

Juha Lahdes

KYLMÄN PIHAKANNEN LÄMPÖLIIKKEIDEN SIMULOINTI COMSOL MULTIPHYSICS - OHJELMALLA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Helmikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Juha Lahdes: Kylmän pihakannen lämpöliikkeiden simulointi COMSOL Multiphysics -ohjelmalla
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Helmikuu 2022

Vuodenaikojen vuoksi Suomessa pihakansien ympäristöolosuhteet vaihtelevat suuresti kalenterivuoden aikana. Ympäristöolosuhteiden muutoksista kylmien pihakansien sisäiset lämpötilajakaumat kokevat suuria muutoksia. Nämä lämpötilajakaumien muutokset aiheuttavat pihakansiin muodonmuutoksia eli pituuden muutoksia ja käyrityksiä.

Estettyinä nämä muodonmuutokset aiheuttavat pakkovoimia ja -momenteja pihakansiin ja sitä kannatteleviin pystyrakenteisiin. Estetyissä muodonmuutoksissa pakkovoimat kasvavat suuriksi jo varsin pienillä lämpötilan muutoksilla ja niiden suuruudet riippuvat pihakanta kantavien rakenteiden jäykkyyksistä. Mitä jäykempiä kantavat rakenteet ovat, sitä vähemmän ne myötäävät pihakansien lämpöliikkeistä ja sitä suuremmiksi pakkovoimat kasvavat pihakannessa. Suuret pakkovoimat voivat johtaa pihakannen ja liitosalueiden liialliseen halkeiluun.

Pihakansien liikkeiden huomioiminen suunnittelussa on tärkeää, jotta liiallisilta pihakannen, pystyrakenteiden ja liitosalueiden halkeiluilta vältytään. Pakkovoimien syntymistä voidaan rajoittaa esimerkiksi sijoittamalla jäykistävät rakenteet pihakannen keskiosalle ja irrottamalla pihakansi pystyrakenteista reuna-alueilla. Pihakansi irrotetaan kantavista rakenteista riittävän liike- ja kiertymävaran omaavilla laakereilla.

Liikevarojen mitoitus perustuu tyypillisesti pelkkään betonin lämpölaajenemiseen, jolloin pintarakenteiden vaikutus jää huomioimatta. Pintarakenteet voivat kuitenkin vaikuttaa suuresti pihakansilaataan kehittyviin keskilämpötiloihin ja pintojen väliseen lämpötilaeroon, jolloin todelliset lämpöliikkeet voivat jäädä paljon pienemmiksi mitä suunnittelussa on huomioitu. Pintarakenteiden vaikutus pihakansiin kehittyviin lämpötiloihin riippuu kuitenkin niiden paksuuksista ja materiaaliominaisuuksista.

Pihakansiin syntyviä lämpöjakaumia voidaan laskea stationääritilassa helposti käsin, mutta muuttuvissa olosuhteissa paras ja tarkin keino on lämpöjakaumien tarkastelu simulaatioiden kautta.

Tässä työssä pihakansiin syntyviä lämpöjakaumia tutkittiin simulaatioiden avulla. Työssä rakennettiin kahdeksan laskentamallia, joiden lämpötilajakaumia tutkittiin COMSOL Multiphysics -ohjelmalla tehtyjen simulaatioiden avulla. Laskentamallit koostuivat neljästä erilaisesta pintarakenteesta ja kahdesta eri laattapaksuudesta. Simulaatioissa pihakannen olosuhteita muutettiin Ilmatieteenlaitoksen energialaskennan testivuosien ja itsemodostettujen ääriolosuhde säädätojen avulla. Simuloinneissa huomioitiin ulkoilman varjölämpötilojen muutokset, pihakannen yläpinnan emittointi ympäristöön ja auringonsäteily sekä talvisimulaatiossa myös kirkkaan taivaan vastasäteilyn viilentävä vaikutus. Simulaatioilla selvitettiin pintarakenteiden ja laattapaksuuden vaikutuksia pihakannen kokemiin lämpöliikkeisiin ja pakkovoimiin.

Simulointitulosten pohjalta määritettiin pihakannen lämpöliikkeiden suuruuksia eri paksuisille laatoille eri pintarakenteilla. Saatujen tulosten mukaan kylmän pihakannen pintarakenteilla oli suuri vaikutus pihakannen kokemiin lämpöliikkeiden suuruuksiin ja siten myös estetyistä muodonmuutoksista syntyviin pakkovoimiin ja -momenteihin.

Avainsanat: Lämpökuorma, lämpöliike, pakkovoima, pihakansi, simulaatio, betoni

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ABSTRACT

Juha Lahdes: Simulation of cold yard deck thermal movements with
COMSOL Multiphysics software
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
February 2022

Due to the seasons, the environmental conditions of yard decks in Finland vary greatly during the calendar year. Due to the changes in environmental conditions, the internal temperature distributions inside the cold yard decks are experiencing major changes. These changes in temperature distributions cause deformations in the yard decks, in other words, changes in length and warping.

When prevented, these deformations cause restrained forces and moments on the yard decks and the supporting vertical structures. In the prevented deformations, the restrained forces become large with very small temperature changes and their magnitudes depend on the stiffness of the structures supporting the yard. The stiffer the load-bearing structures are, the less they yield to the thermal movements of the yard decks and the greater the restrained forces in the yard deck. High restrained forces can lead to excessive cracking of the yard deck and joints.

It is important to consider the movements of the yard decks in the design to avoid excessive cracking of the yard deck, vertical structures and joints. The generation of restraint forces can be limited, for example, by placing stiffening structures in the middle of the yard deck and free the yard deck from the vertical structures in the edge areas. The yard deck can be free from the load-bearing structures with bearings.

The sizing of moving margins is typically based only on the thermal expansion of the concrete, in which case the effect of surface structures is ignored. However, the surface structures can greatly influence the developing average temperatures in the yard deck slab and the temperature difference between the slab's surfaces, so that the actual thermal deformations can be much smaller than what has been considered in the design. However, the effect of surface structures on developing temperatures on the deck depends on their thicknesses and material properties.

The temperature distributions generated in the yard decks can be easily calculated manually in stationary mode, but in changing conditions the best and most accurate way is to examine the temperature distributions through simulations.

In this thesis, the temperature distributions generated in the yard decks were studied using simulations performed with COMSOL Multiphysics software. The calculation models consisted four different surface structures and two different slab thicknesses. In the simulations, the conditions of the yard deck were changed using the Finnish Meteorological Institute's test years for energy calculation and self-generated extreme conditions weather data. The simulations considered the changes in the ambient shadow temperatures, the emission of the upper surface of the yard deck into the ambient and solar radiation, and in the winter simulation also the cooling effect of the reradiation of the clear sky. The simulations investigated the effects of surface structures and slab thickness on the temperature movements and restraint forces experienced by the yard deck.

Based on the simulation results, the magnitudes of the yard deck thermal movements for different yard deck structures were determined. According to the results, the surface structures of the cold yard deck had a great influence on the magnitudes of the thermal movements experienced by the yard deck and thus also on the restraint forces and moments resulting from the prevented deformations.

Keywords: Thermal load, thermal movement, restraint force, yard deck, simulation, concrete

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Sweco Rakennetekniikka Oy:lle. Työn ohjaajana toimi Risto Karjalainen Turun toimistosta. Työn tarkastajina ja ohjaajina toimivat professori Anssi Laaksonen ja väitöskirjatutkija Ulla Kytölä Tampereen yliopistosta.

Haluan kiittää työn ohjaajia, tarkastajia ja kaikkia, jotka neuvoillaan ja ideoillaan edistivät työni tekoa. Kiitos Sweco Rakennetekniikka Oy:lle ja entiselle Optiplan Oy:lle mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta sekä laadukkaista työympäristöistä, joissa sain työtäni tehdä. Opiskelu-urani loppuhetkillä haluan kiittää opiskelijaystäviäni mahtavasta opiskeluajasta. Lopuksi haluan kiittää vaimoani Karoliinaa tuesta ja kannustuksesta, josta olen saanut nauttia koko opiskelujeni ajan.

Turussa, 01.02.2022

Juha Lahdes

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Rajaukset ja tavoitteet	2
1.3 Tutkimuksen rakenne	3
2. PIHAKANNELLISET PYSÄKÖINTIHALLIT	4
2.1 Pysäköintihallin mitat	4
2.2 Pysäköintihallin rakenteet	7
2.2.1 Pilarijako	7
2.2.2 Pihakansi	9
3. PIHAKANNEN MATERIAALIT	11
3.1 Betoni	11
3.1.1 Betonin lujuus	11
3.1.2 Viruma	14
3.1.3 Kutistuma	19
3.2 Teräkset	21
3.2.1 Betoniteräkset	21
3.2.2 Jänneteräkset	22
4. LÄMMÖN JOHTUMINEN JA LÄMPÖSÄTEILY	24
4.1.1 Lämmön siirtymismuodot	24
4.1.2 Lämmön johtuminen	24
4.1.3 Lämpösäteily	29
5. PIHAKANNEN LÄMPÖLIIKKEET	37
5.1 Lämpötilakuormat Eurokoodissa	37
5.1.1 Rakennuksille	37
5.1.2 Silloille	39
5.2 Lämpötilamuodonmuutokset ja pakkovoimat	42
5.2.1 Tasainen lämpötilanmuutos	42
5.2.2 Lineaarisesti jakautunut lämpötilajakauma	44
5.2.3 Epälineaarisesti jakautunut lämpötilajakauma	46
5.2.4 Pakkovoimien yhdistelmä	49
5.3 Pakkovoimat eurokoodissa	50
5.4 Teräsbetonilaatan kestävyys ja jäykkyyden riippuvuus halkeilusta	52
5.5 Pihakannen liitosten vaikutus pakkovoimiin	55
5.6 Tutkimustuloksia betonilaattojen lämpökuormittamisesta	57
6. ILMATIETEENLAITOKSEN TESTIVUODET	63
6.1 Testivuosien esittely	63
6.2 Päästöskenaariot	65
6.3 Testivuosien epävarmuudet	66
7. PIHAKANNEN SIMULOINTI	68
7.1 COMSOL Multiphysics -ohjelman esittely	68

7.1.1	Simuloinnin kulku	68
7.2	Lähtöarvot ja laskentamalli	69
7.2.1	Testivuosisimulaatioiden olosuhteet	72
7.2.2	Ääriolosuhdesimulaatioiden olosuhteet	74
8.	TULOKSET	76
8.1	Testivuosisimulaatiot	76
8.2	Ääriolosuhdesimulaatiot	77
8.3	Simulaatiotulosten herkkyyshanalyysi	78
8.3.1	Laskentaverkon riittävän tiheyden varmistaminen	82
9.	TULOSTEN ANALYSOINTI	84
9.1	Keskilämpötilat	84
9.1.1	Testivuosisimulaatiot	84
9.1.2	Ääriolosuhdesimulaatiot	86
9.2	Pintojen lämpötilaerot	88
9.2.1	Testivuosisimulaatiot	88
9.2.2	Ääriolosuhdesimulaatiot	89
9.3	Pihakansien kokonaisuodonna muutokset	92
9.4	Simulaatiotulosten vertailua standardin EN 1991-1-5 ohjeiden mukaan laskettuihin tuloksiin RFEM-ohjelmalla	93
10.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	96
10.1	Keskeiset tutkimustulokset	96
10.2	Tutkimustulosten arviointi	97
10.3	Jatkotutkimusaiheet	98
	LÄHTEET	99
	LIITE 1: LASKENTAMALLIT	101
	LIITE 2: HALLIN SISÄLÄMPÖTILAT TESTIVUOSISIMULAATIOISSA	103
	LIITE 3: ÄÄRIOLOSUHDESIMULAATIOIDEN SÄÄDATAT	106
	LIITE 4: TESTIVUOSIEN SIMULAATIOTULOKSET	109
	LIITE 5: ÄÄRIOLOSUHDESIMULAATIOIDEN TULOKSET	121
	LIITE 6: LAATTOJEN LÄMPÖTILAJAUKAUMAT KESÄN ÄÄRIOLOSUHDESIMULAATIOIDEN VIIMEISELTÄ VUOROKAUDELTA	129
	LIITE 7: LAATAN LÄMPÖJAKAUMAN LASKENTA STANDARDIN EN 1991-1-5 MUKAAN	133

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Vinopysäköinti kapealla ajoväylällä [1]</i>	<i>5</i>
Kuva 2.	<i>Pysäköinti kaksisuuntaisella ajoväylällä [1]</i>	<i>5</i>
Kuva 3.	<i>Pysäköintihallin toteutus esimerkkejä [muokattu lähteestä 1]</i>	<i>6</i>
Kuva 4.	<i>Pilarilaatta, palkkikaistoilla vahvennettu pilarilaatta ja pilarilaatta pilarin sienivahvennoksilla [4]</i>	<i>7</i>
Kuva 5.	<i>Elementtirakenteisen pysäköintihallin esimerkkirunkoja: kuorilaatta ja ontelolaatta pilari-palkkirunko [3]</i>	<i>8</i>
Kuva 6.	<i>Paikalla valetun pysäköintirakennuksen runkoesimerkkejä: pilarilaatta ja palkkikaistoilla vahvennettu pilarilaatta [4]</i>	<i>8</i>
Kuva 7.	<i>Kylmän pihakannen pintarakenteiden esimerkkejä</i>	<i>10</i>
Kuva 8.	<i>Betonin jännitys-muodonmuutosriippuvuus epälineaarisisä rakennanalyysissä [16]</i>	<i>14</i>
Kuva 9.	<i>Betonin viruman vaikutus muodonmuutokseen vakiojännityksessä [muokattu lähteistä 11, 18]</i>	<i>15</i>
Kuva 10.	<i>Virumaluvun määrittäminen normaaleissa ympäristöolosuhteissa olevalle betonille [16]</i>	<i>16</i>
Kuva 11.	<i>Kuumavalssatun (vasemmalla) ja kylmämuokatun betoniteräksen periaatteelliset jännitys-venymäkuvaajat [16]</i>	<i>22</i>
Kuva 12.	<i>Jänneteräksen periaatteellinen jännitys-venymäkuvaaja [16]</i>	<i>23</i>
Kuva 13.	<i>Lämmön siirtymismuodot [12]</i>	<i>24</i>
Kuva 14.	<i>Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia ($W/(m^{\circ}C)$) [12]</i>	<i>25</i>
Kuva 15.	<i>Rakennusaineiden karkea lämmönjohtavuuden riippuvuus kosteuden pitoisuudesta ja kuivatiheydestä [12]</i>	<i>26</i>
Kuva 16.	<i>Lämpövirran tiheys yksidimensionaalisessa tapauksessa [12]</i>	<i>26</i>
Kuva 17.	<i>Lämmönjohtumisen yksidimensionaalinen epästationääritapaus [12]</i>	<i>28</i>
Kuva 18.	<i>Eri säteilylaatujen aallonpituuksia [12]</i>	<i>30</i>
Kuva 19.	<i>Säteilyteho kohtisuoraan tarkasteltavaan pintaan [12]</i>	<i>31</i>
Kuva 20.	<i>Auringon säteilyn eri komponentit ja niiden aallonpituudet [12]</i>	<i>32</i>
Kuva 21.	<i>Pinnan säteilysuureita [12]</i>	<i>33</i>
Kuva 22.	<i>Mustan pinnan ja todellisten pinnan emittoima säteilyn intensiteetti eri suuntiin [12]</i>	<i>34</i>
Kuva 23.	<i>Lämpötilajakauman peruskomponentit [7]</i>	<i>37</i>
Kuva 24.	<i>Suomen vuotuisia ilman minimi- ja maksimivarjolämpötilojen isotermejä [8]</i>	<i>39</i>
Kuva 25.	<i>Betonilaatan epälineaariset lämpötilajakaumat lämpenemisessä ja jäähtymisessä [7]</i>	<i>41</i>
Kuva 26.	<i>Vapaasti tapahtuva laatan lämpötilamuodonmuutos [21]</i>	<i>43</i>
Kuva 27.	<i>Laatan estetty lämpötilamuodonmuutos [21]</i>	<i>43</i>
Kuva 28.	<i>Osittain estetty laatan lämpötilamuodonmuutos rajallisesti jäykällä tuilla [21]</i>	<i>44</i>
Kuva 29.	<i>Lämpötilakäyritymä vapaasti tuetulla laatalle ($T_2 > T_1$) [21]</i>	<i>45</i>
Kuva 30.	<i>Sivusuunnassa jäykästi tuettu laatta lineaarisesti jakautuneen lämpötilakuorman alaisena [21]</i>	<i>45</i>
Kuva 31.	<i>Jäykästi tuettu laatta lineaarisesti jakautuneen lämpötilakuorman alaisena [21]</i>	<i>46</i>
Kuva 32.	<i>Osittain jäykästi tuettu laatta lineaarisesti jakautuneen lämpötilakuorman alaisena [21]</i>	<i>46</i>
Kuva 33.	<i>Vapaasti tuettuun palkkiin epälineaarisisä lämpöjakaumasta syntyvä sisäinen primäärijännitys- ja venymätila [29]</i>	<i>47</i>
Kuva 34.	<i>Lämpöjakauman muuttaminen lämpögradientiksi ja laskennassa käytettävät parametrit</i>	<i>48</i>

Kuva 35.	<i>Laatan jännitys jakauma, kun lämpölaajeneminen ja -käyristyminen ovat estetty (kuvassa laatan alapinta on lämpimämpi kuin yläpinta) [21].....</i>	<i>49</i>
Kuva 36.	<i>Pakkovoimakertoimet, kun kahden seinän välissä on jäykästi kiinnitetty laatta [22]</i>	<i>51</i>
Kuva 37.	<i>Betonipoikkileikkauksen merkinnät ja muodonmuutosjakauma haljenneessa poikkileikkauksessa, sekä momentin likimääräinen riippuvuus vetoraudoituksen jännityksestä [muokattu lähteestä 18].....</i>	<i>55</i>
Kuva 38.	<i>Laattojen lämpötilakuormituskokeissa käytetty kalusto [24].....</i>	<i>58</i>
Kuva 39.	<i>Tutkimuksen vaiheen 1 testilaatan TS5 tulokset, sekä kaikkien laattojen taipumat.....</i>	<i>59</i>
Kuva 40.	<i>Tutkimuksen vaiheen kaksi testilaatan TS8 tuloksia [24].....</i>	<i>61</i>
Kuva 41.	<i>Testivuoden TRY2020 lämpötilat Vantaalla (vyöhyke I)</i>	<i>63</i>
Kuva 42.	<i>Testivuoden TRY2020 kokonaissäteily ($I_{sol,N} + I_D$) vaakapinnalle Vantaalla (vyöhyke I).....</i>	<i>64</i>
Kuva 43.	<i>Energialaskennan testivuoden TRY2020 tyyppikuukausien vuosiluvut vyöhykkeittäin [14].....</i>	<i>65</i>
Kuva 44.	<i>Hiilidioksidin maailman laajuisten päästöjen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kehitys kolmen eri päästöskenaarion mukaan [14].....</i>	<i>66</i>
Kuva 45.	<i>Keskilämpötilat kuukausittain eri testivuosina Vantaalla päästöskenaarion RCP4.5 mukaan [14].....</i>	<i>66</i>
Kuva 46.	<i>200 mm paksun pihakansilaatan rakennetyypit.....</i>	<i>70</i>
Kuva 47.	<i>300 mm paksun pihakansilaatan rakennetyypit.....</i>	<i>70</i>
Kuva 48.	<i>Hallin sisälämpötila testivuoden TRY2020 simulaatioissa</i>	<i>74</i>
Kuva 49.	<i>Herkkyystestin tulokset laatan keskilämpötilan ääripäissä, 200 mm laatta ilman pintarakenteita</i>	<i>79</i>
Kuva 50.	<i>200 mm laatta asfalttipintarakenteella, herkkyystestin tulokset keskilämpötilan ääripäissä</i>	<i>80</i>
Kuva 51.	<i>200 mm laatta kiveyspintarakenteella, herkkyystestin tulokset keskilämpötilan ääripäissä</i>	<i>80</i>
Kuva 52.	<i>200 mm laatta nurmikkopintarakenteella, herkkyystestin tulokset keskilämpötilan ääripäissä</i>	<i>81</i>
Kuva 53.	<i>Pihakannen 200 mm paksun laatan muodonmuutokset rakennetyypeittäin testivuoden TRY2020 aikana ($T_0=10^{\circ}\text{C}$).....</i>	<i>85</i>
Kuva 54.	<i>200 mm paksun pintarakenteettoman pihakansilaatan lämpökartta kesällä, kun pintojen lämpötilaero on suurimmillaan sekä lämpötilajakaumat ääriolosuhdesimulaation viimeiseltä vuorokaudelta 2 h välein</i>	<i>90</i>
Kuva 55.	<i>Vapaasti tuettujen laskentamallien tason suuntaiset muodonmuutokset (mm)</i>	<i>94</i>
Kuva 56.	<i>Vapaasti tuettujen laskentamallien taipumat (mm)</i>	<i>94</i>
Kuva 57.	<i>Jäykästi tuettujen laskentamallien aksiaaliset normaalivoimat (kN)</i>	<i>94</i>
Kuva 58.	<i>Vapaasti tuettujen laskentamallien leikkausvoimat (kN)</i>	<i>95</i>
Kuva 59.	<i>Vapaasti tuettujen laskentamallien taivutusmomentit (kNm).....</i>	<i>95</i>
Kuva 60.	<i>Jäykästi tuettujen laskentamallien taivutusmomentit (kNm).....</i>	<i>95</i>

