



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Tuomas Tiainen

Matlab-simulaation perustuva sandwich-seinän lämmönjohtavuusanalyysi 5G-antennijärjestelmille

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Diplomityö
Energiatekniikka

Vaasa 2023

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Tuomas Tiainen		
Tutkielman nimi:	Matlab-simulaatioon perustuva sandwich-seinän lämmönjohtavuusanalyysi 5G-antennijärjestelmille		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Professori Xiaoshu Lu		
Työn tarkastaja:	Tekniikan tohtori Birgitta Martinkauppi		
Valmistumisvuosi:	2023	Sivumäärä:	62

TIIVISTELMÄ:

Matalaenergiarakennusten seinäpaksuudet asettavat haasteita uusimpien puhelinteknologioiden käytölle rakennusten sisällä, sillä 4G/5G/6G-signaalit heikkenevät kulkiessaan paksujen seinien läpi. Ongelmaan on selvitetty uutena ratkaisuna passiivisen antennin asentamista paksujen seinien sisään. Tällaisten antennin sisältävien seinien energiaominaisuudet vaativat lisätutkimuksia. Seinän lämmönjohtavuuden mittauksen yhteydessä on huomattu, että mittausten validointi on osoittautunut haastavaksi mitattavan kohteen rajallisen koon sekä tutkimusympäristön hallinnan monimutkaisuuden vuoksi. Tässä opinnäytetyössä kehitetään vakaan tilan lämmönjohtavuusmalli mittausepävarmuuksien tutkimiseen. Mallin simuloinnit suoritetaan MATLAB-ohjelmalla.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia lämmönjohtavuutta matalaenergiarakennuksissa yleisesti käytetyssä kolmikerroksisessa sandwich-seinässä. Tutkimus sisältää simulaatioiden suorittamisen, saatujen tulosten vertailun laboratoriomittauksiin sekä mittausvirheiden analysoinnin.

Tässä työssä kehitettiin monikerroksiselle seinärakenteelle kaksiulotteinen lämmönjohtavuusmalli. Vakaan tilan lämmönjohtavuutta tutkittiin simulaatioiden avulla ja erilaisten skenaarioiden simulaatiotuloksia verrattiin mittaustuloksiin. Mittausepävarmuudet, mukaan lukien reunaehdot, tunnistettiin iteratiivisten prosessien avulla ja arvioitiin monikerroksisen seinänäytteen keskimääräinen lämmönjohtavuus ja siihen liittyvät virheet.

Tulokset paljastivat mittauksista määritettynä lämmönjohtavuuden $2,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ja siihen liittyvät virheet $\pm 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. MATLAB-malli validoitiin vertaamalla simulaatiotuloksia mittaustietoihin.

Tässä opinnäytetyössä on käytetty useita rajoituksia ja yksinkertaistuksia, kuten esimerkiksi kohteen mallintaminen kaksiulotteisena. Työ ei sisällä transienttisimulaatioita, minkä vuoksi työssä ei tehty monikerroksiselle seinärakenteelle yksityiskohtaista lämpötehokkuuden vertailua antennin kanssa ja ilman antennia.

AVAINSANAT: Lämmönjohtuminen, matalaenergiatalo, Matlab, simulointi

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author:	Tuomas Tiainen		
Thesis Title:	Thermal conductivity analysis based on Matlab simulation for 5G Antenna systems in sandwich walls		
Degree:	Masters of Science in Technology		
Programme:	Energy Technology		
Supervisor:	Professor Xiaoshu Lu		
Evaluator:	D.Sc. Birgitta Martinkauppi		
Year of graduation:	2023	Pages:	62

ABSTRACT:

The wall thicknesses of low-energy buildings pose a challenge for the use of the latest telephone technologies inside the buildings, as 4G/5G/6G signals tend to weaken when passing through thick walls. A novel solution has been explored to install a passive antenna within thick walls. The energy performance of these antenna-embedded walls requires further investigation. While measuring thermal conductivity has been conducted, validating the measurements proves challenging due to the limited sample size and environmental control complexity. This thesis develops a steady-state heat conduction model to explore measurement uncertainties. Model simulations are conducted using MATLAB.

The goal for this thesis was to study heat conduction in a three-layer sandwich wall commonly used in low-energy buildings. The study includes performing simulations, comparing the obtained results with the laboratory measurements, and analyzing the measurement errors.

A 2D heat conduction model was developed for a multi-layer wall sample. Using the simulation results, steady-state heat conduction was simulated and compared with measurements under various scenarios. Through iterative processes, measurement uncertainties, including boundary conditions, were identified, and the average thermal conductivity of the multi-layer wall sample was estimated along with associated errors.

The results revealed a thermal conductivity of 2.7 W/m·K with associated errors of ± 0.3 W/m·K, as determined from the measurements. The MATLAB model was validated by comparing simulation results with the measurement data.

Several limitations are present in this thesis, including the simplification of a 2D model while the reality is 3D. Transient simulations were not conducted, and a detailed thermal performance comparison between the multi-layer wall sample with and without an antenna was not carried out.

KEYWORDS: Heat conduction, low-energy building, Matlab, simulation

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Vaasan yliopistolle Starclub-projektissa Suomen Akatemian rahoittamana, päätös nro. 324023.

Kiitän Suomen Akatemiaa työn rahoituksesta. Kiitän myös työn ohjaajana toiminutta Prof. Xiaoshu Lü:ta mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta, työn rahoituksen järjestämisestä ja jonka avulla minulle järjestyi mahdollisuus tutkimuksen tekemiseen myös Aalto-yliopiston tiloissa Espoossa. Kiitos projektitutkija Dr. Xiaolei Wang:lle hyvistä tutkimukseen liittyvistä huomioista sekä avustamisesta Matlabin käytössä. Osoitan kiitokset myös työntarkastaja Birgitta Martinkaupille.

Haluan kiittää kaikkia läheisiäni, jotka annoitte minulle mahdollisuuden opiskella uuden tutkinnon, ystäviäni jotka kyselitte kuulumisiani, opiskelutovereitani Viiviä ja Jonnaa mukavan opiskeluilmapiirin aikaansaamisesta sekä kotiseuralaisena toiminutta Teppoa, joka oli aina paikalla positiivista mieltä tuomassa.

Erytisesti haluan kiittää Sirpaa, tukesi ja kannustuksesi tämän työn loppuun saattamiseksi oli minulle korvaamattoman arvokasta.

Espoossa 7.11.2023

Tuomas Tiainen

Sisällys

1	Johdanto	9
1.1	Työn tausta	9
1.2	Työn tavoite	10
1.3	Työn rakenne ja rajaus	10
2	Matalaenergiatalot ja 5G-signaalin kantavuus	12
2.1	Seinien energiatehokkuus	13
2.2	Sandwich-elementti	13
2.3	5G-puhelimien yleistyminen	14
2.4	5G-signaalin ominaisuudet	15
3	Lämmönsiirron teoriaa ja tutkimuksen perustiedot	17
3.1	Johtuminen	17
3.2	Konvektio	18
3.3	Säteily	19
3.4	Lämpövirran tiheys	19
3.5	Lämmönjohtavuuden mittaus laboratoriossa	20
4	Tutkimukset ja simulaatiot	21
4.1	Tutkimusmenetelmän valinta	21
4.2	Osittaisdifferentiaaliyhtälön laskeminen	21
4.3	Referenssimallin luominen	22
4.3.1	Kaksiulotteinen kuva kappaleesta	22
4.3.2	Kappaleen rajapinnat	23
4.3.3	Laskentaverkko	25
4.3.4	Kappaleen materiaaliominaisuudet	26
4.4	Simulaatiot	26
4.4.1	Referenssimittauksen simulointi	27
4.4.2	Virhealueen etsiminen	29
4.4.3	Paksun seinärakenteen simulointi	29

4.4.4	Simulaatio muutetuilla k -arvoilla	30
4.4.5	Simulointitulosten validointi	31
5	Tulokset ja analyysi	32
5.1	Referenssimittausten tulokset	32
5.2	Mittavirheen etsinnän tulokset	42
5.3	Lämmönjohtuminen paksussa seinässä	53
5.4	Yksiulotteinen lämmönsiirto	56
6	Johtopäätökset	59
7	Yhteenveto	60
	Lähteet	61

Kuvat

Kuva 1. Maapallon keskilämpötila verrattuna vuosien 1850 - 1900 keskiarvoon (WMO, 2023, s.3).	12
Kuva 2. Betonisandwich-elementin rakenne (Paroc Group, 2023).	14
Kuva 3. Mobiilitilaajien määrä puhelinteknologioittain (Telefonaktiebolaget L M Ericsson, 2023).	15
Kuva 4. Laboratoriotutkimuksen mittauspisteet (Haneda ja muut, 2023b, s.9).	20
Kuva 5. Simuloitavan seinärakenteen mitat ja kerrokset.	23
Kuva 6. Kappaleen rajapinnat.	24
Kuva 7. Laskentaverkko sekä tarkasteltavat pisteet.	25
Kuva 8. Lämpötilajakaumat lämpövirran tiheyksillä -100, 0, 100 ja 900 W/m ² .	28
Kuva 9. Loppulämpötilat eristekerroksessa.	31
Kuva 10. Lämpötilan muutos seinärakenteen eri pisteissä.	32
Kuva 11. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 1$.	34
Kuva 12. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 2$.	35
Kuva 13. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 3$.	36
Kuva 14. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 4$.	37
Kuva 15. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 5$.	38
Kuva 16. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 40$.	39
Kuva 17. Lämpötilan muutos ulomman betonikerroksen ja eristeen rajalla.	40
Kuva 18. Lämpötilan muutos eristekerroksen keskellä.	41
Kuva 19. Lämpöjakauma antenniseinässä ajanhetkellä $T = 40$.	42
Kuva 20. Lämpövuon muutoksen suhde lämmönjohtavuuden muutokseen.	44
Kuva 21. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 1$, kun lämpövuoto on 800 W/m ² .	45
Kuva 22. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 5$, kun lämpövuoto on 800 W/m ² .	46
Kuva 23. Lämpöjakauma, kun lämpövuoto on 800 W/m ² .	47
Kuva 24. Lämpötilan muutos seinän eri pisteissä, kun lämpövuoto on 800 W/m ² .	48
Kuva 25. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 1$, kun lämpövuoto on 1000 W/m ² .	49
Kuva 26. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 5$, kun lämpövuoto on 1000 W/m ² .	50
Kuva 27. Lämpöjakauma, kun lämpövuoto on 1000 W/m ² .	51

Kuva 28. Lämpötilan muutokset, kun lämpövuoto on 1000 W/m ² .	52
Kuva 29. Lämpötilan muutos ulomman betonikerroksen ja eristeen rajalla.	53
Kuva 30. Lämpöjakauma suuressa kappaleessa.	55
Kuva 31. Lämpötilan muutos paksun seinän eri pisteissä.	56
Kuva 32. Lämpötilajakauma yksisuuntaisessa lämmönsiirrossa.	58

Taulukot

Taulukko 1. Energian kokonaiskulutus Suomessa (Tilastokeskus, 2021).	13
Taulukko 2. Simuloitavan kappaleen ominaisuuksia.	26
Taulukko 3. Simuloituja pisteiden 16, 27 ja 37 lämpötiloja	28
Taulukko 4. Paksun seinärakenteen ominaisuuksia.	30
Taulukko 5. Lämmönjohtavuuden tutkiminen.	43
Taulukko 6. Simuloitavan kappaleen ominaisuuksia.	57

1 Johdanto

Kansainvälisistä sopimuksista ja yhteisistä tavoitteista huolimatta ilmaston lämpeneminen jatkuu. Rakennusten lämmittämiseen ja toisaalta myös niiden jäähdyttämiseen kuluu merkittävä määrä energiaa. Tuota energiankäyttötarvetta pyritään vähentämään muun muassa tiukentamalla rakennusten energiatehokkuusvaatimuksia. Seinärakenteissa käytettäville eristeille tehdään kehitystyötä ja seinien paksuutta kasvatetaan, jotta rakennusten energiankulutusta saataisiin pienennettyä.

Samalla kun seinistä tehdään entistä energiatehokkaampia, se aiheuttaa ongelmia rakennusten sisällä käytettäville mobiililaitteille. Paksun seinän läpi kulkevan radiosignaalin voimakkuus heikkenee ja ongelma korostuu uusilla puhelinteknologioilla. Kiinteistä internetyhteyksistä ollaan siirtymässä langattomiin järjestelmiin, minkä vuoksi mobiililaitteiden kuuluvuus rakennusten sisällä on varmistettava. Tätä varten on tarvetta erilaisten antenniratkaisujen kehittämiseksi energiatehokkaisiin rakennuksiin. Samalla myös lämpöhäviöiden minimointiin on kiinnitettävä huomiota ja tutkittava seinärakenteiden lämmönjohtavuutta.

1.1 Työn tausta

Tämän diplomityön taustalla on kaksi Aalto-yliopiston laboratoriossa tehtyä tuoretta tutkimusta. Niistä ensimmäisessä tutkittiin passiivisen antennijärjestelmän hyödyntämistä energiatehokkaan rakennuksen monikerroksisessa seinässä. Tutkimusta varten laboratorioon oli myös rakennettu kolmikerroksinen koekappale mallintamaan energiatehokasta seinää. Toisessa tutkimuksessa hyödynnettiin kyseistä seinäkappaletta. Siinä tarkoilla mittalaitteilla tutkittiin kyseisen seinän lämmönjohtavuutta.

Lämmönjohtavuuden tarkka mittaaminen on haastavaa muun muassa koekappaleen rajallisen koon ja ympäristön tutkimukseen aiheuttamien lämpötilavaikutusten vuoksi.

Näistä syistä johtuen on selvää, että laboratoriotutkimusten tuloksissa on ollut jonkin verran mittausvirhettä. Jatkotutkimuksena olisi hyvä kehittää malli, jolla mittausvirheitä voidaan tutkia.

1.2 Työn tavoite

Diplomityön tarkoituksena oli ensin luoda laboratoriotutkimuksissa rakennettua monikerroksista seinää vastaava malli Matlab-ohjelmalla. Matlabilla voidaan tutkia esimerkiksi monenlaisten kappaleiden käyttäytymistä erilaisten simulaatioiden avulla. Toisessa vaiheessa mallilla oli tarkoitus tutkia seinän lämmönjohtavuutta simulaatioiden avulla.

Simulaatioiden tuloksena saadaan selville seinärakenteen teoreettinen lämmönjohtavuus. Työn tavoitteena oli hyödyntää näitä tuloksia ja tehdä lämmönjohtavuusanalyysi kyseisestä seinästä ja selvittää millainen mittausvirhe aikaisemmissa laboratoriotutkimuksissa oli syntynyt.

1.3 Työn rakenne ja rajaus

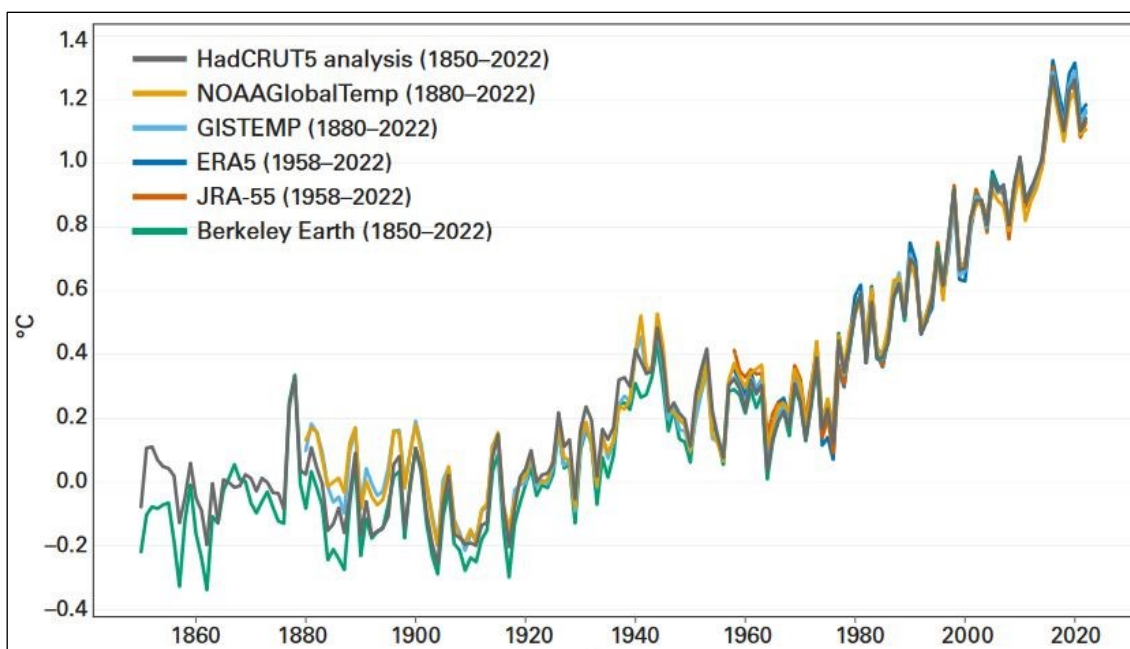
Työ koostuu seitsemästä luvusta. Johdannon jälkeen käsitellään toisessa luvussa matalaenergiatalojen energiatehokkaita seiniä ja 5G-verkon kuuluvuutta. Kolmannessa luvussa kerrotaan lämmönsiirron teoriaa sekä kuvataan tämän työn lähtökohtana olleet laboratoriotutkimukset tarvittavalla tasolla. Neljäs luku sisältää kuvauksen työssä luodusta Matlab-mallista, sillä suoritetuista simulaatioista sekä niistä saadut tulokset. Viidennessä kappaleessa analysoidaan simuloitua lämmönjohtumista. Kuudes ja seitsemäs kappale sisältävät työstä tehdyt johtopäätökset sekä yhteenvedon.

