

Rakennustekniikka

Tutkimusselostus nro RAK/2657/2022

ONTELOLAATTOJEN LÄMPÖTEKNISTEN SUUNNITTELUARVOJEN LASKENNALLINEN MÄÄRITTÄMINEN

Tutkimusselostus Nro 2657

19 sivua

Tilaaja	Betoniteollisuus ry Janne Kihula PL 381 (Eteläranta 10) 00131 Helsinki	
Tehtävä	Määrittää ontelolaattojen teholliset lämpötekniset ominaisuudet rakennusten suunnittelutarpeita varten	
Tutkimusaika	22.6.2021 – 8.11.2021	
Tutkijat	Ville Jokelainen, tutkimusapulainen, tekn. kand. Anssi Laukkarinen, väitöskirjatutkija, DI Tampereen yliopisto Rakennustekniikka PL 600, 33014 Tampereen yliopisto Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere Puh. 0294 5211 (vaihde)	
Jakelu	Betoniteollisuus ry Tampereen yliopisto Rakennustekniikka Tutkijat	1 kpl + pdf 1 kpl 1 kpl

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

ONTELOLAATTOJEN LÄMPÖTEKNISTEN SUUNNITTELUARVOJEN LASKENNALLINEN MÄÄRITTÄMINEN

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	3
2	MENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT	3
2.1	Standardien ohjeet.....	3
2.2	Laskentaan valitut ontelolaatat.....	4
2.3	Materiaaliominaisuudet ja pintavastukset.....	4
2.4	Teholliset arvot käsinlaskentana	6
2.5	Laskelmat simulointiohjelmalla.....	8
3	TULOKSET.....	11
3.1	Tulokset käsinlaskennasta.....	11
3.2	Tulokset laskentaohjelmalla tehdyistä tarkasteluista – stationääritilanne	12
3.3	Tulokset laskentaohjelmalla tehdyistä tarkasteluista – ajasta riippuva tilanne	13
3.4	Keskiosan lämmönjohtavuuden laskentakaavojen vertailu.....	15
4	YHTEENVETO	16
	LÄHTEET	18
	LIITE 1: Laskentamallit työssä tarkastelluista ontelolaatoista.	19

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

1 JOHDANTO

Ontelolaatat ovat laajasti Suomessa ja ulkomailla talonrakentamisessa käytetty rakennustuote. Ontelolaattoja käytetään ala-, väli- ja yläpohjien kantavina rakenteina ja samalla ääntä ja paloa eristävinä rakenteina. Ontelolaattojen valmistukseen liittyvät esimerkiksi standardit: ”SFS-EN 13369 Betonivalmisteiden yleiset säännöt” ja ”SFS-EN 1168 Betonivalmisteet. Ontelolaatat”.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on määrittää laskennallisesti Suomessa yleisesti käytettävien ontelolaattojen lämpötekniset suunnitteluarvot, joita käytetään esimerkiksi U-arvolaskelmissa ja rakennusten simulaatiotarkasteluissa.

2 MENETELMÄT JA LÄHTÖTIEDOT

2.1 Standardien ohjeet

Harmonisoitu eurooppalainen tuotestandardi SFS-EN 1168 + A3 (2012) antaa luvussaan 4.3.6 seuraavan laskentakaavan yli 0,2 m paksujen ontelolaattojen lämmönvaston laskemiseksi. Laskentakaavan tulos ei sisällä pintavastuksia ja se on esitetty kaavana (1).

$$R_c = 0,35 \cdot (h + 0,25) \quad (1)$$

jossa

R_c on laattojen lämmönvastus (ilman pintavastuksia), m²K/W

h on elementtien kokonaispaksuus, m.

Edellä mainittu kohta sisältää myös viittauksen standardiin SFS-EN 13369. Tämän kohdan mukaan betonituotteen lämmöneristävyysominaisuudet voidaan ilmoittaa joko materiaalin lämmönjohtavuuden ja tuotteen geometriatietojen avulla, tai vaihtoehtoisesti tuotteen lämmönvastuksena. Materiaalien lämmönjohtavuuden määrittäminen voidaan tehdä mittaamalla SFS-EN 12664 mukaisesti tai SFS-EN ISO 10456 mukaisilla taulukkoarvoilla tai ilmoitetuilla arvoilla. Materiaalien ominaislämpökapasiteetin osalta standardi SFS-EN 13369 viittaa standardiin SFS-EN ISO 10456, joka sisältää rakennusmateriaalien ominaislämpökapasiteettien taulukkoarvoja. Suoraan ontelolaattojen tapaisiin tilanteisiin soveltuvaa menetelmää ei kuitenkaan ole ohjeistettu. Tätä varten rakenneosan liittyvän tehollisen ominaislämpökapasiteetin määrittämiseen on käytetty tässä tutkimusselostuksessa kuvattua menetelmää, mikä on esitetty luvuissa 2.4– 2.5.

Standardin SFS-EN 13369 mukaan rakenteen lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin voidaan määrittää joko mittaamalla standardin SFS-EN ISO 8990 mukaisesti tai laskennallisesti standardin SFS-EN ISO 6946 mukaan. Standardin SFS-EN ISO 6946, luku 5, tarjoaa kaksi tapaa rakenneosan lämmönläpäisykerroimen (U-arvon) määrittämiseen: i) Standardin SFS-EN ISO 10211 mukainen yksityiskohtainen laskentatapa ja ii) standardin SFS-EN ISO 6946 luvussa 6 esitetty yksinkertaistettu laskentatapa. Tässä tutkimuksessa käytettiin molempia tapoja.

Luvussa 2.2 on esitetty kaikille laskentamenetelmille yhteiset lähtötiedot, eli ontelolaatoissa käytettyjen materiaalien lämpötekniset materiaaliominaisuudet sekä rakenteiden

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

pintavastukset. Luvussa 2.3 on esitetty käsinlaskentamenetelmät ontelolaattojen tehollisten lämpöteknisten ominaisuuksien määrittämiseen. Luvussa 2.4 on esitetty menetelmät ontelolaattojen lämpöteknisten ominaisuuksien määrittämiseen laskentaohjelmien avulla.

2.2 Laskentaan valitut ontelolaatat

Tutkimuksen toteutusta varten tilaaja toimitti neljän valmistajan (Betsset, Lujabetoni, Parma ja Pielisen betoni) ontelolaattojen poikkileikkaustiedot CAD-kuvina. Tarkasteltavia ontelolaattatyyppisiä oli yhteensä kuusi kappaletta ja nämä valittiin vastaamaan yleisimmin käytettyjä ontelolaattatyyppisiä O20, O27, O32, O37, O40 ja O50. Laskentaan päätyneet ontelolaatat valittiin laskemalla ensin kullekin laattatypille sen geometrian tunnuslukuja ja valitsemalla eri valmistajien tuotteista lähellä kyseisen kokoluokan keskiarvoa oleva ontelolaatta. Tämän lisäksi ontelolaattojen valinnassa otettiin huomioon eri valmistajien liikevaihtojen suhteelliset suuruusluokat. Valitut laatat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Laskentaan valitut ontelolaatat.