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	Pysäköintihallin ajoväylän ja kahden pysäköintiruuturivin tilamitoitus.....	5
Taulukko 2.	Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet [16].....	12
Taulukko 3.	Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien analyyttisiä kaavoja [16,17].....	13
Taulukko 4.	Kertoimen k_n arvoja rakenteen eri poikkileikkauksen muunnetuille korkeuksille [16].....	21
Taulukko 5.	Kuivumiskutistuman kertoimet [16].....	21
Taulukko 6.	Rakenneosan sisä- ja ulkokuoren pintavastukset [9].....	27
Taulukko 7.	Esimerkkejä erilaisten pintojen emissiviteeteistä huoneenlämpötilassa (pitkäaaltainen säteily) [12].....	34
Taulukko 8.	Maanpäällisten rakenteiden suuntaa antavia lämpötiloja kesällä ja talvella [7].....	38
Taulukko 9.	Korjauskertoimen k_{sur} arvoja eri laattapäällysteille.....	40
Taulukko 10.	Kuvassa 36 näkyvien seinien keksivyyöhykkeiden pakkovoimakertoimia [22].....	51
Taulukko 11.	Tyypillisten betoniholvien rakennuslaakereilta vaadittavat liikevarat eri olosuhteissa [muokattu lähteestä 27].....	56
Taulukko 12.	Tutkimuksen vaiheen kaksi kaikkien testilaattojen tulokset [24].....	60
Taulukko 13.	Simuloinneissa käytetyt materiaaliominaisuudet.....	71
Taulukko 14.	200 mm laatan keskilämpötilat nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa.....	76
Taulukko 15.	300 mm laatan keskilämpötilat nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa.....	76
Taulukko 16.	Suurin lämpötilaero laatan pintojen välillä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa.....	76
Taulukko 17.	Laatan suurin keskilämpötila kesällä ja pienin keskilämpötila talvella.....	77
Taulukko 18.	Suurin laatan pintojen välille syntynyt lämpötilaero (°C).....	77
Taulukko 19.	standardin EN 1991-1-5 mukaan lasketut 200 mm laatan keskilämpötilat ja pintojen lämpötilaerot (°C).....	78
Taulukko 20.	Suuren vaihtelun ja alkuperäisen laskentamallin tulosten vertailu.....	82
Taulukko 21.	Laskentaverkon tiheyden vaikutus laskentatuloksiin.....	82
Taulukko 22.	200 mm laatan keskilämpötilojen ääriarvojen muutos (°C) vuoteen 2020 verrattuna.....	84
Taulukko 23.	300 mm laatan keskilämpötilojen ääriarvojen muutos (°C) vuoteen 2020 verrattuna.....	84
Taulukko 24.	Pintarakenteiden vaikutus 200 mm laatan muodonmuutoksiin ($T_0=10^\circ\text{C}$).....	85
Taulukko 25.	Pintarakenteiden vaikutus 300 mm laatan muodonmuutoksiin ($T_0=10^\circ\text{C}$).....	86
Taulukko 26.	Pintarakenteiden vaikutus kokonaismuodonmuutoksiin.....	86
Taulukko 27.	Pihakansilaatan tason suuntaiset pituuden muodonmuutokset ääriolosuhteissa ($T_0=10^\circ\text{C}$).....	87
Taulukko 28.	Aksiaalinen jännitys (MPa) pihakannessa estetystä pituuden muodonmuutoksesta ($T_0=10^\circ\text{C}$).....	87
Taulukko 29.	Aksiaalinen pakkovoima (kN/m) pihakannessa estetystä pituuden muodonmuutoksesta ($T_0=10^\circ\text{C}$).....	87
Taulukko 30.	Laatan käyritymä pintojen lämpötilaerosta ($\times 10^{-4}$ 1/m).....	91
Taulukko 31.	Laattaan syntyvä vakiopakkomomentti (kNm/m) ääriolosuhdesimulaatioiden perusteella estetystä kiertymästä.....	91

<i>Taulukko 32. Laatan huippujännitykset (MPa) pintojen tasolla estetystä käyritymästä.....</i>	<i>91</i>
<i>Taulukko 33. Pihakansien kokonaismuodonmuutokset rakenne- ja pintarakennetyypeittäin</i>	<i>93</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EN	eurooppalainen suunnittelustandardi
eurokoodi 2	standardi SFS EN 1992-1-1
FEM	elementtimenetelmä (Finite Element Method)
RCP	päästöskenaario (Representative Concentration Pathways)
RFEM	FEM-ohjelma
TRY2020	energiälaskennan testivuosi
α	absorptiokerroin (pitkääaltainen), pituuden lämpölaajenemiskerroin
α_{sol}	absorptiokerroin (lyhytaaltainen)
β	auringon korkeuskulma
β_{cc}	betonin iästä riippuva kerroin
σ	Stefan-Bolzmännin vakio, jännitys
ε	emissiviteetti
ε_{av}	rakenneseosan keskimääräinen muodonmuutos
ε_{az}	todellinen muodonmuutos korkeudella z
ε_c	betonin puristuma
ε_{ca}	betonin sisäinen kutistuma
$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0)$	betonin viruma
ε_{cd}	betonin kuivumiskutistuma
ε_{cs}	betonin kokonaiskutistuma
ε_{iz}	pakkovoiman aiheuttama muodonmuutos korkeudella z
ε_{θ}	käyritymästä johtuva suhteellinen laatan päiden etäisyyden lyheneminen
ε_T	suhteellinen muodonmuutos keksilämpötilan muutoksesta
ε_{uk}	betoniteräksen tai jänneteräksen suurinta voimaa vastaavan venymän ominaisarvon
ε_{sky}	taivaan emissiviteetti
ζ	halkeilun jakaumakerroin
$\varphi(t, t_0)$	virumaluku hetkien t ja t_0 välillä
$\varphi(\infty, t_0)$	virumaluvun loppuarvo
$\varphi_{nl}(\infty, t_0)$	epälineaarisen virumaluvun loppuarvo
φ_0	nimellinen virumaluku
λ	lämmönjohtavuus, säteilyn aallonpituus
θ	käyritymä
ρ	tiheys, heijastuskerroin
ρ_{1000}	relaksaatiohäviö 1000 tunnin kuluttua jännittämisestä
τ	lämpösäteilyn läpäisykerroin
Φ	lämpövirta
ΔL	pituuden muutos
ΔT	lineaarisesti jakaantuneen ja epälineaarisesti jakautuneen lämpötilaeron summa
ΔT_E	epälineaarisesti jakautunut lämpötilaero
ΔT_M	lineaarinen lämpötilaero
$\Delta T_{M,cool}$	jäähtymistä vastaava lineaarinen lämpötilaero
$\Delta T_{M,heat}$	lämpenemistä vastaava lineaarinen lämpötilaero
$\Delta T_{N,con}$	sillan suurinta kutistumista vastaava keskilämpötilan muutos
$\Delta T_{N,exp}$	sillan suurinta laajenemista vastaava keskilämpötilan muutos
ΔT_{pinta}	pintojen lämpötiloista syntyvä lämpögradientti (lineaarinen/epälineaarinen)
ΔT_u	keskilämpötilan muutoksen osuus

c	ominaislämpökapasiteetti, valon nopeus
f_{ck}	betonin lieriölujuuden ominaisarvo
$f_{ck,cube}$	betonin kuutiolujuuden ominaisarvo
f_{cm}	betonin lieriölujuuden keskiarvo
f_{ctm}	betonin keskimääräinen vetolujuus
f_{pk}	jänneteräksen vetolujuuden ominaisarvo
$f_{p0,1k}$	jänneteräksen 0,1-rajan ominaisarvo
f_t	betoniteräksen vetolujuus
f_{yk}	betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
$f_{0,2k}$	betoniteräksen 0,2-rajan ominaisarvo
h_0	poikkileikkauksen muunnettu korkeus
k_{sur}	lineaarista lämpötilaeroa laskettaessa käytettävä päällysteestä tai tukikerroksesta riippuva kerroin
q	lämpövirran tiheys
q_{rad}	pintojen välisen lämpösäteilyvirran tiheys
s	sementin luokasta riippuva kerroin
t_T	betonin korjattu ikä
t_0	betonin kuormittamisikä
x_c	puristuspinnan korkeus
E	pinnan emittoima säteilyteho
E_b	ideaalisen mustan pinnan emittoima säteilyteho
E_c	betonin tangentialmoduuli
$E_{c,eff}$	betonin tehollinen kimmokerroin
E_{cm}	betonin sekanttimoduuli (kimmokerroin)
$(EI)_I$	halkeilemattoman betonileikkauksen taivutusjäykkyys
$(EI)_{II}$	taivutusjäykkyys halkeaman kohdalla
E_p	jänneteräksen kimmokertoimen mitoitusarvo
E_s	betoniteräksen kimmokertoimen mitoitusarvo
I	neliömomentti
I_{atm}	ilmakehästä pintaan tuleva säteilyteho
I_D	pintaan tuleva diffuusisäteilyteho, hajasäteily
I_{sky}	pintaan tuleva taivaan vastasäteilyteho
I_{sol}	auringon säteilyteho säteilyn suunnassa
$I_{sol,N}$	pintaan kohtisuoraan tuleva auringon säteilyteho
I_{sur}	maasta ja muista näkyvistä kohteista pintaan tuleva säteilyteho
I_{tot}	pintaan tuleva kokonaissäteily
I_{II}	haljenneen betonipoikkileikkauksen neliömomentti
J	pinnasta lähtevä kokonaissäteilyteho
L_0	alkuperäinen pituus
M_{cr}	betonirakenteen halkeilumomentti
N_{cr}	betonirakenteen halkeilunormaalivoima
Q	lämpöenergia
R	lämmönvastus
R_{ax}	kerroin, joka määrittelee tarkasteltavaan rakenneosaan liittyvistä rakenneosista aiheutuvan aksiaalisen pakkovoiman asteen
R_m	kerroin, joka määrittelee tarkasteltavaan rakenneosaan liittyvistä rakenneosista aiheutuvan pakkomomentin asteen
T_e	ulkoilman lämpötila
$T_{e,max}$	sillan korkein keskilämpötila
$T_{e,min}$	sillan matalin keskilämpötila
T_{max}	varjossa mitattu ilman maksimilämpötila
T_{min}	varjossa mitattu ilman minimilämpötila
T_{out}	ulkopuolisen ympäristön lämpötila
T_s	pinnan lämpötila

T_{sky}
 T_0
 W
 X_{II}

taivaan tehollinen lämpötila
alkulämpötila rakenneosan tai sen asennuksen valmistuessa
taivutusvastus
haljenneen betonipoikkileikkauksen puristuspinnan korkeus

1. JOHDANTO

Tämän johdannon on tarkoitus antaa lukijalle kokonaiskäsitys diplomityön sisällöstä. Aluksi käydään läpi työn taustaa. Sitten kerrotaan työn rajauksista ja tavoitteista. Lopuksi käydään läpi työn rakenne.

1.1 Tutkimuksen tausta

Ulkoilmaan yhteydessä olevaan betonirakenteeseen kohdistuu lämpötilakuormia sen ympäristöstä. Lämpökuormat vaikuttavat betonirakenteen lämpöjakauman muotoon. Lämpöjakauman muutokset rakenteessa aiheuttavat aina siihen muodonmuutoksia. Muodonmuutokset havaitaan betonirakenteen liikkeinä, eli rakenteen venyminä, kutistumina, kiertyminä ja taipumina. Jos muodonmuutoksia estetään tapahtumasta, syntyy betonirakenteisiin pakkovoimia, jotka aiheuttavat rakenteisiin suuria jännityksiä.

Pihakannet kohtaavat elinkaartensa aikana ympäristöolosuhteiden muutoksista johtuvia suuria keskilämpötilavaihteluja. Lisäksi pihakansilaatan pintojen välille syntyy lämpötilaeroja sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroista ja auringon säteilyenergian lämmittäessä pihakannen yläpintaa. Erityisesti kylmien eli eristämättömien pihakansien lämpötilavaihteluista syntyvät lämpöliikkeet voivat herkästi kasvaa suuriksi, jolloin ne on huomioitava suunnittelussa.

Vapaasti tuetuissa pihakansissa lämpökuormat aiheuttavat pihakansiin muodonmuutoksia, jotka näkyvät kannen tason suuntaisina liikkeinä ja kannen taipumina. Pihakannen keskilämpötilanmuutos aiheuttaa pihakannen tasonsuuntaista pituuden kasvua ja lyhentymistä, kun taas pintojen lämpötilaero johtaa pihakannen kaareutumiseen. Kun muodonmuutokset pääsevät tapahtumaan vapaasti pihakanteen ei synny merkittäviä jännityksiä eikä halkeilua. Estettyinä muodonmuutokset aiheuttavat pakkovoimia ja -momentteja pihakanteen sekä sitä tukeviin pystyrakenteisiin. Pakkovoimien suuruus riippuu laattaa kantavien pystyrakenteiden jäykkyydestä. Pakkovoimat aiheuttavat laattaan suuria jännitystiloja, jotka voivat johtaa esimerkiksi pihakannen halkeiluun. Eurokoodin mukaan ilmaston lämpötilakuormat, jotka aiheuttavat rakennuksessa lämpötilan muutoksista, tulee ottaa huomioon rakennuksia suunniteltaessa silloin, kun on mahdollista, että murto- tai käyttörajatila ylittyy lämpöliikkeen tai lämpöjännitysten takia. Sen mukaan lämpötilakuormat tulee luokitella muuttuviksi ja välillisiksi kuormiksi [7].

Jotta pihakannen halkeilu voidaan minimoida ja pihakansien suunnittelu voidaan tehdä oikein, tulee pihakannen lämpöliikkeiden suuruus tuntee. Lämpöliikkeiden määrittäminen voidaan tehdä laskennallisesti, taulukkoarvoja käyttämällä tai simuloimalla rakenne haluissa olosuhteissa.

Pakkovoimia voidaan hallita esimerkiksi liikuntasaumoilla ja pihakannen irrotuksilla kantavista rakenteista. Myös jäykkien liitosten käyttö on mahdollisia ja tarpeellisia rakennusten jäykistyksen kannalta. Jäykkiä liitoksia voidaan käyttää, jos niiden vaikutukset otetaan huomioon mitoituksessa, esimerkiksi käyttämällä jäykkyydeltään pieniä kantavia pystyrakenteita, jotka sallivat pihakannen liikkeitä tai sijoittamalla jäykistävät rakenteet niin, että ne sallivat pihakannen lämpöliikkeet mahdollisimman vapaasti. Tukirakenne tulee tällöin mitoittaa kyseistä siirtymästä syntyvälle voimalle [33].

1.2 Rajaukset ja tavoitteet

Kuten edellä kerrottiin betonirakenteen lämpöliikkeet ja pakkovoimat määräytyvät siihen lämpötilakuormista muodostuvien lämpöjakaumien mukaan. Tämän työn tavoite on selvittää erilaisiin kylmiin pihakansirakenteisiin ympäristön vaikutuksista syntyviä lämpöjakaumia COMSOL Multiphysics -ohjelmalla toteutetuilla simulaatioilla. Simulaatiotulosten perusteella lasketaan erilaisille pihakansille lämpöliikkeiden ja -rasitusten suuruuksia.

Tässä työssä suoritetaan kahden tyyppisiä simulaatioita. Ensimmäisissä simulaatioissa pihakansirakenteita rasitetaan Ilmatieteen laitoksen testivuosien säädätällä kokonaisen vuoden ajan nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa. Testivuosisimulaatioiden tarkoitus on tutkia pihakannen pintarakenteiden vaikutusta laattaan syntyviin lämpöjakaumiin. Kokonaisen vuoden kestävällä simulaatiolla saadaan paremmin olosuhteiden muutokset esiin, jolloin tulokset ovat luotettavampia. Lisäksi testivuosisimulaatioilla tutkitaan tulevaisuuden ilmaston vaikutuksia pihakansien lämpöliikkeisiin. Työssä käytettävät energialaskennan testivuosien TRY2020 kuukaudet ovat koottu tarkasteluviikkojen kuukausista, jotka ovat edustaneet parhaiten keskimääräisiä ilmasto-oloja rakennusten energiatarpeen laskennan kannalta, eikä niihin sisälly sään ääriolosuhteita esimerkiksi lämpötilojen osalta. Ääri-ilmiöistä johtuvat lämpötilakuormat voivat siis olla paljon suurempia kuin tämän työn testivuosisimulaatioissa käytetyt lämpötilakuormat. Testivuosisimulaatiot tehdään I-vyöhykkeen, eli Vantaan säädätään pohjautuen, 2020-, 2030- ja 2050-luvun ilmastoissa. Tulevaisuuden ilmastoina käytetään päästöskenaario RCP4.5 mukaisia ilmastodatoja.

Työn toisen vaiheen simulaatioissa pihakansirakenteita rasitetaan itse kehitetyillä ääriolosuhdesäädätöillä, jotka perustuvat standardin SFS-EN 1991-1-5 kansallisen liitteen

vuotuisten minimi- ja maksimivarjotilapötilöjen isotermikarttoihin, sekä kesällä vaakapinnoille saapuvaan maksimilämpösäteilytehoon. Ääriolosuhdesimulaatioilla tutkitaan pihakannen laattaan syntyviä lämpöjakaumia ääriolosuhteissa ja tuloksia verrataan standardin SFS-EN 1991-1-5 laskentamenetelmillä saatuihin tuloksiin. Simulaatiotuloksilla määritetään pihakansien tason suuntaisten lämpöliikkeiden ääriarvot.

Lisäksi työ sisältää kirjallisuuskatsauksen lämpöliikkeiden ja pakkovoimien teoriaan ja se esittelee lyhyesti aiheeseen liittyvän tutkimuksen. Työn toinen tavoite onkin muodostaa kattava teoriapaketti betonirakenteiden lämpökuormien, pakkovoimien ja lämpöliikkeiden määrittämisestä.

Tämä työ keskittyy pihakansiin lämpökuormista aiheutuviin muodonmuutoksiin ja pakkovoimiin. Muita muodonmuutoksia aiheuttavia ilmiöitä, kuten betonin virumista ja kutistumista käydään työssä vain pintapuolisesti läpi. Myöskään pihakansien mitoitusta ei käsitellä työssä, vaan tutkimus rajoittuu lämpöliikkeiden ja -rasitusten laskentaan. Simulaatioissa pihakansien laskentamalleissa käytetään kahta laattapaksumutta, joiden voidaan ajatella edustavan teräsbetonilaattaa, jälkijännitettyä laattaa ja kuorilaattaa pintavaluineen. Ontelolaattatyyppi rajataan pois simulaatiotarkasteluista.

1.3 Tutkimuksen rakenne

Työ jakaantuu teoria- ja tutkimusosaan. Työn teoriaosuudessa (kappaleet 2–5) tutustutaan pysäköintihallien tilamitoitukseen, betonirakenteiden lämpökuormien määrittämiseen sekä lämpöliikkeiden ja -rasitusten laskentaan kirjallisuuden ja standardien mukaan. Lisäksi teoriaosuudessa esitellään lämmönsiirtymismuodoista säteilyn ja johtumisen teoriaa sekä tutkimustuloksia betonilaattojen lämpökuormittamisesta laboratorio-olosuhteissa.

Työn tutkimusosa (kappaleet 6–9) käsittelee työssä tehtävää simulaatiotutkimusta, jossa käytetään COMSOL Multiphysics -simulaatio-ohjelmaa (versio 5.6). Tutkimusosassa käydään aluksi läpi lyhyesti simulaatio-ohjelman esittely sekä simuloinnin lähtötiedot ja laskentamallit. Tämän jälkeen esitellään simulaatiotuloksina saadut pihakansien lämpöjakaumat ja niiden pohjalta tehdyt laskelmat ja analyysit.

Lopuksi kappaleessa 10 käydään läpi työn keskeisimpien tutkimustulosten ja analyysien yhteenveto ja pohdinnat.

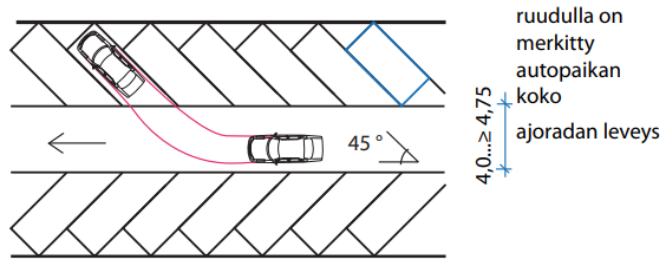
2. PIHAKANNELLISET PYSÄKÖINTIHALLIT

Pihakannella tarkoitetaan betonista yläpohjarakennetta, joka tukeutuu sen alapuolisiin rakenteisiin. Pihakansi koostuu kantavasta laatasta ja sen yläpuolisista pintarakenteista. Koska pihakansi toimii sitä sivuavan rakennuksen pihan pohjana, sen pintarakenteet voivat vaihdella nurmialueista asfalttiin. Pihakannella kävellessään käyttäjä ei aina tajua-kaan kävelevänsä rakennetun alustan päällä. Ominaista pihakansille on sen yläpuoliset suuret kuormat pintarakenteista ja hyötykuormista. Pihakansia käytetään yleensä pysäköintihallin päällä kantavana rakenteena esimerkiksi asuin-, liike- ja toimistorakennusten yhteydessä. Pysäköintihalli rakennetaan tyypillisesti niin, että hallista on suora kulkuyhteys viereisen rakennuksen kellarikerrokseen, jolloin pysäköintihalli sijaitsee monesti maanpinnan alapuolella. Tässä kappaleessa tutustutaan pysäköintihallin tyypillisiin mitoihin ja rakenteisiin.

2.1 Pysäköintihallin mitat

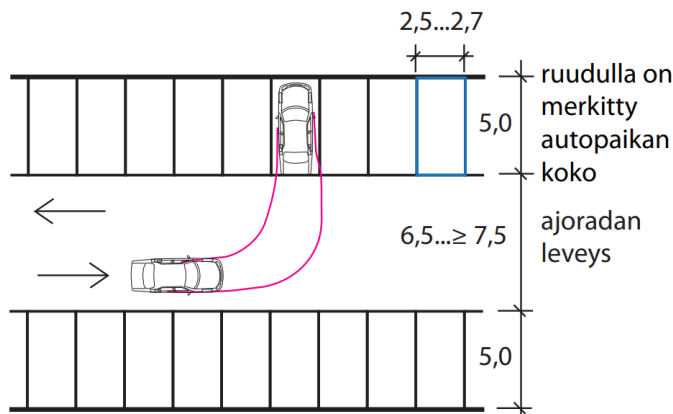
Rakennusten yhteyteen rakennettavien pysäköintihallien mitoitussovelletaan pysäköintilaitosten mitoitusohjeita, vaikka ne rajoittuvat yleensä vai yhteen kerrokseen ja niiden muodot saattavat olla pysäköintilaitoksia moninaisempia. Pysäköintihallien mitoitus perustuu pysäköintiruutujen ja ajoväylien tarvitsemaan tilaan. Autopaikkojen vähimmäislukumäärä voidaan määrätä kunnan asemakaavassa. Usein suunnittelun tavoitteena on maksimaalinen pysäköintiruutujen määrä pysäköintihallille varattuun tilaan nähden [3]. Pysäköintihallin keskimääräinen tilantarve on noin 25–30 m²/parkkiruutu [1].