Tämä diplomityö on rajattu käsittelemään vain aikaisemmissa tutkimuksissa rakennettuun monikerroksiseen seinärakenteeseen liittyvää lämmön johtumista. Niissä

mukana olleen passiivisen antennin vaikutus lämmönsiirtymiseen oli todettu olevan niin pieni, että sitä ei tässä työssä käsitellä.

2 Matalaenergiatalot ja 5G-signaalin kantavuus

Viimeksi kuluneet lähes kymmenen vuotta ovat olleet maapallon lämpimimmät koko sen mittaushistoriassa (World Meteorological Organization, 2022). Kuvasta 1 on selvästi havaittavissa, kuinka keskilämpötila on noussut viime vuosikymmeninä. Maapallon lämpenemisestä johtuvan ilmastonmuutoksen vuoksi energian kulutukseen kiinnitetään nykyään erittäin paljon huomiota. Fossiilisen energian käytöstä pyritään siirtymään uusiutuvan energian hyödyntämiseen ja käytettävän energian määrää pyritään optimoimaan muun muassa kehittämällä vähemmän energiaa kuluttavia ratkaisuja.



Kuva 1. Maapallon keskilämpötila verrattuna vuosien 1850 - 1900 keskiarvoon (WMO, 2023, s.3).

Tilastokeskuksen mukaan rakennusten lämmitykseen käytettiin vuonna 2020 Suomessa energiaa 322 824 TJ, joka oli noin 25 % kaikesta maassa käytetystä energiasta, kuten taulukosta 1 näkee. Tekemällä rakennuksista aikaisempaa energiatehokkaampia, niiden lämmitystarvetta saadaan vähennettyä ja sillä on osaltaan merkittävä vaikutus koko maan energiankulutukseen.

Taulukko 1. Energian kokonaiskulutus Suomessa (Tilastokeskus, 2021).

1.7.1 Energian kokonaiskulutus sektoreittain (TJ)						
1.7.1 Totalförbrukning av energi efter sektor (TJ)						
1.7.1 Total energy consumption by sector (TJ)						
	Teollisuus ¹⁾	Liikenne	Rakennusten lämmitys	Muut	Yhteensä	Ulkomaan liikenne
	Industri ¹⁾	Samfärdsel	Uppvärmning av byggnader	Övriga	Totalt	Utrikestrafik
	Industry ¹⁾	Transport	Space heating	Others	Total	Bunkers in international transport
2015	607 750	189 467	327 065	186 993	1 311 275	39 154
2016	620 641	194 996	356 854	187 670	1 360 162	38 819
2017	620 665	195 630	353 187	181 322	1 350 804	43 376
2018	640 148	196 334	355 410	187 665	1 379 558	46 200
2019	627 903	195 208	349 946	186 701	1 359 757	49 199
2020	590 193	181 559	322 824	182 005	1 276 581	24 768
Osuus - Andel - Share (%)						
2019	46 %	14 %	26 %	14 %	100 %	
2020	46 %	14 %	25 %	14 %	100 %	

2.1 Seinien energiatehokkuus

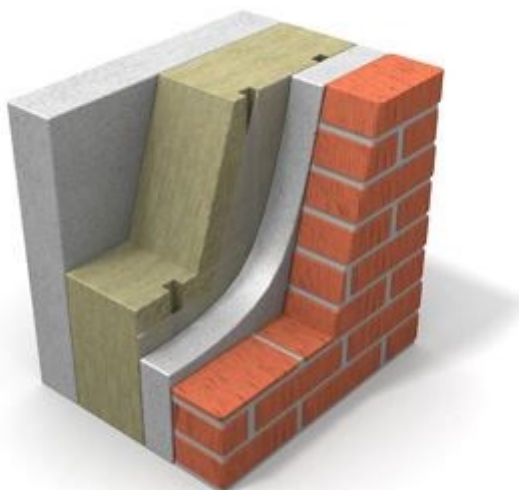
Vaatimukset rakennusten energiatehokkuudesta ovat ajan kuluessa tiukentuneet. Esimerkiksi suurin sallittu ulkoseinien lämmönläpäisykerroin, eli U-arvo on tähän mennessä lähes puolittunut verrattuna vuoteen 2000 (Motiva, 2018, s. 6-7). Tällä halutaan pienentää rakennusten lämpöhukkaa ja sitä kautta vähentää niiden lämmitystarvetta.

Kun suunnitellaan matala-, passiivi-, nolla- tai plusenergiataloja, on mietittävä sekä seinän rakennetta että siinä käytettäviä rakennusmateriaaleja. Kun lämmöneristeiden määrää lisätään, samalla seinärakenteiden paksuutta joudutaan luonnollisesti kasvattamaan. Lämmöneristeiden lisäksi on myös huomioitava seinän kantavuuden tarve.

2.2 Sandwich-elementti

Yleisesti käytössä oleva julkisivujen seinärakenne on sandwich-rakenne, jossa kahden betonikuoren väliin on asennettu eristekerros. Lisäksi ulomman betonikerroksen päällä voi olla vielä julkisivupinnoite, kuten kuvasta 2 näkee. Rakennustyömaiden

kosteusolosuhteet ovat usein haastavia rakennustarvikkeille. Sandwich-elementit rakennetaan tehtaalla kuivissa sisätiloissa, josta ne kuljetetaan valmiina seinälevyinä rakennustyömaalle. Elementtirakenteisen talon pystyttäminen on nopeaa, minkä jälkeen lopullinen rakennuksen kuivuminen pääsee alkamaan.

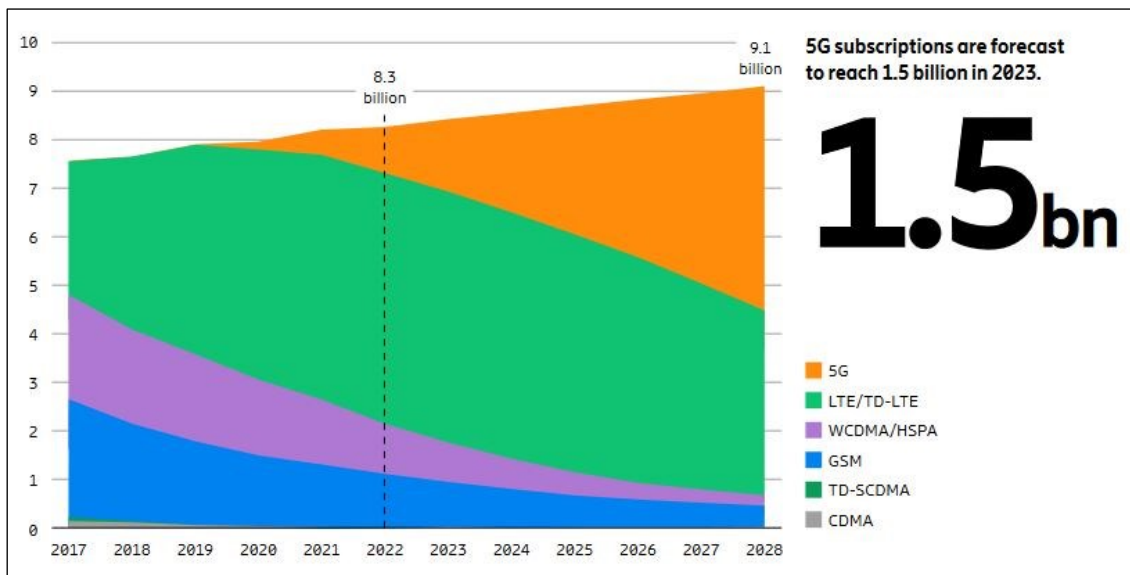


Kuva 2. Betonisandwich-elementin rakenne (Paroc Group, 2023).

2.3 5G-puhelimien yleistyminen

Älypuhelimista on tullut tärkeä tekijä ihmisten päivittäiseen elämään. Niiden rooli on erittäin merkittävä sosiaalisessa kanssakäymisessä. Myös suuri osa käytännön asioiden hoitamisesta tapahtuu nykyään internetin kautta. Monissa tapauksissa langaton verkko on nykyään riittävän nopea kotien ja yritysten tarpeisiin ja langattomien laitteiden käyttö on yleistynyt tiedonsiirtonopeuksien kasvaessa. Vaikka kiinteä internetyhteys on edelleen langatonta verkkoa vakaampi ja nopeampi, se ei enää ole välttämätön. Sen vuoksi se ei myöskään ole itsestäänselvyys. Vuonna 2022 5G-liittymien määrä maailmassa ylitti miljardin tilaajan rajan ja LM Ericssonin arvion mukaan vuoden 2023 loppuun mennessä tilaajia on yli 1,5 miljardia. 5G-käyttäjien määrän kasvun ennustetaan

olevan lähivuosina erittäin voimakasta ja jo viiden vuoden kuluttua se olisi yleisin puhelinsukupolvi, kuten kuvasta 3 näkee.



Kuva 3. Mobiilitilaajien määrä puhelinteknologioittain (Telefonaktiebolaget L M Ericsson, 2023).

2.4 5G-signaalin ominaisuudet

Puhelinverkkovalmistaja Nokian (2023) mukaan langattoman puhelinteknologian viidennen sukupolven teoreettinen tiedonsiirtonopeus on 10 gigabittiä sekunnissa. Suuren tiedonsiirtonopeuden sekä lyhyen vasteajan ansiosta muun muassa elokuvien ja videoiden lataaminen, nettipelien reaaliaikainen pelaaminen sekä etäohjattavien laitteiden käyttö on mahdollista aiempia puhelinverkkosukupolvia huomattavasti paremmin. Nopean yhteyden ansiosta se sopii hyvin myös kotien ja monien toimistojen ainoaksi internetyhteydeksi.

5G-puhelinverkkoa käytetään kolmella eri taajuusalueella riippuen verkon käyttötarpeesta. Nokia (2023) kuvailee, että matalakaistataajuudet 450 MHz:n ja 1 GHz:n välillä sopivat hyvän kantavuuden vuoksi sekä kaupunki- että maaseutualueille. Toisaalta tiedonsiirtonopeus matalakaistataajuuksilla ei ole kovin suuri. Keskikaistataajuuksilla 1GHz:n ja 6 GHz:n välillä tiedonsiirtonopeus on matalakaistataajuuksia suurempi, mutta

puolestaan puhelinsignaalin kantavuus on alempia taajuusalueita heikompi. Suurimpaan tiedonsiirtonopeuteen ja 5G:n teoreettiseen maksiminopeuteen päästään yli 24 GHz:n korkeakaistataajuuksilla, mutta verkon kantavuus on alhainen. Korkeakaistataajuudet ovat myös huonoja läpäisemään seiniä ja muita esteitä kovin tehokkaasti. Suomessa käytetään 5G-taajuuksia 25,1 GHz:n ja 27,5 GHz:n välillä riippuen puhelinoperaattorista (Traficom, 2023).

Edellä mainittiin, että parhaimpiin tiedonsiirtonopeuksiin päästään korkeilla taajuuksilla. Korkeataajuuksisen radiosignaalin aallonpituus on lyhyt, minkä vuoksi se absorboituu tehokkaasti kohdatessaan kiinteän kohteen. Nykyisissä energiatehokkaissa rakennuksissa tämän voi havaita 5G-signaalin heikkona kuuluvuutena rakennuksen sisällä.

3 Lämmönsiirron teoriaa ja tutkimuksen perustiedot

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaan lämmön siirtyminen tapahtuu spontaaneissa prosesseissa aina lämpimämmästä kylmempään. Jotta lämpöä voi siirtyä, on oltava lämpötilaero. Lämpö voi siirtyä kolmella eri tavalla: johtumalla, konvektiolla tai säteilemällä.

Sitä lämpömäärää, joka tietyssä ajassa kulkee tietyn pinta-alan A läpi, kuvataan lämpövirralla q_x . Kun lasketaan lämpövirta johtumalla, saadaan se kertomalla lämpövirran tiheys q_x'' pinta-alalla A .

$$q_x = q_x'' \cdot A \quad (1)$$

Lämpövirran yksikkö on $[q_x] = \frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}$.

3.1 Johtuminen

Lämmön siirtyminen kiinteään aineen tai levossa olevan fluidin läpi tapahtuu johtumalla. Lämmön siirtyminen johtumalla on seurausta aineen sisältämien atomien ja molekyylien välisestä liikkeestä. Tällöin partikkelit, joilla on enemmän energiaa luovuttavat sitä vähemmän energiaa omaaville partikkeleille.

Lämmön johtuminen voidaan laskea nopeusyhtälöillä, eli laskemalla jonkun suureen muutos tietyssä ajassa. Yksiulotteisessa johtumisessa, kyseinen nopeusyhtälö on Fourierin laki

$$q_x'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

jossa q_x'' on lämpövirran tiheys, q_x on lämpövirta, A on pinta-ala, k on lämmönjohtavuus ja $\frac{dT}{dx}$ on lämpötilagradientti, eli lämpötilaero siirtymissuuntaan. Lämpövirran tiheyden

yksikkö on $[q_x] = \frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2}$ ja lämmönjohtavuuden yksikkö on $[k] = \frac{W}{m \cdot K}$. Huomattavaa on, että mikäli aineen lämmönjohtavuus suurenee, niin silloin myös lämpövirta kasvaa, jos lämpötilagradientti $\frac{dT}{dx}$ ei muutu.

Kiinteissä aineissa kuten esimerkiksi betonissa, lämmönjohtavuus on huomattavasti suurempi kuin kaasuissa. Rakennuksissa lämpöeristeenä käytetään materiaaleja, jotka johtavat huonosti lämpöä. Yleisesti lämmöneristeenä käytetty vuorivilla sisältää paljon ilmaa, minkä vuoksi sen lämmönjohtavuuskin on heikko.

Eristeissä lämpö voi siirtyä johtumisen lisäksi myös muilla tavoilla, sillä eristeet koostuvat yleensä useasta eri aineesta. Eristeessä olevan kiinteän aineen läpi lämpö siirtyy johtamalla. Eristeen ilmatilojen läpi lämpö siirtyy johtamalla tai konvektiolla. Lisäksi lämpöä siirtyy eristeessä myös säteilemällä siinä olevan kiinteän aineen pintojen välillä.

3.2 Konvektio

Konvektiossa, josta käytetään myös nimitystä kuljettuminen, lämpöä siirtyy kiinteän pinnan ja liikkuvan fluidin välillä tilanteessa, jossa niiden välillä vallitsee lämpötilaero. Konvektioon liittyvissä laskuissa käytetään konvektiivista lämmönsiirron kerrointa h , jonka yksikkö on $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. Kertoimen arvo riippuu rajapinnan olosuhteista ja pinnanmuodosta sekä fluidin liikkeestä ja ominaisuuksista.

Konvektiota voi tapahtua neljällä eri tavalla. Esimerkki pakotetusta konvektiosta on lämmön siirtyminen ulkoisella tavalla aiheuttamalla, kuten lämmön siirtyminen tietokoneprosessorin jäähdytys-elementistä jäähdytyspuhaltimen puhaltamaan ilmaan. Vapaa tai luonnollinen konvektio tapahtuu tilanteessa, jossa nostevoimat aiheuttavat virtauksen. Esimerkiksi ilman lämpötilaeron vuoksi ilma nousee ylös ja lämpö siirtyy siihen pystyssä olevasta jäähdytys-elementistä. Kiehuminen on myös esimerkki konvektiosta. Siinä kuumen levyn päällä olevassa kattilassa muodostuu kuplia nesteen

pohjassa ja ne aiheuttavat liikkeen. Neljäs tapa, jossa tapahtuu konvektio, on kondensaatio. Kun esimerkiksi jäähdytysputken sisällä on kylmää jäähdytysnestettä, putken pintaan tiivistyy vettä ilmasta ja pisarat tippuvat maahan aiheuttaen ilman liikkeen putken pinnan lähellä.