Ontelolaatta	Valmistaja
O20	Pielisen betoni
O27	Parma
O32	Lujabetoni
O37	Betsset
O40	Lujabetoni
O50	Parma

Ontelolaatoissa olevat jänneteräksöt oli määritelty työn tilaajan toimesta ja nämä lisättiin erikseen tilaajan toimittamiin CAD-piirustuksiin. Pienemmissä ontelolaatoissa O20 ja O27 jänneteräksiä oli 8 kpl ja niiden halkaisija oli 9,3 mm. Suuremmissa ontelolaatoissa O32, O37, O40 ja O50 jänneteräksiä oli 8 kpl ja niiden halkaisija 12,5 mm. Malleissa teräksöt asetettiin 20 mm etäisyydelle ontelolaatan alareunasta mahdollisimman symmetrisesti ontelolaatan keskiviivaa nähden.

Saumabetonissa olevien teräksien määräksi työn tilaaja oli määritellyt 2 kpl per sauma ja halkaisijaksi 10 mm. Teräksöt asetettiin ontelolaatan korkeuden keskiviivan alapuolella, olematta kuitenkaan sauman pohjalla. Saumabetonissa olevat teräksöt käsiteltiin saumabetonin symmetrialeikkauslinjalla puolikkaina ympyröinä. Poikkileikkausten 2D-laskentamallit simulointiohjelmassa on esitetty liitteessä 1.

2.3 Materiaaliominaisuudet ja pintavastukset

Betonin ja saumalaastin tiheydet saatiin työn tilaajalta tarkasteltavia ontelolaattatyyppisiä kuvaavina arvoina ja nämä olivat samaa suuruusluokkaa standardissa SFS-EN ISO 10456 esitettyjen taulukkoarvojen kanssa. Betonin lämmönjohtavuus, teräksen materiaaliominaisuudet sekä ilman tiheys ja ominaislämpökapasiteetti on otettu standardista SFS-EN ISO 10456. Saumalaastin lämmönjohtavuus saatiin työn tilaajalta ja on lukuarvona lähellä tiheyden perusteella interpoloitua betonin lämmönjohtavuutta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Onteloiden sisällä lämpö siirtyy säteilylämmönsiirrolla ontelon eri pintojen välillä, ontelon ilmassa esiintyvien konvektiovirtausten mukana sekä johtamalla ilmassa. Näiden ilmiöiden yksityiskohtaisen mallintamisen sijaan ilmalle käytettiin tehollista lämmönjohtavuutta, joka laskettiin jakamalla kunkin ontelolaattatyyppin ontelon suurin vapaa korkeus standardissa SFS-EN ISO 6946 esitetyllä tuulettumattoman ilmatilan lämmönvastuksella. Standardissa esitetyt tuulettumattoman ilmapälin taulukkoarvot eivät sovellu tilanteisiin, joissa ontelolaattojen onteloita käytetään tarkoituksellisesti ilman virtausreitteinä tai joissa onteloiden ja ympäröivän ilmatilan välillä on virtausaukkoja enemmän kuin $500 \text{ mm}^2/\text{m}^2$ yhden ontelon vaakasuuntaista projektioalaa kohti. Jos ontelolaatan ontelot ovat ilmayhteydessä toisiinsa, niin tällöin virtausaukkojen määrä lasketaan onteloiden yhteenlaskettua pinta-alaa kohti.

Kaikille ontelolaatoille käytettiin 300 mm korkuisella ilmapälinillä annettua ilmapälin lämmönvastusta, koska onteloiden korkeudella ($> \sim 100 \text{ mm}$) lämmönvastusten taulukkoarvot ovat käytännössä samoja keskenään. Standardi rajaa tuulettumattomien ilmapälinien lämmönvastusten taulukkoarvojen käyttöalueen enintään 300 mm korkuisille ilmapälineille, mutta tämän rajoituksen ei katsottu aiheuttavan nyt tehdyissä laskelmissa merkittävää virhettä. Koska lämpövirran suunta voi ontelolaatoissa olla joko ylös- tai alaspäin, käytettiin ilmapälin lämmönvastukselle näille kahdelle suunnalle ilmoitettujen lämmönvastusten keskiarvoa $R_{tot,nve} = (0,16 + 0,23) \text{ m}^2\text{K/W} / 2 = 0,195 \text{ m}^2\text{K/W}$, joka pyöristettiin arvoon $0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Onteloissa olevan ilman tehollinen lämmönjohtavuus laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$\lambda_{nve} = d_{ontelo} / R_{tot,nve} \quad (2)$$

jossa

d_{ontelo} on ontelolaatan ilma-ontelon vapaa maksimikorkeus, m
 $R_{tot,nve}$ on tuulettumattoman ilmapälin lämmönvastus, $\text{m}^2\text{K/W}$.

Laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet on esitetty oheisessa taulukossa.

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetyt lämpötekniiset materiaaliominaisuudet.

Materiaali	Lämmönjohtavuus, λ W/(m·K)	Tiheys, ρ kg/m ³	Ominaislämpökapasiteetti, c_p J/(kg·K)
Betoni	2	2500	1000
Saumalaasti	1,5	2100	1000
Teräs	50	7800	450
Ilma (kaava 2)	0,75 – 2,05	1,23	1008

Laskennassa käytettiin sisä- ja ulkopinnalle samoja pintavastuksia, koska lämpövirran katsottiin olevan mahdollista kulkea kumpaankin suuntaan ontelolaatan läpi. Lisäksi pintavastukset on vähennetty tuloksista käsiteltäessä ontelolaatoille määritettyjä arvoja. Laskennassa käytetty pintavastus on keskiarvo standardin SFS-EN ISO 6946 mukaisesta sisäpinnan pintavastuksesta kaavan 3 mukaisesti.

$$R_{si,se} = \frac{R_{si,\wedge} + R_{si,\vee}}{2} \quad (3)$$

jossa

- $R_{si,se}$ on laskelmissa käytetty pintavastus ontelolaatan ylä- ja alapuolelle, m^2K/W
 on huoneilmaa vasten olevan pinnan pintavastus, kun lämpövirran suunta on
 $R_{si,\wedge}$ ylöspäin, $0,10 m^2K/W$
 $R_{si,\vee}$ kuten yllä, mutta lämpövirran suunnan ollessa alaspäin, $0,17 m^2K/W$

Edellä esitetyillä arvoilla ylä- ja alapinnan pintavastukseksi tuli $0,135 m^2K/W$.

2.4 Teholliset arvot käsinlaskentana

Rakennusmateriaalien keskeiset lämpötekniset ominaisuudet ovat lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti, vrt. taulukko 2. Koko rakenneosalle määritettyinä näitä vastaavat ominaisuudet ovat lämmönläpäisykerroin (U-arvo), massa ja lämpökapasiteetti. Ontelolaattojen tapauksessa U-arvon sijaan ilmoitetaan rakenteen lämmönvastus, jossa ei ole mukana pintavastuksia.

Yksiaineisen materiaalikerroksen lämmönvastus saadaan jakamalla kerroksen paksuus aineen lämmönjohtavuudella ($R = d/\lambda$). Tätä hyödyntämällä saadaan ontelolaatan tehollinen lämmönjohtavuus laskettua jakamalla ontelolaatan korkeus ontelolaatan kokonaislämmönvastuksella.

$$\lambda_{eff} = \frac{d}{R_{tot}} \quad (4)$$

jossa

- λ_{eff} on ontelolaatan tehollinen lämmönjohtavuus, $W/(mK)$.
 d on ontelolaatan korkeus, m ja
 R_{tot} on ontelolaatan kokonaislämmönvastus, m^2K/W .