Lähtökohta suunnittelussa tulisi olla, että jokaiselle parkkiruudulle pääsee kaikkialta pysäköintihallista ilman, että autolla tarvitsee peruuttaa. Ajoväylät voivat olla joko kaksi- tai yksisuuntaisia. Ajoväylien leveyksien suunnittelussa otetaan huomioon henkilöautojen vaatima kääntymistila ajettaessa pysäköintiruutuun. Kääntymistilantarve pienenee ajoneuvon ajokulman pienentyessä ruutuun ajettaessa. Ajokulmaa pienennetään käyttämällä vinopysäköintiä, jossa pysäköintiruutuja käännetään ajoväylän suuntaan kuvan 1 mukaisesti. Pysäköintiruutuja toteutetaan tyypillisesti 45, 60, 75 ja 90 asteen kulmilla. Ajoväylien leveydet vaihtelevat kääntymistilatarpeen mukaan 4 metristä 7,5 metriin. Kuvan 2 mukainen suorakulmainen pysäköintimalli on mahdollinen vain yli 6,5 metrisillä ajoväylillä. [1,2]



Kuva 1. Vinopysäköinti kapealla ajoväylällä [1]

Pysäköintiruudun pituus on tyypillisesti 5 metriä ja leveys vaihtelee 2,5 metrin ja 2,7 metrin välillä, riippuen pysäköintiruudun käyttötarkoituksesta. Pitkäaikaispysäköintiin suositellaan käytettävän 2,5 metrin ja lyhytaikaiseen pysäköintiin yli 2,6 metrin leveyttä. [2]



Kuva 2. Pysäköinti kaksisuuntaisella ajoväylällä [1]

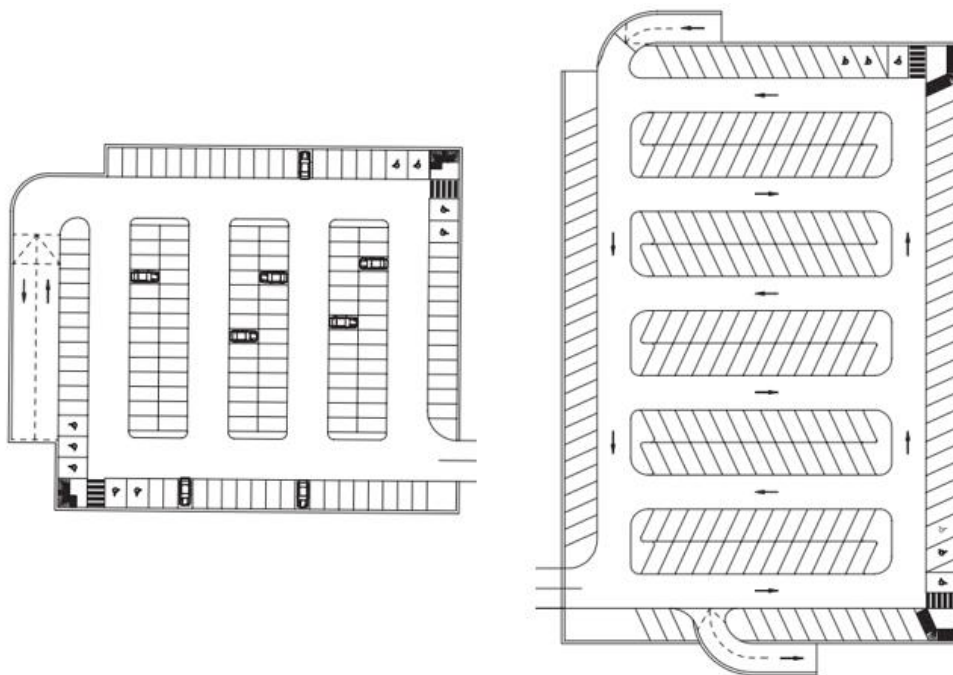
Taulukossa 1 on esitetty kokonaisleveydet eri ajoväyläratkaisuille olettaen, että ajoväylän molemmilla puolilla on pysäköintiruuturivit kuvien 1 ja 2 tapaan. Vioihin pysäköintiruutuihin on helpompi ajaa, mutta tilan optimoinnin kannalta ne eivät aina ole järkevin ratkaisu. Taulukosta 1 nähdään, että vinot pysäköintiruudut vievät aavistuksen verran vähemmän tilaa kuin suorakulmainen pysäköintimalli, mutta tilasuunnittelussa tulee muistaa, että vain 90 asteen pysäköintimallissa on kaksisuuntainen ajoväylä keskellä.

Taulukko 1. Pysäköintihallin ajoväylän ja kahden pysäköintiruuturivin tilamitoitus

Pysäköintikulma [°]	Ajoväylän leveys [m]	Pysäköintirivin pituus [m]	Kokonaisleveys [m]
45	4,5	n. 5,3	n. 15,1
60	4,5	n. 5,6	n. 15,7
75	5,5	n. 5,5	n. 16,5
90	7	5	17

Yksinkertaisimmillaan pysäköintihallin mitoitus toteutetaan kuvan 2 mukaisin mitoin tai sen kerrannaisilla, jolloin pysäköintihallin leveydeksi tulee noin 17 metriä ajoväylää kohti. Pysäköintihalleja joudutaan kuitenkin usein pakon edestä tekemään ahtaisiin tontteihin, joissa tontin rajat ja liittyvät rakennukset asettavat reunaehdot pysäköintihallin koolle ja muodolle, jolloin paikkamäärien optimointi on hankalaa.

Kuvassa 3 on kaksi esimerkkiratkaisua, joilla pysäköintihalli voidaan toteuttaa. Ensimmäisessä ratkaisussa käytetään kaksisuuntaisia ajoväyliä sekä suorakulmaista pysäköintimallia, kun taas toisessa kapeita yksisuuntaisia ajoväyliä ja vinopysäköintiä. Molemmilla ratkaisuilla toteutuu niin sanottu itsehakujärjestelmä, jossa ajoneuvon kuljettaja ei joudu peruuttamaan missään päin hallia pysäköintipaikkaa etsiessään [1].



Kuva 3. Pysäköintihallin toteutusesimerkkejä [muokattu lähteestä 1]

Tavallisten pysäköintiruutujen lisäksi pysäköintihalliin tulee tehdä liikkumisesteisille tarkoitettuja leveämpiä pysäköintiruutuja, jotka sijoitetaan sisäänkäyntien yhteyteen. Liikkumisesteisille tarkoitettujen leveämpien pysäköintiruutujen mitoitusohjeet löytyvät lähteistä [1] ja [2].

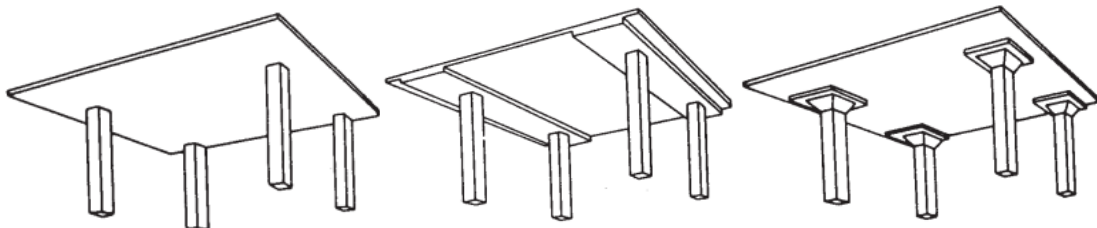
Ajoväylien vapaa korkeus tulee olla vähintään 2,2 metriä, normaalina pidettävän korkeuden ollessa noin 2,4–2,5 metriä. Jalankulkuväylillä vapaa korkeus tulee olla vähintään 2,1 metriä. [2] Vapaan korkeuden suunnittelussa tulee ottaa huomioon katosta roikkuva talotekniikka ja muut vapaata korkeutta rajoittavat tekijät, kuten palkit. Yleistä vapaata

korkeutta rajoittavat rakenteet tulee merkata varoitusmerkeillä, kuten kelta-musta-raidoituksella [2].

2.2 Pysäköintihallin rakenteet

Pysäköintihallin rakenteiden valintaan vaikuttavat rakenneosilta vaadittavat jännevälit, pihakannen kuormat, käytettävissä oleva kerroskorkeus, paloturvallisuus sekä hallin muoto ja sijainti. [1]

Pysäköintihallin vaaka- ja pystyrakenteet voidaan toteuttaa paikallavaluina, elementteinä tai näiden yhdistelmänä. Myös teräsrakenteet ovat mahdollisia, mutta harvinaisia. To-teutustapa ohjaa myös käytettävää runkojärjestelmää. Yleisin runkojärjestelmä element-tirakenteiselle pysäköintihallille on pilari-palkkirunko, jossa pihakannen laatasto tukeutuu pilarien väliin asennettuihin palkkeihin [3]. Paikallavalurakenteisissa pysäköintihalleissa yleisin runkojärjestelmä on pilarilaatta, jonka kestävyyttä voidaan parantaa kuvan 4 mu-kaisilla palkkikaistoilla tai sienivahvennoksilla [4]. Kaikissa runkojärjestelmissä pilarit voi-daan korvata esimerkiksi pysäköintihallin keskellä tai reunoilla olevilla betoniseinillä, jotka voivat toimia samalla pysäköintihallin jäykisteinä.



Kuva 4. *Pilarilaatta, palkkikaistoilla vahvennettu pilarilaatta ja pilarilaatta pilarin sienivahvennoksilla [4]*

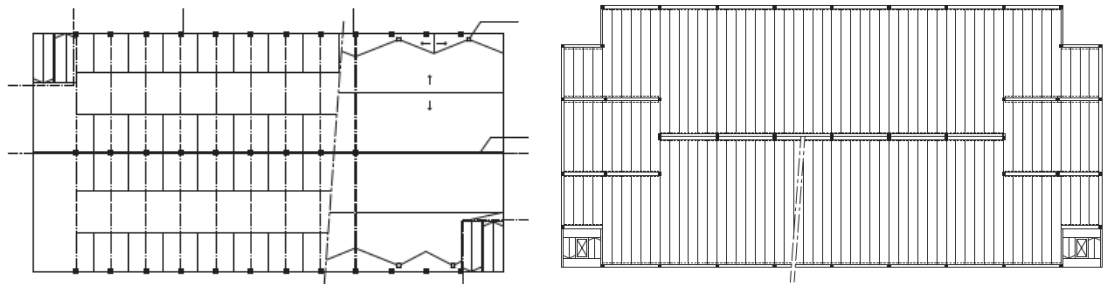
Pysäköintihallien jäykistys järjestetään jäykistävillä seinillä, pilarien väliin rakennettavilla teräsristikoilla, korkeintaan kaksikerroksisissa pysäköintihalleilla pilarien mastojäykistyk-sellä tai näiden yhdistelmillä. [3]

2.2.1 Pilarijako

Pysäköintihallin pysäköintiruuturivit ja ajoväylät asettavat reunaehtoja pilarijaolle. Pysä-köintihallin käyttömukavuus ja turvallisuus edellyttää usein sen rakenteilta suhteellisen pitkiä jännevälejä [4]. Pysäköinnin mahdollistamiseksi pilarit tulee sijoittaa pysäköintiri-vien väliin, jolloin pilari sijoitetaan joko puoliksi kahden pysäköintiruudun päälle tai pysä-köintiruutujen väliin jätetään pilarin kokoinen väli. Pitkäaikaispysäköinnissä pilarit saa si-

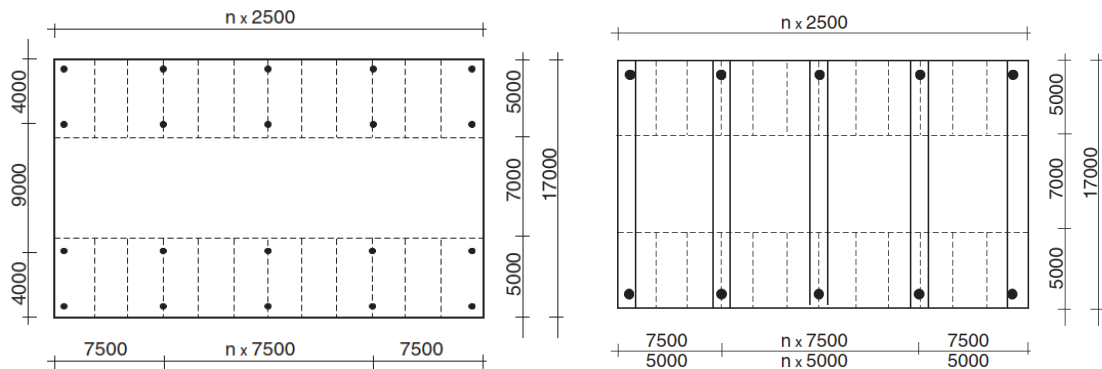
joittaa korkeintaan metrin päähän seinälinjasta, kun pilarivälissä on vähintään kolme autopaikkaa [1]. Tyypillinen pilarijako on kahden tai kolmen pysäköintiruudun verran eli noin 5–7,5 metriä.

Pilari-palkkirunkoisessa pysäköintihallissa pilarit sijoitetaan tyypillisesti kuvan 5 mukaisesti pysäköintiruutujen päihin. Palkit tukeutuvat pilareihin laattatyypistä riippuen joko pysäköintirivien suuntaisesti tai kohtisuoraan niitä vastaan. Tyypillisessä kuorilaattarungossa palkit nojautuvat pilareihin pysäköintiruutujen suuntaisesti, jolloin palkkien jänneväliksi tulee noin 17 metriä.



Kuva 5. Elementtirakenteisen pysäköintihallin esimerkkiruncoja: kuorilaatta ja ontelolaatta pilari-palkkirunko [3]

Pilarilaattarunkoinen pysäköintihalli ilman palkkikaistoja vaatii yleensä pilarit myös ajoväylien läheisyyteen kuvan 6 mukaisesti. Pilarin ulkopinta tulee tällöin sijaita 0,5 metriä pysäköintiruudun päästä [1]. Jälkijännitetyillä laatoilla voidaan toteuttaa 16–18 metrin jännevälejä, jolloin ajoväylän läheisyyteen ei tarvita pilareita. [4]



Kuva 6. Paikalla valetun pysäköintirakennuksen runkoesimerkkejä: pilarilaatta ja palkkikaistoilla vahvennettu pilarilaatta [4]

Jos pysäköintihalli on osin rakennuksen alla, tulee pilari sijoittaa ylempien kerroksien kantavien seinien alle. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista, jolloin joudutaan hallin katossa käyttämään kuormansiirtorakenteita. Tyypillinen kuormansiirtorakenne on paksulaatta, jonka paksuus määräytyy ylempien kerrosten mukaan noin $n \times 100$ mm, missä n on ylempien kerrosten lukumäärä [31].

2.2.2 Pihakansi

Elementtirakenteisen pihakannen kantava laatasto koostuu lähes poikkeuksetta esijännitetystä laatta- ja palkkielementeistä. Elementtilaatoista käytetyin on pintavalun kanssa liittolaattana toimiva kuorilaatta, mutta myös ontelolaatta on yleinen. Elementtilaatoilla pihakansi tehdään yleensä liittorakenteena valamalla elementtitason päälle raudoitettu pintabetoni. [1,3] Paikallavalurakenteisen pihakannen kantavana laatastona toimii paikallavalettu teräsbetonilaatta tai jälkijännitetty betonilaatta. Yleensä pihakannet tehdään jälkijännitettynä pilarilaattoina. Tartunnattomilla jänteillä varustetuilla laatoilla saavutetaan pihakannella pisimmät jännevälit, ohuimmat rakennepaksuudet sekä vesitiivis, monoliittinen ja mekaanista kulutusta kestävä rakenne. [1,4]

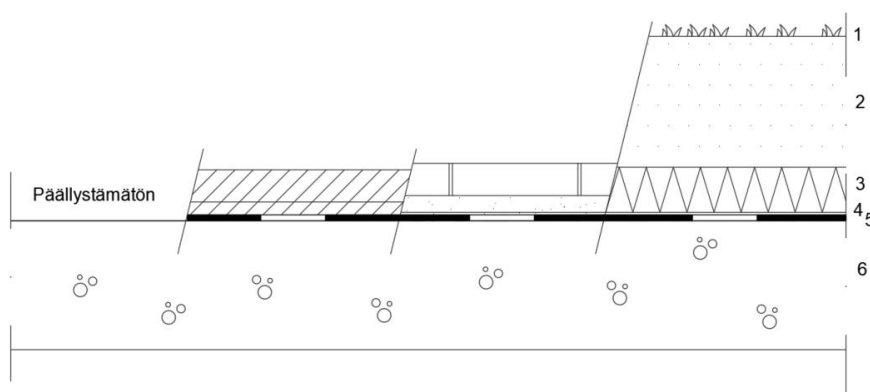
Ontelolaattarakenteen yhteydessä käytetään tyypillisesti esijännitettyjä betonipalkkeja. Laataston kantava suunta suunnitellaan kuormituksen ja jännevälillä perusteella. Tyypillinen ontelolaattapaksuus on 400 tai 500 millimetriä. Tyypillisesti laataston päälle valetaan noin 60–80 millimetriä paksu raudoitettu betonivalu, jolla hoidetaan samalla myös pihakannen kallistukset. Ontelolaataston jänneväliksi voidaan saada jopa 17 metriä riippuen laataston kuormituksesta. Tyypillinen pilarijako on kuuden ontelolaatan leveys eli 7,2 metriä. Mitoituksessa hyödynnetään yleensä ontelolaatan leveyden kerrannaisia eli 12M moduulimitoitusta. [3]

Kuorilaattarakenteessa pilarijaoksi valitaan yleensä 5 metriä ja jännebetonipalkit asetaan pysäköintiruutujen suuntaisiksi. Tällöin tyypillisen jännebetonipalkin jänneväliksi tulee 17 metriä ja kuorilaatan 5 metriä, kuvan 5 mukaisesti. Kuorilaatta on itsessään noin 100–120 millimetriä paksu ja 1200 millimetriä leveä esijännitetty elementtilaatta. Kuorilaatat asennetaan riviin palkkien päälle, jonka jälkeen kuorilaattojen ja palkkien päälle valetaan pintavalu, joka muodostaa laattojen ja palkkien kanssa kaksinkertaisen liittorakenteen. Pintavalun paksuus ja raudoitus riippuu rakenteen kuormituksista ja jännepitäisyydestä. Kaksinkertaisella liittorakenteella tarkoitetaan kahteen suuntaan toimivaa liittorakennetta. Kuorilaattajärjestelmästä pintavalu toimii palkkien liittorakenteena palkkien suuntaan ja kuorilaattojen kanssa laattojen suuntaan. Staattisesta näkökulmasta kuorilaatan ja pintavalun liittorakenteesta syntyy jatkuva, moniaukkoinen ja yhteen suuntaan raudoitettu laatasto ja palkista yksiaukkoinen vapaasti tuettu liittopalkki. Liittolaattarakenteen liikuntasaumajako on noin 25–30 metriä. [3] Kuorilaattarakenteita voidaan toteuttaa myös yhteen suuntaan kantavina ja niiden jänneväli voi olla myös 3 autopaikkaa eli noin 7,5 metriä.

Paikallavalukannen kantavana laattana toimii teräsbetonilaatta tai jälkijännitetty betonilaatta. Rakenne on yleensä pilarilaatta, jossa laatasto tukeutuu pysäköintihallin keskellä

pilareihin ja ulkoreunoilla seinärakenteisiin tai pilareihin. Jälkijännitetyjen betonilaattojen käyttö mahdollistaa pitkien jännevälien käytön ja vähentää pilarien tarvetta rakenteessa. Paikallavalulaatat voidaan tukea suoraan pilareihin ja laatasta voidaan vahvistaa pilarien välisillä palkkikaistoilla yhteen tai kahteen suuntaan. Laatasto raudoitetaan ristiin kantavana ja jatkuvana rakenteena. Pilarilaattojen yhteydessä on aina tarkastettava laatan lävistyskestävyys pilarin kohdalla. Pilarilaattojen lävistyskestävyyttä voidaan parantaa pilarien sienivahvennoksilla. [4]

Pihakansien pintarakenteet määräytyvät pihakannen käyttötarkoituksen mukaan. Päälysrakenteena voi olla esimerkiksi nurmikko, laatoitus tai asfaltti, joiden alle tehdään tarvittaessa vedeneristys ja vedeneristystä suojaavat kerrokset. Vedeneristeenä käytetään tyypillisesti bitumikermejä, jotka kiinnitetään kantavan laatan tai kallistusvalun päälle. Vedeneristeen päälle asennetaan salaojituskerros. Salaojituskerroksella tarkoitetaan vettä läpäisevää rakennetta, jonka tarkoitus on varmistaa veden poiston toimivuus pihakannella. Tyypillisesti salaojituskerroksena käytetään salaojamattoa. Pihakansi voidaan toteuttaa myös ilman vedeneristystä ja muita pintakerroksia. Vedeneristeen rakenne voidaan tehdä jälkijännitetyllä laattalla. Jännitetyyn laattaan ei synny kutustumishalkeamia, jolloin rakenne pysyy vesitiiviinä. [5] Kuvassa 7 on esitelty esimerkkejä pihakannen pintarakenteista, joita tämän työn simuloinneissa tutkitaan. Simuloinnin laskentamallit ovat esitetty tarkemmin kappaleessa 8.1.



