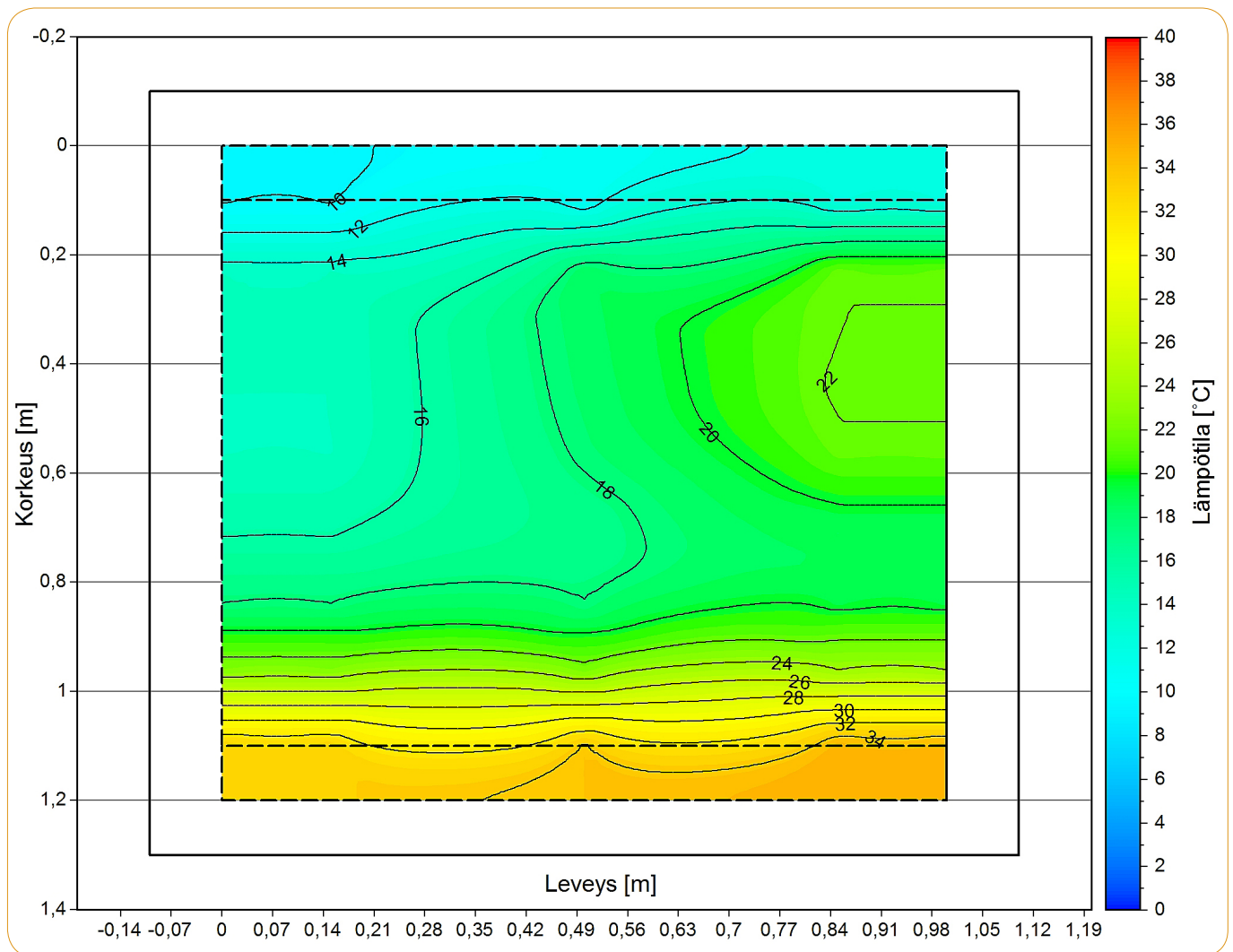


JUHA LATVALA

Konvektiivinen lämmönsiirtyminen ratapenkereessä



Juha Latvala

Konvektiivinen lämmönsiirtyminen ratapenkereessä

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2015

Liikennevirasto
Helsinki 2015

Kannen kuva: Juha Latvala

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-081-0

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Juha Latvala: Konvektiivinen lämmönsiirtyminen ratapenkereessä. Liikennevirasto, kunnosapito-osasto. Helsinki 2015. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2015. 115 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-081-0.

Avainsanat: konvektio, lämmönsiirtyminen, ratapenger, routa, kiviaines

Tiivistelmä

Nykyaikaisen radan tasaisuusvaatimukset ovat suuret, ja routiminen aiheuttaa ongelmia Suomen radoilla. Ratapenkereiden alusrakenteina käytetään nykyään soran sijasta myös kalliomurskettä, jonka lämpötekniinen käyttäytyminen on erilaista luonnon lajittamiin materiaaleihin verrattuna. Maailmalla aiemmin tehdyissä tutkimuksissa on huomattu, että hyvin karkearakeisissa kalliomurskeissa voi tapahtua konvektiivista lämmönsiirtymistä, eli ilma pääsee liikkumaan rakeiden välissä kuljettaen lämpöä. Tämä voi lisätä merkittävästi lämmönsiirtymistä penkereestä ulospäin, jolloin routaraja voi tunkeutua syvemmälle kuin tavanomaisilla mitoitusmenetelmillä on laskettu.

Luontaista konvektiota on tutkittu maailmalla, ja sen arvioimiseen on olemassa laskentamalli. Laskennallinen analyysi ei ole kuitenkaan ongelmaton, sillä malli sisältää karkearakeisille materiaaleille vaikeasti määritettävän suureen, sisäisen läpäisevyyden, joka saadaan materiaalin vedenläpäisevyyden avulla. Muualla tehdyt tutkimukset eivät suoraan sovellu Suomessa käytettäviin ratapenger materiaaleihin, ja siksi tutkimusta varten tehtiin oma testilaitteisto laboratorioon. Laboratoriossa testattiin kolme rakeisuudeltaan erilaista kalliomurskemateriaalia, jotka olivat 31,5/63 mm raidesepeli, 5/16 mm kalliomurske ja 0/63 mm eristys-välikerros-materiaali.

Laboratoriossa testatussa raidesepelissä tapahtui merkittävää luontaista konvektiota ilman välityksellä. Jos väliaine oli kostea ilmaa tai vettä, konvektio oli mahdollinen pienemmillä lämpötilaeroilla. Eristys-välikerros materiaalissa ei tapahtunut ilman välityksellä merkittävää konvektiota, mutta kun vettä lisättiin näytteeseen, materiaalin lämmönjohtavuus muuttui huomattavasti konvektion takia. Vastaava ilmiö oli havaittavissa myös 5/16 mm materiaalissa, mutta vaikka vettä lisättiin, lämmönjohtavuus ei kasvanut merkittävästi suuremmaksi.

Tutkimuksessa käsiteltiin myös maastokohdetta, josta oli saatavilla ratapenkereen lämpötiladataa. Lämpötiladatan perusteella voitiin arvioida ratapenkereissä esiintyviä lämpötilaeroja. Hipissä Seinäjoella sijaitsevan koekohteen tulosten perusteella sorasta ja kalliomurskeesta rakennetut ratapenkereet poikkesivat lämpötekniisesti toisistaan, mutta luontaisen konvektion mahdollisuutta ei voitu todistaa mutta ei myöskään täysin sulkea pois.

Työn lopputuloksena voidaan arvioida, että kalliomurskeesta tuotettu radan eristys-välikerros materiaali voi ratapenkereessä toteutuissa olosuhteissa mahdollistaa luontaisen konvektion, mikäli se on rakeisuudeltaan lähellä nykyohjeistuksen mukaista karkea- ja tasarakeisinta tilannetta. Materiaalin mahdollinen lajittuminen lisää tätä konvektioalttiutta.

Juha Latvala: Konvektiv värmeöverföring i banvallar. Trafikverket, drift och underhåll. Helsingfors 2015. Trafikverkets undersökningar och utredningar 20/2015. 115 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-081-0.

Sammanfattning

Stora krav på jämnhet ställs på moderna banor, och tjälbildningen orsakar problem på banorna i Finland. Som underbyggnad i banvallar använder man i dag vid sidan av grus även berggrus, vars värmetekniska egenskaper avviker från naturliga material. I tidigare studier från olika håll i världen har man lagt märke till att det kan förekomma konvektiv värmeöverföring i mycket grovkornigt berggrus, dvs. luften rör sig mellan kornen och överför värme. Detta kan i hög grad öka värmeöverföringen utåt från vallen, och då kan tjälgränsen tränga sig djupare ner än vad sedvanliga dimensioneringskalkyler ger vid handen.

Naturlig konvektion har studerats ute i världen, och det finns en kalkylmodell för fenomenet. Kalkylmässig analys medför dock en del problem, eftersom modellen innehåller en svårdefinierbar variabel för grovkorniga material, nämligen intern genomtränglighet, som erhålls genom värdet på materialets vattengenomtränglighet. De studier som gjorts i andra länder är inte direkt tillämpliga på de banvallsmaterial som används i Finland, och därför utvecklade man egen testutrustning i laboratoriet. I laboratoriet testade man tre berggrusmaterial med varierande kornighet: 31,5/63 mm bangrus, 5/16 mm berggrus och 0/63 mm isolerings- och mellanlagermaterial.

I laboratorietesten uppvisade bangruset betydande naturlig konvektion via luften. Om mellanmaterialet var fuktig luft eller vatten kunde konvektion uppstå med lägre temperaturskillnader. I isolerings- och mellanlagermaterialet upptäcktes ingen betydande konvektion via luften, men när vatten tillsattes i provet, ändrades materialets värmekonduktivitet betydligt på grund av konvektion. Motsvarande fenomen observerades också hos 5/16 mm material, men även om vatten tillsattes ökade värmekonduktiviteten inte nämnvärt.

I studien granskades även ett terrängobjekt om vilket det fanns temperaturdata om banvallen. Utifrån temperaturdata kunde man estimerat temperaturskillnader i banvallarna. Utifrån resultaten från provobjektet i Hippi i Seinäjoki avvek banvallarna konstruerade av grus respektive berggrus värmetekniskt från varandra, men möjligheten till naturlig konvektion kunde varken bevisas eller helt uteslutas.

Utifrån studien kan man konstatera att isolerings- och mellanlagermaterial i berggrus kan under förhållanden som förekommer i banvallar möjliggöra naturlig konvektion, om materialets kornighet ligger nära grovheten och jämnheten hos det material som är förenligt med nuvarande anvisningar. Eventuell segregation av materialet kan öka risken för konvektion.

Juha Latvala: Convective heat transfer in railway embankment. Finnish Transport Agency, Maintenance Department. Helsinki 2015. Research reports of the Finnish Transport Agency 20/2015. 115 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-081-0

Summary

Modern track evenness demands are high which is why frost heave causes considerable problems in Finland. Nowadays railway ballast and sub-ballast are often of crushed rock whose thermal performance differs from that of the traditional gravel. Many studies around the world have found that convective heat transfer may occur in very coarse crushed rock aggregate. This can lead to increased heat transfer from the embankment which allows frost to penetrate deeper than normal calculation methods predict.

Many studies have been conducted on free convection internationally, and there is a calculation model for estimating its probability. However, the calculation involves problems because the calculation model considers intrinsic permeability, which is difficult to define for coarse materials. Intrinsic permeability can be calculated from water permeability. Unfortunately, water permeability is difficult to determine for coarse materials. The results of research conducted abroad are not as such applicable in determining convection in Finnish railway embankments because of different grain sizes. Therefore, new laboratory test apparatus was built. Three materials of different gradation were tested in the lab: 31.5/63 mm ballast aggregate, 5/16 mm crushed rock aggregate, and 0/63 mm sub-ballast material.

Strong natural convective heat transfer via air occurred in the railway ballast tested in the lab. If the medium was moist air or water, convection could occur at smaller temperature differences. No significant convection occurred in the crushed rock and sub-ballast material via convection, but when water was added to the sample, thermal conductivity of the material increased significantly due to convection. The same phenomenon was observed in the case of 5/16 mm crushed rock, but adding of water did not increase thermal conductivity significantly.

Two actual railway embankments on which temperature data was available were also tested. The data allowed estimating the temperature differences in the embankments. Based on the results from the test embankments in Seinäjoki, Finland, the thermal performance of the gravel embankment and crushed rock embankment differed, but the possibility of natural convection could not be proved nor completely excluded.

The study showed that crushed rock ballast and sub-ballast material may allow natural convection to occur if its grain size distribution is close to the most coarse- and even-grained materials allowed by the current guidelines. Sorting of the material in the building phase can increase this susceptibility to convection.

Esipuhe

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden yksikössä. Työ kuuluu Liikenneviraston rahoittamaan Elinkaaritehokas rata -tutkimushankkeeseen. Tutkimuksen tarkoitus on ollut selvittää kalliomurskeesta rakennettujen ratapenkereiden mahdollista konvektiivista lämmönsiirtymistä ja siitä mahdollisesti aiheutuvia routaongelmia.

Työtä ovat ohjanneet Tampereen teknillisestä yliopistosta professori Antti Nurmikolu ja diplomi-insinööri Heikki Luomala. Liikenneviraston yhteyshenkilönä on toiminut Erkki Mäkelä.

Helsingissä huhtikuussa 2015

Liikennevirasto
Kunnossapito-osasto

Sisällysluettelo

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT	9
1 JOHDANTO	10
1.1 Tutkimuksen tausta	10
1.2 Luonnollisen konvektion tutkiminen	10
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	11
2 LÄMMÖN SIIRTYMINEN MAASSA JA ROUTAMITOITUS.....	12
2.1 Lämmön siirtyminen maassa	12
2.1.1 Johtuminen.....	13
2.1.2 Säteily	13
2.1.3 Konvektiivinen lämmönsiirtyminen.....	15
2.2 Ratapenkereen routamitoitus	15
2.2.1 Routamitoitusperiaatteet	15
2.2.2 Materiaalivaatimukset alusrakenteessa	22
3 LUONNOLLINEN KONVEKTIO	26
3.1 Konvektio fysikaalisena ilmiönä	26
3.1.1 Rayleighin luku.....	27
3.1.2 Materiaalin sisäinen läpäisevyys	28
3.1.3 Nusseltin luku.....	29
3.2 Konvektiosta tehdyt tutkimukset	30
4 KONVEKTIOTUTKIMUS LABORATORIOSSA	39
4.1 Tutkimusohjelma.....	39
4.2 Tutkimuslaitteisto ja sen rakenne	39
4.2.1 Konvektiolaitteen perusidea	39
4.2.2 Laitteen rakennusprosessi ja rakenne	40
4.2.3 Laitteiston toiminta kokeissa	52
4.3 Testattavat materiaalit.....	52
4.4 Lämpöhävikkilaskelma	59
4.5 Laboratoriokokeet ja testausprosessi.....	63
5 LABORATORIOTUTKIMUSTEN TULOKSET JA NIIDEN ANALYSOINTI	66
5.1 Raidesepelinäytteen tutkimustulokset.....	66
5.1.1 Ylälämmitystilanne.....	67
5.1.2 Alalämmitys kuivalla näytteellä	68
5.1.3 Alalämmitys kostealla näytteellä.....	68
5.1.4 Alalämmitys kostealla näytteellä ja korotetulla yläpinnalla.....	70
5.2 5/16 mm kalliomurskenäytteen tutkimustulokset	74
5.2.1 Ylälämmitystilanne.....	74
5.2.2 Alalämmitys kuivalla näytteellä	75
5.2.3 Alalämmitys kostealla näytteellä.....	76
5.3 Eristys- ja välikerrosmateriaalin tutkimustulokset	78
5.3.1 Ylälämmitystilanne.....	78
5.3.2 Alalämmitystilanne kuivalla näytteellä	79
5.3.3 Alalämmitystilanne kostealla näytteellä	80
5.4 Lämpöhävikkilaskelman avulla korjatut tulokset ja näytteen sisäiset lämmönjohtavuudet	82
5.4.1 Raidesepeli.....	82

5.4.2	Kalliomurske 5/16 mm	84
5.4.3	EV-materiaali	86
5.5	Materiaalien väliset erot.....	88
5.6	Laskennallinen analyysi	88
6	KONVEKTIO TUTKIMUS MAASTOKOhteissa	98
6.1	Hipin koekohte ja perustiedot	98
6.2	Koekohteen mittaustulokset.....	102
6.3	Johtopäätökset ja analysointi.....	108
7	LOPPUPÄÄTELMÄT	111
7.1	Yhteenvedo tuloksista	111
7.2	Kehitysehdotuksia tulosten perusteella.....	112
7.3	Jatkotutkimustarpeet.....	113
	LÄHTEET	114

Termit ja niiden määritelmät

Latinalaiset kirjaimet ja lyhenteet

A	Pinta-ala
a_m	Lämmön hajaantuminen (diffusivity) huokoiselle materiaalille
c	Ominaislämpökapasiteetti
C_u	Raekokosuhde
d_m	Tarkasteltavan lajitteen osuus materiaalissa
dT/dx	lämpötilagradientti
E	Energia
F	Pakkassumma
g	Putoamiskiihtyvyys
H	Korkeus
h	Kerroksen paksuus
K	Sisäinen läpäisevyys
k_d	Darcyn vedenläpäisevyyskerroin
k_r	Routaantumiskerroin
l	Etäisyys / pituus
n	Huokoisuus
Nu	Nusseltin luku
P	Lämmitysteho
p	Tarkasteltavan lajitteen osuus materiaalissa %
q	Lämpövuoto
Ra	Rayleighin luku
Ra_{cr}	Kriittinen Rayleighin luku
S	Materiaalin ominaispinta-ala
T	Lämpötila
ΔT	Lämpötilaero
z_f	Roudan syvyys

Kreikkalaiset kirjaimet

α	Väliaineen lämpölaajenemiskerroin
α_m	Partikkelien muodosta riippuva parametri
λ	Lämmönjohtavuus
λ_{ef}	Tehollinen lämmönjohtavuus
μ	Väliaineen dynaaminen viskositeetti
ν	Väliaineen kinemaattinen viskositeetti
σ	Säteilyvakio
ρ	Tiheys

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden yksikön ratatutkimusryhmä on tehnyt useamman vuoden ajan tutkimusta ratapenkereiden routaongelmista. Tutkimusten perusteella on herännyt kysymys siitä, miten kalliomurskeesta rakennettu ratapenger poikkeaa lämpöteknisiltä ominaisuuksiltaan jo pitkään käytetyistä sorapenkereistä. Ratahallintokeskus on myös julkaissut kirjallisuusselvityksen A4/2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa, jossa konvektio on nimetty yhdeksi jatkotutkimuskohteeksi (Nurmikolu 2004). Tässä tutkimuksessa on tarkoitus selvittää, voisiko ratapenkereessä tapahtuva luonnollinen konvektio aiheuttaa routarajan tunkeutumisen oletettua syvemmälle. Konvektiossa lämpö siirtyy välittäjäaineen mukana, jolloin lämmönsiirtyminen on selvästi suurempaa kuin pelkästään johtamalla ja säteilemällä. Lämmönsiirtokyvyn kasvu riippuu myös välittäjäaineesta (esimerkiksi vesi tai ilma). Syksyllä ja talvella ilmojen jäähtyttyä penkereen ja ilman välille muodostuu lämpötilaero, joka saattaa saada ilman liikkumaan tiheyserojen takia karkearakeisesta materiaalista koostuvassa rakenteessa. Mikäli konvektiota tapahtuu ratapenkereissä, sillä on oletettavasti suuri merkitys kalliomurskerakenteisten penkereiden routaongelmiin, koska penkereen ja sen alla olevan maaperän lämpötila voi laskea oletettua nopeammin.

Konvektio jaetaan fysiikan lakien perusteella kahteen osaan, vapaaseen/luonnolliseen konvektioon sekä pakotettuun konvektioon. Vapaassa konvektiossa ilma liikkuu luonnollisten lämpötilaerojen synnyttämien väliaineen tiheyserojen takia. Pakotetussa konvektiossa esimerkiksi tuuli voi puhaltaa ilmaa paineella rakenteen läpi (Yong & Freedman 2000). Tämä tutkimus käsittelee lähinnä vapaata konvektiota. Tutkimuksesta on myös rajattu pois RHK A4/2004 kirjallisuusselvityksessä esitetyjä muita mahdollisia konvektion eri muotoja, jotka liittyvät veden liikkumiseen rakenteessa. Nurmikolun (2004) raportissa veden välityksellä tapahtuvassa konvektiossa lämpö voi myös siirtyä esimerkiksi sadeveden valumisen, pohjaveden virtausten tai routimisen yhteydessä tapahtuvan veden imeytymisen vaikutuksesta. Tässä tutkimuksessa otetaan kuitenkin huomioon vesihöyryn liikkuminen, sillä sen rooli voi olla merkittävä suuremman ominaislämpökapasiteetin johdosta.

1.2 Luonnollisen konvektion tutkiminen

Konvektion tutkimista varten rakennettiin oma laitteisto, jonka avulla voidaan mitata lämmönjohtavuutta sekä lämpötiloja näytteessä. Laitteisto on eristetty laatikko, jossa noin 1 m³ kokoista maa-ainesnäytettä voidaan jäähtyä ja lämmittää hallitusti. Ylhäällä ja alhaalla on 100 mm paksuiset betoniset lämmönsiirtolaatat, joiden näytteen puoleisilla pinnoilla on lämpöä hyvin johtavat alumiinilevyt. Betonilaatoissa on useita lämpötila-antureita, jäähdytysputket, lämmitysvastukset sekä alalaatassa myös lämpövuuanturit. Konvektion havaitseminen perustuu ensisijaisesti oletukseen, että kun näytettä lämmitetään yläpinnasta ja jäähdytetään alapinnasta, ei tiheyserojen takia tapahtuvaa väliaineen liikettä pääse muodostumaan. Tällä tavalla määritetään materiaalin johtumisen ja säteilyn avulla tapahtuva lämmönjohtavuus. Kun lämmitys ja jäähdytys käännetään toisinpäin, konvektion pitäisi lähteä liikkeelle materiaalista ja olosuhteista riippuvan lämpötilaeron ylityksen jälkeen. Tällöin tehollinen lämmön-

johtavuus kasvaa ja erotus edellä määritettyyn lämmönjohtavuuteen kuvaa konvektiivisen lämmönsiirtymisen suuruutta.

Ensisijaisesti tarkoitus on tutkia konvektion suuruutta tehollisen lämmönjohtavuuden avulla, mutta näytteessä on myös lukuisia lämpötila-antureita, joiden perusteella voidaan arvioida lämmön jakautumista näytteessä ja löytää mahdolliset virtaukset. Tämä toimii myös varmistuksena. Kun lämpö siirtyy johtamalla ylhäältä alaspäin, lämpötilojen pitäisi olla tietyllä syvyydellä suhteellisen tasaisia eri puolilla näytettä ja muuttua varsin lineaarisesti syvyyden mukaan. Alhaaltapäin lämmitettäessä voidaan olettaa, että konvektion tapahtuessa näytteeseen muodostuu ”lämpötilapyörteitä” eivätkä kerrokset ole lämpötilojen suhteen homogeenisiä. Periaatteessa samalla korkeustasolla olevien lämpötilaerojen avulla voidaan havaita, milloin materiaalissa alkaa tapahtua ilman virtausta.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, missä olosuhteissa konvektio on maaperässä mahdollista. Työssä käytettävät maa-ainenäytteet pyritään valitsemaan siten, että niitä löytyy Suomen rataverkon alusrakenteista, jolloin tutkimuksen lopputuloksena pitäisi olla varsin realistinen selvitys siitä, millainen on konvektion osuus rataverkon routaongelmissa. Tarkoituksena on saada selville, millaisella lämpötilaerolla konvektio lähtee tietystä maa-aineksessa käyntiin ja kuinka voimakkaasti se vaikuttaa maa-aineksen teholliseen lämmönjohtavuuteen. Tutkimuksen perusteella on myös tarkoitus tarkastella Suomen rataverkolla käytettävän routamitoituksen toimivuutta erityisesti tästä näkökohdasta ja tarvittaessa ehdottaa muutoksia, mikäli konvektio osoittautuu merkittäväksi lämmönsiirtymismuodoksi. Konvektion estämiseen soveltuvia keinoja pyritään myös selvittämään lyhyesti.

Käytössä on myös Tampereen teknillisen yliopiston maa- ja pohjarakenteiden yksikön keräämää mittausdataa ratapenkereen lämpötiloista ja roudan syvyyksistä. Näistä tuloksista on tarkoitus selvittää lähinnä, löytyykö maastosta sellaisia lämpötilaeroja, jotka voisivat saada aikaan painovoimaisen konvektion. Parhaiten tähän tutkimukseen soveltuu Hipin koekohde Seinäjoella, jossa on sekä sorarakenteinen että kalliomurskeesta rakennettu ratapenger ja kattava lämpötilamittaus.

Työssä on tarkoitus selvittää näytteen tiheyden ja huokoisuuden vaikutusta väliaineen liikkumiseen, koska niillä on todennäköisesti merkitystä. Lisäksi on tarkoitus selvittää, miten vesihöyry välittäjäaineena poikkeaa kuivasta ilmasta. Tätä varten laitteiston pohjalaatassa olevasta alumiinilevystä tehtiin kaukalo, jotta näytteen vesipitoisuutta pystytään lisäämään.

2 Lämmön siirtyminen maassa ja routamitoitus

2.1 Lämmön siirtyminen maassa

Lämmön siirtyminen voi tapahtua kolmella eri tavalla, jotka ovat johtuminen, säteily sekä konvektiivinen lämmönsiirtyminen. Lämmön siirtyminen maaperässä on vaikeasti selitettävä asia, sillä maan rakenne vaihtelee huomattavasti ja kyse on monimutkaisesta materiaalista, joka koostuu kiinteistä, erimuotoisista ja kokoisista partikkeleista. Nämä satunnaisesti järjestäytyneet partikkelit voivat olla joko mineraaleja tai orgaanisia aineita, ja niiden välissä on huokostilaksi kutsuttu alue. Huokostila sisältää yleensä ilmaa tai eri muodoissa olevaa vettä. Vesi voi esiintyä nesteinä, kaasuna tai jäänä. Maaperän monimutkaisen rakenteen vuoksi lämmönsiirtyminen ei ole yksiselitteistä, ja se riippuu tarkastelupaikasta sekä materiaalista. Saman materiaalin lämpötekniset ominaisuudet voivat myös muuttua merkittävästi esimerkiksi, jos vesipitoisuus muuttuu tai vesipitoinen maa-aines jäätyy. Lisäksi lämmönjohtavuuteen vaikuttaa lämpötila, tiiviys, raekoostumus ja mineraloginen koostumus. Lämmönsiirtymisongelman tarkastelua voidaan helpottaa jakamalla aihe eri osa-alueisiin, joita tutkimalla päästään lähemmäksi todellista tilannetta. Lisäksi monesti on tarpeen yksinkertaistaa maan ominaisuuksia ja erilaisia ympäristömuuttujia, jotta tarkastelu on ylipäättänsä mahdollista. (Farouki 1986; Yong & Freedman 2000)

Lämmönjohtavuus on suure, joka on tarpeen määritellä lämmön siirtymisestä puhuttaessa. Maaperän lämmönjohtavuus tarkoittaa tietyssä aikayksikössä siirtyvän lämmön määrää poikkipinta-alaa kohden tunnetulla lämpötilagradientilla (lämpötilaerolla). Tämä voidaan esittää kaavalla 2-1, jota myös Farouki (1986) on käyttänyt kirjassaan.

$$\lambda_{ef} = \frac{q}{\left(\frac{A(T_2 - T_1)}{l}\right)} \quad (2-1)$$

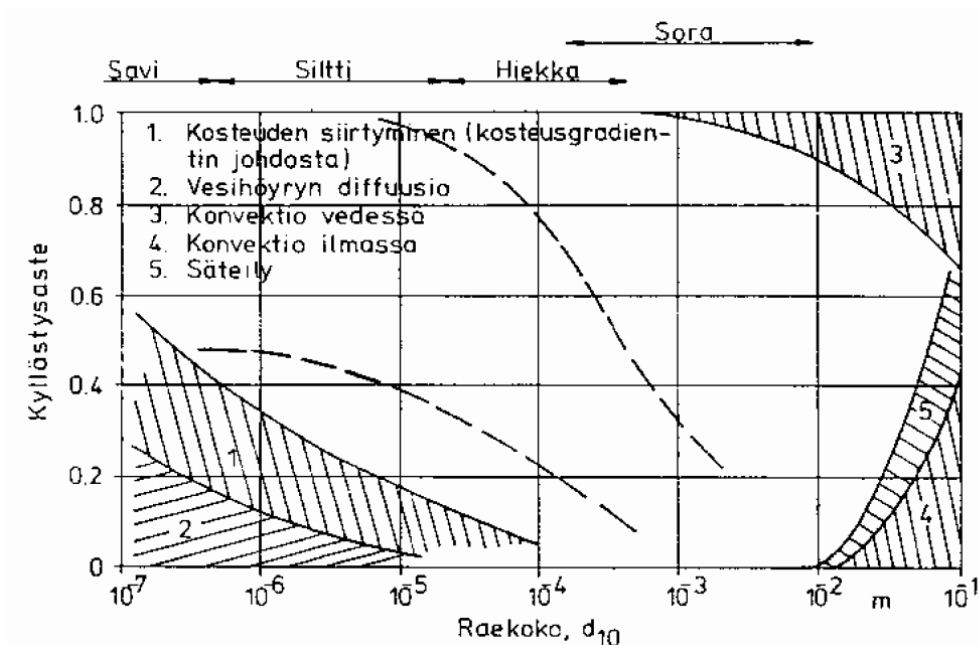
missä

- λ_{ef} = lämmönjohtavuus, [W/mK]
- q = lämpövuoto, [W/m²]
- A = pinta-ala, [m²]
- T_1 = pinnan 1 lämpötila, [°C]
- T_2 = pinnan 2 lämpötila, [°C]
- l = pinnan 1 ja 2 välinen etäisyys, [m]

On tärkeää huomata, että kun puhutaan lämmönjohtavuudesta, tarkoitetaan usein tehollista lämmönjohtavuutta (efektiivinen tai näennäinen lämmönjohtavuus) eikä pelkästään johtumalla siirtyvää lämpöä. Efektiivinen eli tehollinen lämmönjohtavuus sisältää kaikki lämmönsiirtymisen eri muodot. Selvyden vuoksi tehollisesta lämmönjohtavuudesta käytetään tästä eteenpäin merkintää λ_{ef} . Maaperän vaihtelevat ominaisuudet aiheuttavat myös sen, että mitattu lämmönjohtavuus on keskiarvo määrätylle alueelle. Tämän alueen sisällä lämmönjohtavuus voi paikoitellen vaihdella lämpötilaerojen ja maan rakenteen takia. (Farouki 1986)

2.1.1 Johtuminen

Lämpö siirtyy maaperässä pääasiassa johtumalla, sillä johtumista tapahtuu kiinteiden partikkelien välillä, huokosilmassa sekä veden kaikissa eri muodoissa. Ilmassa ja vesihöyryssä johtuminen on prosessi, jossa molekyylit törmäilevät toisiinsa. Veden nestemäisessä muodossa tapahtuu myös vastaavaa ilmiötä, joka on osittain vastuussa johtumisesta, mutta lisäksi lämpöä siirtyy myös vetysidoksien purkautumisen ja muodostumisen kautta. Näiden lisäksi lämpöenergiaa siirtyy kiteiden ja niiden hilarakenteiden kautta. Kiinteissä kideäisissä partikkeleissa, kuten kvartsissa, lämmönsiirtymistä voi havainnollistaa atomien värähtelyllä. Kuvassa 2.1 on esitetty Johansenin (1975) väitöskirjassaan esittämä kuvaaja, jossa on arvioitu eri lämmönsiirtymismuotojen mahdollisuutta määräävän rakeisuuden ja kyllästysasteen mukaan. Kuvan perusteella konvektio on mahdollinen lähinnä karkearakeisilla materiaaleilla. (Farouki 1986)



Kuva 2.1 Lämmönsiirtymismuodot eri maalajeissa. Kuten kuvasta on havaittavissa, konvektio on mahdollinen lähinnä karkearakeisilla materiaaleilla. (Johansen 1975)

Routaongelmien tutkimisen kannalta on tärkeää huomata, että jään lämmönjohtavuus on suunnilleen nelinkertainen nestemäiseen veteen verrattuna. Myös järjestäytyneen veden (oriented water) lämmönjohtavuus on suurempi kuin vapaan veden. Maapartikkelien välinen huokostila voi sisältää myös pelkästään ilmaa. Sen lämmönjohtavuus on suhteellisen merkityksetön. Johtumalla siirtyvän lämpöenergian määrä kasvaa, kun maa-aineksen kuivatiheys tai kyllästyneisyys lisääntyy. Myös rakeiden välisellä kontaktilla on merkitystä. Lämmönjohtavuuden yhtälö on edellisessä luvussa esitetyn kaavan 2-1 mukainen. (Farouki 1986)

2.1.2 Säteily

Lämmön siirtyminen säteilemällä tapahtuu ilman väliainetta, ja se on ainut mekanismi, jolla lämpö voi siirtyä tyhjiössä. Jokainen kappale lähettää energiaa sähkömagneettisena säteilynä. Säteilevän osan lämpötila on tärkein tekijä, sillä lämpövirta kasvaa absoluuttisen lämpötilan neljännessä potenssissa. Käytännössä maa-aineksessa liikkuvan lämmön kannalta säteily on yleensä varsin merkityksetön tekijä, sillä

esimerkiksi hiekassa sen osuus on alle 1 % kokonaislämmönsiirrosta normaaleissa ilmakehän lämpötiloissa. Lähes kuivassa, raekooltaan soraa muistuttavassa materiaalissa ilmiön voi jo huomata. Mielenkiintoista on, että 20 mm raekoolla Faroukin (1986) mukaan Wakao ja Kato (1969) saivat tutkimuksissaan säteilyn osuudeksi noin 10 % kokonaislämmönjohtavuudesta normaaleilla lämpötiloilla. Säteilyn merkitys näyttää siis jäävän lähinnä kuiviin, karkearakeisiin murskattuihin kiviaineksiin. Faroukin (1986) mukaan Nusselt (1957 jälkeen) on johtanut yhtälön epäjatkuvalle rakenteelle, jossa säteilyn vaikutus on otettu huomioon (kaava 2-2).

$$k = \frac{L_s + L_a}{\frac{L_s}{\lambda_s} + \frac{1}{\frac{\lambda_a}{L_a} + 4\sigma T^3}} \quad (2-2)$$

missä

T = absoluuttinen lämpötila, [°C]

σ = säteilyvakio Stefanin laissa, yleensä $4,96 \cdot 10^{-8} \text{erg/cm}^2$

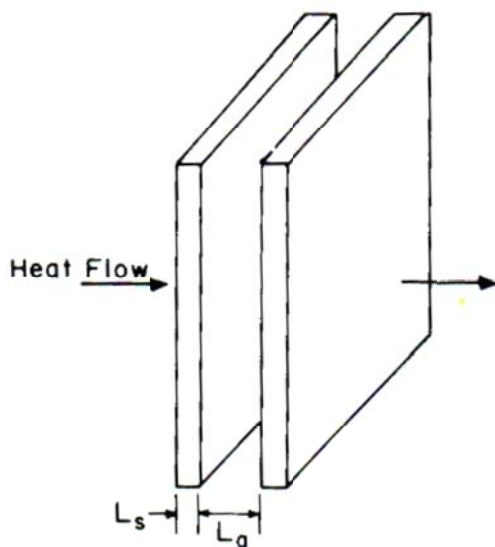
λ_a = ilman lämmönjohtavuus, [W/mK]

λ_s = kiinteän aineksen lämmönjohtavuus, [W/mK]

L_s = Levyn paksuus, [m]

L_a = Levyjen välinen välimatka, [m]

Kuvassa 2.2 on havainnollistettu Nusseltin mallia. Mallin mukaan epäjatkuvan rakenteen runko koostuu sarjasta rinnakkaisia kiinteitä levyjä, joiden välissä on ilmaa. Faroukin (1968) mukaan Van Rooyen ja Winterkorn (1957) sovelsivat mallia käytäntöön laskeakseen lämmönjohtavuutta kuivilla maa-aineksilla. Tämä ei kuitenkaan toiminut odotetusti, sillä heidän saamansa arvot olivat noin yksi viidesosa mitatuista arvoista. Van der Held (1952) havaitsi, että lämmönjohtavuudet mitattuna lyhytaikaisella menetelmällä olivat suurempia kuin pysyvän tilanteen mittauksissa. Eron syyksi arveltiin säteilyn osuutta, joka osoittautui myöhemmässä (1955) tutkimuksessa kasvavan lineaarisesti näytteen paksuuteen nähden.



Kuva 2.2 Nusseltin malli lämmönsiirtymiselle epäyhtenäisessä rakenteessa. (Van Rooyen and Winterkorn 1957 Faroukin 1968 mukaan).

2.1.3 Konvektiivinen lämmönsiirtyminen

Konvektio tarkoittaa lämmön siirtymistä välittäjäaineen mukana. Vapaassa konvektiossa välittäjäaine lähtee liikkumaan lämpötilaeroista johtuvien tiheyserojen takia. Korkeammassa lämpötilassa olevan väliaineen tiheys on yleensä pienempi verrattuna kylmempään lämpötilaan, jolloin väliaineeseen muodostuu noste, joka saa väliaineen liikkeelle. Tällöin virtauksien takia välittäjäaine myös sekoittuu ja johtumalla tapahtuva lämmönsiirtymä tehostuu. Yleensä konvektion osuus maaperässä on merkityksellön, koska se vaatii riittävän ison huokostilavuuden, jotta ilma tai vesi pääsee kulkemaan. Käytännössä hienorakeisimmilla maalajeilla (kuten hiekalla) konvektiota ei juurikaan tapahdu, mutta tilanne on toinen karkearakeisemmillä materiaaleilla, kuten vaikkapa kalliomurskeilla. Hyvänä esimerkkinä konvektion mahdollisista vaikutuksista Farouki (1986) mainitsee kirjassaan Martynovin (1959) havainneen epätavallisen syvälle (10 m) ulottuneen kausiluonteisen jäätyneen, joka johtui ilman konvektiosta maaperän halkeamissa. Konvektiotutkimuksen kannalta mielenkiintoinen tapaus on Norjassa 1990-luvulla esiintynyt routimisongelma, joka Jerbnaneverketin (1999) raportin mukaan johtui käytetystä louhemateriaalista. Myöhemmin selvisi, että kyseisessä Sprengestein-nimellä kutsutussa materiaalissa tapahtui konvektiivista lämmönsiirtymistä, jota ei ollut otettu huomioon routamitoituksessa.

Myös pakotettu konvektio on lämmön siirtymistä välittäjäaineen kautta, mutta aineen liikkumisen aiheuttaa ulkopuolinen voima. Ulkopuolinen voima voi olla esimerkiksi tuuli tai pumppu (*Yong & Freedman 2000*). Maaperässä tapahtuva pakotettu konvektio voi olla muun muassa pohjaveden virtauksen aiheuttamaa, jolloin vesi virtaa paine-erojen takia maahuokosissa (Farouki 1986). Johansen (1975) on tehnyt kokeita tuulen vaikutuksesta siirtyvästä lämmöstä, ja hän havaitsi, että jopa pienillä tuulenopeuksilla lämmönjohtavuus kasvoi huomattavasti karkeassa kiviaineksessa. Hän myös epäili, että vastaava ilmiö voi tapahtua ilman lumipeitettä kylmänä vuodenaikana, jolloin lämpöhukka maaperästä voi olla hyvin voimakasta.

Välittäjäaineella on merkittävä osuus konvektiossa. Ilmiöön voi liittyä myös höyrystyminen sekä kondensoituminen, jolloin lämpöä siirtyy latenttilämpönä paikasta toiseen. Höyrystymisen voi saada aikaan lämpötilan paikallinen nousu, jolloin (vesi)höyry leviää ja luovuttaa lämpönsä toisaalle. Tällöin lämpöä voi siirtyä huomattavia määriä (*Farouki 1986*). Konvektiota ilmiönä tarkastellaan lähemmin luvussa 3.

2.2 Ratapenkereen routamitoitus

2.2.1 Routamitoitusperiaatteet

Teoria

Suomen ilmasto tekee radan rakentamisesta erityisen haastavan, sillä talvella routa voi tunkeutua syvälle maahan, mutta kesällä jäätynyt maa sulaa. Hallitsemattomana toistuva rakenteen jäätyminen ja sulaminen aiheuttaa epätasaisuuksia sekä rakenteen vaurioitumista. Ratapenkereen sulamispainumista on valmistunut Lauri Metsovuoren diplomityö vuonna 2013. Routamitoituksen yleinen tarkoitus on estää, ettei suunniteltavassa kohteessa routa pääse aiheuttamaan ongelmia kohteen normaalille toiminnalle tai kestävyydelle.

Mitoittaminen voidaan jakaa pääpiirteittään kahteen eri tapaan. Routan syvyyden hallintaan perustuvissa menetelmissä ajatuksena on, että rakenteessa ei ole routivia

materiaaleja syvyyalueella, jonka lämpötila laskee pakkasen puolelle. Toinen menetelmä on sallia rakenteelle tietty routanousu, jonka suuruutta pyritään mitoittamaan. Routanousumitoitus ei kuitenkaan ole hyvä vaihtoehto rautateiden routamitoitukseen, koska tasaisuusvaatimukset ovat erittäin korkeat eikä epäjatkuvuuskohtia saisi olla. Ratapenkereet mitoitetetaan siis käytännössä niin, että routa ei tunkeudu routiviin maakerrokseen asti. Penkereen korkeus ja muoto tuovat tähän oman haasteensa, sillä lämpöä voi siirtyä myös penkereen sivuja pitkin. (Nurmikolu & Kolisoja 2002)

Routamitoitukseen liittyvät vahvasti myös tilastot ja todennäköisyyslaskenta, sillä talvet vaihtelevat eikä vuoden pakkassumma pysy vakiona. Yleensä ei ole taloudellisesti kannattavaa mitoittaa rakennetta niin, ettei se koskaan roudi, ellei se ole välttämätöntä kohteen kannalta. Kyse on siis tilastollisesta todennäköisyydestä, jossa mitoitukselle hyväksytään tietty riski routimiseen. On kohteesta ja routimisen vaikutuksista kiinni, millainen epävarmuus voidaan sallia. Suomessa rautateillä käytetään mitoitustapana kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää, jolloin routiminen on harvinaista, mutta pitkällä ajanjaksolla myös mahdollista (Nurmikolu & Kolisoja 2002).

Roudan syvyyden laskentaan perustuvia menetelmiä on käsitelty paljon erilaisissa routaan liittyvissä tutkimuksissa sekä töissä. Konvektiotutkimuksen kannalta mielenkiintoisin työ on Nurmikolun ja Kolisojan vuonna 2002 tekemä Ratarakenteen routasuojaus - julkaisu, jossa mitoitustapana on käsitelty rautatien kannalta ja jonka tuloksena on julkaistu nykyiset ratasuunnittelussa käytetyt mitoitustapana. Maan jäätyminen perustana voidaan pitää energian häviämättömyyden lakia, jonka mukaan energia ei katoa eikä tule tyhjästä. Nurmikolun ja Kolisojan työssä esitetty energiataseyhtälö voidaan lausua kaavan 2-3 muodossa.

$$E_{out} = E_{in} + E_g - E_{st} \quad (2-3)$$

missä

- E_{out} = tasealueelta ulos tuleva energia
- E_{in} = tasealueelle sisään menevä energia
- E_g = tasealueen sisälle vapautuva energia
- E_{st} = tasealueen sisään varastoituva energia

Roudan syvyyden mitoitustapana ovat muun muassa Neumannin teoria, Stefanin menetelmä, Rucklin menetelmä, Berggrenin menetelmä Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin menetelmä, Beskowin menetelmä, Skaven–Haugin–Watzingerin menetelmä. Menetelmien tarkka läpikäynti ei ole tässä työssä tarpeen, sillä ne löytyvät hyvin esiteltyinä esimerkiksi jo aiemmin mainitusta Nurmikolun ja Kolisojan 2002 ilmestyneestä Ratarakenteen routasuojaus -julkaisusta. Tärkeintä on tässä yhteydessä huomata, että kaikissa menetelmissä esiintyy jossain muodossa λ , jota käytetään kuvaamaan maan lämmönjohtavuutta. Menetelmissä tarvitaan lämmönjohtavuutta sekä sulasta että jäätyneestä maasta. Jos lämmönjohtavuuden arvot ovat väärät, ne vaikuttavat mitoituksen onnistumiseen. Myös kenttämittausten perusteella on pyritty löytämään malleja routamitoitukseen tavalla, jossa etsitään roudan syvyyden ja pakkassumman neliöjuuren välistä yhteyttä kaavan 2-4 mukaan.

$$z_f = k_r \sqrt{F} \quad (2-4)$$

missä

k_r	= routaantumiskerroin , $m/\sqrt{h^\circ C}$
z_f	= roudan syvyys
F	= pakkassumma

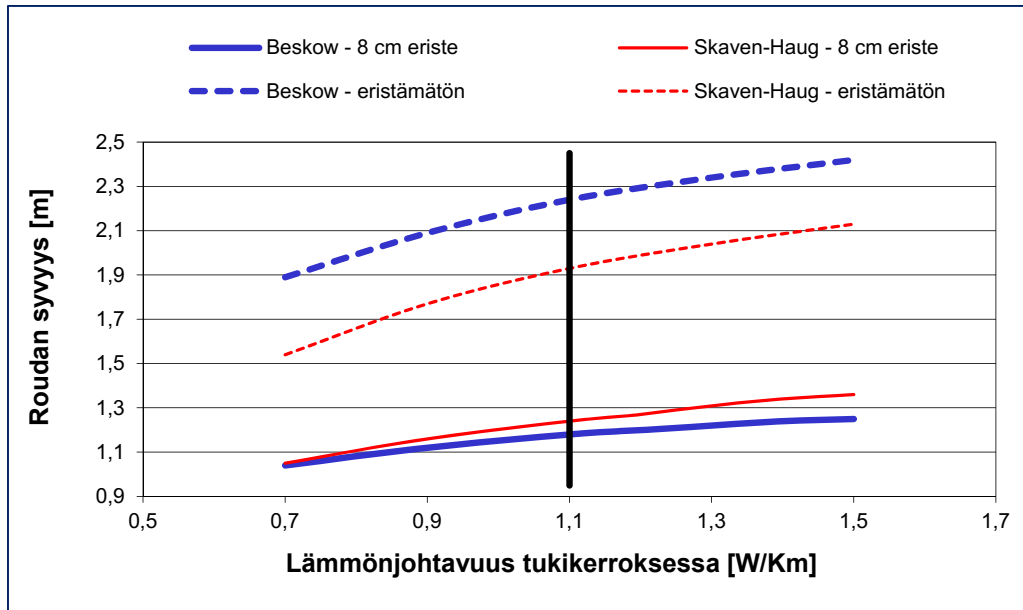
Tämä menetelmä ottaa huomioon kaikki lämpövirtauksen osatekijät, mutta se pätee valitettavasti vain tarkastelupaikalla ja sen läheisyydessä samanlaisissa olosuhteissa olevissa tilanteissa. Tämä malli voi ottaa huomioon konvektion, mikäli sitä tapahtuu mittausolosuhteissa.

Suomen ratapenkereiden routamitoitus pohjautuu kahteen menetelmään, yhdistettyyn Watzingerin, Kindemin, Michelsenin ja Beskowin menetelmään sekä Skaven-Haugin-Watzingerin menetelmään. Menetelmät poikkeavat toisistaan merkittävästi lähinnä routarajalle virtaavan sulan maan jäähtymislämmön arvioinnissa. Skaven-Haugin menetelmässä käytetty jäähtymislämmön arviointi perustuu empiirisiin mittauksiin ja ilmastoparametreihin. Beskowin menetelmässä (yhdistetty menetelmä) jäähtymislämpö lasketaan Fourierin lain mukaan lämpötilagradienttiin perustuen. Selvityksessä on päädytty käyttämään taulukon 2.1 mukaisia parametreja. (Nurmikolu & Kolisoja 2002)

Taulukko 2.1 Roudansyvyyteen vaikuttavien parametrien arvoja kirjallisuusselvityksen perusteella (Nurmikolu & Kolisoja 2002)

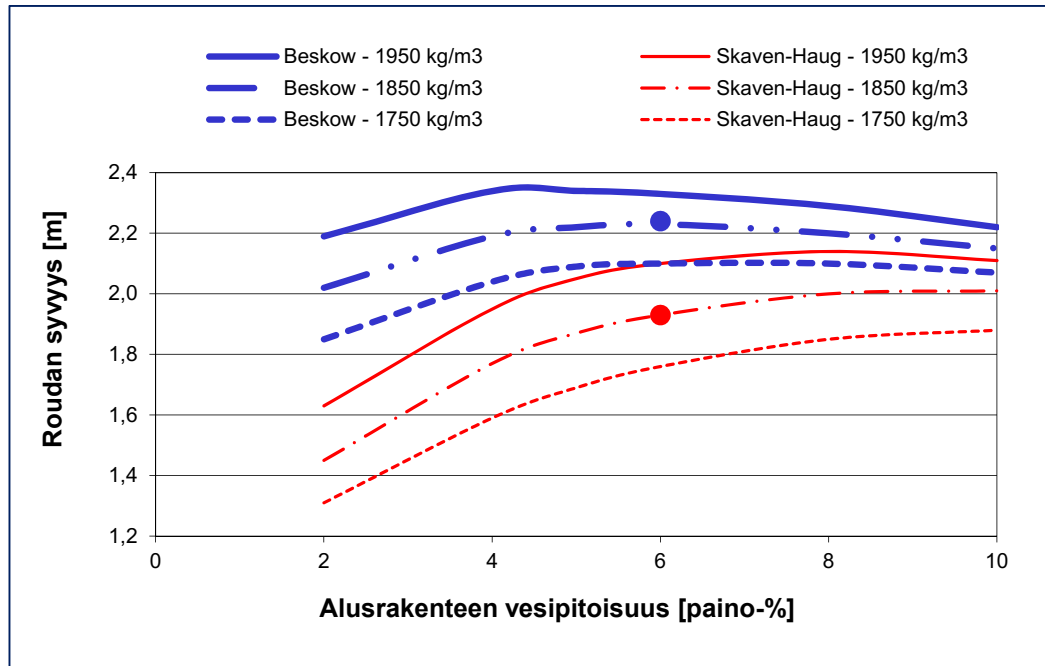
Parametri	Tukikerros	XPS-routalevy	Alusrakenne
d [m]	0,55		
w [p. %]	2	10 [til. %]	6
ρ_d [kg/m ³]	1600	40	1850
λ_f [W/Km]	1,1	0,050	1,7
λ_u [W/Km]		1,5	
S [-]		0,7	

Samassa julkaisussa on käsitelty myös tämän työn kannalta tärkeää asiaa: lämmönjohtavuuden vaikutusta roudan syvyyteen jo aiemmin mainituilla mitoitusten menetelmillä. Kuvassa 2.3 on tarkasteltu tukikerroksen lämmönjohtavuuden merkitystä roudan syvyyteen nähden. Tarkastelu on tehty Tampereen ilmasto-olosuhteiden mukaan taulukon 2.1 arvoilla. Routalevyn paksuudesta on vähennetty 10 mm kuvastamaan sepelin aiheuttamaa kokoonpuristumaa. Pakkasmääränä on käytetty kerran 50 vuodessa toistuvaa ilman pakkasmäärää.



