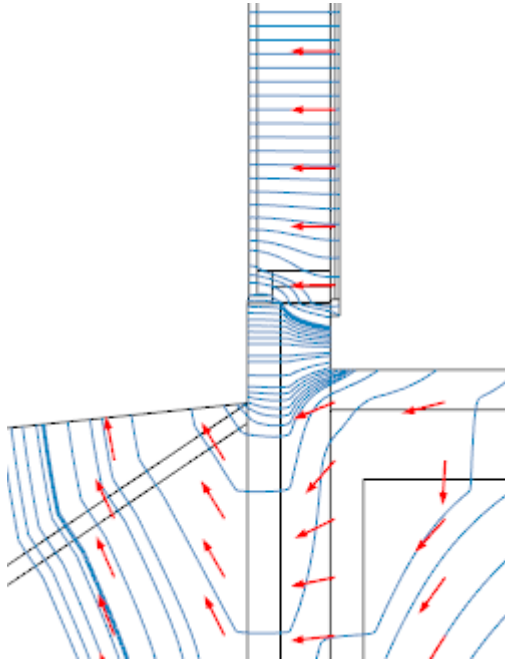
KOHDE	SEINÄ [W/m <sup>2</sup> ]	LATTIA [W/m <sup>2</sup> ]	YHTEENSÄ [W/m <sup>2</sup> ]
Talo R	6,28	9,19	15,48
Suunnitteluhalli	9,39	9,58	18,97
Talo I	5,41	4,90	10,31
Talo H	18,24	9,21	27,46
Legalet	4,02	7,02	11,04
Puurunkoinen esimerkkitalo	3,84	4,33	8,17

Taulukon tulokset on haettu Comsol-ohjelmasta, joka laskee kyseiset pinnat tunnin välein kahden vuoden ajalta. Jokaisesta kohteesta haettiin suurin lämpövirta pinnoilla. Kohteiden lattiapintojen lämpövirta-arvoja verrattaessa ei tuloksissa tullut esille suuria eroja. Pääasialliset erot syntyivät perusmuurin ja seinän liitoskohdissa, joihin syntyy herkästi kylmäsilta.

Verrattaessa Talo R:n, joka on hyvin tyypillinen perusratkaisu, ja puurunkoisen esimerkkitalon lattian ja seinän kautta tapahtuvaa lämpövirtaa, on ero jopa 47 %.

Talo H:n seinän lämpövirta-arvo 18,24 W/m<sup>2</sup> erottuu muista huomattavasti, koska sen seinät on tehty hirrestä. Muissa kohteissa on käytetty erilaisia eristämateriaaleja.

Teollisuushallin tulokset ovat kohtuullisen hyvät, kun otetaan huomioon seinän alareunaan jätetty tarkoituksellinen kylmäsilta, jonka tarkoituksena on pitää perustukset sulana. Kylmäsilan osuus seinän lämpövirrasta oli huomattava. Kylmäsilan kautta menee 5,11 W/m<sup>2</sup> koko seinän lämpövirrasta, joka on 9,39 W/m<sup>2</sup>. Kuten Comsolista saadut tulokset osoittavat, suurin osa lämpövirrasta menee lähes suoraan perusmuurin yläosasta ulos. Kuvassa 29 näkyy lämpövirta perusmuurin yläosassa.



*KUVA 29. Teollisuushallin lämpövirta perusmuurin yläosassa*

Kokonaisuudessaan tulosten perusteella voidaan päätellä suoraan, että mitä ulompana on perusmuurin pystyeristys, sitä parempi on tulos. Kuten tuloksista nähdään, Talo R ja Talo H edustavat tapaa asentaa perusmuurin eristys sisäpintaan. Molempien tulokset lattiaan lämpövirran osalta ovat hyvin lähellä toisiinsa: Talo R.  $9,19 \text{ W/m}^2$  ja Talo H.  $9,21 \text{ W/m}^2$ .