1	-	/ asfaltti 20+50 mm	/ kiveys 50 mm	/ nurmikko
2	-	/ -	/ asennushiekka 30 mm	/ multa 200 mm
3	-	/ -	/ -	/ XPS-eriste 70mm
4	-	/ -	/ salaojamatto	/ salaojamatto
5	-	/ kumibitumikermieristys n. 3x3 mm luokka VE80R	/ kumibitumikermieristys n. 3x3 mm luokka VE80R	/ kumibitumikermieristys n. 3x3 mm luokka VE80R
6		Kantava betonilaatta 200 mm, kallistettu >1:80		

Kuva 7. Kylmän pihakannen pintarakenteiden esimerkkejä

3. PIHAKANNEN MATERIAALIT

3.1 Betoni

Betoni on epähomogeeninen materiaali, jonka ainesosat ovat sementti, vesi, runkoaine sekä mahdolliset lisä- ja seosaineet. Jokaisen ainesosan ominaisuudet ja niiden suhteelliset määrät vaikuttava valmiin betonin ominaisuuksiin. Betonin tärkeimpinä ominaisuuksina voidaan pitää sen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia.

Lämpötilamuodonmuutosten lisäksi muodonmuutoksia betonirakenteissa aiheuttaa betonin kutistuminen ja viruminen, joista jälkimmäinen on jännityksestä riippuvainen. Betonirakenteen kokonaismuodonmuutokset muodostuvat näiden muodonmuutosten summana. Seuraavaksi käydään läpi betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien laskentaa eurokoodien näkökulmasta.

3.1.1 Betonin lujuus

Standardi EN 1992-1-1 (eurokoodi 2) luokittelee eri betonilaadut taulukon 2 mukaisesti niiden lujuuksien mukaan. Betonin lujuusluokka määräytyy siihen 28 vuorokauden iässä kehittyvän lieriölujuuden ominaisarvon f_{ck} (MPa) mukaan. Luokkien tunnuksena käytetään C kirjaintainta, jonka jälkeen ilmoitetaan betonilaadun lieriölujuuden f_{ck} sekä kuutiolujuuden $f_{ck,cube}$ ominaisarvot erotettuna jakoviivalla, esimerkiksi C30/37. Eurokoodi 2:ssa eri betoniluokkien lujuudet on annettu 5 % fraktaalia vastaavien standardin EN 206-1 mukaisten lieriö- ja kuutiolujuuksien mukaan. Taulukossa 2 esitetään eurokoodi 2 mukaiset betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. [16]

Monesti on kuitenkin tarpeellista tuntea betonin lujuus jo ennen 28 päivän ikää. Eurokoodi 2:n mukaan betonin puristuslujuutta eri ajanhetkillä voidaan arvioida kaavoilla

$$f_{ck}(t) = f_{cm}(t) - 8(\text{MPa}), \text{ kun } 3 < t < 28 \text{ vuorokautta} \quad (3.1)$$

$$f_{ck}(t) = f_{ck}, \text{ kun } t \geq 28 \text{ vuorokautta}, \quad (3.2)$$

missä $f_{cm}(t)$ (MPa) on betonin keskimääräinen puristuslujuus t (d) vuorokauden ikäisenä. Betonin keskimääräinen puristuslujuus ajanhetkellä t lasketaan kaavalla

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t)f_{cm}, \quad (3.3)$$

jossa

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\}. \quad (3.4)$$

Kaavassa 3.4 f_{cm} (MPa) on taulukon 2 mukainen betonin keskimääräinen puristuslujuus ja $\beta_{cc}(t)$ on betonin iästä riippuva kerroin. Kaavassa 3.4 s (-) on sementin luokasta riippuva kerroin, joka saa arvon 0,20 tyyppin R sementillä (lujuusluokat CEM 42,5 R, CEM 52,5 N ja CEM 52,5 R), 0,25 tyyppin N sementeillä (lujuusluokat CEM 32,5 R ja CEM 42,5 N) ja 0,38 tyyppin S sementillä (lujuusluokka CEM 32,5 N). Kaavat 3.1–3.4 ovat voimassa vain silloin, kun betonia jälkihoitetaan standardin EN 12390 mukaisesti ja keksilämpötilan ollessa 20 °C. [16]

Jos betonin keskilämpötila poikkeaa 20 °C:sta, voidaan betonin ikää vuorokausissa korjata kaavalla

$$t_T = \sum_{i=1}^n \exp - \left(\frac{4000}{273+T(\Delta t_i)} - 13,65 \right) \Delta t_i, \quad (3.5)$$

missä $T(\Delta t_i)$ on betonin keskilämpötila (°C) tarkasteltavan ajanjakson Δt_i (d) aikana. [17]

Betonin vetolujuuden kehitystä voidaan karkeasti arvioida kaavalla

$$f_{ctm}(t) = \beta_{cc}(t)^\alpha f_{ctm}, \quad (3.6)$$

missä $\alpha = 1$, kun $t < 28$ vuorokautta ja $\alpha = 2/3$, kun $t \geq 28$ vuorokautta. f_{ctm} (MPa) on taulukon 2 mukainen betonin vetolujuuden arvo. Vetolujuuden arvoon vaikuttaa merkittävästi rakenteen koko sekä jälkihoito- ja kuivumisolosuhteet. [16]

Taulukko 2. *Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet [16]*

Betonin lujuusluokka														
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} (Mpa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{c1} (‰)	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ϵ_{cu1} (‰)	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ϵ_{c2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ϵ_{cu2} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4
ϵ_{c3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ϵ_{cu3} (‰)	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6

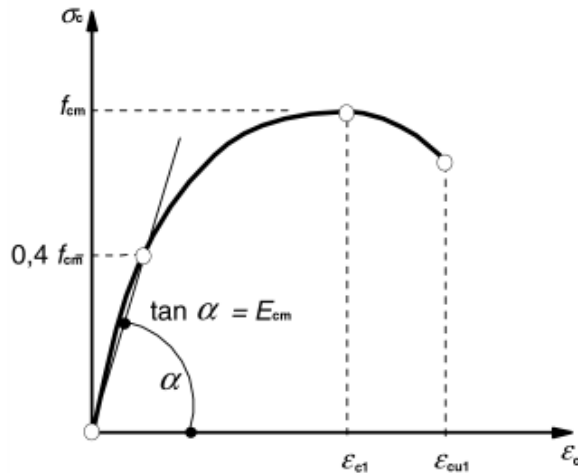
Betonin puristuslujuuden avulla pystytään määrittämään muutkin betonin keskeiset ominaisuudet. Alla taulukossa 3 on esitelty taulukon 2 mukaisten betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien analyyttiset kaavat.

Taulukko 3. *Betonin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien analyyttisiä kaavoja [16,17]*

Betonin keskimääräinen puristuslujuus 28 vrk ikäisenä f_{cm} (MPa)	$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$
Betonin keskimääräinen vetolujuus 28 vrk ikäisenä f_{ctm} (MPa)	$f_{ctm} = 0,3f_{ck}^{\frac{2}{3}}$, kun $f_{ck} \leq 50 \text{ MPa}$ $f_{ctm} = 2,12 \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10} \right)$, kun $f_{ck} > 50 \text{ MPa}$
Betonin vetolujuuden 5 % fraktiili 28 vrk ikäisenä $f_{ctk,0,05}$ (MPa)	$f_{ctk,0,05} = 0,7f_{ctm}$
Betonin vetolujuuden 95 % fraktiili 28 vrk ikäisenä $f_{ctk,0,95}$ (MPa)	$f_{ctk,0,95} = 1,3f_{ctm}$
Kvartsiittipitoisesta kiviaineksesta valmistetun betonin kimmokerroin E_{cm} (GPa)	$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3}$
Betonin puristuma jännityksen huippuarvon kohdalla, kun käytössä on epälineaarinen rakenneanalyysi ε_{c1} (‰)	$\varepsilon_{c1} = 0,7f_{cm}^{0,31} \leq 2,8$
Betonin murtopuristuma, kun käytössä on epälineaarinen rakenneanalyysi ε_{cu1} (‰)	$\varepsilon_{cu1} = 2,8 + 27 \left(\frac{98-f_{cm}}{100} \right)^4$, kun $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$
Betonin puristuma jännityksen huippuarvon kohdalla, kun betonin jännitys-muodonmuutos yhteyttä kuvataan paraabeli-suorakaidemallilla ε_{c2} (‰)	$\varepsilon_{c2} = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$, kun $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$
Betonin murtopuristuma, kun betonin jännitys-muodonmuutos yhteyttä kuvataan paraabeli-suorakaidemallilla ε_{cu2} (‰)	$\varepsilon_{cu2} = 2,6 + 35 \left(\frac{90-f_{ck}}{100} \right)^4$, kun $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$
n	$n = 1,4 + 23,4 \left(\frac{90-f_{ck}}{100} \right)^{0,53}$, kun $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$
Betonin puristuma jännityksen huippuarvon kohdalla, kun betonin jännitys-muodonmuutos yhteyttä kuvataan bi-lineaarisella mallilla ε_{c3} (‰)	$\varepsilon_{c3} = 1,75 + 0,55 \left(\frac{f_{ck}-50}{40} \right)$, kun $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$
Betonin murtopuristuma, kun betonin jännitys-muodonmuutos yhteyttä kuvataan bi-lineaarisella mallilla ε_{cu3} (‰)	$\varepsilon_{cu3} = 2,6 + 35 \left(\frac{90-f_{ck}}{100} \right)^4$, kun $f_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$

Lyhytaikaisessa kuormituksessa betonin muodonmuutokset ovat kimmoisia, eli ne palautuvat täysin kuorman poistuttua. Tämä pätee betonin kimmoisan jännitystason alueella, joka päättyy noin $0,4f_{cm}$ jännitykseen. Suuremmissa jännitystiloissa betonin muodonmuutokset kasvavat nopeammin mikä näkyy kuvan 8 betonin muodonmuutos-jännityskuvaajan kaareutumisenä. Kimmoisan jännitystason alueella jännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta kuvataan kimmokertoimella E_{cm} , jonka arvo voidaan laskea 28 päivän ikäisessä betonissa taulukon 3 mukaisesti kaavalla.

Kaava pätee betoneihin, jotka on valmistettu kvartsiittipitoisesta kiviaineksesta, kuten graniitista. Muiden kiviaineksien yhteydessä kerrotaan kimmokerroimen arvoa seuraavilla arvoilla: basaltti = 1,2, kalkkikivi = 0,90 ja hiekkakivi = 0,70. Betonin kimmokerrointa käytetään lähinnä käyttörajatilatarkasteluissa, joissa jännitystaso pysyy alhaisena. [11]



Kuva 8. Betonin jännitys-muodonmuutosriippuvuus epälineaarisisessa rakenneanalyysissä [16]

Kimmokerroimen kehitystä ajan suhteen voidaan arvioida kaavalla

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} E_{cm}, \quad (3.7)$$

missä E_{cm} (GPa) on taulukon 2 mukainen betonin kimmokerroin. [16] Kimmokerroimen avulla voidaan laskea betoniin välittömästi kuormituksesta syntyvän kimmoisan suhteellisen kokoonpuristuman ε_c (-) arvon kaavalla

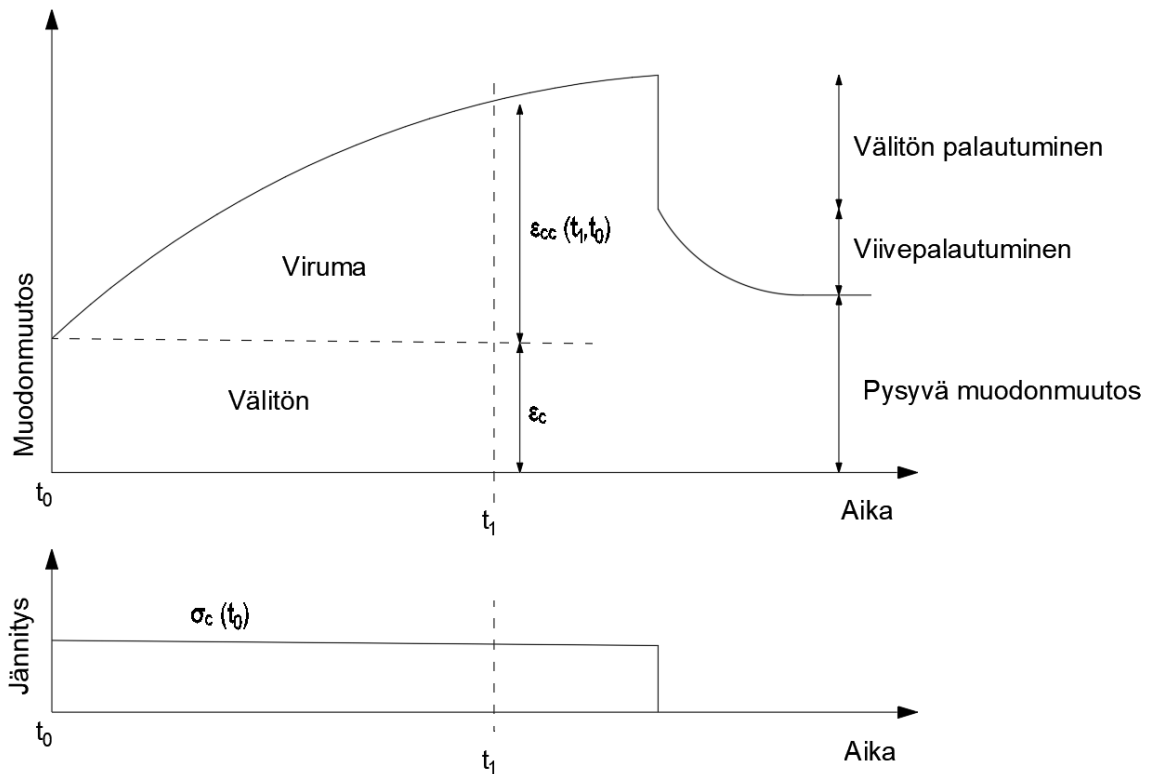
$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}, \quad (3.8)$$

missä σ_c (MPa) on kuormituksesta betoniin syntyvä jännitys ja E_c (GPa) betonin tangenttikimmokerroin, jolle voidaan käyttää arvoa $1,05E_{cm}$.

3.1.2 Viruma

Betonin viruminen tarkoittaa muodonmuutosta, joka tapahtuu kuormitetussa betonirakenteessa ajan kuluessa välittömän muodonmuutoksen lisäksi. Muutamassa kymmenessä vuodessa muodonmuutokset voivat kasvaa viruman takia jopa 2–3 kertaisiksi verrattuna välittömään muodonmuutokseen kuvan 9 mukaisesti. Viruminen tapahtuu, kun kuormituksen paine saa veden virtaamaan pois geelihuokosista, jolloin sementtigeeli tii-

vistyy. Sementtigeelin tiivistymisen takia muodonmuutos ei palaudu täysin geelihuokosten täytyessä uudelleen vedellä, jolloin betoniin jää pysyvä muodonmuutos kuorman poistuttua. Viruman suuruuteen vaikuttaa merkittävästi betonin ikä kuormituksen alkamisaikana, betonin lujuusluokka, ympäristön kosteus, rakenteen mitat, kuormituksen aiheuttama jännitystaso ja kuormituksen kesto. [11]

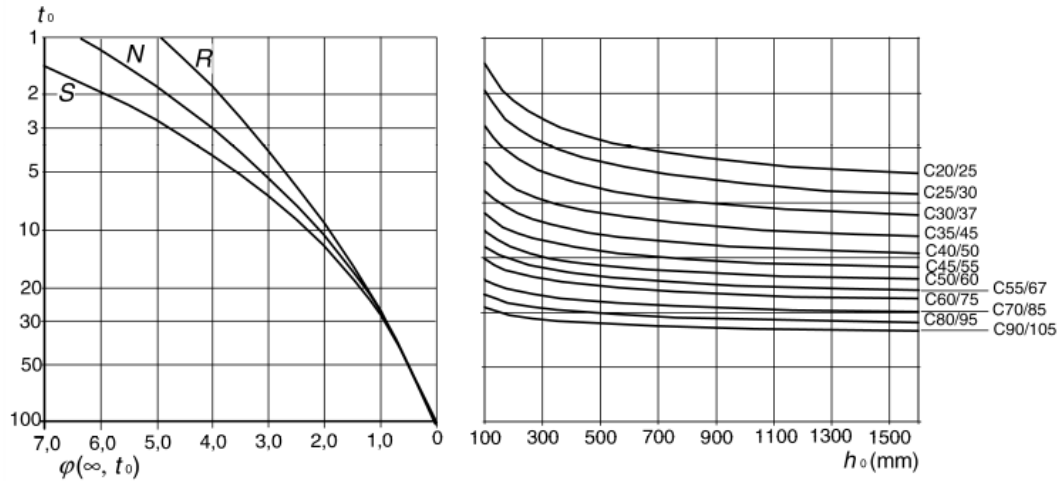


Kuva 9. Betonin viruman vaikutus muodonmuutokseen vakiojännityksessä [muokattu lähteistä 11,18]

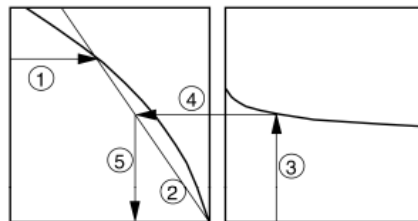
Virumista esiintyy kaikissa jännitystapauksissa ja sen vaikutus kokonaismuodonmuutokseen on merkittävä. Kuivissa sisätiloissa viruman suuruus on noin kolminkertainen kimmoiseen muodonmuutokseen nähden. Ulkotiloissa kimmainen muodonmuutos ja viruma ovat lähes samansuuruiset. Viruma aiheuttamia seurauksia betonirakenteille voidaan pitää hyvinä ja huonoina. Huonoina seurauksina voidaan pitää taipumien kasvua ja jännepunosten jännityshäviöitä. Virumisen hyviä puolia ovat taas jännityshuippujen tasaantuminen ja jännitysten uudelleen jakaantuminen. [11]

Viruman suuruus lasketaan virumaluvun $\varphi(t, t_0)$ (-) avulla. Virumaluvun loppuarvo voidaan määrittää kuvan 10 mukaisella yksinkertaistetulla Eurokoodi 2:n taulukkomenetelmällä. Tarvittaessa virumaluku voidaan myös laskea tarkemmin ja sen kehittymistä ajan suhteen voidaan arvioida Eurokoodi 2:n liitteen B ohjeilla. Tarkempi laskentamenetelmä esitetään taulukkomenetelmän jälkeen.

Jos virumaluvun määrittämiseen ei tarvita suurta tarkkuutta, betonin puristusjäännitys ei ylitä $0,45f_{ck}$, ympäristön lämpötila pysyy -40 °C ja 40 °C välissä ja keskimääräinen suhteellinen ilmankosteus 40 % ja 100 % välissä, voidaan eurokoodi 2:n mukaan virumaluvun loppuarvo määrittää kuvan 10 kuvaajista. [16]

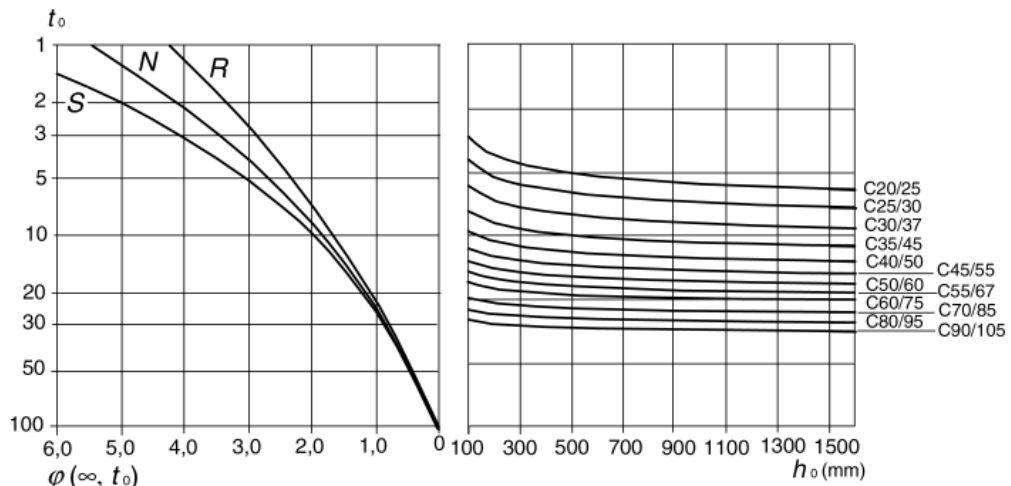


a) sisätilat – suhteellinen kosteus = 50 %



HUOM.