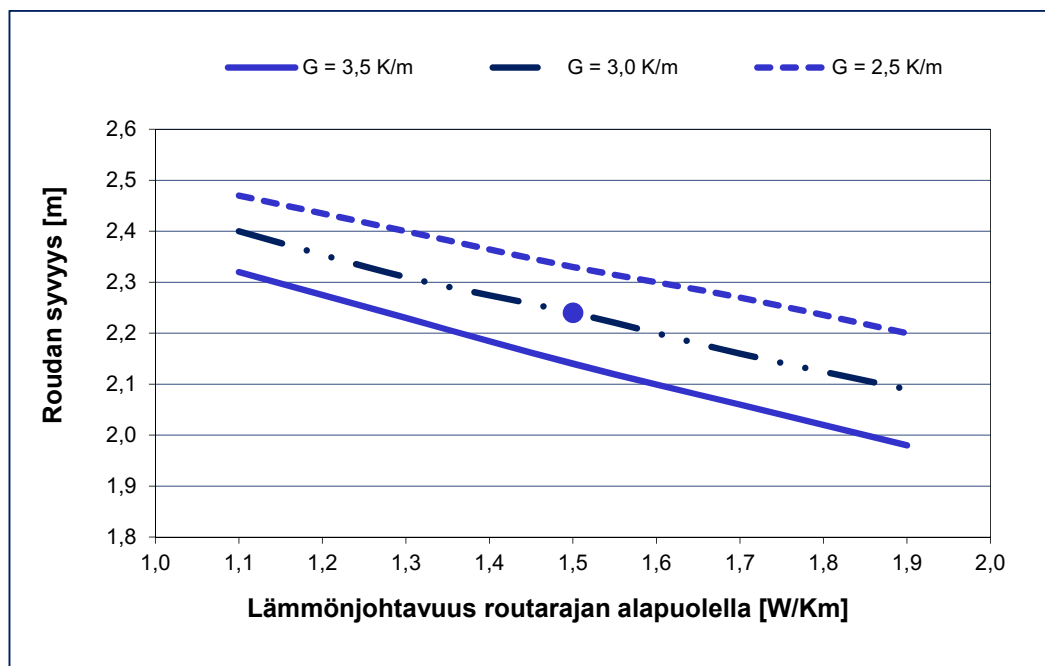
Kuva 2.3 Roudansyvyyslaskelmien herkkyytarkastelu tukikerroksen lämmönjohtavuuden mukaan. (Nurmikolu & Kolisoja 2002)

Samassa yhteydessä alusrakenteen materiaaliparametreille on tehty herkkyytarkastelu, sillä vesipitoisuus, kuivatiheys ja lämmönjohtavuus vaikuttavat mitoitukseen. Tähän liittyy myös kalliomurskeille määrätty 15 % paksuuskorotus, joka on esitetty myös RATO 3:ssa. Mikäli kalliomurskeen lämmönjohtavuus riippuu vesipitoisuudesta ja kuivairtoteheydestä samalla tavalla kuin karkearakeisilla luonnonmateriaaleilla, raportissa päädytään tulokseen, että 15 % korotus ei johda alimitoitukseen. Vesipitoisuuden vaikutusta on selvitetty kuvassa 2.4, jossa on tarkasteltu kahdella mitoitusmenetelmällä teoreettista roudan syvyyttä eri vesipitoisuuksilla ja materiaalin irtotiheyksillä. Kuvasta on havaittavissa, että korkeammilla kiviaineksen irtotiheyksillä veden vaikutus on yllättävän pieni, varsinkin Beskowin menetelmällä. Skaven-Haug-menetelmä antaa suuremman eron roudan syvyydelle varsinkin 2...5 % vesipitoisuuden välillä. Yllättävää myös on, että roudan syvyys kasvaa vesipitoisuuden lisääntyessä. Tämä kuitenkin johtuu Nurmikolun ja Kolisojan mukaan siitä, että lisääntyvä vesipitoisuus vaikuttaa roudan syvyyteen enemmän lisääntyvän lämmönjohtavuuden kautta kuin lisääntyvän ominaislämpökapasiteetin kautta.

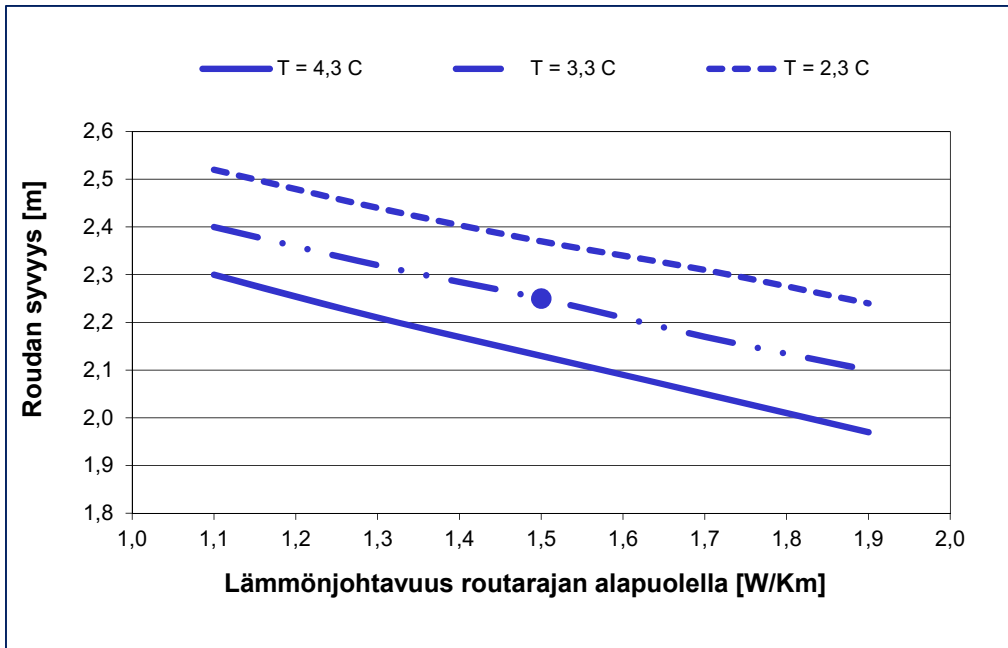


Kuva 2.4 Roudansyvyyslaskelmien herkkyys eristämättömässä rakenteessa alusrakenteen vesipitoisuudelle ja kuivairtitiheydelle. Laskelmissa on oletettu, että lämmönjohtavuus määräytyy vesipitoisuuden ja kuivairtitiheyden perusteella Kerstenin yhtälöiden mukaisesti. (Nurmikolu & Kolisoja 2002)

Sulan maan lämmönjohtavuuden vaikutusta roudan syvyyteen on tarkasteltu kuvassa 2.5. Tulokset on laskettu Beskowin menetelmällä, jossa sulasta maasta routarajalle virtaavaa lämpöenergiaa arvioidaan sulan maan lämmönjohtavuuden ja lämpötilagradientin tulolla. Kuvasta voidaan nähdä, että roudan syvyys pienenee selvästi lämmönjohtavuuden noustessa. Sama tilanne on myös kuvassa 2.6. Molemmissa kuvissa kyse on routarajan alapuolisen osan lämmönjohtavuudesta.



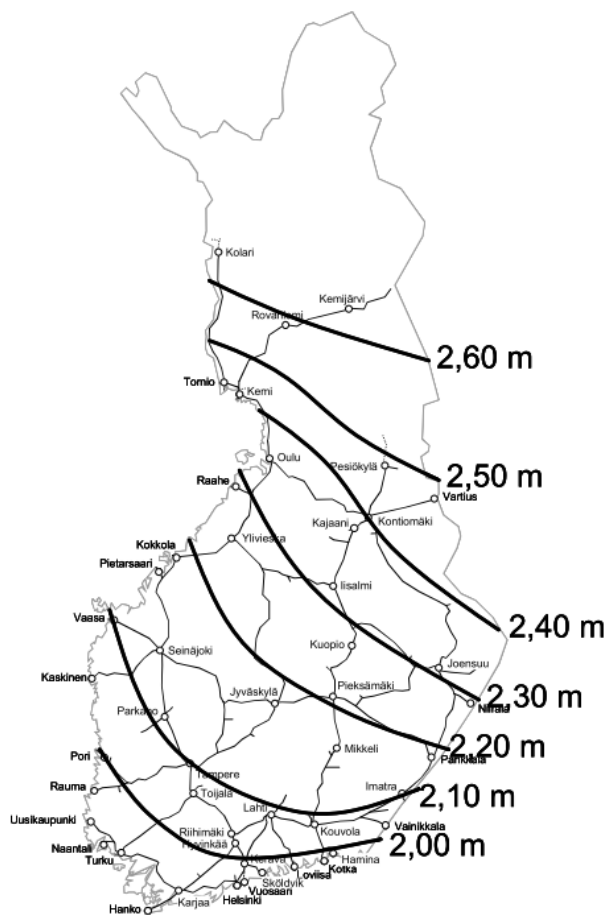
Kuva 2.5 Beskowin menetelmällä tehty roudan syvyyden herkkyystarkastelu sulan maan lämmönjohtavuudelle ja lämpötilagradientille eristämättömässä rakenteessa. (Nurmikolu & Kolisoja 2002)



Kuva 2.6 Beskowin menetelmällä tehty roudan syvyyden herkkyytarkastelu sulan maan lämmönjohtavuudelle ja vuotuisille ilman keskilämpötilalle. Lämpötilagradientti määräytyy kaavan $G_+ = 0,47 * T_u + 1,4$ mukaan. (Nurmikolu & Kolisoja 2002)

Käytännön routamitoitus rautateillä

Yleisessä rautatiesuunnittelussa käytettävät routamitoitusperiaatteet löytyvät RATO 3 Radan rakenne (2008) julkaisusta. Julkaisu on tarkoitettu ratojen suunnitelmia tekevien suunnittelijoiden käyttöön. Käytännön suunnittelussa ei ole tarpeen laskea teoreettisia roudan syvyyksiä, sillä mitoitus perustuu Nurmikolun ja Kolisojan (2002) tekemään tutkimukseen. RATO:n ohjeiden mukaan routamitoitus tulee routaeristämättömillä uusilla rataoikaisuilla tai radoilla tehdä julkaisun liitteenä (kuva 2.7) olevan kokonaispaksuuden mukaan, kun alusrakenneluokka on 2, 3 tai 4. Liitteen kokonaispaksuudet on mitoitettu käyttäen kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää F_{50} . Jos alusrakenneluokka on 1, kokonaispaksuus saa olla 0,2 m pienempi ja alusrakenneluokan 0 radoilla 0,6 m pienempi. Routaeristetyillä osuuksilla mitoitus tehdään myös RATO:n liitteenä olevien mitoituskäyrästä ja vuotuisen ilman keskilämpötilan avulla. Routalevyjen käyttö edellyttää erityislupaa. Taulukossa 2.2 on esitetty pakkasmäärän toistumisjaksot eri alusrakenneluokissa.



Kuva 2.7 RATO 3:n liitteenä 1 oleva mitoituskäyrästä (RATO 3)

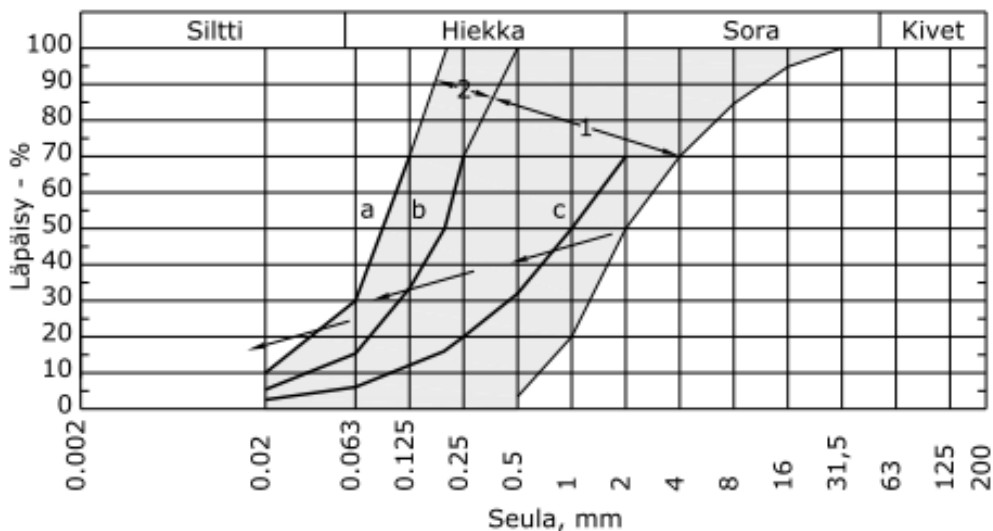
Taulukko 2.2. Routraeristetyn radan routamitoituksessa käytettävän mitoituspakkasmäärän toistumisjakson valinta radan alusrakenneluokan perusteella (RATO 3)

Radan alusrakenneluokka	Mitoituspakkasmäärän toistumisjakso [vuotta]	
	Ratalinja	Vaihdealue
0	5	20
1	20	50
2	50	50
3	50	50
4	50	50

Mitoitusohjeessa on mainittu, että mikäli radan väli- ja eristyskerrosmateriaalina käytetään murskattua kiviainesta, kuvan 2.7 mukaisia rakennepaksuuksia on kasvatettava 15 %. Tämän tutkimuksen kannalta tärkeää tietoa on mahdollisesti myös se, että routasuojauksen parantaminen toteutetaan ensisijaisesti routivien materiaalien korvaamisella. Toissijainen vaihtoehto on käyttää routalevyjä, mikä edellyttää uusilla radoilla ja rataoikaisulla erityislupaa. Routalevyjen käyttämättömyys voi olla merkittävä asia, sillä konvektioon liittyy karkearakenteisen kerroksen yhtenäinen paksuus. Ohje pätee sekä uusille että parannettaville radoille.

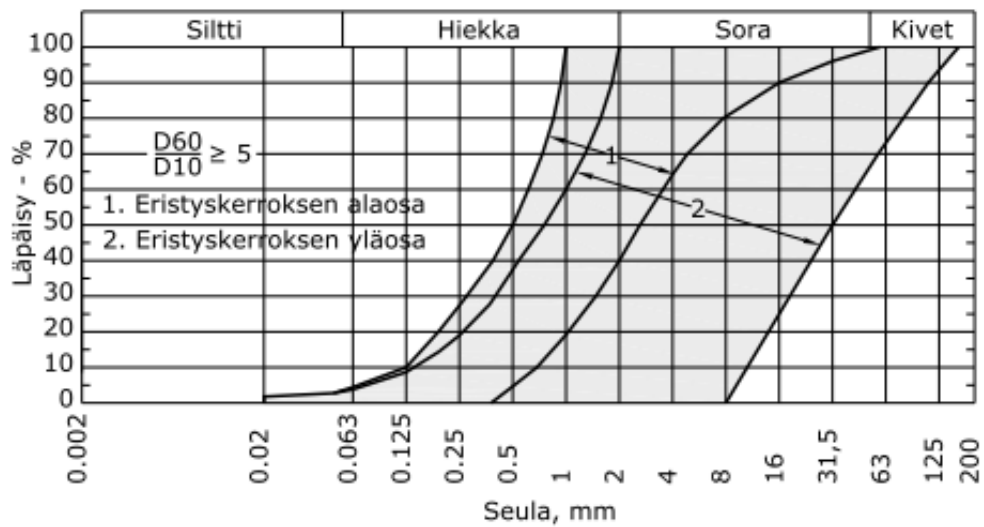
2.2.2 Materiaalivaatimukset alusrakenteessa

Ratarakentamisen alusrakenteiden materiaalivaatimukset löytyvät InfraRYL-julkaisusta (Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset). Ratapenkereen suodatinkerros voidaan rakentaa InfraRYL 2012 -laatuvaatimuskokoelman mukaan joko hiekasta tai murskeesta. Suodatinkerroksessa hiekan rakeisuus on kuvan 2.8. mukainen niin, että normaalisti rakeisuus on kuvan alueella yksi. Rakeisuuskäyrän muodon tulee ohjeiden mukaan noudattaa rajakäyrien muotoa. Alueelle 2 sijoittuvaa materiaalia voidaan käyttää, mikäli se suunnitelma-asiakirjoissa sallitaan ja kyse on hyvin kuivatetusta paikasta. Jos eristyskerros on tehty murskeesta, myös suodatinkerros voidaan tehdä rakeisuudeltaan 2/4 murskeesta tai korvata suodatinkankaalla (suunnitelmien mukaisesti). Suodatinkerroksen tarve määräytyy kriteerillä $D_{15}/d_{85} < 5$, jossa D_{15} on karkeampirakenteisen läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko ja vastaavasti d_{85} on hienomman materiaalin raekoko. Karkeampi materiaali on erityskerrosmateriaalia ja hienempi materiaali pohjamaata. Mikäli ehto ei toteudu, välissä täytyy olla suodatinkerros. Kerros tiivistetään ja tehdään InfraRYL:istä löytyvien ohjeiden mukaan, jolloin lopullinen suodatinkerros on paksuudeltaan 300 mm +/- 100 mm.



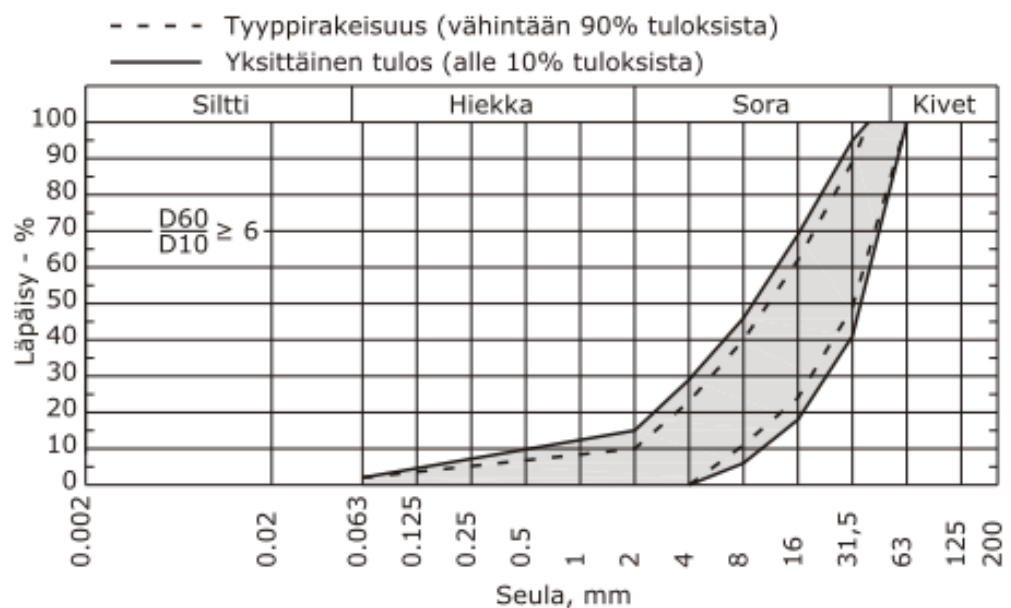
Kuva 2.8 *InfraRYL-ohjeesta löytyvä kuvaaja suodatinkerroksen rakeisuusalueelle. Alue 1 on normaalisti käytössä oleva rakeisuusalue. (InfraRYL 2012)*

Radan eristyskerros tehdään routimattomasta hiekasta, sorasta tai kalliomurskeesta. Eristyskerrosmateriaaleja ei saa valmistaa sekoittamalla eri materiaaleja keskenään. Materiaalissa ei saa olla orgaanisia eikä epäpuhtaita aineita. Sorasta tai hiekasta rakennetun eristyskerroksen rakeisuusvaatimukset löytyvät kuvasta 2.9. Kerroksen alaosassa voidaan käyttää kuvan 2.9 alueen 1 materiaalia. Yläosassa käytetään ohjealueen 2 materiaalia niin, ettei se saa sisältää yli 150 mm rakeita.



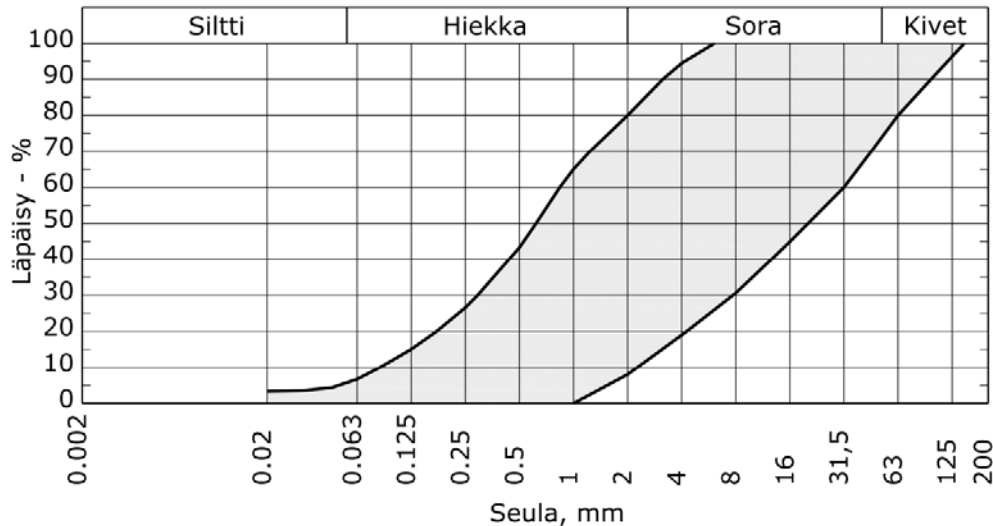
Kuva 2.9 Radan eristyskerroksen materiaalivaatimukset, kuva InfraRYL-julkaisusta. Käyrän tulee noudattaa rajakäyrien muotoa. (InfraRYL 2012)

Jos eristyskerros tehdään kalliomurskeesta, sen tulee noudattaa kuvan 2.10 rakeisuusvaatimuksia. Ohjeen mukaan vähintään 90 % tuloksista tulee olla tyyppirakeisuuden vaihteluvälillä. Myös raekokosuhteen ($C_u = d_{60}/d_{10}$) täytyy olla vähintään 6 yli 90 prosentissa tuloksista. Raekokosuhte saa olla enintään 10 prosentilla tuloksista alle 6, mutta sen täytyy silti olla vähintään 4. Kiviaineksen tulee myös olla puhdasta ja laatuvaatimusten mukaista. Laatuvaatimukset sisältävät muun muassa määritelmiä kiviaineksen mineraalipitoisuuksista sekä lujuusvaatimuksia. Kerrosta tehdessä tulee varoa eristyskerroksen likaantumista. Mikäli eristyskerros tehdään murskeesta, se tehdään samanaikaisesti ja samasta materiaalista kuin välikerros. Kerroksen tulee täyttää myös tiiviysvaatimukset. Konvektiotutkimuksen kannalta kalliomurskeesta tehty eristys/välikerros on mielenkiintoisin, sillä sen raekokojakauma voi olla altista konvektiolle.



Kuva 2.10 Radan eristyskerroksen ja välikerroksen rakeisuusvaatimukset kalliomurskekerrokselle. (InfraRYL 2012)

Radan välikerros tehdään joko routimattomasta hiekasta, sorasta tai kalliomurskeesta. Materiaalia ei saa valmistaa sekoittamalla eri materiaaleja keskenään. Hiekan ja soran rakeisuuden tulee sijaita kuvan 2.11. määrittämällä alueella sekä olla muodoltaan rajakäyrien mukainen. Mikäli välikerros tehdään murskeesta, sen tulee täyttää eristyskerrokselle kuvassa 2.10 määritetyt rakeisuusarvot. Välikerros tehdään yhtenä 300 mm kerroksena.



Kuva 2.11 InfraRYL-ohje hiekasta tai sorasta tehdyn välikerroksen materiaalin rakeisuudelle. (InfraRYL 2012)

InfraRYLin mukaan radan päällysrakenteen tukikerrosmateriaali on yleensä CE-merkittyä raidesepeä, joka on SFS-EN 13450 mukaista. Lisäksi noudatetaan myös kyseisen standardin kansallista soveltamisohjetta. Mikäli materiaalina käytetään raidesoraa, sen ominaisuudet määritellään suunnitelma-asiakirjoissa. Raidesepeän käsittelyssä kiinnitetään erityisesti huomiota sen pysymiseen puhtaana ja lajittumattomana. Hienoaineksen kulkeutumista pyritään välttämään. Myös rakentamistyön aikana vältetään koneita, joiden liikkuminen voisi aiheuttaa sepeän murskautumista. Tukikerroksen alaosan tiivistäminen täytyy suorittaa staattisesti, dynaaminen tiivistys on ehdottomasti kielletty. Standardin SFS-EN 13450 mukaiset Suomessa käytettävät rakeisuusluokat on esitetty kuvassa 2.12. Kansallisen soveltamisohjeen mukaan Suomessa käytetään lähinnä kolmea eri luokkaa, jotka on esitetty kuvassa tummennetulla pohjalla.

Seulan koko mm	Raidesepelin raekoko 31,5...50 mm			Raidesepelin raekoko 31,5...63 mm		
	Läpäisy massaprosentteina					
	Rakeisuusluokka					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97...100	95...100	97...99	95...99	93...99
50	70...99	70...99	70...99	65...99	55...99	45...70
40	30...65	30...70	25...75	30...65	25...75	15...40
31,5	1...25	1...25	1...25	1...25	1...25	0...7
22,4	0...3	0...3	0...3	0...3	0...3	0...7
31,5...50	≥ 50	≥ 50	≥ 50	-	-	-
31,5...63	-	-	-	≥ 50	≥ 50	≥ 85

HUOM. 1. Seulan 22,4 mm läpäisylle asetetut vaatimuksia sovelletaan vain tuotantopaikalta otetulle raidesepelinäytteelle
HUOM. 2. Tietyissä olosuhteissa 25 mm seulaa voidaan käyttää 22,4 mm seulan sijasta, tällöin raja-arvona käytetään 0...5 (0...7 luokassa F).

Kuva 2.12 Raidesepelin rakeisuusvaatimukset. Suomessa käytetään F-luokkaa pääradoilla ja C-luokkaa kuormaus- ja vaihtotyöalueilla. Luokka E tarkoittaa uusioraidesepeliä tai vähäliikenteisiä, alle 1 Mbrt vuodessa olevia ratoja. (Standardin SFS-EN 13450 raidesepelikiviainekset kansallinen soveltamisohje 2004)

3 Luonnollinen konvektio

Routamitoitusmenetelmien lyhyen tarkastelun perusteella maan lämmönjohtavuudella on suuri merkitys roudan syvyyteen. Tämä havainto antaa syyn tutkia mahdollisen konvektion vaikutuksia ja roolia alusrakenteissa. Nurmikolun ja Kolisojan (2002) raportin yhteenvedossa on todettu, että vaikka pääosa lämmön siirtymisestä tapahtuu-kin maaperässä johtamalla, konvektiivinen ja säteilynä tapahtuva lämmönsiirtyminen ovat mahdollisia. Samassa yhteydessä on myös tiedostettu, että näitä asioita olisi syytä tutkia enemmän, sillä kalliomurskeen käytöstä alusrakenteessa ei ole paljoa kokemuksia. Ratapenkereessä tapahtuva konvektiivinen lämmönsiirtyminen ei ole vain teoreettinen uhka, sillä Norjassa tapahtunut yllättävä ratapenkereiden routaantumisen Sprengstein-nimisellä karkealla materiaalilla johtui luonnollisesta konvektiosta. On siis varsin perusteltua tutkia tilannetta Suomen olosuhteissa ja materiaaleilla.

Aiemmin käytössä olleet luonnonmateriaalit ovat sisältäneet runsaasti myös hienorakeista ainesta, jolloin raekokojakauma on ollut laajempi. Tällöin konvektio ei ole ollut todennäköinen lämmönsiirtymismuoto alusrakenteissa. Kalliomurskeiden käytön lisääntyttyä ratapenkereen paksuutta on päädytty ohjeissa kasvattamaan 15 %. Syynä on kuivatiheyden ja vesipitoisuuden vaikutus lämmönjohtavuuteen. Konvektion mahdollisuus on otettu esille mitoituksissa, mutta sen todellisesta roolista ei ole tällä hetkellä tarkempaa tietoa. Mikäli konvektiota tapahtuu merkittävässä määrin, oletettu lämmönjohtavuus voi olla liian pieni. Tällöin rakenne voi routia odottamattomalla tavalla. Routimisongelma riippuu kuitenkin monista eri tekijöistä, sillä edellä mainitun tilanteen toteutuminen vaatii muun muassa sopivan raekokojakauman, riittävän korkean kerrospaksuuden ja riittävän suuren lämpötilagradientin. Myös kuivatuksella ja routimattomien kerroksien alla olevalla materiaalilla on merkitystä. Erittäin tärkeää on huomata, että tiheyserojen perusteella tapahtuvan konvektion mahdollisuuden vaikuttaa kerrospaksuus. Tällöin perinteinen ajattelutapa kerrospaksuuden lisäämisestä ei välttämättä johda haluttuun lopputulokseen vaan voi huonoimmassa tapauksessa jopa lisätä konvektion mahdollisuutta.

3.1 Konvektio fysikaalisena ilmiönä

Konvektio on lämmön siirtymistä väliaineen välityksellä paikasta toiseen. Se voidaan jakaa kahteen eri osaan; pakotettuun konvektioon sekä vapaaseen konvektioon. Pakotetussa konvektiossa väliaineen liikkeen aiheuttaa ulkopuolinen voima, esimerkiksi pumppu tai tuuli. Vapaassa konvektiossa (tai luonnollisessa konvektiossa) väliaineen liikkeen saa aikaan aineen lämpölaajenemisesta aiheutuvat tiheyserot. Molemmissa tapauksissa lämpöä siirtyy diffuusion (satunnainen molekyylien liike) ja advektion (fluidin liike) myötä. Kuumen ilman kohoaminen ylöspäin on yksi esimerkki vapaasta konvektiosta. Ilmiönä konvektio on hankala, sillä siihen vaikuttaa voimakkaasti monet ympäristöstä riippuvat tekijät. (Young & Freedman 2000; Newman & Lam 2000)

Luonnollista konvektiota on tutkittu paljon. Se perustuu tiheyseroista aiheutuviin nostevoimiin, jolloin väliaine lähtee liikkeelle. Kokeiden perusteella on havaittu, ettei väliaine lähde liikkeelle tiheyserojen vaikutuksesta, ennen kuin kriittinen lämpötilaero ylitetään. Tämä johtuu liikkeitä vastustavista voimista, toisin sanoen kriittisen lämpötilan alapuolella väliaine on levossa eikä konvektiivista lämmönsiirtymistä tapahdu. Kriittisen lämpötilaeron sijasta käytetään kuitenkin yleensä kriittistä Rayleighin lu-

kua, joka kuvaa paremmin todellista tilannetta. Luonnollista konvektiivista lämmönsiirtymistä voi tapahtua ainoastaan silloin, kun lämpötilagradientti suuntautuu ylöspäin. Alusrakenteissa luonnollista konvektiota voi siis esiintyä vain talvella, kun rata-penger on lämmin ja ympäröivä ilma kylmää. Tilannetta, jossa konvektio on mahdollinen, kutsutaan yleensä epävakaaaksi tilanteeksi. Tilanne on vakaa silloin, kun lämpötilagradientti suuntautuu alaspäin tai lämpötilaero ei ole riittävän suuri voittamaan liikettä vastustavia voimia. (Johansen 1975; Goering et al. 2000)

3.1.1 Rayleighin luku

Rayleighin luku on yksikötön luku, joka perustuu analyttisiin tutkimuksiin. Se kuvaa nosteen aiheuttamien voimien suhdetta liikettä vastustaviin voimiin, joten sitä voidaan käyttää hyödyksi arvioitaessa konvektion voimakkuutta tai mahdollisuutta. Luvusta on liikkeellä muutamia eri versioita riippuen tarkastelukohteesta, sillä luonnollista konvektiota voidaan tarkastella maaperän lisäksi esimerkiksi rakennusfysiikassa. Riippuen kirjoittajasta ja lähteestä alusrakenteisiin liittyvän kaavan esitysmuodossa ja sisällössä on pientä vaihtelua. Hyvä lähtökohta on Johansenin väitöskirjassaan (1975) käyttämä kaava 3-1.

$$Ra = \frac{\Delta T \alpha g h K}{a_m \nu} \quad (3-1)$$

missä

Ra	= Rayleighin luku, [-]
ΔT	= lämpötilaero, [°C]
h	= kerroksen paksuus, [m]
g	= putoamiskiintyvyyys, vakio, [m/s ²]
α	= väliaineen lämpölaajenemiskerroin, [1/K]
ν	= väliaineen kineettinen viskositeetti, [m ² /s]
K	= materiaalin sisäinen läpäisevyys, [m ²]
a_m	= Lämmön hajaantuminen (diffusivity) huokoiselle materiaalille

Johansenin kaava poikkeaa muualla kirjallisuudessa esillä olleista kaavoista lähinnä a_m -termin osalta, joka on hänen väitöskirjassaan lausuttu kaavan 3-2 mukaan.

$$a_m = \frac{\lambda_e^0}{(c\rho)_f} \quad (3-2)$$

missä

λ_e^0	= vakaan tilan lämmönjohtavuus, [W/mK]
$(c\rho)_f$	= lämpökapasiteetti tilavuuden mukaan (lasketaan kertomalla ominaislämpökapasiteetti c väliaineen tiheydellä ρ), [J/m ³ K]

Rayleighin luvussa käytetty väliaineen kinemaattinen viskositeetti ν voidaan laskea dynaamisen viskositeetin avulla kaavalla 3-3 (Valtanen 2010).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3-3)$$

missä

μ	= liikkuvan väliaineen dynaaminen viskositeetti, [kg/ms]
ρ	= liikkuvan väliaineen tiheys, [kg/m ³]

Edellisistä kaavoista muokkaamalla saadaan Rayleighin luvun kaava muotoon 3-4.

$$Ra = \frac{\Delta T \alpha g h K \rho^2 c}{\lambda \mu} \quad (3-4)$$

missä

Ra	= Rayleighin luku, [-]
ΔT	= lämpötilaero, [°C]
h	= kerroksen paksuus, [m]
g	= putoamiskiintyvyyden vakio, [m/s ²]
α	= väliaineen lämpölaajenemiskerroin, [1/K]
μ	= väliaineen dynaaminen viskositeetti, [kg/ms]
ρ	= väliaineen tiheys, [kg/m ³]
c	= väliaineen ominaislämpökapasiteetti [J/Kg · K]
λ	= lämmönjohtavuus ilman konvektiota, [W/mK]
K	= sisäinen läpäisevyys, [m ²]

Rayleighin luvun laskeminen on muuten suhteellisen yksinkertaista, mutta materiaalin sisäinen läpäisevyys on hankala määrittää karkealle materiaalille. Sisäisen läpäisevyyden määrittämiseen on olemassa muutamia keinoja, joista lisää luvussa 3.1.2. Kuten yhtälöstä 3-1 on havaittavissa, Rayleighin luvun laskentakaava sisältää lämpötilaeron ΔT . Aiemmin on puhuttu konvektion kannalta kriittisestä lämpötilaerosta, mutta todellista konvektion mahdollisuutta voidaan kuvata paremmin kriittisellä Rayleighin luvulla. Luonnollinen konvektio on mahdollinen vasta sitten, kun kriittinen luku ylitetään. Kriittinen Rayleighin luku riippuu reunaehdoista, ja Lapwood (1948) on laskenut seuraavat kriittiset arvot nestepitoiselle huokoiselle materiaaleille eri olosuhteissa. Kun kyseessä on kaksi läpäisemätöntä ja lämpöä johtavaa pintaa, on $Ra_{cr} = 40$. Mikäli alempi pinta on läpäisemätön ja ylempi vapaa, kriittinen luku on 27.

Luonnollista konvektiota tapahtuu siis helpommin silloin, kun yläpinta on vapaa. Ratapenger on talvella yläpinnastaan avoin, mikä on otettava huomioon tarkasteluissa. Rayleighin luvun laskentakaavassa penkereen paksuus on suoraan osoittajassa, joten kaksinkertaistamalla pengerkorkeus voidaan päätyä kaksinkertaiseen Rayleighin lukuun. Tämä voi johtaa Johansenin (1975) mukaan pahimmassa tapauksessa siihen, ettei pengerkorkeuden kaksinkertaistaminen paranna routaongelmia yhtään. Tämä perustuu siihen, että Johansen on tutkimuksissaan havainnut tehollisen lämmönjohtavuuden kasvavan suorassa suhteessa Rayleighin lukuun, kunhan toimitaan kriittisen Rayleighin luvun yläpuolella. On myös syytä huomata, että jos penkereen korkeus kaksinkertaistuu, laskee luonnolliseen konvektioon tarvittava lämpötilaero puoleen.

3.1.2 Materiaalin sisäinen läpäisevyys

Sisäinen läpäisevyys K on tarpeellinen suure tarkasteltaessa konvektion mahdollisuutta Rayleighin luvulla. Sisäisen läpäisevyyden yksikkönä on m². Suure kuvaa sitä, miten aine kulkee huokoisen materiaalin läpi. Sisäiseen läpäisevyyteen vaikuttaa raekoko, raekokojakauma ja sen muoto sekä huokoisuus (Johansen 1975). Luonnollisesta konvektiosta tehtyjen tutkimusten perusteella vaikuttaa siltä, että sisäinen läpäisevyyden määrittäminen on melko hankalaa karkeille kiviaineksille. Yksi tapa määrittää sisäinen läpäisevyys on käyttää Darcyn kertoimeen perustuvaa kaavaa 3-5. Karkearakeisilla kiviaineksilla vedenläpäisevyyden mittaaminen on kuitenkin vaikeaa. (Nurmikolu, 2004)

$$K = k_d * \frac{\mu_{vesi}}{g\rho_{vesi}} \quad (3-5)$$

missä

K	= materiaalin sisäinen läpäisevyys, [m ²]
k _d	= Darcyn vedenläpäisevyyskerroin materiaalille, [m/s]
μ _{vesi}	= veden dynaaminen viskositeetti, [kg/ms]
ρ _{vesi}	= veden tiheys, [kg/m ³]
g	= putoamiskiihtyvyys, [m/s ²]

Toinen tapa arvioida sisäistä läpäisevyyttä on käyttää Goeringin et al. (2000) käyttämää kaavaa, jonka Bear (1972) on raportoinut lähteestä Fair & Hatch (1933). Kaava 3-6 perustuu huokoisuuteen, partikkelien muotoon, tarkasteltavan lajitteen osuuteen materiaalissa sekä tarkasteltavan lajitteen geometriseen keskimääräiseen raekokoon.

$$K = \frac{1}{5} \left[\frac{(1-n)^2}{n^3} \left(\alpha_m \sum \frac{p}{d_m} \right) \right] \quad (3-6)$$

missä

K	= materiaalin sisäinen läpäisevyys, [m ²]
n	= huokoisuus, [-]
α _m	= partikkelien muodosta riippuva parametri, [-]
p	= tarkasteltavan lajitteen osuus materiaalissa, [%]
d _m	= tarkasteltavan lajitteen geometrinen keskimääräinen raekoko, [m]

Johansen (1975) mainitsee väitöskirjassaan Kozeny–Carman-kaavan 3-7, jota käytetään yleisesti sisäisen läpäisevyyden laskemisessa. Kaava perustuu huokoisuuteen sekä materiaalin ominaispinta-alaan. Edellisiin verrattuna kaava vaikuttaa melko yksinkertaiselta, kunhan ominaispinta-ala pystytään määrittämään.

$$K = \frac{n^3}{5S^2(1-n)^2} \quad (3-7)$$

missä

K	= materiaalin sisäinen läpäisevyys, [m ²]
n	= huokoisuus, [-]
S	= materiaalin ominaispinta-ala, [m ² /m ³]

3.1.3 Nusseltin luku

Nusseltin lukua käytetään yleisesti konvektiotutkimuksessa, sillä sen avulla on helppo arvioida konvektion todellisia vaikutuksia. Luku kuvaa tehollisen lämmönjohtavuuden (sisältäen konvektion) suhdetta lämmönjohtavuuteen ilman konvektiota. Se lasketaan kaavalla 3-8. Nusseltin luku on kuitenkin aina vähintään yksi. Laskennassa hyödynnetään kriittistä Rayleighin lukua, joka riippuu olosuhteista. On huomattava, että suurilla Rayleighin luvun arvoilla Nusseltin luku ei kasva enää täysin lineaarisesti. (Johansen 1975; Côté et al.2011)

$$Nu = \frac{Ra}{Ra_{cr}} \quad (3-8)$$

missä

Nu	= Nusseltin luku, [-]
Ra	= Rayleighin luku, [-]
Ra _{cr}	= Kriittinen Rayleighin luku, jonka ylittyessä konvektio on laskennallisesti mahdollinen, [-]

3.2 Konvektiosta tehdyt tutkimukset

Konvektiivisesta lämmönsiirtymisestä on tehty maailmalla useita eri tutkimuksia. Peruseriaate tutkimuksissa on ollut hyödyntää vakaan ja epävakaan tilanteen välistä eroa ja arvioida sen perusteella lämmönjohtavuuden muutosta. Tutkimuksissa on saattanut esiintyä myös pakotetulla konvektiolla tehtyjä testejä (esimerkiksi Johansen 1975), jotka on jätetty tässä yhteydessä esittelemättä. Pakotetulla konvektiolla on kuitenkin havaittu voimakas kokonaislämmönjohtavuutta nostava vaikutus.

Johansen

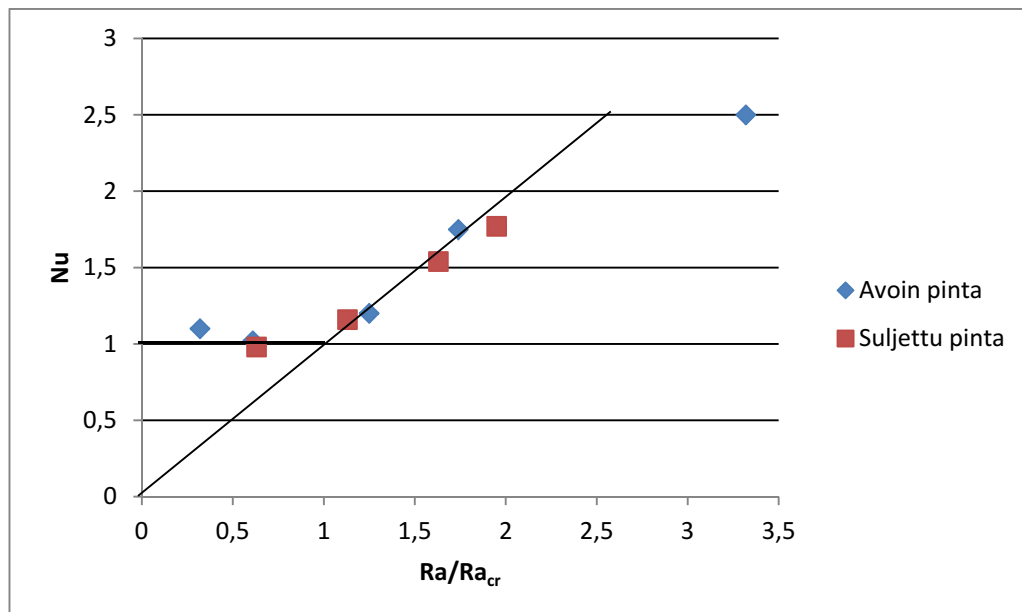
Johansen (1975) on tutkinut konvektiota käyttämällä laitteistoa, jonka näytetila oli pohjapinta-alaltaan 1,8 m x 2,2 m ja korkeus 0,48 m. Laitteisto oli sijoitettu jäähdetytyyn huoneeseen. Luonnollisen konvektion testeissä näytteen yläpuolelle oli asennettu suojalevy (ei kiinni näytteeseen), ettei näytteen päällä olevan jäähdytyspuhaltimen ilmavirta häiritse testiä. Lämpövuota mitattiin yhdeksällä anturilla, jotka oli sijoitettu tasaisesti kivikerroksen alle. Lämpötilajakaumaa varten oli melko kattava anturiverkosto, sillä näytteessä oli 22 anturia seitsemässä eri kerroksessa (kerrosten väli 80 mm). Suuren lämpötila-anturimäärän tarkoituksena oli selvittää lämpötilaprofiilit ja isotermit tarkasti. Materiaalina käytettiin kuivaa murskettä, jonka raekoko oli 20–80 mm. Tiivistys oli tehty kevyesti ja näytteen kuivatiheys oli noin 1500 kg/m³. Murskeen sisäinen läpäisevyys K oli $0,97 \cdot 10^{-6}$ m². Vapaata konvektiota testattiin yhteensä kymmenellä eri testillä. Yksi testi tehtiin niin, että lämpövirta suuntautui ylhäältä alaspäin, jolloin testiryhmä sai selville maamateriaalin lämmönjohtavuuden ilman konvektiota. Lämmönjohtavuustesti tehtiin noin 3 °C keskilämpötilassa. Lopuissa yhdeksässä testissä näytteen alapuoli oli lämmin ja yläpuoli kylmempi, jolloin lämpövirta suuntautui ylöspäin. Nämä testit voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, sillä ensimmäisessä viiden testin erässä näyte altistettiin jäähdytyshuoneessa olevalle ilmalle, kun taas jälkimmäisessä neljän testin erässä näyte oli peitetty. Johansen käytti peitteenä muovipeitettä, jonka päällä oli hiekkaa. On hyvä huomata, että rajapinnat eivät ole täysin ideaalisia lämmönjohtajia, jolloin rajapintoihin ilmestyy Johansenin mukaan paljon lämpötilavariaatioita konvektiotilanteessa.

Taulukossa 3.1 on esitetty Johansenin konvektiotestien tuloksia. Taulukossa esiintyvä t_m tarkoittaa kokeen keskimääräistä lämpötilaa. Nusseltin luku on laskettu jakamalla saatu tehollinen lämmönjohtavuus pelkällä johtumistilanteen lämmönjohtavuudella. Suhde Ra/Ra_{cr} on laskennallinen Nusseltin luku, joka on laskettu avoimella pinnalla käyttäen kriittistä Rayleighin lukua $Ra_{cr}=27$ ja suljetulla pinnalla $Ra_{cr}=40$. Johansen on laskenut tuloksien perusteella testeissä toteutuneet kriittiset Rayleighin luvut, jotka olivat 26 ja 41. Arvot ovat todella lähellä Lapwoodin laskemia arvoja, joten koe on varsin onnistunut. Työssä on laskettu myös teoreettiset kriittiset lämpötilaerot, jotka ovat 7,8 °C ja 11,6 °C. Lisäksi on syytä muistaa, että teorian mukaan pinnat ovat ideaalisia lämmönjohtajia, mikä ei käytännössä toteudu.

Taulukko 3.1 Johansenin (1975) vapaan konvektion tutkimustulokset.

Koe	ΔT [°C]	t_m [°C]	Ra	λ_e [W/mK]	Nu	Ra/Ra _{cr}
Lämpövirta ylhäältä alaspäin						
1a	10,8	-	-	0,45	1,0	-
Lämpövirta alhaalta ylöspäin, avoin pinta yläpinta						
2c	2,6	5,8	8,26	0,50	1,10	0,32
2d	4,7	3,3	15,82	0,46	1,02	0,61
2a	9,0	-5,5	31,99	0,55	1,20	1,25
2c	11,5	-13,4	44,72	0,79	1,75	1,74
2f	19,0	-28,5	87,40	1,13	2,50	3,32
Lämpövirta alhaalta ylöspäin, suljettu yläpinta						
3a	7,3	-1,5	25,10	0,43	0,98	0,63
3b	12,8	-3,2	45,06	0,52	1,16	1,13
3c	17,4	-8,5	65,02	0,70	1,54	1,63
3d	19,6	-16,9	77,40	0,80	1,77	1,95

Kuva 3.1 on suoraan Johansenin raportissa oleva kuvaaja, joka on piirretty uudelleen. Kuvassa on otettu huomioon avoimella ja suljetulla pinnalla olevat eri kriittiset Rayleighin luvut, jolloin molemmat tilanteet voidaan piirtää samaan kuvaan. Kuvasta näkyy varsin selkeästi, ettei konvektiota tapahdu, ennen kuin Ra/Ra_{cr} ylittää arvon 1. Tämän jälkeen näennäinen lämmönjohtavuus kasvaa varsin suoraan, mutta suurilla Rayleighin arvoilla lineaarisuus ei ole enää voimassa.



Kuva 3.1. Johansenin testitulokset. Mitattu Nusseltin luku piirrettynä suhteessa laskettuun Ra/Ra_{cr}. Avoimella pinnalla Ra_{cr} on 27 ja suljetulla 41.

Johansen on väitöskirjassaan todennut, että helpoin tapa välttää konvektiota on valita materiaali niin, että sen sisäinen läpäisevyys ei mahdollista konvektiota alhaisilla lämpötilaeroilla. Raekoolla 10–50 mm sisäinen läpäisevyys on noin $0,12 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ verrattuna karkeaan murskeeseen (jolla Johansen teki konvektiotestit), jonka läpäisevyys on noin $0,97 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kriittinen lämpötilaero kasvaa metrin paksuisella kerroksella 6 asteesta 48 asteeseen pelkällä materiaalinvaihdolla. Ero on siis suuri. Johansen on kuitenkin huomauttanut, ettei kriittisen rajan ylittäviä lämpötilaeroja esiinny kuin lyhyissä jaksoissa keskitalvella.

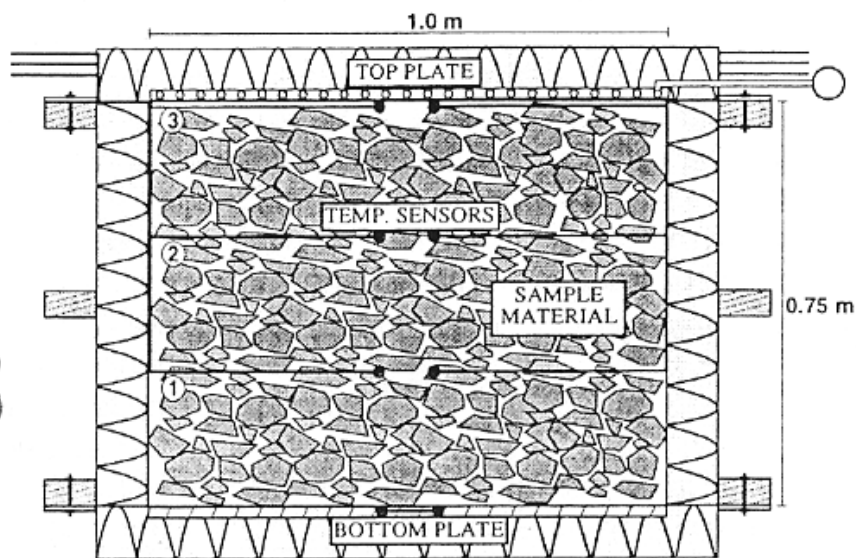
Johansenin esittämät testitulokset olivat peräisin kuivasta näytteestä. Jos kerros on kyllästynyt vedellä, veden suuri tiheys ja ominaislämpökapasiteetti sekä alhainen viskositeetti mahdollistavat konvektion alkamisen huomattavasti alhaisemmalla lämpötilaerolla. Taulukossa 3.2 on esitetty sekä kuivan tilan että vedellä kyllästyneen tilan parametreja, joita käytetään Rayleighin luvun laskennassa. Taulukon arvoista voidaan päätellä, että veden mukanaolo muuttaa tilanteen aivan erilaiseksi.

Taulukko 3.2. Kuivan ja vedellä kyllästyneen tilan parametrieroja Rayleighin luvun laskennassa. (Johansen 1975)

Suure	α	$\lambda^0 e$	c_p	ρ	a_m	u
Yksikkö	(°C) ⁻¹	W/mK	J/kg°C	kg/m ³	m ² /s	m ² /s
Kuiva	1/273	0,45	1000	1,251	3,6*10 ⁻⁴	13,6*10 ⁻⁶
Vedellä kyllästynyt	2*10 ⁻⁴ * *t _m =20°C	1,50	4187	1000	0,36*10 ⁻⁶	1,792*10 ⁻⁶

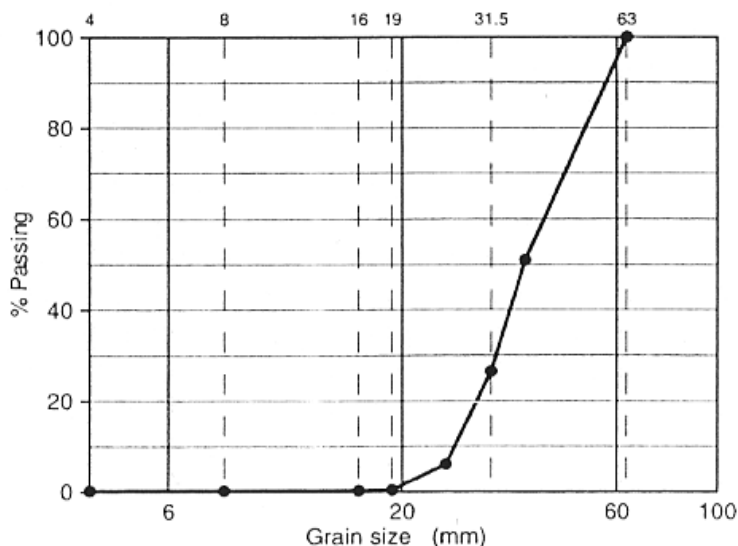
Goering et al.

Goering et al. (2000) on tutkinut konvektiota laboratoriossa hieman samankaltaisella järjestelyllä kuin Johansen. Käytössä ollut testilaitteisto on ollut mitoiltaan 1 m x 1 m x 0,75 m (kuva 3.2). Näytetila on eristetty 100 mm XPS eristeellä ja eriste on suojattu molemmilta puolilta 15 mm levyllä. Lämpöhäviöitä on pyritty pienentämään pitämällä näytteen keskimääräinen lämpötila lähellä ympäröivän huoneen lämpötilaa. Laatikon ala- ja yläpinnassa on käytetty alumiinisia lämmönvaihdinlaattoja, joita on pystytty jäädyttämään tai lämmittämään. Lämmitys on laitteessa toteutettu sähkövastusteipillä, jotta laitteeseen syötettävä lämmitysteho on tiedossa. Jäähdytys on vesikiertoinen. Testilaitteella on mahdollista testata sora- ja kivimateriaalien lämmönjohtavuutta 0–250 mm raekoolla.