Rakenteen kokonaislämmönvastus laskettiin käyttäen käsinlaskennassa yksinkertaistettua suorakaidegeometriaa sekä kokonaislämmönvastuksen yläraja-alaraja-menetelmää. Periaatekuva käsinlaskennassa käytetystä suorakaidegeometriasta on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. O50-laatan yksinkertaistettu leikkauskuva ylä- ja alarajamenetelmän laskennassa. Siniset alueet kuvaavat saumabetonia ja harmaan alueen (betonin) sisällä olevat alueet onteloita.

Kokonaislämmönvastus lasketaan tällöin kokonaislämmönvastuksen yläkiarvon ja alalikiarvon keskiarvona kaavan 5 mukaisesti.

$$R_{tot} = \frac{R_{tot,upper} + R_{tot,lower}}{2} \quad (5)$$

jossa

- R_{tot} on rakenneosan kokonaislämmönvastus, m²K/W
 $R_{tot,upper}$ on rakenneosan kokonaislämmönvastuksen yläkiarvo, m²K/W
 $R_{tot,lower}$ on rakenneosan kokonaislämmönvastuksen alalikiarvo, m²K/W.

Yläkiarvo laskettiin lämpövirran suuntaan vierekkäisten lohkojen perusteella:

$$\frac{1}{R_{tot,upper}} = \frac{f_{ontelo}}{R_{tot,ontelo}} + \frac{f_{uuma}}{R_{tot,uuma}} + \frac{f_{sv}}{R_{tot,sv}} \quad (6)$$

jossa

- f_x ovat ontelon, uuman sekä saumavalun lohkojen osuudet ontelolaatan pinta-alasta kohtisuoraan lämpövirtaan nähden, -
 R_x ovat ontelo-, uuma- sekä saumavalulohkon kokonaislämmönvastukset rakenteen yli, m²K/W.

Käsinlaskennassa ontelolaatta yksinkertaistettiin suorakaiteen muotoiseksi ja teräkset jätettiin pinta-alaltaan pieninä pois laskelmista.

Alalikiarvon laskennassa rakennusosa jaetaan lämpövirran suunnassa kerroksiin, joissa jokainen kerros on lämmönjohtavuudeltaan yhtenäinen. Epähomogeenisille kerroksille lasketaan ensin tehollinen lämmönvastus kaavan 6 avulla. Alalikiarvo laskettiin kaavalla (7).

$$R_{tot,lower} = R_{si,yp} + R_{bet,yp} + R_{ontelot} + R_{bet,ap} + R_{si,ap} \quad (7)$$

jossa

- $R_{si,yp}$ on yläpinnan pintavastus, m²K/W
 $R_{bet,yp}$ on ontelolaatan yläpinnassa olevan homogeenisen betonikerroksen lämmönvastus, m²K/W
 $R_{ontelot}$ on ilma-onteloiden ja niiden välissä olevien uumien yhdistetty lämmönvastus, m²K/W
 $R_{bet,ap}$ on ontelolaatan alapinnassa olevan homogeenisen betonikerroksen lämmönvastus, m²K/W
 $R_{si,ap}$ on alapinnan pintavastus, m²K/W.

Ontelolaatan tehollinen tiheys määritettiin käsinlaskennassa seuraavasti:

$$m_{tot} = (\rho_{bet}A_{bet} + \rho_t A_t + \rho_{sv}A_{sv} + \rho_i A_i) \cdot l \quad (8)$$

$$\rho_{eff} = \frac{m_{tot}}{b \cdot d \cdot l} \quad (9)$$

jossa

m_{tot}	on ontelolaatan kokonaismassa, kg
ρ_x	ovat betonin, teräksen, saumavalubetonin ja ilman tiheydet, kg/m ³
A_x	ovat betonin, teräksen, saumavalun ja ontelolaatan ontelon pinta-alat ontelolaatan päädyn suunnasta katsottuna, m ²
b	on laatan nimellisleveys, m
l	on laatan nimellispituus, m

Ontelolaattojen tehollinen ominaislämpökapasiteetti laskettiin käsin seuraavasti:

$$C_{tot} = C_{bet} + C_t + C_{sv} + C_i \quad (10)$$

$$c_{eff} m_{tot} = c_{bet} m_{bet} + c_t m_t + c_{sv} m_{sv} + c_i m_i \quad (11)$$

$$c_{eff} = \frac{c_{bet} \rho_{bet} A_{bet} l + c_t \rho_t A_t l + c_{sv} \rho_{sv} A_{sv} l + c_i \rho_i A_i l}{\rho_{bet} A_{bet} l + \rho_t A_t l + \rho_{sv} A_{sv} l + \rho_i A_i l} \quad (12)$$

$$c_{eff} = \frac{c_{bet} \rho_{bet} A_{bet} + c_t \rho_t A_t + c_{sv} \rho_{sv} A_{sv} + c_i \rho_i A_i}{\rho_{bet} A_{bet} + \rho_t A_t + \rho_{sv} A_{sv}} \quad (13)$$

jossa

c_x	ovat betonin, teräksen, saumavalubetonin sekä ilman ominaislämpökapasiteetit, J/(kg·K)
m_x	ovat ontelolaatan kokonaismassa sekä betonin, teräksen, saumavalubetonin ja ilman massat erikseen, kg/m ³

Ontelolaattojen nimellisleveys oli kaikissa tapauksissa $b = 1,2$ m. Laskelmat tehtiin yhden metrin mittaista ontelolaatan osuutta kohti ($l = 1$ m). Ilman massa jätettiin kaavasta (13) pienenä pois.

2.5 Laskelmat simulointiohjelmalla

Ontelolaattojen kokonaislämmönvastuksen määrittämiseksi kustakin tarkasteltavasta ontelolaatasta tehtiin kaksiulotteinen lämmönjohtumisen laskentamalli COMSOL Multiphysics -ohjelmaan. Ontelolaattojen ilmalle käytettiin laskelmissa tehollista lämmönjohtavuutta, joka laskettiin luvun 2.3 mukaisesti. COMSOL Multiphysics -ohjelmaan laadittujen laskentamallien geometria on esitetty liitteessä 1.

Ontelolaattojen tehollinen lämmönjohtavuus määritettiin tekemällä stationääritilanteen laskelma lämmön johtumisesta ontelolaatan läpi. Ontelolaatan ylä- ja alapinnan lämpövirroista määritettiin ensin lämpövirran tiheys ontelolaatan nimellislevyettä kohti, josta sitten edelleen määritettiin ontelolaatan kokonaislämmönvastus seuraavasti:

$$q = \frac{\Phi}{b} \quad (14)$$

$$R_{tot} = \frac{\Delta T}{q} \quad (15)$$

jossa

q on lämpövirran tiheys ontelolaatan ylä- ja alapinnan läpi, W/m²
 Φ on lämpövirta ontelolaatan ylä- ja alapinnan läpi, W
 ΔT on lämpötilaero laatan eri puolilla (stationääritilanteessa 1 K), K

Ontelolaatan tehollinen lämmönjohtavuus määritettiin vähentämällä kokonaislämmönvastuksesta ensin pintavastukset ja lopuksi laskemalla tehollinen lämmönjohtavuus kaavan (4) mukaisesti.