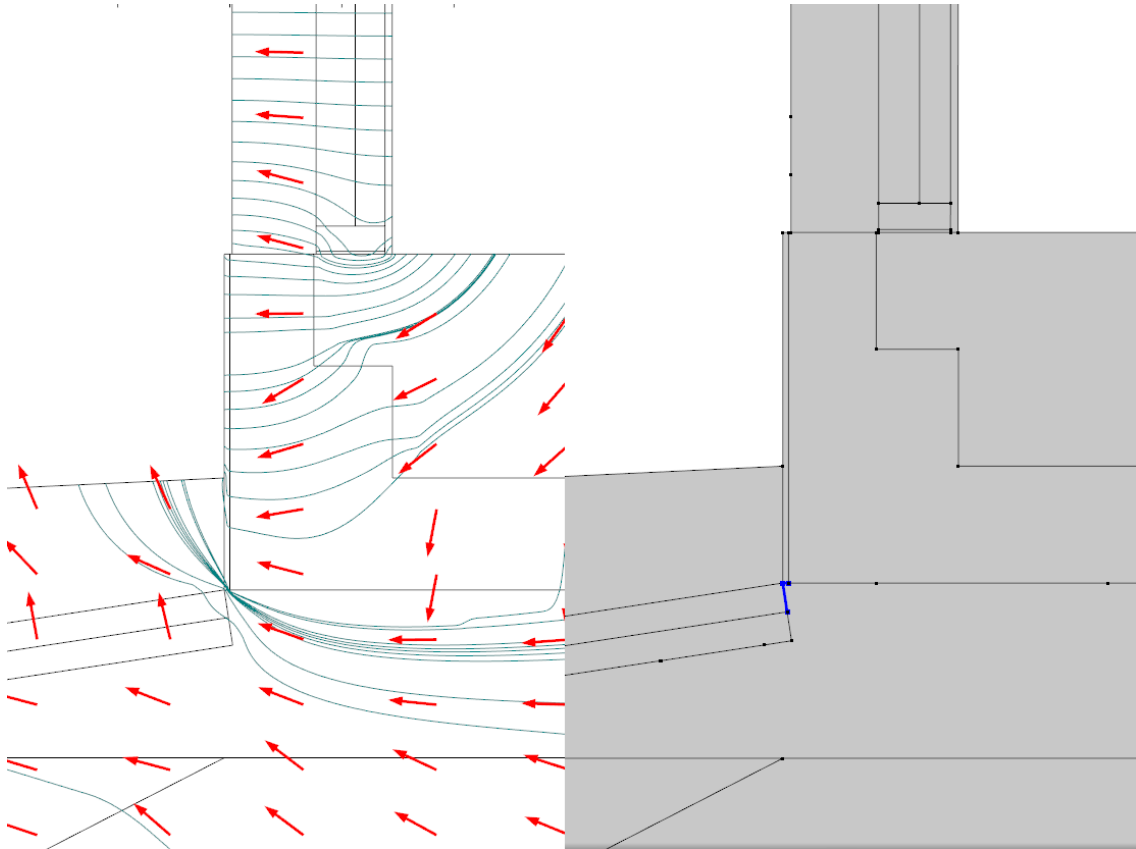
Teollisuushalli on oma lukunsa, mutta ei sekään ole huono ratkaisu. Teollisuushallin rakenneratkaisuissa tavoiteltiin enemmän turvallista perustusratkaisua kuin energiataloudellista ratkaisua ja siitä huolimatta se pääsi lattiaan lämpövirran osalta lähes samaan kuin Talo R ja Talo H tuloksella  $9,52 \text{ W/m}^2$ .

Talo I:n perusmuuriratkaisussa eriste oli laitettu keskelle muuria ja sen tulos olikin heti lattiaan lämpövirran osalta lähes puolet parempi kuin edellä olleissa perustuksissa ollen  $4,90 \text{ W/m}^2$ .

Legaletin ratkaisu on tarkoitettu paaluperustuksille, mutta se otettiin vertailuun mukaan routa- ja kylmäsiilatarkasteluun poikkeavien rakenneratkaisujen vuoksi. Legaletin ratkaisu lattiaan lämpövirran osalta sijoittui välimaastoon,  $7,02 \text{ W/m}^2$ .



Legaletin tulos todennäköisesti olisi huomattavasti parempi, jos routaeriste olisi kohdistettu muun eristyksen kanssa paremmin. Routaeristeen ja laatan eristeen kulmauksen kautta meneväksi lämpövirraksi saatiin  $11,03 \text{ W/m}^2$ . Kuvassa 30 on esitetty kohta, josta lämpö pääsee karkaamaan rakenteen alta.