Konvektiossa lämpövirran tiheys voidaan laskea Newtonin jäähtymislailalla

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (3)$$

jossa q'' on lämpövirran tiheys, h on konvektiivisen lämmönsiirron kerroin, T_s on pinnan lämpötila ja T_∞ on ympäristön lämpötila. Lämpövirran tiheyden yksikkö on, kuten edellä mainittiin, $[q_x''] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, konvektiivisen lämmönsiirron kertoimen yksikkö on $[h] = \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ ja lämpötilojen T_s ja T_∞ yksikkö on K tai °C. Konvektion selvittäminen on usein konvektiivisen lämmönsiirron kertoimen h selvittämistä.

3.3 Säteily

Lämmön siirtymiseen ei välttämättä tarvita väliainetta. Kolmas lämmön siirtymistapa on säteily. Siinä lämpö siirtyy pintojen välillä elektromagneettisina aaltoina. Aineen pinnan lämpötilan on poikettava absoluuttisesta nollapisteestä, jotta lämpösäteilyä tapahtuu.

Yleisesti tunnettu esimerkki lämpösäteilystä on auringosta maahan saapuva lämpö. Auringosta säteilemällä saapuva lämpö siirtyy maahan hyvin, sillä lämmönsiirto säteilemällä tapahtuu tehokkaimmin tyhjiössä. Kaikki pinnat säteilevät lämpöä. Säteilyä voi tapahtua kiinteiltä pinnoilta, nesteistä ja kaasuista.

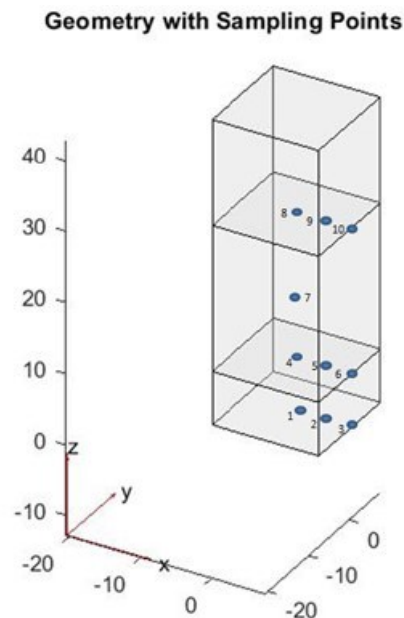
3.4 Lämpövirran tiheys

Lämpövirran tiheys q'' kuvaa lämpövirran nopeuden suhdetta siihen pinta-alaan, jonka läpi lämpö siirtyy. Lämpövirran tiheydestä käytetään myös nimitystä lämpövu

(englanniksi flux). Lämpövirran tiheys voidaan laskea riippumatta siitä, tapahtuuko lämmönsiirto johtumalla, konvektiolla vai säteilemällä. Eri lämmönsiirron tilanteet vain ratkaistaan erilaisilla yhtälöillä, kuten aiemmissa kappaleissa johtumisen ja konvektion osalta esitettiin.

3.5 Lämmönjohtavuuden mittaus laboratoriossa

Matalaenergiatalon seinän lämmönjohtavuutta on mitattu laboratoriossa. Haneda ja muut (2023a; 2023b) olivat toteuttaneet tutkimuksen, jonka tuloksissa on tutkimusolosuhteista ja muista käytännön syistä virhettä. Tämän diplomityön lähtökohdaksi otettiin tämä heidän Aalto-yliopiston laboratoriossa tekemänsä tutkimus, jossa oli rakennettu betonisandwich-elementtiä vastaava koekappale ja josta oli tutkittu lämmönsiirtymistä ajan funktiona. Siinä lämmön siirtymistä tutkittiin mittaamalla lämpötilan muutoksia kuvan 4 mukaisiin pisteisiin sijoitetuilla antureilla tilanteessa, jossa kappaleen alapinta oli kylmä ja yläpinta oli lämmin.



Kuva 4. Laboratoriotutkimuksen mittauspisteet (Haneda ja muut, 2023b, s.9).

4 Tutkimukset ja simulaatiot

4.1 Tutkimusmenetelmän valinta

Lämmönjohtumisen tutkimiseen voi käyttää monia eri tietokoneohjelmistoja. Tämä tutkimus päätettiin tehdä Matlab-ohjelmalla. Tarkoituksena oli ensin luoda Matlab-malli, kuin millaisen Hanedan ja muut olivat aitoon ympäristöön omassa tutkimuksessaan rakentaneet (2023b, s. 3) ja sen jälkeen tutkia mallin käyttäytymistä tekemällä erilaisia simulaatioita Matlabilla. Matlab on erittäin monikäyttöinen lisensoitu tietokoneohjelmisto, jota käytetään laajalti numeeriseen laskentaan. Myös kyseisessä ohjelmistossa käytettävä ohjelmointikieli on nimeltään Matlab minkä vuoksi termit voivat helposti mennä sekaisin, mikäli ei tunneta asiayhteyttä.

Matlab valikoitui simulointityökaluksi, sillä sen ajateltiin olevan sopiva tämän tutkimuksen tekemiseen ja sen käytön opetteleminen vaikutti järkevältä. Matlab on maailmanlaajuisesti hyvin tunnettu ohjelma, siitä on saatavissa paljon hyödyllistä tietoa ja sen käyttöön löytyy ohjeita ja ohjevideoita sekä suomeksi että englanniksi. Koska käyttäjäkunta on hyvin laaja, niin käytössä ilmenneisiin ongelmiin löytyy myös runsaasti käyttäjien esittämiä kysymyksiä ja niihin on löydettävissä valmiita vastauksia. Matlab-lisenssi on ilmainen opiskelu- ja tutkimuskäyttöön. Ohjelma oli siten helposti saatavissa tähän tutkimukseen, sillä se on valmiiksi olemassa Vaasan Yliopistolla, kuten monella muullakin korkeakoululla ja oppilaitoksella.

4.2 Osittaisdifferentiaaliyhtälön laskeminen

Lämmönjohtumisen laskennassa ratkaistaan osittaisdifferentiaaliyhtälöitä. Matlabiin on asennettavissa erilaisia laajennuksia, kuten esimerkiksi osittaisdifferentiaaliyhtälöiden laskemiseen tarkoitettu työkalu, "Partial Differential Equation" -mallintaja. Se on Matlabiin sisältyvä sovellus, jolla voidaan laskea ja ratkaista graafisesti monimutkaisiakin

ongelmia kaksiulotteisesti. Tämän tutkimuksen ongelmanratkaisua varten, Matlabin asennuksen yhteydessä, tietokoneelle asennettiin myös PDE-mallintaja.

PDE-mallintajan avulla voidaan esimerkiksi lämmön siirtyminen kappaleen läpi mallintaa hyvinkin tarkasti. PDE-mallintaja sisältää myös valmiita tiloja tekniikan eri osa-alueille, muun muassa lämmönsiirtoon liittyviä ongelmia varten.

Lämmönjohtumisen simulaatiot suoritettiin PDE-mallintajalla vaiheittain:

1. Kappaleesta luotiin kaksiulotteinen kuva
2. Määriteltiin kappaleen rajapintojen ominaisuudet
3. Määriteltiin kappaleen sisäiset ominaisuudet
4. Määriteltiin tarkasteltavat kappaleen pisteet verkkokuvan avulla
5. Simuloitiin lämmönjohtuminen

Simulaation, eli PDE-mallintajalla tehdyn ongelmanratkaisun jälkeen, saadut tulokset siirrettiin tarkempaa tutkimista varten Matlabiin.

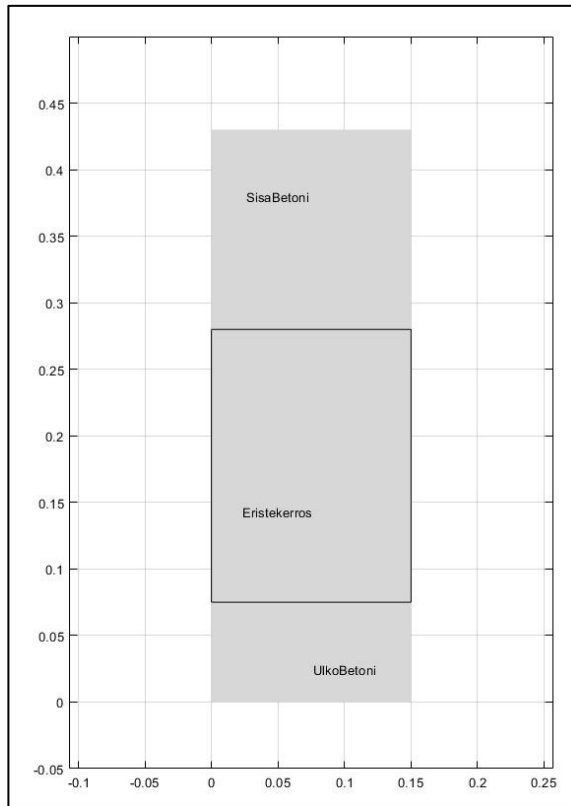
4.3 Referenssimallin luominen

Matlabilla tutkittavan kappaleen oli tarkoitus vastata todellista kappaletta, jota Haneda ja muut (2023b, s. 3) olivat tutkimuksessaan käyttäneet. Matlabilla lämmönjohtumista voidaan tutkia simuloimalla kappaleen kaksiulotteista poikkileikkausta.

4.3.1 Kaksiulotteinen kuva kappaleesta

Simuloitavan kappaleen luominen aloitettiin piirtämällä siitä kaksiulotteinen poikkileikkaus PDE-mallintajan työpöydälle. Koska kyseessä on sandwich-seinärakenne, joka koostuu kahdesta betonikerroksesta sekä niiden väliin jäävästä vuorivillakerroksesta, työpöydälle piirrettiin kolme toisissaan kiinni olevaa suorakaiteen muotoista kerrosta kuvan 5 mukaisesti.

Aito kappale on 15 cm leveä ja 44 cm korkea. Kuvitteellista ulkoilmaa vasten oleva betonikerros, on kuvassa 5 nimetty 'UlkoBetoni'. Betonikerros on 7 cm paksu, joka hyvin vastaa tyyppillisen sandwich-seinän ulompaa betonikerrosta (Atienza ja muut, 2021, s.1). Kuvitteellista sisäilmaa vasten oleva 'SisaBetoni'-niminen betonikerros on paksuudeltaan 15 cm ja betonikerrosten välissä oleva mineraalivillasta koostuva 'Eristekerros' on 20,5 cm paksu.



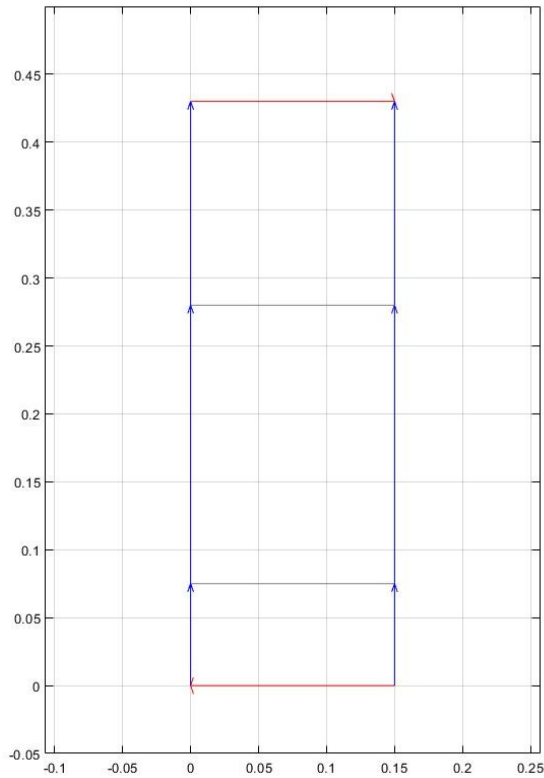
Kuva 5. Simuloitavan seinärakenteen mitat ja kerrokset.

4.3.2 Kappaleen rajapinnat

Ongelman ratkaisua varten kappaleen rajapinnoille oli määriteltävä niiden reunaehdot. Dirichlet'n reunaehdossa, jota kutsutaan myös ensimmäisen tavan reunaehdoksi, määritellään kappaleen pintaa koskeva vakiona pysyvä lämpötila. Tätä reunaehtoä käytettiin tutkimuksessa betonikerrosten ulkopinnoille, eli kuvan 6 ylä- ja alareunoille.

Ulkoilmaa vasten olevan pinnan lämpötilaksi asetettiin $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lämmintä ilmaa vasten olevan pinnan lämpötilaksi asetettiin $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Näitä arvoja käytettiin koko tutkimuksen ajan.

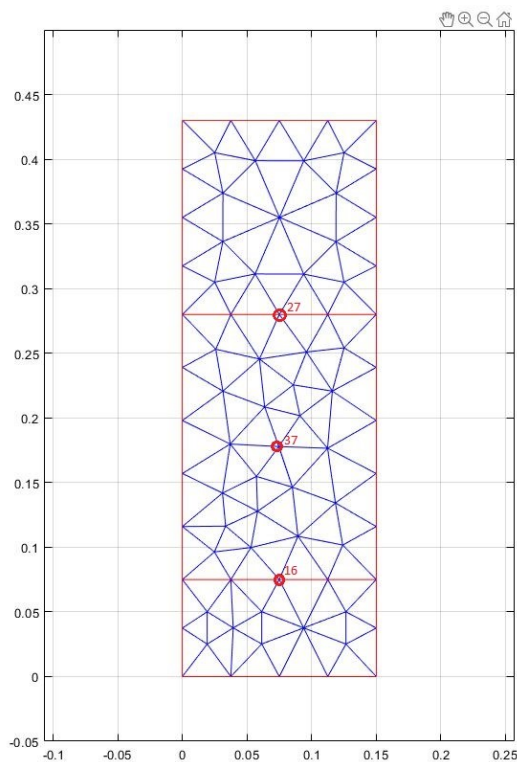
Neumannin reunaehdossa, jota kutsutaan myös toisen tavan reunaehdoksi, määritellään kappaleen pintaa koskeva vakiona pysyvä lämpövirran tiheys. Tätä reunaehtoä käytettiin tutkimuksessa kaikkien kerrosten sivuille, eli kuvan 6 oikealle ja vasemmalle kyljelle. Tutkimuksessa asetettiin erilaisia lämpövirran tiheyden arvoja riippuen siitä, mitä tilannetta kulloinkin simuloitiin.



Kuva 6. Kappaleen rajapinnat.

4.3.3 Laskentaverkko

Jotta tutkimuksen kohteena olevasta kappaleesta voitiin tarkastella muutoksia tietyssä pisteessä, kappaleesta oli ennen laskennan suorittamista luotava verkkokuva. Kyseinen kuva kappaleen pinnasta saatiin muodostettua PDE-mallintajalla. Kuten kuvasta 7 nähdään, muodostettu verkko koostuu kolmion muotoisista alueista ja tarkasteltavaksi pisteeksi voitiin valita mikä tahansa verkossa oleva kolmion nurkka, eli usean alueen risteyskohta.



Kuva 7. Laskentaverkko sekä tarkasteltavat pisteet.

Tarkasteltavia pisteitä voidaan lisätä pienentämällä verkon silmäkokoja. Tällöin verkkoon syntyy aiempaa enemmän kyseisiä kolmion muotoisia alueita, jolloin niiden risteyskohtiakin on enemmän. Tällä tavoin pystytään tarkentamaan sitä pisteen sijaintia, jota halutaan tarkastella.

Tutkimuksen kannalta kiinnostavia kohtia olivat eriste- ja betonikerrosten rajakohdat. Tarkasteltaviksi pisteiksi valittiin sivusuunnassa katsottuna kappaleen keskilinjalla olevat pisteet. Kuvan 7 mukaisesti kylmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalla on alin tarkasteltava piste, numero 16. Lämpimän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalla on ylin tarkasteltava piste, numero 27. Eristekerroksen keskellä oleva pisteen numero on 37.