Ontelolaattojen tehollisen lämpökapasiteetin määrittämistä varten tehtiin ensin ajasta riippuvat lämmönjohtumisen laskentatarkastelut samoilla kaksikulotteisilla COMSOL Multiphysics -malleilla, kuin stationääritilanteen tapauksessa. Ajasta riippuvat laskelmat suoritettiin 14 vuorokauden laskenta-ajalla, jossa aika-askeleen enimmäispituudeksi asetettiin 0,25 h. Ympäristön lämpötila ontelolaatan ylä- ja alapuolella määritettiin trigonometristen funktioiden avulla seuraavasti:

$$T_{ext} = 23 + 3 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t}{24}\right) \quad (16)$$

$$T_{int} = 23 + 3 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{t-3}{24}\right) \quad (17)$$

jossa

T_{ext} on ympäristön lämpötila ontelolaatan yläpuolella, °C
 T_{int} on ympäristön lämpötila ontelolaatan alapuolella, °C
 t on laskennan ajanhetki, h

Rakenteen alkulämpötilaksi asetettiin 10 °C, jotta laskennan alussa esiintyisi pieni häiriö, joka kuitenkin ehtii tasaantumaan pois 14 vrk laskenta-ajan kuluessa.

Kaksikulotteisilla malleilla tehtyjen laskelmien jälkeen tehtiin vastaavat ajasta riippuvat laskelmat myös yksikulotteisilla malleilla, joissa käytettiin tehollisia materiaaliominaisuuksia. Yksikulotteisia malleja testattiin kahta erilaista:

- Ontelolaatta mallinnetaan yhtenä homogeenisena ainekerroksena siten, että:
 - Rakenteen paksuus on todellisen rakenteen mukainen
 - Tiheytenä käytetään pituusmassasta laskettua tehollista arvoa
 - Ominaislämpökapasiteetiksi asetetaan 1000 J/(kgK)
 - Lämmönjohtavuus etsitään COMSOL Multiphysics -ohjelman Parametric Sweep -työkalulla siten, että laskentamallista saadut pintalämpötilojen ja lämpövirran tiheyksien tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin tarkemman 2D-mallin tuloksia.
- Ontelolaatta mallinnetaan kolmesta kerroksesta koostuvana rakenteena siten, että:
 - Laatan ylä- ja alapinnassa on 40 mm paksu ehjän betonin kerros. Sisäosan paksuus määräytyy laatan kokonaispaksuuden ja näiden pintakerrosten erotuksena.
 - Betonin lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti ontelolaatan ylä- ja alapintojen 40 mm paksuissa kerroksissa ovat taulukon 2 mukaisia.
 - Keskiosan tiheys lasketaan todellisen neliömassan ja 40 mm paksujen betonikerrosten erotuksen sekä sisäosan korkeuden avulla
 - Keskiosan ominaislämpökapasiteetille käytetään arvoa 1000 J/(kgK)
 - Keskiosan lämmönjohtavuus etsitään COMSOL Multiphysics -ohjelman Parametric Sweep -työkalulla siten, että laskentamallista saadut pintalämpötilojen ja lämpövirran tiheyksien tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin tarkemman 2D-mallin tuloksia.

Kaikkien ajasta riippuvien laskelmien tulokset tallennettiin 1 h aika-askelein (tallennusaikaväli oli eri, kuin aiemmin mainittu laskenta-askeleen enimmäispituus). Kahden eri yksiulotteisen mallin antamia pintalämpötiloja ja lämpövirran tiheyksiä verrattiin kaksiulotteisen mallin tuloksiin myös kuvaajien avulla.

Yksiulotteisten mallien tapauksessa käytetty 40 mm paksuus oli käytössä kaikissa ontelolaattatyypeissä. Kyseinen paksuus oli pyöristetty tulos ontelolaattojen ylä- ja alareunassa olevien kannasten paksuuksien keskiarvosta eri ontelolaattatyypeillä.

Kaksiulotteisen vertailumallin sekä erilaisten yksiulotteisten laskentamallien tuloksia verrattiin toisiinsa laskemalla tulosten tunnitaiten erotusten neliöiden keskiarvon neliöjuuri:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{t=0}^N (y_{2D,t} - y_{1D,t})^2} \quad (18)$$

jossa

$RMSE$ on 1D-mallien tarkkuuden arvioimiseen käytetty vertailusuure, °C tai W/m²

N on ajanhetkien lukumäärä tulosdatassa, 1 kpl + 336 kpl (2 vko)

t on ajanhetkien indeksointiin käytetty muuttuja, h

$y_{2D,t}$ ja $y_{1D,t}$ ovat kaksi- ja yksiulotteisista laskentamalleista saadut tulokset, °C tai W/m².

Kaksiulotteisella mallilla laskettuna pintalämpötilana käytettiin pinnan keskilämpötilaa kullakin ajanhetkellä. Yksiulotteisista malleista kaksiulotteisen (tarkemman) mallin tuloksia vastasi se tapaus, jossa ylä- ja alapintojen $RMSE$ -virheiden keskiarvo oli pienin.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

3 TULOKSET

3.1 Tulokset käsinlaskennasta

Seuraavassa taulukossa on esitetty CAD-kuvien mukaisia tietoja ontelolaattojen onteloiden suhteellisesta pinta-alaosuudesta sekä ontelolaatosten massasta ja tehollisesta tiheydestä.

Taulukossa on myös ontelolaatan keskiosalle lasketut neliömassat sekä teholliset tiheydet. Keskiosien arvot on laskettu käyttäen kaikille ontelolaatoilla vakiosuuruista 40 mm ehjän betonin paksuutta ontelolaatan ylä- ja alareunassa.

Taulukko 3. Ontelolaatoille lasketut laataston tason suuntaiset neliömassat sekä teholliset tiheydet. Koko ontelolaattaa koskevat arvot on laskettu CAD-geometrian avulla ja keskiosaa kuvaavat arvot vähentäen näistä ylä- ja alapinnasta 40 mm betonikerrosten osuudet.

Ontelolaatta	Onteloiden osuus poikkileikkauksalasta, %	Koko ontelolaatta		Keskiosa	
		m_{OL} , kg/m ²	$\rho_{eff,OL}$, kg/m ³	m_{ko} , kg/m ²	$\rho_{eff,ko}$, kg/m ³
O20	44	277	1385	77	642
O27	42	382	1442	182	984
O32	47	423	1321	223	928
O37	44	517	1396	317	1091
O40	54	458	1146	258	808
O50	51	608	1215	408	970

Taulukossa esitettyjen arvojen perusteella onteloiden osuus ontelolaattojen poikkileikkauksen nimellispinta-alasta oli 42–54 %, laataston massa 277–608 kg/m² laataston tason suunnassa ja ontelolaattojen tehollinen tiheys noin 1150–1450 kg/m³. Keskiosille lasketut massat ovat kaikissa tilanteissa $2 \cdot 0,04 \text{ m} \cdot 2500 \text{ kg/m}^2 = 200 \text{ kg/m}^2$ pienempiä kuin CAD-kuvien perusteella lasketut massat.

Seuraavassa taulukossa on esitetty suorakaidegeometrialla lasketut ontelolaattojen teholliset lämmönjohtavuudet sekä CAD-kuvien mukaisella geometrialla lasketut ominaislämpökapasiteetit. Taulukossa esitetyt lämmönjohtavuuksien ja lämmönvastusten arvot eivät sisällä pintavastuksia.

Taulukko 4. Käsinlaskennan tuloksena määritetyt teholliset lämpötekniset materiaaliominaisuudet. Ontelolaatan teholliset lämmönjohtavuudet tai lämmönvastukset eivät sisällä pintavastuksia.