Kuva 3.2. Goering et al. käyttämä testilaitteisto. (Goering et al. 2000)

Goering et al. testaama materiaali oli 20–63 mm mursketta, joka oli sekoitettu hyvin ennen asettamista koelaitteeseen. Testattavan materiaalin rakeisuuskäyrä (kuva 3.3) poikkeaa lähinnä pienimmän raekoon osalta Suomessa käytettävässä raidesepelistä, jonka minimiläpimitta on 31,5 mm. Tiivistys tehtiin kolmessa 0,25 m kerroksessa ja siinä käytettiin tärisevää maantiivistintä. Jokaiseen kerrokseen asennettiin kaksi lämpötila-anturia, jotka olivat 50 mm sivussa keskilinjasta. Mielenkiintoinen yksityiskohta on suodatinkangas, jonka päälle he laittoivat hiekkaa, jotta lämpö johtuisi hyvin testilaitteen ylälaatan ja näytteen välillä.



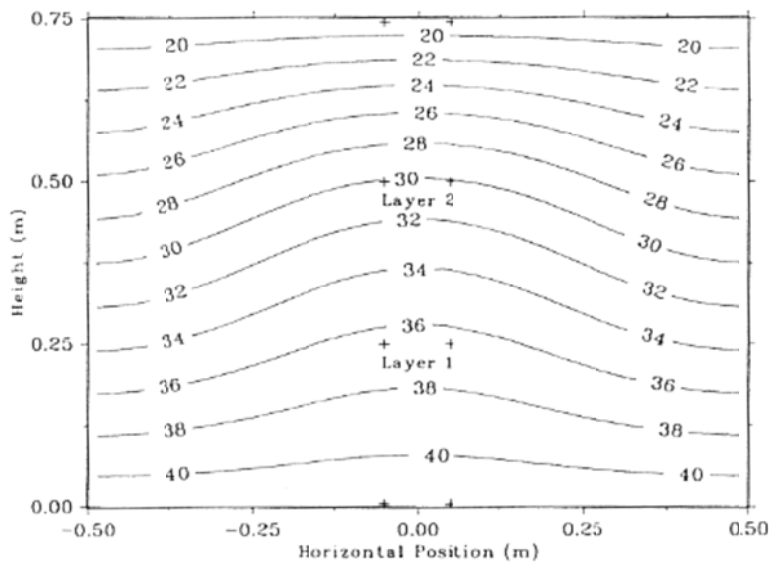
Kuva 3.3. Goering et al. käyttämän materiaalin rakeisuuskäyrä. Vertailun vuoksi Suomessa käytössä olevan raidesepelin minimirakeisuus on 31,5 mm. (Goering et al. 2000)

Goeringin tutkimusryhmä teki testejä sekä vakaassa ja epävakaassa tilanteessa. Testien toteutus oli kuitenkin mielenkiintoinen, sillä kummankin testin alussa kuumaa laattaa ohjattiin lämpötilan mukaan, kunnes olosuhteet olivat vakiintuneet. Tämän jälkeen lämmönsyöttö vaihdettiin vakiotehoon ja tilanteen annettiin tasaantua ennen mittauksia. Jäähdytyslämpötila oli molemmissa testeissä 13 °C. Tuloksien analysoinnissa ryhmä pyrki mallintamaan huokosilmavirtausta laskennallisella menetelmällä. Laskentamallin toimivuutta testattiin ja testeissä havaittiin, ettei huokosilmaa virtaa, kun liikutaan kriittisen Rayleighin luvun alapuolisella alueella. Tällöin muodostunut yksiulotteinen lämpötilaprofiili oli lämmönjohtumisteorian mukainen. Mallin mukaan liikuttaessa yli 39,48 Rayleighin luvussa huokosilman liike kasvoi asteittain. Näiden testien perusteella Goering et al. totesi mallin toimivan hyvin. Ryhmä raportoi tässä raportissa vain kaksi eri testiä, joiden parametrit on esitetty taulukossa 3.3. Näyte tasaantui 10 päivää sen jälkeen, kun lämmitys vaihdettiin vakioteholle. Taulukossa esitetyt kerroksien lämpötilat ovat kahden anturin keskiarvoja. Lämpövirta-antureiden arvoa on korjattu kuumen laatan toiselta puolelta tapahtuvan lämpövuodon takia.

Taulukko 3.3. Lämpötilat ja lämpövuot testissä. (Goering et al. 2000)

	$T_{ylä}$ [°C]	$T_{kerros1}$ [°C]	$T_{kerros2}$ [°C]	$T_{kerros3}$ [°C]	Q [W/m ²]
Ylälämmitys	13	18	22,5	28	16,2
Alalämmitys	41,5	35,5	30,5	18,5	43,3

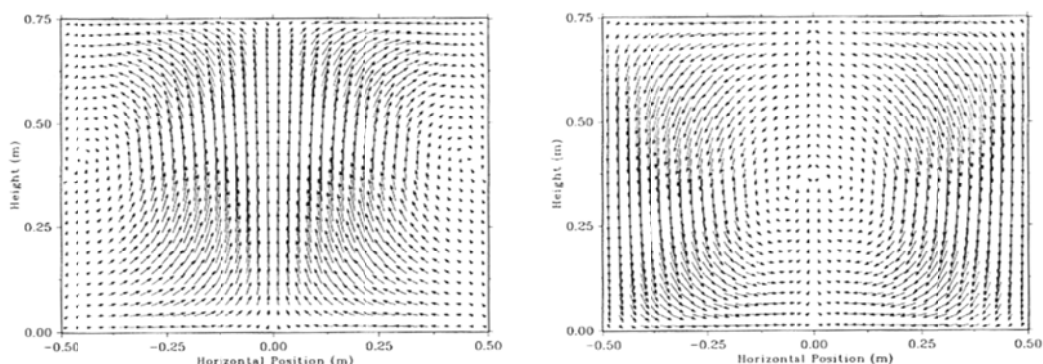
Taulukon 3.3 ylälämmitystilanteessa materiaalin lämmönjohtavuudeksi saatiin $0,79 \text{ W/mK}$ ja näytteessä olevien anturien lämpötilaprofiili oli hyvin lineaarinen. Lämmönjohtavuus on laskettu käyttäen kolmannen kerroksen lämpötila-antureiden ja alalaatan välistä lämpötilaeroa ja niiden etäisyyttä toisistaan ($0,73 \text{ m}$). Alalämmityksellä näytteen käytös muuttui selvästi, ja kuvassa 3.4 on esitetty näytteen keskilinjalta piirretyt isotermit. Kuvan perusteella näyttää siltä, että alhaalla isotermien välinen ero on suurempi ja yläosassa ne ovat puristuneet lähemmäksi toisiaan. Taulukossa mainittu lämpövirta on myös selkeästi suurempi.



Kuva 3.4. Näytteen keskilinjan tasosta havaitut isotermit. Isotermien välinen etäisyys on alaosassa selvästi suurempi verrattuna yläosaan. (Goering et al. 2000)

Goering et al. (2000) ryhmä selvitti myös laskennallista Rayleighin lukua konvektiolianteessa, sillä se kuvaa konvektiovirtauksen voimakkuutta. Raportin mukaan muut parametrit olivat helposti määritettävissä ilmalle, mutta sisäisen läpäisevyyden määrittäminen oli vaikeaa. He päätyivät käyttämään Fair & Hatchin (1933) menetelmää, jonka Bear (1972) oli esittänyt. Menetelmässä sisäistä läpäisevyyttä arvioidaan huokoisuuden, partikkelin muotoparametrin, tarkasteltavan lajitteen materiaaliolosuuden sekä keskimääräisen geometrisen koon perusteella. Sisäisen läpäisevyyden laskentaan on olemassa myös muita menetelmiä, mutta ne ovat yleensä päteviä huomattavasti pienemmälle raekoolle. Yleisesti voidaan todeta, että materiaalin sisäinen läpäisevyys kasvaa, kun partikkelikoko kasvaa ja rakeisuusjakauma muuttuu yhdenmukaisemmaksi. Testimateriaalille Goering et al. mittasivat huokoisuudeksi $0,38$ ja partikkelin muotoparametriksi 7 , jolloin sisäinen läpäisevyys sai arvon $7,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Rayleighin luvuksi muodostui 23°C lämpötilaerolla lukuarvo $49,9$, joka on selkeästi suurempi kriittiseen Rayleighin lukuun $39,48$ verrattuna. Tämän lisäksi konvektioliannetta tarkasteltiin numeerisella mallintamisella, jonka tulokset tukivat teoriaa. Kuvassa 3.5 on mallinnettu ilman virtausta näytteessä. Mallinnuksen perusteella näyttää siltä, että ilma kulkee näytteessä keskeltä ylöspäin ja laskee nurkissa alaspäin. Tällöin muodostuu neljä symmetristä konvektiosolua, joissa ilma kulkee samalla tavalla. Kuvasta on myös havaittavissa, että keskeltä ylöspäin suuntautuva virtaus on suurinta keskellä ja reunoilla virtaus on pienempää. Tätä tukee myös kuva 3.4. Raportissa on myös todettu, että lämmönjohtavuuden laskenta konvektiolianteessa on vaikeaa, sillä se riippuu tarkastelukohdasta. Lopputuloksena testistä ja analyysistä todetaan, että konvektiolla voi olla suuri vaikutus lämmönsiirtymiseen rautatiepenke-

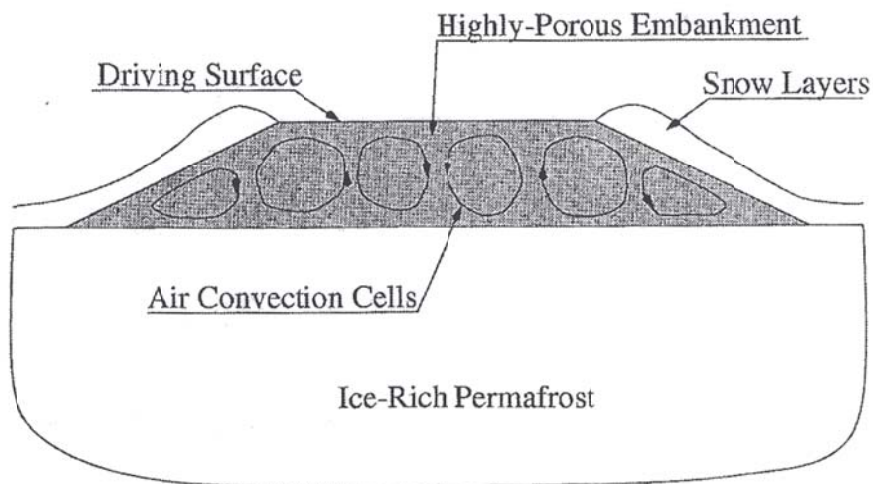
reissä. Testit ja laskelmat todistivat lisäksi, että sisäisen läpäisevyyden laskennassa käytetty kaava toimi oikein näillä lähtöarvoilla.



Kuva 3.5 *Goering et al. tutkimusryhmän mallinnus ilman kulkemisesta konvektiolianteessa. Vasemmanpuoleinen kuva on näytteen keskilinjalta ja oikeanpuoleinen reunalta. (Goering et al. 2000)*

Goering (1998) on tehnyt tutkimusta Alaskan yliopistossa myös hieman erilaisista lähtökohdista, sillä ajatuksena on ollut hyödyntää konvektiota ikerouta-alueella. Tutkimus on tehty ikeroudassa olevista tiepenkereistä, joissa ilman konvektiosta on jopa hyötyä, sillä karkearakeinen ja avoin penkere luovuttaa talvella konvektion myötä tehokkaasti lämpöä, jolloin jäätyneen kerroksen paksuus kasvaa. Kesällä konvektiota ei pääse tiheyserojen vuoksi syntymään, sillä lämpötilagradientti on konvektion kannalta väärinpäin. Vuonna 1998 julkaistu artikkeli kertoo Alaskassa sijaitsevan koe-penkereen tuloksista. Kohdetta on seurattu yli kahden vuoden ajan.

Goeringin mukaan Lunardi (1981) on todennut, että maanpinnan energiatasapaino on monimutkainen ilmiö, johon vaikuttaa vuotuinen lumipeite, kasvillisuus, aurinko ja pitkäaaltoinen säteily, pinnankosteus ja ilmankehän lämpötila. Nämä vaikuttavat paljon vuotuisen keskimääräiseen pinnanlämpötilaan. Jos pysyvän roudan alueelle rakennetaan tiepenkereitä, niillä on suuri vaikutus kohteen ”lämpöjärjestelmään”. Tämä johtaa monesti pintalämpötilojen nousuun, jolloin pysyvä routa voi sulaa. Tilaanne voi myös johtaa muodonmuutoksiin, sillä penkereen eri osissa kosteuspitoisuudet, lumipitoisuudet ja kasvillisuudet ovat erilaisia. Goeringin mukaan on kehitetty monia eri menetelmiä, joilla pysyvä routa saataisiin pysymään paremmin kohteessa. Konvektion hyödyntäminen on ollut suhteellisen uusi menetelmä. Mikäli penger rakennetaan riittävän huokoisesta materiaalista, penkereeseen voi muodostua konvektiosoluja, jolloin lämpöä virtaa tehokkaasti penkereen pohjasta yläpintaan talviaikaan. Artikkelissa kuvataan ilmiötä eräänlaiseksi ”lämpödioksi”, joka johtaa lämpöä talvella pois penkereestä, mutta kesällä lämmönjohtavuus on pienempi. Kuvassa 3.6 on esitetty penger, jossa tapahtuu sisäistä konvektiota.

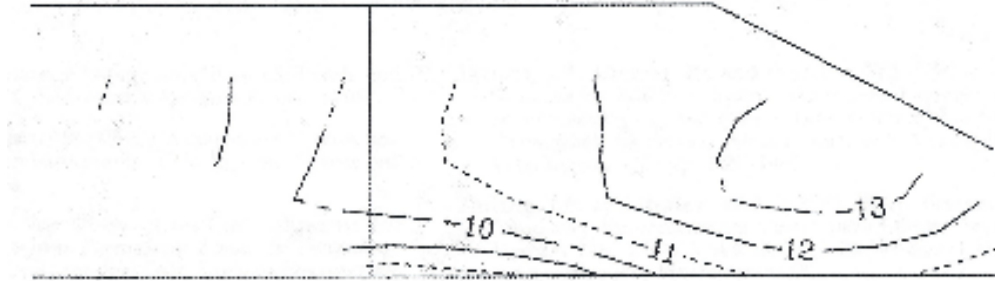


Kuva 3.6 *Hahmotelma karkeasta materiaalista rakennetun tiepenkereen sisäisestä konvektiosta. (Goering 1998)*

Goeringin koepenger rakennettiin Brown's Hill Quarryyn lähelle Fairbanksia vuonna 1993. Sen pituus oli 40 m ja kokonaisleveys 16 m, ajorata oli 6 m leveä sekä korkeus 2,5 m. Testipenger oli rakennettu halkaisijaltaan 50 - 80 mm olevasta murskatusta kivistä. Materiaali oli seulottu niin, ettei mukana ollut alueelle kuulumatonta kiviainesta. Se pidettiin myös puhtaana työn ajan, jotta hienoaineksen määrä pysyi pienenä. Tiivistys oli tehty ajamalla kuormaajalla noin 0,6 m kerroksien päällä. Penkereen päällä ei ollut asfalttia tai muuta peittävää materiaalia. Tiivistys tosin sai kivenmurikat asettumaan varsin tasaisesti, ja lopputuloksena oli yllättävän pehmeä ajopinta, vaikka materiaali oli myös pinnassa 50 - 80 mm kiveä. Penkereeseen asennettiin myös runsaasti lämpötila-antureita. Tutkimustulosten kannalta on syytä ottaa huomioon, ettei penkereellä ollut suljettua yläpintaa, jolloin ilmaa voi liikkua penkereestä sen ulkopuolelle tai päinvastoin. Tätä kompensoitiin antamalla ensilumen kerääntyä yläpinnan päälle ja tiivistämällä lumikerros jääkerrokseksi. Jääkerroksen loppupaksuus oli noin 100 mm luokkaa. Tämän jälkeen lumi poistettiin ajopinnalta normaalin auraustavan mukaisesti. Lumi aurattiin sivuluiskiin. Kun lumi oli sulanut keväällä 1994, yläpinnalle ja penkereen sivuluiskiin asennettiin muovikalvo. Syksyllä kalvo poistettiin yläpinnalta.

Penkereestä kerättyä mittausdataa Goering tiimeineen analysoi varsin kattavasti. Tuloksista havaittiin, että kalvo penkereen pinnalla esti kesällä lämpenemistä, sillä se estää pakotetun konvektion sekä sateen vaikutuksen. Ilman kalvoa sade aiheutti piikkejä lämpötiloihin. Tutkimuksissa havaittiin myös nopea uudelleenjäätyminen 1,2 m metrin syvyydessä sen jälkeen, kun vesi tunkeutui penkereeseen. Talvella konvektion toimiessa aktiivisesti, penkereessä havaittiin runsaasti variaatiota lämpötilaprofiileissa. Konvektiorakenne penkereen sisällä näytti myös reagoivan ympäristön vaikutuksiin muutamissa päivissä. Tuloksista havaittiin myös, ettei ohut tiivistetty lumikerros penkereen sivuilla estä ympäröivän ilman tunkeutumista sivuluiskasta. Kesällä isotermit ovat periaatteessa vaakasuorassa, kuten on odotettavissa lämmön tullessa penkereen yläpinnasta johtumalla. Toisena talvena sivuluiskassa ollut muovikalvo esti ilman kulkemisen, jolloin konvektiopyörteet olivat enemmän järjestyksessä. Kuvassa 3.7 näkyy helmikuun 1994 tilanne, jolloin penkereen pintaa on peittänyt 100 mm paksuinen tiivistetty jääkerros ja sivuluiskia satanut lumi. Kesällä isotermit on havaittu olevan vaakasuorassa tasossa, kuten johtumistilanteessa yleensä on. Kuvan tilanteesta on selvästi havaittavissa, että rakenteessa tapahtuu konvektiota.

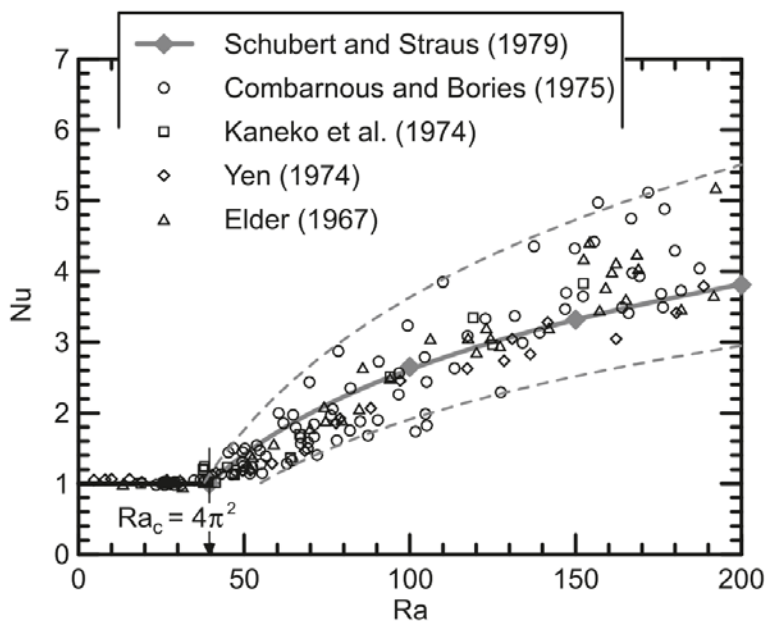
Lopputuloksena todetaan, että ilman konvektiolla on suuri vaikutus lämpöjärjestelmään ja konvektiopenkereet voisivat olla tehokkaita keinoja estää sulamisen aiheuttamia ongelmia ikiroudan alueella.



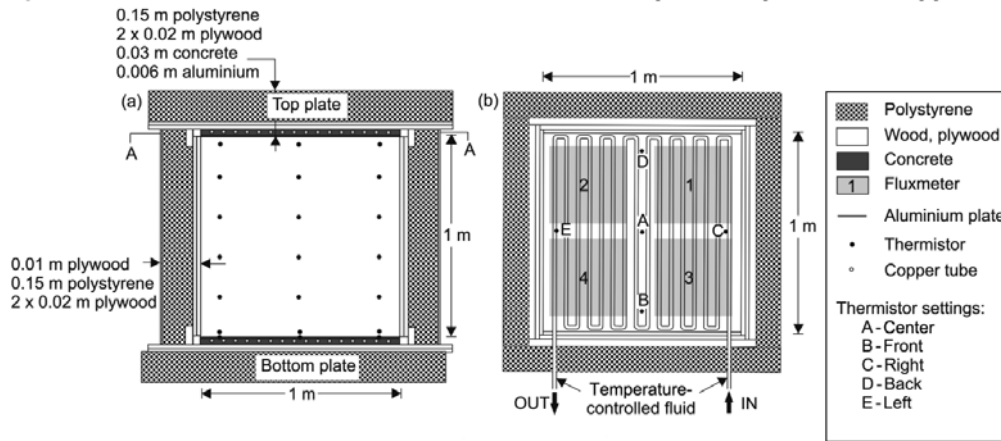
Kuva 3.7. Goeringin testipenkereen isotermit helmikuussa 1994. Kuvasta on havaittavissa, että isotermit poikkeavat selvästi lineaarisesta tilanteesta, jossa lämpöä siirtyy vain johtumalla. Penkereen päällä on ollut 100 mm jääkerros ja luiskissa tiivistämätön lumi. (Goering 1998)

Côté et al.

Côté et al. (2011) ovat tehneet hieman erilaista tutkimusta, sillä he ovat tutkineet materiaalin sisäistä läpäisevyyttä luonnollisen konvektion avulla. Tutkimusaihe on tärkeä, sillä heidän mukaansa luonnollisesta konvektiosta on tehty useita eri tutkimuksia, joissa on käytetty arvioituja sisäisiä läpäisevyyksiä, jotka ovat peräisin hienoille rakeisuuksille tarkoitetuista malleista. Tutkimuksen yhteydessä he ovat analysoineet aiempia tutkimuksia, ja kuvassa 3.8 on piirretty Nusseltin luku suhteessa Rayleighin lukuun. Kuva todistaa, ettei alle kriittisen Rayleighin luvun tapahdu konvektiota. Tuloksien perusteella näyttää siltä, ettei Nusseltin luku kasva täysin lineaarisesti. Testeissään he käyttivät 1 m^3 näytekoolla olevaa testilaitteistoa, jolla tutkittiin 75–202 mm raekoolla olevia materiaaleja. Kuvassa 3.9 on esitetty ryhmän käyttämä tutkimuslaitteisto. Tutkimuslaitteisto on hyvin samankaltainen tässä työssä käytettävän laitteiston kanssa.

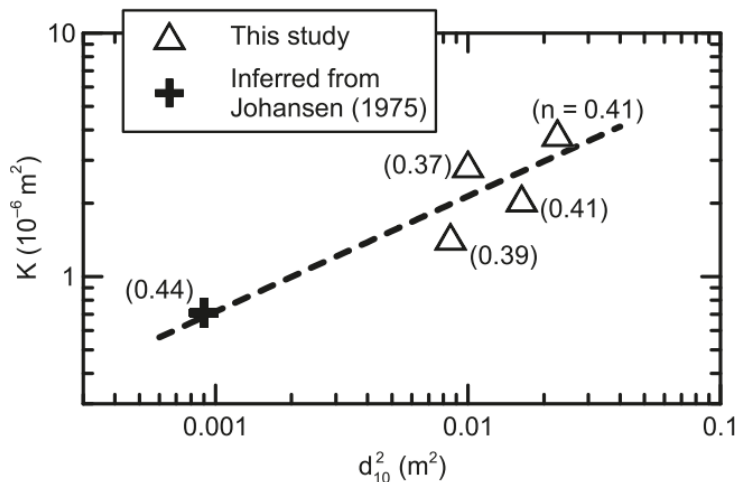


Kuva 3.8 Nusseltin luku suhteessa Rayleighin lukuun eri tutkimuksissa. Tulokset ovat kokeellisia & analyttisiä tuloksia huokoiselle materiaalille suljettussa neliön muotoisessa laatikossa. (Côté et al. 2011)



Kuva 3.9 Côté et al. käyttämän tutkimuslaitteiston periaatekuva. (Fillion et al. 2011 Côté et al. 2011 mukaan)

Côté et al. (2011) ovat raportissaan julkaisseet runsaasti tuloksia sekä heidän omista kokeistaan että uudelleen analysoiduista vanhoista kokeista. Mielenkiintoisin kuvaaja heidän raportissaan on kuva 3.10, jossa on esitetty hallitsevan d_{10} raekoon (10 % raakeista on pienempiä kuin d_{10}) vaikutus sisäiseen läpäisevyyteen. Tässä yhteydessä he ovat myös tutkineet Johansenin testituloksia. Johansenin testeissään käyttämän materiaalin hallitseva raekoko on ollut selvästi pienempi verrattuna heidän omiin tutkimuksiinsa. Tämä ei ole ihme, sillä Côté et al. käyttivät minimissään 75,3 mm raemittaan olevaa materiaalia.



Kuva 3.10 d_{10} läpäisyarvon vaikutus sisäiseen läpäisevyyteen K . (Côté et al. 2011)

Muut tutkimukset

Luonnollisesta konvektiosta on tehty myös runsaasti muita tutkimuksia. Näihin kuuluu esimerkiksi Qian et al. (2011) tekemä tutkimus, jossa on mitattu pienillä virtausantureilla virtauksia murskatussa kiviaineessa. Myös he havaitsivat, että konvektiolla on suuri vaikutus materiaalin käyttäytymiseen. Tutkimus liittyy ikiroutaan, ja he ovat tutkineet sykleissä toistuvan lämpötilamuutoksen vaikutuksia. Vastaavaan aiheeseen liittyy myös Putkosen (1998) tekemä tutkimus maaperän lämpöominaisuuksia Ny-Ålesundissa. Hänen tekemässään tutkimuksessa on myös käsitelty ilmastonmuutosta ja sen vaikutusta arktisiin alueisiin. Lukuisista tutkimuksista on havaittavissa, että luonnollisen konvektion vaikutukset ovat merkittävät ja niitä on ollut syytä tutkia. Eri tutkimustulosten materiaalit poikkeavat kuitenkin Suomen radoilla käytettävistä materiaaleista, joten niistä ei löydy suoraan vastausta siihen, voiko suomalaisissa radoilla tapahtua konvektiivista lämmönsiirtymistä.

4 Konvektiotutkimus laboratoriossa

4.1 Tutkimusohjelma

Laboratoriotutkimukset on toteutettu vuoden 2012 ja 2013 aikana Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallissa, jossa sijaitsee tutkimusta varten rakennettu laitteisto. Laitteiston rakenne on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2. Laboratoriokokeiden tarkoituksena on ollut selvittää, millaisissa olosuhteissa luonnollinen konvektio on mahdollinen ja miten suuri vaikutus sillä on materiaalin teholliseen lämmönjohtavuuteen. Kokeita on tehty erilaisilla kalliomurskemateriaaleilla, lämpötiloilla sekä kosteusolosuhteilla. Luonnon lajittamia materiaaleja ei ole tässä tutkimuksessa käsitelty, sillä ne sisältävät yleensä niin paljon hienoaainesta, että konvektio ei ole todennäköistä. Ulkoiset olosuhteet on mahdollisuuksien mukaan pyritty pitämään kokeiden aikana mahdollisimman samanlaisina. Käytännössä olosuhteet kuitenkin muuttuivat jonkin verran, minkä takia tuloksien analysoinnissa on tarpeen ottaa huomioon lämpöhävikki. Tarkempi selostus lämpöhävikistä on luvussa 4.4.

Laboratoriotutkimukset pohjautuvat pitkälti teoriaan ala- ja ylälämmityksen eroista. Tavoite on ollut määrittää materiaalin lämmönjohtavuus ilman konvektiota sekä konvektion kanssa. Tutkimuksissa luontaisen konvektion esiintymistä on pyritty arvioimaan tehollisen lämmönjohtavuuden muutoksen perusteella sekä näytteessä olevilla lämpötila-antureilla. Testeissä käytettävät eri parametrit perustuvat pitkälti Rayleighin luvun laskennassa käytettyihin suureisiin ja niiden lähtökohtiin. Tärkeimpiä muuttujia luonnollisen konvektion arvioinnissa ovat materiaalin sisäinen läpäisevyys, lämpötilaero, liikkuvan väliaineen ominaisuudet sekä näytteen korkeus. Myös keskimääräisellä lämpötilalla on merkitystä, sillä se vaikuttaa liikkuvan väliaineen ominaisuuksiin (viskoosivoimat sekä tiheys). Laboratoriotutkimuksissa luonnollisen konvektion mahdollisuutta testattiin eri materiaaleilla, lämpötilaeroilla, suljetulla ja avoimella yläpinnalla sekä eri väliaineella.

4.2 Tutkimuslaitteisto ja sen rakenne

4.2.1 Konvektiolaitteen perusidea

Konvektiolaitteen toiminta perustuu luonnollisen konvektion fysikaalisiin ominaisuuksiin. Kun materiaalia lämmitetään alhaalta ja jäähdytetään ylhäältä, lämmin ilma tai muu väliaine alkaa kohota tiheyserojen vuoksi. Tällöin lämpö siirtyy ilman tai muun väliaineen mukana eli näytteessä tapahtuu lämmön siirtymistä johtamalla kosketuspintoista toiseen, säteilemällä sekä konvektiivisesti siirtymällä. Jos näytettä lämmitetään yläpuolelta ja jäähdytetään alapuolelta, väliaine ei lähde liikkeelle, koska tihein ilmassa on näytteen kylmällä puolella ja alimmassa mahdollisessa kohdassa.

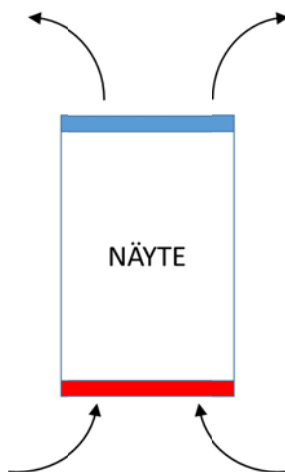
Varsinainen konvektion tutkiminen tapahtuu lähinnä näytteen lämmönjohtavuutta seuraamalla. Mahdollisesti näytteessä liikkuva ilma tai vesihöyry kuljettaa mukanaan lämpöä, jolloin materiaalin tehollinen lämmönjohtavuus kasvaa. Lämmönjohtavuutta mitataan näytteen läpi kulkevan energiamäärän sekä ylä- ja alalaatan lämpötilaerojen avulla. Toinen menetelmä on tarkastella näytteessä olevien lämpötila-antureiden lukemia ja muodostunutta lämpötilagradienttia. Teorian mukaan konvektiotilanteessa

väliaineen liikkuminen aiheuttaa epätasaisen lämpötilajakauman. Tätä teoriaa tukevat myös muualla tehdyt tutkimukset (esimerkiksi Goering 1998), joissa on havaittu konvektiopyörteiden aiheuttamaa epätasaisuutta lämpötiloissa.

4.2.2 Laitteen rakennusprosessi ja rakenne

Konvektiolaitteen prototyyppi

Tutkimuksen alkaessa kesäkuussa 2012 ei ollut vielä varmuutta siitä, mikä olisi paras mahdollinen tapa tutkia ilmiötä. Ensimmäisen prototyyppi perustui näytteen lämmittämiseen kahdella eri tavalla ja näytteen sisällä oleviin lämpötila-antureihin. Tarkoitus oli tutkia lämpötilagradienttia kahden eri tilanteen välillä (ylälämmitys ja alälämmitys), jolloin voisi selvittää, tapahtuuko konvektiota näytteessä lainkaan. Tällä laitteistolla ei kuitenkaan ollut mahdollista selvittää tehollista lämmönjohtavuutta tai konvektion vaikutuksia, sillä arviointi perustui näytteessä oleviin lämpötila-antureihin. Prototyypin periaate on esitetty kuvassa 4.1. Laitteessa ilma pääsi kulkemaan vapaasti näytteen ja ylä- sekä alälämmönvaihdinlaatan läpi. Ajatuksena oli, että jos näytteessä tapahtuu konvektiivista lämmönsiirtymistä, lämmitetty ilma kohoaa ylöspäin jäähdytyslaatan läpi ja päätyy huoneilmaan. Samaan aikaan uutta ilmaa imeytyy sisälle alapuolella olevan lämmityslaatan läpi.

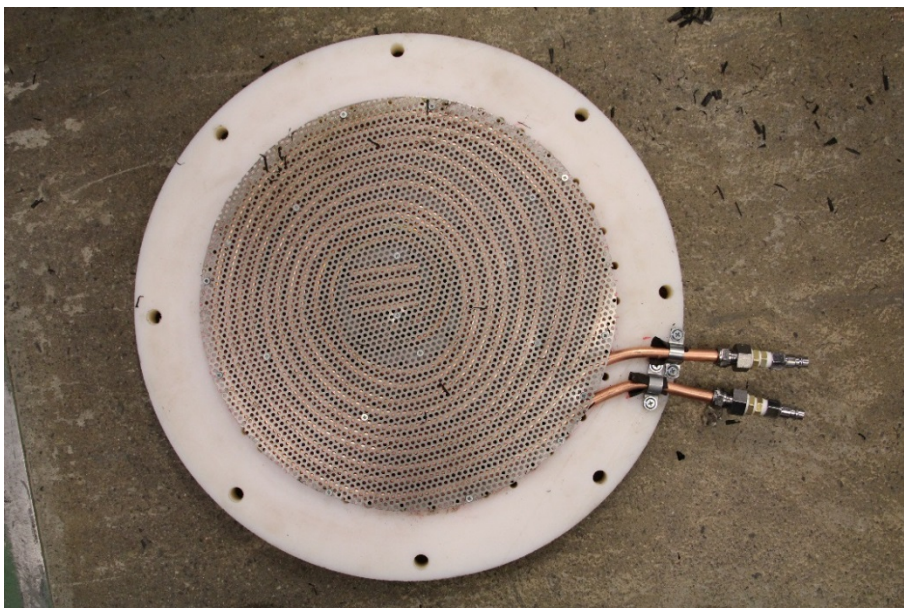


Kuva 4.1 Konvektiolaitteen prototyypin periaatekuva. Ala- ja ylälämmönvaihtimien läpi pääsi kulkemaan ilmaa.

Prototyyppi muodostui noin 300 mm halkaisijaltaan olevasta muoviputkesta, jonka pituus oli noin 1000 mm (kuva 4.2). Laitteen ylä- ja alapuolelle rakennettiin kupari-putkesta spiraalin muotoinen lämmönvaihdin, joka kiinnitettiin noin 20 mm paksuiseen rei'itettyyn muovilevyyn. Toiselle puolelle kierukkaa kiinnitettiin metalliverkko, joka tuli näytettä vasten. Muovilevy oli rei'itetty (kuva 4.3). Sekä jäähdytys- että lämmityselementit olivat molemmat ilmaa läpäiseviä. Ylempi lämmönsiirrin oli muovilaatan osalta pienempi, jotta se mahtuisi putken sisään näytettä vasten. Lopullinen rakenne myös eristettiin solumuovilla sekä nostettiin irti lattiasta, jotta ilma pääsee liikkumaan.



Kuva 4.2 Konvektiolaitteen prototyypin runkorakenne. Putki on noin 1000 mm korkea ja 300 mm halkaisijaltaan. Pohjalla on ilmaa läpäisevä lämmönvaihdin.



Kuva 4.3 Konvektiolaitteen prototyypin kuparikierukkalämmönvaihdin. Näytteen päällä ja alla oli samantyyppiset lämmönvaihtimet, joiden läpi ilma pääsi virtaamaan. Ylempi lämmönvaihdin sopi putken sisään.

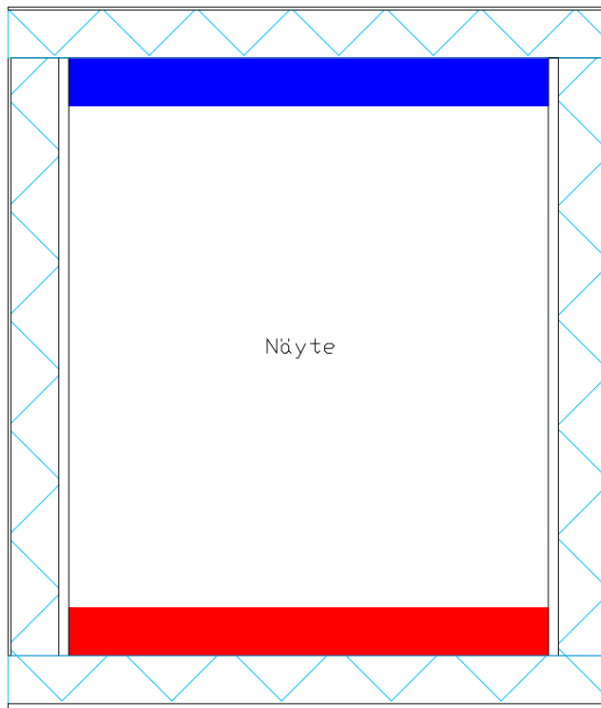
Laitteen toisessa elementissä kulkevaa etanolia jäähdytettiin säädettävällä Kryomat K40D -jäähdytyslaitteella ja toisen elementin vettä pidettiin n. +25 C lämpötilassa yli kuution kokoisella lämpöhauteella. Mittauksessa käytettiin 15 kpl T-tyyppin termopareja, jotka oli jaettu näytteen sisälle. Laitteella saatiin aikaan tuloksia siitä, että ylhäältäpäin lämmitettäessä gradientti on lähes suora ja alhaaltapäin lämmitettäessä poikkeaa suorasta. Erot lämpötilagradienteissa olivat kuitenkin melko pieniä, joten laitteesta ei ollut varsinaiseen tutkimuskäyttöön. Tulosten epävarmuus johtui myös osittain siitä, että laitteen rakenne oli avoin ja hallin ilma kulki näytteen läpi. Tällöin muutokset hallin ilman lämpötilassa vaikuttivat merkittävästi koetuloksiin. Prototyypin toiminta antoi kuitenkin viitteitä siitä, että konvektiotutkimuksessa ollaan oikeilla jäljillä.

Lopullinen tutkimuslaitteisto

Runko ja yleinen rakenne

Ensimmäisen prototyypin jälkeen oli aika rakentaa suurempi laitteisto, joka poikkesi periaatteeltaan prototyypistä, sillä nyt rakenne oli täysin suljettu. Laite on myös huomattavasti edellistä suurempi, koska näytekoko on noin 1 m³. Nykyisen tutkimuslaitteen suunnittelussa otettiin myös mallia muualla tehdyistä konvektiotutkimuksista, joista on kerrottu tarkemmin luvussa 3.2. Suuremmalle näytekoolle on hyvät perusteet, sillä tutkimuksissa testattavat materiaalit ovat karkeita kalliomurskeita, jolloin pieni näyte ei anna edustavia tuloksia. Tutkimuksien päätyttyä voidaan myös todeta, että laitteen koko ei ollut vielääkään yhtään liian suuri, sillä väliaineen liikkuminen kiviainesnäytteessä on hankala ilmiö ja näytteen koolla on todennäköisesti merkitystä konvektion muodostumiseen.

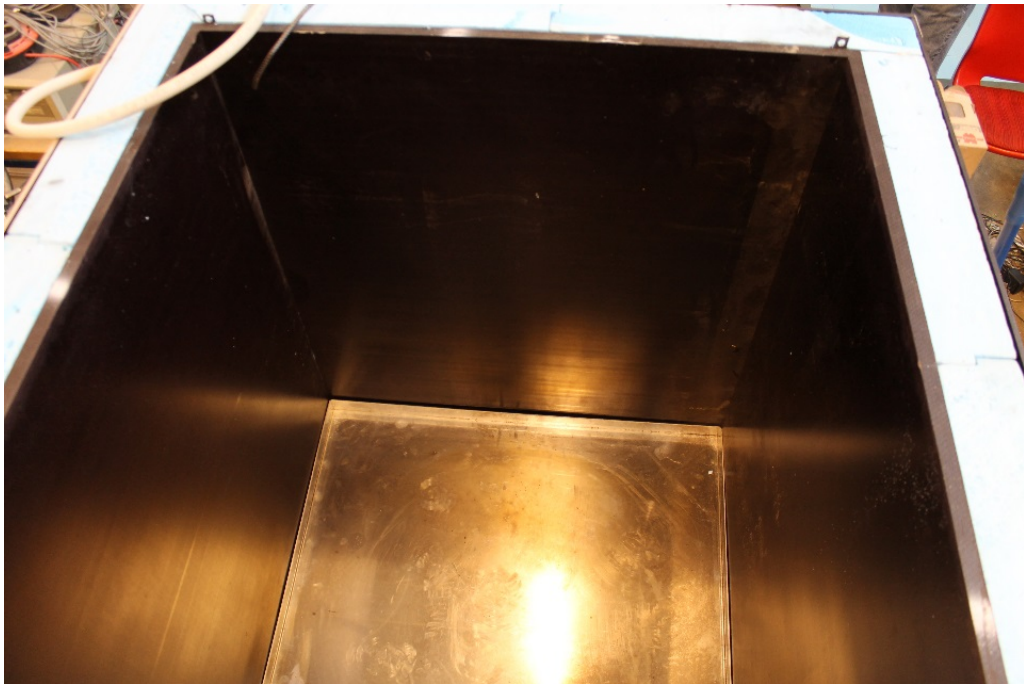
Konvektiolaitteen runko on 28 mm filmivaneria, josta on rakennettu kuution muotoinen näytetila. Näytetilan seinät on eristetty 100 mm XPS-eristeellä, jota suojaamaan on asennettu 6 mm filmivaneri eristeen ulkopintaan. Seinät on myös vahvistettu ulkoapäin 50 x 100 mm puutavaralla, jotta ne kestävät yli 1500 kg painavan näytteen aiheuttaman maanpaineen sekä kevyen tiivistyksen. Rakenteen periaate on esitetty kuvassa 4.4 ja kuvassa 4.5 näkyy runko eristysvaiheessa. Periaatekuvassa sinisellä ja punaisella merkittyjen lämmönsiirtolaattojen kohdalla rakenne poikkeaa seinien rakenteesta. Alapuolella oleva lämmönsiirtolaatta on 100 mm XPS-eristeen päällä ja eristeen alla on 28 mm filmivaneri. Yläpuolella laatta kelluu vapaasti näytteen päällä ja laitteen kansi on rakennettu 100 mm XPS-eristeestä sekä sitä suojaavasta 6 mm filmivanerista. Laitteen näytetila on esitetty kuvassa 4.6. Rungon korkeus on 1250 mm, sillä molemmat lämmönsiirtolaatat vievät 100 mm korkeudesta. Tällöin näytekorkeudeksi jää noin 1000 mm.



Kuva 4.4 Konvektiolaitteen perusrakenne poikkileikkauksena. Seinärakenne sisältä ulospäin on 28 mm filmivaneri, 100 mm XPS-eriste, 6 mm filmivaneri ja ulkopuolella lisäksi 50x100 mm puut tukemassa rakennetta. Lämmönsiirtolaatat on merkitty kuvaan sinisellä ja punaisella.



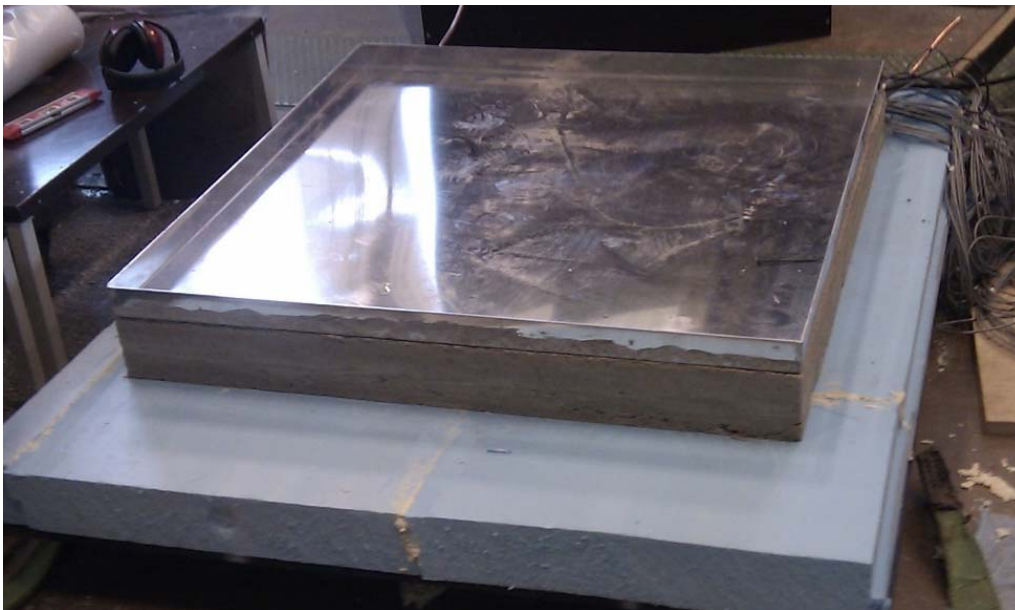
Kuva 4.5. Näytetilan eristäminen 100 mm XPS-eristeellä. Eristeet on liimattu kiinni filmivanerin pintaan ja raot on tukittu uretaanivaahdolla.



Kuva 4.6. Laitteen näytetila, joka on kooltaan noin 1 m³. Pohjalla näkyy alalämmönvaihdinlaatan päällä oleva alumiinikaukalo. Kuvassa näkyy myös seinärakenteen poikkileikkaus.

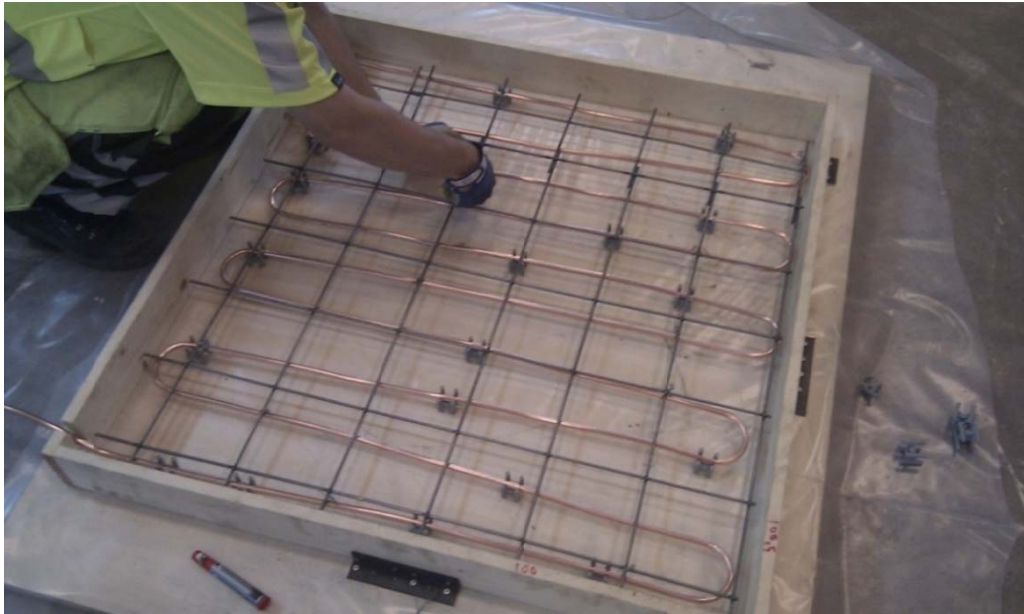
Lämmönsiirtolaatat

Konvektiolaitteen tärkeimpiin osiin kuuluvat näytteen ylä- ja alapuolella olevat betoniset lämmönsiirtolaatat. Laatat ovat mitoiltaan 1020 mm x 1000 mm x 100 mm. Molemmat lämmönsiirtolaatat on rakennettu niin, että ne voivat joko jäähdyttää tai lämmitellä näytettä. Laattojen paikkoja ei siis tarvitse vaihtaa kesken tutkimuksen. Laatat jäävät täysin laitteen näytetilan sisäpuolelle, ja ne ovat myös eristettyjä. Alapuolisen lämmönsiirtolaatan päälle on rakennettu 3 mm paksuisesta alumiinista kaukalo, jonka päälle näyte tulee (Kuva 4.7). Alumiinikaukalon tarkoitus on jakaa laatasta siirtyvä lämpö tasaisesti sekä suojata betonilaattaa teräviltä kiviltä. Alumiinin hyvä lämmönjohtavuus myös parantaa lämpövuointureiden tarkkuutta. Lisäksi 50 mm korkea kaukalo on vesitiivis, jotta näytettä voidaan kastella. Yläpuolisen lämmönsiirtolaatan alapinnassa on myös 2 mm alumiinilevy suojaamassa betonilaattaa.

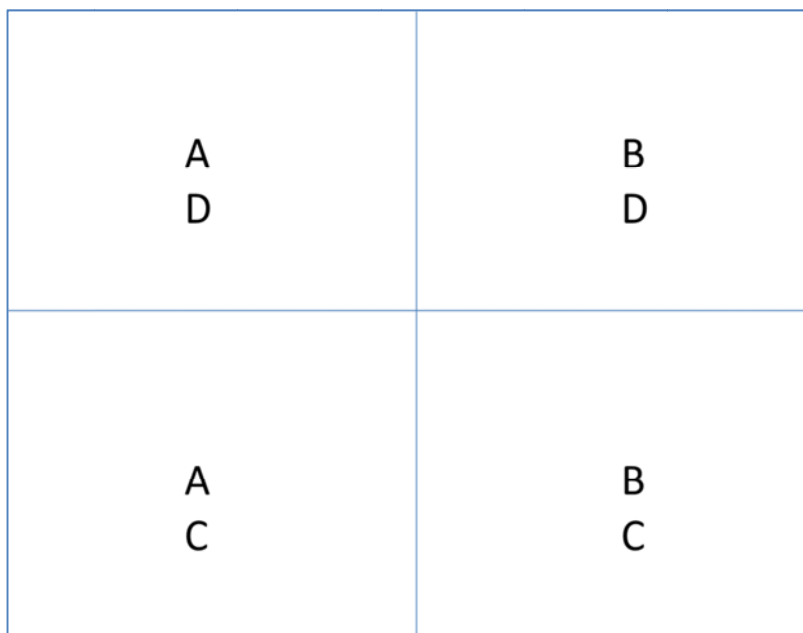


Kuva 4.7 Näytteen pohjalla oleva lämmönsiirtolaatta sekä sen päällä oleva alumiininen kaukalo. Laatta on 100 mm paksuisen XPS-eristeen päällä, jonka alla on filmivaneri kantamassa rakennetta.

Laitteen lämmönsiirtolaatat eivät ole pelkästään betonilaattoja, vaan ne ovat täynnä tekniikkaa. Betonilaatat ovat Fescon S100 -valmisbetonista muotissa valettuja, ja niiden raudoituksena on käytetty 5 mm saneerausverkkoa. Ylä- tai alalaatan jäähdytys on toteutettu nestekierrolla ja sitä varten laattojen sisälle on asennettu 10 mm kupariputkesta tehty jäähdytyskierukka, jonka laatan sisällä olevan osan pituus on noin 10 m. Kupariputken ja teräsverkon asennus muotin sisälle näkyy kuvassa 4.8. Laattojen lämmitys on toteutettu sähköllä, koska sen avulla tehonmittaus on tarkkaa ja helppoa. Kummankin betonilaatan sisään on valettu 80 metriä silikonikaapelia, jonka poikkipinta-ala on 0,50 mm². Lämmityskaapeli on asennettu neljään 20 metrin pituiseen osaan (kuva 4.9) siten, että tarvittaessa laitteella voidaan lämmitellä vain toista puolta laatasta. Tämän tutkimuksen aikana laattaa on kuitenkin lämmitetty aina tasaisesti. Koska käytetty silikonikaapeli on ohutta, eri lämmityslohkojen virransyöttöä on jatkettu huomattavasti paksummalla kaapelilla laatan sisällä niin, että laitteen ulkopuolella oleva johto ei lämpene.