4.3.4 Kappaleen materiaaliominaisuudet

Simuloitavilla kappaleilla ja materiaaleilla on myös muutama muu ominaisuus, jotka on määriteltävä ennen simulointia. Näihin liittyen, tutkimuksessa tehdyille mallille käytettiin lähtötilanteessa taulukko 2:n mukaisia arvoja, jotka perustuvat Hanedan ja muiden (2023b) tutkimuksen tekijöiltä saatuihin tietoihin.

Taulukko 2. Simuloitavan kappaleen ominaisuuksia.

Suure	UlkoBetoni	Eristekerros	SisaBetoni
leveys (cm)	15,00	15,00	15,00
korkeus (cm)	7,50	20,50	15,00
tiheys (kg/m ³)	2200	60	2200
ominaislämpökapasiteetti (kJ/K·kg)	0,75	0,8	0,75
lämmönjohtavuus (W/m·K)	2,7	0,05	2,7

4.4 Simulaatiot

Matlabilla oli luotu simulointeja varten malli, joka kuvasi laboratoriossa valmistettua sandwich-seinäkappaletta. Matlab-malli oli samankokoinen ja sen kolme kerrosta vastasi aidon mallin kerroksia. Laboratoriossa tehdyn tutkimuksen todellista betonin lämmönjohtavuutta sekä lämpövirran tiheyttä ei tiedetty, minkä vuoksi näitä oli haettava simulointien avulla.

Sekä lämpimämmän puolen betonikerroksen että eristekerroksen sivusuunnassa liikkuvan lämpövirran oletettiin olevan kohtalaisen merkityksetön, joten tutkimuksessa keskityttiin kylmää pintaa vasten olevan betonikerroksen ominaisuuksiin. Simulaatioissa lämpimämmän betonikerroksen sivut on ajateltu adiabaattisiksi, eli niiden läpi ei annettu virrata lämpöä ja niille asetettiin lämpövirran tiheydeksi 0. Eristekerrokselle oli kuitenkin haettava sopiva lämpövirran tiheys simulointien avulla.

4.4.1 Referenssimittauksen simulointi

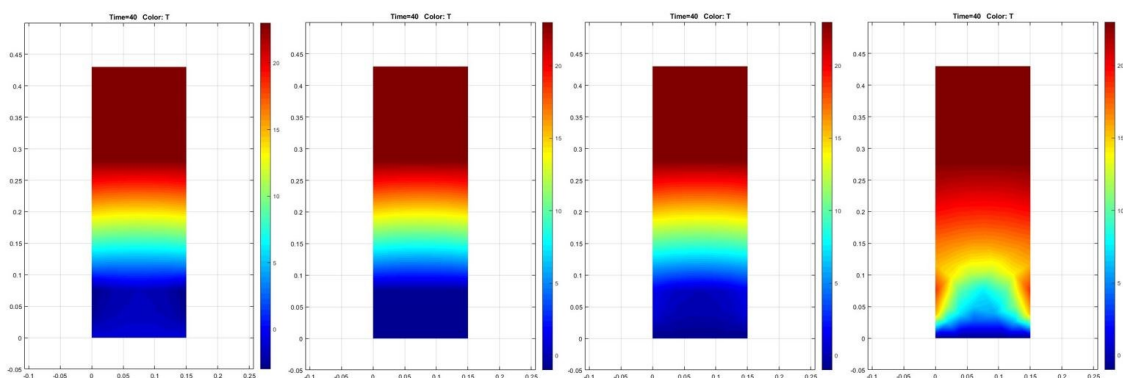
Betonin lämmönjohtavuudelle on eri lähteistä löydettävissä erilaisia arvoja. Tämä on selitettävissä sillä, että betonissa käytettävissä materiaaleissa on vaihtelua ja että betonin valmistuksen jälkeinen kosteus ovat eri kappaleissa erilaisia. Laboratoriomittauksissa käytetyn betonin lämmönjohtavuudelle annettiin tässä simuloinnissa arvoksi $k = 2,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Lämpövirran tiheyden arvoa lähdettiin hakemaan väliltä $-100 \dots +100 \text{ W/m}^2$. Tarkoituksena oli löytää samanlainen lämpötilajakauma, kuin mikä oli ollut laboratoriomittauksissa. Siinä kylmemmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalla (piste 16) lämpötila oli $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$, lämpimämmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalla (piste 27) lämpötila oli $22,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ja keskellä eristekerrosta lämpötila oli $17,92 \text{ }^\circ\text{C}$ (piste 37).

Aluksi kylmemmän betonikerroksen sivuille annettiin lämpövirran tiheydeksi arvot -100 W/m^2 . Simulointi näytti, että lämpöjakauma kappaleen keskilinjalla ja sen reunoilla oli hyvin samankaltainen. Lämpövirran tiheyttä muutettiin vähän kerrallaan ja simulointeja toistettiin, jotta kappaleen lämpökäyttäytymisestä muodostuisi käsitys.

Kun kylmemmän betonikerroksen sivuille annettiin lämpövirran tiheydeksi arvot 0 W/m^2 , saatiin lämpötila kahden alimman kerroksen välillä nousemaan hieman. Tämä johtuu lämpimän pinnan suunnasta tulevan lämmönsiirron vaikutuksesta. Tämä simulointi vastasi tilannetta, jossa lämpövirta liikkuu vain yksiuotteisesti lämpimästä kylmään. Kun

lämpövirran tiheyden arvoksi annettiin positiivisia lukuja, saatiin mittauspisteiden lämpötiloja nousemaan. Lämpövirran tiheyden ollessa 100 W/m^2 huomattiin olevan edelleen hyvin kaukana tavoitelämpötiloista, kuten kuva 8 osoittaa.



Kuva 8. Lämpötilajakaumat lämpövirran tiheyksillä -100 , 0 , 100 ja 900 W/m^2 .

Lopulta lukuisten simulointien jälkeen löydettiin yrityksen ja erehdyksen menetelmällä riittävän tarkat lämpötilat, jotka vastasivat laboratoriomittauksia. Tämä löytyi, kun betonin rajapinnoille annettiin lämpövirran tiheydeksi 900 W/m^2 ja eristekerroksen rajapinnoille annettiin arvo $0,65 \text{ W/m}^2$. Lämpimämmän betonikerroksen ja eristekerroksen välissä lämpötila on hieman laboratoriomittausta korkeampi, mutta tarkkuus oli riittävä, sillä tutkimuksessa kiinnostus oli enemmän eristekerroksen ja kylmemmän betonikerroksen alueella. Taulukossa 3 on esitetty muutamia simuloinneista saatuja lämpötiloja, joiden avulla oikeaa lämpöjakaumaa haettiin.

Taulukko 3. Simuloituja pisteiden 16, 27 ja 37 lämpötiloja

Lämpövirran tiheys	piste 16	piste 37	piste 27
laboratoriossa	$7,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$17,92 \text{ }^\circ\text{C}$	$22,0 \text{ }^\circ\text{C}$
-100 W/m^2	$-1,74 \text{ }^\circ\text{C}$	$11,04 \text{ }^\circ\text{C}$	$22,71 \text{ }^\circ\text{C}$
0 W/m^2	$-0,82 \text{ }^\circ\text{C}$	$11,72 \text{ }^\circ\text{C}$	$22,73 \text{ }^\circ\text{C}$
100 W/m^2	$0,11 \text{ }^\circ\text{C}$	$12,41 \text{ }^\circ\text{C}$	$22,75 \text{ }^\circ\text{C}$
900 W/m^2	$7,50 \text{ }^\circ\text{C}$	$17,93 \text{ }^\circ\text{C}$	$22,89 \text{ }^\circ\text{C}$

4.4.2 Virhealueen etsiminen

Edellä löydettiin sandwich-seinälle laboratoriomittauksia vastaava lämpötilajakauma, kun simuloinnissa käytettiin betonin lämmönjohtavuudelle arvoa $k = 2,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ja betonin rajapinnoille lämpövirran tiheyttä 900 W/m^2 . Seuraavat simuloinnit keskittyivät näiden viitearvojen läheisyyteen, sillä olimme kiinnostuneita ensisijaisesti tutkittavasta lämmönjohtavuuden virhealueesta.

Tutkittava alue rajattiin 10 - 20 %:n alueelle edellisistä viitearvoista ja simuloiteja jatkettiin selvittämällä betonin lämmönjohtavuutta muutamalla lämpövirran tiheyttä 10 W/m^2 välein. Aluksi simulointi tehtiin lämpövirran tiheydellä 800 W/m^2 ja suurin käytetty lämpövirran tiheys oli 1000 W/m^2 . Simuloiteja toistettiin useita kertoja siten, että lämmönjohtavuuden arvoa muutettiin hieman. Näin lopulta kussakin simulaatiossa saavutettiin kylmemmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalle, eli pisteeseen 16 vakiona pidetty $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötila.

Simulointien avulla saatiin selvitettyä lämpövirran tiheyden muutoksen vaikutus lämmönjohtavuuden muutokseen, kun lämpötila pidettiin vakiona. Kustakin simulaatiosta huomiottiin kyseisten tulosten ero verrattuna lähtötilanteen viitearvoihin. Simuloinnin tulokset esitetään kappaleessa 5.

4.4.3 Paksun seinärakenteen simulointi

Kiinnostavaa on myös tutkia lämmönjohtumista erikokoisessa seinärakenteessa. Seuraava simulaatio tehtiin huomattavasti alkuperäistä kappaletta suuremmalle mallille. Simuloitava tilanne on teoreettinen, sillä tässä kappaletta suurennettiin noin kymmenkertaiseksi alkuperäiseen verrattuna. Myös kappaleen muita ominaisuuksia muutettiin hieman. Taulukossa 4 on esitetty tässä simulaatiossa käytetyt kappaleen

mitat ja muut tärkeät ominaisuudet, jotka perustuvat Hanedan ja muiden (2023b) tutkimuksen tekijöiltä saatuihin tietoihin.

Taulukko 4. Paksun seinärakenteen ominaisuuksia.

Suure	UlkoBetoni	Eristekerros	SisaBetoni
leveys (cm)	100,00	100,00	100,00
korkeus (cm)	70,00	220,00	150,00
tiheys (kg/m ³)	2650	200	2650
ominaislämpökapasiteetti (kJ/K·kg)	1,1	0,8	1,1
lämmönjohtavuus (W/m·K)	2,7	0,05	2,7

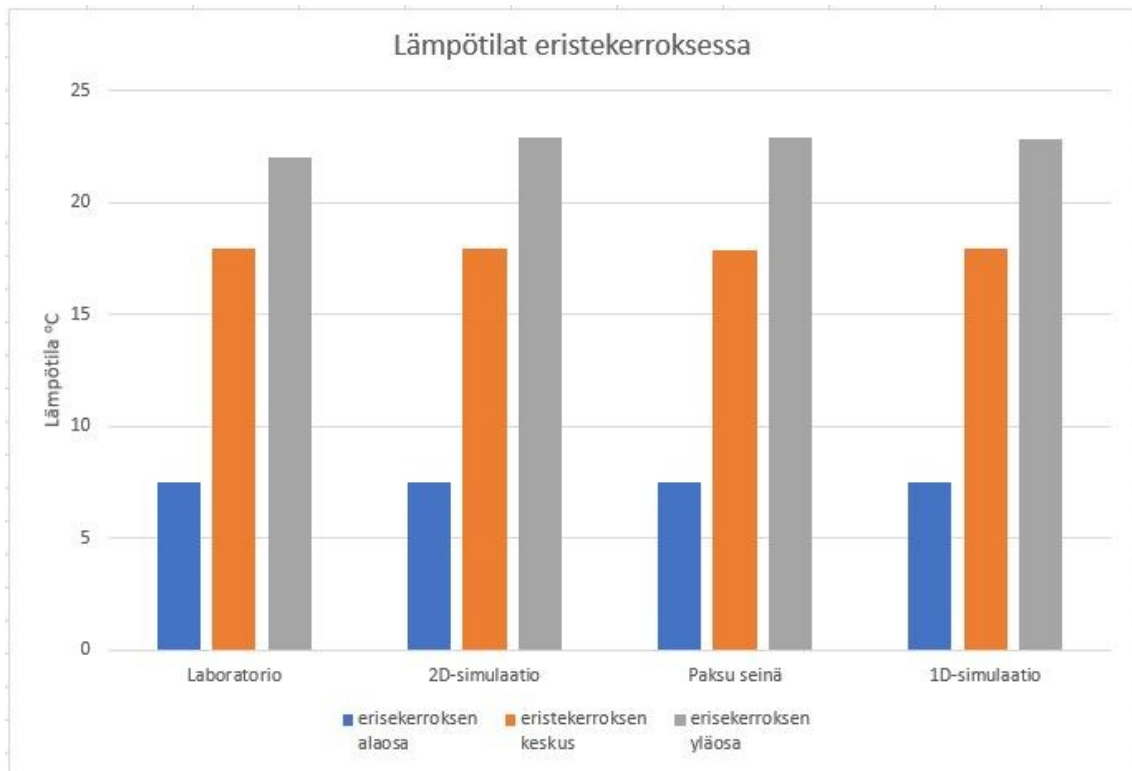
Simuloimalla oli tarkoitus hakea samanlainen lämpöjakauma, kuin mikä oli alkuperäisen kappaleen simuloinnissa. Tavoiteltavat lämpötilat pidettiin siis samoina kuin edellä, eli kylmemmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalle haettiin lämpötila 7,5 °C, paksun eristekerroksen keskelle haettiin vastaavasti 17,92 °C ja eristekerroksen ja lämpimämmän betonikerroksen rajalle tavoiteltiin lämpötilaa 22 °C. Simuloinnin tulokset esitetään kappaleessa 5.

4.4.4 Simulaatio muutetuilla k -arvoilla

Tässä simulaatiossa seinärakenne oli mallinnettu alkuperäisen kokoisena. Lämpövirran sallittiin kulkea yksiulotteisesti vain pystysuunnassa. Lämpövirtaa kylkien läpi ei siten tapahtunut, eli kaikkien kerrosten kyljet olivat adiabaattisia. Simulaatiossa betonin ja eristeen k -arvoja muutettiin siten, että löydettiin samanlainen lämpötilajakauma, joka ensimmäisessä simulaatiossa oli kappaleen keskilinjalla. Simuloinnin tulokset on esitetty kappaleessa 5.

4.4.5 Simulointitulosten validointi

Simuloinneissa keskityttiin tarkkailemaan kolmea seinän keskilinjalla olevaa pistettä. Kylmin sijaitsi eristekerroksen alaosassa, ulomman betonikerroksen rajalla. Lämpimin sijaitsi eristekerroksen yläosassa, sisemmän betonikerroksen rajalla. Kolmas tarkkailun kohteena ollut piste oli eristekerroksen keskiosassa. Kuvassa 9 on esitetty loppulämpötilat kussakin tilanteessa, lämpötilan tasaannuttua.



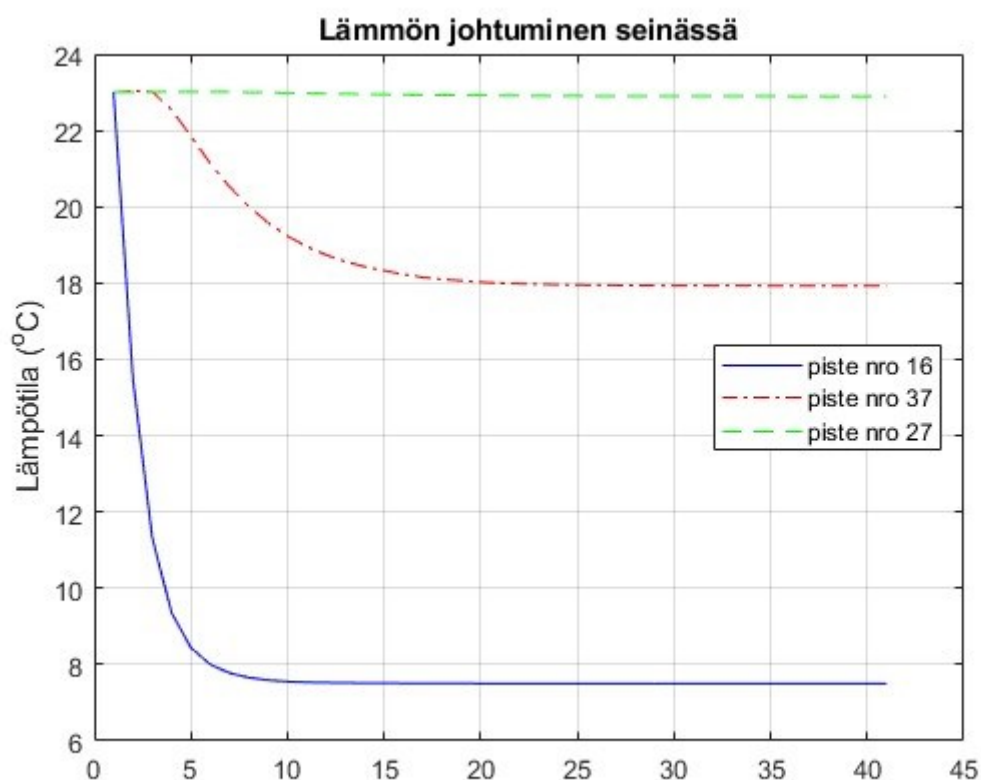
Kuva 9. Loppulämpötilat eristekerroksessa.