Ontelolaatta	$\lambda_{eff,käsin}$, W/(mK)	$R_{eff,käsin}$, m ² K/W	$c_{eff,käsin}$, J/(kgK)
O20	1,21	0,17	991
O27	1,38	0,19	993
O32	1,49	0,21	991
O37	1,64	0,23	993
O40	1,76	0,23	992
O50	2,01	0,25	994

Käsinlaskentatulosten perusteella 0,2–0,5 m paksujen ontelolaattojen teholliset lämmönjohtavuudet olivat noin 1,2–2,0 W/(mK) ja lämmönvastukset 0,17–0,25 m²K/W.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Ominaislämpökapasiteetti eri ontelolaattatyypeissä oli käsinlaskentatulosten perusteella hyvin samankaltainen, johtuen ilman ja betonin samankaltaisista (~1000 J/(kgK)) ominaislämpökapasiteeteista massayksikköä kohden.

3.2 Tulokset laskentaohjelmalla tehdyistä tarkasteluista – stationääritilanne

Seuraavassa taulukossa on esitetty CAD-geometrian mukaisista stationääritilanteen 2D-malleista saatuja tuloksia. Taulukon oikeassa reunassa on lisäksi esitetty standardin SFS-EN 1168 laskentakaavan mukaiset ontelolaattojen lämmönvastukset.

Taulukko 5. Stationääritilanteen 2D-malleilla lasketut lämpövirran tiheydet (1 K lämpötilaero), ontelolaattojen teholliset lämmönjohtavuudet ja lämmönvastukset sekä standardin SFS-EN 1168 käsinlaskentakaavalla määritetty ontelolaatan lämmönvastus.

Ontelolaatta	$q_{2D,stat}$, W/m ²	$\lambda_{eff,2D}$, W/(m·K)	$R_{eff,2D}$, m ² K/W	R_c , m ² K/W
O20	2,34	1,28	0,16	0,16
O27	2,21	1,45	0,18	0,18
O32	2,12	1,59	0,20	0,20
O37	2,03	1,66	0,22	0,22
O40	2,02	1,77	0,23	0,23
O50	1,94	2,03	0,25	0,26

Laskentaohjelmalla määritetyt tarkan geometrian mukaiset ontelolaattojen teholliset lämmönjohtavuudet olivat 0,7–6,4 % suurempia, kuin edellä käsin määritetyt arvot. Ontelolaattojen O20, O27 ja O32 tapauksissa laskentaohjelmalla lasketut tulokset olivat 5,2–6,4 % suurempia käsinlaskennan tuloksiin verrattuna. Ontelolaatoilla O37, O40 ja O50 vastaava ero oli 0,7–0,9 %. Erot käsinlaskennasta ja laskentaohjelmasta saatujen tulosten välillä olivat yllättävänkin pieniä ja kertovat siitä, että yksinkertainen suorakaidemalli pystyi stationääritilanteen tapauksessa kuvaamaan ontelolaattojen läpi tapahtuvan lämpövirran kohtuullisen hyvällä tarkkuudella.

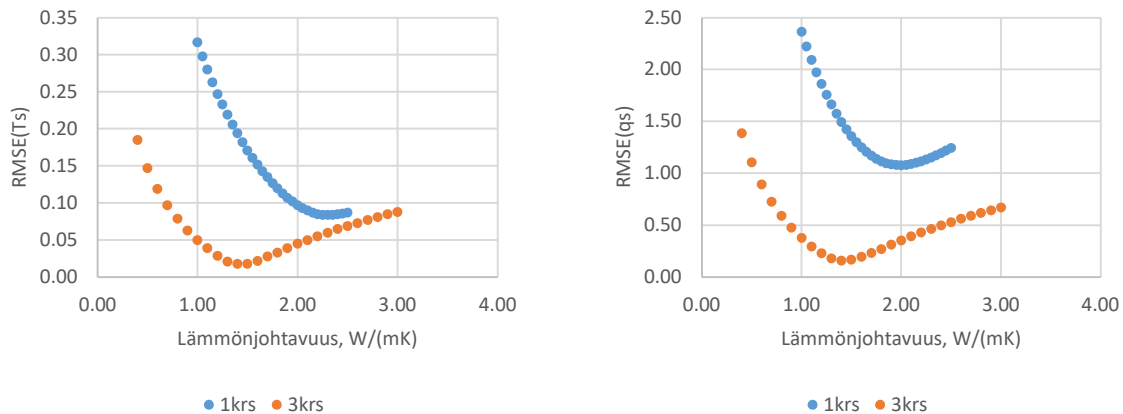
Kaksiulotteisesta laskentamallista saatu tehollinen lämmönjohtavuus lähenei arvoa 2,0 W/(mK), kun ontelolaatan paksuus kasvoi lähelle arvoa 0,5 m. Tällä ontelolaatan paksuudella onteloissa olevan ilman tehollinen lämmönjohtavuus kasvoi lähelle arvoa 2,0 W/(mK), joka on samalla myös laskelmissa käytetty betonin lämmönjohtavuus. Ohuemmilla ontelolaatoilla taas tehollinen lämmönjohtavuus oli ilman tehollisen lämmönjohtavuuden ja betonin lämmönjohtavuuden välissä.

Standardissa SFS-EN 1168 esitetty käsinlaskentakaava ontelolaattojen lämmönvastukselle vastasi tarkemmalla menetelmällä määritettyjä tuloksia hyvin. Tämä on todennäköisesti yhteydessä käsinlaskentamenetelmällä ja tarkemmalla menetelmällä laskettujen hyvään vastaavuuteen, jolloin samoja laskentaperiaatteita käytettäessä ontelolaatan lämmönvastus ei ole herkkä pienille eroille ontelolaatan geometriassa.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

3.3 Tulokset laskentaohjelmalla tehdyistä tarkasteluista – ajasta riippuva tilanne

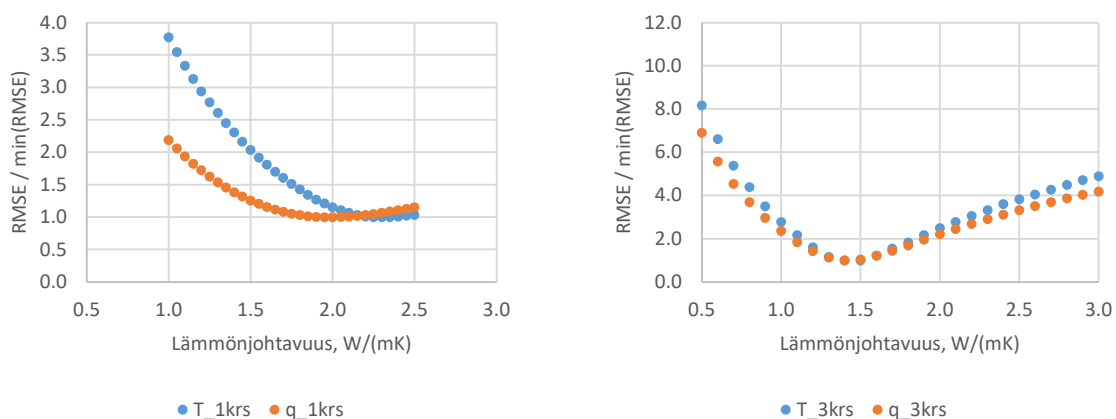
Seuraavissa kuvissa on esitetty laskentatuloksia yksiulotteisen laskentamallin tarkkuudelle, kun ontelolaattarakenteen on mallinnettu joko yhtenä homogeenisena ainekerroksena (1krs) tai kolmesta ainekerroksesta koostuvana rakenteena (3krs).



Kuva 2. Pinta- $RMSE(T_s)$ ja lämpövirran tiheyden $RMSE(q_s)$ -virheen kuvaajia, joissa vaaka-akselilla on kussakin tapauksessa käytössä ollut materiaalin lämmönjohtavuus. Laskentatulokset on sitä tarkempi, mitä pienempi $RMSE$ -virheen arvo on. Kuvaajat ovat ontelolaatasta O32.