- Käyrien 4 ja 5 välinen leikkauspiste voi olla myös pisteen 1 yläpuolella.
- Kun $t_0 > 100$, saavutetaan riittävä tarkkuus, kun oletetaan $t_0 = 100$ (ja käytetään tangenttiviivaa).



b) ulkotilat – suhteellinen kosteus = 80 %

Kuva 10. Virumaluvun määrittäminen normaaleissa ympäristöolosuhteissa olevalle betonille [16]

Kuvan 10 merkeistä $\varphi(\infty, t_0)$ (-) tarkoittaa virumaluvun loppuarvoa, t_0 (d) betonin ikää vuorokausissa kuormituksen alkaessa ja h_0 (m) rakenteen poikkileikkauksen muunnettua korkeutta, joka lasketaan kaavalla

$$h_0 = 2 \frac{A_c}{u}, \quad (3.9)$$

jossa A_c (m²) on betonin poikkileikkausala ja u (m) on poikkileikkauksen piirin yhteenlaskettu pituus, jossa kuivumista voi tapahtua. Kuvaajan kirjaimet S , N ja R viittaavat sementtilaatuihin, jotka esiteltiin lyhyesti kaavan 3.4 yhteydessä. [16]

Taulukon käyttö perustuu viiteen vaiheeseen:

1. Ensiksi piirretään kuormituksen aloitusajankohdasta vaakasuora viiva käytetyn sementtityypin käyrän päälle.
2. Seuraavaksi piirretään viiva ensimmäisen taulukon oikeasta alanurkasta siten, että se kulkee 1. kohdassa määritetyn leikkauspisteen läpi aina taulukon reunalle saakka.
3. Piirretään pystysuoraviiva rakenteen muunnetun korkeuden arvon kohdalta käytetyn betonin lujuuskäyrään saakka.
4. Piirretään 3. kohdan viivan ja lujuuskäyrän leikkauspisteestä vaakasuora viiva, joka leikkaa 2. kohdassa piirretyn viivan
5. Piirretään 4. kohdan leikkauspisteestä pystysuora viiva alas

Kohdan 5. viiva määrittää lopullisen virumaluvun loppuarvon. Kun virumaluvun loppuarvo on määritetty, voidaan lopullinen puristusilassa olevan betonin viruma ajanhetkellä $t=\infty$ laskea kaavalla

$$\varepsilon_{cc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \left(\frac{\sigma_c}{E_c} \right), \quad (3.10)$$

jossa σ_c (MPa) on puristava vakiojännitys, joka on asetettu vaikuttamaan ajanhetkellä $t=t_0$ ja E_c (MPa) betonin tangenttimoduuli, jolle voidaan käyttää arvoa $1,05E_{cm}$.

Jos betonirakenteessa vaikuttava puristusjännitys ylittää arvon $0,45f_{ck}$ tulee virumisen epälineaarisuus ottaa huomioon. Tällainen tilanne voi tulla vastaan esimerkiksi jännitettävän betonirakenteen jänteen korkeudella. Tällöin kaavan 3.10 virumaluku $\varphi(\infty, t_0)$ korvataan epälineaarisella virumaluvulla $\varphi_{nl}(\infty, t_0)$ (-), joka lasketaan seuraavasti:

$$\varphi_{nl}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \exp(1,5(k_\sigma - 0,45)), \quad (3.11)$$

missä k_σ (-) on puristusjännityksen ja betonin lujuuden välinen suhde $\sigma_c/f_{ck}(t_0)$. [16]

Jos virumaluku halutaan laskea tarkemmin tai sen kehittymistä ajansuhteen halutaan selvittää, voidaan eurokoodi 2 liitteen B:n mukaan virumaluvun arvo ajanhetkellä t laskea kaavasta

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0), \quad (3.12)$$

missä φ_0 on nimellinen virumaluku ja $\beta_c(t, t_0)$ kerroin, joka kuvaa virumisen kehittymistä kuormituksen alkamisen jälkeen. Nimellinen virumaluku lasketaan kaavalla

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0), \quad (3.13)$$

missä

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1-RH/100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}}, \text{ kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa ja} \quad (3.14)$$

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \frac{1-RH/100}{0,1 \sqrt[3]{h_0}} \alpha_1\right) \alpha_2, \text{ kun } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa.} \quad (3.15)$$

Kaavoissa 14 ja 15 RH on ympäristön suhteellinen kosteus prosentteina ja h_0 kaavan 3.9 mukainen rakenteen poikkileikkauksen muunnettu korkeus millimetreinä. Kertoimilla α_1 (-) ja α_2 (-) otetaan huomioon betonin lujuuden vaikutus ja ne määräytyvät seuraavasti:

$$\alpha_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,7} \quad (3.16)$$

ja

$$\alpha_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,2}, \quad (3.17)$$

joissa f_{cm} (MPa) on betonin keskimääräinen puristuslujuus megapascalina 28 vuorokauden iässä. [16]

Betonin lujuus virumaluvun määrittämisessä otetaan huomioon kertoimella $\beta(f_{cm})$ (-), joka lasketaan kaavalla

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}. \quad (3.18)$$

Kertoimella $\beta(t_0)$ (-) otetaan huomioon kuormittamisen alkamisajankohdan vaikutus nimelliseen virumalukuun ja se lasketaan kaavalla

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1+t_0^{0,20}}, \quad (3.19)$$

missä t_0 (d) on betonin ikä vuorokausina kuormittamisen alkaessa. [16]

Virumisen kehittymistä kuormituksen alkamisen jälkeen kuvaavan kertoimen $\beta_c(t, t_0)$ liikiarvo lasketaan kaavalla

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t-t_0}{\beta_H+t-t_0}\right)^{0,3}, \quad (3.20)$$

missä t (d) on betonin ikä vuorokausina tarkasteluhetkellä. Kerroin β_H (-) lasketaan kaavoilla

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012RH)^{18})h_0 + 250 \leq 1500, \text{ kun } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \quad (3.21)$$

$$\beta_H = 1,5(1 + (0,012RH)^{18})h_0 + 250\left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,5} \leq 1500\left(\frac{35}{f_{cm}}\right)^{0,5}, \text{ kun} \quad (3.22)$$

$f_{cm} \geq 35 \text{ MPa.}$

Sementtityypin vaikutus virumalukuun voidaan ottaa huomioon muokkaamalla kaavan 19 betonin kuormittamisikä t_0 kaavan

$$t_0 = t_{0,T} \left(\frac{9}{2+t_{0,T}^{1,2}} + 1 \right)^\alpha \geq 0,5 \quad (3.23)$$

mukaisesti, missä $t_{0,T}$ on kaavan 3.5 mukaisesti laskettu betonin lämpötilakorjattu ikä ja α käytetystä sementtityypistä riippuva eksponentti. Eksponentti α saa seuraavat arvot eri sementtityyppien yhteydessä: $\alpha = -1$, kun sementti on S-tyyppiä, $\alpha = 0$, kun sementti on N-tyyppiä ja $\alpha = 1$, kun sementti on R-tyyppiä. [16]

3.1.3 Kutistuma

Betonin kutistuma koostuu kahdesta osasta, betonin sisäisestä kutistumasta ja kuivumiskutistumasta. Kuivumiskutistuma kehittyy hitaasti ajan myötä. Kuivumiskutistuma on tyyppillisesti merkittävämpi tavallisissa betoneissa, kun taas sisäinen kutistuma tulee merkittäväksi korkealujuusbetoneissa. [18,16]

Eurokoodi 2:n mukaan kokonaiskutistuma ε_{cs} lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}, \quad (3.24)$$

missä ε_{cd} on kuivumiskutistuma ja ε_{ca} sisäinen kutistuma. [16]

Sisäinen kutistuma syntyy betonin kovettumisen aikana ja se sisältää sementin hydraatatiosta aiheutuvan kemiallisen kutistuman sekä karbonatisaatiokutistuman, joka syntyy, kun hydratoitunut sementti reagoi ilman hiilidioksidin kanssa. Sisäinen kutistuma riippuu vain betonin lujuusluokasta eikä esimerkiksi ympäristön kosteus vaikuta sen suuruuteen. [18] Sisäisestä kutistumasta merkittävin osuus tapahtuu muutaman päivän sisällä valusta. Sisäinen kutistuma on otettava erityisesti huomioon valettaessa uutta betonia vanhan betonin päälle. [16]

Betonin sisäisen kutistuman loppuarvo lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10)10^{-6} \quad (3.25)$$

ja kehittyminen ajan suhteen kaavalla

$$\varepsilon_{ca}(t) = \left(1 - \exp(-0,2\sqrt{t})\right) \varepsilon_{ca}(\infty), \quad (3.26)$$

missä t on betonin ikä vuorokausina tarkasteltava ajankohtana. [16]

Betonin varhaisvaiheessa tapahtuvaa plastista kutistumaa pyritään pitämään hallinnassa riittävällä jälkihoidolla. Kuivumiskutistuma kovettuneessa betonissa, johtuu veden haihtumisesta johtuvasta tilavuuden muutoksesta. Kovettunut betoni kutistuu kuivuesaan ja paisuu kostuessaan. Kuivumiskutistuma on siis lähes palautuvaa lukuun ottamatta betonin ensimmäistä kuivumiskutistumista mikä on palautumaton. Kaikki vesi, joka ei ole sitoutunut kemiallisesti betoniin tai jää pysyvästi betonin pienimpiin huokosiin, voi haihtua. Betonin kuivuminen aiheuttaa sen sisältämään veteen jännityksiä, mitkä saavat sen imeytymään pois geelihuokosista, jolloin geelihiukkasten välit pienenevät ja betoni kutistuu. Kutistuman suuruus on suoraan yhteydessä poistuneen kosteuden määrään. Kosteus haihtuu aina betonin pintaosista, jolloin betonirakenteen keskiosa on kosteampi kuin sen pintaosat. Tämä epätasaisesti jakautunut kosteus aiheuttaa rakenteen pintaosiin vetojännityksiä ja sisäosiin puristusjännityksiä. Myös se kuinka rakenne pääsee kuivumaan, vaikuttaa syntyviin jännityksiin. Epätasainen kuivuminen lisää jännityksiä. Jos kutistuminen on estetty ja vetojännitys ylittää vetolujuuden betonin pinnalla, syntyy pintaan vähintään yksi halkeama. Kuivumiskutistuminen on sitä suurempaa, mitä enemmän betoni sisältää vettä ja sementtiä, myös ympäristön kuivuus ja betonin huokoistaminen kasvattaa kuivumiskutistuman suuruutta. [11]

Kuivumiskutistuma loppuarvo lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{cd,\infty} = k_h \varepsilon_{cd,0}, \quad (3.27)$$

jonka kerroin k_h (-) saadaan taulukosta 4. Taulukon muunnettu paksuus h_0 lasketaan kaavalla 3.9. Kuivumiskutistuman perusyhtälö $\varepsilon_{cd,0}$ lasketaan kaavalla

$$\varepsilon_{cd,0} = 0,85 \left((220 + 110\alpha_{ds1}) \exp\left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cmo}}\right) \right) 10^{-6} * 1,55 \left(1 - \left(\frac{RH}{RH_0}\right)^3 \right), \quad (3.28)$$

missä kertoimet α_{ds1} (-) ja α_{ds2} (-) riippuvat käytettävästä sementtityypistä ja niiden arvot saadaan taulukosta 5. Kaavassa 3.28 f_{cmo} paikalla käytetään arvoa 10 MPa, RH ympäristön suhteellinen kosteus ja $RH_0 = 100$ %. [16]

Kuivumiskutistuman kehittyminen ajan suhteen voidaan laskea kaavasta

$$\varepsilon_{cd}(t) = \frac{t-t_s}{(t-t_s)+0,04\sqrt{h_0^3}} k_h \varepsilon_{cd,0}, \quad (3.29)$$

missä t (d) on betonin ikä tarkasteltavan ajankohtana vuorokausina ja t_s (d) aika kuivumiskutistumisen alkamisesta. Tyypillisesti kuivumiskutistuman ajatellaan alkavan siitä hetkestä, kun betonin jälkihoito lopetetaan. [16]

Taulukko 4. Kertoimen k_h arvoja rakenteen eri poikkileikkauksen muunnetuille korkeuksille [16]

h_0 (mm)	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Taulukko 5. Kuivumiskutistuman kertoimet [16]

	α_{ds1}	α_{ds2}
S-tyyppi	3	0,13
N-tyyppi	4	0,12
R-tyyppi	6	0,11

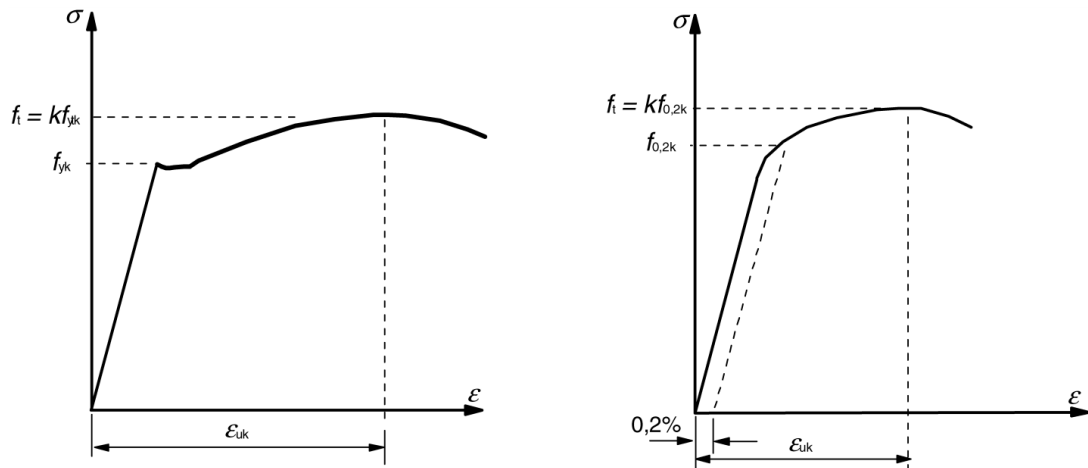
3.2 Teräkset

3.2.1 Betoniteräkset

Betoniteräkset jaetaan niiden valmistustavan mukaan kuumavalssattuihin ja kylmämuokattuihin, sitkeytensä perusteella alhaisen sitkeyden, normaalin sitkeyden ja korkean sitkeyden omaaviin ja hitsattavuuden mukaan hitsattaviin ja ei-hitsattaviin teräksiin. Betoniterästen pintaan valssataan tartuntaa parantavia harjoja. [18,23]

Kuumavalssauksessa teräs muokataan noin 1000 °C lämpötilassa ja lopuksi karaistaan nopealla jäähtytyksellä. Menettelyllä teräkselle saadaan hyvä hitsattavuus ja muodonmuutoskyky. [18] Kylmämuokatut teräkset valmistetaan valssilangasta kylmämuokausprosessilla, jossa teräksen lujuus kasvaa, mutta muodonmuutoskyky heikkenee. Eurokoodisuunnittelussa käytetään betoniteräksiä, joiden ominaisuudet täyttävät standardin EN 10080 mukaiset vaatimukset. [23]

Teräs on lineaarikimmoinen materiaali myötörajaan saakka ja raudoitusteräksen kimmo kertoimen E_s mitoitusarvona käytetään 200 GPa. Suunnittelussa teräksen ominaismyötörajana f_{yk} (MPa) käytetään teräksen ylemmän myötörajan arvoa. Kuvasta 11 nähdään, että kylmämuokatuilla teräksillä ei ole samanlaista selkeää myötörajaa kuin kuumavalssatuilla. Kylmämuokatuissa teräksissä ominaismyötörajana $f_{0,2k}$ käytetään jännitystä, joka aiheuttaa teräkseen 0,2 prosentin pysyvän venymän. [18]



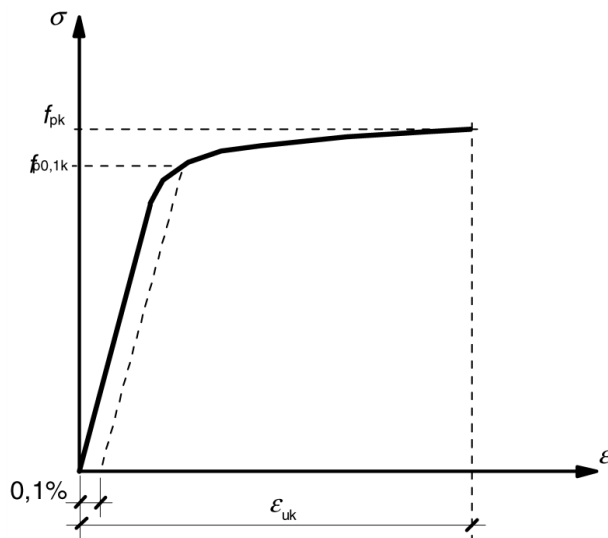
Kuva 11. Kuumavalssatun (vasemmalla) ja kylmämuokatun betoniteräksen periaatteelliset jännitys-venymäkuvaajat [16]

Teräkset jaetaan sitkeyden suhteen kolmeen luokkaan A-C, joista A on vähiten sitkeä ja C sitkein. Raudoitteen sitkeyttä kuvaa myötölujuuden f_{yk} ja murtolujuuden f_t välinen suhde k ja kokonaisvenymä ϵ_{uk} , joille on esitetty rajat sitkeysluokittain Eurokoodi 2:n liitteessä C. [23,16] Suunnittelussa teräsluokat esitetään tunnuksella, josta ilmenee myötölujuuden arvo ja sitkeysluokka. Esimerkiksi terästunnus B500B tarkoittaa betoniterästä seuraavilla ominaisuuksilla: B = betoniteräs, 500 = myötölujuus f_{yk} on 500 MPa ja sitkeysluokka = B. Tunnuksesta ei ilmene suoraan onko betoniteräs valmistettu kuumavalssaamalla vai kylmämuokkaamalla, mutta nyrkkisääntönä voidaan pitää, että kylmämuokkaamalla valmistetut teräkset kuuluvat sitkeysluokkaan A. Poikkeuksena korkean lujuusluokan kuumavalssatut teräkset, jotka saattavat myös kuulua sitkeysluokkaan A. [23]

3.2.2 Jänneteräkset

Jänneteräkset ovat kylmämuokattuja korkealujuus teräksiä, joiden vaaditut ominaisuudet esitetään standardissa EN 10138 tai eurooppalaisessa teknisessä hyväksynnässä. Eri-laisia jänneteräksiä ovat langat, punokset ja tangot. Suomessa selvästi yleisimmässä käytössä näistä ovat jännepunokset, jotka muodostuvat 2–7 langasta, tyypillisesti seitsemästä. Jänneterästen toiminta perustuu korkealujuusterästen suureen kimmoisaan venymään, joka voi olla yli 5 %. Suuri kimmoisa venymä mahdollistaa jännitysten siirron betonille jännityshäviöistä johtuvan venymän vähenemisen jälkeenkin. Jännepunokset nimetään tunnuksella, josta selviää punoksen lankojen määrä ja teräksen vetolujuus f_{pk} . Esimerkiksi tunnuksen Y1860S7 osat ovat Y = jänneteräs, 1860 = vetolujuus f_{pk} (MPa), S = punos ja 7 = lankojen lukumäärä. [17]

Kuvassa 12 oleva jänneterästen jännitys-venymäkuvaaja muistuttaa kylmämuokatun betoniteräksen vastaavaa kuvaajaa, eli silläkään ei ole selvää myötörajaa. Ominaismyötörajana $f_{p0,1k}$ (MPa) pidetään jännitystä, joka aiheuttaa punokseen 0,1 % pysyvän venymän. Vetolujuutta f_{pk} (MPa) vastaavalle kokonaistasavenymälle ϵ_{uk} (-) esitetään vaatimukset standardissa EN 10138. Standardin EN 10138 mukaisten 7-lankaisten punosten teräslajit ovat S1770, S1860 ja S1960. [18]



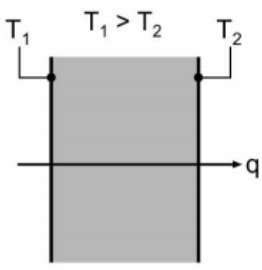
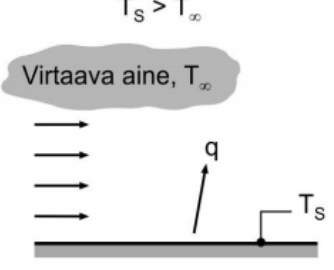
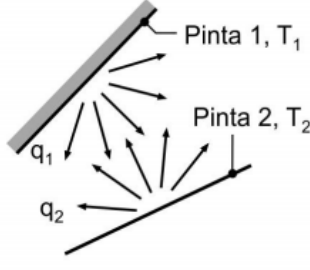
Kuva 12. jänneteräksen periaatteellinen jännitys-venymäkuvaaja [16]

Jännepunosten kimmomoduulin E_p mitoitusarvona voidaan käyttää 195 GPa. Vastaavat mitoitusarvot langoille ja tangoille on 205 GPa. Punosten, lankojen ja tankojen toimituserää seuraavissa koetodistuksissa esitetään lopullinen eräkohtainen kimmokertoimen arvo. Jänneteräksissä tapahtuu ajan suhteen relaksaatiota. Relaksaatiolla tarkoitetaan jännityksen vähenemistä venymän pysyessä vakiona. Relaksaation suuruuteen vaikuttaa jänneteräksen relaksaatioluokka, lämpötila ja jännitys. Eurokoodi 2 jakaa jänneteräset kolmeen relaksaatioluokkaan. Jänneterästen relaksaatioluokka määritetään standardin EN 10138 mukaisen 1000 tunnin relaksaatiokokeen avulla. Suomessa käytetyt langat ja punokset kuuluvat relaksaatioluokkaan 2, joilla on pieni relaksaatio $\rho_{1000} = 2,5 \%$. [17,18]

4. LÄMMÖN JOHTUMINEN JA LÄMPÖSÄTEILY

4.1.1 Lämmön siirtymismuodot

Lämpö on yksi energian muoto ja sillä on kolme erilaista siirtymismuotoa: johtuminen, konvektio ja säteily, joista esimerkit esitetty alla kuvassa 13. Yhteistä kaikille siirtymismuodoille on se, että lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta alempaan. [12]

Johtuminen kiinteän aineen läpi	Konvektio pinnasta virtaavaan aineeseen	Nettosäteily kahden pinnan välillä
		

Kuva 13. Lämmön siirtymismuodot [12]

Tässä työssä tutkitaan pihakannen lämpöjakaumia simuloinnin avulla, jossa lämmönsiirtymämuodoista huomioidaan johtuminen ja säteily. Käydään seuraavaksi läpi näiden siirtymismuotojen peruseriaatteet.