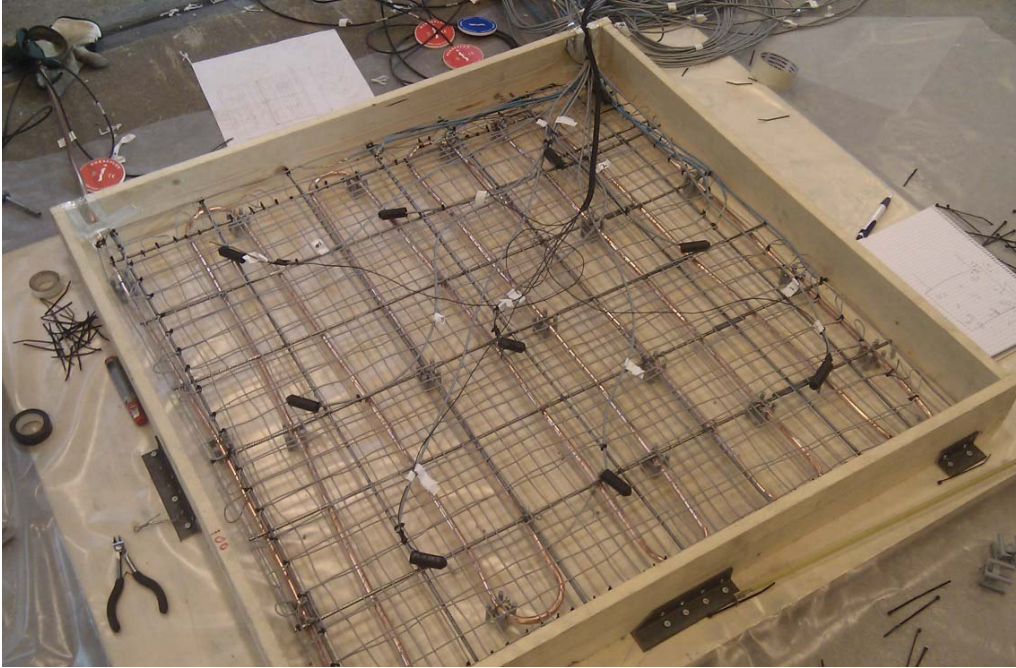


Kuva 4.8 Laattojen valmistuksessa käytettävä muotti, teräsverkko sekä jäähdytyksessä käytettävä kuparikierukka.



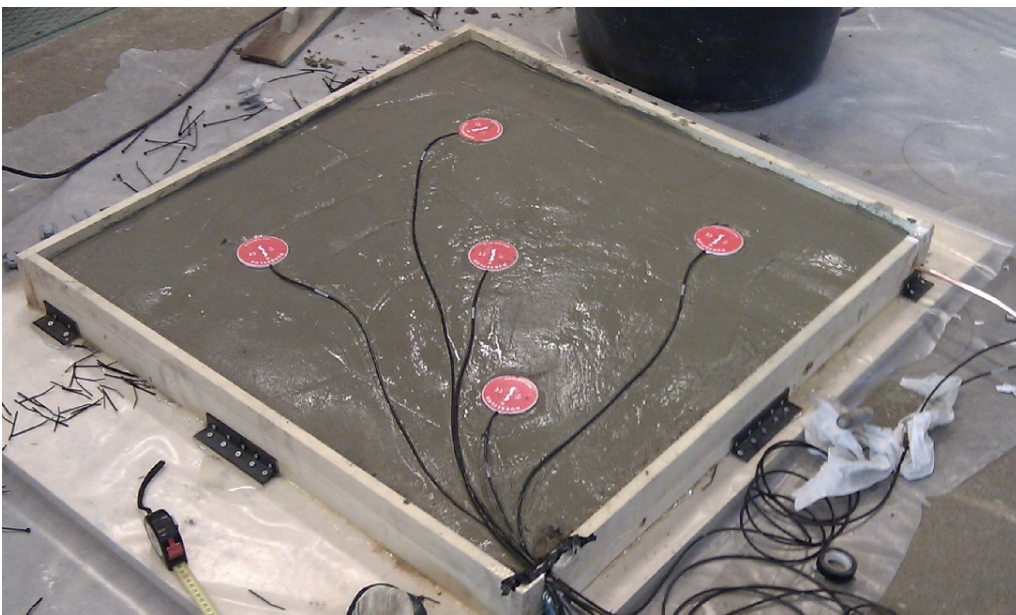
Kuva 4.9. Laitteen lämmönsiirtolaatoissa olevan sähkölämmityksen periaatekuva. Lämmitys on toteutettu neljällä lohkolta siten, että jokainen lohko kattaa aina puolet laatasta.

Molemmissa laatoissa on erittäin kattava lämpötilamittaus, 10 kpl LM335-antureita sekä 5 kpl termopareja. Kuvassa 4.10 näkyy antureiden sijoittelu. Viisi termoparia on asetettu samoihin paikkoihin LM335-antureiden kanssa nurkkiin sekä keskelle. Kuvan yläreunassa näkyy muotin ulkopuolella lämpövuoanturit, jotka odottavat asennusta.



Kuva 4.10 Lämpötila-anturit ennen valua. Kuvassa näkyy 10 kpl LM335 anturia (isot mustat) sekä viisi termoparianturia, jotka ovat samoissa paikoissa. Lämpötila-antureiden alla näkyy harmaa silikonijohdosta tehty lämmitysverkko.

Anturien ja muun laatussa sijaitsevan tekniikan asennuksen jälkeen oli aika valaa laatta. Laatta valettiin notkealla massalla, koska lämmityskaapelien välissä olevat raot olivat varsin pieniä. Muotti täytettiin lähes täyteen korkeuteen, jonka jälkeen valun pinnalle asennettiin lämpövuoanturit (kuva 4.11). Lämpövuoantureiden päälle laitettiin vielä 10–20 mm betonia suojaamaan antureita. Kuvassa 4.12 alalaatan valu on valmis. Valu tiivistettiin ennen lämpövuoantureiden asennusta betonivibralla. Valu viimeisteltiin lämpövuoantureiden sijoittelun jälkeen, ja tämän jälkeen laatan pintaan hierrettiin tiiviisti kiinni alumiininen kaukalo.



Kuva 4.11 Lämpövuoantureiden asennus valun yhteydessä. Antureiden päälle tuli noin 10 mm verran betonia.



Kuva 4.12 Alalaatan valu valmis. Laatan päälle tulee vielä alumiininen kaukalo, joka hierrettiin paikalleen valun ollessa vielä kostea. Kuvan oikeassa alakulmassa näkyy varsin massiivinen johtonippu, joka menee laattaan.

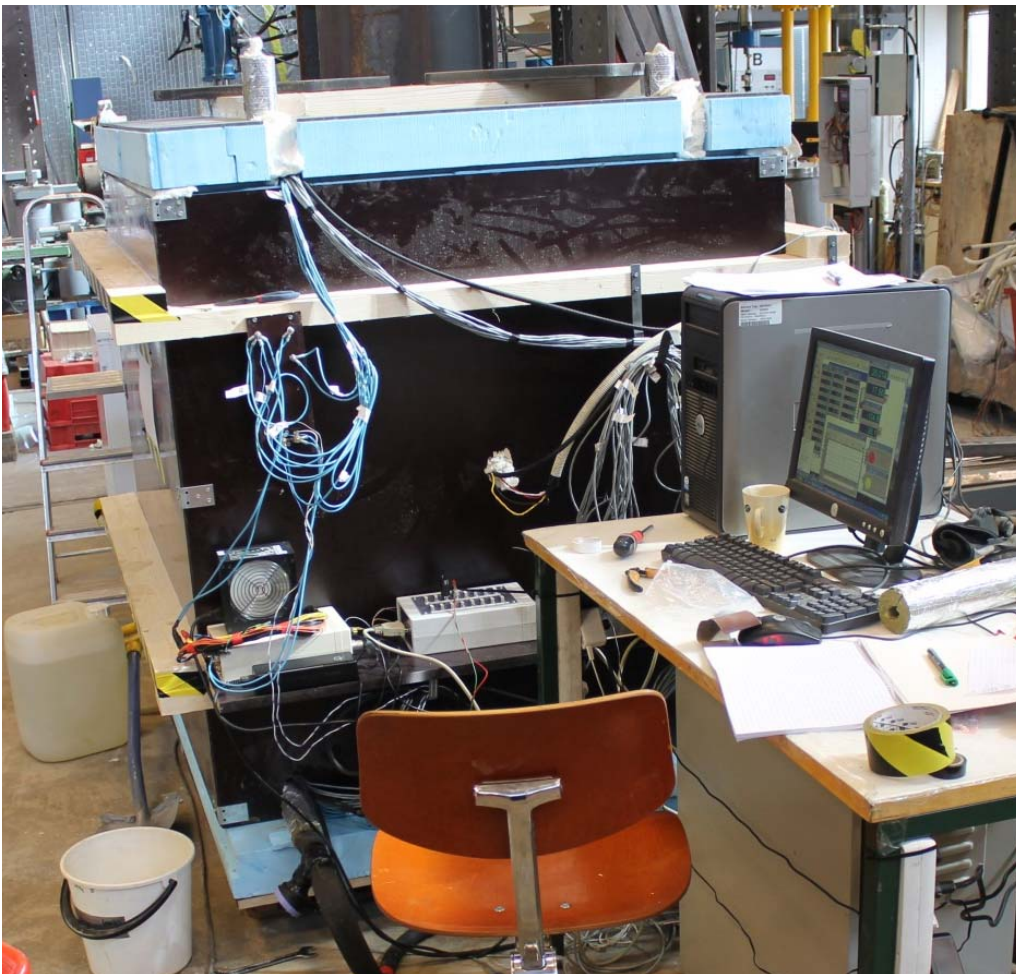
Ylälaatta on periaatteeltaan samanlainen kuin alalaatta. Lämpövoantureita ei ylälaattaan ole asennettu, ja rakenne on tehty peilikuvana. Tällöin 2 mm paksuinen alumiinilevy on laatan alapuolella ja laatta on omalla painollaan näytteen päällä. Alumiinilevylle on myös tehty tartunnat betoniin, sillä muuten levy ei pysyisi kiinni laatussa. Putki- ja johtolähdöt ovat ylöspäin, jotta näytekorketta voidaan säätää. Kuvassa 4.13 on esitetty ylälaatan rakenne ennen valua, ja kuva 4.14 on valun jälkeen. Jälkimmäisessä kuvassa näkyy myös laatan yläpintaan asennetut nostokoukut, joiden avulla ylälaattaa voidaan siirtää siltanosturilla. Laatan paino lienee noin 250 kg.



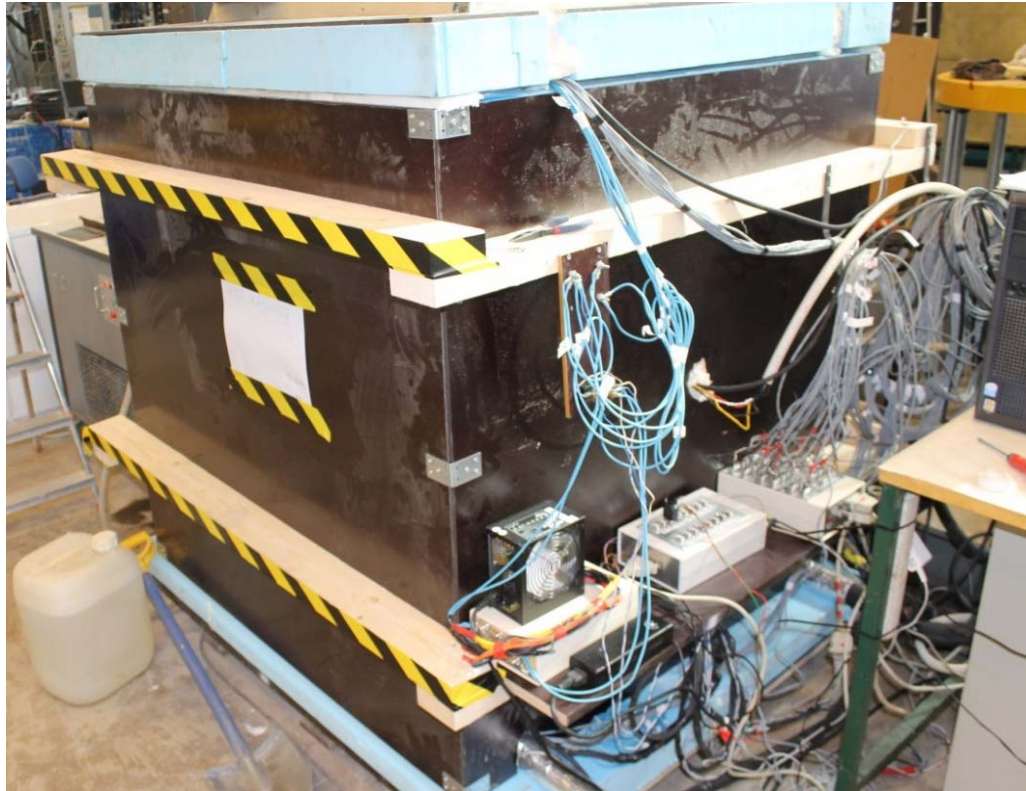
Kuva 4.13 Näytteen päällä oleva lämmönsiirtolaatta. Laatussa olevat rakenteet on kasattu alalaatan peilikuvana, ja ne ovat näytteen suhteen samoin päin. Ylälaatussa ei ole lämpövoantureita. Myös johdot ja kupariputket lähtevät ylöspäin, jotta laatta voi vapaasti kellua näytteen päällä.



Kuva 4.14 Ylälaatta valun jälkeen. Laatan pintaan on asennettu nostokoukut, jotta painavaa laattaa voidaan siirtää siltanosturilla.



Kuva 4.15 Konvektiolaite käyttökunnossa. Etualalla näkyy myös laitetta ohjaava tietokone ja alla on laitekaappi, joka sisältää dataloggerin.



Kuva 4.16 Konvektiolaite käyttökunnossa. Laatikon takana näkyy Kryomat-jäähdytyslaite, joka kierrättää kylmää nestettä jäähdyttävässä laatassa.

Ohjaus- ja mittausjärjestelmä ja niiden toiminta

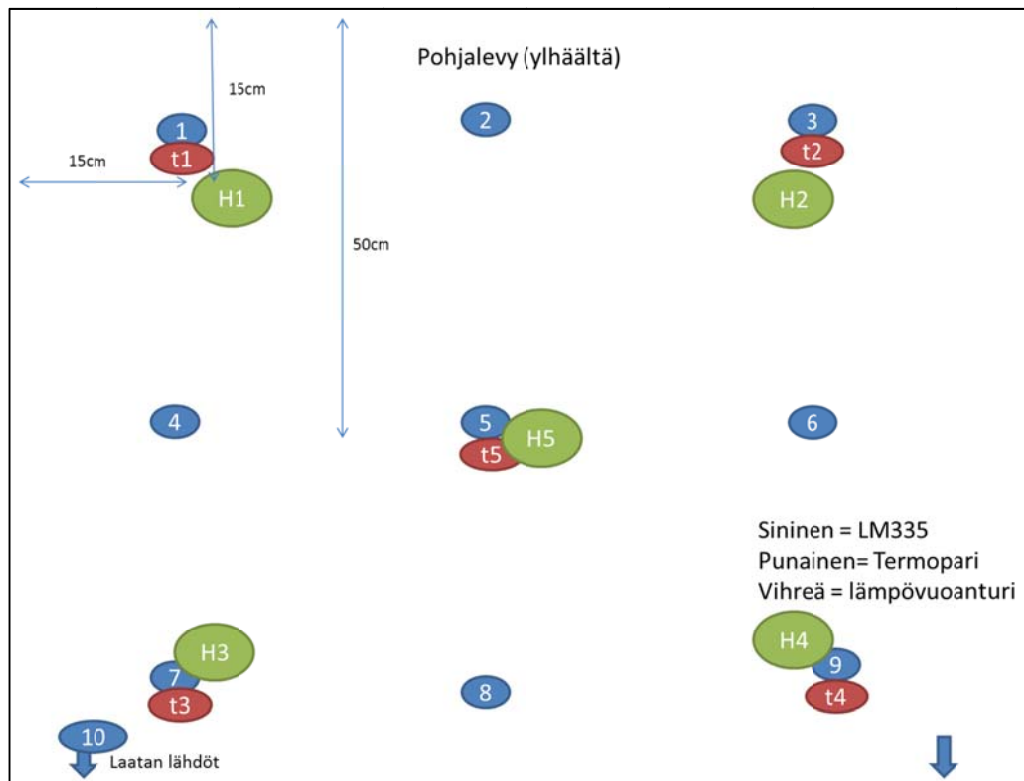
Konvektiolaitteen toiminta vaatii tarkan ohjaus- sekä mittausjärjestelmän. Laitteen ohjaus ja mittaus ovat molemmat tietokoneohjattuja. Ohjausohjelmisto on toteutettu DasyLab-ohjelmalla, jonka teki laitteeseen DI Heikki Luomala. Ohjaus laitteessa on toteutettu niin, että lämmin laatta pidetään vakioämpötilassa sähkölämmityksen avulla noin $0,1^{\circ}\text{C}$ tarkkuudella ja jäähdyttävän laatan lämpötila säädetään suoraan nestettä jäähdyttävästä Kryomat K40D -jäähdytyslaitteesta. Ohjelmisto tallentaa kaikkien antureiden lukemat 5 minuutin välein. Ohjelmalla valitaan joko ylä- tai alalaatan lämmitys sekä haluttu lämpötila lämpimälle laatalle.

Laatan lämmitys toimii laitteessa sähköllä. Kaikissa tässä työssä tehdyissä kokeissa lämmitys on tapahtunut koko laatan vakioämpötilalla, jolloin on hyödynnetty lämmitettävän laatan kaikkia neljää eri lämmityslohkoa. Lämmitysjärjestelmälle sähköä syöttää tähän käyttöön muokattu 500 W tietokoneen virtalähde. Tietokone ohjaa toisen loggerin välityksellä kahta eri relettä siten, että tehokas lämmitys tehdään 12 V jännitteellä, jolloin lämmitysteho on ollut 140–150 W. Kun laatan lämpötila on lähellä tavoitelämpötilaa, laite siirtyy käyttämään 5 V jännitettä, jolloin lämmitysteho on pienempi. Jännitteenvaihdon idea on kasvattaa lämmitysjaksojen pituutta, jolloin lämmitys ja lämmitystehon mittaus on ainakin teoriassa tarkempi. Lämmitystehoa mitataan Agilentin dataloggerin jännitemittauksella ja virran mittaukseen käytettävällä virtashuntilla. Näiden perusteella saadaan selville laitteen lämmitysteho. Virran mittaus on tarpeen, sillä kun laattaa lämmitetään pitkään, silikonikaapelin resistanssi muuttuu niin paljon, ettei mittaus pitäisi enää paikkaansa. Ohjauksessa käytettävä laatan lämpötila saadaan kymmenen LM335-anturin lämpötilan perusteella.

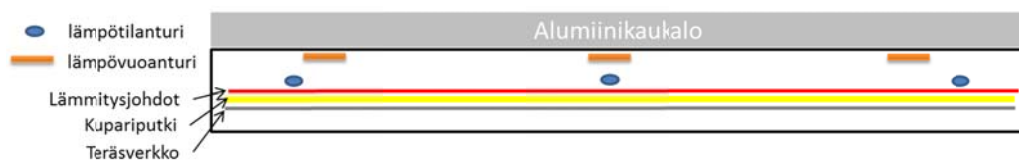
Käytettävä Kryomat K40D -jäähdytyslaite on vanha mutta tehokas. Valittu lämpötila täytyy säätää laitteesta käsin. Laitteen nestesäiliön lämpötilaa on myös mitattu LM335-lämpötila-anturilla. Käytettävä jäähdytysteho on myös kiinnostava asia, ja sen mittaukseen on käytetty pulssilähdöllä olevaa vesimittaria sekä meno- ja paluuputkissa olevia PT100-lämpötila-antureita. Lämpötila-anturit on kytketty siltakytkennällä, koska meno- ja paluuveden lämpötilaero on melko pieni, sillä laite kierrättää vettä yli 250 litraa tunnissa. Virtauksen ja lämpötilaeron perusteella on mahdollista laskea laatasta tullut lämpöenergia virtaavan nesteen ominaislämpökapasiteetin avulla. Käytettävä neste oli aluksi vettä, mutta myöhemmin siihen lisättiin joukkoon etanolia.

Laitteen tärkeimmät mittalaitteet ovat lämpövuuanturit, joiden avulla selviää, paljonko lämpöä virtaa alalaatan läpi näytteeseen. Koska lämpövuuanturit ovat alalaatan valun pinnassa ja sen päällä on hyvin lämpöä johtava alumiinilevy, lämpövuantureiden antama lukema on tarkin keino päästä selville siitä, paljonko lämpöenergiaa siirtyy näytteen läpi. Laitteessa käytetyt lämpövuuanturit ovat Huksefluxin HFP01-antureita, joille valmistaja lupaa +5/-5 % tarkkuuden normaaleissa olosuhteissa. Antureiden halkaisija on 80 mm ja paksuus 5 mm. Antureiden valmistaja ei tiennyt, mitä tapahtuu, jos anturit valetaan betonin sisään. Kyseiset anturit ovat kuitenkin vedenpitäviä, ja niitä käytetään myös maaperässä, joten yhdelle anturille tehtiin koevalu. Ongelmia ei ilmennyt, joten kaikki 5 kpl valettiin alalaattaan. Anturit on kalibroitu tehtaalla, ja jokaiselle anturille on toimitettu kalibrointitodistus ja käytettävä kerroin.

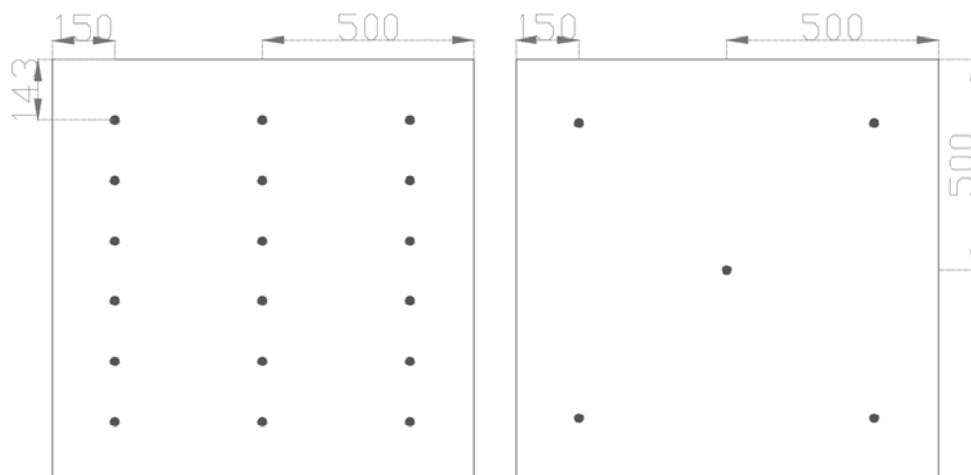
Mittauksissa laite tarvitsee kaksi eri dataloggeria. Jatkuvan mittauksen anturit (esimerkiksi vesimittari) luetaan Advantechin USB-4716-dataloggerilla ja termoparit sekä muut loput anturit Agilent 34970A -loggerilla. Agilentin laitteeseen on asennettu kolme laajennuskorttia, jolloin kanavia on käytössä 60 kpl. Aluksi ensimmäisen prototyypin kanssa kävi ilmi, että termoparien mittaamisessa tulokset vaihtelivat epämääräisesti, kun hallin lämpötila vaihteli nopeasti. Tämän virhetekijän estämiseksi dataloggeri on ollut isossa laitekaapissa, jossa lämpötilanvaihtelut tapahtuvat riittävän hitaasti. Molemmissa laatoissa on 10 kpl LM335-lämpötila-antureita. Anturit on kalibroitu jääpalojen avulla ennen asennusta. Kuvassa 4.17 on esitetty alalaatan anturit ja niiden paikat. Ylälaatta on antureiltaan samanlainen, mutta lämpövuuanturit puuttuvat. Kuvassa ei näy sitä, että anturit sijaitsevat eri syvyyksillä. Termoparit sekä LM335-lämpötila-anturit ovat samassa paikassa, mutta lämpövuuanturit ovat lähellä laatan yläpintaa. Kaikki mittauksessa käytettävät termoparit ovat T-tyyppiä ja ovat tarkkoja tutkimuksessa esiintyvillä lämpötiloilla. Näytteessä on 30 kpl termopareja, joiden paikat on esitetty kuvassa 4.19. Anturit on jaettu kuuteen eri kerrokseen niin, että jokaisessa kerroksessa on viisi anturia. Näytteessä olevilla antureilla voidaan tarkastella sitä, miten lämpötilat jakautuvat eri lämmitystilanteissa.



Kuva 4.17 Alalaatan antureiden sijoittelu. Ylälaatta on muuten samanlainen, mutta lämpövuointurit puuttuvat.



Kuva 4.18 Alalaatan poikkileikkaus. Ylälaatta on peilikuva alalaatasta, ilman lämpövuointureita. Myös alumiinikaukalon tilalla on pelkkä alumiini-levy.



Kuva 4.19 Näytteessä olevat termoparilämpötila-anturit. Vasen kuva on poikkileikkaus sivulta, ja oikealla on tasokuva ylhäältäpäin.

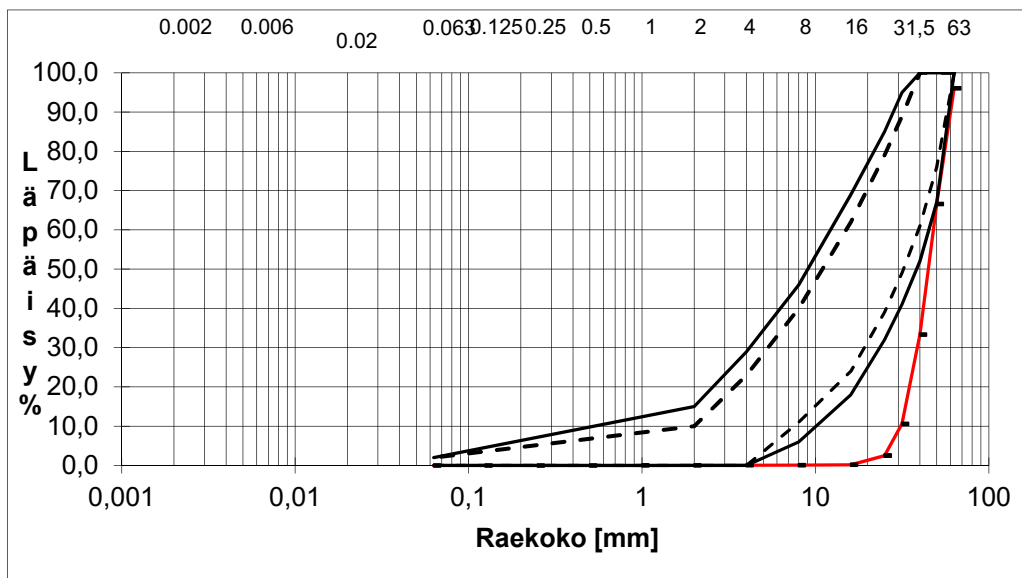
4.2.3 Laitteiston toiminta kokeissa

Rakennettu laitteisto osoittautui varsin hyvin toimivaksi kokonaisuudeksi yli vuoden kestäneissä kokeissa. Suurin yksittäinen esiin tullut parannuskohde on laitteen eristys, sillä 100 mm XPS osoittautui liian ohueksi. Toinen vaihtoehto eristämiseksi olisi ollut vakaampi ympäristö tai telttä, jonka avulla lämpötila pidetään vakiona laitteen ympärillä. Muita pieniä ongelmia oli muun muassa jäähdytyskoneen kanssa, sillä vanhasta koneesta hajosi vettä kierrättävän pumpun laakerit testien alkuvaiheessa. Pumpun korjaus kuitenkin onnistui eikä myöhemmin tämän asian kanssa ei ollut ongelmia. Alkuvaiheessa jäähdytyskierrossa oli puhdasta vettä, sillä tarkoitus ei ollut mennä alle 0 °C lämpötiloihin. Puhdas vesi osoittautui kuitenkin ongelmalliseksi, sillä nestekierrossa alkoi kasvaa levää ja se tukki ohuet putkistot. Tämä ongelma korjautui lisäämällä kiertoon etanolia. Etanolin lisäämisellä on kuitenkin vaikutusta laitteen jäähdytystehon laskentaan, sillä seoksen ominaislämpökapasiteetti poikkeaa puhtaasta vedestä. Kokeiden aikana DasyLab-ohjausohjelmisto kaatui muutaman kerran selittämättömästi. Tämä tapahtui hyvin pitkään kestäneiden koejaksojen aikana. Kaiken kaikkiaan laitteisto toimi yllättävän hyvin ja kokeet onnistuivat odotusten mukaan.

4.3 Testattavat materiaalit

Raidesepeli

Ensimmäinen testattava materiaali oli raidesepeli, joka on tutkittavista materiaaleista karkearakeisin. Materiaalin toivottiin olevan niin karkeaa, että siinä olisi mahdollista saada aikaan luontainen konvektio, ja testien perusteella oletus oli oikea. Raidesepeliä käytetään radan tukikerroksessa ja sen d/D raekoko on 31,5/63 mm. Hienoainesta raidesepelissä on hyvin vähän: uudessa sepelissä 0,063 mm seulan läpäisyprosentti saa olla maksimissaan 1,0. Käytännössä hienoaines on siis lähinnä sepelin pinnalla, erikseen sitä ei juuri esiinny (SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset, kansallinen soveltamisohje). Tutkittavan raidesepelin rakeisuus myös tarkistettiin seulomalla, ja tulokset on esitetty kuvassa 4.20. Kuvaan on piirretty myös kalliomurskeesta valmistetun eristys-välikerrosmateriaalin rajat vertailun vuoksi. Yhtenäiset mustat viivat kuvassa ovat ehdottomia yksittäisen näytteen rajoja ja 90 % tuloksista tulee sijaita katkoviivoilla rajatun alueen sisäpuolella. Raidesepeli on rakeisuudeltaan huomattavasti homogeenisempaa verrattuna eristys-välikerrosmateriaaliin (tästä lähtien käytetään lyhennettä EV-materiaali). Tällöin suurien kivipartikkelien väliin jää helposti enemmän tyhjää tilaa, jolloin väliaine voi liikkua helpommin. Kuvassa 4.21 on nähtävillä testattu raidesepeli laitteen sisällä.



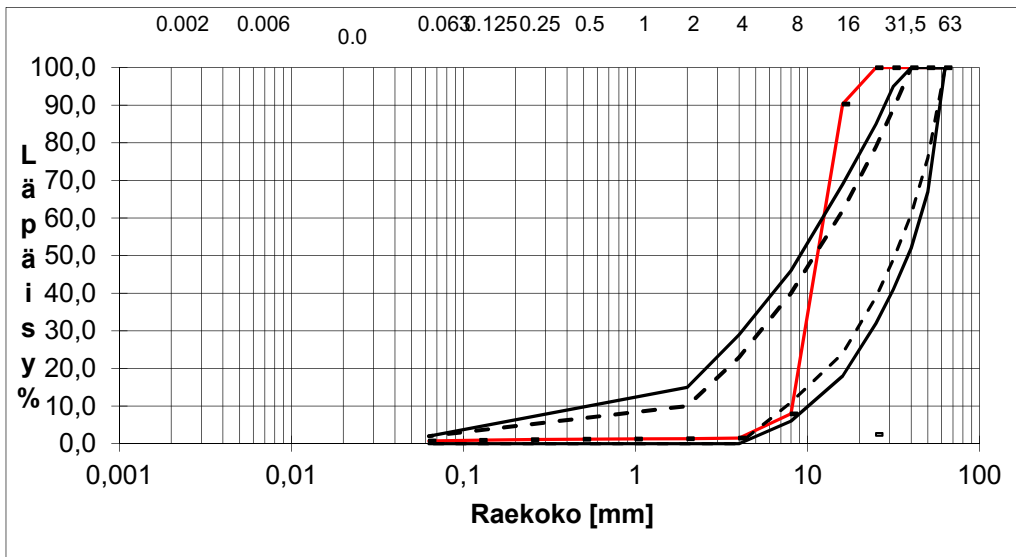
Kuva 4.20 Testattavan raideseppelin raekokojakauma. Kuvassa mustalla piirretyt yhtenäiset viivat ovat yksittäisen rakeisuustuloksen vaihteluvälit EV-materiaalille. 90 % tuloksista tulee sijaita katkoviivoilla piirretyyn alueen sisäpuolella.



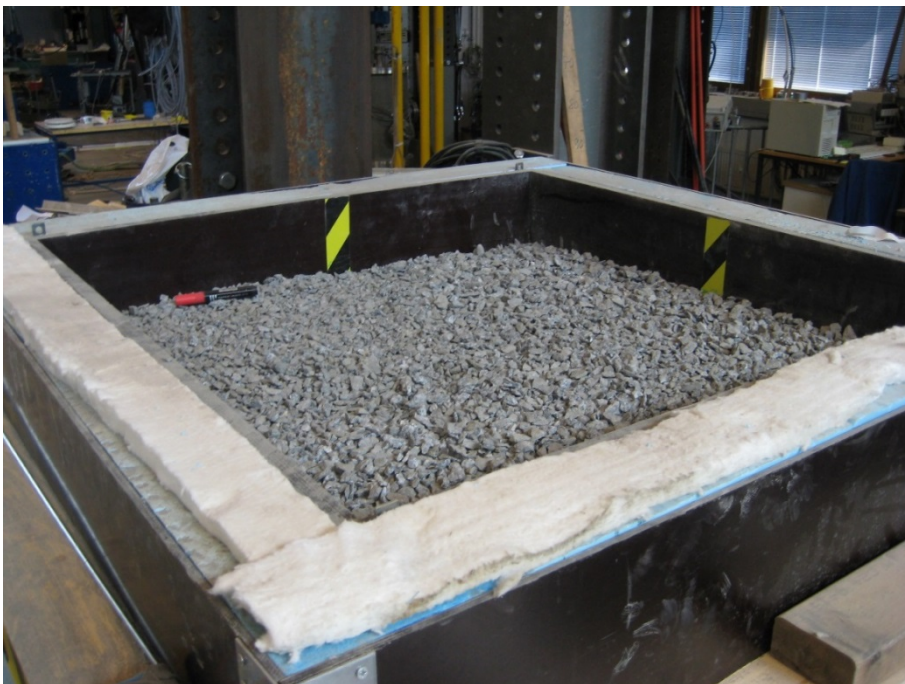
Kuva 4.21 Raideseppelinäyte testiajojen jälkeen. Kuvassa näkyvien puukapuloiden avulla ylälämmityslaatta nostettiin irti näytteestä. Näyte on kastunut kostean tilan testauksessa ylhäälle saakka.

5/16 mm kalliomurske

Toinen testattu materiaali oli 5/16 mm kalliomurske, jonka kaupallisia nimiä ovat esimerkiksi salaojasepeli tai kapillaarikatkosepeli. Materiaali valittiin testeihin, koska sen raekoko on selvästi raidesepeliä pienempi, mutta se ei kuitenkaan sisällä hienoainesta. 5/16 mm kalliomursketta ei käytetä ratapenkereissä suoraan. Kuvassa 4.22 on materiaalille tehdyn seulonnan tulokset. Kuvaajassa on myös EV-materiaalivaatimuksen rajat, kuten raidesepelinkin kohdalla. 5/16 mm materiaali on myös melko homogeenistä, sillä sen raekoko painottuu melko pienelle välille. Materiaalissa partikkeleiden väliin jäävä tyhjätila on silmämääräisesti pienempi verrattuna raidesepeliin. Toisaalta pieniä tyhjätiloja lienee enemmän, mutta ne eivät ole niin yhtenäisiä. Testimateriaali näkyy kuvassa 4.23.



Kuva 4.22 Testattavan 5/16 mm kalliomurskeen raekokojakauma. Kuvassa mustalla piirretyt yhtenäiset viivat ovat yksittäisen rakeisuustuloksen vaihteluvälit. 90 % tuloksista tulee sijaita katkoviivoilla piirretyllä alueella.



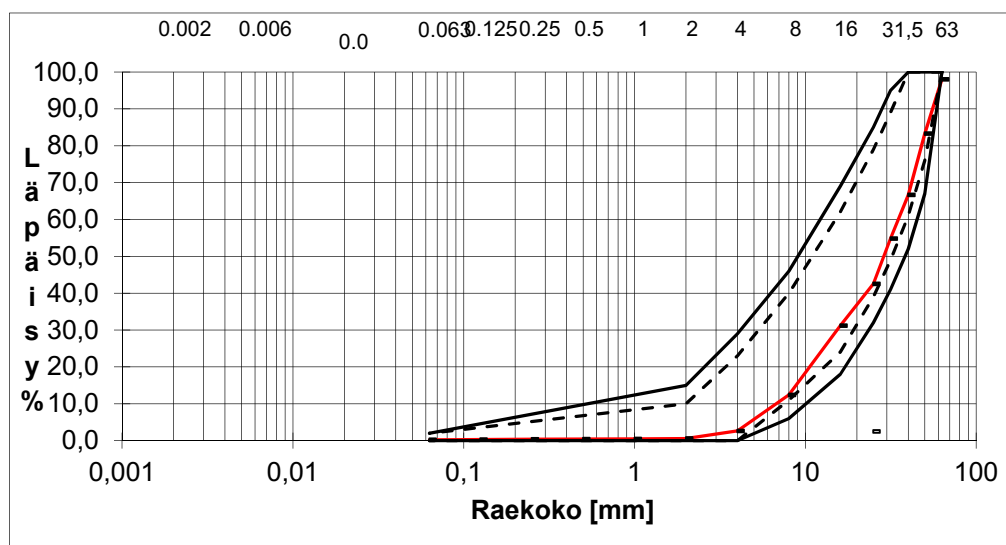
Kuva 4.23 Testattava 5/16 mm kalliomurske konvektiolaitteessa.

EV-materiaali

Ratapenkereen konvektiivisen lämmönsiirtymisen kannalta mielenkiintoisin testattu materiaali oli nykyisin kalliomurskepohjaisissa ratarakenteissa käytettävä yhdistetty eristys-välikerrosmateriaali. Eritys-välikerroksen materiaalivaatimuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2.2. Materiaalin rakeisuusjakauma on selvästi laajempi verrattuna kahteen aiempaan testimateriaaliin, jolloin materiaalin pitäisi olla teoriassa tiiviimpää, mikäli tiivistys onnistuu. Sopivaa materiaalia ei löytynyt lähistöltä valmiina, sillä tällä hetkellä Tampereen ympäristössä ei ole ollut käynnissä suuria ratahankkeita. Tämän takia materiaali valmistettiin eri lajikkeista suhteittamalla. 5/16 mm kalliomurskeen tuloksien perusteella oli järkevää tehdä EV-materiaali mahdollisimman lähelle rajojen karkeaa puolta. Taulukossa 4.1 on esitetty sekoituksessa käytetyt lajikkeet ja niiden osuudet. Jokainen valmistusmateriaali on seulottu ja seulontatuloksia on käytetty oikean suhteitusreseptin löytämiseksi. Valmistetun EV-materiaalin lopullinen rakeisuuskäyrä reseptin mukaan on kuvassa 4.24. Materiaalin raekokosuhte $C_u = d_{60}/d_{10}$ on $31,5/7 = 4,5$. Raekokosuhteen tulisi olla 90 % tuloksista vähintään 6, mutta tulos on kelvallinen, mikäli alle 10 % tuloksista raekokosuhte on vähintään 4. Valmistettu EV-materiaali on siis kelvallinen. Näytettä testattaessa materiaali pyrittiin täyttämään mahdollisimman tasaisesti, jotta lajittumista ei tapahtuisi. Materiaalin valmistuksen aikana tämän tyyppinen materiaali osoittautui kuitenkin erittäin herkästi lajittuvaksi. Testattava aines sekoitettiin isossa laatikossa nosturin kahmarikauhan ja lapion avulla. Materiaaliosat on punnittu nosturivaa'an avulla, joten niissä voi olla pientä epätarkkuutta karkean mittausresoluution takia. Kuvassa 4.25 on nähtävillä EV-materiaali testilaitteessa.

Taulukko 4.1 Kokeita varten valmistetun eristys-välikerrosmateriaalin valmistusmateriaalien suhteet.

Lajike	Osuus näytteestä
Raidesepeli	50 %
5/16 mm kalliomurske	20 %
16/32 mm kalliomurske	20 %
3/6 mm kalliomurske	10 %

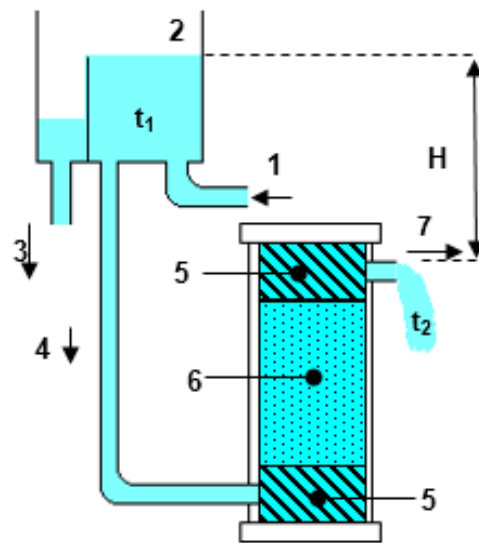


Kuva 4.24. Tutkimusta varten valmistetun eristys-välikerrosmateriaalin raekokojakauma. Kuvassa mustalla piirretyt yhtenäiset viivat ovat yksittäisen rakeisuustuloksen vaihteluväliä. 90 % tuloksista tulee sijaita katkoviivoilla piirretyllä alueella.



Kuva 4.25 Testeissä käytettävä EV-materiaali. Materiaali sisältää sekä karkeampaa että hienompaa murskettä.

Konvektion mahdollisuutta arvioidessa materiaalin sisäinen läpäisevyys on merkittävässä asemassa (Rayleighin luvun laskentakaava). Materiaalin rakeisuuskäyrä vaikuttaa sen vedenläpäisevyyteen, ja sisäinen läpäisevyys voidaan laskea vedenläpäisevyyden perusteella (luku 3.1.2). Testattavat materiaalit ovat karkeita kalliomurskeita, jolloin vedenläpäisevyyden määrittäminen on hankalaa, sillä materiaalit läpäisevät erittäin hyvin vettä. Testitulosten analysoinnin kannalta sisäisen läpäisevyyden tietäminen olisi hyödyllistä. Vedenläpäisevyyttä yritettiin määrittää laboratoriossa 5/16 mm kalliomurskeelle. Testilaitteistona toimi yleisesti maa-aineksen vedenläpäisevyyksien mittauksessa käytetty TTY:n laitteisto (kuva 4.26). Koe tehtiin halkaisijaltaan 102 mm olevassa korotetussa Proctor-muotissa, jossa näytteen korkeus oli 356,7 mm. Kuvassa 4.26 numerolla 5 esitettyä karkeaa täyttöä ei tehty, sillä näyte oli jo itsessään niin karkea. Materiaalia ei erikseen tiivistetty. Mittauksella vedenläpäisevyydeksi saatiin seitsemän mittauksen keskiarvona $1,04 \cdot 10^{-1}$ m/s. Mittaus tehtiin 10 mm paine-erolla, koska jo silloin vettä tuli näytteen läpi todella runsaasti (kuva 4.27). Testilaitteisto on suunniteltu hienorakeisemmille maalajeille, joten sen toimintaa varmistettiin mittaamalla vedenläpäisevyys tyhjällä sellillä. Tyhjän sellin mittaustulos osui melko lähelle 5/16 mm materiaalille mitattua vedenläpäisevyysarvoa, jolloin laitteiston rajat tulivat todennäköisesti vastaan. Tuloksesta voidaan kuitenkin päätellä, että 5/16 mm kalliomurskeen vedenläpäisevyys on vähintään $1,04 \cdot 10^{-1}$ m/s. Koska muut testattavat materiaalit olivat karkerakeisempia, niiden läpäisevyyttä ei edes yritetty mitata tällä laitteistolla.



- 1 Kylmä syöttövesi hanasta
- 2 Tasausallas
- 3 Tasausaltaan ylivuotoputki
- 4 Kylmä hanavesi koekappaleeseen
- 5 Karkea täyttö
- 6 Koekappale
- 7 Koekappaleesta tuleva vesi
- h Vapaiden vesipintojen korkeusero eli paine-ero.
- t_1 Veden lämpötila tasausaltaassa
- t_2 Koekappaleen läpivirranneen veden lämpötila

Kuva 4.26 Vedenläpäisevyysskokeen mittauslaitteiston periaate (kuva MPR:n raportointipohjasta).



Kuva 4.27 Vedenläpäisevyysskoe käynnissä 5/16mm kalliomurskeelle. Jo 10 mm painekorkeudella vettä tuli todella paljon läpi.

Vedenläpäisevyyttä voidaan arvioida myös Leivo & Rantala (2000) työssään esittämällä kaavalla 4-1, jonka alkuperäinen lähde on Fukt Handbook 1994. Kaava perustuu huokoisuuteen sekä d_{10} arvoa vastaavaan raekokoon. Seulonnan perusteella 5/16 mm kalliomurskeen d_{10} läpäisyä vastaava raekoko on noin 8 mm. Punnituksen ja tilavuuden perusteella näytteen huokoisuus oli noin 0,45, jolloin kaavalla saadaan vedenläpäisevyydeksi $k=2,1$ m/s.

$$k = C \left(\frac{100 * d_{10} * n}{1 - n} \right)^{1/2} \quad (4-1)$$

missä

- k = vedenläpäisevyys [m/s]
 d_{10} = rakeisuus, jota pienempää raekokoa on 10 % koko materiaalista [m]
 n = huokoisuus [-]
 C = Hazen vakio [1/ms], jonka arvo on keskimäärin 2

Kirjallisuuden perusteella on havaittavissa, että karkeiden materiaalien vedenläpäisevyyden määrittäminen on yleinen ongelma. Taulukkoon 4.2 on kerätty eri materiaalien sisäisiä läpäisevyyksiä. Alkuperäinen taulukko on peräisin Nurmikolun (2004) raportista, mutta siihen on lisätty 5/16 mm materiaali sekä sisäisten läpäisevyyksien perusteella lasketut vedenläpäisevyysarvot. Vedenläpäisevyysarvot on laskettu luvussa 3.1.2 esitetyllä tavalla. 5/16 mm materiaalille laskenta on tehty toisinpäin.

Taulukko 4.2 Kirjallisuudessa esitetyt arvoja sisäisestä läpäisevyydestä ja vedenläpäisevyydestä. (muokattu lähteestä Nurmikolu 2004)

Materiaali	Raekoko, tiiviys	Sisäinen läpäisevyys [m ²]	Vedenläpäisevyys [m/s]	Lähde
Kalliomurske	20–80 mm	$9,7 \cdot 10^{-7}$	7,32	Johansen (1975)
Raidesepeli	25–63 mm	$7,7 \cdot 10^{-7}$	5,81	Goering et al. (2000)
Kalliomurske	$d_{avg}=30$ mm, $n=40\%$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	4,75	Goering ja Kumar (1996)
Kalliomurske	10–50 mm	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,91	Johansen (1975)
Kalliomurske	5/16 mm	$1,3 \cdot 10^{-8*}$	$0,104^*$	Mitattu (2013)
Hiekka /sora	pakkautunut	$3 \cdot 10^{-11}$	$2,26 \cdot 10^{-4}$	Goering ja Kumar (1996)

* 5/16 mm materiaalin todellinen läpäisevyys on todennäköisesti suurempi mittausjärjestelyiden puutteiden takia.

Tiivistys vaikuttaa testattavien materiaalin tiheyksiin ja siihen, miten paljon tyhjätilaa jää partikkelien välille. Testilaitteiston ja näytteessä olevien lämpötila-antureiden takia näytettä ei voitu tiivistää dynaamisesti. Näyte on kuitenkin levitetty alle 150 mm paksuisissa kerroksissa, ja sen päällä on kävelty ja tasoitettu kerrokset lämpötila-antureiden asentamista varten. Näytteet ovat siis tiivistyneet jonkin verran. Näytekorkeus oli kaikissa testeissä noin 1000 mm, mikä on testilaitteiston maksiminäytekorkeus. Laitteistolla olisi mahdollista testata myös matalampia näytteitä, mutta se ei ollut järkevää tämän tutkimuksen kannalta. Laitteiston testinäytteen leveys on 1010 mm, pituus 1020 mm ja korkeus noin 1000 mm (riippuu näytteestä). Testattavien materiaalien tiheydet on esitetty taulukossa 4.3. Raidesepeliä oli laitteistossa 1565 kg, 5/16 mm materiaalia 1536 kg ja EV-materiaalia 1719 kg. Raidesepeli punnittiin tyhjennysvaiheessa useassa eri erässä tarkan vaa'an avulla ja samalla tarkistettiin nosturivaa'an tarkkuus. Mittaustulos osui 10 kg sisään samaan lukemaan. 5/16 mm ja

EV-materiaali on punnittu pelkästään nosturivaa'alla, joten tulos voi olla prosentin verran virheellinen. Mielenkiintoista on, että 5/16 mm murskeella ja raidesepelillä oli täsmälleen sama 45 % huokoisuus. EV-materiaalin kiintotiheyttä ei ole erikseen mitattu, mutta valmistusmateriaalin perusteella sen suuruudeksi voidaan arvioida sama 2690 kg/m³. Testien perusteella tämä osoitti, ettei kiviaineksen huokoisuutta voida käyttää konvektion mahdollisuuden arvioinnissa ainakaan yksistään.

Taulukko 4.3 Testimateriaalien tiheydet ja kiven kiintotiheydet.

Materiaali	Tiheys [kg/m ³]	Kiintotiheys [kg/m ³]	Huokoisuus [%]
Raidesepeli	1490	2690	45 %
5/16 mm	1490	2690	45 %
EV-materiaali	1670	2690 (arvio)	38 % (arvio)

Testattavat näytteet ovat olleet kuivia ennen testien aloittamista. Näytteet on kuivattu pitämällä niitä useita viikkoja lämpimässä rakennushallissa yläpinta avoinna. Näytteille on tehty ensin kuivan tilan testit, jolloin liikkuva väliaine materiaalissa on ollut kuivaa, noin 20 °C:een lämpötilassa normaalissa ilmankosteudessa olevaa ilmaa. Näytteille on tehty myös testejä kosteassa tilassa, jolloin liikkuva väliaine on ollut vesihöyryn ja ilman sekoitus. Laitteen yhdessä kyljessä, noin 0,5 m korkeudella, on läpivienti lämpötila-antureiden johtoja varten. Tämän läpiviennin kautta kulki myös ohut muoviputki, joka ulottui noin 150 mm näytteen sisälle. Muoviputkesta syötettiin vettä näytteeseen noin 20 litraa. Laitteen pohjalla on 50 mm korkea allas, jonka teoreettinen tilavuus on noin 50 litraa. Allas on kuitenkin täynnä kiviä, jolloin jo 20 litran määrällä osa vedestä valui laitteesta ulos. Vesi valui näytteeseen painovoimaisesti laitteen yläpuolella olevasta säiliöstä. Näyte ei siis kyllästynyt kauttaaltaan vedellä, mikäli vesihöyry ei kiertänyt laitteen sisällä ja kastellut kiviainesta. Raidesepelinäyte ja 5/16 mm kalliomurskenäyte kasteltiin suhteellisen nopeasti, noin parin tunnin aikana. EV-materiaalin kohdalla kastelu tapahtui hieman hitaammin ja vettä päästettiin useammassa erässä. Tällöin on mahdollista, että EV-materiaaliin jäi jonkin verran enemmän vettä, mikäli vesi ehti höyrystyä ja tarttua kiviin.

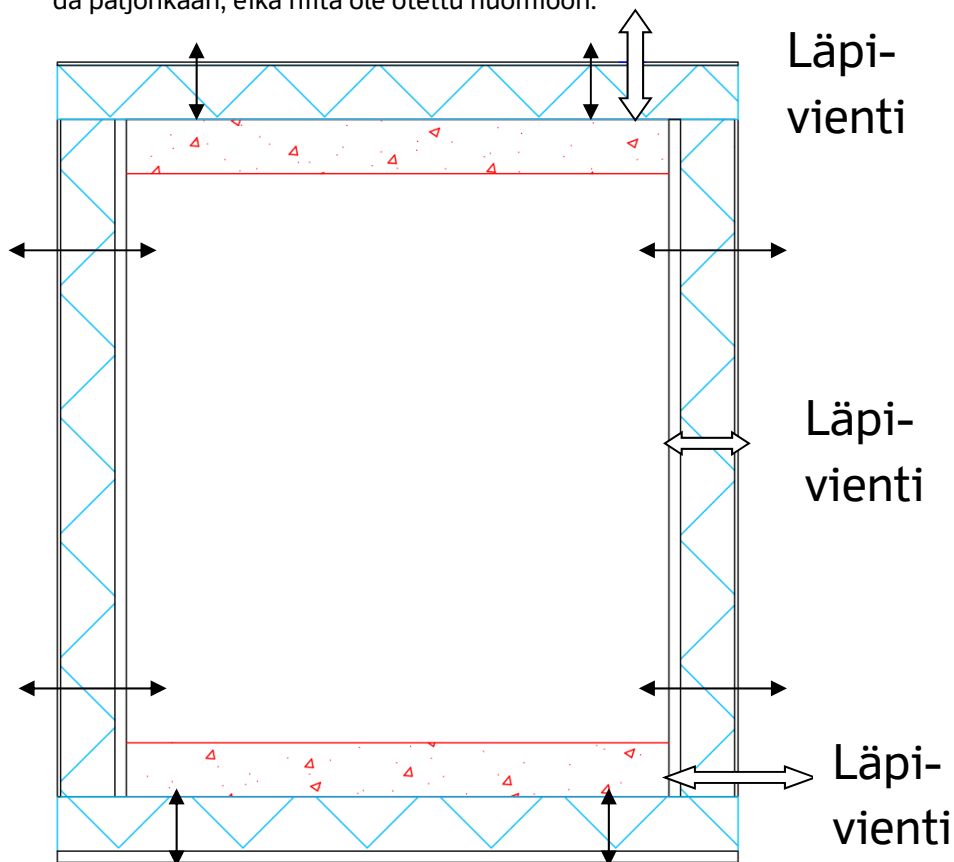
4.4 Lämpöhävikkilaskelma

Laitteen rakenne on kuvattu tarkemmin luvussa 4.2. Vaikka laitteen näytetila on eristetty, lämpöä liikkuu laitteen seinien läpi joko ulospäin tai myös sisälle. Kokeiden alussa oli tarkoitus täsmätä laitteen sisällä olevan näytteen keskilämpötila samaan kuin ulkolämpötila, jolloin lämpövuodot kompensoisivat toisiansa. Tämä ei kuitenkaan täysin onnistunut, sillä rakennushallissa, jossa laite sijaitsee, olosuhteet vaihtelivat. Kesällä viikonloppuisin lämpötila nousi hallissa auringon vaikutuksesta huomattavasti, sillä hallin ovet olivat kiinni. Vastaavasti talvella arkisin ovien aukominen pudotti hallin lämpötilaa. Parempaa paikkaa laitteelle ei kuitenkaan löytynyt, sillä näytteenvaihdossa siirrettiin tuhansia kiloja kiviä.