Kuvaajien perusteella kolmesta kerroksesta koottu malli tuotti tarkemmat tulokset (pienempi $RMSE$ -virhe) yhdestä homogeenisesta kerroksesta koostuvaan malliin nähden. Kolmesta kerroksesta muodostuvan mallin tarkimman tuloksen tuottava lämmönjohtavuus oli lisäksi lähempänä edellisessä luvussa määritettyä ontelolaatan tehollista lämmönjohtavuutta.

Seuraavissa kuvissa vertaillaan samoja tuloksia, mutta nyt lämpötilan ja lämpövirran tiheyden näkökulmasta. Tulokset on skaalattu pienimmän $RMSE$ -virheen suhteen, jotta pinta- $RMSE(T_s)$ ja lämpövirran tiheyden virhe on saatu esitettyä samassa kuvaajassa.

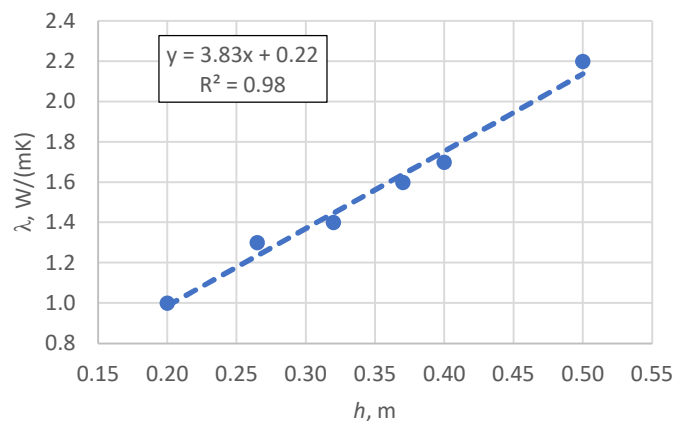


Kuva 3. Tarkimmat laskentatulokset tuottavan lämmönjohtavuuden vertailukuvaajia, kun valinta tehdään joko pinta- $RMSE(T_s)$ tai lämpövirran tiheyden perusteella yhden tai kolmen materiaalikerroksen laskentamallista. Pystyakselilla $RMSE$ -virhe on skaalattu suhteessa laskentatulosten pienimpään arvoon. Kuvaajat ovat ontelolaatasta O32.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Tarkimmat laskentatulokset saavutettiin kolmen materiaalikerroksen laskentamallissa samalla lämmönjohtavuuden arvolla, kun taas yhden homogeenisen materiaalin laskentamallissa tarkimmat tulokset osuivat eri lämmönjohtavuuden arvoille. Tulosten samankaltainen käyttäytyminen oli nähtävissä myös muissa ontelolaatoissa, mutta kuitenkin niin, että tarkimmat tulokset tuottava keskiosan lämmönjohtavuus oli sitä korkeampi, mitä korkeammasta ontelolaatasta oli kyse. Tarkimmat tulokset tuottavan lämmönjohtavuuden käyttäytyminen on samassa linjassa edellä esitettyjen stationääritilanteen 2D-mallien tulosten kanssa.

Seuraavassa kuvassa on esitetty tarkimmat tulokset tuottaneen kolmikerroksisen 1D-mallin keskiosan teholliset lämmönjohtavuudet ontelolaatan kokonaiskorkeuden funktiona. Tuloksiin on sovitettu lineaarinen regressiosuora.



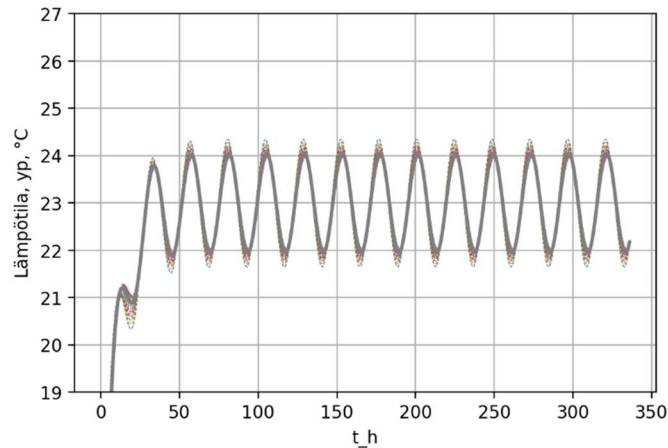
Kuva 4. Kolmesta kerroksesta kerroksellisena rakenteena mallinnettujen ontelolaattojen keskiosan tehollinen lämmönjohtavuus ontelolaatan kokonaiskorkeuden funktiona. Arvot on määritetty ajasta riippuvan tilanteen tuloksista.

Kuvassa esitetyissä arvoissa voi olla pieniä poikkeamia johtuen laskelmissa käytetystä 0,1 W/(mK) porrastuksesta lämmönjohtavuuden arvoissa.

Määritetään esimerkkinä 0,32 m korkean ontelolaatan keskiosan tehollinen lämmönjohtavuus ja ontelolaatan kokonaislämmönvastus käyttäen yllä olevaa sovitekäyrää: Lasketaan ensin keskiosan tehollinen lämmönjohtavuus, joka on: $\lambda_{\text{keskiosa}} = (3,83 \cdot 0,32 + 0,22) \text{ W/(mK)} = 1,45 \text{ W/(mK)}$. Tämän jälkeen saadaan laskettua ontelolaatan kokonaislämmönvastus summaamalla yhteen ylä- ja alareunan 40 mm paksujen betonikerrosten lämmönvastukset sekä keskiosan lämmönvastus: $R_{032} = 2 \cdot 0,04 \text{ m} / 2,0 \text{ W/(mK)} + (0,32 \text{ m} - 2 \cdot 0,04 \text{ m}) / 1,45 \text{ W/(mK)} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W} + 0,166 \text{ m}^2\text{K/W} = 0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tämä tulos on lähellä aiemmista stationääritilanteen 2D-malleista saatuja tuloksia, mutta ajasta riippuvien ja stationääritilanteen tulosten välillä on pieni ero.

Seuraavassa kuvassa on esitetty esimerkki ajasta riippuvasta tilanteesta, jossa on 2D-mallin tuottama ontelolaatan yläpinnan keskilämpötila eri ajanhetkillä sekä vastaava arvo kolmikerroksisesta 1D-mallista.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.



Kuva 5. Ontelolaatan yläpinnan lämpötila kolmikerroksisella rakenteella ajasta riippuvissa olosuhteissa ja vastaavat arvot 2D-mallin tuloksina. Laskentamallien vastaavuus toisiinsa nähden on hyvä.

Myös yhden homogeenisen ainekerroksen mallilla laskettu pintalämpötilojen ja lämpövirran tiheyden käyttäytyminen oli kuvaajista tarkasteltuna lähellä 2D-mallien antamia tuloksia. Kolmikerroksinen malli tuotti kuitenkin tarkemmat tulokset, minkä lisäksi kolmikerroksisen laskentamallin avulla ontelolaatan ylä- ja alareunalle voidaan käyttää alkuperäisiä betonin materiaaliominaisuuksia, mikä vähentää tehollisten arvojen käyttämisen määrää.