4.1.2 Lämmön johtuminen

Johtumista tapahtuu kaikissa materiaaleissa ja aineissa. Kiinteissä aineissa lämpö on atomien värähtelyä, joka liikkuu aineessa aaltoliikkeinä ja johteissa lisäksi vapaiden elektronien liikkeenä. Lämpömäärä ilmaisee tarkastelun kohteena olevan kappaleen kaikkien molekyylien liike-energian summan. Lämpömäärä eli lämpöenergia riippuu siis kappaleen massasta. Lämpöenergian Q (J, kWh) kaava on

$$Q = \Phi t, \quad (4.1)$$

missä Φ on lämpövirta (W) ja t aika (s). [12]

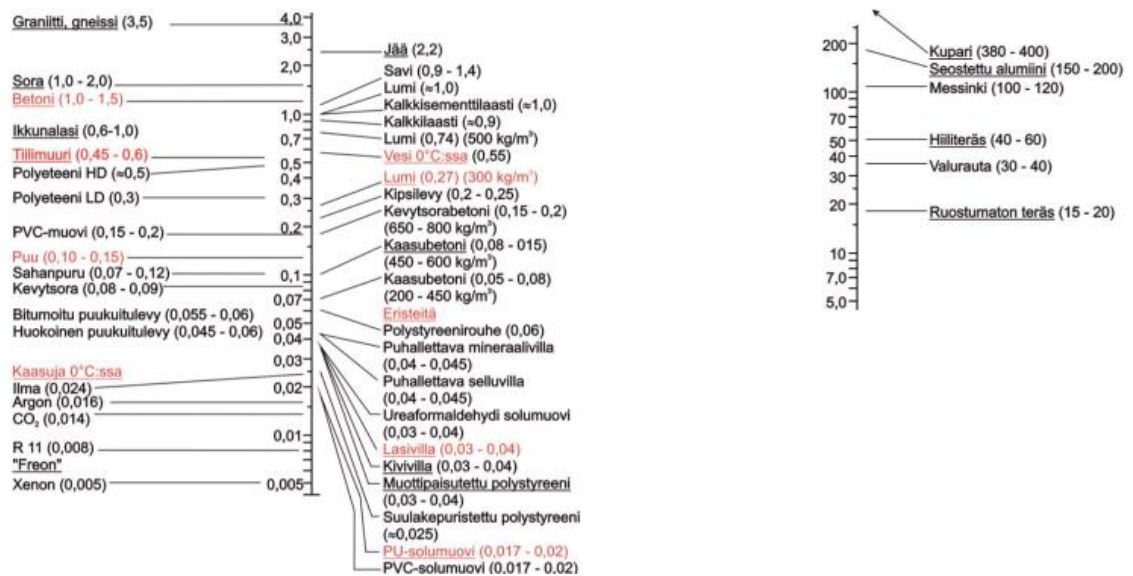
Lämpövirta Φ materiaalin läpi lasketaan lämpövirran tiheyden q ja rakenteen pinta-alan A , jonka läpi lämpövirta kulkee, avulla kaavan 4.2 mukaisesti:

$$\Phi = qA. \quad (4.2)$$

Johtumista voi tapahtua stationääri- tai epästationääritilassa. Stationääritilassa rakenteen lämpötilakentässä ei tapahdu muutoksia, eli lämpötila rakenteen molemmilla puolilla pysyy vakiona. Lämpövirran tiheys q (W/m^2) voidaan laskea homogeenisissa ja isotrooppisissa ainekerroksissa Fourierin lailla, joka on muotoa

$$q = -\lambda \nabla T = -\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right), \quad (4.3)$$

missä λ on ainekerroksen lämmönjohtavuus ($W/(m^{\circ}C)$), T lämpötila ($^{\circ}C$) ja x , y ja z lämpövirran suuntakoordinaatteja (m). Eri materiaaleille on määritetty lämmönjohtavuuden arvoja, joista esimerkkejä esitetty kuvassa 14. Arvot saattavat vaihdella suurestikin eri lähteissä. [12]

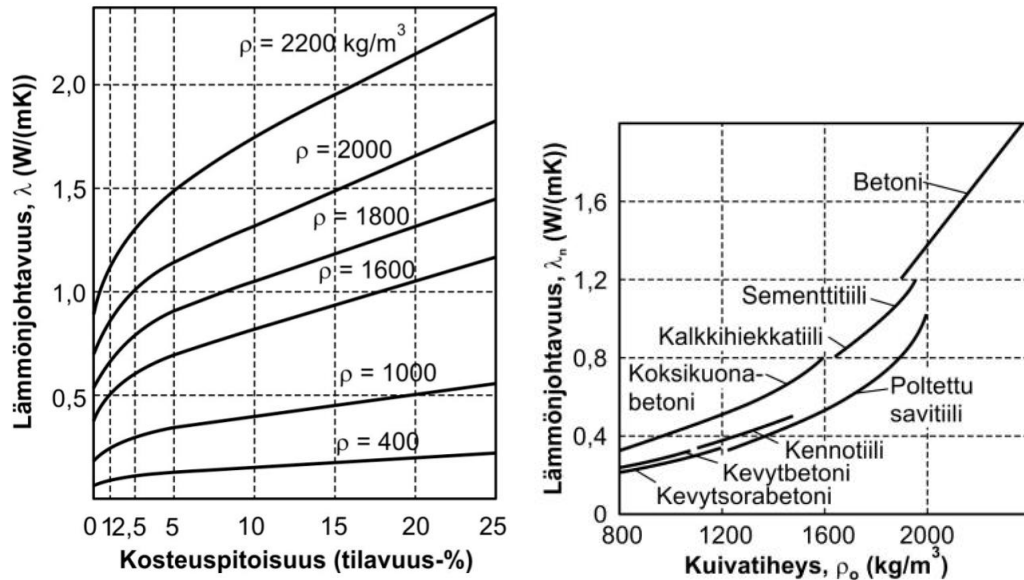


Kuva 14. Eri materiaalien lämmönjohtavuuksia ($W/(m^{\circ}C)$) [12]

Todellisuudessa materiaalien lämmönjohtavuus voi vaihdella suuresti materiaalin tiheyden ja kosteuspitoisuuden mukaan. Vesi on tehokas lämmönjohde, jolloin kostea materiaali johtaa lämpöä kuivaa materiaalia tehokkaammin. Kosteuden vaikutus riippuu materiaalin hygroskooppisuudesta eli kyvystä sitoa itseensä kosteutta. Vahvasti hygroskooppisilla materiaaleilla kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen on suurempaa. [12]

Materiaalin tiheys vaikuttaa sen sisältämän huokosten ja ilman määrään. Mitä suurempi tiheys materiaalilla on, sitä vähemmän materiaalin sisällä on ilmaa. Ilman lämmönjohtavuus on hyvin alhainen, ja kun sen määrä pienenee materiaalissa ja runkoaineen määrä kasvaa, kasvaa usein myös materiaalin lämmönjohtavuus. Alla kuvassa 15 on havainnollistettu kosteuden ja kuivatiheyden vaikutusta eri raskaiden rakennusmateriaalien

lämmönjohtavuuksiin. Myös lämpötila vaikuttaa lämmönjohtavuuteen, sillä kylmässä atomien liike-energia vähenee, jolloin niiden lämpö ei pääse yhtä tehokkaasti johtumaan niiden kautta. Tyypillisesti materiaalin lämmönjohtavuus määritetään 10 celsiusasteen lämpötilassa. [12]



Kuva 15. Rakennusaineiden karkea lämmönjohtavuuden riippuvuus kosteuden pitoisuudesta ja kuivatiheydestä [12]

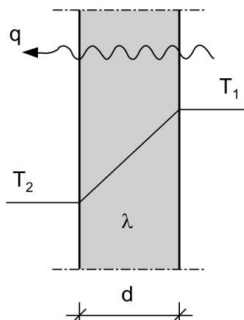
Yksidimensionaalisessa tapauksessa kaava 4.3 supistuu muotoon:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (4.4)$$

Stationääritilassa voidaan kaava 4.4 muuntaa gradienttimuodosta yleiseen muotoon

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (4.5)$$

missä d on materiaalikerroksen paksuus (m). Tapausta havainnollistava kuva alla kuvassa 16. Lämpövirran tiheyden arvolla voidaan laskea useita lämpöteknisiä suureita rakenteelle. [12]



Kuva 16. Lämpövirran tiheys yksidimensionaalisessa tapauksessa [12]

Lämpövirran tiheys voidaan laskea myös materiaalin lämmönvastuksen R ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$) avulla kaavalla

$$q = \frac{T_1 - T_2}{R}, \quad (4.6)$$

missä lämmönvastus R lasketaan kerrospaksuuden ja lämmönjohtavuuden avulla kaavalla

$$R = \frac{d}{\lambda}, \quad (4.7)$$

Ohuille materiaaleille, kuten kalvoille, joiden paksuutta ei voida varmuudella tietää, lämmönvastukset on annettu suoraan. Myös ilmapäleille on annettu lämmönvastuksia suoraan ilmapälin koon mukaan, sillä ilmapäleissä lämpö siirtyy johtumisen lisäksi konvektiolla ja säteilemällä. Materiaalin lämmönvastuksen lisäksi lämmön johtumista ympäröivästä ilmasta rakenteeseen hidastaa rakenteen pinnanalla pintavastus R_s ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$), jonka suuruus riippuu pinnan suunnasta, ilmavirtauksista pinnan lähellä ja pintaan tulevasta ja siitä poistuvasta lämpösäteilystä. [12] Sisä- ja ulkoilmaan rajoittuvilla rakenteilla voidaan kuitenkin rakennusfysikaalisissa laskuissa käyttää taulukon 6 mukaisia arvoja.

Taulukko 6. *Rakenneosan sisä- ja ulkokuoren pintavastukset [9]*

Pintavastus [$\text{m}^2\text{C}/\text{W}$]	Lämpövirran suunta		
	Ylöspäin	Vaakasuoraan	Alaspäin
Sisäpuolen pintavastus (R_{si})	0,10	0,13	0,17
Ulkopuolen pintavastus (R_{se})	0,04	0,04	0,04

Stationääritilanteessa lämpötila tietyssä pisteessä voidaan laskea monikerroksisen rakenteen osalta kaavalla

$$T_x = T_i - \frac{\sum_{n=i}^x R_n}{R_T} (T_i - T_e), \quad (4.8)$$

missä

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}, \quad (4.9)$$

$\sum_{n=i}^x R_n$ rakenteen lämmönvastusten summa ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$) sisäilmasta kohtaan x , T_i sisäilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$) ja T_e ulkoilman lämpötila ($^{\circ}\text{C}$). [12,7]

Todellisuudessa stationääritilannetta vastaavat olosuhteet ovat harvinaisia ja niihin perustuvilla laskuilla voidaan yleensä vain osoittaa esimerkiksi rakenteen määräysten mukaisuus tai soveltuvuus tiettyyn kohteeseen. Todellisissa tilanteissa rakenteen ympäristöolot vaihtelevat lähes aina, jolloin ollaan epästationäärisessä tilassa. Epästationääri-

sessä johtumissa rakenteen ympäristön muun muassa lämpötilat vaihtelevat ajan suhteen. Tällöin pintojen välinen lämpötilaero ei pysy vakiona, jolloin lämpövirran tiheyden arvokin muuttuu. Epästationääritilassa rakenteen lämpötilojen ja lämpövirran tiheyden määrittämistä varten eri ajan hetkinä tarvitaan energiataseyhtälö, johon perustuvat useimmat laskentaohjelmatkin. Johtumistapauksessa energiatase yhtälö saa muodon

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q', \quad (4.10)$$

missä ρ on materiaalin tiheys (kg/m^3), c materiaalin ominaislämpökapasiteetti ($\text{J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$), $\frac{\partial T}{\partial t}$ lämpötilan muutos ajan suhteen ($^\circ\text{C/s}$) ja q' lämmönkehitys tai lämpöhäviö (W/m^3) riippuen tilanteesta. Ominaislämpökapasiteetti kuvaa materiaalin lämmönsitomiskykyä. Lämmön kehitystä tai häviötä materiaalissa voi aiheuttaa esimerkiksi kemiallinen reaktio, joka sitoo tai luovuttaa lämpöä. Yksi yleinen lämpöä tuottava kemiallinen reaktio on betonin hydratoituminen. Myös jokin erillinen lämmönlähde, kuten lämpökaapeli tai lämminvesiputki, voi aiheuttaa lämmön kehitystä rakenteen sisällä. [12,28]

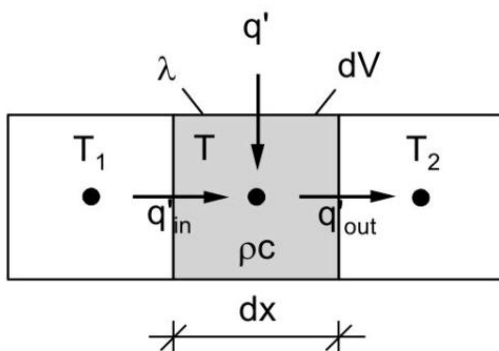
Jos lämmönjohtavuus pysyy lämmön muuttuessa vakiona ja se on joka suuntaan sama, voidaan kaava 4.10 muuttaa lineaariseen muotoon

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q'. \quad (4.11)$$

Yksidimensionaalinen muoto johtumisen energiataseyhtälölle on

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q' = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q' \quad (4.12)$$

ja tilannetta havainnollistaa alla oleva kuva 17.



Kuva 17. Lämmönjohtumisen yksidimensionaalinen epästationääritapaus [12]

Termiä ρc kutustaan tilavuuslämpökapasiteetiksi ($\text{J}/(\text{m}^3^\circ\text{C})$) ja se kuvaa kappaleeseen kykyä varastoida lämpöä. Kappaleeseen varastoituvan lämmön suuruus riippuu siis kappaleen tiheydestä ja ominaislämpökapasiteetista.

Epästationääritilanteissa lämpötila vaihtelee yleensä nollan celsiusasteen molemmin puolin, jolloin vedessä tapahtuu faasimuutoksia. Veden jäätyminen ja sulaminen vaatii energiaa. Johtumisen energiataseyhtälöön voidaan lisätä veden faasimuutosenergia, joka huomio veden faasimuutoksiin kuluvan energian. Laskentaohjelmat eivät yleensä ota huomioon veden jäätymistä ja sulamista, jolloin näihin liittyvää faasimuutosenergiaa ei huomioida energiataseyhtälössä. Lämpötilatarkasteluissa faasimuutosenergian huomiotta jättämisestä syntyvä virhe ei kuitenkaan ole suuri. Veden jäätyminen huomioiminen on tärkeämpää kosteusteknisissä tarkasteluissa. [12]

4.1.3 Lämpösäteily

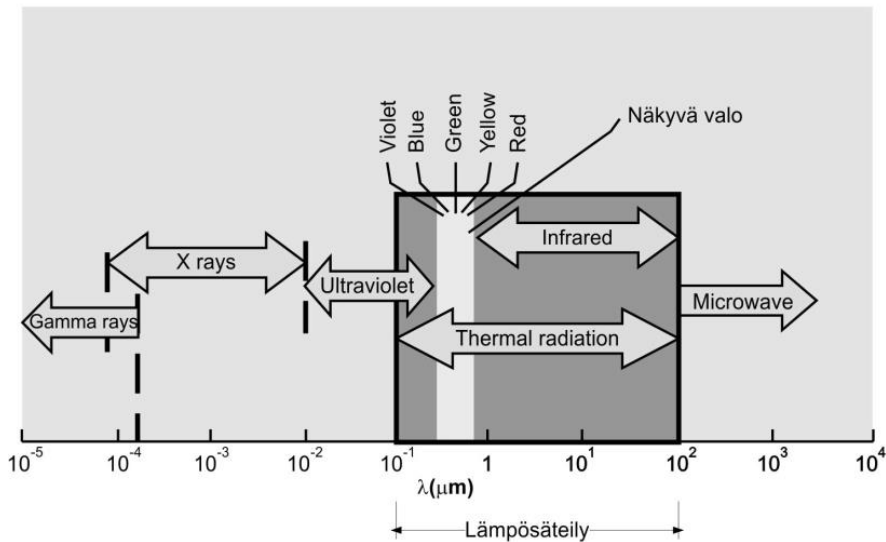
Lämpösäteily tarkoittaa lämpöenergian siirtymistä sähkömagneettisina aaltoina kahden eri lämpötilassa olevan pinnan välillä. Säteilyä syntyy, kun materiaalin atomeissa ja molekyyliissä olevien elektronien paikat muuttuvat. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapaisteen yläpuolella, säteilevät lämpöenergiaa ympäristöönsä. Muista lämmönsiirtymismuodoista poiketen, säteily ei tarvitse väliainetta siirtyäkseen. Itseasiassa väliaine hidastaa säteilyn siirtymistä. [12]

Auringon pinnasta lähtevä säteily jakaantuu muiden kappaleiden pinnoista lähtevän säteilyn tapaan eri aallon pituuksille. Säteilyn aallonpituus λ (μm) voidaan laskea kaavalla

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4.13)$$

missä c on valon nopeus ($2,998 \times 10^8$ m/s) ja f säteilyn taajuus (Hz). [12]

Kuvassa 18 on esitetty lämpösäteilyn aallonpituusalue, joka käsittää sähkömagneettisen spektrin aallonpituusalueen 10^{-1} – 10^2 μm . Myös näkyvän valon aallonpituus noin 0,4–0,7 μm osuu tälle aallonpituusalueelle.



Kuva 18. Eri säteilylaatuojen aallonpituuksia [12]

Kappaleen pinnan lämpötila vaikuttaa lähtevän säteilyn aallonpituuteen. Mitä korkeampi säteilevän pinnan lämpötila on, sitä suurempi osa lähtevästä säteilystä on lyhytaaltoista. Rakennusfysiikallisissa tarkasteluissa lämpösäteily jaetaan kuitenkin karkeasti lyhytaaltoiseen auringonsäteilyyn ja pitkäaaltoiseen lämpösäteilyyn. Lyhytaaltoiseksi säteilyksi lasketaan suoran auringonsäteilyn lisäksi ilmakehän hiukkasista tasaisesti eri suuntiin heijastunut auringon säteily, eli diffuusi säteily sekä suoraan pinnoilta heijastunut auringonsäteily. Lyhytaaltoisen säteilyn aallonpituus vaihtelee 0,2–3 μm välillä. Pitkäaaltoiseksi lämpösäteilyksi lasketaan muiden pintojen kuin auringon lähettämää eli emittoimaa lämpösäteilyä. [12]

Aurinko säteilee maapallon ilmakehän ulko-osiin noin 1340 W/m² säteilyteholla $I_{sol,0}$. Tästä säteilytehosta osa heijastuu ilmakehästä takaisin avaruuteen ja osa absorptoituu ilmakehään. Säteilyteho, joka kohdistuu ilmakehän läpi kulkeneiden auringonsäteiden vastaan kohtisuoralle pinnalle, lasketaan kaavalla

$$I_{sol} = I_{sol,0} \tau^m \quad (4.14)$$

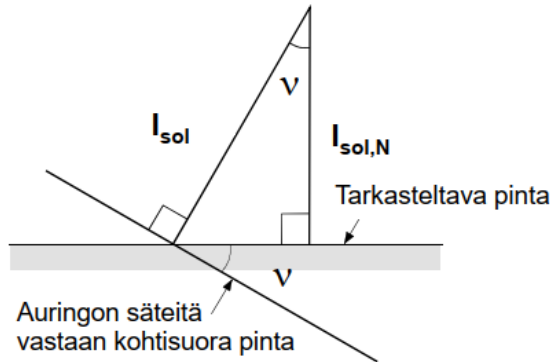
$$m = \frac{1}{\cos(90^\circ - \beta)} \quad (4.15)$$

missä τ (-) on ilmakehän läpäisykerroin, m (-) suhteellinen läpäisymassa, eli auringonsäteiden ilmassa kulkema matka verrattuna lyhimpään mahdolliseen matkaan ja β (°) auringon korkeuskulma. Ilmakehän läpäisykerroin vaihtelee pilvisen sään arvosta 0,62 kirkkaan sään arvoon 0,81 keskiarvon ollessa noin 0,7. [12]

Kun säteilyteho säteitä vastaan kohtisuoraa pintaa vasten tunnetaan, voidaan säteilyteho kohtisuoraan tarkasteltavaan pintaa laskea kaavalla

$$I_{sol,N} = I_{sol} \cos(\nu) \quad (4.16)$$

missä ν ($^\circ$) on tarkasteltavan pinnan normaali ja säteitä vastaan kohtisuoran pinnan normaalin välinen kulma, jota kutsutaan myös säteilyn lankeamispinnaksi. [12] Asiaa on havainnollistettu alla kuvassa 19.



Kuva 19. Säteilyteho kohtisuoraan tarkasteltavaan pintaan [12]

Kappaleen pinnalle saapuva kokonaissäteily I_{tot} (W/m^2) koostuu ilmakehän kautta tulevasta säteilytehosta I_{atm} (W/m^2) sekä pinnan ympäristön muista pinnoista heijastuneesta ja emittoituneesta lämpösäteilystä I_{sur} (W/m^2).

Ilmakehän kautta pinnalle tuleva säteily I_{atm} koostuu kohtisuoraan pintaan tulevasta auringon suorasta säteilystä $I_{sol,N}$ (W/m^2) (lyhytaaltainen), pintaan tulevasta diffuusista säteilystä eli hajasäteilystä I_D (W/m^2) (lyhytaaltainen) sekä pintaan tulevasta taivaan vastasäteilystä I_{sky} (W/m^2) (pitkäaaltainen).