Laitteen lämpöhävikkiä on kuitenkin mahdollista arvioida. Kuvassa 4.28 on esitetty laitteistossa tapahtuvat lämpövuodot. Pienet nuolet kuvaavat laitteen seinien ja eristeiden läpi kulkevaa lämpöä, isommat nuolet ovat läpivientejä. Sekä ylä- että alalataan menee paksu johtonippu antureille ja lämmitykselle sekä kupariputket jäähdytystä varten. Kuvan oikeassa reunassa keskellä oleva läpivienti on näytteessä olevien lämpötila-antureiden läpivienti. Kaikki läpiviennit on tiivistetty villalla. Laitteen seinien rakenne sisältä ulospäin on 28 mm filmivaneri, 100 mm XPS-eriste ja 6 mm filmi-

vaneri. Kannessa ja pohjassa rakenne on hieman erilainen, mutta myös niissä on 100 mm XPS-eristettä.

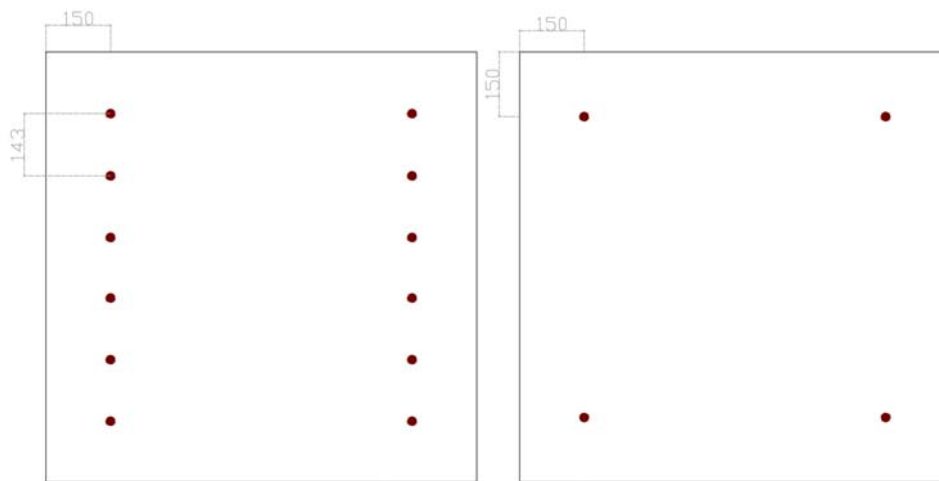
Ylä- ja alalaattaan menevien sähköjohtojen ja 10 mm kupariputkien kautta vuotaa lämpöä sisälle tai ulos riippuen lämmönsiirtolaattojen lämpötilasta. Lämpövuotoja on pyritty estämään eristämällä kupariputket ja läpiviennit, mutta lämpöä liikkuu silti kuparisia putkia ja johtoja pitkin. Periaatteessa kuparia pitkin johtumalla tapahtuva lämpövuoto on mahdollista laskea, mutta käytännössä laskeminen menee hyvin vaikeaksi, sillä johdot ovat eristettyjä ja niissä esiintyviä lämpötiloja ei tiedetä. Ainut järkevä ratkaisu johtojen ja putkien kautta kulkevan lämpövuodon selvittämiseen olisi ollut kalibrointiajot, joita ei kuitenkaan tehty, koska rakennushallin olosuhteet vaihtelevat. Näytteeseen laitteen kyljestä menevät lämpötila-anturit ovat tyypiltään termopareja, joiden johdot ovat hyvin ohuet. Näiden kautta lämpöä ei todennäköisesti vuoda paljontaan, eikä niitä ole otettu huomioon.



Kuva 4.28 Tutkimuslaitteiston lämpötekniinen rakenne poikkileikkauksessa. Ohuet nuolet kuvaavat lämpövuotoja, paksut nuolet ovat läpivientejä, jotka on tiivistetty.

Testeissä sekä ylä- että alalaatta on pidetty vakio­lämpötilassa lämpötilaohjattuna. Niiden lämmitys- ja jäähdysteho on mitattu, mutta erityisesti jäähdystehon mittaussessa on havaittu epätarkkuutta. Kaikista tarkin mittaussmenetelmä kiviaineksen läpi kulkevan lämpöenergian mittaukseen on alemman betonilaatan yläpinnassa alumiinilevyn alla olevat lämpövuotanturit. Lämpövuotanturit ovat kalibroituja antureita, jotka testien perusteella ovat varsin tarkkoja. Myös lämmönjohtavuustulokset perustuvat näihin viiteen anturiin. Kun lämpövuoto mitataan juuri ennen kiviainesta, laattoihin kulkeva lämpövuoto ei vaikuta mittaustulokseen vakio­lämpötilaohjauksen takia. Merkittävä lämpövuoto rajoittuu siis laitteen neljään sivuseinään.

Sivujen kautta siirtyvä lämpöenergia on mahdollista laskea, kun tiedossa on filmivanerien sekä lämpöeristeen lämmönjohtavuudet. Laskelmaan tarvitaan myös lämpötilan mittaus sisäpuolelta sekä ulkopuolelta. Ulkopuolelta hallin lämpötilaa on mitattu yhdellä anturilla. Hallin lämpötilan mittaus ei ole kuitenkaan kovin kattava, sillä laitteen lähellä on ollut muita rakenteita ja tavaraa. Kesällä 2013 rakennushallia on remontoitu ja ilmastointia on tehostettu huomattavasti. Remontin jälkeen lämpötilavaihtelut ovat pienentyneet, mutta ikävä seuraus remontista oli laitteen toiselle puolelle kohdistuva voimakas tuloilmavirtaus. Seinän sisäpuolista lämpötilaa voidaan arvioida näytteessä olevilla lämpötila-antureilla. Kuvassa 4.29 on esitetty näytteen reunimmaisets anturit. Näytteessä on kuusi kerrosta antureita, jotka ovat 150 mm päässä seinistä. Näiden antureiden perusteella on mahdollista arvioida, paljonko sisäseinän lämpötila on. Kyseessä on kuitenkin arvio, sillä konvektiotilanteessa virtaukset vaikuttavat reunan lämpötilaan. Ylhäältäpäin lämmitettäessä seinän lämpötilan pitäisi olla melko lähellä oikeaa.



Kuva 4.29 Näytteen reunoilla olevat lämpötila-anturit. Vasen kuva on poikkileikkaus sivulta. Oikeanpuoleinen kuva on antureiden sijainti ylhäältä katsottuna. Antureita on sijoitettu kuuteen eri kerrokseen tasavälisen 150 mm päähän reunoista.

Laitteen käytössä on pyritty täsmäämään ylä- ja alalaatan välinen lämpötila niin, että niiden keskiarvo on hallin lämpötilan kanssa sama, jolloin lämpövuodot kompensoituvat. Ylhäältä päin lämmitettäessä lämpötilagradientti on suora, mutta konvektiotilanteessa näytteen lämpötilajakauma voi poiketa huomattavasti virtausten takia. On siis varsin perusteltua yrittää laskea vuotavan lämmön määrää. Laskennassa on kuitenkin monta epätarkkuustekijää, mutta laskelman perusteella voidaan päätellä mitauksen onnistumista ja virheen suuruusluokkaa.

Laitteen näytetila on eristetty XPS-eristeellä (suulakepuristettu polystyreeni). Eristeen tarkka tyyppi on Styrofoam 300 A-N. Eristeen paksuus on 100 mm, jolloin materiaalille on valmistaja ilmoittanut 0,036W/mK lämmönjohtavuuden. Eristeen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa kosteus ja keskimääräinen lämpötila. Lämpötilan vaikutus standardin SFS-EN 10456 mukaan otetaan huomioon kaavalla 4-2

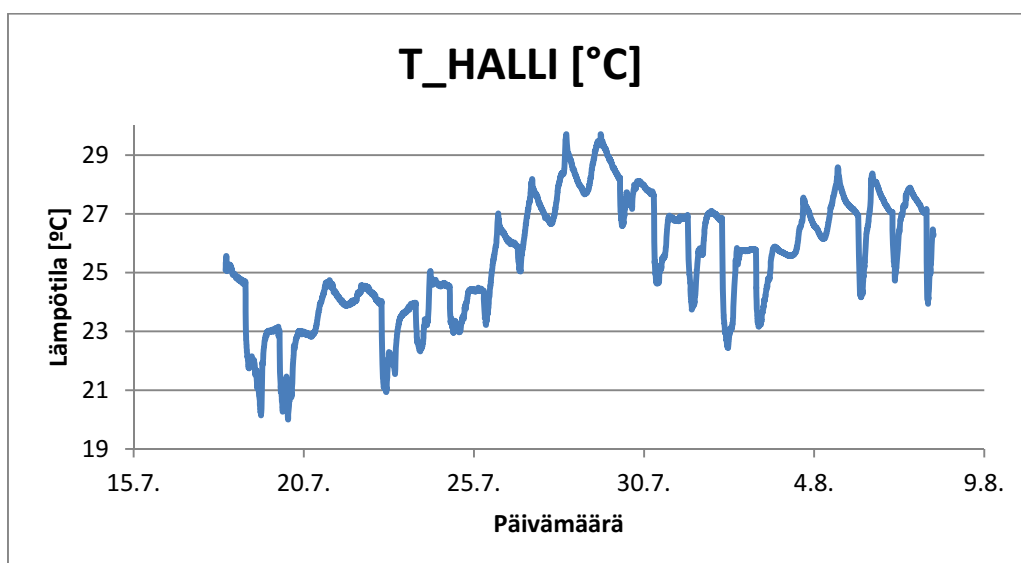
$$F_t = e^{f_t(T_2 - T_1)} \quad (4-2)$$

missä

- F_T = lämpötilan muuntotekijä
- f_T = lämpötilan muuntokerroin
- T_1 = on ensimmäisen olosuhdeyhdistelmän lämpötila
- T_2 = toisen olosuhdeyhdistelmän lämpötila

Kaavassa käytettäviä muuntokertoimia on esitetty myös saman SFS-EN 10456 standardin liitteessä A. XPS-levyissä on valmistajan mukaan pintanahka, jolloin on käytettävä muuntokerrointa f_r , joka on standardin liitteen mukaan noin 0,0035. Jos valmistaja on ilmoittanut arvot $+23^\circ\text{C}$ tilassa, lämpötilan muuntotekijä on 0°C lämpötilassa 0,923 ja $+50^\circ\text{C}$ 1,099. Tällöin XPS-eristeen lämmönjohtavuus vaihtelee 0,033... 0,039 W/mK edellä mainituilla keskiarvolämpötiloilla. Lämmönjohtavuus siis kasvaa, kun lämpötila nousee. Tämä on otettu huomioon laskelmassa siten, että laitteen sivuseinät on jaettu kerroksittain lohkoihin. Lohkoja on 7 korkeussuunnassa, joten sivuseinät on jaettu yhteensä 28 eri lohkokoon. Jokaiselle lohkolle on laskettu antureiden perusteella näytteen ja ulkoilman välinen keskilämpötila, jonka perusteella XPS:n lämmönjohtavuutta on korjattu. Menetelmällä on siis laskettu jokaisen lohkon kohdalla tapahtuva lämpövirta, joka suuntautuu joko sisään tai ulos. Laskelmassa on myös otettu huomioon filmivanerin lämmönjohtavuus, joka on suuruusluokaltaan 0,12 W/mK. Sen lämmönjohtavuus on kuitenkin huomattavasti suurempi verrattuna XPS:ään, joten sen arvolle ei ole tehty lämpötilakorjausta. XPS:n ja filmivanerin lämmönjohtavuuksien perusteella laskettiin lämpöresistanssi joka seinälohkolle ja niiden kautta vuotava lämpöteho. Summaamalla lohkot on saatu kokonaislämpövuototeho, jolla on korjattu lämpövuotantureiden lukemaa ja laskettu lämmönjohtavuus näytteelle. Yleensä lämpöenergiaa vuotaa kylmän laatan puolelta sisälle näytteeseen, koska hallin lämpötila on suurempi kuin kylmän laatan. Lämpimän laatan puolelta lämpöä vuotaa vastaavasti ulospäin, koska laatta on hallin ilmaa lämpimämpi.

Lämpöhävikkilaskelma vaikuttaa tuloksien perusteella (luku 5) toimivan kohtuullisesti, kun hallin lämpötila pysyy suhteellisen vakiona. Tilanteet, joissa lämpötila vaihtelee jopa 10°C (esimerkiksi kuva 4.30), osoittautuivat todella vaikeiksi kompensoida. Yllättävää kuitenkin on, että ulkolämpötilan vaihtelu näkyy melko vähän lämpövuotantureiden lukemassa. Tämä johtunee osittain siitä, että laitteella ja näytteellä on runsaasti ominaislämpökapasiteettia. Suuri ominaislämpökapasiteetti yhdistettynä melko hyvin eristävään seinään saa aikaan niin monimutkaisen systeemin, ettei sen tarkkaa käytöstä pysty selvittämään. On myös epäselvää, miten hyvin 150 mm seinästä olevat anturit kuvaavat seinän lämpötilaa, sillä lämpöä siirtyy useaan eri suuntaan.



Kuva 4.30 Esimerkki tilanteesta, jossa lämpövuotoa on vaikea laskea.

Mielenkiintoinen yksityiskohta lämpöhävikkilaskelmassa on se, että joissakin tilanteissa näyttää siltä, että lämpöä ei vuoda läheskään niin paljon, kuin laskelma osoittaa. Näin on käynyt esimerkiksi silloin, kun lämpötilaero laattojen välillä on ollut hy-

vin pieni ja sitä myöten lämpövuointureiden lukema on myös pieni. Tämän ilmiön syytä ei tässä työssä löydetty. On mahdollista, että jos hallin lämpötila käy nopeasti alhaalla, tämän vaikutus ei ehdi näkyä näytteen puolella juuri ollenkaan. Helppointa kuitenkin olisi, jos laite olisi paikassa, jonka lämpötila pysyy vakiona ilman turhia muutoksia. Yksi ratkaisu olisi ollut myös rakentaa laitteen päälle telttä, jonka lämpötila olisi nostettu selvästi huoneenlämpötilaa korkeammaksi. Tällöin olosuhteet olisivat olleet teltan sisällä vakiot.

4.5 Laboratoriokokeet ja testausprosessi

Kolmen materiaalin testaaminen konvektiolaitteella osoittautui yllättävän pitkäksi projektiksi, sillä näytteiden lämpötilojen tasaantuminen oli hidasta. Kokeet olivat pitkiä erityisesti ylhäältä päin lämmitettäessä, sillä kiviaineksen lämmönjohtavuus ilman konvektiota on melko pieni, noin $0,5 \text{ W/mK}$. Tasaantuminen myös hidastuu lopuksi, sillä Fourierin lain mukaan lämpötilaero vaikuttaa lämpöenergian siirtymiseen. Tasaantumisen lopussa lämpötilaero on pieni, ja kuution kiviäytteellä on myös melkoisesti ominaislämpökapasiteettia. Yksi koeajo kesti yleensä vähintään viikon, usein enemmänkin.

Laboratoriokokeissa saadut lämmönjohtavuustulokset perustuvat lämmönsiirto-laattojen lämpötilaeroon sekä lämpövuointureiden antamaan tehoon. Vertailun vuoksi on laskettu myös näytteen sisäinen lämmönjohtavuus käyttämällä ylintä ja alinta lämpöanturikerrosta sekä mitattua lämpövuota. Menetelmän etuna on se, että sitä käytettäessä ei laatan ja näytteen välinen lämpöhäviö tule mukaan laskelmiin, sillä lämpötilaero on mitattu suoraan näytteestä. Viisi lämpövuointuria alalaatassa antaa tarkan käsityksen siitä, miten paljon lämpöä virtaa alalaattaan tai siitä pois päin. Verralle rakennetut järjestelmät sähköllä toimivan lämmitysjärjestelmän tehonmittauksesta sekä jäähditysjärjestelmän tehosta antoivat epätarkempia tuloksia, todennäköisesti lämpövuotojen takia. Jäähdystehon mittauksessa oli myös ongelmia, sillä jäähditysnesteeseen kertyi roskaa, jotka häiritsivät virtaamaa mittavaa vesimittaria. Lämpövuointureiden paikka on ihanteellinen, sillä ne ovat alalaatan pinnassa hyvin lähellä betonilaatan pintaa hyvin lämpöä johtavan alumiinilevyn alla. Tarkempi selitys laitteen rakenteesta löytyy kappaleesta 4.2.

Testeissä käytettävät lämpötilaerot ovat vaihdelleet muutamasta asteesta noin 60°C lämpötilaeroon. Raidesepelinäytteelle tehtyjen testien perusteella arvioitiin sitä, miten herkästi konvektio voi alkaa ja miten suuri lämpötilaero tarvitaan. Raidesepelin kohdalla pyrittiin hakemaan myös kriittistä lämpötilaeroa pudottamalla lämpötilaeroa 7°C tasolle. Kaikille materiaaleille on tehty testejä järkevillä lämpötilaeroilla, jotta niitä voisi verrata luonnossa esiintyviin todellisiin lämpötilaeroihin. Hipin koe kohteen tulosten analysoinnissa (luku 6.2) havaittiin vajaan 9°C/m lämpötilagradientti, jolloin testeissä käytettävät lämpötilaerot ovat olleet pääsääntöisesti suurempia. On kuitenkin syytä huomata, että koe kohteessa esiintyneessä lämpötilagradientissa lämpötilaeroa ei laskettu ratapenkereen yläpinnan ja alaosan välillä, jolloin gradientti voi olla havaittua 9°C/m selvästi suurempi riippuen tarkastelukohdasta. Kokeiden aikana havaittiin, että lämmönjohtavuuden mittaaminen ilman konvektiota (ylälämmitys) kannattaa tehdä suurella lämpötilaerolla, sillä se pienentää mittaustarkkuudesta johtuvien virheiden määrää. Tämä perustuu siihen, että tällöin näytteen läpi virtaa enemmän lämpöä, jolloin vuotojen osuus on suhteessa pienempi. Konvektio-tilannetta testattaessa $5/16 \text{ mm}$ kalliomurskeella sekä EV-materiaalilla lämpötilaero asetettiin melko suureksi jo ensimmäisessä kokeessa, jotta mahdollinen konvektion

vaikutus tulisi mahdollisimman selkeästi ilmi. Kokeissa testattiin myös, miten tilanne muuttuu, jos väliaineena on kuivan ilman sijasta vesihöyryä. Tällöin väliaine on ominaisuuksiltaan erilaista, jolloin konvektion vaikutus voi olla erilainen verrattuna kuivaan tilanteeseen.

Lämmönjohtavuustulokset perustuvat lämpövuointureiden keskiarvoon, näytteen korkeuteen sekä lämpötilaeroon. Lämpövuointurit ilmoittavat niiden läpi kulkevan lämpövirran, jolloin yksikkönä on W/m^2 . Käytettävä kaava on siis 4-3 mukainen, jossa lämpövuointureiden lukema on lämmitysteho jaettuna pinta-alalla.

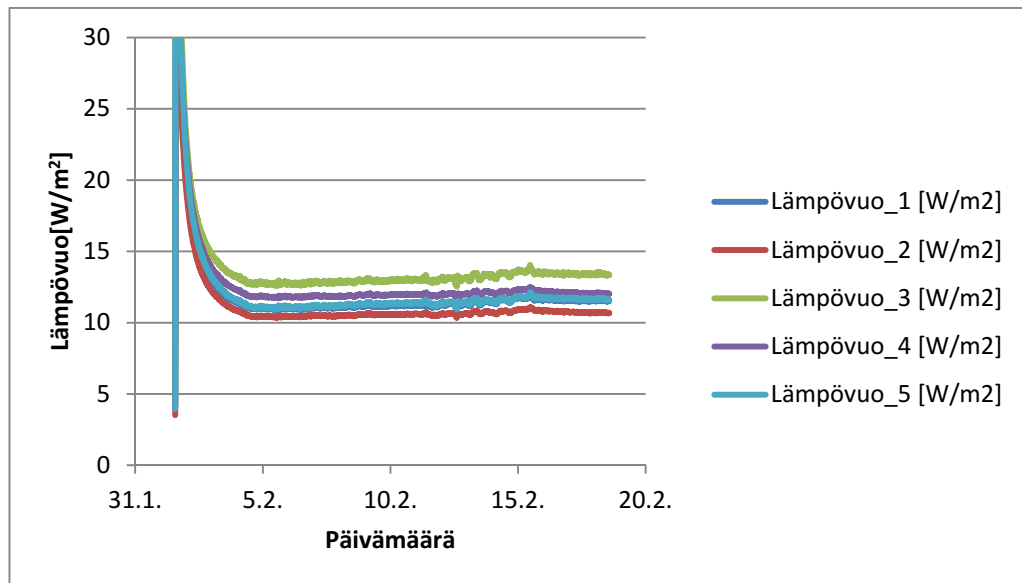
$$\lambda = \frac{P}{A \cdot \frac{dT}{dx}} \quad (4-3)$$

missä

λ	=lämmönjohtavuus
P	=lämmitysteho
A	= pinta-ala
dT/dx	=lämpötilagradientti

Näytteen ja alumiinilevyjen välillä näyttäisi tulosten (luku 5.4) perusteella tapahtuvan jonkin verran lämpöhäviöitä. Todennäköistä on, että kontakti on parempi alemman alumiinilevyn ja näytteen välillä, sillä näyte on kasattu levyn päälle ja on koko painollaan sitä vasten. Ylempää laattaa painaa näytettä vasten vain laatan oma paino. Kun näytettä lämmitetään yläpuolelta ja jäähdytetään alapuolelta, lämmityskontakti on todennäköisesti huonompi. Kun näytettä lämmitetään alapuolelta, yläpuolen jäähdytyskontakti on huonompi. Tässä tilanteessa on kuitenkin ehkä mahdollista, että lämpimän kiviaineksen ja kylmän ylälaatan välillä voi tapahtua pientä paikallista konvektiota. Tämä voi olla mahdollista siksi, että rakeiden välissä on avointa tilaa, jolloin liikettä vastustavat voimat ovat pieniä. Ilmiö näkyy kuvassa 5.8, sillä gradientti kääntyy viimeisten näytteessä olevien lämpötila-anturien ja laatan välillä. Alalaatassa vastaavaa ilmiötä ei ole näkyvissä. Yksi tapa korjata tilanne on käyttää kokonaislämpövuota sekä kahta näytteessä olevaa lämpötila-anturitasoa. Tällöin lämpötilagradientti on todellinen. Tämän testimenetelmän avulla on laskettu näytteen sisäinen lämmönjohtavuus. Näytteen lämpötila-anturitasojen käyttö toimii kuitenkin vain ylälämmityksellä, sillä konvektiotilanteessa näytteen lämmönjohtavuus vaihtelee paikasta riippuen. Konvektiotilanteessa ainut vaihtoehto on siis käyttää ylä- ja alalaatan lämpötilaeroja, mikä voi antaa lämmönjohtavuuden hieman alakanttiin.

Testien aikana on odotettu, että näytteen eri osissa lämpötila ehtii tasaantua riittävästi. Tilanne on katsottu tasaantuneeksi, kun lämpövuointureiden lukema on asetunut vakiotasolle eikä näytteessä olevissa lämpötila-antureissa näy muutoksia. Dataa on tallennettu viiden minuutin välein, ja tulokset (lämpötilaero, lämpövuoto sekä muut laskennassa tarvittavat parametrit) on määritetty sadan viimeisen tallennuksen keskiarvona. Tällöin lukemat kertovat tilanteen viimeisen kahdeksan tunnin ajalta. Lukemat ovat yleensä kuitenkin olleet vakiona useamman päivän ennen testien lopettamista. Esimerkki tasaantumisesta ja lämpövuointureiden näyttämästä tilanteesta on esitetty kuvassa 4.31. Kuvaajan alussa näkyy, miten asetuksia on muutettu kokeen aluksi (piikki kuvassa), jonka jälkeen tilanne näytteessä on hiljalleen tasaantunut.



Kuva 4.31 Näytteen lämpövirtaustilan tasaantuminen. Lämpövuotantureiden lukemista on nähtävissä, ettei lämpövuoto muutu enää merkittävästi. Tasaantuneesta tilanteesta on otettu viimeisen 8 tunnin keskiarvo, jonka perusteella tulokset on laskettu. Esimerkkikuva on peräisin raidesepeille tehdystä ylälämmityskokeesta, jossa lämpötilaero oli n. 32 C.

Laboratoriotutkimusten mukaiset lämmönjohtavuudet on esitetty melko tarkasti, kahden desimaalin tarkkuudella. Tuloksia tarkasteltaessa on kuitenkin hyvä muistaa testien epävarmuustekijät sekä myös se, että maa on luonteeltaan hyvin heterogeenistä ainetta. Pelkästään näytteen tiivistystapa, mahdollinen lajittuminen ja kosteus tila vaikuttavat hyvin paljon materiaalin lämmönjohtavuuteen. Laitteiston toimintaan ja testiolosuhteisiin liittyy myös epätarkkuuksia, jotka voivat vaikuttaa tuloksiin. Tuloksien perusteella tehollisen lämmönjohtavuuden suuruusluokka on kuitenkin oikein, ja sen perusteella on mahdollista arvioida, onko konvektiolla osuutta mahdollisiin routaongelmiin.

5 Laboratoriotutkimusten tulokset ja niiden analysointi

5.1 Raidesepelinäytteen tutkimustulokset

Ensimmäinen konvektiolaitteella testattu materiaali oli raidesepeli. Raidesepelille tehtiin eniten testejä, sillä tavoitteena oli tutkia myös rakennetun laitteiston toimintaa sekä sitä, miten mahdollinen konvektio näkyy tuloksissa. Testilaitteisto osoittautui toimivaksi, ja tuloksista näkyi hyvin, miten lämpötilat jakautuivat konvektiotilanteessa epätasaisesti ja tehollinen lämmönjohtavuus kasvoi selvästi verrattuna pelkkään johtumiseen ja säteilyyn. Tarkemmat tiedot raidesepelin ominaisuuksista löytyvät luvusta 4.3.

Testiolosuhteilla on vaikutusta konvektiotestien tuloksiin, sillä näytteen lämpötila vaikuttaa väliaineen tiheyteen ja sitä kautta konvektion mahdollisuuteen. Taulukossa 5.1 on esitetty raidesepelille tehtyjen testien olosuhteet. Muutamassa kohdassa hallin keskilämpötila on merkitty tähdellä, sillä se on vaihdellut voimakkaasti ennen testin loppua, ja keskiarvo antaa osittain virheellisen kuvan tilanteesta.

Taulukko 5.1 Raidesepelinäytteen testiolosuhteet.

Raidesepeli	Lämpötilaero [°C]	Näytteen keskilämpötila [°C]	Hallin keskilämpötila [°C]	Ylälaatan lämpötila [°C]	Alalaatan lämpötila [°C]	Ajon pituus [vrk]
Kuiva näyte, ylälämmitys						
Ajo 1	10,1	21,4	24,3	26,8	16,8	11
Ajo 2	27,1	20,1	20,4	36,7	9,7	14
Ajo 3	19,4	18,5	18,5	30,7	11,3	30
Ajo 4	9,2	17,7	21,5*	22,7	13,6	42
Ajo 5	31,8	19,5	19,5	38,7	6,9	17
Kuiva näyte, alalämmitys						
Ajo 1	10,0	22,1	22,8	16,9	26,9	13
Ajo 2	19,4	21,4	23,6	12,3	31,7	8
Ajo 3	14,9	21,6	24,0	14,3	29,3	7
Ajo 4	7,1	22,6	22,2*	19,2	26,3	13
Kostea näyte, alalämmitys						
Ajo 1	12,3	14,9	19,7	9,4	21,8	10
Ajo 2	23,3	19,7	21,3	11,3	34,6	7
Ajo 3	13,6	20,6	22,0	15,6	29,2	8
Ajo 4	11,1	20,0	21,2	15,6	26,7	14
Ajo 5	5,7	21,6	23,0	19,1	24,8	13
Kostea näyte, alalämmitys, avoin yläpinta						
Ajo 1	5,6	21,9	24,9	19,3	24,8	12
Ajo 2	11,4	23,0	25,2	16,9	34,6	8
Ajo 3	17,7	22,2	24,6	18,3	29,7	7
Kuiva näyte, nopeustesti						
Ajo 1	12,9	16,1	19,4	8,9	21,9	12

* Hallin lämpötila on vaihdellut voimakkaasti, jolloin keskiarvo antaa vääristyneen kuvan todellisista testiolosuhteista.

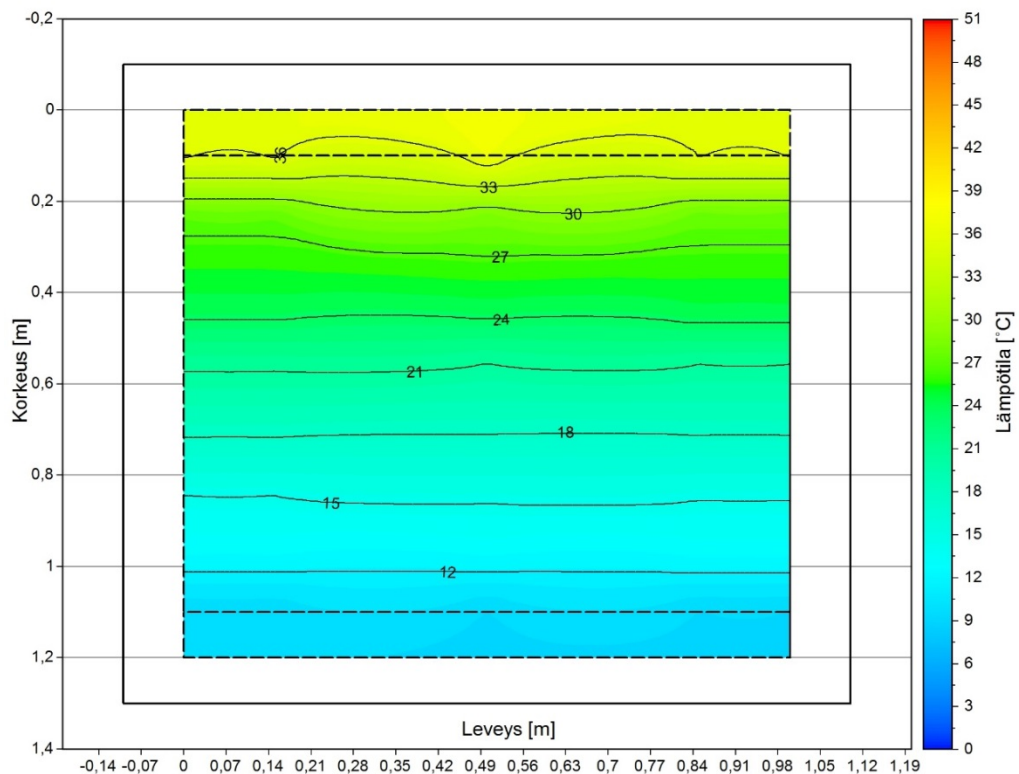
5.1.1 Ylälämmitystilanne

Tutkimuksessa raidesepelistä mitattiin ensimmäiseksi lämmönjohtavuus ilman konvektiota. Tällöin näytettä lämmitettiin yläpuolelta, jolloin konvektiota ei voi tapahtua. Tulokset löytyvät taulukosta 5.2. Tulokset ovat varsin lähellä toisiaan lukuun ottamatta ensimmäisenä suoritettua testiä, josta lämmönjohtavuudeksi saatiin 0,52 W/mK. Suurempi tulos johtuu todennäköisesti betonilaattoihin jääneestä kosteudesta, sillä laattojen valusta ei ollut kulunut kovin paljon aikaa. Tätä tulosta ei ole otettu huomioon myöskään eri lämpötiloissa määritettyjen lämmönjohtavuuksien keskiarvossa, joksi laskettiin 0,36 W/mK. Kuvassa 5.1 on esitetty näytteen lämpötilajakaumat ja isotermit ylälämmitystilanteessa. Näyte käyttäytyy teorian mukaan; isotermit ovat vaakasuorassa ja lämpötilagradietti on suora.

Taulukko 5.2. Raidesepelin mitatut lämmönjohtavuudet ilman konvektiota ylälämmityksellä. Keskiarvon laskennassa tulos 0,52 W/mK on jätetty pois virheellisenä.

Raidesepeli, kuiva Ylälämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
9,2	0,37	4
10,1	0,52*	1
27,1	0,36	2
19,4	0,32	3
31,8	0,37	5
Keskiarvo:	0,36	

* Tulosta ei ole käytetty keskiarvon laskennassa, koska se on oletettavasti virheellinen.



Kuva 5.1 Poikkileikkaus raidesepelinäytteen lämpötilajakaumasta ylälämmitystilanteessa lämpötilaerolla 27 °C. Lämpötilamuutos on lineaarinen ja isotermit ovat vaakasuorassa.

5.1.2 Alalämmitys kuivalla näytteellä

Materiaalin lämmönjohtavuustestien jälkeen raidesepelille tehtiin alalämmitystestit kuivalla näytteellä. Tulokset on esitetty taulukossa 5.3. Mitatussa tehollisessa lämmönjohtavuudessa on havaittavissa selvä ero aiemman ylälämmityksen keskiarvoon 0,36 W/mK verrattuna. Pienimmällä lämpötilaerolla 7,1°C lämmönjohtavuus on 0,89 W/mK, joka on yli kaksinkertainen verrattuna tilanteeseen, jossa konvektiota ei voinut tapahtua. Testien perusteella havaittiin myös, että ajojärjestyksellä on merkitystä, sillä kun väliaine on lähtenyt liikkeelle, konvektio vaikuttaisi tapahtuvan voimakkaammin myös pienemmillä lämpötilaeroilla.

Taulukko 5.3 Kuivalle raidesepelille mitatut lämmönjohtavuudet konvektiotilanteessa.

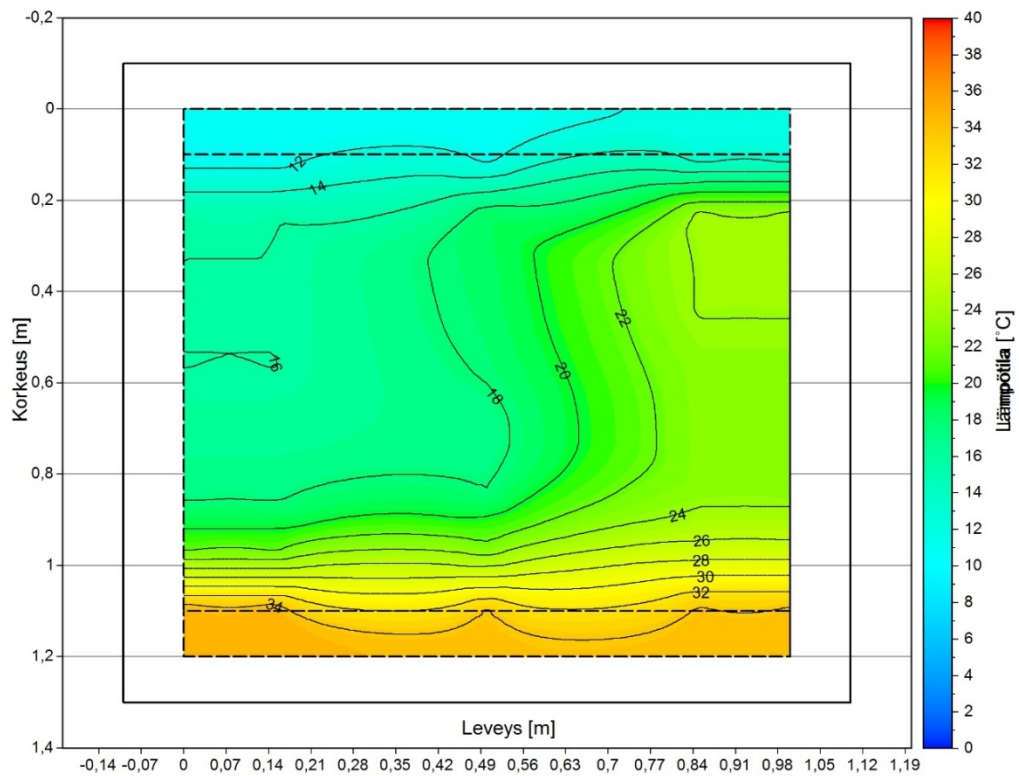
Raidesepeli, kuiva Alalämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
7,1	0,89	4
9,9	0,81	1
14,9	0,99	3
19,4	1,12	2

5.1.3 Alalämmitys kostealla näytteellä

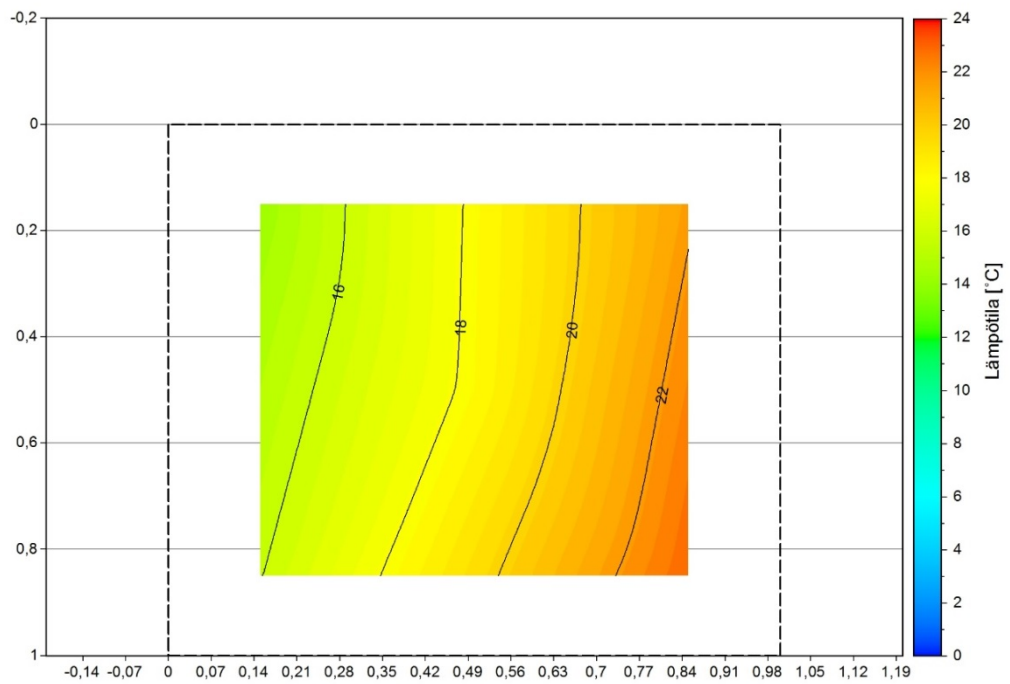
Luonnontilassa materiaalissa on todennäköisesti aina jonkin verran kosteutta, joten raideseppelinäyte päätettiin testata myös kosteana. Kosteana tilan testissä laitteen kyljestä johdettiin ohuella putkella vettä kiviaineksen sekaan, jolloin vesi valui alumiiniseen pohja-altaaseen. Vettä lisättiin saman päivän aikana kahteen otteeseen, jolloin pohja-allas tulvi yli ja ylimääräinen vesi valui laitteesta ulos. Taulukossa 5.4 on esitetty kostean näytteen testaustulokset. Kun tuloksia verrataan säteilyn ja johtumisen kautta siirtyvään lämpöön, tehollinen lämmönjohtavuus on moninkertainen jo pienillä eroilla. Kuvassa 5.2 on esitetty näytteen isotermit kosteassa konvektiotilanteessa. Kuvan piirtämisessä on tehty approksimaatioita, sillä näytteen reunoilla ei ole ollut lämpötila-antureita. Tällöin reunassa tapahtuva virtaus ei näy kuvassa, mutta siitä huolimatta kuvasta nähdään hyvin, että ylälämmitystilanteessa väliaine liikkuu näytteessä ja muuttaa lämpötilajakaumaa merkittävästi. Kuva on poikkileikkaus laitteesta 150 mm laitteen sivuseinästä keskelle päin. Samalle tasolle on myös asetettu näytteen keskellä olevat lämpötila-anturit, jotka ovat oikeasti 150 mm syvemmällä sivulta päin katsottuna (500 mm seinästä). Kuvassa 5.3 on esitetty lämpötilavaihtelut ylhäältäpäin katsottuna noin näytteen puolivälissä. Tässä kuvassa ei ole tehty approksimaatioita, ja siksi kuva kattaa vain viiden lämpötila-anturin välisen alueen.

Taulukko 5.4 Lämmönjohtavuudet raidesepelille konvektiotilanteessa, kun näyte on kasteltu.

Raidesepeli, kostea Alalämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
5,7	1,52	5
11,1	2,04	4
12,3	1,69	1
13,6	2,44	3
23,3	3,16	2



Kuva 5.2 Kostean raideseppelinäytteen isotermit alalämmitystilanteessa. Lämpötilaero on noin $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Näytteen oikea puoli on selvästi vasenta lämpimämpi.



Kuva 5.3 Kostean raideseppelin lämpötilajakauma ylhäältä päin katsottuna noin $0,5\text{ m}$ syvyydeltä alalämmitystilanteessa. Samassa kerroksessa on suuret lämpötilavaihtelut.

5.1.4 Alalämmitys kostealla näytteellä ja korotetulla yläpinnalla

Raidesepelinäytteellä tutkittiin myös tilannetta, jossa ylälämmönsiirtolaattaa nostettiin 50 mm näytteen yläpuolelle, jolloin näytteen ja ylälaatan väliin jäi selkeä ilmatila. Muutosta tehtäessä laite avattiin ja raidesepeli oli yläpintaan saakka kauttaaltaan kastunutta (kuva 5.4). Myös laitteen ylälämmönsiirtolaatan alumiinilevyssä oli runsaasti tiivistyneitä vesipisaroita, jotka kertovat siitä, että edellisessä konvektio-tilanteessa vesihöyry on kulkenut ylhäälle saakka, jossa se on tiivistynyt vesipisaroiksi. On todennäköistä, että laitteessa on tapahtunut sateen kaltainen ilmiö, jossa vesi höyrystyy ja nousee ylös, tiivistyy ja palaa takaisin alas nestemäisessä muodossa. Taulukossa 5.5 on esitetty testaustulokset kostealla raidesepelillä niin, että ylälämmönsiirtolaatta on ollut 50 mm irti näytteestä. Lämpötilaerolla 5,6 °C ajettu testi on tulosten suhteen epävarmin, sillä lämpövuointureiden lukema oli pitkään vakiintunut, mutta näytteen lämpötila-antureissa näkyi vielä muutoksia. Tämä viestii siitä, että pienillä lämpötilaeroilla lämmön siirtyminen on Fourierin lain mukaan hidasta, jolloin tasaantuminen vie paljon aikaa. Lisäksi myös hallin lämpötila voi vaikuttaa tuloksiin.

Taulukko 5.5 Lämmönjohtavuudet raidesepelille konvektio-tilanteessa, kun näyte on kasteltu ja näytteen pinta "avoin". Raidesepelillä testattiin myös eroa suljetun yläpinnan ja avoimen tilanteen välillä. Ylälaattaa nostettiin 50 mm irti näytteen yläpinnasta. Näyte oli kokeen jälkeen edelleen kostea.

Raidesepeli, kostea		
Alalämmitys, avoin yläpinta		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
5,6	1,46	1
11,4	1,84	3
17,7	2,61	2



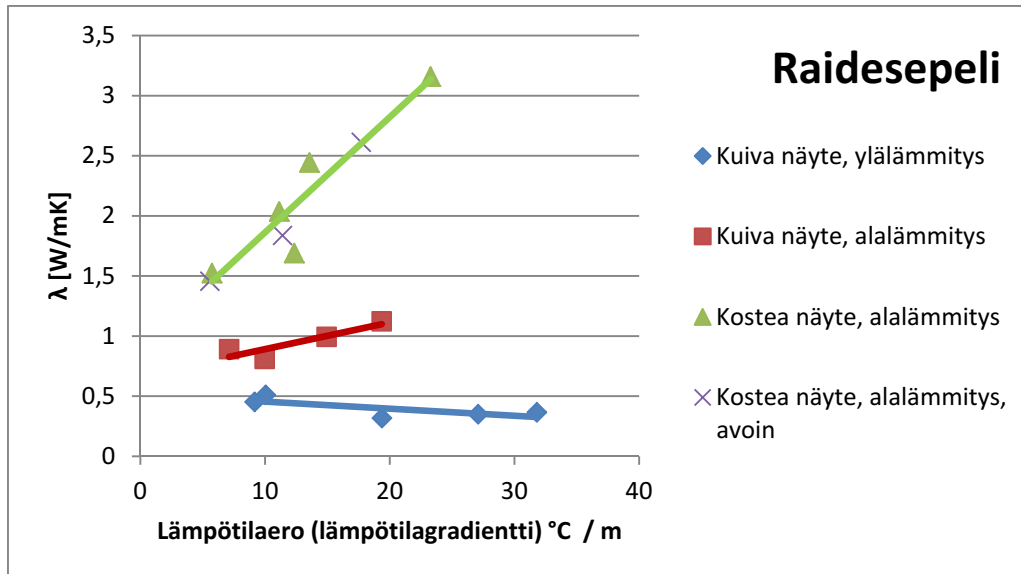
Kuva 5.4 Raidesepelinäyte kostean tilan konvektiokokeen jälkeen. Kun laatikko avattiin, näyte oli selkeästi kastunut ylhäälle saakka ja ylälaatan alapinnassa oli runsaasti tiivistyneitä vesipisaroita.

Raidesepelinäyte purettiin testilaitteistosta viimeisten avoimella yläpinnalla tehtyjen testien jälkeen. Näyte oli selvästi kastunut yläosasta, mutta näytteen alaosassa laitteen reunoilla oli kuivia kohtia (kuva 5.5). Tämä viestii siitä, että näissä kohdissa vesihöyryä ei ole virrannut. Laitteen pohjalla altaassa oli kuitenkin vettä.



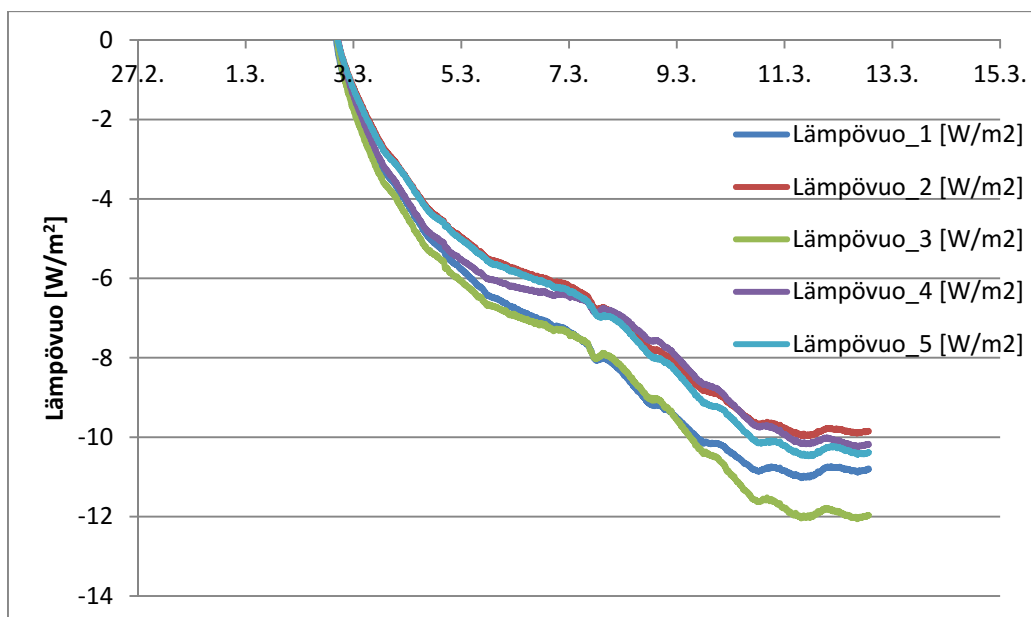
Kuva 5.5 Raidesepelinäytteen purku. Vasemmanpuoleinen kuva on noin 1/3 korkeudelta pohjasta lukien. Oikeanpuoleinen kuva on näytteen pohjalta. Näytteessä on selvästi havaittavissa kuivia kohtia, joissa vesihöyryä ei ole virrannut.

Raidesepelinäytteen tuloksista on piirretty kuva 5.6. Kuvasta voidaan havaita, että raidesepelissä tapahtuu merkittävää konvektiivista lämmönsiirtymistä jo 10 °C lämpötilaerolla. Mikäli liikkuva väliaine on vesihöyryä, tehollinen lämmönjohtavuus kasvaa edelleen. Avoimen yläpinnan tulokset näyttävät osuvan myös hyvin kostean näytteen käyrälle täydentäen puuttuvia pisteitä. Tämä kertoo siitä, että 50 mm näytteen yläpinnasta oleva laatta ei muodostanut kriittisen Rayleighin luvun tarkastelussa esiintyvää avoimen yläpinnan tilannetta.



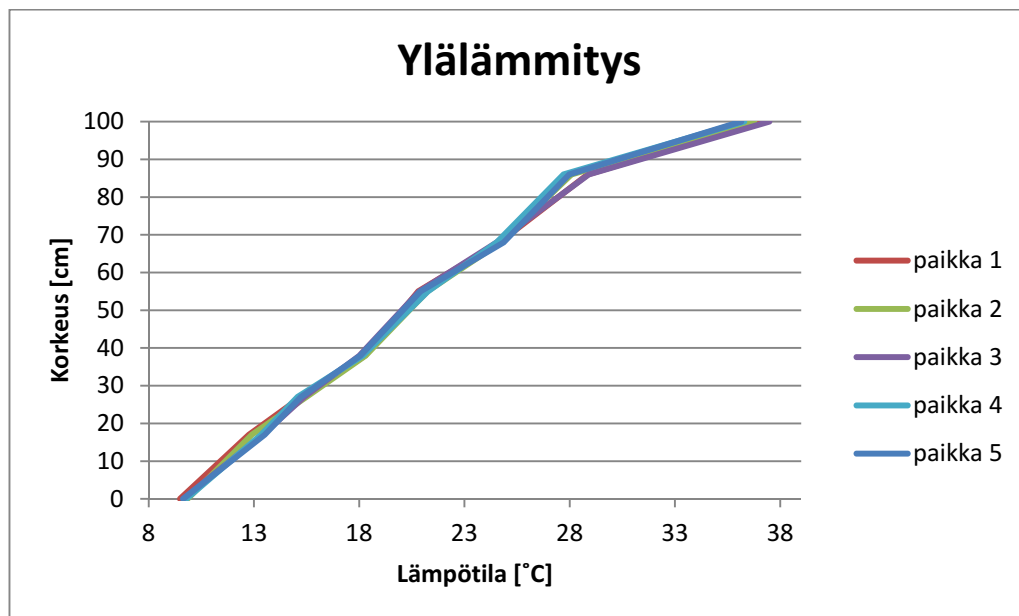
Kuva 5.6 Raidesepelinäytteestä testatut lämmönjohtavuudet lämpötilaeron funktiona 1,0 m korkealla näytteellä.