Kuvassa 9 ensimmäiset lämpötilat on laboratoriomittauksesta ja kolme seuraavaa lämpötilasarjaa on tässä työssä tehdyistä simulaatioista. Kuvasta näkyy, että jokaiselle simulaatiolle löydettiin tarkasti sama lämpötila kahteen alimpaan mittauspisteeseen. Ylin mittauspiste ei ollut yhtä merkityksellinen eikä siten suuren tarkastelun kohteena, joten sille sallittiin kuvassakin erottuva pieni ero laboratoriotuloksiin verrattuna.

5 Tulokset ja analyysi

5.1 Referenssimittausten tulokset

Kappaleessa 4.1 saatiin simuloimalla haettua lämpötilat, jotka vastasivat laboratoriomittauksen lämpötiloja. Kuva 10 esittää lämmönjohtumista seinän eri pisteissä. Piste numero 16 on viileämmän betonikerroksen ja eristekerroksen välisellä rajalla, piste numero 37 on keskellä eristekerrosta ja piste numero 27 on eristekerroksen ja lämpimämmän betonikerroksen rajalla.



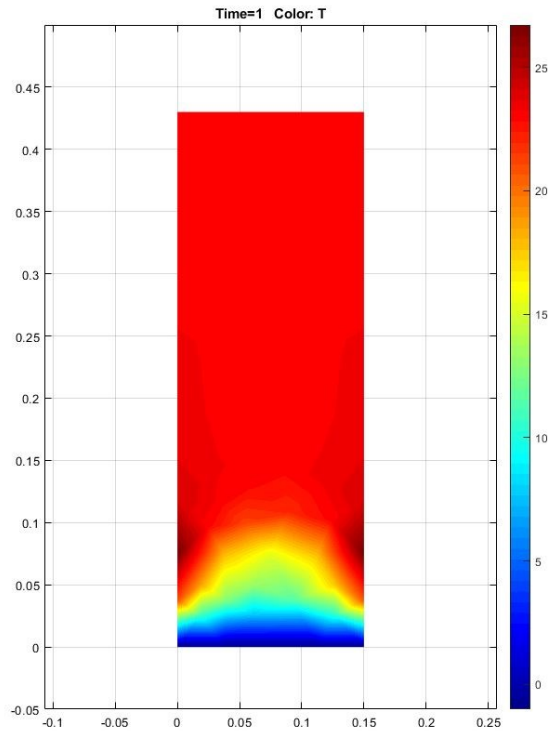
Kuva 10. Lämpötilan muutos seinärakenteen eri pisteissä.

Pisteessä 16 lämpötila laskee jyrkästi simuloinnin alussa ja tasaantuu kun simulointia on kulunut noin 10 sekuntia. Lämmönjohtuminen betonikerroksessa on suurta ja lämpö virtaa alussa betonin läpi kohti kylmempää ulkopintaa nopeammin kuin mitä eristekerroksesta siihen tulee lämpöä.

Pisteessä 37, eli keskellä eristekerrosta, lämpötila simuloinnin alussa laskee kohtalaisesti ja alkaa tasaantumaan kun simulointiaika alkaa lähestyä kahtakymmentä sekuntia. Lämmönjohtuminen eristekerroksessa on pientä. Aivan simuloinnin alussa lämpötila pysyttelee hetken aikaa lähes muuttumattomana ennen kuin lämpötilan lasku alkaa. Lämpö virtaa kylmemmän betonin suuntaan ja lämpötila eristekerroksen keskellä hakeutuu noin 18 °C:een.

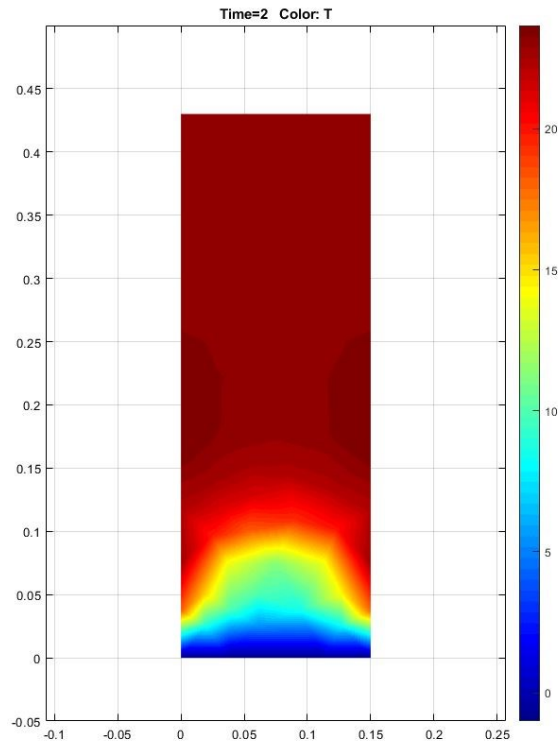
Pisteessä 27 lämpötilan lasku simuloinnin aikana on hyvin vähäistä. Lämmönjohtuminen lämpimän betonikerroksen läpi riittää pitämään lämpötilan lähellä alkuperäistä 23 °C lämpötilaa. Eristekerros suojaa pistettä 27 kylmältä hyvin, eristeessä lämmönjohtuminen on heikkoa ja lämpötila laskee tässä vain hieman.

Kappaleen alapuolella lämpötila on -1 °C ja kappaleen yläpuolella lämpötila on +23 °C. Simuloinnin alussa seinän lämpötila on +23 °C. Kuvassa 11 nähdään seinän lämpötilajakauma heti simuloinnin alettua. Lämpötila seinän alaosassa alkaa laskemaan välittömästi ja lämmönjohtuminen betonissa on voimakasta. Eristekerros hidastaa lämmönjohtumista. Seinän lämmin puoli, kuvassa ylhäällä, pysyy hyvin lämpimänä.



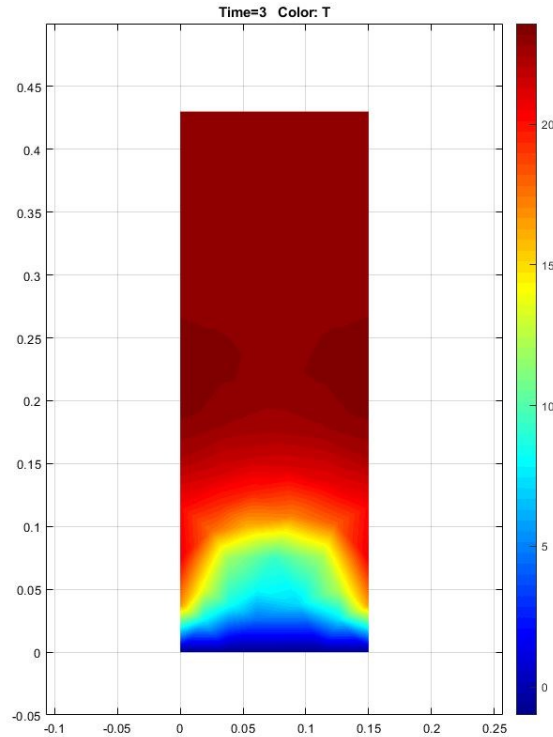
Kuva 11. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 1$.

Simuloinnin edetessä, nähdään kuvassa 12, kuinka seinän kylmempi puoli on jäähtynyt edelleen, mutta eristeen vaikutus lämpötilajakaumaan on merkittävä. Seinän lämmin puoli on lämpötilan osalta edelleen käytännössä muuttumaton ja jäähtyminen on havaittavissa vain kylmemmässä betonikerroksessa sekä eristekerroksen alaosassa.



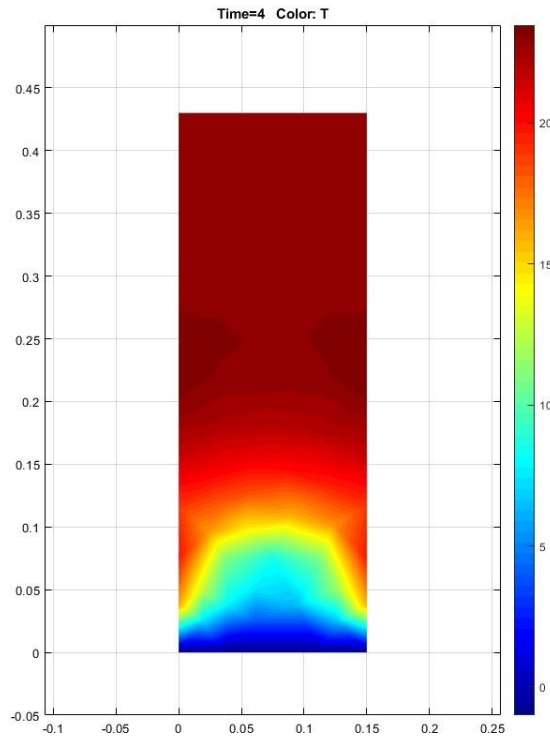
Kuva 12. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 2$.

Kuvassa 13 esitetään lämpöjakauma simuloinnin kestätyä kolme sekuntia. Siinä nähdään kuinka seinärakenteen alaosan jäähtyminen jatkaa etenemistään ja pisteessä 16 aletaan lähestymään $+10\text{ °C}$:n lämpötilaa. Eristekerroksen puolivälissä, pisteessä 37, lämpötila on edelleen lähes muuttumaton.



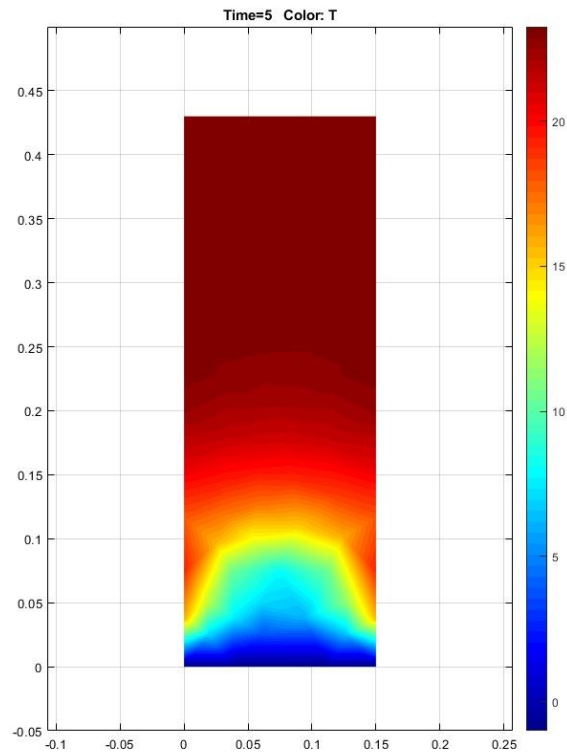
Kuva 13. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 3$.

Simuloinnin jatkuessa, kuten kuvasta 14 nähdään, kappaleen jäähtyminen on edennyt eristekerroksen puoliväliin, pisteeseen 37. Siinä lämpötilan lasku on alkanut ja voimakkain muutos viileässä betonikerroksessa alkaa hidastumaan. Koko seinän lämmin puoli on edelleen hyvin lähellä alkuperäistä lämpötilaa.



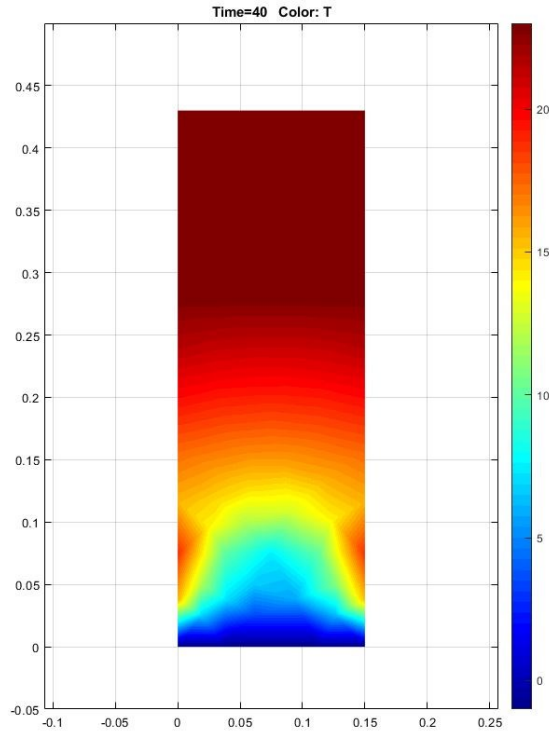
Kuva 14. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 4$.

Kuvassa 15 esitetään seinän lämpötilajakauma simuloinnin kestätyä viisi sekuntia. Lämpötilan muutokset yksittäisten simulointikierrosten välillä eivät ole enää yhtä rajuja kuin aivan simuloinnin alussa. Lämpötila pisteessä 37, eli eristekerroksen puolivälissä on havaittavissa, eristekerroksen yläosa pysyy lämpimänä ja lämpötilan muutos eristekerroksen alaosassa alkaa tasaantumaan.



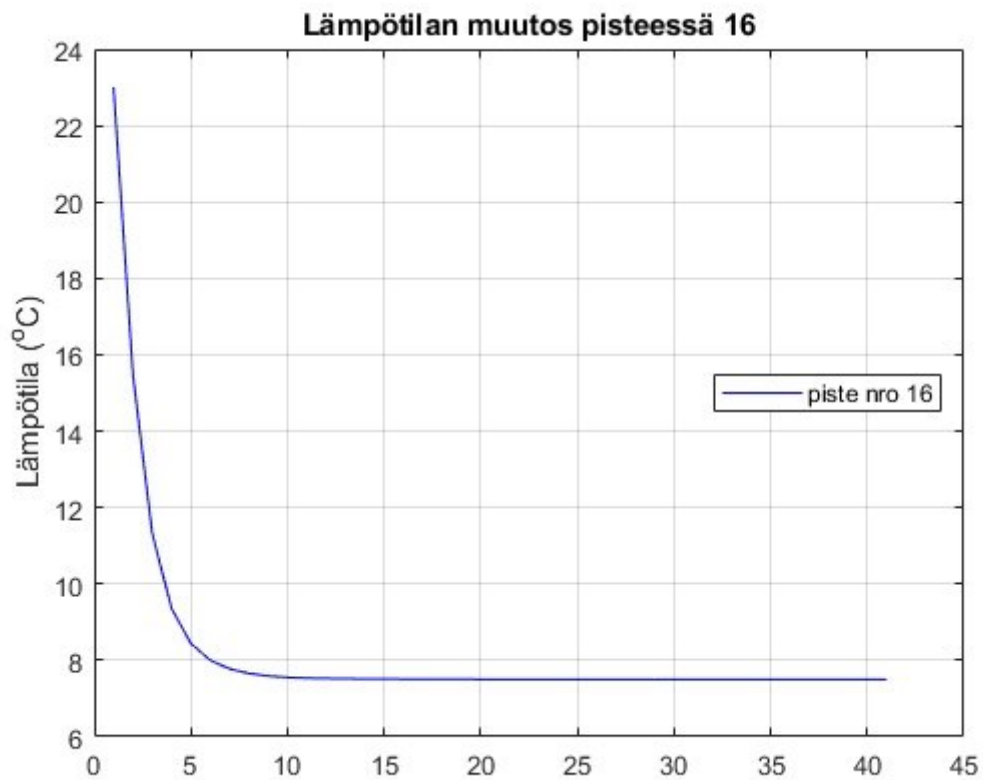
Kuva 15. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 5$.

Simuloinnin perusteella seinän lämpötilajakauma on tasaantunut ajanhetkellä $T = 40$. Kuvassa 16 esitetään simuloinnin lopputilanne. Lämmin betonikerros pysyy lämpimänä eikä siinä tapahtunutta pientä lämpötilan laskua $+23\text{ °C}$:sta pysty kuvasta erottamaan. Eristekerroksen yläosa pysyy lämpimänä ja lämpötilan muutos sen alaosassa on selkeä. Lämpötila eristekerroksen alaosassa on $+7,5\text{ °C}$ ja kerroksen puolivälissä noin $+18\text{ °C}$.