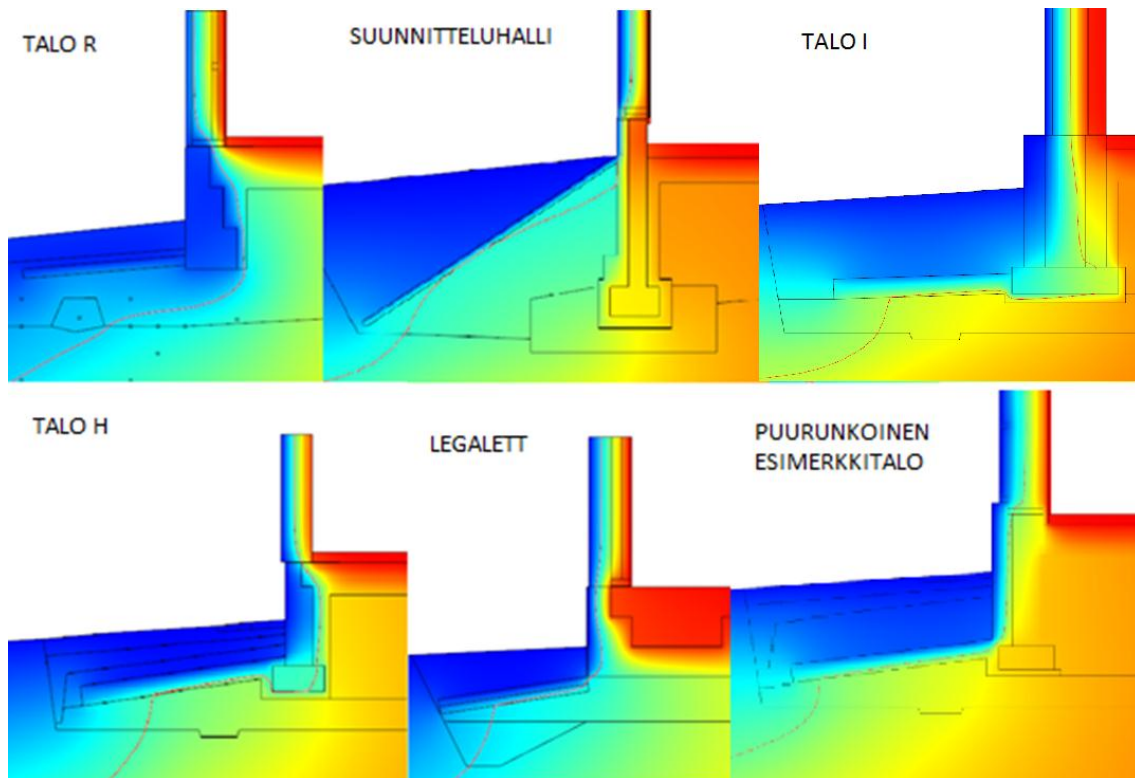


*Kuva 30. Legalett ratkaisun lämpövirran vuotokohta, josta rakenteen alta pääsee lämpö vuotamaan ulkopuolelle*

Kuvaan (kuva 30) on sinisellä merkitty alue, jonka laskennallinen lämpövirran tulos on  $11,03 \text{ W/m}^2$ . Lämpövirta on huomattavan suuri verrattaessa lattian läpi menevään lämpövirtaan, joka oli  $7,02 \text{ W/m}^2$ . Legalett sai toiseksi parhaimman tuloksen seinän lämpövirran osalta, joka pääosin on onnistuneen perusmuurin ja seinän liittymän ansiota.

Puurunkoisen esimerkkitalon perusmuurin eristys tuli ulkopintaan, jolloin seinän ja perusmuurin eristykset jatkuvat yhtenevänä liitoksen ohi. Merkittävää on huomata, miten erilaisilla perustusten eristemäärillä saadaan hyvin samaa luok-

kaa olevia tuloksia. Talo I:n perusmuurin pystyeristettä on kevytsoraharkkojen välissä 280 mm ja sisäpinnalla vielä 80 mm. Tämä määrä eristettä estää hyvin lämmön siirtymisen perusmuurin läpi ulospäin. Vastaavasti Puurunkoisessa esimerkkitalossa perusmuurin pystyeristettä on vain 160 mm, mutta rakennuksen sisältä lämpövirta on pienempi kuin Talo I:ssä. Talo I:n perusmuurin eriste estää rakennuksen alta tulevan lämpövirran siirtymisen rakenteiden ulkopuolelle paremmin kuin esimerkkitalo. Tämä näkyy hyvin Talo I:n lämpövirtakuvassa (kuva 24), jossa lämpövirran suunta on alaviistoon anturan alitse. Kuvassa 31 on esitetty kaikkien perustusratkaisujen lämpöjakaumat kovimman pakkasjakson loppupuolella.



KUVA 31. Perustusratkaisujen lämpöjakaumat kovimman pakkasjakson loppupuolella

## 7 POHDINTA

Matalaperusratkaisut yleistyivät 1950-luvun loppupuolella. Nykyaikainen alapohjaneristys estää rakennuksen sisältä lämmön siirtymisen rakenteiden alle huomattavasti tehokkaammin kuin ennen ja routaeristyksen merkitys on tämän myötä kasvanut.