Raidesepelille tehtiin myös niin sanottu nopeustesti, jossa näytettä lämmitettiin alhaalta päin ja näytteen annettiin tasaantua alalämmitysalaan lämpötilaan. Testin tavoitteena oli selvittää, miten kauan konvektion käynnistyminen kestää testiolosuhteissa. Tasaantumisen jälkeen ylälaatan jäähtytys käynnistettiin, jolloin ylälaatan lämpötila putosi nopeasti noin 30 °C lämpötilasta 9 °C lämpötilaan. Kuvassa 5.7 on esitetty testin lämpövuomittausten tulokset. Testin perusteella näyttää siltä, että näissä olosuhteissa lämpövuomittausten välille alkaa muodostua eroa jo ajankohtana 4.3. eli noin kaksi päivää testin aloittamisen jälkeen. Ero kasvaa ajankohtaan 11.3. saakka, jonka jälkeen tilanne vakiintuu. Näyttää siis siltä, että konvektio lähtee liikkeelle varsin nopeasti, kunhan lämpötilaero on riittävä.

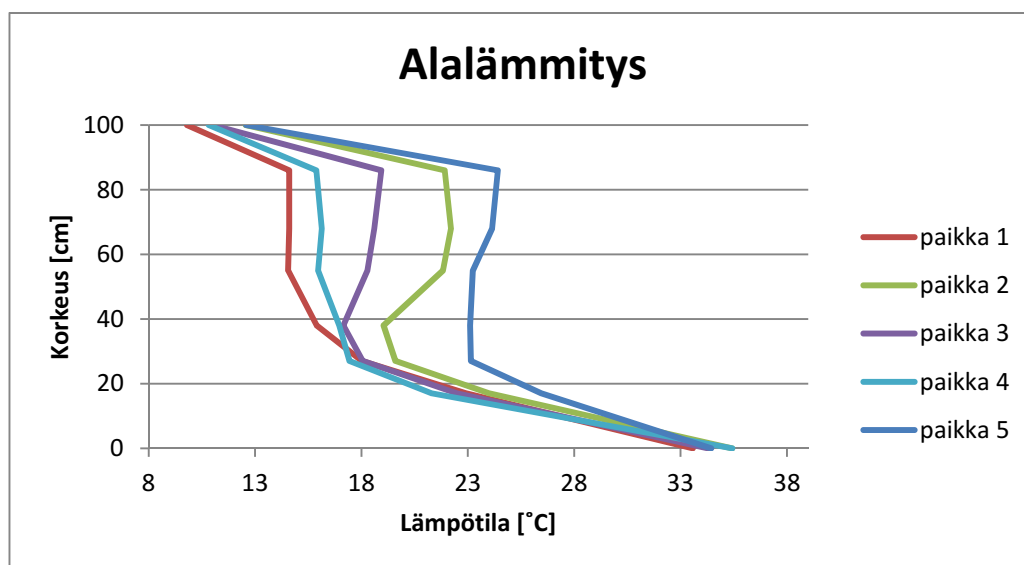


Kuva 5.7 Nopeustestin tulokset. Lämpövuoto kasvaa melko nopeasti sen jälkeen, kun jäähtytys on aloitettu. Ajankohtana 4.3. kuvassa lämpövuomittausten välillä alkaa näkyä eroa, joka viittaa konvektion alkamiseen.

Kuvassa 5.8 on näkyvissä raidesepelille tehdyn ylälämmitystestin lämpötilat korkeuden mukaan. Lämpötila-anturien välillä ei ole havaittavissa suuria eroja, ja gradientti on lähellä suoraa. Pienet erot johtunevat siitä, että anturien sijainti ei ole täysin oikea, sillä karkeassa raidesepelissä sijoittelu oli vaikeaa. Kuvassa 5.9 on esitetty vastaava kuvaaja konvektiotilanteessa. Kuvasta näkee erittäin hyvin, miten samalla tasolla olevien antureiden välillä on runsaasti lämpötilaeroja. Kun lämpötiloja tarkastellaan anturipaikoittain, voidaan havaita, että kuvassa 5.9 lämpötilat pysyvät korkeussuunnassa vakiona melkein 2/3 näytteen korkeudesta. Konvektiotestissä raidesepeli oli kostea ja lämpötilaero oli suuri, noin 23 °C.



Kuva 5.8 Lämpötilat korkeuden suhteen ylälämmityksellä. Samalla tasolla olevissa lämpötila-antureiden lukemien välillä ei ole havaittavissa merkittäviä eroja. Pienet erot johtunevat anturien sijaintien pienestä heitosta.



Kuva 5.9 Lämpötilat korkeuden suhteen konvektiotilanteessa. Kostealla raidesepelillä konvektio oli voimakasta ja samalla tasolla lämpötilat poikkeavat merkittävästi toisistaan. Paikka 3 on näytteen keskeltä ja muut ovat nurkkapisteitä.

5.2 5/16 mm kalliomurskenäytteen tutkimustulokset

5/16 mm kalliomurskeelle testit tehtiin vastaavalla tavalla kuin raidesepelille. Yhtä laajoja testejä ei tehty, sillä materiaalin lämmönjohtavuus pysyi suurista lämpötilaeroista huolimatta varsin pienenä. 5/16 mm materiaali poikkesi tuloksiltaan selvästi raidesepeleistä. Koeolosuhteet olivat hieman erilaiset raidesepelille tehtyihin kokeisiin nähden, sillä testeissä käytettävät lämpötilaerot olivat suurempia kuin raidesepelemateriaalilla. Kokeet tehtiin 5/16 mm materiaalilla myös toisessa järjestyksessä, sillä konvektiotilanne testattiin ensin ja vasta sen jälkeen puhdas lämmönjohtavuus. Järjestelyn tarkoituksena oli selvittää heti alkuunsa se, voiko materiaalissa tapahtua vastaavaa konvektiota kuin raidesepeleissä. Viimeisenä testattiin kostea tilanne. Testiparametrit on esitetty taulukossa 5.6. Alalämmitysajo 1:n kohdalla hallin lämpötila on vaihdellut voimakkaasti, jolloin keskiarvo antaa osittain vääristyneen kuvan testin onnistumisesta. Tämän takia kyseinen keskiarvo on merkitty tähdellä ja sululla.

Taulukko 5.6 5/16 mm kalliomurskeen testauksissa käytetyt parametrit.

5/16 mm:n kalliomurske	Lämpötilaero [°C]	Näytteen keskilämpötila [°C]	Hallin keskilämpötila [°C]	Ylälaatan lämpötila [°C]	Alalaa- tan lämpötila [°C]	Ajon pitiuus [vrk]
Kuiva näyte, ylälämmitys						
Ajo 1.	38,8	24,1	26,3	44,6	5,8	10
Ajo 2.	50,1	23,6	25,0	51,7	1,6	10
Poikkeutus* ¹⁾	53,3	31,1	26,6	64,7	11,4	21
Poikkeutus* ¹⁾	62,4	25,3	23,3	64,8	2,4	7
Kuiva näyte, alalämmitys						
Ajo 1.	29,6	25,0	24,3* ²⁾	10,0	39,6	14
Ajo 2.	39,7	24,7	24,2	4,9	44,6	8
Ajo 3.	17,9	25,8	27,6	16,8	34,7	8
Kostea näyte, alalämmitys						
Ajo 1.	38,9	31,1	26,6	5,6	44,5	21
Ajo 2.	28,9	25,3	23,3	10,7	39,6	7

*¹⁾ Poikkeutusajossa näytteen keskimääräinen lämpötila poikkesi tarkoituksella hallin keskimääräisestä lämpötilasta.

*²⁾ Hallin lämpötila vaihteli voimakkaasti testin aikana, joten keskiarvo ei anna todellista kuvaa testin olosuhteista.

5.2.1 Ylälämmitystilanne

Taulukossa 5.7 on esitetty näytteen lämmönjohtavuudet ylälämmitystilanteessa eli ilman konvektiota. Tarkkuuden parantamiseksi testissä käytettiin suurempia lämpötilaeroja verrattuna raidesepeleihin, koska pienillä lämmönjohtavuuksilla laitteistosta johtuvat virhetekijät ovat suurempia. Tämä voi vaikuttaa jonkin verran kiven lämmönjohtavuuteen, mutta ero lienee kuitenkin varsin pieni. Taulukossa on esitetty myös kaksi testiä, joissa lukee poikkeutus. Näissä testeissä selvitettiin lämpövuodon vaikutusta sekä mahdollisen korjauksen toimivuutta. Korjaamattoman lämmönjohtavuuden keskiarvon laskemisessa on otettu huomioon vain kaksi ensimmäistä koetta. 5/16 mm kalliomurskeen lämmönjohtavuus on testien perusteella noin 0,34...0,40 W/mK.

Taulukko 5.7 Lämmönjohtavuudet ylälämmitystilanteessa eli ilman konvektiota 5/16 mm kalliomurskeella. Poikkeusajoissa näytteen keskimääräistä lämpötilaa on poikkeutettu selvästi hallin lämpötilasta. Lämmönjohtavuuden keskiarvossa on otettu huomioon vain kaksi ensimmäistä tulosta.

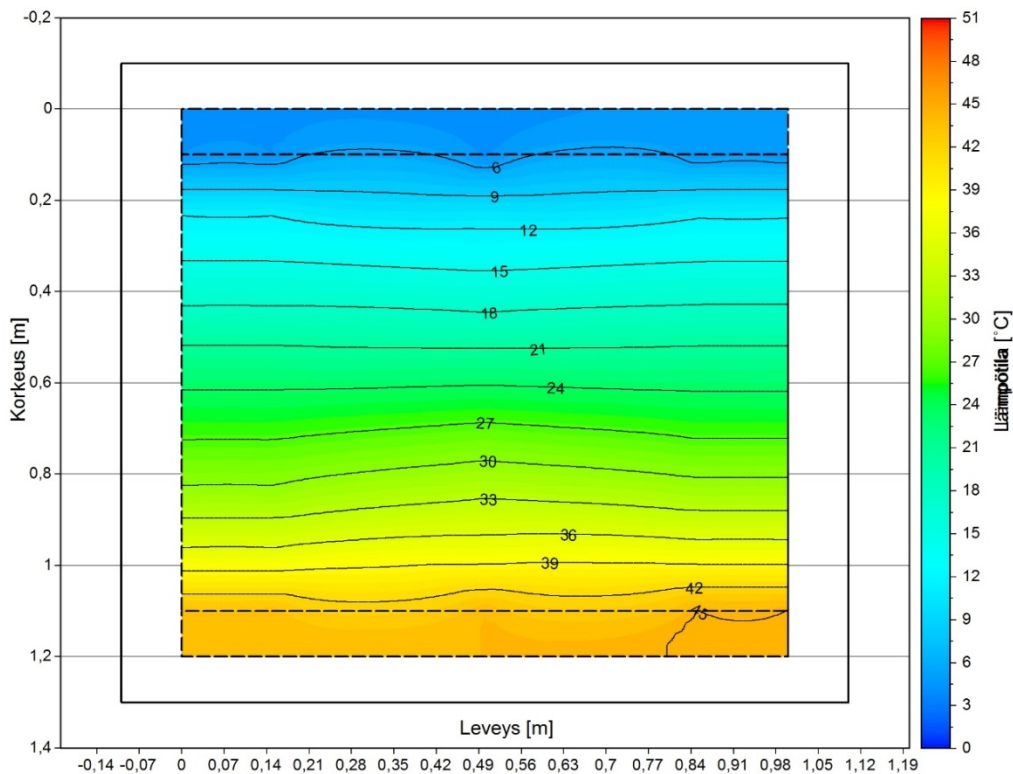
5/16mm KaM, kuiva Ylälämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
38,8	0,40	1
50,1	0,34	2
53,3	0,25	Poikkeutus
62,4	0,37	Poikkeutus
Keskiarvo:		0,37

5.2.2 Alalämmitys kuivalla näytteellä

Materiaalista testattiin myös konvektion mahdollistavan tilanteen tehollinen lämmönjohtavuus alalämmityksellä. Taulukossa 5.8 on esitetty testien tulokset. Tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, mutta poikkeavat hieman aiemmasta ylälämmityksellä tehdystä testistä. Kuva 5.10 esittää konvektiotilanteessa 40 °C lämpötilaerolla olevan näytteen lämpötilajakaumaa. Iso termeissä on havaittavissa hyvin vähän taipumista alaosassa. Kuvasta on kuitenkin nähtävissä, että tilanne on selvästi lähempänä johtumistilannetta kuin vahvaa konvektiotilannetta.

Taulukko 5.8 Lämmönjohtavuudet konvektiotilanteessa 5/16 mm kalliomurskeella.

5/16 mm KaM, kuiva Alalämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [°C]	Testausjärjestys
17,9	0,49	3
29,6	0,54	1
39,7	0,55	2



Kuva 5.10 5/16 mm kalliomurskeen lämpötilajakauma ja isotermit 40°C lämpötilaerolla alalämmitystilanteessa. Isotermeissä on havaittavissa pientä taittumista keskellä, mutta tilanne muistuttaa kuitenkin johtumistilannetta.

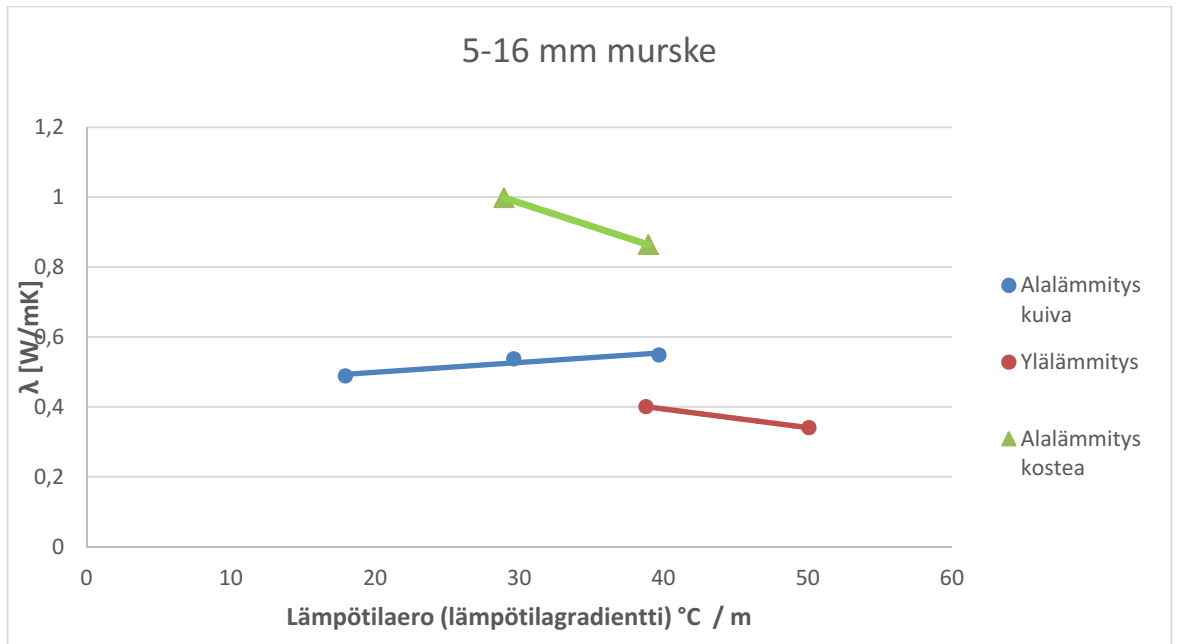
5.2.3 Alalämmitys kostealla näytteellä

Kuivalla näytteellä ei saatu aikaan merkittäviä eroja lämmönjohtavuudessa eri lämmitysuntien välillä. Kalliomursketta testattiin myös kosteassa tilanteessa, jossa konvektion pitäisi alkaa herkemmin. Kastelu tehtiin samalla tavalla kuin raideseppelinäytteelle (luku 5.1). Tulokset on esitetty taulukossa 5.9. Mielenkiintoista on, että pienemmällä lämpötilaerolla on saavutettu suurempi tehollinen lämmönjohtavuus kuin suuremmalla. Lienee mahdollista, että konvektio ei ole ehtinyt lähteä liikkeelle kunnon ensimmäisen kokeen aikana.

Taulukko 5.9 Kostean alalämmitystilanteen lämmönjohtavuudet 5/16 mm kalliomurskeella.

5/16 mm KaM, kostea Alalämmitys		
Lämpötilaero [$^{\circ}\text{C}$]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
28,9	0,99	2
38,9	0,86	1

Kalliomurskeesta on piirretty vastaavanlaiset kuvaajat kuin raidesepelille. Kuvassa 5.11 on esitetty lämmönjohtavuus lämpötilaeron funktiona. Tilanne on kaaviossa mielenkiintoinen, sillä lämmönjohtavuuksissa on havaittavia eroja kuivan tilanteen ylä- ja alalämmityksen välillä, mutta ne ovat kuitenkin pieniä verrattuna raidesepeleihin. Kosteassa tilanteessa lämmönjohtavuus on selvästi suurempi.



Kuva 5.11 Mitatut lämmönjohtavuudet 5/16 mm kalliomurskeelle

Rakeisuudeltaan 5/16 mm kalliomurskeen kohdalla tulokset ovat hankalasti tulkittavia, sillä erot eri koeajojen välillä olivat melko pieniä verrattuna raidesepelinäytteen. Kun näytettä purettiin, havaittiin ylälämmityslaatan pinnalla runsaasti vesipisaroita (kuva 5.12). Myös näytteen pinnalla oli havaittavissa kosteutta (kuva 5.13). Tämä todistaa sen, että näytteen puolivälistä pohjaltaaseen syötetty vesi on höyrystynyt ja tiivistynyt näytteen yläpinnalle. Vesihöyryä on siis kiertänyt ainakin jonkin verran näytteen sisällä. On siis todennäköistä, että lämpöä on siirtynyt myös konvektiivisesti. Lisäksi vesihöyryn diffuusiolla voi olla merkitystä.



Kuva 5.12 Ylälaattaan tiivistyneet vesipisarot. Ylälaatan alapinnassa oli selvästi nähtävissä tiivistyneitä vesipisaroita purettaessa 5/16 mm kalliomurskenäytettä.



Kuva 5.13 Kalliomurskenäytteen kostea yläpinta testien jälkeen. Kun konvektiolaite avattiin, oli 5/16 mm näytteen yläpinta selvästi kostunut.

5.3 Eristys- ja välikerrosmateriaalin tutkimustulokset

Konvektiokoetta varten valmistettu eristys–välikerrosmateriaali on testattavista materiaaleista kaikista mielenkiintoisin. Materiaalille tehtiin vastaavat testit kuin kahdelle muulle materiaalille, mutta hieman eri tavalla. Raidesepelinäytteen ja 5/16 mm kalliomurskenäytteen testeistä poiketen EV-materiaalille tehtiin määrällisesti vähemmän testejä, mutta testiajot olivat pidempiä. Testiparametrit on esitetty taulukossa 5.10.

5.3.1 Ylälämmitystilanne

EV-materiaalille tehtiin vain yksi ylälämmitystesti, sillä tulos osui hyvin lähelle muiden materiaalien lämmönjohtavuutta ilman konvektiota. Tulokset on esitetty taulukossa 5.11. EV-materiaalin lämmönjohtavuus ilman konvektiota oli siis noin 0,41 W/mK.

Taulukko 5.10 EV-materiaalille suoritettujen testien parametrit.

EV-materiaali	Lämpötilaero [°C]	Näytteen keskilämpötila [°C]	Hallin keskilämpötila [°C]	Ylälaatan lämpötila [°C]	Alalaatan lämpötila [°C]	Ajon pituus [vrk]
Kuiva näyte, ylälämmitys						
Ajo 1	38,6	19,9	21,3	42,7	4,1	25
Kuiva näyte, alalämmitys						
Ajo 1	29,6	21,3	22,6*	5,0	34,6	20
Kostea näyte, alalämmitys						
Ajo 1	34,6	24,0	21,8	4,9	35,6	26
Ajo 2	17,4	23,0	19,9	13,3	30,7	21
Ajo 3	7,6	21,3	20,2	17,2	24,8	

* Hallin keskilämpötila on vaihdellut voimakkaasti testin aikana, joten keskiarvoa ei anna testin onnistumisesta todellista kuvaa.

Taulukko 5.11 EV-materiaalin lämmönjohtavuus ilman konvektiota.

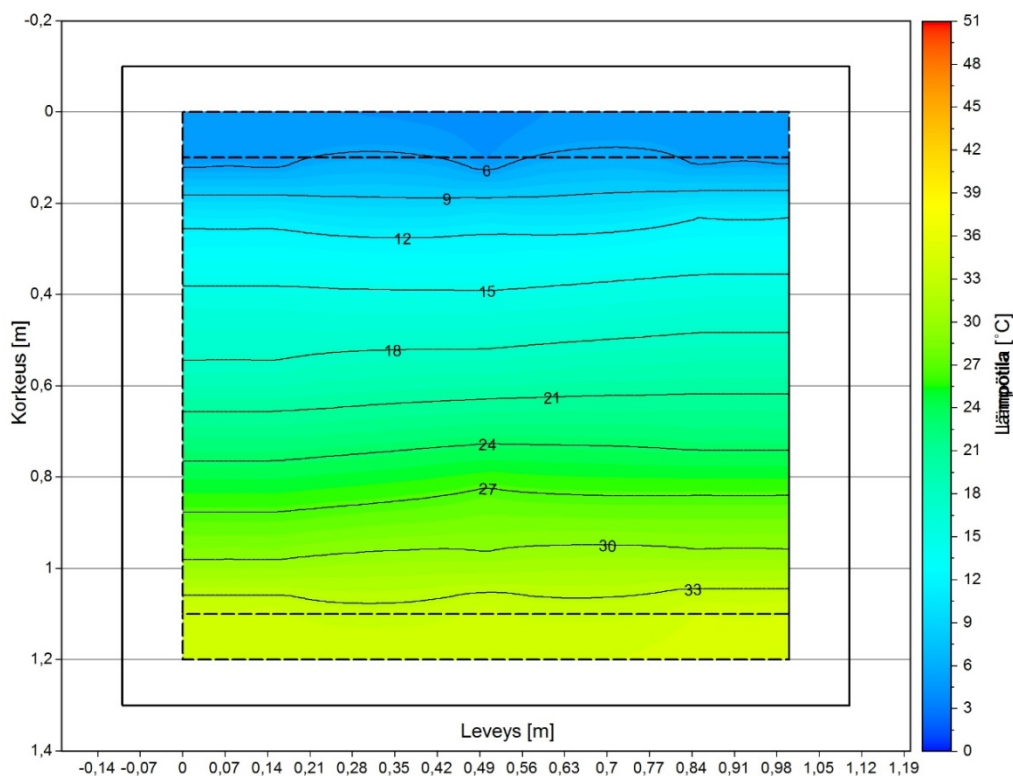
EV-materiaali, kuiva Ylälämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
38,6	0,41	1

5.3.2 Alalämmitystilanne kuivalla näytteellä

Materiaalille on tehty myös alalämmitystesti. Testin tulos on taulukossa 5.12. Myös EV-materiaalilla on nähtävissä samankaltainen ilmiö kuin 5/16 mm kalliomurskeella: lämmönjohtavuus kasvoi hieman ylälämmitystilanteeseen verrattuna. Kuvassa 5.14 on esitetty tilanne alalämmityksellä noin 30 °C lämpötilaerolla. Kuvasta voidaan havaita, että oikean reunan isotermit ovat hieman korkeammalla kuin vasemman mutta kokonaisuudessa tilanne muistuttaa enemmän johtumistilannetta.

Taulukko 5.12 EV-materiaalin lämmönjohtavuus konvektiotilanteessa kuivalla näytteellä.

EV-materiaali, kuiva Alalämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
29,6	0,58	1



Kuva 5.14 Kuivan EV-materiaalin lämpötilajakaumat alalämmitystilanteessa. Lämpötilaero oli noin 30 °C. Isotermit näyttäisivät olevan hieman ylempänä oikeassa reunassa. Tilanne kuitenkin muistuttaa konvektiotilanteen sijaan enemmän johtumistilannetta.

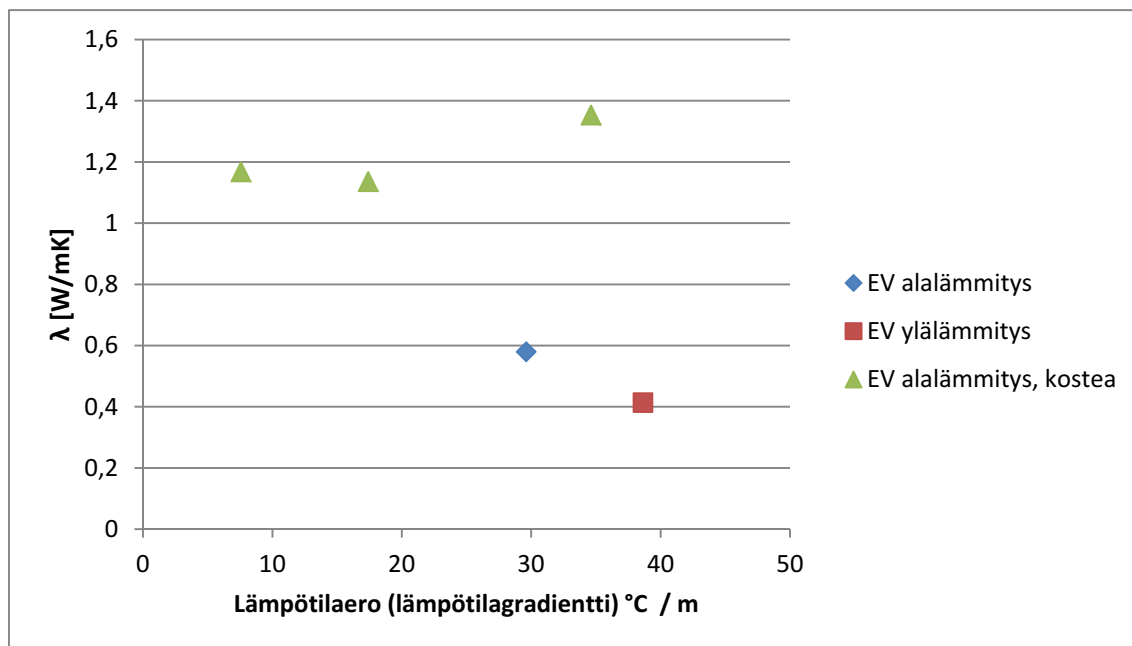
5.3.3 Alalämmitystilanne kostealla näytteellä

Sekä raidesepelinäytteellä että 5/16 mm kalliomurskenäytteellä tilanne on muuttunut selvästi, kun vettä lisätään näytteeseen. Veden lisäys on toistettu myös EV-materiaalilla, mutta menetelmää on hieman parannettu. EV-materiaalin kohdalla vettä lisättiin useassa erässä parin päivän aikana, jolloin vettä ehti höyrystyä ja mahdollisesti nousta ylemmäksi. Tällöin näytteeseen on mahdollisesti jäänyt enemmän vettä verrattuna raidesepeliin ja 5/16 mm kalliomurskenäytteeseen. Käytettävä vesimäärä on kuitenkin ollut lähes sama. Taulukossa 5.13 on esitetty kostean tilan tulokset, jotka poikkeavat selvästi aiemmista tilanteista. Myös kuvat 5.16 ja 5.17 kertovat selvästi siitä, että näytteessä tapahtuu konvektiota. Tehollinen lämmönjohtavuus on jokaisessa testiajossa melkein kolminkertainen verrattuna tilanteeseen ilman konvektiota. Myös EV-materiaalin kohdalla on havaittavissa, että viimeisen testin lämmönjohtavuus on korkeampi verrattuna aiempiin. Osittain kyseessä lienee mittausvirhe, sillä virheet korostuvat pienillä lämpötilaeroilla, mutta toisaalta asia on myös selitettävissä massan hitaudella.

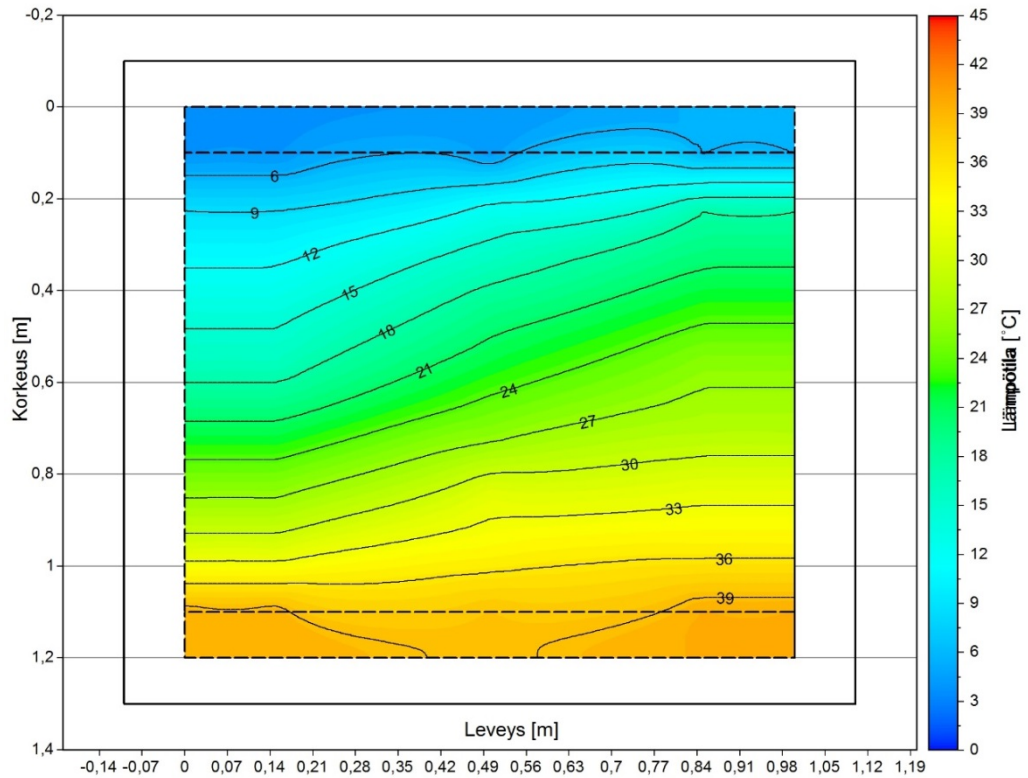
Taulukko 5.13 EV-materiaalin lämmönjohtavuudet konvektiotilanteessa kostealla näytteellä.

EV-materiaali, kostea Alalämmitys		
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Testausjärjestys
34,6	1,35	1
17,4	1,13	2
7,6	1,17	3

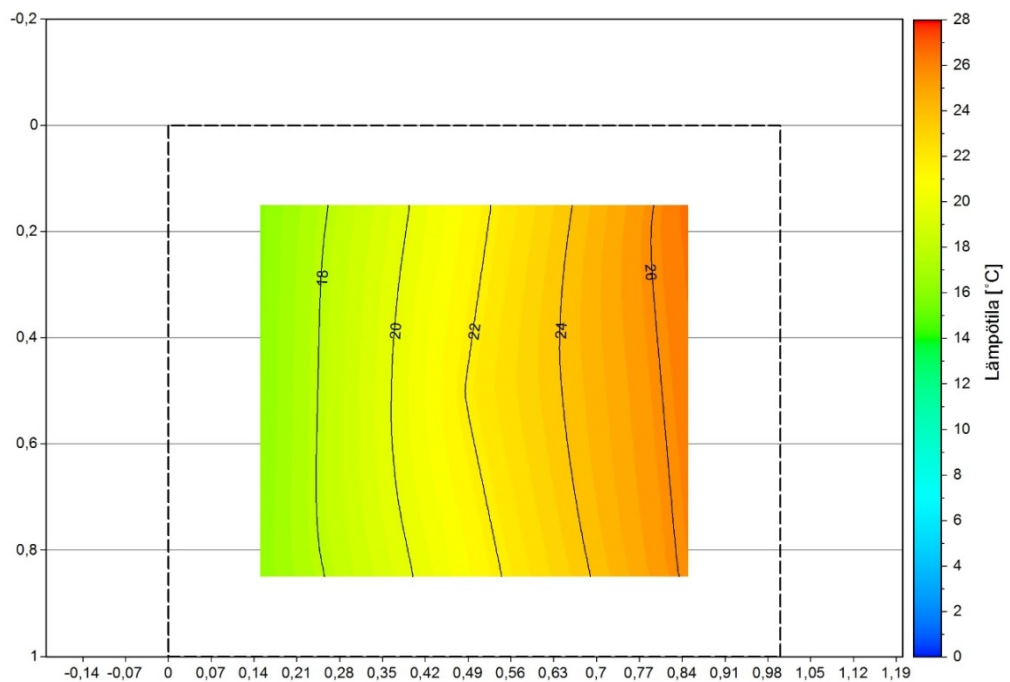
Eri testien yhdistetyt tulokset on esitetty kaaviossa 5.15. Kuvaajasta on nähtävissä selkeästi, että kosteassa EV-materiaalissa tapahtuu konvektiota, sillä lämmönjohtavuus on yli kaksinkertainen ilman konvektiota olevaan tilanteeseen verrattuna, jossa lämmönjohtavuus oli noin 0,4 W/mK.



Kuva 5.15 EV-materiaalille tehtyjen testien yhteenveto.



Kuva 5.16 *Kostean EV-näytteen konvektiotilanne 35°C lämpötilaerolla. Lämpö selvästi nousee toista reunaa ylös. Taitteet reunojen lähellä johtuvat approksimaatiosta.*



Kuva 5.17 *Kostean EV-näytteen konvektiotilanne 35°C lämpötilaerolla ylhäältä päin katsottuna. Kuva on noin puolivälistä näytteen korkeutta. Lämpötilaerot sivujen välillä ovat selvästi havaittavissa.*

5.4 Lämpöhävikkilaskelman avulla korjatut tulokset ja näytteen sisäiset lämmönjohtavuudet

Vaikka testilaitteisto on eristetty, tapahtuu siinä silti lämpöhävikkiä, jota on yritetty kompensoida luvussa 4.4 esitettyllä lämpöhävikkilaskelmalla. Seuraavissa alaluvuissa on esitetty korjatut tulokset. Korjauksen onnistuminen vaihteli ajosta riippuen. Lisäksi on esitetty myös näytteen sisäiset lämmönjohtavuudet. Näiden tulosten perusteella on mahdollista arvioida testien onnistumista ja ”varmuutta”, sillä jos korjattu lämmönjohtavuus on lähellä mitattua lämmönjohtavuutta, eivät hallin lämpötilan muutokset ole todennäköisesti vaikuttaneet merkittävästi testiin.

5.4.1 Raidesepeli

Taulukossa 5.14 on esitetty raidesepelinäytteelle tehtyjen ylälämmitystestien tulokset korjattuna lämpöhävikkilaskelmalla. Korjatut tulokset ovat melko lähellä mitattuja lämmönjohtavuuksia, jolloin hallin lämpötilan vaikutus on ollut pieni. Samassa taulukossa on esitetty myös näytteen sisältä laskettu lämmönjohtavuus, joka oli 0,49 W/mK. Korjausta ei ole tehty lämpötilaerolla 9,8 °C tehdylle ajolle eikä myöskään lämpötilaerolla 10,1 °C tehdylle ajolle. Korjaus ei onnistunut lämpötilaeron 9,8 °C ajolla, koska hallin lämpötilassa tapahtui nopeita muutoksia, jotka eivät näkyneet lämpövuoantureissa.

Taulukko 5.14 Raidesepelin mitatut, korjatut ja sisäiset lämmönjohtavuudet ilman konvektiota ylälämmityksellä. Keskiarvon laskennassa tulos 0,52 W/mK on jätetty pois virheellisenä.

Raidesepeli, kuiva Ylälämmitys				
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Näytteen sisäinen lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
9,2	0,37	0,56	_* ²⁾	4
10,1	0,52* ¹⁾	0,64	_* ²⁾	1
27,1	0,36	0,47	0,36	2
19,4	0,32	0,42	0,35	3
31,8	0,37	0,79	0,36	5
Keskiarvo:	0,36	0,49		

*¹⁾ Tulosta ei ole käytetty keskiarvon laskennassa, koska se on oletettavasti virheellinen.

*²⁾ Korjaus ei onnistunut voimakkaiden lämpötilavaihteluiden takia

Taulukossa 5.15 on esitetty alalämmitystestien tulokset korjattuna. Korjatut lukemat eivät poikkea paljon mitatuista tehollisista lämmönjohtavuuden arvoista. Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että korjattu lukema on aavistuksen mitattua lämmönjohtavuutta suurempi kolmessa tapauksessa. Pienet erot antavat viitteitä testin hyvästä onnistumisesta ja mitattuja lämmönjohtavuuksia voidaan pitää varsin luotettavina. Taulukossa 5.16 on kostean tilan tulokset korjattuna. Korjatut lukemat ovat

myös tässä tilanteessa melko lähellä alkuperäisiä mitattuja lukemia lukuun ottamatta 12,3 °C lämpötilaerolla tehtyä testiä. Kostean tilan testit on esitetty taulukossa 5.17.

Taulukko 5.15 Kuivalle raidesepelille mitatut ja korjatut lämmönjohtavuudet konvektiotilanteessa.

Raidesepeli, kuiva Alalämmitys			
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
7,1	0,89	0,82	4
9,9	0,81	0,91	1
14,9	0,99	1,14	3
19,4	1,12	1,25	2

Taulukko 5.16 Mitatut ja korjatut lämmönjohtavuudet raidesepelille konvektiotilanteessa, kun näyte on kasteltu.

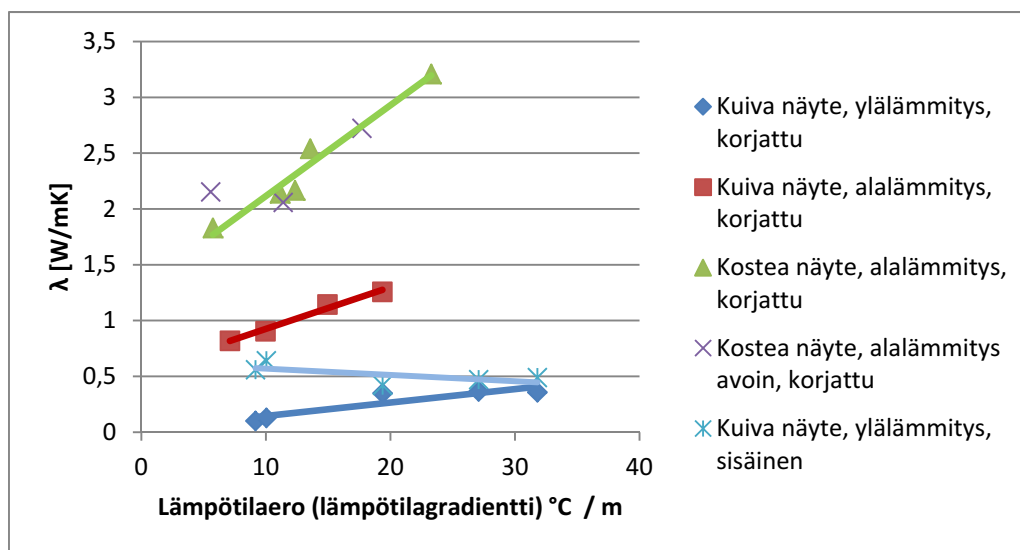
Raidesepeli, kostea Alalämmitys			
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
5,7	1,52	1,83	5
11,1	2,04	2,14	4
12,3	1,69	2,17	1
13,6	2,44	2,54	3
23,3	3,16	3,21	2

Taulukko 5.17 Lämmönjohtavuudet raidesepelille konvektiotilanteessa, kun näyte on kasteltu ja näytteen pinta "avoin". Raidesepelillä testattiin myös eroa suljetun yläpinnan ja avoimen tilanteen välillä. Ylälaattaa nostettiin 50 mm irti näytteen yläpinnasta. Näyte oli kokeen jälkeen edelleen kostea.

Raidesepeli, kostea Alalämmitys, avoin yläpinta			
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
5,6	1,46	-	1
11,4	1,84	2,06	3
17,7	2,61	2,72	2

Raidesepelin lämpöhävikkilaskelmalla korjatut tulokset on koottu kuvaan 5.18. Ylälämmityksellä näytteen lämmönjohtavuus on lähellä suoraa. Alalämmitystilanteessa lämmönjohtavuus on yli kaksinkertainen ja tehollinen lämmönjohtavuus kasvaa selvästi lämpötilaeron kasvaessa. Kostealla näytteellä lämmönjohtavuus kasvaa moninkertaiseksi ylälämmitystilanteeseen verrattuna, ja myös se kasvaa johdonmukaisesti

lämpötilaeron mukaan. Käyrien muodot ovat kuitenkin jokseenkin samat kuin korjaamattomilla arvoilla.



Kuva 5.18 Raideseppelinäytteen lämpöhävikkilaskelmalla korjatut lämmönjohtavuudet lämpötilaeron funktiona 1,0 m korkealla näytteellä.

5.4.2 Kalliomurske 5/16 mm

Myös 5/16 mm materiaalin testituloksia on testattu lämpöhävikkilaskelman avulla. Taulukossa 5.18 esiintyvät korjatut lämmönjohtavuudet poikkeavat jonkin verran mitattusta lämmönjohtavuudesta. Kaikilla kolmella eri menetelmällä ilmoitettujen lämmönjohtavuuksien keskiarvot ovat kuitenkin melko lähellä toisiaan. Tuloksista on selvästi havaittavissa, että lämpöhävikkilaskelmalla korjatut poikkeutusajon lämmönjohtavuudet ovat lähempänä oikeaa noin 0,4 W/mK arvoa kuin korjaamattomat arvot. Tulosten perusteella noin 0,4 W/mK arvoa ilman konvektiota voidaan pitää varsin järkevänä tälle materiaalille.

Taulukko 5.18 Eri tavoilla saadut lämmönjohtavuudet ylälämmitystilanteessa eli ilman konvektiota 5/16 mm kalliomurskeella. Poikkeutusajoissa näytteen keskimääräistä lämpötilaa on poikkeutettu selvästi hallin lämpötilasta. Korjaamattomassa ja näytteen sisäisen lämmönjohtavuuden perusteella tehdyssä keskiarvossa on otettu huomioon vain kaksi ensimmäistä. Korjatussa on otettu huomioon kaikki testit.

5/16 mm KaM, kuiva Ylälämmitys				
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus näytteessä [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
38,8	0,40	0,48	0,34	1
50,1	0,34	0,41	0,32	2
53,3	0,25	0,29	0,39	Poikkeutus
62,4	0,37	0,42	0,46	Poikkeutus
Keskiarvo:	0,37	0,45	0,37	

Taulukossa 5.19 on tehty korjaus alalämmitystilanteen mitatuille lämmönjohtavuuk-
sille. Sisäistä lämmönjohtavuutta ei voida ilmoittaa konvektiotilanteessa. Korjatut
arvot ovat jälleen melko lähellä alkuperäisiä mitattuja lämmönjohtavuuksia. Kostean
tilanteen korjatut teholliset lämmönjohtavuudet on esitetty taulukossa 5.20. Tässä
tapauksessa korjatut teholliset lämmönjohtavuudet ovat selvästi noin 0,2 W/mK pie-
nempiä kuin mitatut arvot.

Taulukko 5.19 Lämmönjohtavuudet konvektiotilanteessa 5/16 mm kalliomurskeella.

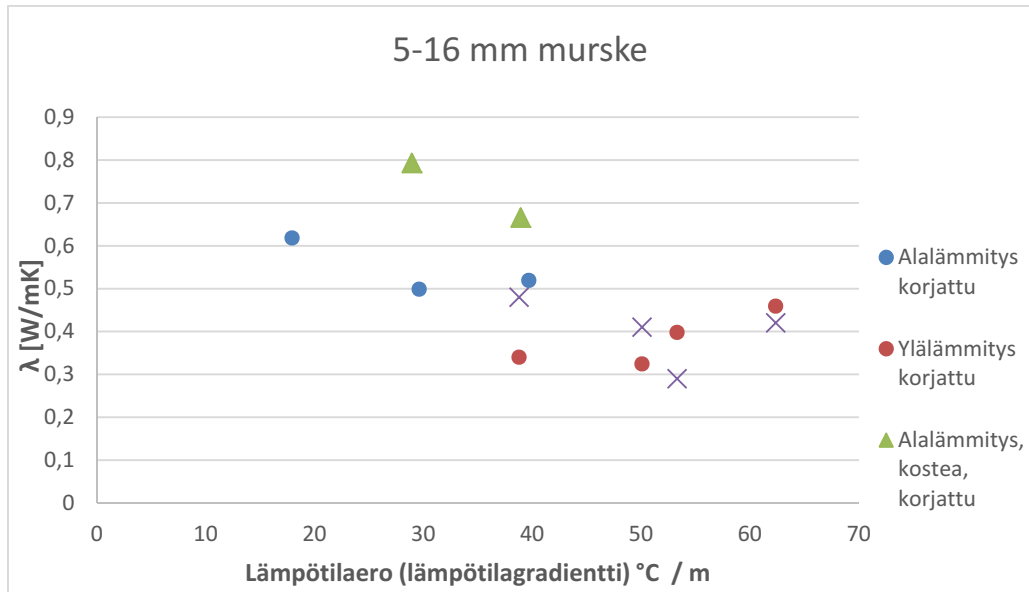
5/16 mm KaM, kuiva Alalämmitys			
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
17,9	0,49	0,62 *	3
29,6	0,54	0,50	1
39,7	0,55	0,52	2

* Korjaus ei ole onnistunut kunnolla hallin lämpötilan nopeiden muutosten takia

*Taulukko 5.20 Kostean alalämmitystilanteen lämmönjohtavuudet 5/16 mm kallio-
murskeella.*

5/16mm KaM, kostea Alalämmitys			
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
28,9	0,99	0,79	2
38,9	0,86	0,66	1

Kuvaan 5.19 on koottu eri ajojen korjatut tulokset. Korjattujen tulosten perusteella
alalämmitystilanteen kuvaaja on enemmän laskeva suora kuin nouseva, mikä on risti-
riidassa konvektioteorian kanssa. Myös kostealla näytteellä kasvusuunta on väärin-
päin. Tuloksista on kuitenkin havaittavissa, että lämmönjohtavuus kasvaa alalämmi-
tystilanteessa ylälämmitystilanteeseen verrattuna. Kostealla näytteellä lämmönjohta-
vuus kasvaa myös jonkin verran kuivaan tilanteeseen nähden. Alalämmitystilanteen
kuvaaja herättää kuitenkin kysymyksen siitä, voisiko se olla kuitenkin suora. Kaikki
arvot ovat kuitenkin tällä materiaalilla alle 1,0 W/mK, vaikka lämpötilaerot ovat olleet
testeissä todella suuria.



Kuva 5.19 Korjatut lämmönjohtavuudet 5/16 mm kalliomurskeelle.

5.4.3 EV-materiaali

Ylälämmitystilanteessa lämpöhävikkilaskelmalla korjattu tulos on taulukon 5.21 mukaan hieman pienempi korjaamattomaan lämmönjohtavuuteen verrattuna. Ero on kuitenkin hyvin pieni, mikä viittaa siihen, ettei hallin lämpötilasta aiheutuva korjauskomponentti ollut merkittävä tässä testissä. Taulukossa on esitetty myös näytteen sisäinen lämmönjohtavuus 0,64 W/mK, joka on selvästi suurempi verrattuna kahteen muuhun lämmönjohtavuuslukemaan.

Taulukko 5.21 EV-materiaalin mitattu, korjattu ja sisäinen lämmönjohtavuus ilman konvektiota.

EV-materiaali, kuiva Ylälämmitys				
Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Näytteen sisäinen lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
38,6	0,41	0,64	0,39	1

Alalämmitystestin korjatut tulokset on esitetty taulukossa 5.22. Korjattu lämmönjohtavuus 0,63 W/mK on hyvin lähellä mitattua lämmönjohtavuutta 0,58 W/mK. Materiaalille voidaan myös tässä tapauksessa laskea sisäinen lämmönjohtavuus, sillä tilanne on hyvin lähellä johtumistilannetta. Sisäinen lämmönjohtavuus on selvästi suurempi kuin muilla tavoin saatu lämmönjohtavuus mutta melko lähellä ylälämmitystilanteessa mitattua sisäistä lämmönjohtavuutta.

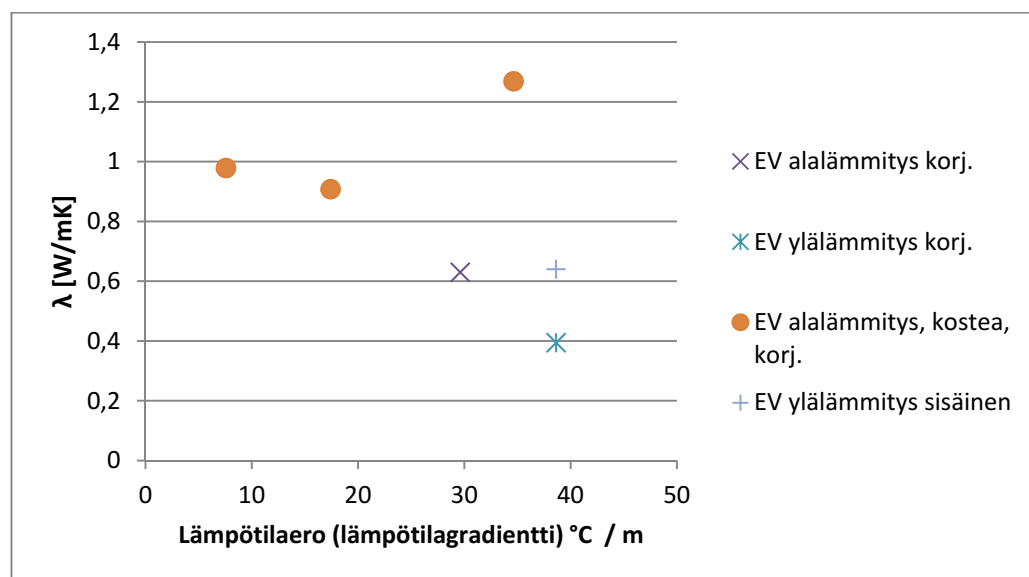
Taulukko 5.22 EV-materiaalin mitattu, korjattu ja sisäinen lämmönjohtavuus konvektiotilanteessa kuivalla näytteellä.

EV-materiaali, kuiva Alalämmitys		Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus näyte [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
		29,6	0,58	0,70	0,63	1

Taulukkoon 5.23 on kirjattu kostean tilan korjatut tulokset. Lämpöhävikkilaskelmalla korjatut tulokset poikkeavat selvästi mitatuista tuloksista pienentäen tehollista lämmönjohtavuutta. Kuvassa 5.20 on esitetty kaikki korjatut tulokset sekä näytteen sisäinen lämmönjohtavuus.

Taulukko 5.23 EV-materiaalin mitatut ja korjatut lämmönjohtavuudet konvektiotilanteessa kostealla näytteellä.

EV-materiaali, kostea Alalämmitys		Lämpötilaero [°C]	Lämmönjohtavuus [W/mK]	Lämmönjohtavuus korjattu [W/mK]	Testausjärjestys
		34,6	1,35	1,27	1
		17,4	1,13	0,91	2
		7,6	1,17	0,98	3



Kuva 5.20 EV-materiaalille lämpöhävikkilaskelman avulla korjatut tulokset sekä näytteen sisäinen lämmönjohtavuus.

Lämpöhävikkilaskelmalla korjattujen tulosten vertaaminen suoraan mitattuihin arvoihin osoittaa todeksi laitteessa tapahtuvan pienen lämpöhävikin. Korjattujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että lämpöhävikkilaskelma toimii kohtuullisesti mitattujen tulosten virhearvioinnissa. Laskelman avulla ei kuitenkaan voida tuottaa tarkkoja lämmönjohtavuuksia, sillä lämpöhävikki on hyvin vaikeasti arvioitava asia ja käytetty laskentamenetelmä sisältää puutteita. Näytteen sisäinen lämmönjohtavuus osoittautui mielenkiintoiseksi menetelmäksi, joka pääsääntöisesti näytti antavan hieman suurempia lämmönjohtavuuksia verrattuna normaaliin mittausmenetelmään. Eri menetelmien avulla saadut lämmönjohtavuudet ovat kuitenkin melko lähellä toisiaan, jolloin materiaalin mahdollista konvektiivista käytöstä voidaan arvioida lähinnä mitatuilla lämmönjohtavuuksilla.

5.5 Materiaalien väliset erot

Testattavat materiaalit olivat rakeisuudeltaan hyvin erilaisia, joten oli oletettavaa, että testien tulokset poikkeavat huomattavasti toisistaan. Materiaalien käyttäytymisestä on kuitenkin myös löydettävissä yhtäläisyyksiä. Ylälämmitystestien avulla saadut lämmönjohtavuusarvot osuivat hyvin lähelle toisiaan, vaihteluväli oli 0,33...0,41 W/mK. Sisäinen lämmönjohtavuus antoi hieman korkeammat lämmönjohtavuudet, joiden vaihteluväli oli 0,45...0,64 W/mK. Korkein sisäinen lämmönjohtavuus oli EV-materiaalilla, joka oli selvästi tiheämpää verrattuna raidesepeleihin ja 5/16 mm kalliomurskeeseen.