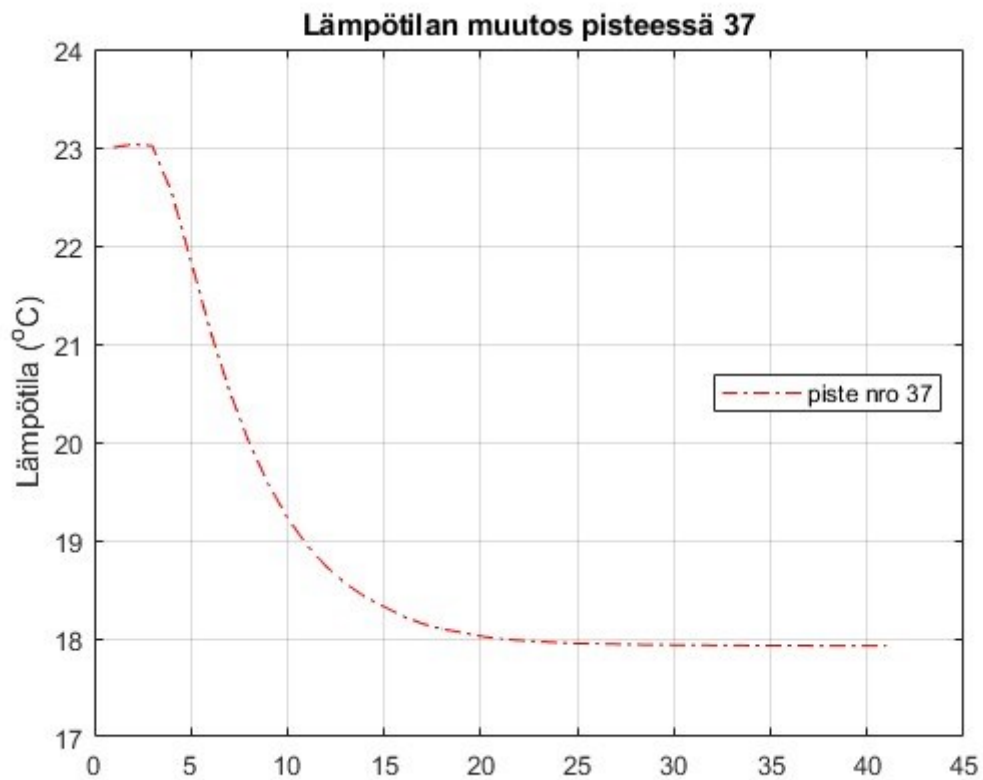
Kuva 16. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 40$.

Viileämmän betonikerroksen ja eristekerroksen välissä olevan mittauspisteen numero 16 lämpötila on simuloinnin lopussa hyvin stabiili. Kuvasta 17 nähdään, että vaikka simulointia jatkettiin pitkään, niin lämpötila oli lähes tasaantunut jo ajanhetkellä $T = 10$. Lämmönjohtuminen betonissa on moninkertaisesti voimakkaampaa kuin eristeessä, minkä vuoksi betonin ulkopinnalle asetettu $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$:n lämpötilan vaikutus betonikerroksessa on voimakas ja lämmönjohtumisen vuoksi betonin lämpimämpi puoli jäähtyy nopeasti.



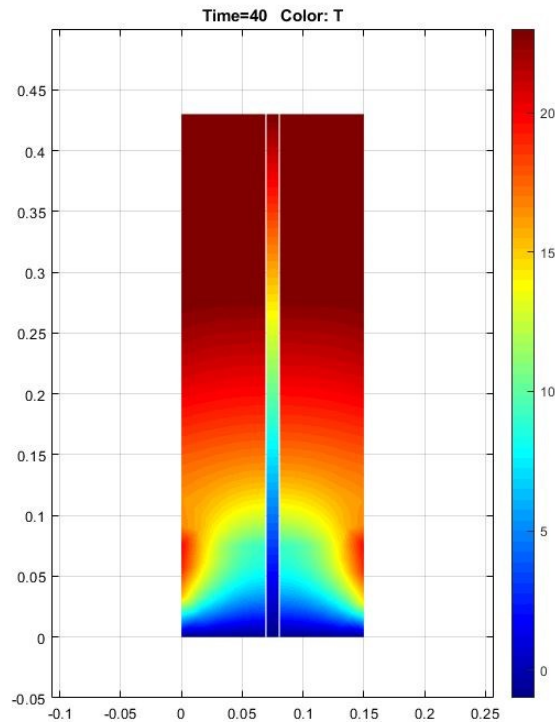
Kuva 17. Lämpötilan muutos ulomman betonikerroksen ja eristeen rajalla.

Eristekerroksen keskellä, mittauspisteessä 37, lämpötila asettuu simuloinnissa noin +18 °C:een. Kuten kuvasta 18 nähdään, simulointi alkaa siten, että lämpötila pisteessä 37 ei laske, vaan lämpötilan lasku alkaa voimakkaasti noin ajanhetkellä $T = 3$. Lämpötila laskee tässä vaiheessa jyrkästi noin +19 °C:een, minkä jälkeen lämpötilan muutos alkaa tasaantumaan. Simuloinnin puolivälissä ollaan saavutettu noin +18 °C:n lämpötila, minkä jälkeen simulaation loppupuolella lämpötila laskee enää hieman. Simulaation lopussa lämpötila ei enää muutu.



Kuva 18. Lämpötilan muutos eristekerroksen keskellä.

Kuva 19 esittää samaa simulaatiota, mutta keskelle seinän sisälle on tässä sijoitettu passiivinen antenni, joka ulottuu seinän läpi. Simulaatiossa antenni on kuparia, jolla on korkea lämmönjohtavuus. Erilainen lämpötilajakauma antennin kohdalla erottuu hyvin kuvasta. Siinä kylmä johtuu antennia pitkin syvemmälle seinään.



Kuva 19. Lämpöjakauma antenniseinässä ajanhetkellä $T = 40$.

5.2 Mittavirheen etsinnän tulokset

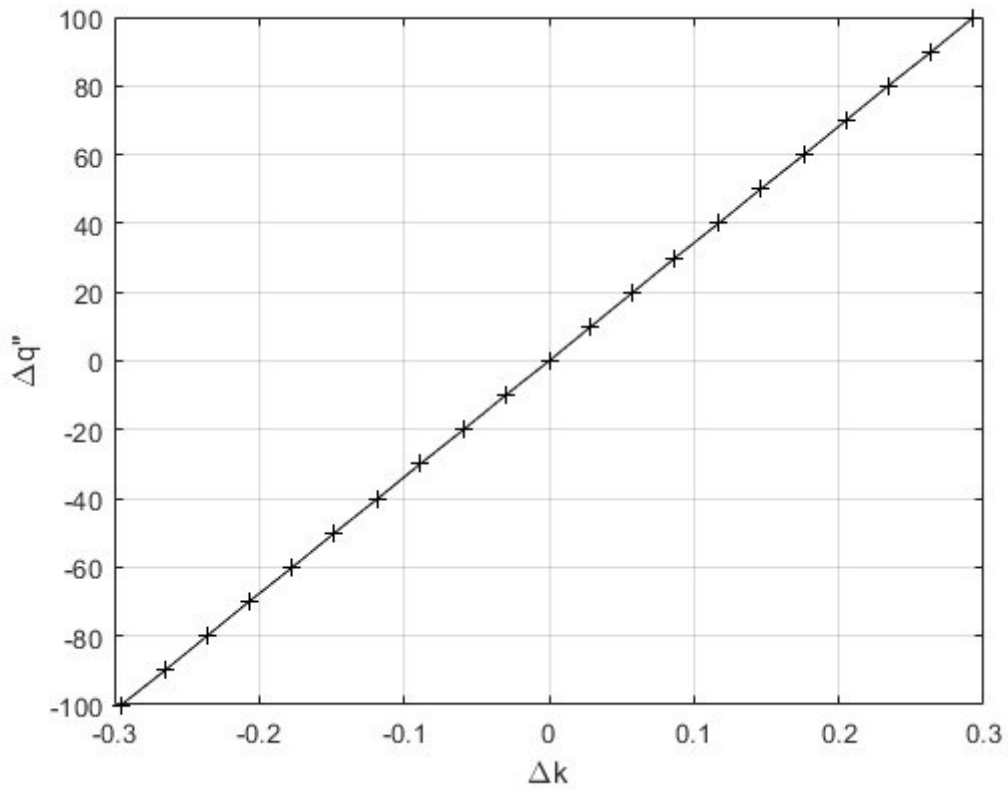
Ensimmäisen simulaatiotutkimuksen tuloksena oli saatu viitearvot varsinaista virhealueen tutkimista varten. Nyt toisessa vaiheessa viitearvoja hyödynnettiin uusien simulaatioiden lähtökohtana. Viitearvot olivat betonin lämmönjohtavuudelle $k = 2,7$ W/m·K ja betonin rajapintojen lämpövirran tiheydelle 900 W/m².

Taulukossa 5 esitetään miten lämmönjohtavuus oli yhteydessä lämpövirran tiheyteen. Taulukossa on esitetty neljän desimaalin tarkkuudella se lämpötila, joka simulaatiossa saavutettiin. Kun simulaatiossa käytettiin lämpövirran tiheytenä arvoa $q'' = 900$ W/m², pisteeseen 16 eli kylmemmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalle löytyi lämpötila $7,50$ °C, kun lämmönjohtavuudeksi valittiin $k = 2,7$ W/m·K. Tällöin erot viitearvoihin ovat luonnollisesti $\Delta k = 0$ ja $\Delta q'' = 0$. Taulukosta nähdään, että simuloimalla löydettiin sama lämpötila, kun $q'' = 800$ W/m², niin $k = 2,407$ W/m·K, jolloin $\Delta k = 0,293$ ja $\Delta q'' = 100$ ja vastaavasti, kun $q'' = 1000$ W/m², niin $k = 2,995$ W/m·K, jolloin $\Delta k = 0,295$ ja $\Delta q'' = -100$.

Taulukko 5. Lämmönjohtavuuden tutkiminen.

k	q''																			delta k	delta q''		
	800	810	820	830	840	850	860	870	880	890	900	910	920	930	940	950	960	970	980			990	1000
2,407	7,4991																					0,293	100
2,436		7,5005																				0,264	90
2,466			7,4984																			0,234	80
2,495				7,4998																		0,205	70
2,524					7,5011																	0,176	60
2,554						7,4991																0,146	50
2,583							7,5004															0,117	40
2,613								7,4985														0,087	30
2,642									7,4998													0,058	20
2,671										7,501												0,029	10
2,7											7,5023											0	0
2,73												7,5004										-0,03	-10
2,759													7,5016									-0,059	-20
2,789														7,4997								-0,089	-30
2,818															7,5009							-0,118	-40
2,848																7,4991						-0,148	-50
2,877																	7,5003					-0,177	-60
2,907																		7,4985				-0,207	-70
2,936																			7,4997			-0,236	-80
2,965																				7,5008		-0,265	-90
2,995																					7,4991	-0,295	-100

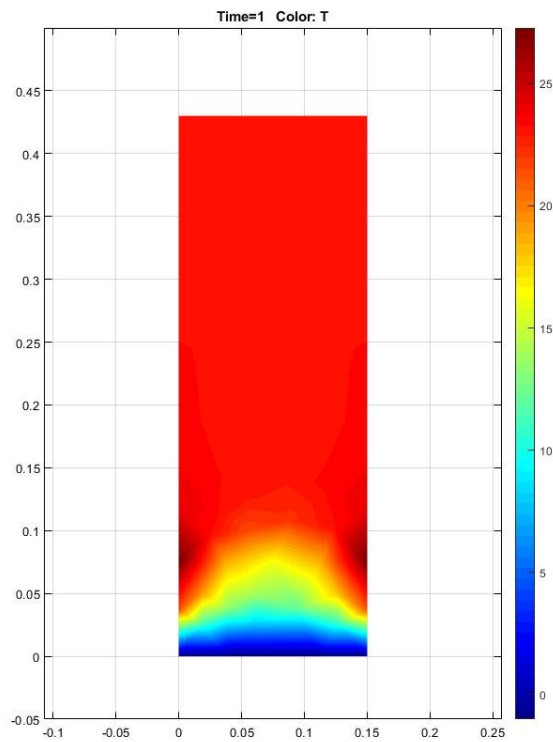
Taulukon arvot Δk ja $\Delta q''$ voidaan piirtää koordinaatistoon, jossa x-akselilla on lämpövirran tiheyden eli lämpövuon muutos ja y-akselilla on lämmönjohtavuuden muutos. Kuvassa 20 on merkitty pisteet taulukko 5:n sisältämien Δk :n ja $\Delta q''$:n perusteella ja kuvaajasta voidaan huomata, että se on suora.



Kuva 20. Lämpövuon muutoksen suhde lämmönjohtavuuden muutokseen.

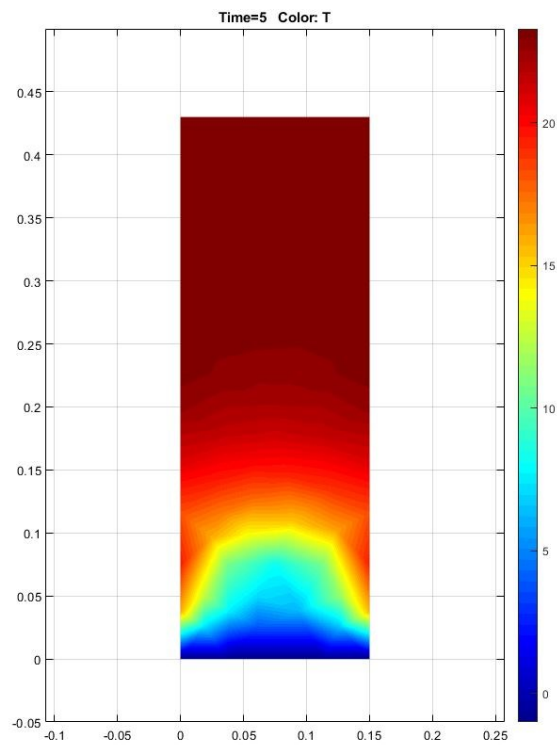
Simuloinnin perusteella voidaan todeta, että mahdolliset virheet huomioon ottaen betonin lämmönjohtavuus on $k = 2,7 \pm 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Lämmönjohtavuutta voidaan tarkastella myös simuloitujen lämpökuvien avulla. Kuvassa 21 on kuvattu seinän lämpötilajakauma simulaatiossa, jossa betonille oli asetettu lämpövirran tiheydelle arvo $q'' = 800 \text{ W/m}^2$ ja lämmönjohtavuus on $k = 2,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Kuva on tilanteesta, jossa simulointia on tehty sekunnin ajan. Seinän alla oleva kylmä pinta, jonka lämpötila on $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ vaikuttaa voimakkaasti seinän lämpöjakaumaan.



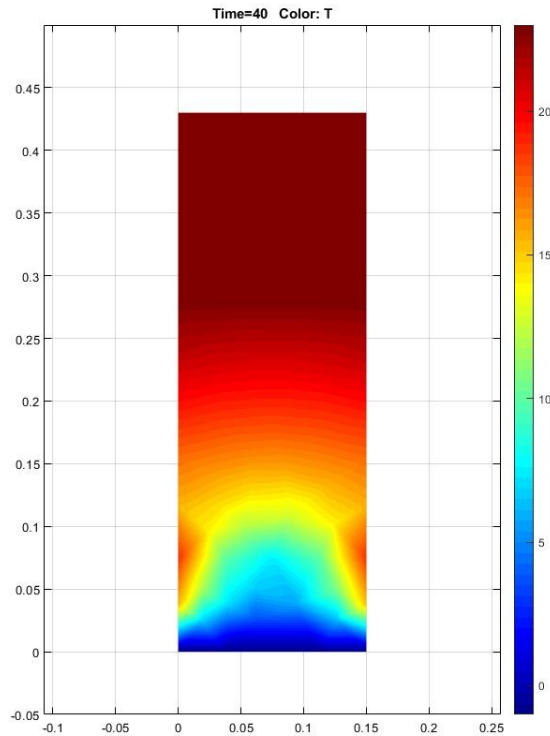
Kuva 21. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 1$, kun lämpövuoto on 800 W/m^2 .

Kuva 22 on kuvattu vastaava simulaatio ajanhetkellä $T = 5$. Lämpötila kahden alimman kerroksen rajalla on selvästi alempi, kuin simuloinnin alussa ja alkaa lähestymään $7,5 \text{ }^\circ\text{C}$:een tavoitelämpötilaa.