Insinööriyön tavoitteena oli saada Talo R simuloitua siten, että siitä sai vertailukelpoisia tuloksia mitattujen tulosten kanssa. Kohteesta mitattujen lämpötilojen täsmätessä simuloituun kohteeseen voitiin samoihin olosuhteisiin mallintaa erilaisia perusratkaisuja, joita pystyi vertailemaan keskenään. Perusratkaisujen eroavaisuudet, ongelmat ja hyvät puolet oli helposti tarkasteltavissa Comsol-ohjelman luomien kuvien ja laskentatulosten avulla.

Mallinnuksen tulosten vertaaminen mitattuihin tuloksiin oli osittain ongelmallista, koska alue, johon lämpötila-anturit on sijoitettu rakennuksessa, on sellainen, että talvella seinän viereen pääsee satamaan lunta. COMSOL Multiphysics -ohjelmaan ei voinut syöttää lumipeitettä, koska siitä ei ole kerättyä tietoa. Tässä tapauksessa lumi toimii ylimääräisenä lämmöneristeenä ja maassa olevat anturit näyttävät korkeampia lämpöarvoja kuin Comsol-ohjelmasta saatavat tulokset.

Rakentamisen edetessä lähemmäksi nollaenergiataloa joudutaan perehtymään pienempiin yksityiskohtiin ja miettimään tarkemmin, miten mikäkin yksityiskohta olisi parasta toteuttaa. Kaikkihan on helppoa toteuttaa paperilla, mutta se pitäisi saada onnistumaan myös työmaalla. Käyttämällä laskentaohjelmia, kuten COMSOL Multiphysicsiä, riskien kartoittamiseen ja erilaisten perusratkaisujen suunnitteluun ennaltaehkäistään niitä pieniä virheitä, joita muuten ei suunnitteluvaiheessa välttämättä huomattaisi.

Tässä työssä käytettiin säädataa, jonka pakkasmäärä oli 18 937 °Ch. Se on pieni verrattuna mitoituspakkasmäärään, joka on Oulussa 55 000 °Ch. On selvää, että Talo R:än perusratkaisulla routimisriski lisääntyy, kun koittaa se talvi, joka on lähellekään tuota kerran 50 vuodessa olevaa pakkasmäärää.

## LÄHTEET

1. RIL 155. 1984. Lämmön- ja kosteuden eristys. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.
2. Viivamaisten lisäkoduktanssien laskentaopas. 2011. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=135713&lan=fi> . Hakupäivä 20.8.2012. Helsinki: Ympäristöministeriö.
3. Kallio, Jarmo. 2008. Maa- ja kalliolämpö. Saatavissa: [http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/energiaseminaari/esitykset/12-Kallio\\_Jarmo-Kalajoki.pdf](http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/energiaseminaari/esitykset/12-Kallio_Jarmo-Kalajoki.pdf). Hakupäivä 20.8.2012
4. Keskilämpötila. 2012. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/vuositilastot>. Hakupäivä 2.10.2012.
5. Lämmöneristys. Ohjeet 2003. Suomen Rakennusmääräyskokoelman osa C4. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/1931-C4s.pdf>. Hakupäivä 6.9.2012.
6. ROUTA JA ROUTIVUUS. 2012. Saatavissa: [http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia\\_ ja\\_ymparisto/ymparistotekniikka/PATOTURVA/Routa%20ja%20routivuus.pdf](http://portal.savonia.fi/img/amk/sisalto/teknologia_ ja_ymparisto/ymparistotekniikka/PATOTURVA/Routa%20ja%20routivuus.pdf). Hakupäivä 20.8.2012. Kuopio: Savonia ammattikorkeakoulu.
7. Dr. Wolfgang, Feist 2004. Passivhaus Institut. Wärmeverluste durch das Erdreich Protokollband Nr. 27. Darmstadt. Saatavissa: [http://www.passiv.de/de/05\\_service/01\\_literaturverkauf/00\\_literaturhinweise/05\\_pb.htm](http://www.passiv.de/de/05_service/01_literaturverkauf/00_literaturhinweise/05_pb.htm). Hakupäivä 6.9.2012.
8. SPU-eristeet. 2012. Saatavissa: <http://www.spu.fi/vesihoyryn-vastus-ilmanpityvyys-radonsuo>. Hakupäivä 5.9.2012.