Alalämmityksellä tulokset poikkesivat toisistaan huomattavasti enemmän. Tuloksista oli nähtävissä selkeästi, että kuivalla ilmalla merkittävää konvektiota tapahtuu lähinnä raidesepeleissä. Raidesepeleiden tehollinen lämmönjohtavuus nousi selvästi jo suhteellisen pienillä lämpötilaeroilla. Vastaavia tuloksia ei 5/16 mm kalliomurskeen ja EV-materiaalin kohdalla saatu esille, vaikka käytetyt lämpötilaerot olivat suurempia. Kostean tilanteen testaus muutti selvästi EV-materiaalin käyttäytymistä, mutta myös 5/16 mm kalliomurskeella oli havaittavissa tehollisen lämmönjohtavuuden nousua.

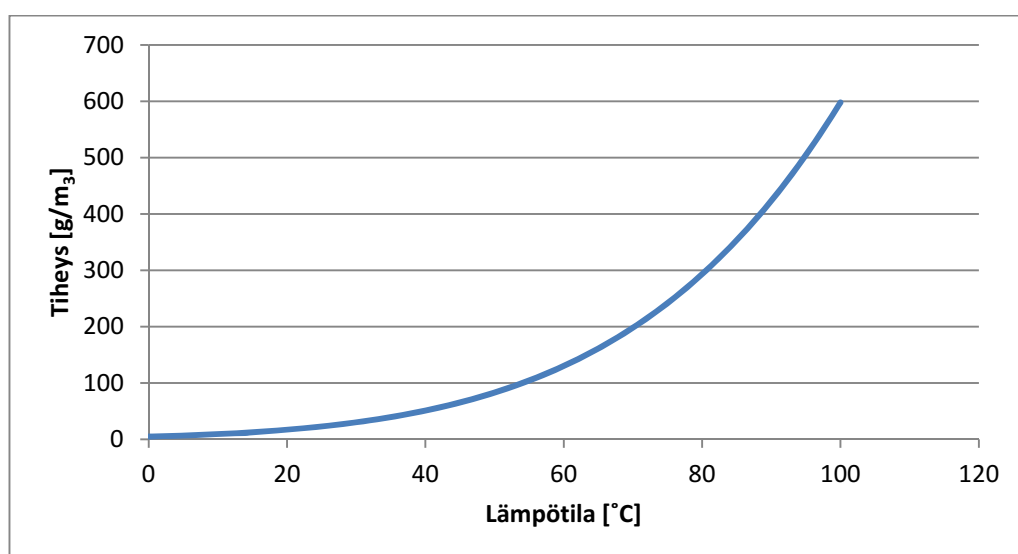
5.6 Laskennallinen analyysi

Konvektiotestien tuloksia on syytä tarkastella teorian pohjalta tarkastelemalla laskennallista Rayleighin lukua. Tarkastelussa käytettävät arvot on esitetty taulukossa 5.24. Osa arvoista on lämpötilariippuvaisia, joten niitä on laskennassa korjattu todellisilla lämpötiloilla (esimerkiksi ilman tiheys).

Taulukko 5.24 Laskennassa käytettyjä lähtöarvoja.

Laskennassa käytettävät muuttujat	
Ilman tiheys normaalipaineessa, 0 °C	1,293 kg/m ³
Putoamiskiihtyvyys	9,81 m/s ²
Ilman ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa	1010 J/kg·°C
Ilman lämpölaajenemiskerroin	0,00367 1/K
Ilman kinemaattinen viskositeetti ν	13,3 mm ² /s
Ilman dynaaminen viskositeetti μ (riippuu tiheydestä)	1,6589·10 ⁻⁵ kg/ms
Veden kinemaattinen viskositeetti 10 °C	1,3·10 ⁻⁶ m ² /s
Kriittinen Rayleighin luku Ra_{cr} suljettu	≈40
Kriittinen Rayleighin luku Ra_{cr} avoin	≈27

Ilman tiheys kasvaa, kun lämpötila laskee. Tiheyden muutos vaikuttaa myös dynaamiseen viskositeettiin. Tämä tarkoittaa sitä, että konvektiota voi tapahtua herkemmin kylmässä ilmassa verrattuna lämpimämpään. Tilanne on vaikeampi vesihöyryllä, sillä kylläisen vesihöyryn tiheys putoaa, kun lämpötila laskee. Lisäksi on vaikea tietää, oliko näytteessä oleva vesihöyry täysin kyllästynyttä vai ei. Tämän lisäksi vesihöyry (tai kostea ilma) väliaineena voi tiivistyä yläpinnassa, jolloin näytteessä voi tapahtua sateen kaltainen ilmiö. Pelkkä olomuodonmuutos siirtää runsaasti energiaa, joten sillä on todennäköisesti suuri merkitys kostean tilan konvektiossa. Kuvassa 5.21 on esitetty kylläisen vesihöyryn tiheys lämpötilan funktiona. Ilman ja vesihöyryn seos on kuitenkin vielä eri asia, sillä sen tiheys on, yllättävää kyllä, pienempi kuin kuivan ilman (Rogers & Yau 1989). Lisäksi laskennassa tarvitaan myös tämän seoksen dynaaminen viskositeetti, lämpölaajenemiskerroin sekä ominaislämpökapasiteetti. Nämä tekijät riippuvat vahvasti lämpötilasta. Näiden asioiden takia Rayleighin luvun laskenta on hankalaa kostealla ilmalla, sillä kylläisen vesihöyryn parametrit eivät päde suoraan tässä seoksessa. Koska näytteessä on vesihöyryä, siellä on silloin myös höyrynpainegradientti, joka voi aiheuttaa diffuusiota sekä latenttilämmön siirtymistä (Kane et al. 2001). Tämä on asia, joka kaipaava lisää tutkimuksia.



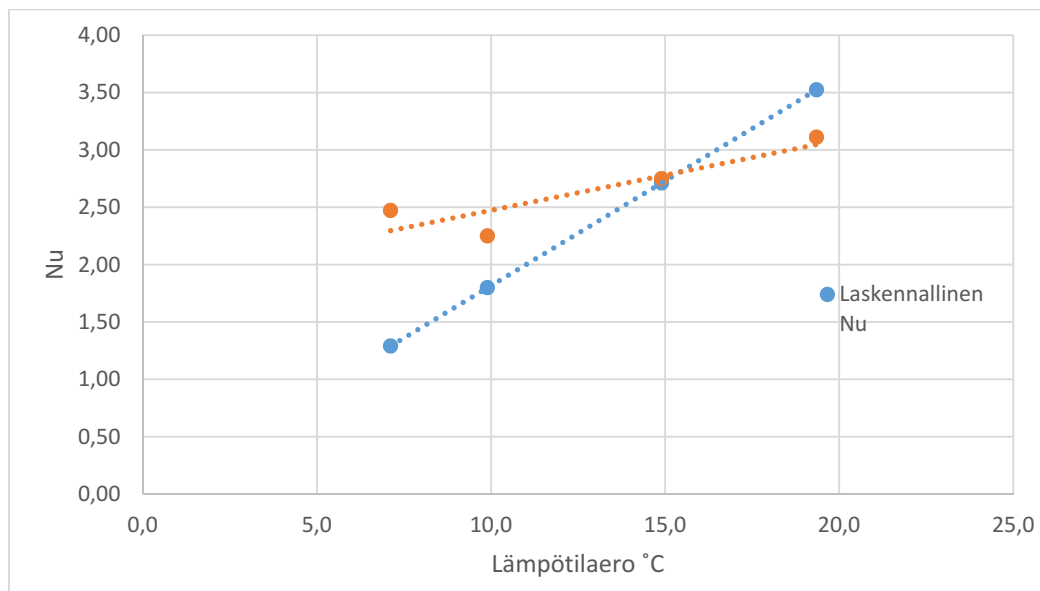
Kuva 5.21 Kylläisen vesihöyryn tiheys lämpötilan funktiona.

Raidesepeli

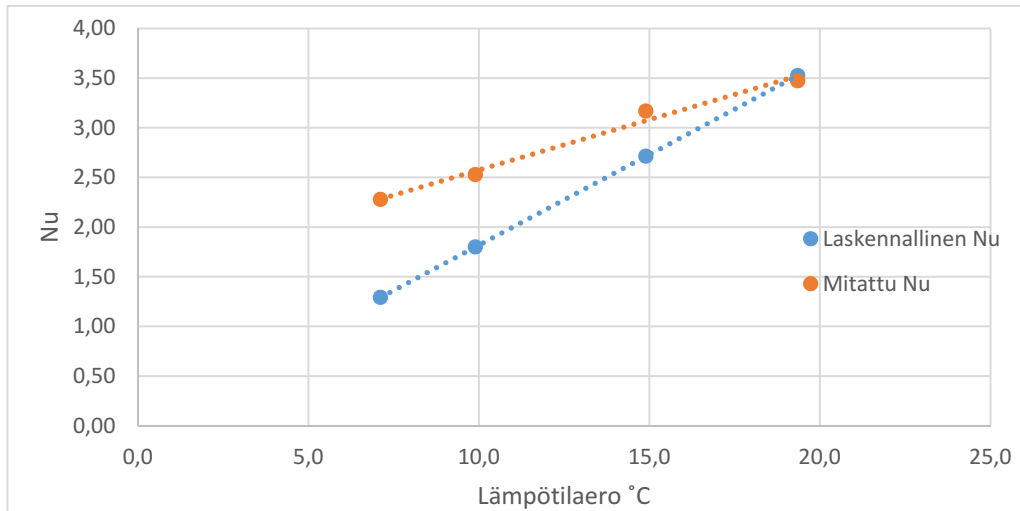
Raidesepelillä laskennan ongelmana on epävarmuus materiaalin sisäisestä läpäisevyydestä. Kirjallisuuden perusteella sisäisenä läpäisevyytenä on käytetty arvoa $8 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Raidesepelillä lämmönjohtavuus ilman konvektiota on noin $0,36 \text{ W/mK}$. Näillä lähtöarvoilla lasketut Rayleighin luvut on esitetty taulukossa 5.25. Teorian mukaan mitatun tehollisen lämmönjohtavuuden ja pelkän lämmönjohtavuuden pitäisi korreloida laskennalliseen Nusseltin lukuun. Taulukon perusteella on mielenkiintoista huomata, että kolmella viimeisellä mittauksella suhde $\lambda / \lambda_{\text{ef}}$ sekä laskennallinen Nusseltin luku Nu molemmat kasvavat johdonmukaisesti samassa suhteessa. Arvot on piirretty kuvaan 5.22, jossa näkyy varsin selkeästi, että suurin ero tapahtuu $7,1^\circ\text{C}$ lämpötilaerolla. Poikkeava arvo esiintyy myös mitatussa kokonaislämmönjohtavuudessa kyseisellä lämpötilaerolla. Ilmiö liittyy todennäköisesti siihen, että pienimmällä lämpötilaerolla tehty ajo on viimeisin, jolloin konvektio on ”jäänyt liikkeelle”. Kuvassa 5.23 on tehty edellistä vastaava kuvaaja korjatuilla lämmönjohtavuusarvoilla. Tällöin sekä laskennallinen että mitattu Nu kasvavat molemmat melko suoraan. Kuvaajasta on kuitenkin havaittavissa, että mitattu Nusseltin luku kasvaa loivemmin kuin Rayleighin luvun mukaan pitäisi.

Taulukko 5.25 Raidesepelille kuivalla näytteellä lasketut Rayleighin luvut. Lisäksi taulukossa on esitetty mitatun tehokkaan lämmönjohtavuuden ja pelkän lämmönjohtavuuden suhde sekä laskennallinen Nusseltin luku. Toinen $\lambda / \lambda_{\text{ef}}$ kuvaa korjatulla lämmönjohtavuudella laskettua suhdetta.

ΔT [$^\circ\text{C}$]	λ_{ef} [W/mK]	T_{avg} [$^\circ\text{C}$]	$\lambda / \lambda_{\text{ef}}$	$\lambda / \lambda_{\text{ef}}$ Korjattu	Ra	Nu ($=Ra/Ra_{cr}$)
7,1	0,89	22,6	2,47	2,28	52	1,29
9,9	0,81	22,1	2,25	2,53	72	1,80
14,9	0,99	21,6	2,75	3,17	108	2,71
19,4	1,12	21,4	3,11	3,47	141	3,52

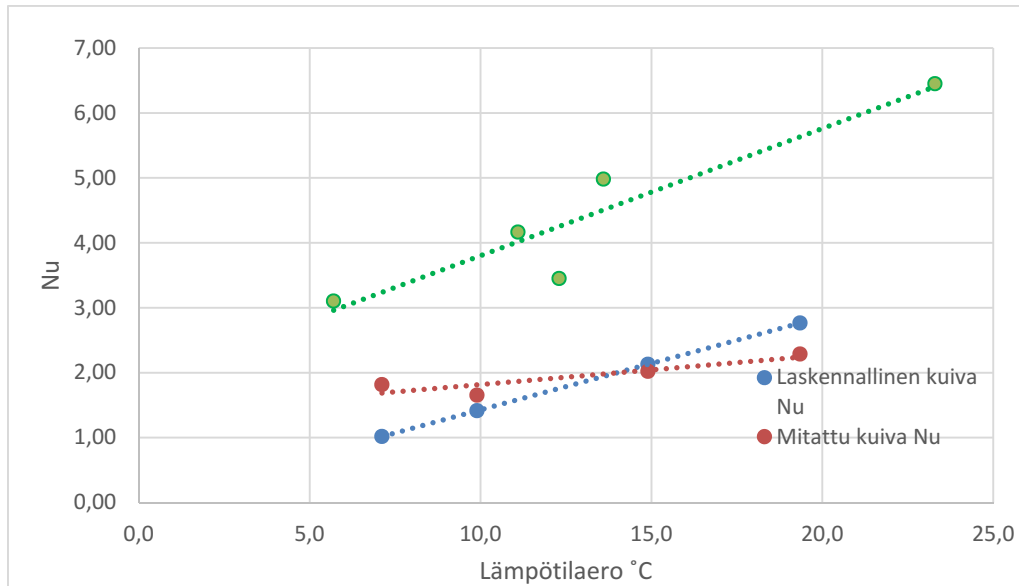


Kuva 5.22 Mitattu ja laskettu Nusseltin luku kuivalla raidesepelillä. Laskennassa on käytetty korjaamatonta lämmönjohtavuutta. Kuvassa on käytetty suoraan mitattua lämmönjohtavuutta $0,36 \text{ W/mK}$.



Kuva 5.23 Mitattu ja laskettu Nu raidesevelille käyttäen lämpöhävikkilaskelmalla korjattua lämmönjohtavuutta. Mittaus ja laskennallinen analyysi korreloivat hyvin. Kuvassa on käytetty suoraan mitattua lämmönjohtavuutta 0,36 W/mK.

Kuvassa 5.24 on esitetty kaikkien raidesevelille tehtyjen kokeiden Nusseltin luvut lämpötilan funktiona. Koska Nusseltin luku on Rayleighin luku jaettuna kriittisellä Rayleighin luvulla, voidaan tuloksista päätellä kriittistä lämpötilaeroa. Kuivalla raidesevelillä noin 10 °C lämpötilaerossa Nusseltin luku on noin 1,6. Tällöin Rayleighin luvun täytyy olla 1,6·40 joka on 64. Suljetulla yläpinnalla kriittinen Rayleighin luku on 40, jolloin kriittiseksi lämpötilaeroksi tulee tämän perusteella noin 6 °C. Kostealla näytteellä ja suljetulla yläpinnalla vastaava kriittinen lämpötilaero on noin 2 °C (käyttäen lämpötilaeroa 6 °C ja Nusseltin lukua 3). Jos näytteen yläpinta on suljetun sijaan avoin, kriittiset lämpötilaerot pienenevät ja ovat metrin paksuiselle kerrokselle 4 °C ja 1,3 °C. Lämpötilaerot on laskettu noin 20 °C keskilämpötilassa. Jos keskilämpötila on 0 °C, kriittiset lämpötilat ovat ilmalla noin 7 % pienempiä. Kosteaa tilan parametreja on vaikea arvioida eri lämpötiloissa, koska kyse on ilman ja vesihöyryn seoksesta. Tuloksia tarkastella on syytä muistaa, että maastossa olosuhteet voivat poiketa merkittävästi laboratoriotestien olosuhteista. Mitattu kostean tilan Nusseltin luku on myös melko suuri, mikä voi johtua siitä, että kosteassa näytteessä lämpöä siirtyy myös johtumalla enemmän. Lisäksi vesihöyryn diffuusio voi vaikuttaa.



Kuva 5.24 Nusseltin luvut lämpötilaeron suhteen raidesepeleissä. Kuvaan on piirretty myös kostean tilanteen testin tulokset. Nusseltin luvut on laskettu käyttäen sisäistä lämmönjohtavuutta 0,49 W/mK.

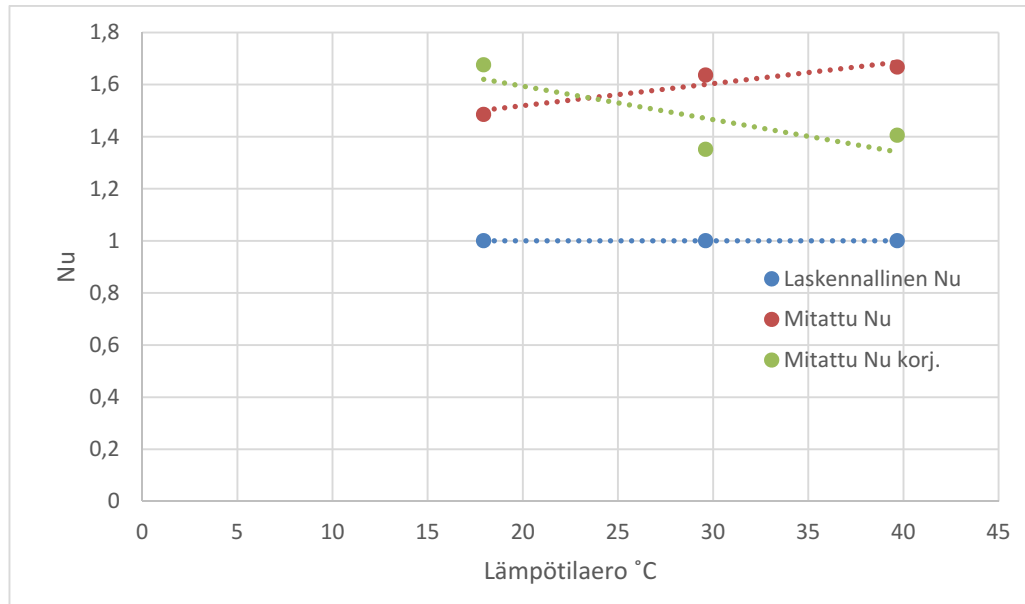
5/16 mm kalliomurske

5/16 mm kalliomurske oli materiaalina mielenkiintoinen, sillä sen mittaustulokset ovat jossain määrin ristiriitaisia. Materiaalin lämmönjohtavuus kasvaa selvästi alalämmitystilanteessa ylälämmitystilanteeseen verrattuna, mutta eri lämpötilaeroilla testatessa tehollinen lämmönjohtavuus ei muutu paljonkaan. Taulukossa 5.26 on esitetty kyseiselle materiaalille laskettuja arvoja. Laskennassa on käytetty sisäisenä läpäisevyytenä arvoa $1,38 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$, joka on laskettu mitatun vedenläpäisevyyden arvon $1,04 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$ perusteella. Tuloksista voidaan päätellä, että laskennallinen ja mitattu tulos eivät täsmää keskenään. Kuvan 5.25 kuvaaja tukee myös tätä tulosta. Yllättävää on, että ilman korjausta kuvaan piirretty mitattu Nu vaikuttaa varsin johdonmukaiselta. Korjatun laskennan perusteella kuitenkin herää epäily siitä, voisiko todellinen Nu olla kuitenkin lähempänä vaakasuoraa. Tämä voinee johtua siitä, että 5/16 mm kalliomurskeen mitatut tehollisen lämmönjohtavuuden arvot ovat kuitenkin varsin pieniä verrattuna raidesepeleinäytteessä olleisiin arvoihin. Myös käytetyt lämpötilaerot olivat suurempia. Lämmönjohtavuuden kasvu alalämmityksellä ilman konvektiota voi olla kuitenkin todellinen ilmiö, johon ei tämän työn puitteissa löytynyt varmaa selitystä.

Taulukko 5.26 5/16 mm kalliomurskeelle kuivalla näytteellä lasketut arvot käyttäen sisäisenä läpäisevyytenä arvoa $1,38 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$. $17,9^\circ \text{C}$ lämpötilaerolla mitattu korjattu $N \lambda_{ef}$ on suluissa, koska korjaus on epätarkka.

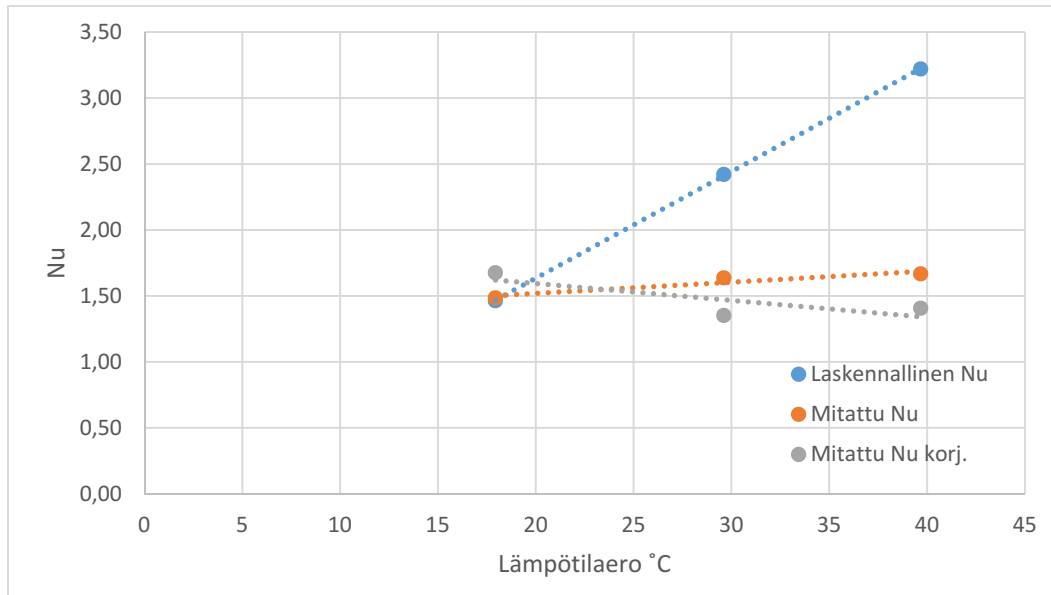
ΔT	λ_{ef}	T_{avg}	$N \lambda_{ef}$	$N \lambda_{ef}$ Korjattu	Ra	$Nu (=Ra/Ra_{cr})$
17,9	0,49	25,0	1,48	(1,68)	2,31	0,06 (=1,0)* ¹⁾
29,6	0,54	24,7	1,64	1,35	3,82	0,09 (=1,0)* ¹⁾
39,7	0,55	25,8	1,67	1,41	5,08	0,13 (=1,0)* ¹⁾

*¹⁾ Nusseltin luku on määritelmän mukaan aina vähintään yksi, vaikka laskennallinen tulos antaisi pienemmän arvon.



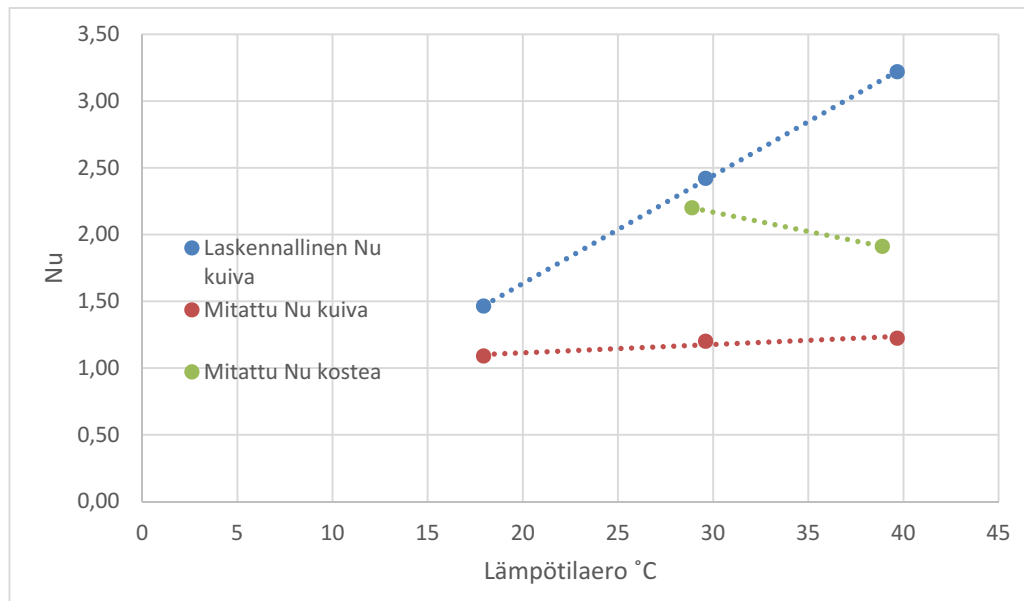
Kuva 5.25 Laskettu ja mitattu Nusseltin luku 5/16 mm kalliomurskeelle. Kuvassa on myös korjatuilla arvoilla laskettu versio. Nusseltin luvun määritelmän takia Nu on aina vähintään yksi.

Koska edellisen kuvaajan ja tarkastelun perusteella näyttäisi siltä, että laskennallinen Nu ja mitattu Nu ovat täysin eri suuruusluokassa, kuvassa 5.26 on piirretty laskennallinen Nu suuremmalla sisäisellä läpäisevyydellä. Sisäinen läpäisevyys täsmättiin niin, että laskennan ensimmäinen piste osuu lähelle mitattuja arvoja. Tällöin sisäinen läpäisevyys oli $3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$, jolloin vedenläpäisevyys on laskennallisesti noin 2,6 m/s. Kun tarkastellaan taulukossa 4.2 esitettyjä sisäisiä läpäisevyyksiä, näyttää siltä, että arvo olisi huomattavasti karkeampien kalliomurskeiden mukainen. Mielenkiintoista on, että d_{10} -arvon ja huokoisuuden perusteella laskettu vedenläpäisevyys (luku 4.3) 2,1 m/s on melko lähellä tätä kautta laskettua 2,6 m/s arvoa. Kuvassa 5.26 on havaittavissa myös suuri ero laskennallisen ja mitatun Nu:n kulmakertoimissa. Tämä viitanee siihen, että alkuperäinen mitatun vedenläpäisevyyden arvon perusteella laskettu sisäinen läpäisevyys on lähempänä oikeaa. Tulosten perusteella konvektion mahdollistavassa alalämmitystilanteessa mitattu tehollinen lämmönjohtavuus on noin puoli-toistakertainen verrattuna ylälämmitystilanteeseen, vaikka konvektiota ei laskennallisesti pitäisi tapahtua. Selvää kuitenkin on, ettei tämä materiaali ole normaaleilla ratapenkereessä esiintyvillä lämpötilaeroilla kuivalla ilmalla konvektiivinen.



Kuva 5.26 5/16 mm kalliomurskeelle piirretyt kuvaajat siten, että laskennassa on käytetty huomattavasti suurempaa sisäistä läpäisevyyttä $3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Nu on laskettu käyttäen lämmönjohtavuutta $0,37 \text{ W/mK}$.

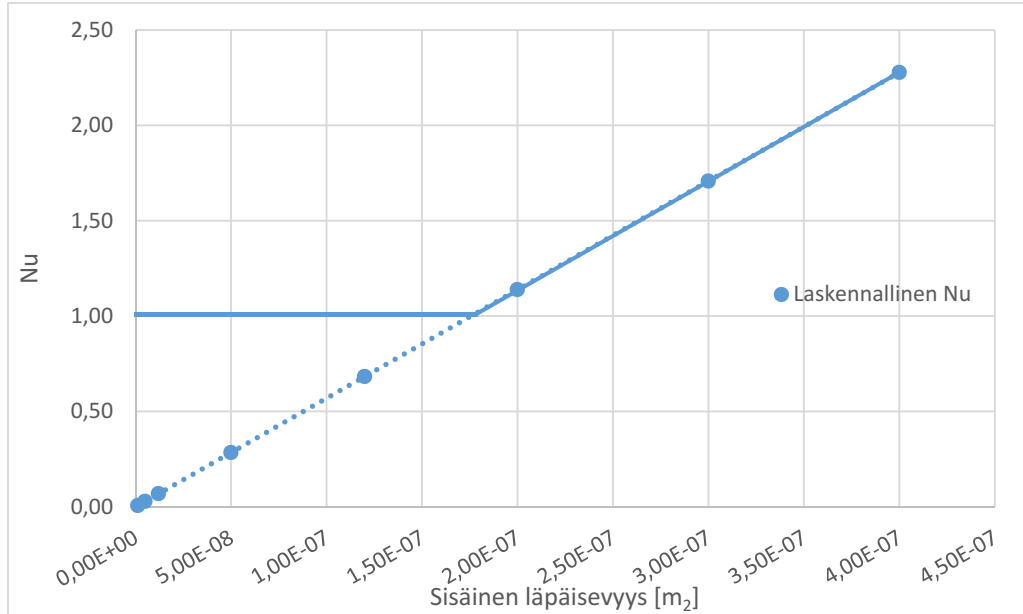
Myös 5/16 mm kalliomurskeelle on piirretty kuva 5.27, jossa on käytetty sisäistä lämmönjohtavuutta ja myös kuvassa 5.26 käytettyä sisäistä läpäisevyyttä $3,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$. Kuvasta nähdään, että kuivalla näytteellä Nusseltin luku on hyvin lähellä ykköstä. Lämpötilaero on myös ollut hyvin suuri. Tulokset viittaavat siihen, ettei näytteessä tapahtunut merkittävää konvektiivista lämmönsiirtymistä kuivalla ilmalla, vaikka lämpötilaero oli yli 20°C . Kostealla näytteellä Nusseltin luku käyttäytyy oudosti, sillä sen pitäisi nousta lämpötilaeron noustessa. Selitys tähän voi olla se, että pienemmällä lämpötilaerolla ajettu testi on tehty viimeksi, jolloin konvektio on saanut enemmän aikaa ”käynnistyä”. Toinen mahdollinen ilmiötä selittävä asia on muutokset vesihöyryn tiheyksissä lämpötilan mukaan, jotka aiheuttavat diffuusion. Jos kostean tilan Nusseltin luku oletetaan 35°C lämpötilaerolla noin kahdeksi, kriittinen lämpötilaero on tällöin $17,5^\circ\text{C}$. Avoimella yläpinnalla kriittinen lämpötilaero olisi noin 12°C . Kostean tilan parametrit muuttuvat kuitenkin erittäin paljon lämpötilan muututtua, joten tulos ei todennäköisesti päde näin pitkälle. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, ettei materiaali ole luonnossa esiintyvillä lämpötilaeroilla herkkää konvektiolle.



Kuva 5.27 Nusseltin luvut 5/16 mm kalliomurskeelle. Laskennassa on käytetty sisäistä lämmönjohtavuutta 0,45 W/mK.

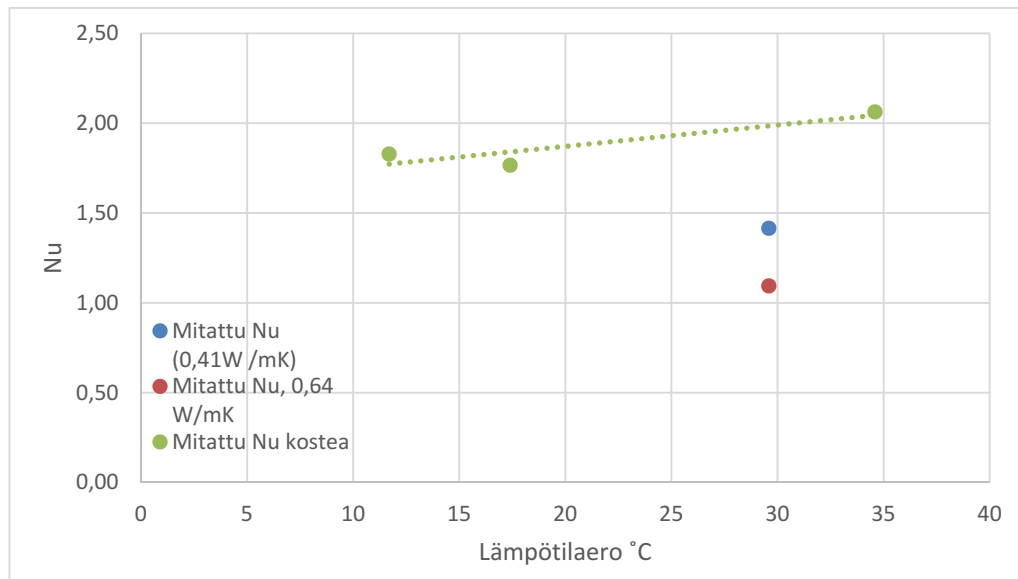
EV-materiaali

Eristys-välikerrosmateriaalin osalta käytettävissä on vain yksi koetulos kuivalla näytteellä konvektiotilanteessa. Materiaalin sisäisen läpäisevyyden arviointi on myös hankalaa, sillä taulukon 4.2 kirjallisuusarvoista ei löydy sopivaa arvoa materiaalille, jonka raekokojakauma on näin laaja. EV-materiaalille mitattiin lämmönjohtavuudeksi arvo 0,41 W/mK (korjattu 0,39 W/mK) ja konvektiotilanteessa 0,58 W/mK (korjattu 0,63 W/mK). Tällöin mitattu Nusseltin luku on 1,41 (korjatuilla arvoilla 1,62). Koska sisäinen läpäisevyys on epäselvä, kuvassa 5.28 on piirretty kokeen parametreilla laskennallinen Nusseltin luku sisäisen läpäisevyyden funktiona. Kuvaajan mukaan mitattu arvo saavutettaisiin noin $2,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ arvolla, joka vastaa vedenläpäisevyyttä 1,89 m/s. Taulukossa 4.2 tulos menisi 10–50 mm murskeen sekä $d_{\text{avg}}=30 \text{ mm}$ $n=40 \%$ väliin. Tämä vaikuttaa liian korkealta arvolta, sillä testattu EV-materiaali sisältää myös pienempää kiviainesta. On mahdollista, että materiaalilla tapahtuu vastaava ilmiö kuin 5/16 mm kalliomurskeella, jossa konvektiotilanteessa mitatut arvot ovat järjestelmällisesti korkeampia kuin ilman konvektiota, mutta kuitenkin suhteellisen tasaisia eri lämpötilaeroilla. Tätä selitystä tukee myös se, että EV-materiaalille mitattu lämmönjohtavuus konvektiotilanteessa on kuitenkin vielä selvästi pienempi raidesepelin vastaaviin arvoihin verrattuna. Sisäistä lämmönjohtavuutta käyttämällä Nusseltin luku on 1,1, joka on hyvin lähellä yhtä.



Kuva 5.28 EV-materiaalille laskettu Nusseltin luku kokeen parametreilla sisäisen läpäisevyyden mukaan. Nusseltin luku ei teorian mukaan voi olla alle yhden, joten alle yhden oleva osuus on merkitty katkoviivalla.

Kuvassa 5.29 on esitetty EV-materiaalille laskettuja Nusseltin lukuja. Käyttäen alkuperäistä $0,41 \text{ W/mK}$ lämmönjohtavuutta ja konvektiotilanteessa mitattua tehollista lämmönjohtavuutta $0,58 \text{ W/mK}$ saadaan Nusseltin luvuksi noin $1,4$. Jos laskelma tehdään käyttäen näytteen sisältä mitattuja lämmönjohtavuuksia, Nusseltin luku on noin $1,1$. Tämä viitanee siihen, ettei näytteessä tapahtunut ainakaan merkittävää konvektiota. Kosteassa tilanteessa Nusseltin luvut on laskettu käyttäen lämmönjohtavuutta sisäistä $0,64 \text{ W/mK}$. Luvut olisivat siis suurempia, jos käytettäisiin alkuperäistä $0,41 \text{ W/mK}$. Jos kriittistä lämpötilaeroa arvioidaan kostean tilanteen perusteella, on 15°C lämpötilaerolla Nusseltin luku noin $1,7$, jolloin kriittiseksi lämpötilaeroksi muodostuu noin 9°C . Avoimessa tilanteessa kriittinen lämpötila olisi noin 6°C . Toisaalta jos tilannetta tarkastellaan 35°C lämpötilaeron perusteella, kriittinen lämpötilaero avoimessa tilassa olisi noin 12°C . Kuten muillakin näytteillä on todettu, kriittinen lämpötilaero voi olosuhteiden takia vaihdella merkittävästi. Kostean tilan parametrien muutos 20°C keskilämpötilasta lähelle 0°C on todennäköisesti melko suuri. Kuvasta on myös havaittavissa, ettei mitattu Nusseltin luku kasva kovin jyrkästi, vaikka lämpötilaero muuttuu yli kolminkertaiseksi. Ilmiö voi mahdollisesti liittyä veden olomuodonmuutoksiin ja diffuusion aiheuttamaan vesihöyryn liikkeeseen. Nämä viittaavat kuitenkin siihen, että kostean tilanteen tarkastelu vaatii lisätutkimuksia.

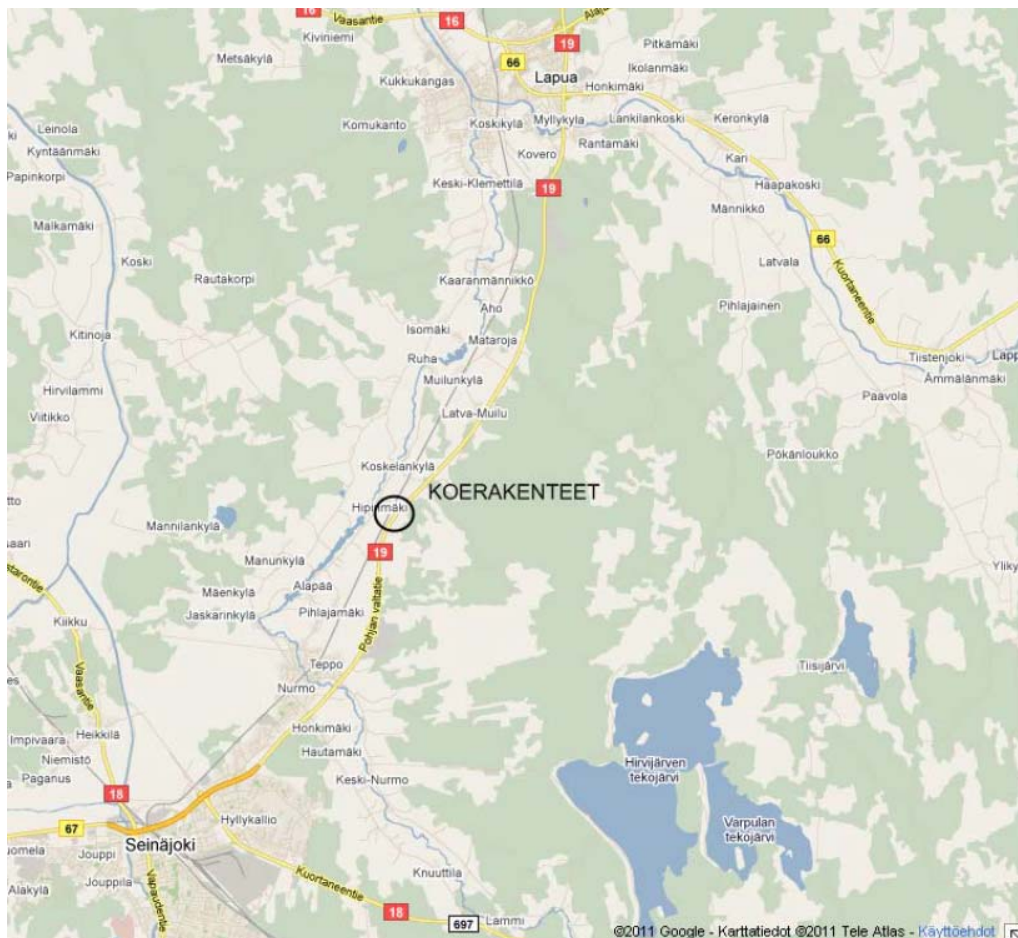


Kuva 5.29 EV-materiaalin Nusseltin luvut. Kuvassa on piirretty kuivan tilanteen Nu käyttäen kahta eri lämmönjohtavuutta. Sinisessä pisteessä on käytetty lämmönjohtavuutta 0,41 W/mK ja konvektiotilanteessa mitattua 0,58. Punaisessa pisteessä on käytetty lämmönjohtavuutta 0,64 W/mK ja konvektiotilanteessa 0,7 W/mK sisäistä lämmönjohtavuutta.

6 Konvektiotutkimus maastokohteissa

6.1 Hipin koekohte ja perustiedot

Hipin maastokohde sijaitsee Seinäjoen ja Lapuan välillä, Etelä-Pohjanmaalla (kuva 6.1). Koekohte on toteutettu Seinäjoki–Oulu-ratahankkeen yhteydessä, jossa vanhaa rataa on kunnostettu Seinäjoelta pohjoiseen päin. Seinäjoen ja Lapuan välille on myös rakennettu kaksoisraidetta. Tampereen teknillinen yliopisto on ollut mukana projektissa tekemässä koerakenteita, joihin on sijoitettu lämpötila-anturit sekä myöhemmin ratapölkyn korkeusasemaa mittaavat siirtymäanturit.



Kuva 6.1 Hipin koekohteet sijaitsevat Seinäjoen ja Lapuan välillä. (Kalliainen et al. 2011)

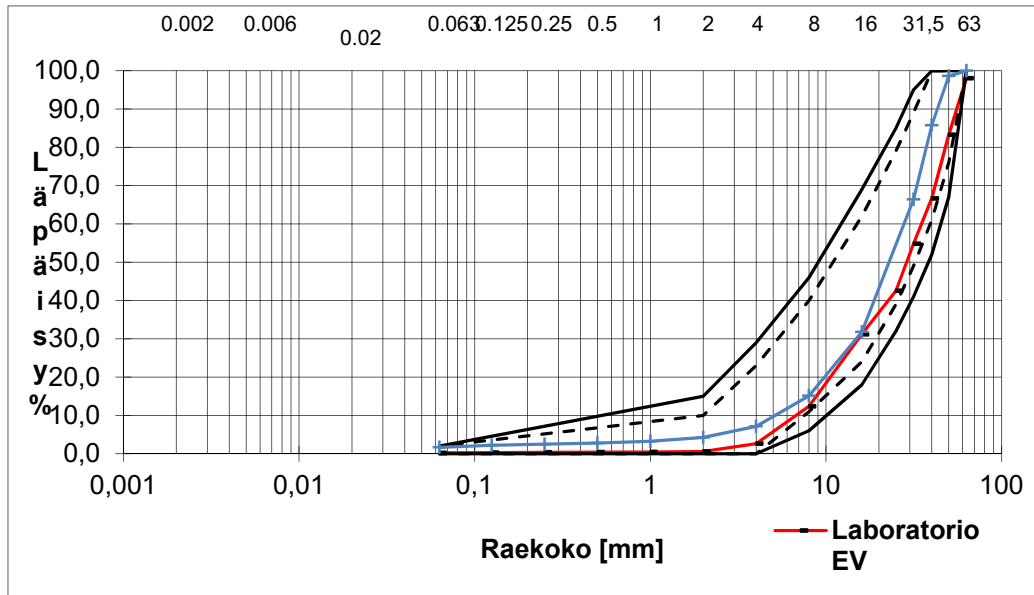
Hipin koekohteessa radan alusrakenne vaihtelee. Pohjoisen puolella olevassa penkereessä (KM 429+495) on Kalliainen et al. (2011) mukaan käytössä perinteinen sorasta tehty alusrakenne, jonka päällä on 0,3 m kalliomurskeesta tehty välikerros sekä 0,55 m raidesepelikerros. Eteläisessä kohteessa (KM 429+370) rakenne on muuten samanlainen, mutta sorakerroksen tilalla on kalliomursketta. Sorarakenteinen penger on näkyvillä kuvassa 6.2 ja kalliomurskerakenne kuvassa 6.3. Kuvassa 6.4 on esitetty Hipin koekohteessa käytetyn kalliomurskeen rakeisuuskäyrä verrattuna laboratoriotesteissä käytettyyn EV-materiaaliin. Rakeisuudet ovat melko lähellä toisiaan, mutta Hipissä käytetyn kalliomurskeen rakeisuusjakauma on hienompi. Koekohteen tarkoitus on ollut selvittää, miten eri materiaaleista tehdyt penkereet poikkeavat toisistaan lämpöteknisesti.



Kuva 6.2 *Hipin sorarakenne rakentamisen jälkeen syksyllä 2009.*



Kuva 6.3 *Hipin kalliomurskerakenne syksyllä 2009.*



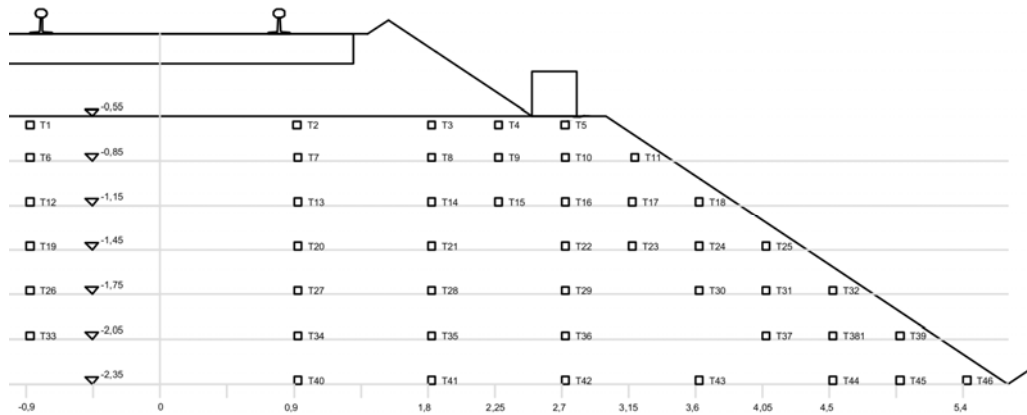
Kuva 6.4 Hipin kohteessa käytetyn kalliomurskeen rakeisuuskäyrä verrattuna laboratoriotesteissä käytettyyn EV-materiaaliin.

Molemmissa penkereissä on asennettuna useita lämpötila-antureita, joiden avulla on tarkoitus arvioida lämmönsiirtymisen eroja. Ratapenkereen routaherkyyden kannalta kiinnostavia asioita ovat eri materiaalien lämmönjohtavuudet, ominaislämpökapasiteetit, mahdollinen konvektiivinen lämmönsiirtyminen sekä muut routimista edistävät asiat. Vedellä on myös merkittävä rooli routimisessa ja lämmönsiirtymisessä, sillä esimerkiksi voimakas sade voi muuttaa penkereen lämpötilannetta. Myöhemmissä tuloksissa on käytössä myös pölkyn korkeusasema, jonka perusteella voidaan tarkastella mahdollista routanousua.

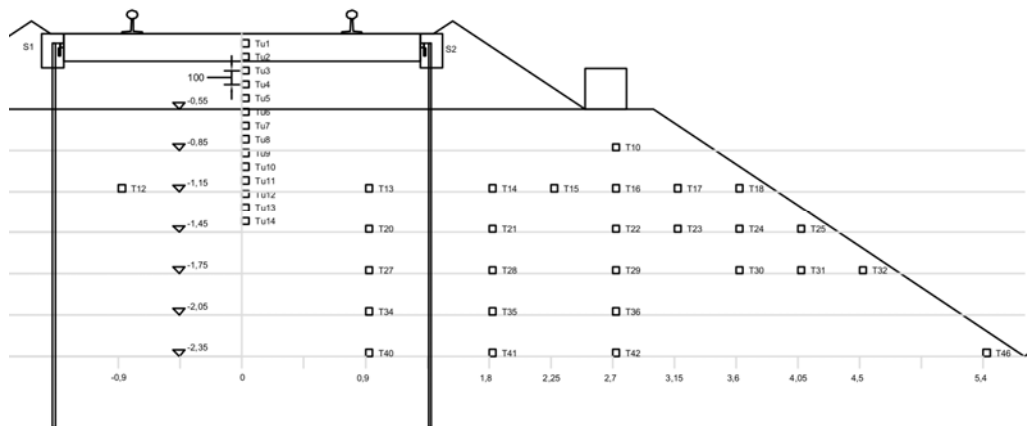
Mittausdataa Hipin kohteesta on kerätty 4.12.2009 lähtien. Selvitys kohteen mittausjärjestelyistä ja anturoinneista on peräisin DI Heikki Luomalalta (TTY). Lämpötilatiedot sekä myöhemmin myös siirtymäantureiden tiedot on tallennettu tunnin välein. Eteläisessä kohteessa on 9.8.2010–12.9.2010 ollut pidempi jakso, jolloin mittaus ei ole toiminut. Mittausongelmia on kohteissa esiintynyt myös muina aikoina, mutta ne ovat olleet lyhyitä häiriöitä. Tukikerros on rakennettu 2011 keväällä, jolloin iso osa antureista hajosi. Uudella raiteella on liikennöity 11.9.–23.10.2011, ja tämän jälkeen on ollut rakennustöistä johtuva tauko. Liikennöinti on jatkunut 13.8.2012 alkaen ja 5.11.2012, molemmat raiteet ovat olleet liikennöitävissä. 2012–2013 oli siis ensimmäinen talvi, jolloin uusi eteläinen raide oli liikenteen käytössä. Aiempina talvina lumi on peittänyt penkereen, jolloin lumitilanne on ollut erilainen liikenteelle oton jälkeiseen talveen verrattuna.

Kohteessa sekä pohjoisen että eteläisen puolen anturointi on muuttunut tukikerroksen rakentamisen jälkeen, sillä sähköratapylväiden perustusten asennuksen yhteydessä suuri osa lämpötila-antureista hajosi. Alkuperäinen anturointi kattoi penkereestä sivusuunnassa yli puolet kuvan 6.5 mukaisesti kummassakin rakenteessa. Pohjoisen sorarakenteessa ylin anturikerros T1-T5 tuhoutui heti mittauksen alussa, joten siltä osin ei ole käytettävissä mittausdataa. 21.12.2011 lähtien rikkoontuneiden antureiden tilalla on ollut osittain uusi anturointi, joka kalliomurskerakenteessa kattaa hyvin sekä tukikerroksen keskilinjan että varsinaisen pengerrakenteen. Eteläisen kalliomurskepenkereen anturointi on esitetty kuvassa 6.6. Pohjoisen sorarakenteisen penkereen anturointi on jouduttu uusimaan kokonaan, jolloin anturit on asennettu

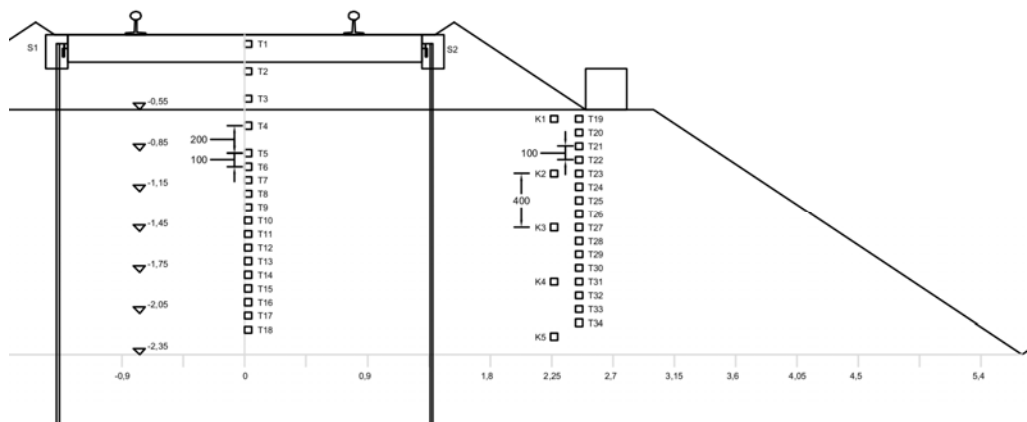
kuvan 6.7 mukaisesti kahteen pystysuoraan linjaan. Myös tukikerroksessa on lämpötila-anturit. Lisäksi ratapölkyn päihin on asennettu siirtymäanturit.



Kuva 6.5 Hipin koekohteiden (km 429+370 ja KM 429+495) lämpötila-anturit 21.12.2011 saakka. Neliöt ovat kuvassa lämpötila-antureita.



Kuva 6.6 Eteläisen kalliomurskekohteen uusi anturointi 21.12.2011 alkaen. Tu1-Tu14 ovat uusia lämpötila-antureita ja S1 sekä S2 siirtymäantureita pölkyn päässä.