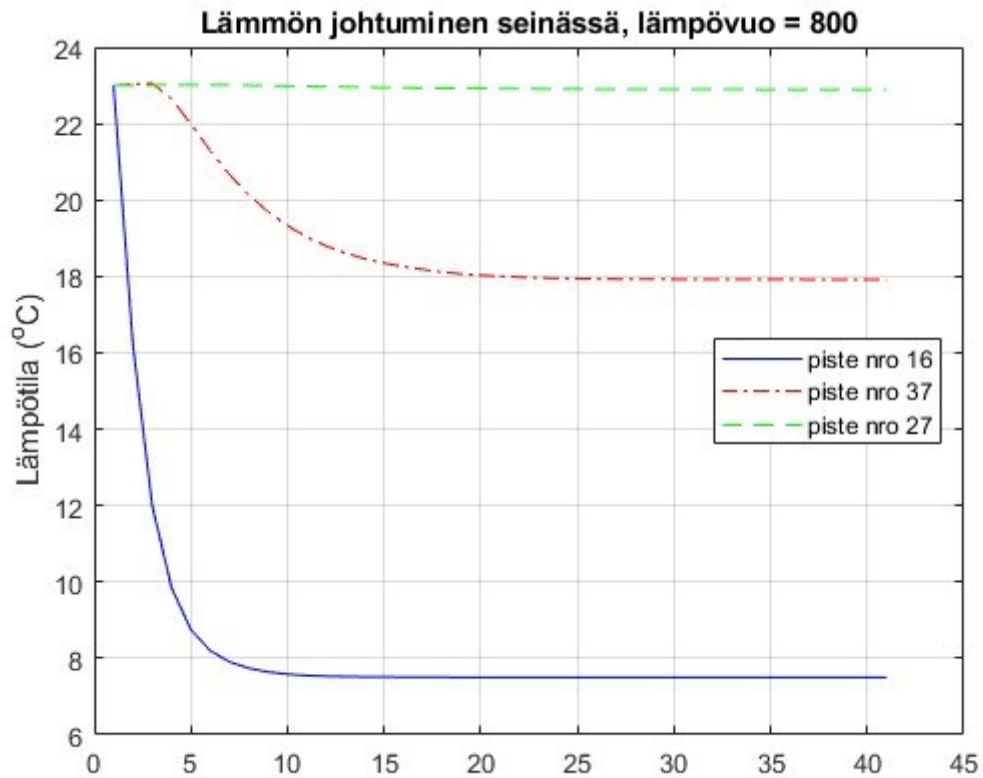
Kuva 22. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 5$, kun lämpövuoto on 800 W/m^2 .

Kuva 23 esittää seinän lämpötilajakauman simulaation lopussa, kun betonilla käytetään lämpövirran tiheydenä $q'' = 800 \text{ W/m}^2$ ja lämmönjohtavuus on $k = 2,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Lämpökuva on hyvin samankaltainen kuin aiemmassa vaiheessa, jossa suoritettiin simulaatio viitearvoilla.



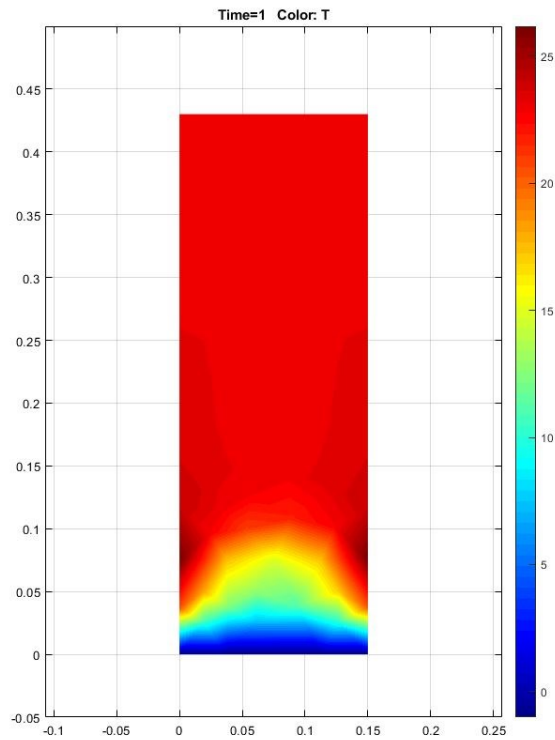
Kuva 23. Lämpöjakauma, kun lämpövuoto on 800 W/m^2 .

Kuvassa 24 on esitetty lämpötilan muutokset simuloinnin aikana. Lämpötilat käyttäytyvät samalla tavalla kuin viitearvoilla simuloitaessa. Suuria eroja ei ole havaittavissa. Eristekerroksen ja kylmemmän betonikerroksen rajalla lämpötila lähtee simulaation alussa laskemaan nopeasti. Lämpimän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalla lämpötilan muutos on lähes olematon. Eristekerroksen keskellä lämpötila on aluksi hetken lähes muuttumaton, minkä jälkeen lämpötila lähtee laskemaan. Lämpötila vakiintuu eristekerroksen keskellä hitaammin kuin eristeen ja kylmän betonin rajalla.



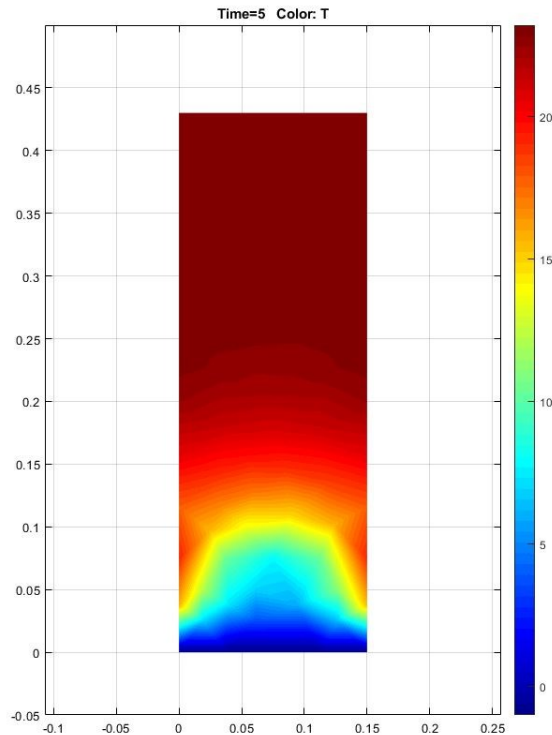
Kuva 24. Lämpötilan muutos seinän eri pisteissä, kun lämpövuoto on 800 W/m^2 .

Simulaatiossa, jossa betonilla käytetään lämpövirran tiheytenä $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$ ja lämmönjohtavuus on $k = 3,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, saadaan simulaation alussa kuvan 25 mukainen lämpöjakauma. Simulaatio noudattaa tässäkin samaa linjaa kuin tutkimuksen aikaisemmat esimerkit simulaatioista pienemmillä lämpövirran tiheyksillä ja lämmönjohtavuuksilla. Lämpötilan lasku kylmemmässä betonikerroksessa alkaa tässäkin voimakkaana.



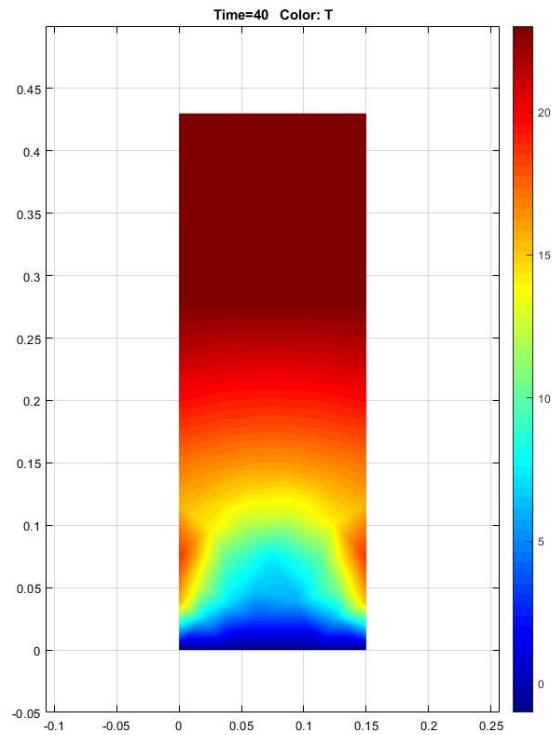
Kuva 25. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 1$, kun lämpövuoto on 1000 W/m^2 .

Kuvassa 26 näytetään tilanne simulaatiosta ajanhetkellä $T = 5$. Alempi betonikerros on jo kylmä ja eristekerroksen alaosassa lämpötila on laskenut. Suuria eroja aiempiin simulaatioihin ei ole havaittavissa.



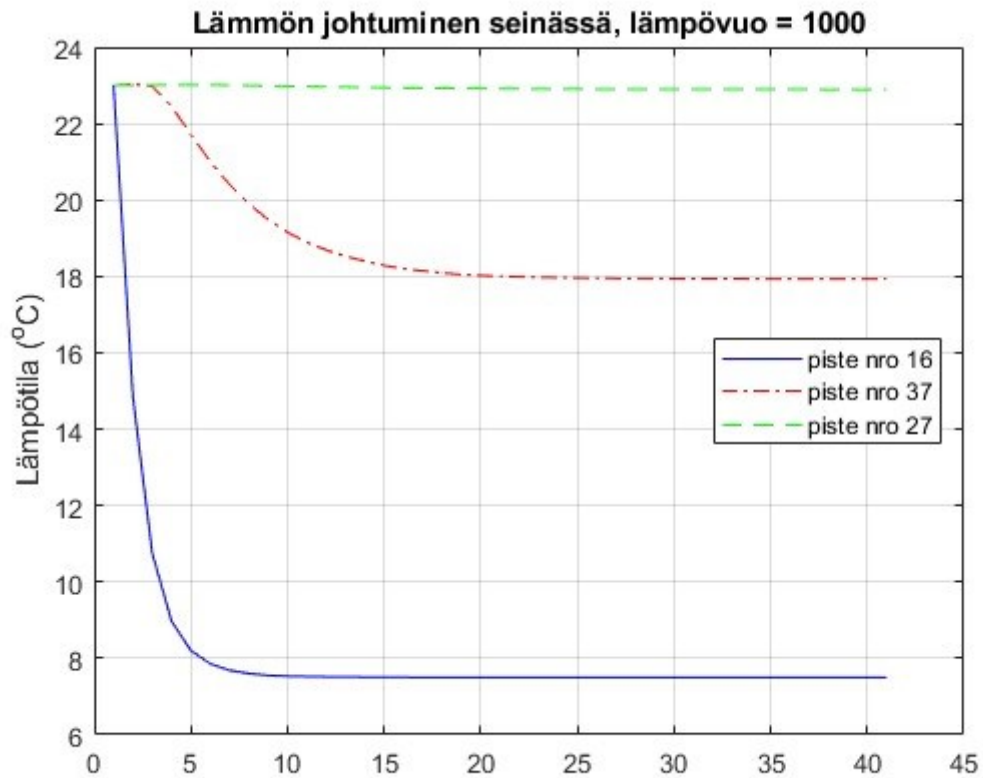
Kuva 26. Lämpöjakauma ajanhetkellä $T = 5$, kun lämpövuoto on 1000 W/m^2 .

Simulaation loppuvaiheessa seinässä on saavutettu kuvan 27 mukainen lämpöjakauma. Myös tässä on nähtävissä samanlainen lämpöjakauma kuin edellisissä simulaatioissa. Seinän yläosa on lämmin, eristeen keskellä lämpötila on laskenut noin $+18 \text{ }^\circ\text{C}$:een ja alhaalla betonin ja eristeen rajalla ollaan $+7,5 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa.



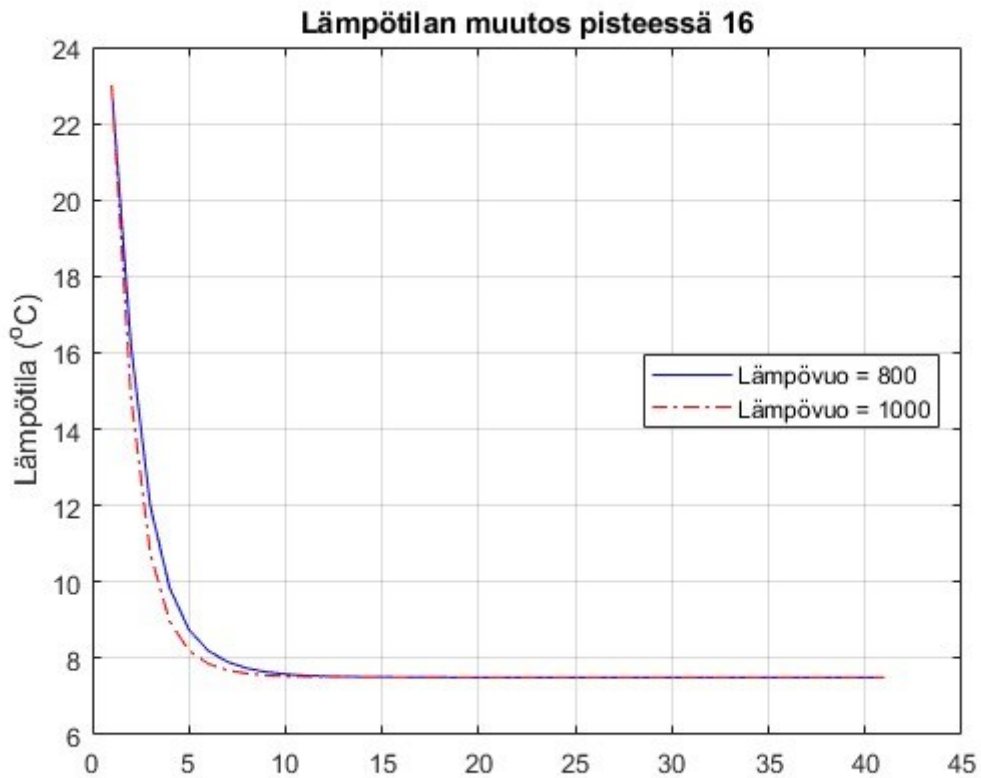
Kuva 27. Lämpöjakauma, kun lämpövuoto on 1000 W/m^2 .

Kuvassa 28 esitetään lämpötilan muutokset tutkimuksen kohteena olleissa pisteissä 16, 37 ja 27. Pisteissä on saavutettu samat lämpötilat kuin aiemmissakin simulaatioissa, vaikka tässä simulaatiossa on käytetty lämpövirran tiheytenä ja lämmönjohtavuutena eri arvoja kuin aiemmissa simulaatioissa.



Kuva 28. Lämpötilan muutokset, kun lämpövuoto on 1000 W/m².

Vaikka tehdyt simulaatiot olivat hyvin samankaltaisia, niistä löydettiin myös eroavuuttakin. Kuvassa 29 esitetään lämpötilan muutos pisteessä 16, eli kylmemmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalla kahdessa eri simulaatiossa. Ensimmäisessä simulaatiossa lämpövirran tiheytenä käytettiin arvoa $q'' = 800 \text{ W/m}^2$ ja lämmönjohtavuutena arvoa $k = 2,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Toisessa simulaatiossa vastaavat arvot olivat $q'' = 1000 \text{ W/m}^2$ ja $k = 3,0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.



Kuva 29. Lämpötilan muutos ulomman betonikerroksen ja eristeen rajalla.

Molemmissa tapauksissa simuloinnin alussa lämpötila lähti nopeasti laskemaan lähtötilanteen $+23\text{ °C}$:sta. Simulointien lopussa molemmissa tapauksissa oltiin samassa loppulämpötilassa $+7,5\text{ °C}$:ssa. Huomattavaa kuitenkin on, että kun lämmönjohtavuus oli suurempi, niin lämpötila laski hieman nopeammin. Tämä on ymmärrettävää, sillä suuremman lämmönjohtavuuden tapauksessa lämpö betonissa virtaa nopeasti kohti kylmää ulkopintaa ja seinän sisällä oleva eriste hidastaa lämpövirtausta lämpimän sisäpinnan suunnasta. Pienemmän lämmönjohtavuuden tapauksessa lämmön poistuminen ulommasta betonikerroksesta ei tapahdu yhtä nopeasti.