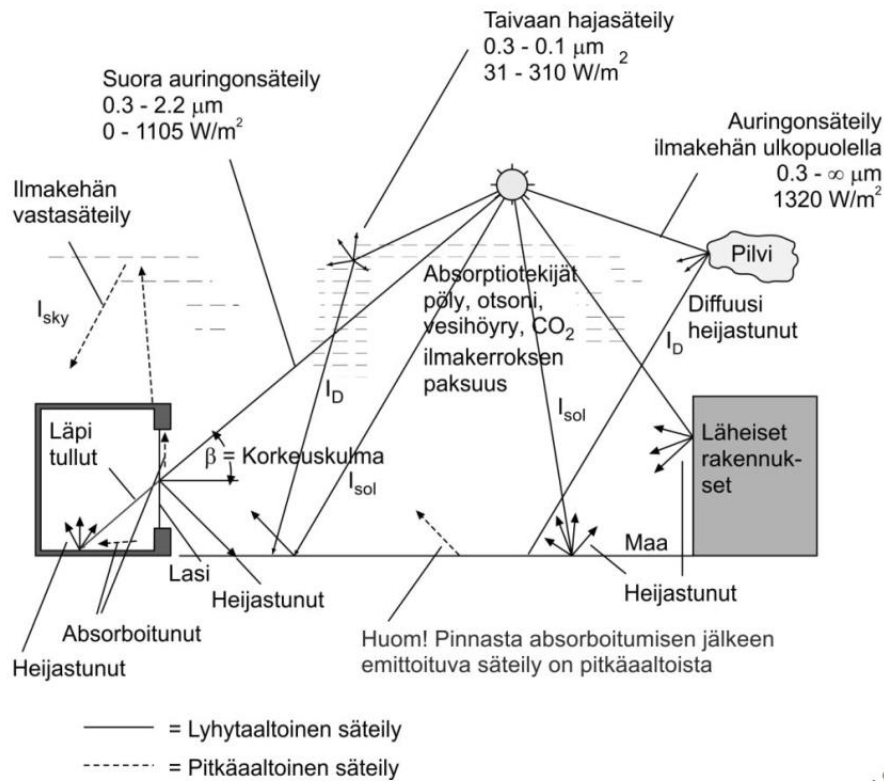
I_{sur} (W/m^2) koostuu maasta ja muista kappaleista heijastuneesta (lyhytaaltainen/pitkäaaltainen) ja emittoituneesta (pitkäaaltainen) lämpösäteilystä.

Rakenteen pinnalle saapuva kokonaissäteily lasketaan kaavalla

$$I_{tot} = I_{atm} + I_{sur} \quad (4.17)$$

$$I_{atm} = I_{sol,N} + I_D + I_{sky}. \quad [12] \quad (4.18)$$

Nämä auringonsäteilyn eri komponentit on havainnollistettu alla kuvassa 20. Lämpösäteily I_{sur} jätetään usein huomioimatta kattorakenteita tarkasteltaessa, mutta pihakan- sille lämpösäteilyä voi heijastua ja emittoitua esimerkiksi rakennusten seiniltä. [12,28]



Kuva 20. Auringon säteilyn eri komponentit ja niiden aallonpituudet [12]

Kappaleen pinnan absorboima säteilyenergia q_s (W/m^2) voidaan laskea kaavalla

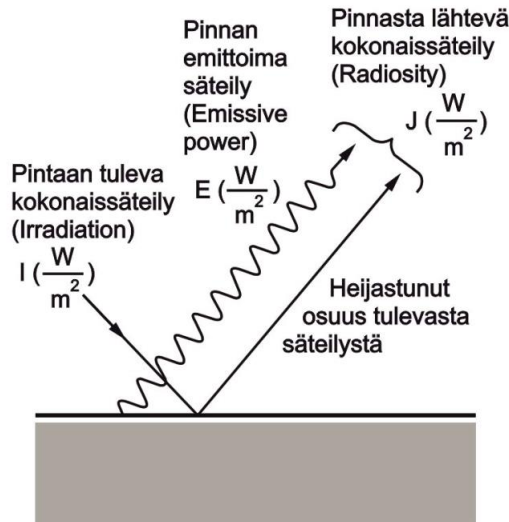
$$q_s = \alpha_{sol}(I_{sol,N} + I_D) + \alpha(I_{sky} + I_{sur}), \quad (4.19)$$

missä α_{sol} (-) on pinnan lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokerroin ja α (-) pinnan pitkäaaltoisen säteilyn absorptiokerroin.

Kappaleen pinnasta lähtevä kokonaissäteilyteho J (W/m^2) koostuu kuvan 21 mukaisesti pinnan emittoimasta ja pinnasta heijastuneesta säteilystä ja sen suuruus voidaan laskea kaavalla

$$J = E + \rho I, \quad (4.20)$$

missä E on pinnan emittoiva säteily (W/m^2), ρ on pinnan heijastuskerroin (-) ja I on pintaan tuleva kokonaissäteilyteho (W/m^2). [12]



Kuva 21. Pinnan säteilysuureita [12]

Pinnan emittomalle säteilylle on olemassa yläraja, joka voidaan laskea Stefan-Bolzmanin lain avulla:

$$E_b = \sigma T_s^4, \quad (4.21)$$

missä σ on Stefan-Bolzmanning vakio ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$) ja T_s säteilyä lähettävän pinnan lämpötila. Ylärajan arvo vastaa säteilyteholtaan ideaalisen mustan kappaleen lähettämää säteilytehoa, joka rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa pätee vain auringon lähettämään säteilytehoon. [12,28]

Erilaisille pinnoille on määritetty pinnan emissiviteetti ε (-) joka kuvaa tarkasteltavan pinnan säteilytehon ja ideaalimustan kappaleen säteilytehon suhdetta seuraavasti:

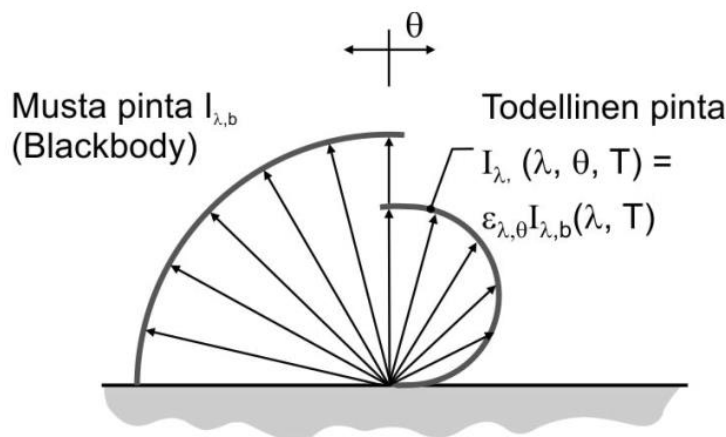
$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}. \quad (4.22)$$

Emissiviteetin arvo vaihtelee välillä 0–1, mutta suurimmalla osalla rakennusmateriaaleista pinnan emissiviteetti on huoneenlämmössä noin 0,8–0,95 välillä. Pienempiä emissiviteettejä kohdataan lähinnä vain kiiltävillä metallipinnoilla. Esimerkkejä erilaisista pintojen emissiviteettien arvoista löytyy alta taulukosta 7. [12]

Taulukko 7. *Esimerkkejä erilaisten pintojen emissiviteeteistä huoneenlämpötilassa (pitkäaaltoinen säteily) [12]*

Pinta	Emissiviteetti ε
Alumiini	
- kirkas	0,09
- oksidoitunut	0,20–0,33
Betoni, karkea	0,94
Huurre	0,985
Kattohuopa	0,92–0,94
Lasi	0,94
Maalit, lakat	
- alumiiniväri	0,27–0,62
- emalilakka	0,85–0,95
- musta maali	0,8–0,97
- valkoinen maali	0,9–0,97
Puu	0,8–0,9
Poltettu savi (tiili)	0,91
Karkea tiilikivi	0,93
Kalkkihiekkakivi	0,9

Todellisuudessa kappaleen pinnan lähettämä säteily ei ole täysin diffuusia eikä aallonpituusjakauma vastaa täysin mustan kappaleen lähettämää aallonpituusjakaumaa. Lisäksi pinnan emissiviteetti riippuu sekä säteilyn aallonpituudesta, että säteilyn lähtökulmasta pintaan nähden. Aallonpituusriippuvuuden takia emissiviteetti riippuu myös pinnan lämpötilasta. Alla kuvassa 22 havainnollistetaan mustan pinnan ja todellisen pinnan emittoiman säteilyn intensiteettien eroja. Rakennusfysiikassa pintoja tarkastellaan kuitenkin niin kutsuttuina harmaina pintoina, joista säteilyn oletetaan emittoituvan diffuusina säteilyä tasaisesti kaikkiin suuntiin. Lisäksi harmaan pinnan emissiviteetin oletetaan myös olevan riippumaton säteilyn aallonpituudesta. [12]



Kuva 22. Mustan pinnan ja todellisen pinnan emittoima säteilyn intensiteetti eri suuntiin [12]

Todellisen pinnan emittoima säteilyteho voidaan siis laskea kaavalla

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4. [12,28] \quad (4.23)$$

Kun tarkastella kahden pinnan välistä lämpösäteilyä voidaan niiden välinen nettosäteilyn määrä ja suunta laskea kaavalla

$$q_{rad} = \varepsilon_{1,2} \sigma (T_1^4 - T_2^4), \quad (4.24)$$

missä $\varepsilon_{1,2}$ on pintojen yhdistetty emissiviteetti, joka lasketaan pintojen pinta-alojen ja näkyvyyskertoimien avulla.

Säteilyn kohdatessa materiaalin pinnan, osa siitä heijastuu, osa absorboituu pinnan kautta materiaaliin ja osa voi tunkeutua materiaalin läpi. Näitä kolmea säteilykomponenttia kuvataan kertoimilla, jotka ovat heijastuskerroin ρ (-), absorptiokerroin α (-) ja läpäisykerroin τ (-). Kertoimien tulee toteuttaa ehto

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (4.25)$$

Läpäisykerroin on useimmilla rakennusmateriaaleilla, lasella ja läpinäkyviä muoveja lukuun ottamatta, lähes nolla, jolloin heijastuskerroin voidaan laskea suoraan kaavasta

$$\rho = 1 - \alpha. \quad (4.26)$$

Harmaiden pintojen välistä pitkäaaltoista säteilyä tarkasteltaessa voidaan pinnan absorptiokertoimen ja pinnan emissiviteetin välille johtaa Kirchoffin lakina tunnettu yhtälö

$$\alpha = \varepsilon. \quad (4.27)$$

Tällöin pinnan värillä ei ole juurikaan merkitystä absorptiokertoimen suuruuteen. Tilanne on toinen, kun määritetään auringon lähettämän lyhytaaltoisen säteilyn absorptiokertoimen kappaleen pinnalle α_{sol} (-). Lyhytaaltoisen auringonsäteilyn pinnan absorptiokerroin α_{sol} voi erota merkittävästi saman materiaalin pitkäaaltoisen säteilyn pinnan absorptiokertoimesta α ja emissiviteetistä ε . Pinnan tummuus vaikuttaa suuresti pinnan absorptiokertoimen α_{sol} suuruuteen ja se saa likimain seuraavat arvot eri pinnoilla: tummat pinnan noin 0,9, harmaat pinnat noin 0,7 ja vaaleat pinnan alle 0,5. [12] Auringonsäteilyn absorptiokertoimia eri materiaaleille on lueteltuna muun muassa lähteen [6] liitteessä 5.

Taivaan vastasäteilyn viilentävä vaikutus on otettava tarvittaessa huomioon. Erityisesti kirkkaina öinä voi taivasta vasten olevan pinnan lämpötila painua useita asteita ulkoilman lämpötilaa alemmas. Ilmiö perustuu taivaan ja pinnan väliseen lämpötilaeroon, joka pyrkii tasoittumaan. Tällöin rakennuksen pintaan kohdistuva nettosäteily saa negatiivisen arvon ja lämpösäteilyä siirtyy pinnalta taivaalle. Vaikka rakennuksen pinta säteilee taivaalle lämpöä ei taivaan lämpötila muutu. Sen sijaan rakennuksen vaipan lämpötila laskee.

Tarkasteltavaan pintaan taivaalta tuleva taivaan vastasäteilyn I_{sky} määrä voidaan laskea kaavasta

$$I_{sky} = 5,67 \left(\frac{T_{sky}}{100} \right)^4 \varepsilon_{sky}, \quad (4.28)$$

missä T_{sky} (K) on taivaan tehollinen lämpötila kelvineinä ja ε_{sky} (-) taivaan emissiviteetti, joka riippuu pilvisyydestä ja ilman vesihöyrynpitoisuudesta. T_{sky} on teoreettinen lämpötila, joka synnyttää vastaavan säteilytehon tarkasteltavaan rakennuksen pintaan kuin taivaalla olisi pinta, joka olisi vastaavassa lämpötilassa. T_{sky} saa ulkoilman kanssa saman arvon pilvisellä säällä, eli $T_{sky} = T_e$. Kun ilma on kirkas T_{sky} saa vaakapintaa tarkasteltaessa arvon

$$T_{sky} = 1,2T_e - 14, \quad (4.29)$$

jossa T_e on ulkolämpötila celsiusasteina. [12]

Kun tarkastellaan pihakannen pinnan ja taivaan välistä lämpösäteilyä voidaan olettaa, että pintojen pinta-alojen suhde lähenee nollaa ja näkyvyyskerroin arvoa yksi. Tällöin yhdistettynä emissiviteettinä voidaan käyttää tarkasteltavan pinnan emissiviteettiä. Säteilyn lämmönsiirtokerroin pinnan ja taivaan välillä voidaan laskea kaavalla

$$h_{rad,e} = 4\varepsilon_{se}\sigma \left(\frac{T_s + T_{sky}}{2} \right)^3, \quad (4.30)$$

missä ε_{se} (-) on tarkasteltavan pinnan emissiviteetti ja T_s (K) pinnan lämpötila. Tällöin pinnan ja taivaan välisen nettosäteilyn määrä ja suunta määräytyy pinnan ja taivaan lämpötilaerosta kaavan 4.31 mukaisesti

$$q_{rad,e} = h_{rad,e}(T_s - T_{sky}). \quad [12] \quad (4.31)$$

5. PIHAKANNEN LÄMPÖLIIKKEET

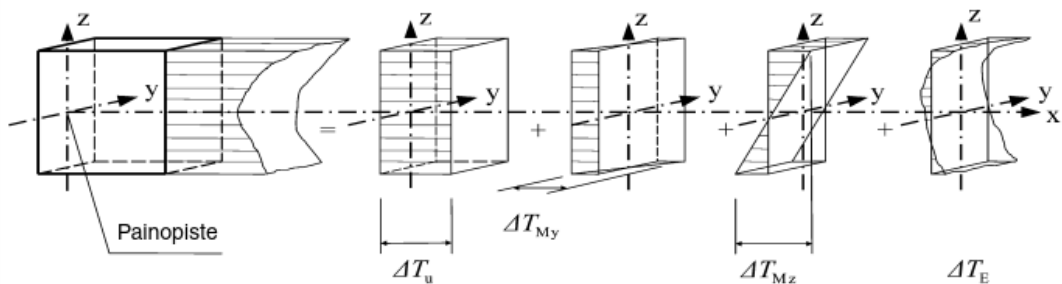
5.1 Lämpötilakuormat Eurokoodissa

Eurokoodissa on oma osansa rakenteiden lämpötilakuormille, joka käsittelee lämpökuormista rakenteisiin syntyviä lämpöjakaumien määrittystä. Lämpökuormia aiheutuu rakenteille niiden käyttötarkoituksen tai ympäristön takia. Eurokoodi antaa ohjeita lämpötilakuormien ja lämpöjakaumien laskentaan rakennuksissa, silloissa, teollisuuden savupiipuissa, putkistoissa, siloissa, säiliöissä ja jäähdytystorneissa, pääpainon kuitenkin ollessa selvästi silloissa. Seuraavaksi käydään läpi lämpökuormien ja lämpöjakaumien määrittäminen rakennus- ja siltatapauksissa standardin EN 1991-1-5 mukaan.

5.1.1 Rakennuksille

Standardin EN 1991-1-5 mukaan lämpötilakuormat tulee ottaa rakennusten kantavien rakenteiden suunnittelussa huomioon, jos on mahdollista, että rakenteen kapasiteetti murto- tai käyttörajatilassa voi ylittyä lämpöliikkeiden tai -jännitysten seurauksesta. Lämpökuormat huomioidaan suunnittelussa muuttuvina ja välillisinä kuormina. [7]

Lämpötilakuorma voivat aiheuttaa rakenteeseen esimerkiksi kuvan 23 muotoisen lämpötilajakauman. Lämpökuormista rakennusosaan syntyvä lämpötilajakauma voidaan jakaa kuvan 23 mukaisesti neljään eri peruskomponenttiin, jotka ovat keskilämpötilan muutos ΔT_u , lineaarisesti jakautunut lämpötilaero ΔT_M akselin z-z ja y-y suhteen sekä epälineaarisesti jakautunut lämpötilaero ΔT_E . Nämä peruskomponentit tulee määrittää standardin EN 1991-1-5 luvun 5 periaatteiden mukaisesti käyttäen alueellisia tietoja. Ilmastosta johtuvat lämpökuormat määritetään huomioimalla varjossa mitattujen lämpötilojen vaihtelu ja auringonsäteily. Jos alueellisia tietoja ei ole saatavilla käytetään määrittämisessä luvun 5.3 ohjearvoja kansallinen liite huomioiden.



Kuva 23. Lämpötilajakauman peruskomponentit [7]

Pihakannelle keskilämpötilanmuutos ΔT_u määritetään kaavasta

$$\Delta T_u = T - T_0, \quad (5.1)$$

missä T on talvi- tai kesäajan ilmaston lämpötilasta johtuva pihakannen laatan keskilämpötila ja T_0 asennus- tai valuaikainen lämpötila. Alkulämpötilalle T_0 käytetään 10 °C , jos tarkempaa tietoa ei ole käytettävissä [8]. Lineaarisesti jakautunut lämpötilaero ΔT_M määritetään poikkileikkauksen sisä- ja ulkopintojen lämpötilojen erotuksella.

$$\Delta T_M = T_{yp} - T_{ap}. \quad (5.2)$$

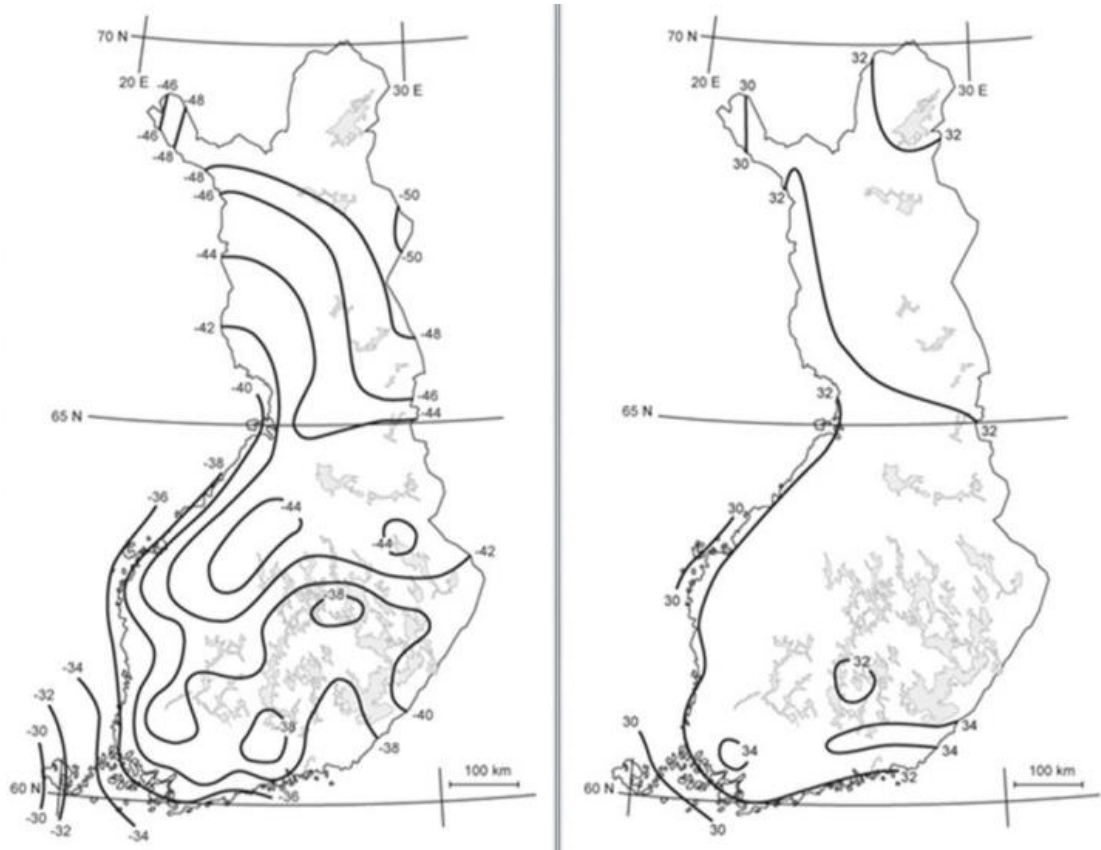
Kuvassa 23 ΔT_E on epälineaarisesti jakautunut lämpötilaero, joka muodostaa rakenteelle tasapainossa olevien jännitysten kokonaisuuden, jolloin siitä ei aiheudu rakenteelle voimaa tai momenttina vaikuttavaa kuormaa. [7]

Jos tarkempia alueellisia tietoja ei ole saatavilla taulukon 8 avulla voidaan määrittää suuntaa antavia arvoja pihakannen yläpuolisen ympäristön lämpötilojen ääriarvoille T_{out} kesällä ja talvella. Taulukko huomioi auringonsäteilyn vaikutukset eri värisille pinnoille lämpötilan korotuksilla T_3 , T_4 ja T_5 , joiden arvot on annettu kansallisessa liitteessä. Kansallisen liitteen mukaan vaakasuuntaisille rakenteille kuten pihakansille käytetään arvoja $T_3 = 10\text{ °C}$, $T_4 = 20\text{ °C}$ ja $T_5 = 30\text{ °C}$. Mikäli rakennusosan pinnan absorptiokerroin on määritetty, voidaan käytettävä lämpötila valita sen mukaan, jolloin pinnan värillä ei ole merkitystä. [7,8]

Taulukko 8. *Maanpäällisten rakenteiden suuntaa antavia lämpötiloja kesällä ja talvella [7]*

Vuodenaika	Määrävä tekijä	Lämpötila T_{out} [°C]	
Kesä	Suhteellinen absorptiokyky pinnan väristä riippuen	0,5 kiiltävä, vaalea pinta	$T_{max} + T_3$
		0,7 vaaleaksi värjätty pinta	$T_{max} + T_4$
		0,9 tumma pinta	$T_{max} + T_5$
Talvi		T_{min}	

Taulukon 8 T_{max} ja T_{min} määräytyvät rakennuksen sijainnin mukaan ja niiden arvot ovat annettu kansallisessa liitteessä. Kuvan 24 vasemmalla puolella on esitetty Suomen varjossa mitattuja vuotuisia minimilämpötilan T_{min} isotermejä ja oikealla puolella vuotuisia maksimilämpötilan T_{max} isotermejä. Kuvan lämpötilojen isotermit on määritetty niin, että niiden alittumis- ja ylittymistodennäköisyydet ovat 0,02, eli noin kerran 50 vuodessa [8]. Taulukkoa 8 ja kuvaa 24 tutkimalla huomataan, että Vantaalla sijaitsevan pihakannen tumman pinnan päällisen ilman lämpötilavaihtelu voi vuodessa olla lähes 100 °C ($-36\text{ °C} \dots 32\text{ °C} + 30\text{ °C}$).