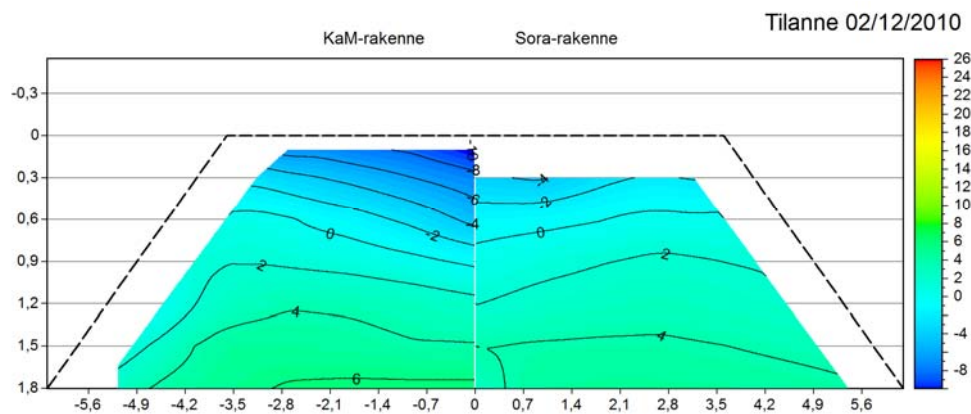


Kuva 6.7 Pohjoisen sorarakenteisen penkereen uusi anturointi 21.12.2011 alkaen. Kaikki lämpötila-anturit ovat uusia, ja ne on asennettu kahteen pystysuoraan linjaan.

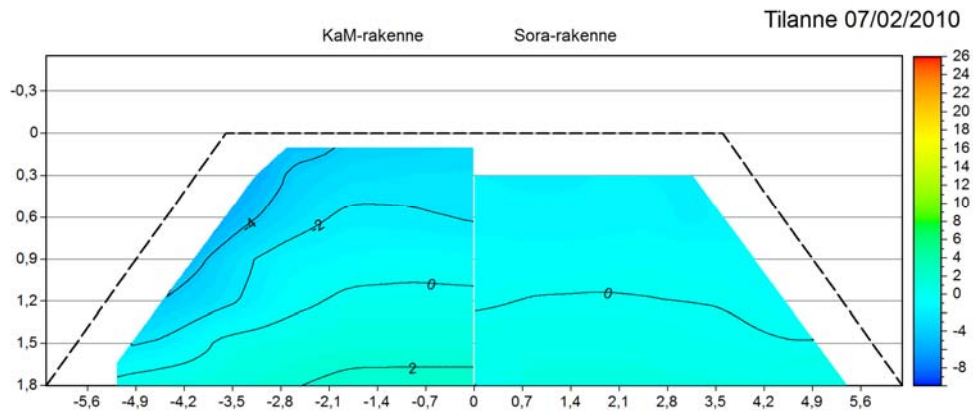
6.2 Koekohteen mittaustulokset

Hipin koeperenkereiden mittaustulosten avulla on pyritty löytämään tietoa siitä, eroaako kalliomurskeesta rakennettu ratapenger olennaisesti sorarakenteisesta penkereestä. Mittaustuloksia analysoidessa on kiinnitetty erityistä huomiota siihen, voisivatko mahdolliset penkereiden käyttäytymisen erot selittyä konvektiivisella lämmönsiirtymisellä. Ensimmäiseksi on syytä tarkastella penkereiden lämpötilajakaumia ja niiden eroja. Mittaustulosten käsittely on tehty Flexpro-ohjelmistolla, ja penkereen lämpötilat on esitetty liukuvärikuvaajan avulla joihin on piirretty isotermit. On syytä ottaa huomioon, että käsittelyssä on jouduttu tekemään joitakin approksimaatioita antureiden sijainnin suhteen, jolloin pieniä epätarkkuuksia voi mahdollisesti esiintyä, koska anturit eivät kata jokaista kohtaa poikkileikkauksessa. Kuvaan on piirretty myös karkeasti ratapenger ja tukikerros tilanteiden havainnollistamisen takia. Leveysmitat ja kaltevuudet ovat suuntaa antavia.

Lämpötilajakaumaa esittävät kuvat on tehty penkereistä päivittäin kello 14.00 olevan tilanteen mukaan. Kuvien perusteella penkereiden lämpötilojen käyttäytyminen näyttää vaihtelevan muutamissa tilanteissa niin, että erot ovat suhteellisen selvästi havaittavissa. Konvektioteorian kannalta kiinnostava tilanne on silloin, kun ulkolämpötila laskee nopeasti ja ratapenger on vielä lämmin. Tällöin painovoimainen konvektio on periaatteessa mahdollinen. Kuvassa 6.8 on nähtävissä konvektion kannalta otollinen tilanne, sillä penkereen yläpinta on lähes -10°C lämpötilassa ja ratapenger on vielä lämmin. Kuvan perusteella kalliomurskeesta rakennettu ratapenger on jäähtynyt yläosastaan ja reunoilta nopeammin ja syvemmältä verrattuna sorarakenteeseen mutta alaosa hitaammin. Vastaava ilmiö hieman eri tavalla näkyy myös kuvassa 6.9, jossa kalliomurskerakenteessa on suuremmat lämpötilaerot verrattuna sorarakenteeseen, jonka lämpötila on suhteellisen tasainen.

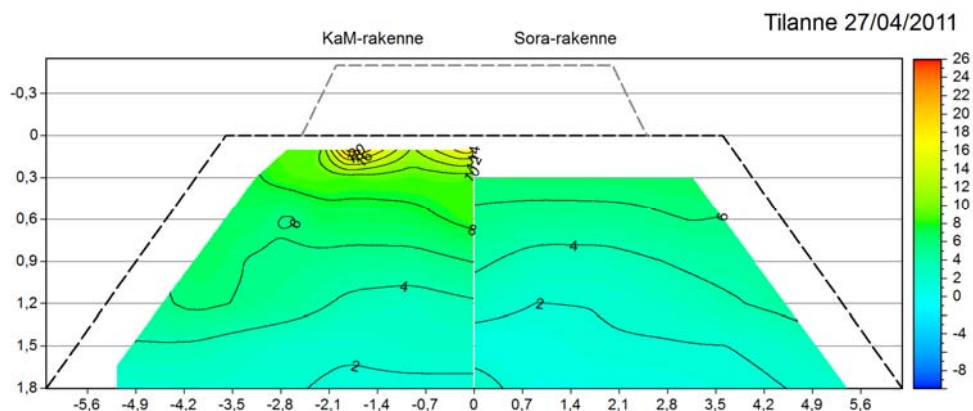


Kuva 6.8 Lämpötilat penkereissä 2.12.2010. Kalliomurskepenkereen yläpinta ja reunaosat ovat jäähtyneet selkeästi sorarakennetta nopeammin mutta alaosa hitaammin. Tukikerrosta ei ole vielä rakennettu.

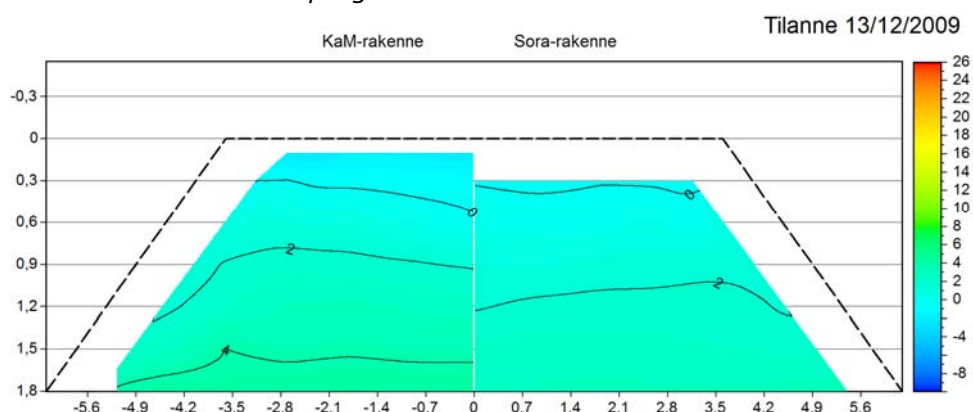


Kuva 6.9 *Lämpötilat penkereissä 7.2.2010. Kalliomurskepenkereen reunan lämpötilat poikkeavat selkeästi sorarakenteesta. Sorarakenne on kokonaisuudessaan melko tasalämpöinen verrattuna kalliomurskerakenteeseen.*

Toinen mielenkiintoinen tarkasteluajankohta tuloksien perusteella näyttää olevan kesä, sillä silloin kalliomurskerakenne lämpenee nopeammin (kuva 6.10) verrattuna sorarakenteeseen. Erot ovat kuvassa varsin selkeät, sillä esimerkiksi $+4^{\circ}\text{C}$ isotermi on kalliomurskeessa keskimäärin noin 0,3-0,4 m syvemmällä. Tuloksista on löydettävissä myös ajankohta, jolloin kalliomurskepenkereen pohja on selkeästi sorarakennetta lämpimämpi (kuva 6.11).



Kuva 6.10 *Lämpötilat penkereissä 27.4.2011. Kalliomurskepenkeren on lämmennyt yläosasta, reunoilta ja myös sisäosiltaan nopeammin kuin sorarakenteinen ratapenger.*

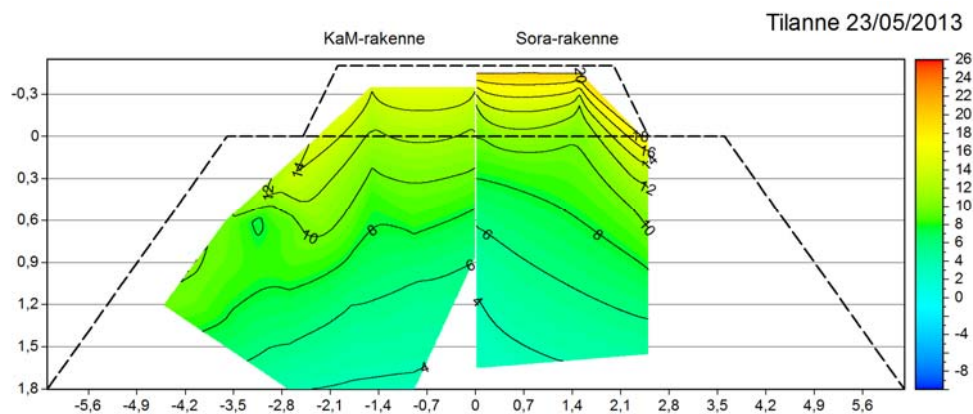


Kuva 6.11 *Lämpötilat penkereissä 13.12.2009. Kalliomurskeesta rakennettu ratapenger on syvältä lämpimämpi kuin sorapenger.*

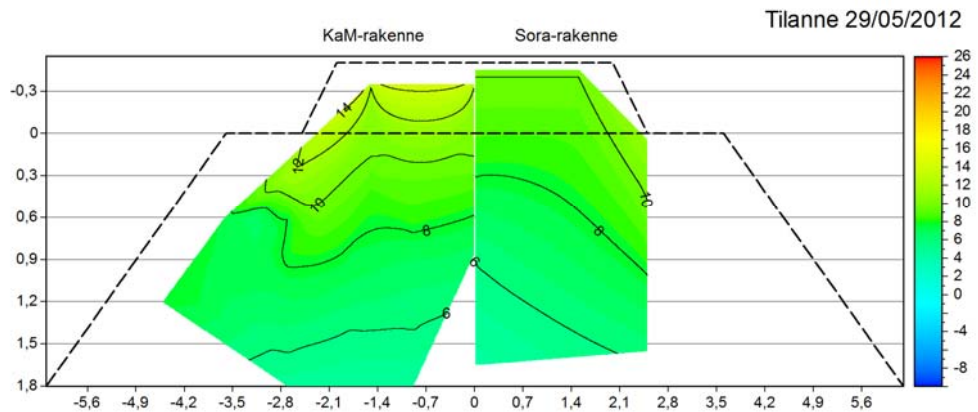
Vuosien 2009 ja 2011 väliseltä ajalta piirretyissä kuvissa on havaittavissa selkeiden tapausten lisäksi myös runsaasti pientä vaihtelua, joka näkyy tarkasteltaessa kuvia päivä kerrallaan. Pienet vaihtelut ovat todennäköisesti luonnollisia ja saattavat osittain johtua myös mittaustarkkuudesta, sillä penkereen ollessa lämpötilaltaan melko tasainen, anturien kalibrointi voi aiheuttaa pieniä eroja. On hyvä huomata, että tällä tarkasteluvälillä penkereen päällä on talvisin ollut lumipeite eikä liikennettä ole myöskään voinut olla, sillä tukikerros on rakennettu vasta 2011 keväällä.

Loppuvuodesta 2011 vuoteen 2013 laaditut kuvat ovat aiempia vuosia epätarkempia, sillä anturoinnin rakenne on muuttunut luvussa 6.1 mainitulla tavalla. Kuvaajien piirtämisessä on anturitietoja jouduttu kopioimaan, jotta liukuvärikuvaajan piirtäminen olisi mahdollista. Tukikerroksen sivuosissa ei siis ole ollut antureita, vaan siinä on käytetty samalla korkeudella keskeemmällä pengertä olevan anturin mittaustietoa. Uudemmat anturit kattavat myös aiempaa pienemmän alueen penkereen sivusuunnassa, mikä joka näkyy erityisesti sorarakenteessa.

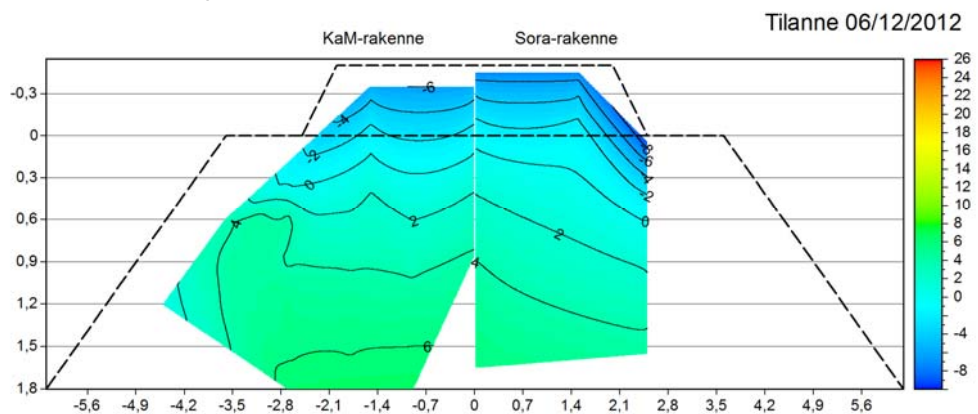
Keväällä 2012 uudella anturoinnilla on havaittavissa sama tilanne kuin aiemmin keuhällä/kevällä ulkolämpötilan noustessa, sillä kalliomurskerakenteinen ratapenger vaikuttaa lämpenevän nopeammin ja syvemältä verrattuna sorarakenteiseen penkereeseen (kuvat 6.12 ja 6.13). Talvi 2012–2013 on ensimmäinen talvi, jolloin uudella raiteella on ollut liikennettä. Tällöin lumipeite on ollut ohuempi ja penkereen pinnan pitäisi teoriassa jäähtyä nopeammin. 6.12.2012 penkereiden välillä ei ole juuri eroa (kuva 6.14), mutta 25.1.2013 (kuva 6.15) on kalliomurskerakenne yläpinnastaan selkeästi kylmempi. Penkereiden alaosassa, esimerkiksi 1,5 m syvyydessä ero ei kuitenkaan ole tuloksissa havaittavissa.



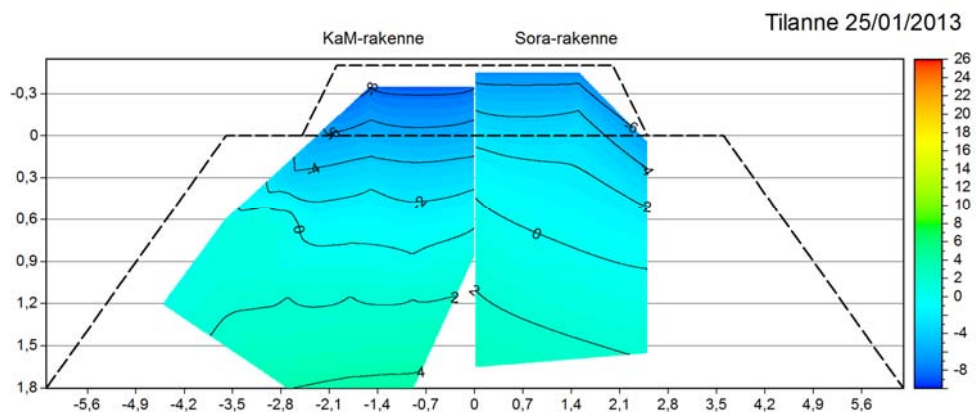
Kuva 6.12 Lämpötilat penkereissä 23.5.2013. Kalliomurske lämpenee keuhällä nopeammin.



Kuva 6.13 Lämpötilat penkereissä 29.5.2012. Kalliomurskeesta rakennettu rata-penger on lämmennyt myös keväällä 2012 nopeammin verrattuna sorapengereseen.

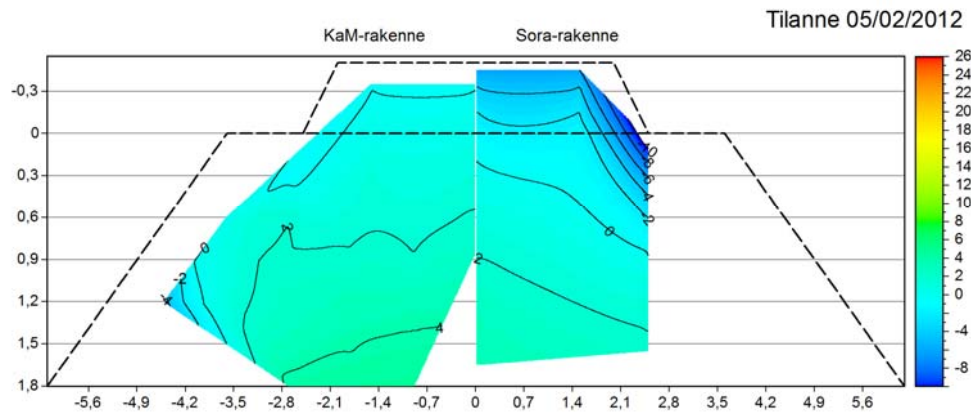


Kuva 6.14 Lämpötilat penkereissä 6.12.2012. Kalliomurskerakenne on alaosastaan ja reunoistaan lämpimämpi verrattuna sorarakenteeseen.



Kuva 6.15. Lämpötilat penkereissä 25.1.2013. Kalliomurskerakenne on alaosistaan sorarakennetta lämpimämpi mutta yläosistaan kylmempi.

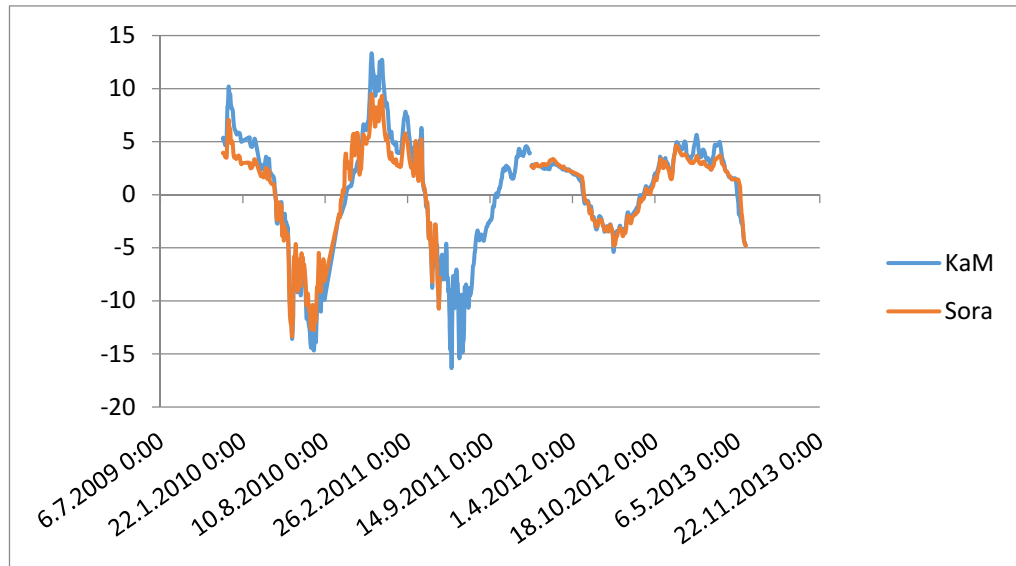
Aiemmissä tilanteissa on ollut havaittavissa, että kalliomurskerakenne lämpenee tai kylmenee nopeammin mutta vain pinta- ja reunaosistaan. 5.2.2012 (kuva 6.16) sorarakenteen reunassa on yllättävän suuret lämpötilaerot.



Kuva 6.16. Lämpötilat penkereissä 5.2.2012. Kalliomurskepenkereen keskiosan lämpötila on selvästi kohonnut, mutta reunaosien alentunut. Sorarakenteessa muutokset ovat pääasiassa pintaosissa.

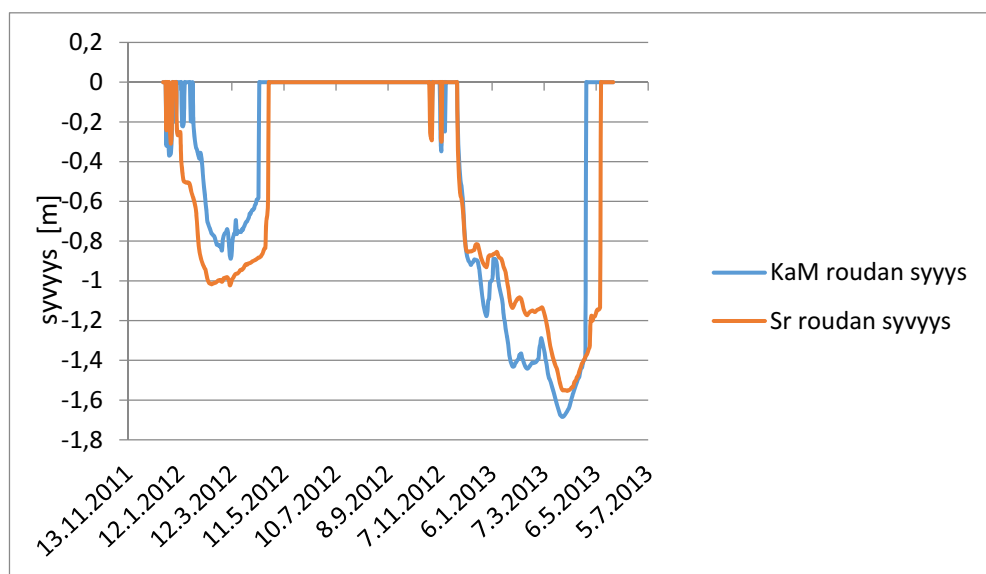
Rayleighin luvun laskentakaavan mukaan rakenteen ylä- ja alapinnan välisellä lämpötilaerolla on suuri merkitys konvektion mahdollisuuteen. Kuvassa 6.17 on esitetty Hipin koekohteesta lämpötilaerot vuosilta 2009–2011 antureiden T40 ja T7 väliltä. Etäisyys näiden antureiden välillä korkeussuunnassa on noin 1,5 m. Syksyllä 2011 sorarakenteesta rakennustöiden yhteydessä rikkoutui lämpötila-antureita, jonka takia erotus on kuvaajassa tuolloin nolla. Joulukuussa 2011 on otettu käyttöön uusi anturointi, jonka perusteella on piirretty kuvaajan loppupuoli. Tällöin sorarakenteessa on ollut käytössä erotus T17-T5 (korkeusero noin 1,2 m) ja kalliomurskerakenteessa T34-Tu9 (korkeusero noin 1,2 m). Anturit on pyritty valitsemaan niin, että ne olisivat molemmissa penkereissä vastaavissa paikoissa. Anturoinnin muuttumisen takia kalliomurskerakenteessa T34 poikkeaa sivusuunnassa uudesta anturilinjasta noin 0,9 m, sillä syvemmällä olevat anturit eivät ole penkereen keskilinjalla.

Kuvassa 6.17 näkyvät lämpötilaerot ovat positiivisia, kun yläpinnan lämpötila on pienempi kuin alapinnan lämpötila. Näyttää siltä, että kalliomurskerakenteessa lämpötilaerot ovat jonkin verran suurempia verrattuna sorarakenteeseen. Esimerkiksi alkuvuodesta 2010 sorarakenteessa on ollut noin 7 °C lämpötilaero, kun taas kalliomurskerakenteessa vastaava lämpötilaero on ollut hieman yli 10 °C. Erot ovat vielä suuremmat loppuvuodesta, jolloin ero sorarakenteessa on ollut n. 9,5 °C ja kalliomurskerakenteessa 13,3 °C. Jos lämpötilaerot muutetaan lämpötilagradienteiksi metriä kohden, kalliomurskerakenteessa on ollut 2009–2011 enimmillään hieman vajaan 9 °C/m lämpötilagradientti. Myös talvena 2012–2013 kalliomurskerakenteessa lämpötilaerot ovat olleet suurempia verrattuna sorarakenteeseen. Lämpötilagradientti kalliomurskerakenteessa vuoden 2011 jälkeen on ollut kuitenkin enimmillään vain noin 4,5 °C. Tulokset eivät ole aiempien vuosien kanssa täysin vertailukelpoisia, sillä tukikerroksen rakentaminen ja anturoinnin muutos muuttivat olosuhteita oleellisesti.



Kuva 6.17 Lämpötilaero antureiden T40 ja T7 välillä vuoteen 2011 saakka ja sen jälkeen kalliomurskerakenteessa T34 ja Tu9 ja sorarakenteessa T17 ja T5 välillä. Syksyllä 2009 sorarakenteen anturit rikkoutuivat rakennustöiden takia. Lämpötilaerot eivät ole vanhan ja uuden anturoinnin välillä suoraan verrattavissa, sillä syvyydet ovat erilaiset.

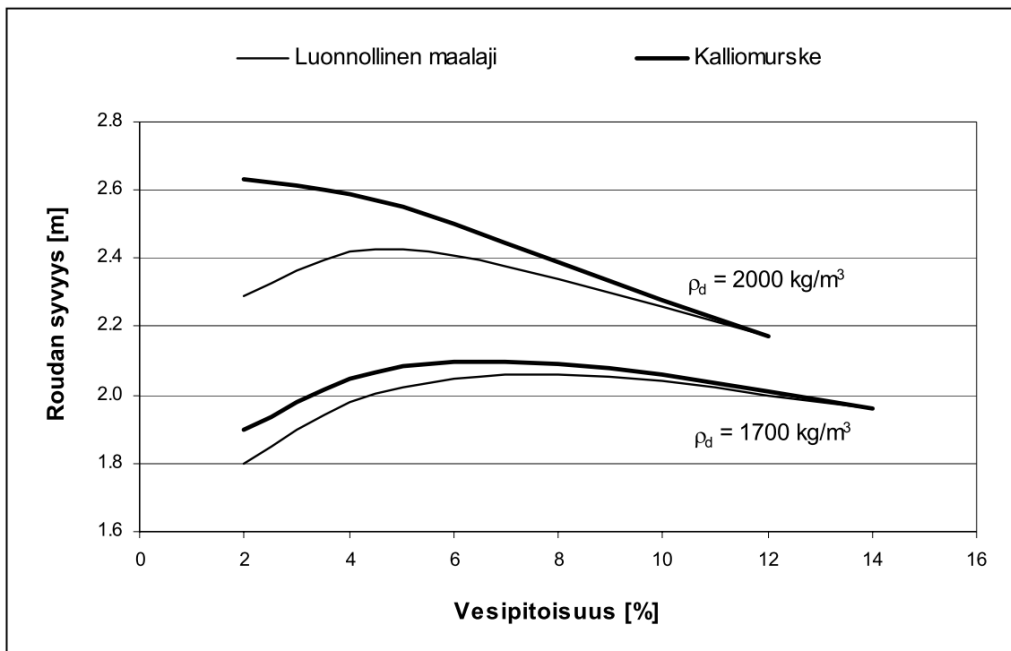
Hipin koekohteiden lämpötila-antureiden perusteella on myös mahdollista arvioida roudan syvyyttä sen perusteella, milloin kerroksen lämpötila-antureiden lukema menee nollan alapuolelle. Kuvassa 6.18 on esitetty roudan syvyys kuvaajan avulla. Mielenkintoista on, että 2011–2012 talvena sorarakenne on jäähtynyt noin 0,2 metriä syvemmältä verrattuna kalliomurskerakenteeseen. Talvena 2012–2013 tilanne on päinvastainen, sillä kalliomurskerakenteessa routa on mennyt sorarakennetta syvemmälle. Pahimmillaan ero on ollut yli 0,2 m mutta ero on kuitenkin tasoittunut kevään mittaan. Sulamishetki näkyy kuvassa osittain yksinkertaistettuna, sillä roudan syvyys putoaa nolnaan, kun rakenteen pinta on sulanut. Todellisuudessa rakenne on vielä tällöin syvemmältä pakkasen puolella.



Kuva 6.18 Lämpötilan 0-tason syvyys Hipin koekohteessa. Sulamishetkellä syvyys menee suoraan nolnaan, kun pinnan antureiden lämpötila on noussut nollan yläpuolelle.

6.3 Johtopäätökset ja analysointi

Hipin koepenkereiden lämpötilatietojen perusteella näyttää siltä, että merkittävää luonnollista konvektiota ei ole esiintynyt tarkasteluvuosien aikana. Lämpötilajakaumia tarkasteltaessa on havaittavissa, että kalliomurskerakenne näyttää reagoivan nopeammin lämpötilamuutoksiin sorarakenteeseen verrattuna. Talvella nopeampi jäähtyminen voisi selittyä konvektiolla, mutta toisaalta sama ilmiö näkyy myös keväällä ja kesällä. Mikäli yläpinta on lämpimämpi verrattuna alapintaan, ilman tai vesihöyryn painovoimaista konvektiota ei voi rakenteen sisällä tapahtua. Tilanne ei ole kuitenkaan täysin selvä, sillä jos auringon säteily lämmittää penkereen yläpintaa voimakkaasti, ilma alkaa todennäköisesti kohota painovoimaisen konvektion avulla ylöspäin voimakkaasti lämpenevien kivien välistä. Tällöin osa ilmasta voi mahdollisesti imeytyä penkereestä, jolloin ilmaa saattaa kuitenkin kiertää rakenteen yläosissa. On syytä kuitenkin muistaa, että vajoavien sade- ja sulamisveden mukana kulkeutuu lämpöä (pakotettu konvektio), jolloin materiaalien vedenläpäisevyys vaikuttaa lämpötekniseen käytökseen. Toisaalta nopeampi reagointi lämpötilamuutoksiin voisi selittyä esimerkiksi materiaalien erilaisilla ominaislämpökapasiteeteilla tai rakenteen erilaisella vedenläpäisevyydellä. Veden ominaislämpökapasiteetti on suuri, joten vesipitoisuudella lienee paljon merkitystä. Tätä tukee myös kuvassa 6.19 esitetty roudan syvyyden muutos vesipitoisuuden funktiona. Vesipitoisuudella on myös oletettavasti vaikutusta penkereessä mahdollisesti tapahtuvaan vesihöyryn diffuusioon, jossa kosteus nousee rakenteessa ylöspäin ja tiivistyy. Tällöin lämpöä voi siirtyä huomattavia määriä. Sorarakenteessa oli 5.12.2012 penkereen reunassa näkyvissä suuret lämpötilaerot, mutta tämä voi olla selitettävissä myös sorarakenteessa olevalla murskerakenteisella välikerroksella. Välikerros on 0,3 m paksuinen ja lämpötilaeroja on eniten tällä alueella.



Kuva 6.19 Materiaalin vesipitoisuuden ja kuivairtitiheyden vaikutus roudan syvyyteen Tampereen ilmasto-olosuhteissa. (Nurmikolu 2004)

Roudan syvyydestarkastelu koekohteesta osoittautui varsin mielenkiintoiseksi, sillä talvena 2011–2012 sorarakenteen jäähdytys syvemmältä verrattuna kalliomurskerakenteeseen ja 2012–2013 talvena tilanne oli päinvastainen. 2012–2013 on ollut ensimmäinen talvi, kun uusi raide on ollut käytössä, joten erilainen lumitilanne voisi selittää merkittävää eroa. Suljettu ja avoin pinta vaikuttaa myös luonnollisen konvektion mahdollisuuteen. Goeringin (1998) testien perusteella tiivistetty lumi rakenteen pinnassa ei kuitenkaan osoittautunut konvektion kannalta yhtä tiiviiksi kuin muovikalvo. Tämän perusteella lumipeitteistä pengertä ei voida pitää koekohteessa täysin suljettuna rakenteena, mutta lumipeite voi kuitenkin mahdollisesti suurentaa kriittistä Rayleighin lukua. Lumipeite myös pienentää lämpötilagradienttia, mutta se ei ole silti estänyt sorarakenteen jäähtymistä. Mielenkiintoinen näkökulma on myös liikkuvan kaluston aiheuttama ilmavirta, jolloin lämpöä voisi siirtyä osittain pakotettuna konvektiona. Vaikutus voi ulottua ainakin tukikerroksen syvyydelle, sillä raidesepeli osoittautui myös laboratoriotutkimuksissa herkäksi luontaiselle konvektiolle. Periaatteessa pinnassa tapahtuva pakotettu konvektio voisi myös jäähdyttää rakenteen pintaa nopeammin lähelle ulkolämpötilaa niin, että luonnollinen konvektio mahdollistuisi lämpötilagradientin suurentuessa.

Kahden eri syvyydellä olevan lämpötila-anturin lukemien vertaaminen eri rakenteissa oli konvektiotutkimuksen kannalta luonteva vaihtoehto, sillä niiden avulla voidaan selvittää rakenteessa vaikuttava lämpötilagradientti. Tulosten perusteella kalliomurskerakenteessa esiintyy selvästi suurempia lämpötilaeroja verrattuna sorarakenteeseen. Kalliomurskerakenteessa lämpötilagradientti metriä kohden oli enimmillään hieman alle 9 °C. Laboratoriotutkimusten perusteella raidesepelissä tämä ero riittäisi luontaisen konvektion alkamiseen, mutta eristys-välikerrosmateriaalin kohdalla tilanne on erilainen. Lisäksi on syytä huomata, että lämpötilaerojen vertailua varten valitut lämpötila-anturit eivät olleet pahimmat mahdolliset, sillä jos ylempänä anturina käytettäisiin tukikerroksessa olevaa anturia, erot olisivat erot huomattavasti suuremmat. Toisaalta ratapengerrakenteessa liikkuva ilma on todennäköisesti huomattavasti kosteampaa verrattuna laboratorio-olosuhteissa tehtyihin tutkimuksiin.

Laboratoriossa tehtyjen tutkimusten perusteella kalliomurskeesta valmistettu EV-materiaali osoittautui melko herkäksi lajittumaan ainakin silloin, kun se oli lähellä rakeisuuskäyrän karkeaa päätä. Mikäli materiaali pääsee riittävästi lajittumaan, penkereeseen voisi mahdollisesti tulla konvektiosoluja, joissa konvektiota tapahtuu paikallisesti. Koekohteen rakentamisen yhteydessä on myös havaittu lajittumista (6.20). Koekohteessa laadunvalvonta on myös ollut todennäköisesti hyvin tarkkaa, joten toisessa kohteessa voi kalliomurskeesta esiintyä kenties enemmän vaihtelua.



Kuva 6.20 Koepenkereiden rakentamisen yhteydessä kalliomurske havaittiin helposti lajittuvaksi. (Kalliainen et al. 2011)

Tulosten perusteella kalliomurskerakenteen ja sorarakenteen käyttäytymisessä on selvästi havaittavissa olevia eroja. Penkereiden erilainen ominaislämpökapasiteetti on todennäköisesti yksi selittävästä asioista, mutta luonnollisen konvektion mahdollisuutta ei voida sulkea täysin pois. Lisäksi ratapenkereissä sade- ja sulamisvesien mukana kulkeutuvalla lämmöllä on merkitystä. Kalliomurskerakenne näyttää lämpötilajakaumia tarkasteltaessa myös pysyvän keskeltä alhaalta lämpimämpänä kuin vastaava sorarakenne, mille ei tämän työn puitteissa löydetty varmaa selitystä. Mikäli konvektiota tapahtuisi, lämpöä siirtyisi penkereen yläosiin niin kauan, kun alaosaa pysyy merkittävästi lämpimämpänä. Tätä teoriaa luonnollisesta konvektiosta tukee myös 2011–2012 talvena esiintynyt kalliomurskerakenteen hitaampi jäähtyminen. Talvena 2012–2013 lumipeite on ollut todennäköisesti pienempi, jolloin on mahdollista, että kaikki penkereeseen varastoitunut lämpö siirtyi ulkopuolelle ja ratapenger jäähtyi syvemmältä kuin aiemmin. Havaittujen tuloksien perusteella rakenteiden välisiä eroja olisi syytä tarkastella maastokohteissa lisää siten, että koko penkereen alueella olisi leveyssuunnassa enemmän antureita ja poikkileikkauksia olisi muutaman metrin välein. Tämänhetkisten tulosten ongelma on, että anturointi on muuttunut kesken koesarjan eikä antureita ole riittävästi. Joka tapauksessa on selvää, että vesipitoisuus ja erilainen ominaislämpökapasiteetti ovat selvästi havaittavissa tuloksista.

7 Loppupäätelmät

7.1 Yhteenveto tuloksista

Laboratoriokokeiden tulokset ovat mielenkiintoisia, sillä ne osoittavat todeksi sen, että luonnollinen konvektio voi muuttaa merkittävästi karkean materiaalin lämmönjohtavuutta. Raidesepeli osoittautui herkäksi konvektiolle jo pienillä lämpötilaeroilla kuivan ilman toimiessa välittäjäaineena, mutta 5/16 mm kalliomurskeella ja EV-materiaalilla vastaavaa ilmiötä ei todettu. Liikkuvalla väliaineella havaittiin kuitenkin suuri merkitys, sillä veden lisäys muutti materiaalien lämpötekniestä käyttäytymistä. Suurin vaikutus vesihöyryllä oli raidesepelissä, mutta myös EV-materiaalissa alkoi tapahtua selvää konvektiivista lämmönsiirtymistä. Konvektion lisäksi vesihöyryn diffuusio voi olla merkittävä tekijä, sillä liikkuvan vesihöyryn mukana kulkeutuu lämpöä. Diffuusion yhteydessä lämmönsiirtymistä voi lisätä myös mahdollinen veden olomuodonmuutos.

On syytä huomata, että testit tehtiin metrin paksuisella kerroksella. Jos kerros-paksuus kaksinkertaistetaan, kriittinen lämpötilaero pienenee puoleen alkuperäisestä. Tuloksia tarkastellessa on kuitenkin muistettava, että Hipin koekohteessa tarkasteluajanjaksolla (luku 6.2) esiintyi noin 9 °C/m lämpötilagradientti, joka antaa viitteitä siihen, ettei penkereessä esiinny yhtä suuria lämpötilaeroja kuin testeissä on käytetty. Lämpötilagradientin määrittäminen on kuitenkin hankalaa, sillä gradientti vaihtelee syvyyden mukaan. Lähellä pintaa lämpötilagradientti voi olla hyvinkin suuri. Myös kriittinen Rayleighin luku vaikuttaa kriittisiin lämpötilaeroihin, sillä testeissä materiaalien rajapinnat ovat olleet käytännössä suljettuja. Kun yläpinta on avoin, on konvektio mahdollinen pienemmällä Rayleighin luvulla.

Mitatut lämmönjohtavuudet ilman konvektiota ($0,36\text{...}0,41\text{ W/mK}$) ovat yllättävän kaukana laskelmissa tukikerrokselle yleisesti käytetystä $1,1\text{ W/mK}$ arvosta. Tätä selittää osittain kuitenkin näytteiden vesipitoisuus, sillä lämmönjohtavuudet ilman konvektiota on mitattu kuivasta näytteestä. Kostean näytteen lämmönjohtavuuden mitaus ilman konvektiota ei ollut mahdollista, sillä materiaalit olivat hyvin karkearakeisia ja vesi olisi valunut nopeasti pohja-altaaseen. Laskennassa käytettävä arvo on kuitenkin perusteltavissa erilaisilla olosuhteilla ja maa-aineksen heterogeenisuudella. On huomattava, että 5/16 mm kalliomurskeen sekä EV-materiaalin konvektiotestien tehollinen lämmönjohtavuus ei myöskään testiolosuhteissa merkittävästi ylittänyt $1,1\text{ W/mK}$ arvoa, vaikka käytetyt lämpötilaerot olivat suuria.

Tutkimuksessa tehdyt laboratoriokokeet eivät täysin vastaa todellista tilannetta maastossa, sillä 1 m^3 kokoinen laatikko sisältää useita rajapintoja, joita ei ole olemassa ratapenkereessä. Nämä rajapinnat voivat muuttaa konvektion käytöstä. Suurin osa laboratoriokokeista tehtiin sulkemalla näyte tiiviin koelaitteiston sisälle. Todennäköisesti myös tilanne, jossa ylälaattaa nostettiin 50 mm, vastasi todellisuudessa suljettua tilannetta. Luonnossa yläpinta on täysin avoin ja alttiina tuulen vaikutukselle. Testien perusteella on myös osittain syytä epäillä, että kun väliaine lähtee materiaalissa kiertämään, jatkaa se kiertoaan myös pienemmällä lämpötiloilla. Tämä on toisaalta loogista, sillä aineen ollessa lepotilassa liikettä vastustavat voimat ovat suurempia verrattuna liiketilään. Tässä yhteydessä on myös syytä ottaa huomioon junat, jotka nykyisillä ajonopeuksilla aiheuttavat suurehkoja ilmavirtoja.

Laskennallisen analyysin ja tulosten perusteella näyttää myös siltä, että konvektion mahdollisuuden arviointi materiaalissa edellyttää sisäisen läpäisevyyden selvittämistä tai erillistä testausta. Materiaalin huokoisuuden käyttäminen arvioinnissa osoittautui mahdottomaksi, sillä 5/16 mm kalliomurske ja raidesepeleli olivat huokoisuudeltaan hyvin lähellä toisiaan, mutta materiaalit käyttäytyivät teisteissä lämpövirtauksen suhteen eri tavalla. Tällöin ongelmallinen vedenläpäisevyyden mittausta tai sen arviointi on edelleen ainoa mahdollisuus selvittää laskennallisesti konvektion mahdollisuutta.

Hipin koekohteen tuloksista voidaan päätellä, että kalliomurskepenkereen ja sora-
penkereen välillä on selvästi havaittavia lämpöteknisiä eroja. Tulokset on todennäköisesti selitettävissä materiaalin erilaisen ominaislämpökapasiteetin ja vesipitoisuuden vaikutuksesta. Eroja aiheuttanee myös sade-sulamisvesien aiheuttama konvektiivinen lämmönsiirtyminen. Myöskään huokosilmassa tapahtuvaa luonnollista konvektiota tai diffuusiota ei voida varmuudella sulkea pois.

7.2 Kehitysehdotuksia tulosten perusteella

Testattujen materiaalien tulosten perusteella on todennäköistä, että nykyisin käytetty raidesepeleli mahdollistaa merkittävän konvektiivisen lämmönsiirtymisen. Jo pienillä lämpötilaeroilla tehollinen lämmönjohtavuus oli yli kaksinkertainen johtumistilanteeseen verrattuna. Tukikerroksen paksuus on kuitenkin vain 0,55 m, joten eristysvälikerrosmateriaali on penkereen lämpöteknisen käyttäytymisen kannalta oleellisempi materiaali. Nykyisin käytettävän EV-materiaalin raekokojakauman karkean puolen raja-arvot näyttävät olevan melko lähellä konvektiivisen lämmönsiirtymisen rajaa. Jos eristysvälikerrosmateriaalin rakeisuuskäyrän karkearakeisen puolen raja-arvojen muuttamiselle ei ole muita esteitä, lienee järkevää käyttää jonkin verran hienompaa tai sekarakeisempaa materiaalia. Tämä ei yksinään riitä, sillä karkearakeinen EV-materiaali on herkästi lajittuvaa, jolloin työmaalla on syytä kiinnittää huomiota EV-materiaalin säilömiseen ja levittämiseen. Nykyistä karkeampaa materiaalia ei kuitenkaan radan alusrakenteessa tule käyttää ilman mukana olevaa hienorakeisempaa ainesta. Myöskään pengerpaksuuksia ei tule kasvattaa käyttäen karkeaa materiaalia, sillä tällöin konvektion mahdollisuus lisääntyy.

Konvektiivinen lämmönsiirtyminen vaatii toimiakseen riittävän suuren yhtenäisen kerroksen. Yksi vaihtoehto estää konvektiota on estää väliaineen liikkuminen. Paksu suodatinkangas voi olla riittävä este, jolloin väliaine ei pääse kulkemaan sen läpi riittävän nopeasti. Toinen vaihtoehto on pienentää lämpötilaeroa routalevyjen avulla. Lisäksi routalevy voi oikeaan paikkaan sijoitettuna jakaa konvektiolle alttiin kerroksen kahteen osuuteen, jolloin sekä kriittinen korkeus että lämpötilagradientti kerrosta kohti pienenevät. Myös pinnan peittämistä ja suojaamista pakotetulta konvektioltta voi olla syytä testata ongelmallisessa routakohteessa.

7.3 Jatkotutkimustarpeet

Konvektio on kokonaisuudessaan monimutkainen ilmiö, josta on tässä työssä tutkittu vain luonnollisen konvektion osuutta. On todennäköistä, että pakotettu konvektio liittyy ratapenkereillä myös luonnolliseen konvektioon, sillä se voi mahdollisesti edesauttaa väliaineen lähtemistä liikkeelle. Pakotettua konvektiota voi ratapenkereellä aiheuttaa esimerkiksi tuuli ja kovalla nopeudella liikkuvat junat. Pakotetun konvektion vaikutusta karkearakenteisten ratapenkereiden lämpötiloihin ja lämmön siirtymiseen on syytä tutkia enemmän. Tätä tukee Johansenin (1975) havainnot pakotetun konvektion voimakkaasta vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen. Myös veden liikkumisen aiheuttamaa konvektiivista lämmönsiirtymistä voi olla järkevää tarkastella.

Työn yhteydessä tuli esille kysymys siitä, voiko ratapenkereessä tapahtua vesihöyryn diffuusiota, ja sen yhteydessä mahdollisesti esiintyvää olomuodonmuutoslämpöä. Periaatteessa eri lämpötiloista aiheutuvat erot höyryntiheydessä voivat saada aikaan diffuusiota, jolloin kylmällä alueella tiivistyvä vesihöyry voi siirtää yllättävän paljon lämpöä. Tämän perusteella vesihöyryn diffuusion mahdollisuutta on syytä tutkia lisää, sillä se voisi selittää esimerkiksi 5/16 mm kalliomurskenäytteen kosteassa tilassa kasvaneen lämmönjohtavuuden.

Työssä käsitellyn Hipin koekohteiden tulosten analysointi osoittautui jossain määrin ongelmalliseksi vähäisten lämpötila-antureiden takia. Luonnollista konvektiota todellisessa ratapenkereessä on syytä tutkia enemmän. Samassa yhteydessä on järkevää mitata, millaisia painevaihteluita liikkuva juna aiheuttaa tukikerroksessa sekä EV-kerroksen pinnassa. Tarkasteluissa on syytä ottaa huomioon myös vallitsevat sääolosuhteet, jolloin tuulen vaikutusta voidaan selvittää.

Laboratoriotutkimukset kattoivat vain kolme erilaista materiaalia. Tämän työn osalta jäi testaamatta, miten esimerkiksi konvektiolle herkkä raidesepeli vaikuttaa sen alla olevaan materiaaliin. Ilmiö on kiinnostava erityisesti silloin, kun karkean yläpinnan alla on materiaalia, joka voi olla lähellä konvektion rajaa. Konvektion estäminen voi tapahtua monella tavalla, mutta routalevyjen, suodatinkankaan ja pinnan peittämisen vaikutusta konvektioon on syytä selvittää enemmän, sillä niiden käytöllä voidaan mahdollisesti korjata ongelmallisia alueita. Lisäksi kostean tilan konvektio ja sen arviointi on tärkeää.

Lähteet

Bear, J. 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media. American Elsevier Pub Co., New York.

Côté, J., Fillion, M-H., Konrad, J-M. 2011. Intrinsic permeability of materials ranging from sand to rock-fill using natural air convection tests. Canadian Geotechnical Journal, vol. 48, pp 679-690.

Fair, G.M., Hatch, L.P. 1933. Fundamental factors governing the streamline flow of water through sand. Journal American Water Works Association, 25, pp. 1551-1565.

Farouki, O.T. 1986. Thermal properties of soils. Series on Rock and Soil Mechanics. Vol. 11. Trans Tech Publications. 136p.

Goering, D.J., Instanes, A., Knudsen, S. 2000. Convective heat transfer in railway embankment ballast. Ground Freezing 2000, Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Louvain-La-Neuve, Belgium, 11-13 September, pp. 31-36.

InfraRYL. 2012. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa: 21000 Päälysrakenteet osat ja radan alusrakennekerrokset. Rakennustieto Oy. InfraRYL 2012/1.

Isover-eristeet [WWW]. Styrofoam 300-SL-AN tekniset tiedot. Viitattu [30.1.2014]. Saatavissa: <http://www.isover.fi/tuoteseloste/2599/styrofoam-300-sl-an.pdf>

Johansen, O. 1977. Varmeledningsevne av jordarter. Institute of Kjøleteknikk, 231 p. Draft translation 637: Thermal conductivity of soils, U.S Army Cold regions research and engineering laboratory. 291p.

Kalliainen A., Luomala H., Jäniskangas T., Nurmikolu A., Kolisoja P. Helsinki 2011. Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. 152s.

Lapwood, E.R. 1948. Convection of a fluid in a porous medium. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, vol 44, pp. 508-521.

Leivo V., Rantala J. 2000. Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. Tampere. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto, julkaisu 106. 121s.

Lunardi, V.J. 1981. Heat Transfer in Cold Climates. Van Nostrand Reinhold, New York. pp. 731.

Martynov, G.A., 1959. Heat and moisture transfer in freezing and thawing soils. In Principles of Geocryology. National Research Council of Canada, Technical Translation 1065, Chapter VI.

Metsovuori, L., 2013. Sulamispainuminen radan epätasaisuuden aiheuttajana. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan koulutusohjelma. 93s.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2002 Ratarakenteen routasuojaus. Helsinki. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 1/2002, Ratahallintokeskus, Kunnossapitoyksikkö. 101s, 1 liite.

Nurmikolu, A. 2004. Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisu A4/ 2004. Helsinki.. Ratahallintokeskus. 193s.

Newman, G.B., Lam, L. 2000. Simple application of a convective heat transfer boundary in a FEM freezing analysis. Ground Freezing 2000, Proceedings of the International Symposium on Ground Freezing and Frost Action in Soils, Louvain-La-Neuve, Belgium, 11-3 September, pp. 205-216.

Putkonen, J. 1998. Soil thermal properties and heat transfer processes near Ny-Ålesund, northwestern Spitsbergen, Svalbard. Polar Research 17(2), pp 165-179.

Qian, J., Yu, Q., Guo, L. & Hu, J. 2013. Experimental study on convection characteristics of crushed-rock layer. Canadian Geotechnical Journal 50, pp. 834-840.

Ratahallintokeskus. 2004. Standardin SFS-EN 13450 Raidesepelikiviainekset kansallinen soveltamisohje. Helsinki, Ratahallintokeskus. 7s.

Ratahallintokeskus. 2008. Ratatekniset ohjeet (RATO), osa 3 radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 50 s + liitt. 27.

Ratahallintokeskus. 2008. Radan suunnitteluohje B20. Helsinki 2008, Ratahallintokeskus. 72s. + liitt. 85s.

R.R. Rogers, M.K. Yau. 1989. A Short Course in Cloud Physics. 3. painos. 290 p.

SFS-EN 12667.2001. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy-lämpövirtalevyllä. Tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 54s.

SFS-EN ISO 10456+AC:2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 30 + liitt. 1 s.

Valtanen, E. 2010. Tekniikan taulukkokirja. 18. painos. Mikkeli. Genesis-kirjat Oy. 1176 p. Van der Held, E.F.M. 1952. The contribution of radiation to the conduction of heat. Applied Scientific Research. Section A, vol. 3. p. 237-249.

Van Royeen, M., Winterkorn, H.F., 1959. Structural and textural influences on thermal conductivity of soils. Highway Research Board Proceedings, vol. 39, pp. 576-621.

Wakao, N., Kato, K. 1969. Effective thermal conductivity of packed beds. Journal of Chemical Engineering of Japan, vol. 2, no 1. pp. 24-33.

Young, H., Freedman, R. University Physics, 2000, Addison-Wesley. 1274p.