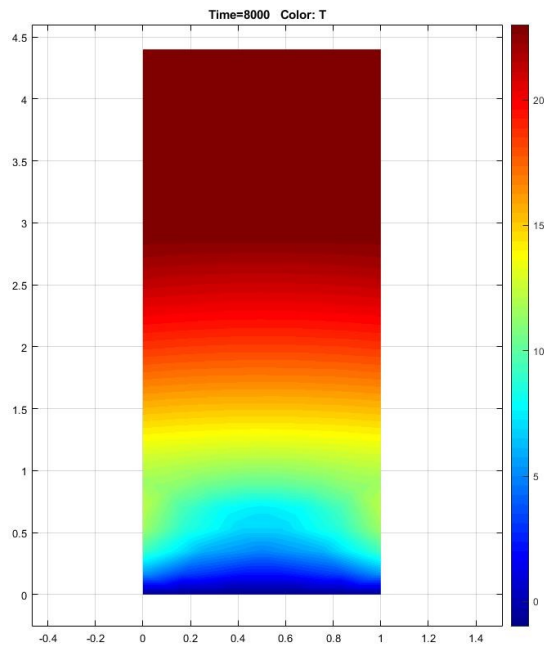
5.3 Lämmönjohtuminen paksussa seinässä

Simuloinnin tulokset suuressa kappaleessa olivat hyvin erilaiset kuin aikaisemmissa simulaatioissa. Simulaatiossa haettiin samanlainen lämpötilajakauma kuin mikä

normaalikokoisessakin seinässä oli ollut. Kylmemmän betonikerroksen ja eristekerroksen rajalle (tässä piste numero 78) haettiin lämpötila $+7,5\text{ °C}$, keskelle eristekerrosta (tässä piste numero 191) $17,9\text{ °C}$ ja eristekerroksen yläosaan lämpimämmän betonikerroksen rajalle (tässä piste numero 64) $22,9\text{ °C}$. Lämpötilat vastasivat laboratoriomittauksissa saavutettuja lämpötiloja lukuunottamatta ylintä mittauspistettä, joka oli $0,9\text{ °C}$ korkeampi kuin laboratoriomittauksissa ollut.

Tässä simulaatiossa seinärakenne oli noin kymmenkertainen normaaliin seinään verrattuna. Koska tavoitellut lämpötilat sijaitsivat näennäisesti samoissa kohdissa kuin normaalissa seinässä, mutta seinän mitat olivat todellista paljon suuremmat, niin lämpövirran tiheyden ja lämmönjohtavuuden välisen suhteenkin oli oltava erilainen kuin normaalikokoisessa seinässä.

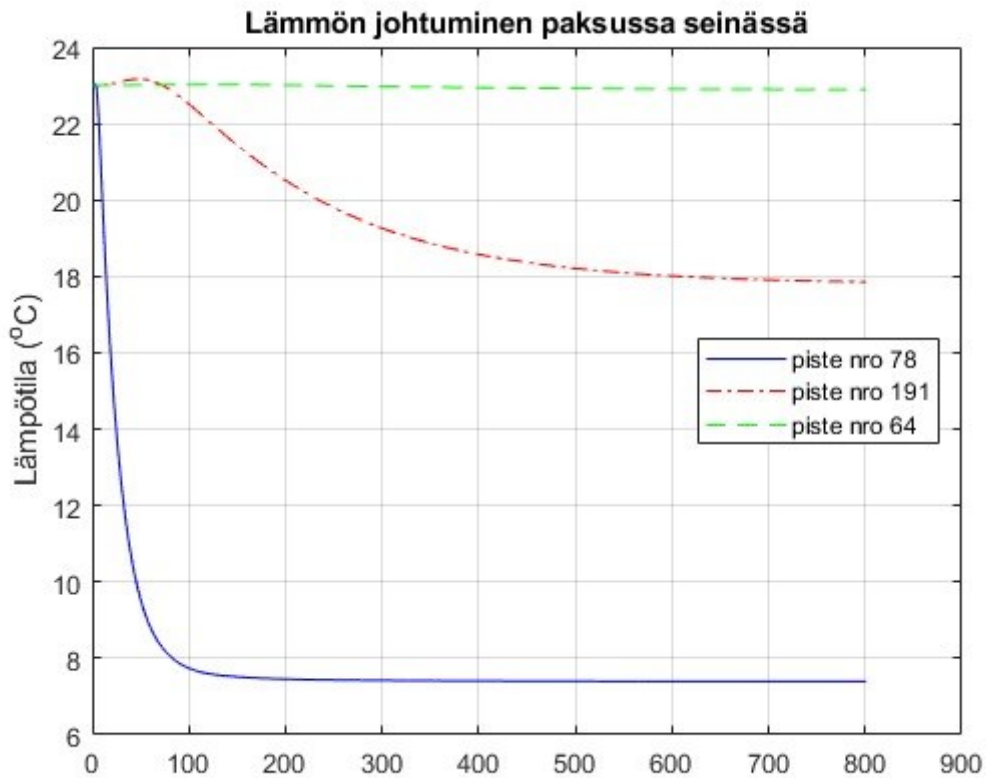
Suuren kappaleen käyttäytymistä tutkittiin ja haluttuja lämpötiloja lähdettiin tavoittelemaan yrityksen ja erehdyksen periaatteella vaihtelemalla lämpövirran tiheyksien arvoja kahdessa alemmassa kerroksessa. Kuvan 30 mukainen lämpöjakauma saavutettiin, kun eristekerrokselle käytettiin arvoja $q'' = 0,05\text{ W/m}^2$ ja $k = 0,05\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ja alemmalle betonikerrokselle käytettiin arvoja $q'' = 55\text{ W/m}^2$ ja $k = 2,7\text{ W/m}\cdot\text{K}$.



Kuva 30. Lämpöjakauma suuressa kappaleessa.

Kuvassa 31 esitetään lämpötilan kehitys tutkituissa pisteissä simulaation aikana. Ensimmäisenä huomio kiinnittyy siihen, että simulaation suoritus kesti paljon kauemmin kuin mitä normaalikokoisella kappaleella kesti. Suuremmassa kappaleessa lämmönjohtuminen rakenteiden läpi kestää pidempään.

Lämmönjohtumisen nopeuteen vaikuttavat tässä kappaleen koon lisäksi myös simulaatiossa käytetty lämpövirran tiheys. Sekä eristekerroksella että betonikerroksella käytettiin lämpövirran tiheydelle tässä simulaatiossa yli kymmenen kertaa pienempiä arvoja. Se tarkoittaa samalla sitä, että tässä simulaatiossa lämpötilan muutokset tapahtuivat hitaammin.



Kuva 31. Lämpötilan muutos paksun seinän eri pisteissä.

Toinen asia, johon kuvassa 31 kiinnittää huomion, on että eristekerroksen keskellä lämpötilan lasku ei tapahdu yhtä jyrkästi kuin normaalikokoisen seinän simulaatioissa.

5.4 Yksiulotteinen lämmönsiirto

Viimeinen simulaatio oli suoritettu siten, että lämmönsiirto seinärakenteen läpi oli yksiulotteista. Ylemmän eli lämmintä tilaa vasten olleen betonikerroksen lisäksi nyt myös alemman eli kylmää pintaa vasten olleen betonikerroksen sekä eristekerroksen sivut olivat adiabaattisia.

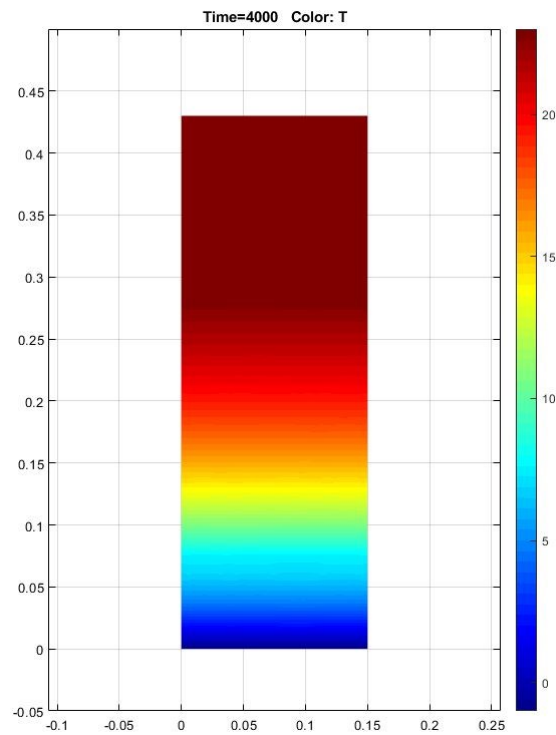
Seinälle löydettiin haluttu lämpötilajakauma sekä betonin että eristeen lämmönjohtavuuksia muuttamalla. Lämmönjohtavuudet oli asetettava todella pieniksi, jotta tutkittaviin pisteisiin asetui samat lämpötilat, kuin muissakin simulaatioissa.

Taulukossa 6 on esitetty tässä simulaatiossa löydettyt lämmönjohtavuuksien arvot sekä muut tutkimuksessa käytetyt seinän eri kerrosten ominaisuudet. Lämmönjohtavuuden arvot on löytyvät kokeellisesti simulointien avulla ja muut luvut ovat samat kuin aiemmissa simuloinneissa kappaleessa 4.3.4, taulukossa 2.

Taulukko 6. Simuloitavan kappaleen ominaisuuksia.

Suure	UlkoBetoni	Eristekerros	SisaBetoni
leveys (cm)	15,00	15,00	15,00
korkeus (cm)	7,50	20,50	15,00
tiheys (kg/m ³)	2200	60	2200
ominaislämpökapasiteetti (kJ/K·kg)	0,75	0,8	0,75
lämmönjohtavuus (W/m·K)	0,001288	0,000162	0,001288

Kuvassa 32 esitetään seinän lämpötilajakauma 1D-simulaatiossa. Kun lämmönsiirtoa kylkien läpi ei tapahdu, riippuu seinässä oleva lämpötila ainoastaan mittauspisteen etäisyydestä seinän ulkopinnoista. Toisin sanoen, kuvasta nähdään että lämpötila on saman suuruinen koko kuvan leveydellä.



Kuva 32. Lämpötilajakauma yksisuuntaisessa lämmönsiirrossa.

6 Johtopäätökset

Matalaenergiataloissa käytetyn monikerroksisen seinärakenteen lämmönjohtuvuuden tutkiminen konkreettisilla kappaleilla on haastavaa. Rajoituksia voivat asettaa muun muassa mitattavien kappaleiden koko, materiaaliominaisuuksien epätasaisuus, ulkoiset lämpötilatekijät ja mittalaitteista johtuvat virheet. Vaikka laboratoriossa voidaan luoda mahdollisimman hyvät olosuhteet mittauksille, on mittaustuloksissa aina huomioitava virhemarginaali.

Betonin lämmönjohtavuudelle löytyy eri lähteistä erilaisia arvoja, joten tiettyä valmista lukemaa lämmönjohtavuudelle ei voida varmuudella käyttää. Tarkka lämmönjohtavuus riippuu betonin ominaisuuksista, kuten esimerkiksi tiheydestä ja se on tapauskohtainen. Erityisesti yksittäisten valmistuserien kohdalla erilaisia koostumuksia syntyy herkemmin.

Simuloimalla sopivan kokoista seinärakennetta, saadaan tutkittua kappaleiden ja materiaalien lämpöominaisuuksia laboratoriotutkimuksia tarkemmin. Materiaaleille voidaan antaa haluttuja arvoja ja nopeasti toistaa useita simulaatioita ilman, että tarvitaan massiivisia järjestelyjä tutkittavien kohteiden rakentamiseksi.

Tässä tutkimuksessa mitattava mallikappale luotiin Matlabilla ja simulointien avulla tutkittiin laboratoriotutkimuksissa käytetyn sandwich-seinän betonikerroksen lämmönjohtavuutta. On kuitenkin huomattava, että simulaatiotulokset eivät välttämättä vastaa todellista tilannetta.

7 Yhteenveto

Tutkimuksen lähtökohtana oli aikaisemmin laboratoriossa tehty tutkimus, jossa mitattiin matalaenergiatalon sandwich-seinän lämpökäyttäytymistä. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli tutkia kolmikerroksisen seinän lämmönjohtavuutta, simuloida erilaisia skenarioita ja analysoida laboratoriotutkimuksessa käytetyn betonin lämmönjohtavuuden mittausvirhettä

Matlabilla luodun mallin avulla saatiin simuloitua vastaavanlainen tilanne, kuin millainen laboratoriossa oli ollut. Muuttamalla betoni- ja eristekerrosten rajapintojen lämpövirtojen tiheyttä, saatiin tutkittua lämmönjohtumista erilaisissa tapauksissa. Tutkimuksen tuloksena saatiin betonin lämmönjohtavuudelle virhemarginaali, jota voidaan hyödyntää laboratoriotutkimusten tuloksia analysoidessa. Simulointitulokset paljastivat mittauksista määritettynä betonin lämmönjohtavuuden $2,7 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ja siihen liittyvät virheet $\pm 0,3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. MATLAB-malli saatiin validoitua mittaustuloksilla. Näin ollen voidaan todeta, että tutkimuksen tavoite toteutui.

Energiarakentaminen on ajankohtainen aihe ja siihen liittyviä tutkimuksia tullaan tekemään vastaisuudessaakin. Matalaenergiatalojen seinämateriaalien kehitystyö jatkuu, seinien lämpöhäviöitä tullaan vähentämään samalla kuin yhteiskunta siirtyy käyttämään yhä enemmän langattomia ratkaisuja. Näiden aihealueiden parissa riittää jatkossakin tutkimusaiheita, kuten esimerkiksi tämän työn laajentaminen kolmikerrosseinän lämpötehokkuuden vertailuun passiivisen antennin kanssa ja ilman, sekä simuloimalla kolmiulotteista mallia.

Lähteet

- Atienza, A. G., Cziezerski, C., Haneda, K., Heino, M., Icheln, C., Lü, X., Viljanen, K. & Vähä-Savo, L. (2021). Passive Antenna Systems Embedded into a Load Bearing Wall for Improved Radio Transparency. *2020 50th European Microwave Conference (EuMC)*, <https://doi.org/10.23919/EuMC48046.2021.9338219>
- Haneda, K., Lü, X., Lu, T. & Vähä-Savo, L. (2023a, 12. maaliskuuta). Thermal Impact of 5G Antenna Systems in Sandwich Walls. *Energies*, 16, MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16062657>
- Haneda, K., Lü, X., Vähä-Savo, L. & Wang, X. (2023b, 19. toukokuuta). A novel AI based thermal conductivity predictor in the insulation performance analysis of signal-transmissive-wall. *Special Issue "Applications of Machine Learning and Soft Computing in Energy Use Forecasting"*. MDPI. <https://doi.org/10.3390/en16104211>
- Motiva. (2018). *Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnitteluarvoja*. Noudettu 29.9.2023 osoitteesta https://www.motiva.fi/files/16465/Tyypillisia_olemassa_olevien_vanhojen_rakennusten_alkuperaisia_suunnitteluarvoja_-_Energiatodistusoppaan_2018_liite.pdf
- Nokia. (2023). *What is 5G?*. Noudettu 30.9.2023 osoitteesta <https://www.nokia.com/networks/5g/what-is-5g/>
- Paroc Group Oy. (2023). Betonisandwich-elementit. Noudettu 16.10.2023 osoitteesta <https://www.paroc.fi/kayttokohteet/rakennusten-eristaminen/betonielementit/betonisandwich-elementit>
- Telefonaktiebolaget L M Ericsson. (2023). *Ericsson Mobility Report, June 2023*. Noudettu 24.9.2023 osoitteesta <https://www.ericsson.com/49dd9d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023/ericsson-mobility-report-june-2023.pdf>
- Tilastokeskus. (2021). *Energia 2021 -taulukopalvelu. Energian kulutus sektoreittain*. Noudettu 23.9.2023 osoitteesta https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2021/html/suom0000.htm

Traficom. (2023, 2. kesäkuuta). *Matkaviestinverkkojen taajuudet ja luvanhaltijat*. Noudettu 1.10.2023 osoitteesta

<https://www.traficom.fi/fi/viestinta/viestintaverkot/matkaviestinverkkojen-taajuudet-ja-luvanhaltijat>

World Meteorological Organization. (2022). *Eight warmest years on record witness upsurge in climate change impacts*. Noudettu 24.9.2023 osoitteesta

<https://public.wmo.int/en/media/press-release/eight-warmest-years-record-witness-upsurge-climate-change-impacts>

World Meteorological Organization. (2023). *State of the Global Climate 2022*. Noudettu 24.9.2023 osoitteesta <https://library.wmo.int/idurl/4/66214>