3.4 Keskiosan lämmönjohtavuuden laskentakaavojen vertailu

Ajasta riippuvia laskelmia varten kolmesta kerroksesta kostuva malli tuotti tarkemmat tulokset homogeeniseen yksiaineiseen malliin verrattuna. Kaikki edellä esitetyt tulokset huomioon ottaen ontelolaatan keskiosan tehollisen lämmönjohtavuuden määrittämiseksi on käsitelty eri vaihtoehtoja, eli: a) betonin lämmönjohtavuus λ_{betoni} , b) ilman tehollinen lämmönjohtavuus λ_{nve} , c) SFS-EN 1168 mukaisesta ontelolaatan lämmönvastuksesta laskettu keskiosan lämmönjohtavuus λ_c , d) 2D-laskentamallin ja kolmikerroksisen laskentamallin vertailujen avulla etsityt taulukoidut lämmönjohtavuuden arvot $\lambda_{3krs,taul}$ ja e) d-kohdan tuloksiin sovitettut regressiosuoran arvot $\lambda_{3krs,reg}$. Nämä eri tapaukset on koottu seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 6. Yksiulotteisen, kolmesta kerroksesta muodostetun ontelolaatan laskentamallin keskiosan lämmönjohtavuus eri menetelmillä määritettynä.

Ontelolaatta	λ_{betoni} , W/(mK)	λ_{nve} , W/(mK)	λ_c , W/(mK)	$\lambda_{3krs,taul}$, W/(mK)	$\lambda_{3krs,reg}$, W/(mK)
O20	2	0,75	1,02	1,0	0,99
O27	2	0,93	1,32	1,3	1,23
O32	2	1,22	1,50	1,4	1,45
O37	2	1,30	1,64	1,6	1,64
O40	2	1,60	1,71	1,7	1,75
O50	2	2,05	1,89	2,2	2,14

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.

Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Taulukon arvojen perusteella SFS-EN 1168 mukaisen laskentakaavan tulokset λ_c vastasivat kolmen kerroksen mallin keskiosalle haettuja lämmönjohtavuuksia $\lambda_{3krs,taul}$ hyvin, pois lukien paksuimman ontelolaatan O50 lämmönjohtavuus. Kyseisen ontelolaatan osalta sovitekäyrän antama tulos $\lambda_{3krs,reg}$ oli lähempänä simuloinneista saatua arvoa, verrattuna SFS-EN 1168 kaavaan verrattuna. Tehollisen lämmönjohtavuuden korkea arvo johtuu todennäköisesti todellisen geometrian ja tehollisten arvojen eroista ontelolaatan keskialueella.

Esitetään vielä esimerkki SFS-EN 1168 -standardissa esitetyn ontelolaatan lämmönvastuksen laskentakaavan käyttämisestä keskiosan tehollisen lämmönjohtavuuden määrittämiseen: Ontelolaatalle O32 kaavan antama tulos on: $R_c = 0,35 \cdot (0,32 + 0,25) \text{ m}^2\text{K/W} = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$. Vähennetään tästä ontelolaatan ylä- ja alapinnan ehjän betonin osuudet, jotka molemmat on tässä oletettu 40 mm paksuiksi kerroksiksi: $R_{keskiosa} = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W} - 0,04 \text{ m} / 2 \text{ W/(mK)} - 0,04 \text{ m} / 2 \text{ W/(mK)} = 0,20 \text{ m}^2\text{K/W} - 0,020 \text{ m}^2\text{K/W} - 0,020 \text{ m}^2\text{K/W} = 0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$. Keskiosan korkeudeksi tulee: $d_{keskiosa} = 0,32 \text{ m} - 0,04 \text{ m} - 0,04 \text{ m} = 0,24 \text{ m}$. Näillä arvoilla keskiosan teholliseksi lämmönjohtavuudeksi tulee: $\lambda_{eff,keskiosa} = d_{keskiosa} / R_{keskiosa} = 0,24 \text{ m} / 0,16 \text{ m}^2\text{K/W} = 1,5 \text{ W/(mK)}$. Tulos on sama, kuin taulukossa 6 oleva λ_c -arvo.

4 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin kuuden Suomessa valmistettavan ontelolaatan lämpöteknisiä ominaisuuksia. Ontelolaatoille määritettiin ensin lämmönjohtavuus, tiheys ja ominaislämpökapasiteetti stationääritilanteessa käsinlaskelmin sekä ontelolaatan lämmönvastus standardin SFS-EN 1168 laskentakaavalla. Tämän jälkeen ontelolaatoille laskettiin stationääritilanteen tehollinen lämmönjohtavuus käyttäen kaksiulotteista COMSOL Multiphysics -laskentamallia. Kaksiulotteista laskentamallia käytettiin tämän jälkeen ajasta riippuviin simuloiteihin, joiden tulosten perusteella määritettiin edelleen parhaiten pintalämpötiloja ja lämpövirran tiheyksiä vastaavat yksiulotteisten laskentamallien teholliset lämmönjohtavuudet. Yksiulotteisia laskentamalleja oli vertailussa yhdestä ainekerroksesta muodostuva laskentamalli ja kolmesta ainekerroksesta muodostuva laskentamalli. Stationääritilanteen laskentatulosten ensisijainen käyttötarkoitus on käsinlaskelmissa, kun taas ajasta riippuvien tulosten käyttötarkoitus on tyypillisesti koko rakennuksen simulointitarkasteluissa.

Tulosten perusteella SFS-EN 1168 mukainen laskentakaava ontelolaatan lämmönvastukselle vastasi hyvin laskentaohjelmalla stationääritilanteessa CAD-geometrialle laskettuja tuloksia. Käsin suorakaidegeometrialla ontelolaatoille laskettu lämmönvastus vastasi tarkemmasta mallista saatuja tuloksia myös kohtuullisesti, mutta ei yhtä hyvin kuin edellä mainittu SFS-EN 1168 mukainen laskentakaava.

Ajasta riippuvassa tilanteessa kolmesta materiaalikerroksesta koostuvan mallin tulokset olivat tarkempia yhden homogeenisen materiaalikerroksen käyttämiseen nähden. Tällöin ontelolaatan pintakerroksina käytettiin 40 mm paksuja betonikerroksia ja ontelolaatan keskiosaan asetettiin ontelolaatan neliömassasta jäljelle jäänyt osuus ja lämmönjohtavuudelle simulointitarkastelujen avulla määritetty arvo. Keskiosan ominaislämpökapasiteettina käytettiin arvoa 1000 J/(kgK). Ontelolaatan sisäosan tehollinen lämmönjohtavuus voidaan vertailujen

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

perusteella valita 2D-laskelmien tuloksista, mutta kohtuullisella tarkkuudella laskea myös SFS-EN 1168 -standardissa annetun kaavan mukaisesta lämmönvastuksesta. Jälkimmäisessä tapauksessa paksuimman ontelolaatan tulokset ovat kuitenkin tarkempia, jos keskiosalle käytetään korotettua lämmönjohtavuutta 2,2 W/(mK), SFS-EN 1168 laskentakaavalla lasketun arvon 1,9 W/(mK) sijaan.

Tampereella 19.1.2022

TAMPEREEN YLIOPISTO
Rakennustekniikka, rakennusfysiikka



Ville Jokelainen
Tutkimusapulainen, tekn. kand.



Anssi Laukkarinen
Väitöskirjatutkija, DI



Juha Vinha
Professori, TkT

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

LÄHTEET

SFS-EN 1168 + A3 (2012) Betonivalmisosat. Ontelolaatat. 71 s.

SFS-EN ISO 6946 (2017) Building components and building elements. Thermal resistance and thermal transmittance. Calculation methods. Finnish Standards Association SFS. 48 s.

SFS-EN ISO 10211 (2017) Thermal bridges in building construction. Heat flows and surface temperatures. Detailed calculations. Finnish Standards Association SFS. 63 s.

SFS-EN ISO 10456 (2008) Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Suomen standardisoimisliitto SFS. 30 s.

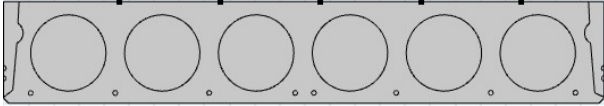
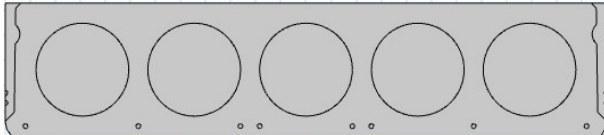
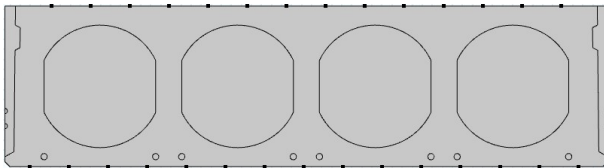
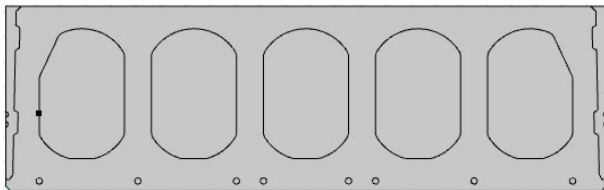
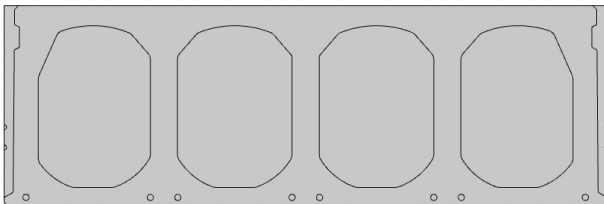
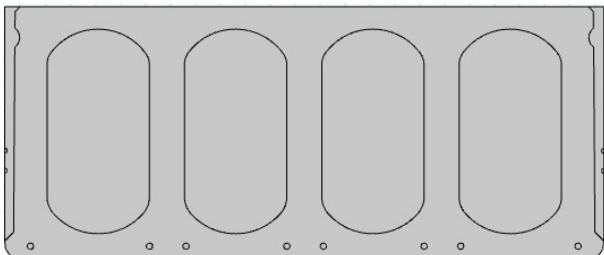
SFS-EN 12664 (2001) Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Kuivat ja kosteat tuotteet, joilla on suhteellisen matala tai matala lämmönvastus. Suomen standardisoimisliitto SFS. 69 s.

SFS-EN 13369 (2018) Betonivalmisosien yleiset säännöt. Suomen standardisoimisliitto SFS. 68 s.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

LIITE 1: Laskentamallit työssä tarkastelluista ontelolaatoista.

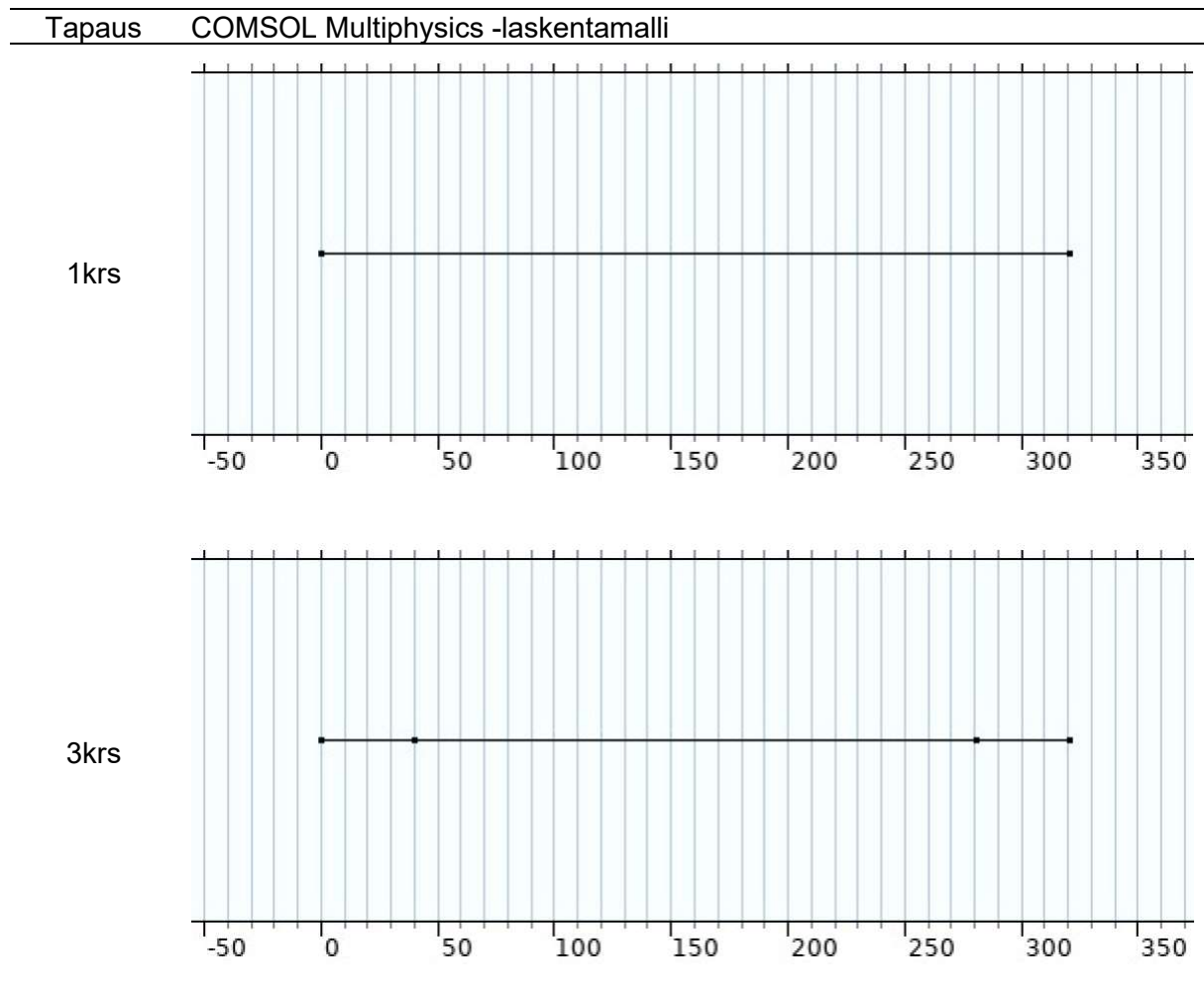
Kuvat 2D-laskentamalleista:

Ontelolaatta	COMSOL Multiphysics -laskentamalli
O20	
O27	
O32	
O37	
O40	
O50	

Yllä olevat kuvat eivät sisällä laskentamallien laskentaverkkoja. Laskelmissa käytettyjen laskentaverkkojen tiheys valittiin sellaiseksi, että laskennan tulokset eivät muuttuneet laskentaverkkoa tihennettäessä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
 Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Esimerkit 1D-laskentamalleista (O32):



Yllä olevissa kuvissa on esitetty laskentamallin materiaalikerrokset, mutta ei laskentaverkkoa (elementtiverkkoa).

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille rakenteille.
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.