Kuva 24. Suomen vuotuisia ilman minimi- ja maksimivarjotilämpötilojen isotermejä [8]

5.1.2 Silloille

Eurokoodi EN 1991-1-5 esittelee luvussa 6 menetelmät siltojen keskilämpötilojen muutosten ja pintojen lämpötilaerojen laskentaan. Menetelmät huomioivat siltojen päällysrakennetyypit. Pintojen väliselle lämpötilaeron määrittämiselle standardi esittää kaksi menetelmää, joista toinen huomioi lämpöjakauman epälineaarisuuden. Menetelmillä lämpötilajakaumat voidaan laskea erikseen lämpenevälle ja viilenevälle rakenteelle. Ulkoilmaan avoimien pihakansien olosuhteiden voidaan ajatella vastaavan siltojen olosuhteita. Maanalaisiin tai muuten suljettuihin pihakansiin ohjeita ei voida soveltaa

Siltojen lämpölaajenemisesta johtuvan pituuden vaihtelun määrittämistä varten silloille määritetään keskilämpötilan vaihteluväli. Keskilämpötilan vaihteluväli riippuu siltaan kehittyvästä minimi- ja maksimilämpötilasta $T_{e,min}$ ja $T_{e,max}$, jotka määritetään varjossa mitattujen ilman minimi- ja maksimilämpötilojen T_{min} ja T_{max} sekä alkulämpötilan T_0 perusteella. Samaan tapaan kuin rakennusten yhteydessä, alkulämpötilana T_0 käytetään rakennusosan asennusaikaista tai sen valmistusaikaista lämpötilaa. [7] Jos alkulämpötilasta ei ole tietoa, käytetään arvoa 10 °C. [8]

Kun lasketaan suurinta keskilämpötilan muutoksesta johtuvaa kutistumaa, käytetään laskuissa keskilämpötilanmuutosta $\Delta T_{N,con}$, joka lasketaan kaavalla

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min}. \quad (5.3)$$

Vastaavasti suurinta laajenemista laskettaessa käytetään keskilämpötilamuutoksena $\Delta T_{N,exp}$, joka lasketaan kaavalla

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0. \quad (5.4)$$

Termit $T_{e,min}$ ja $T_{e,max}$ määräytyvät siltojen päällysrakenteiden perusteella ja saavat betonipäällysteen tapauksessa arvot $T_{e,min} = T_{min} + 8 \text{ °C}$ ja $T_{e,max} = T_{max} + 2 \text{ °C}$. [7]

Siltojen kansien pystysuuntaisten lämpötilaerojen määrittämiseen eurokoodi tarjoaa kaksi menettelytapaa.

Menettelytapa 1

Ensimmäinen menettelytapa ottaa pystysuuntaiset lämpötilaerot huomioon ekvivalenttien lineaaristen lämpötilaerojen $\Delta T_{M,heat}$ ja $\Delta T_{M,cool}$ avulla, joiden arvot ovat betonilaatan tapauksessa $\Delta T_{M,heat} = 15 \text{ °C}$ ja $\Delta T_{M,cool} = 8 \text{ °C}$. Lämpötilaero $\Delta T_{M,heat}$ kuvaa tilannetta, jossa rakenteen yläpinta on lämpimämpi kuin alapinta ja $\Delta T_{M,cool}$ tilannetta, jossa alapinnan lämpötila on suurempi kuin yläpinnan. Esitetyt arvot perustuvat eri mittaisia siltoja edustavalla otoksella saatujen lineaaristen lämpötilaerojen yläraja-arvoihin. Lisäksi arvoissa on huomioitu 50 mm paksuinen päällyste. Päällysteen paksuuden poiketessa 50 mm arvosta lämpötilaerot kerrotaan korjauskertoimella k_{sur} , jonka arvoja eri paksuisille päällysteille on annettu taulukossa 9.

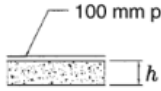
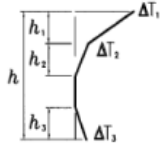
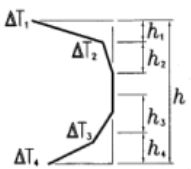
Taulukko 9. Korjauskertoimen k_{sur} arvoja eri laattapäällysteille

Päällysteen paksuus [mm]	Yläpinta alapintaa lämpimämpi	Alapinta yläpintaa lämpimämpi
päällystämätön	0,8	1,1
vesieristetty (tumma pinta)	1,5	1,0
50	1,0	1,0
100	0,7	1,0
150	0,5	1,0

Menettelytapa 2

Toinen menettelytapa määrittää pystysuuntaisen lineaarisen lämpötilaeron epälineaariset vaikutukset huomioiden. Epälineaarinen lämpötilajakauma määritetään erikseen laatan lämpenemis- ja jäähtymistilanteessa. Kuvan 25 lämpöjakauma on määritetty betonilaatalle, jonka päällä on 100 mm paksu päällyste. Muiden laatta- ja päällystepaksuuksien epälineaaristen lämpötilajakaumien väliarvoja annetaan standardin 1991-1-5 liitteessä

B. Kuvan 25 avulla määritetty epälineaarinen lämpötilaero ΔT sisältää lämpötilajakauman komponentit ΔT_M ja ΔT_E sekä pienen osuuden komponentista ΔT_N . [7]

Rakenteen materiaali ja tyyppi	Lämpötilaero (ΔT)																																																																	
	(a) Lämpeneminen	(b) Jäähtyminen																																																																
 <p>100 mm päällyste</p> <p>3a. Betonilaatta</p>	 <p> $h_1 = 0,3h$, mutta $\leq 0,15$ m $h_2 = 0,3h$, mutta $\geq 0,10$ m mutta $\leq 0,25$ m $h_3 = 0,3h$, mutta $\leq (0,10$ m + päällysteen paksuus metreinä) (ohuilla laatoilla paksuutta h_3 rajoittaa mitta $h - h_1 - h_2$) </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>h</th> <th>ΔT_1</th> <th>ΔT_2</th> <th>ΔT_3</th> </tr> <tr> <td>m</td> <td></td> <td>°C</td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\leq 0,2$</td> <td>8.5</td> <td>3.5</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>0.4</td> <td>12.0</td> <td>3.0</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>0.6</td> <td>13.0</td> <td>3.0</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>≥ 0.8</td> <td>13.0</td> <td>3.0</td> <td>2.5</td> </tr> </tbody> </table>	h	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	m		°C		$\leq 0,2$	8.5	3.5	0.5	0.4	12.0	3.0	1.5	0.6	13.0	3.0	2.0	≥ 0.8	13.0	3.0	2.5	 <p> $h_1 = h_4 = 0,20h$, mutta $\leq 0,25$ m $h_2 = h_3 = 0,25h$, mutta $\leq 0,20$ m </p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>h</th> <th>ΔT_1</th> <th>ΔT_2</th> <th>ΔT_3</th> <th>ΔT_4</th> </tr> <tr> <td>m</td> <td></td> <td>°C</td> <td></td> <td></td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$\leq 0,2$</td> <td>-2.0</td> <td>-0.5</td> <td>-0.5</td> <td>-1.5</td> </tr> <tr> <td>0.4</td> <td>-4.5</td> <td>-1.4</td> <td>-1.0</td> <td>-3.5</td> </tr> <tr> <td>0.6</td> <td>-6.5</td> <td>-1.8</td> <td>-1.5</td> <td>-5.0</td> </tr> <tr> <td>0.8</td> <td>-7.6</td> <td>-1.7</td> <td>-1.5</td> <td>-6.0</td> </tr> <tr> <td>1.0</td> <td>-8.0</td> <td>-1.5</td> <td>-1.5</td> <td>-6.3</td> </tr> <tr> <td>≥ 1.5</td> <td>-8.4</td> <td>-0.5</td> <td>-1.0</td> <td>-6.5</td> </tr> </tbody> </table>	h	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4	m		°C			$\leq 0,2$	-2.0	-0.5	-0.5	-1.5	0.4	-4.5	-1.4	-1.0	-3.5	0.6	-6.5	-1.8	-1.5	-5.0	0.8	-7.6	-1.7	-1.5	-6.0	1.0	-8.0	-1.5	-1.5	-6.3	≥ 1.5	-8.4	-0.5	-1.0	-6.5
h	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3																																																															
m		°C																																																																
$\leq 0,2$	8.5	3.5	0.5																																																															
0.4	12.0	3.0	1.5																																																															
0.6	13.0	3.0	2.0																																																															
≥ 0.8	13.0	3.0	2.5																																																															
h	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4																																																														
m		°C																																																																
$\leq 0,2$	-2.0	-0.5	-0.5	-1.5																																																														
0.4	-4.5	-1.4	-1.0	-3.5																																																														
0.6	-6.5	-1.8	-1.5	-5.0																																																														
0.8	-7.6	-1.7	-1.5	-6.0																																																														
1.0	-8.0	-1.5	-1.5	-6.3																																																														
≥ 1.5	-8.4	-0.5	-1.0	-6.5																																																														

Kuva 25. Betonilaatan epälineaariset lämpötilajakaumat lämpenemisessä ja jäähtymisessä [7]

Jos lämpökuormien laskennassa halutaan huomioida keskilämpötilan suurin muutos ja lämpötilaero samanaikaisesti, voidaan yhteisvaikutus laskea kuormayhdistelmistä

$$\Delta T_{M,heat} \text{ (tai } \Delta T_{M,cool}) + \omega_N \Delta T_{N,exp} \text{ (tai } \Delta T_{N,con}) \quad (5.5)$$

tai

$$\omega_M \Delta T_{M,heat} \text{ (tai } \Delta T_{M,cool}) + \Delta T_{N,exp} \text{ (tai } \Delta T_{N,con}), \quad (5.6)$$

joista huomioidaan epäedullisempi vaikutus rakenteeseen. Kertoimien ω_N ja ω_M suositusarvot ovat $\omega_N = 0,35$ ja $\omega_M = 0,75$. Jos laskennassa käytetään menettelytapaa 2, käytetään laskennassa lineaarisen lämpötilaeron ΔT_M sijasta lämpötilaeroa ΔT , joka sisältää lämpötilaerot ΔT_M ja ΔT_E . [7]

Larssonin ja Svenssonin vertasivat menettelytapoja väitöskirjatutkimuksessaan. tutkimuksen mukaan menettelytapa 2 antaa realistisemmän lämpöjakauman kuin menettelytapa 1. Lisäksi menettelytavalla 2 laskettuna vaadittu rauditusmäärä on vähäisempi. [28]

5.2 Lämpötilamuodonmuutokset ja pakkovoimat

Kun rakenteen lämpöjakauma muuttuu, aiheuttaa se rakenteeseen muodonmuutoksia. Tasainen lämpötilanmuutos aiheuttaa rakenteen pituuden muutoksia. Lämpötilaerot rakenteen eri pinnoilla taas aiheuttaa rakenteen käyritystä. Estetty pituudenmuutos aiheuttaa rakenteelle suuria normaalivoimia. Estetty käyritymä taas johtaa suuriin vakio- taivutusmomenttirasituksiin pitkin rakennetta. Rakenteisiin lämpöjakauman muutoksista syntyvät jännitykset vaihtelevat siis jatkuvasti ja niiden suuruuteen vaikuttaa lämpötila- vaihteluiden lisäksi rakennetta tukevien rakenteiden ja itse liitosten jäykkyydet. [21]

5.2.1 Tasainen lämpötilanmuutos

Keskilämpötilavaihteluiden ΔT_u vaikutukset pihakanteen määritetään betonin pituuden lämpötilakertoimen avulla. Standardin EN 1991-1-5 liite C antaa betonin pituuden lämpötilakertoimen suunnitteluarvoksi $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [7]. Todellisuudessa betonin pituuden lämpötilakerroin vaihtelee $8,6\text{--}12,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ välillä. Rakenteen pituuden muutos keski- lämpötilan muutoksesta saadaan kaavasta

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T_u, \quad (5.7)$$

missä L_0 on rakenteen alkuperäinen pituus, α lämpötilakerroin ja ΔT_u keskilämpötilan muutos. [6,25] Keskilämpötilan muutos lasketaan asettamalla lähtölämpötila, jossa muodonmuutosten suuruus on nolla. Aina, kun rakennusosan keskilämpötila poikkeaa tästä arvosta, kokee se muodonmuutoksia. Lähtölämpötila on rakenteen asennus- tai valmistusaikainen lämpötila. Asennusaikaisella lämpötilalla on siis suuri vaikutus rakenteen lämpöliikkeisiin.

Mikäli lämpöliike ei pääse tapahtumaan pihakannella vapaasti, syntyy rakenteeseen pakkovoimia. Pakkovoimien suuruus riippuu laattaa kantavien pystyrakenteiden jäykkyydestä siten, että mitä jäykempiä pystyrakenteet ovat, sitä suurempia ovat pihakannessa vaikuttavat pakkovoimat. Toisin sanoen, vaikka pihakannen liitokset pystyrakenteisiin olisivat jäykkiä, tapahtuu pihakannen lämpöliike melko vapaasti, jos pystyrakenteina ovat esimerkiksi hoikat pilarit, joiden jäykkyydet ovat pieniä. Tällöin hoikat pilarit taipuvat ja kiertyvät pihakannen liikkeen johdosta. Jos pystyrakenteet ovat jäykkiä, ei lämpölaajeneminen pääse tapahtumaan ja pihakanteen syntyy pakkovoimia. Pakkovoimista johtuvat jännitykset aiheuttavat halkeilua pihakannella, jos betonin vetolujuus ylittyy.

Estetystä muodonmuutoksesta syntyviä jännityksiä voidaan arvioida Hooken lailla. Kun lämpöliike pääsee tapahtumaan vapaasti, kuten kuvassa 26, on pihakanteen syntyvän jännityksen arvo nolla:

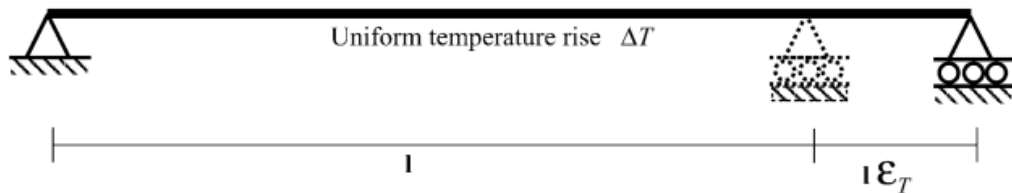
$$\Delta L = \varepsilon_T L, \text{ jolloin } \sigma = 0. \quad (5.8)$$

Kun lämpöliike on estetty, syntyy rakenteeseen jännitys, jonka suuruus riippuu suhteellisesta muodonmuutoksesta ε_T , joka tapahtuisi vapaassa muodonmuutoksessa sekä betonilaatan kimmokertoimesta E_c :

$$\Delta L = 0, \text{ jolloin } \sigma = \varepsilon_T E_c. [10,21,25] \quad (5.9)$$

Suhteellinen muodonmuutos määritetään rakenteen muodonmuutoksen suuruuden ja alkuperäisen pituuden suhteesta, mutta se voidaan laskea myös suoraan lämpötilakerroimen ja keskilämpötilamuutoksen avulla:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T_u. \quad (5.10)$$



Kuva 26. Vapaasti tapahtuva laatan lämpötilamuodonmuutos [21]

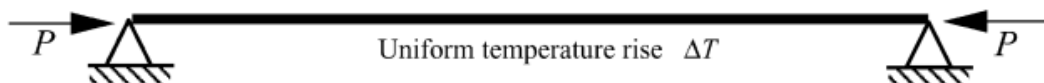
Jos muodonmuutos on estetty, syntyy rakenteeseen jännityksiä. Esimerkiksi kuvan 27 mukaisessa tilanteessa, laatan lämpöliikkeiden suuntaan jäykästi kiinnitettyyn pihakan-teen syntyy jännityksiä tasaisen lämpötilamuutoksen vaikutuksesta kaavan 5.11 mukaisesti (puristus merkitään negatiivisena):

$$\sigma = E_c \varepsilon_T = -E_c \alpha \Delta T_u. \quad (5.11)$$

Kun huomioidaan rakenteen pinta-ala, voidaan syntyvän pakkovoiman suuruus laskea kaavalla

$$P = -E_c A \alpha \Delta T_u. [21,25] \quad (5.12)$$

Kaavasta huomataan, että syntyvä pakkovoima ei riipu laatan pituudesta.

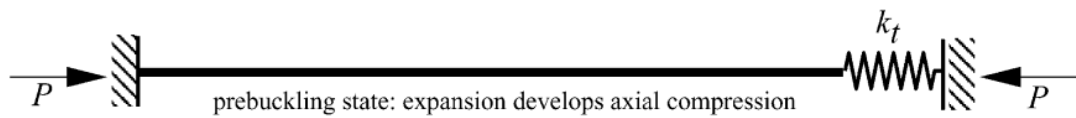


Kuva 27. Laatan estetty lämpötilamuodonmuutos [21]

Todellisuudessa täysin jäykkiä rakenteita ei ole olemassa ja yleensä rakenteiden aksiaaliset jäykkyydet ovat niin suuria, että suurin osa muodonmuutoksista pääsee aina tapahtumaan, mikä pienentää laattarakenteeseen syntyviä jännityksiä. Jotta jännityksiä

voidaan laskea tarkemmin, tulee rakennetta tukevien rakenteiden jäykkyys tuntea. Rakennetta tukevien rakenteiden jäykkyys voidaan mallintaa kuvan 28 mukaisella jousella. Jousen jäykkyys on k_t (EA/L). Kun tukien jäykkyys otetaan huomioon, voidaan rakenteeseen vaikuttava jännitys laskea kaavalla

$$\sigma = -\frac{E_c \alpha \Delta T_u}{1 + \frac{E_c A}{k_t L}} \quad [21,25] \quad (5.13)$$



Kuva 28. Osittain estetty laatan lämpötilamuodonmuutos rajallisesti jäykillä tuilla [21]

Kaavasta huomataan, että laattaa tukevien rakenteiden jäykkyyden ollessa sama kuin laatalta, putoaa pakkovoimista syntyvät jännitykset puoleen täysin jäykästä tapauksesta.

5.2.2 Lineaarisesti jakautunut lämpötilajakauma

Kun laatasta vaikuttaa lineaarisesti jakautunut lämpötilajakauma, laatan sisäiset lämpötilaerot aiheuttavat vapaasti tuettuun laattaan kuvan 29 mukaisesti vakio käyritymän θ , joka voidaan laskea kaavalla

$$\theta = \alpha \frac{\Delta T_{pinta}}{h}, \quad (5.14)$$

missä

$$\Delta T_{pinta} = T_1 - T_2. \quad [21] \quad (5.15)$$

Jos laatan käyritymistä ei estetä jäykillä liitoksilla, käyrityminen pääsee tapahtumaan vapaasti. Palkeilla tämä käyrityminen tapahtuu vapaasti, mutta laatoilla se aiheuttaa estettyjä rasituksia. Teorian yksinkertaistamiseksi, käyrityminen ajatellaan tapahtuvan vapaasti myös laattarakenteilla.

Vapaasta käyritymästä syntyvä taipuman suuruus jokaisessa laatan pisteessä voidaan laskea laatan käyritymän tai momentin ja taivutusjäykkyyden avulla differentiaaliyhtälöllä

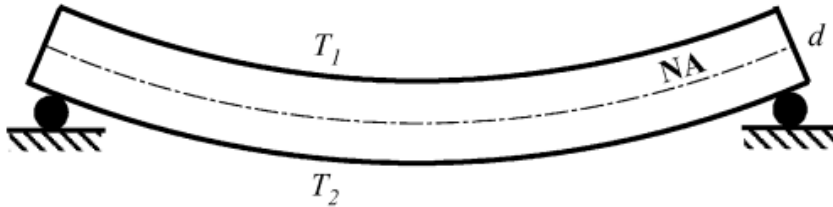
$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} = \theta = \frac{M}{E_c I}. \quad (5.16)$$

Reunaehdot huomioiden kuvan 29 mukaisen vapaasti tuetun laatan taipuma voidaan laskea kaavalla:

$$\delta(x) = \frac{1}{2}\theta x^2 - \frac{L\theta}{2}x. \quad (5.17)$$

Vapaasti tuetun laatan maksimitaipuma on laatan keskellä ja se voidaan laskea kaavalla

$$\delta_{max} = \delta\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{1}{8}\theta L^2. \quad (5.18)$$



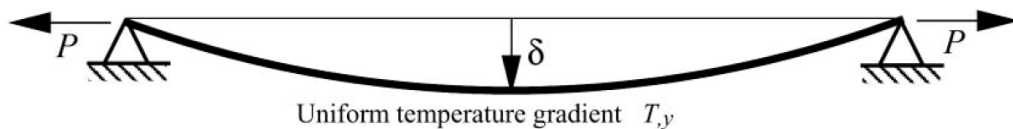
Kuva 29. Lämpötilakäyritymä vapaasti tuetulla laattalla ($T_2 > T_1$) [21]

Käyrityksen takia laatan päiden välimatka lyhenee laatan yläreunassa ja pitenee alareunassa. Tämä käyrityksestä johtuva suhteellinen päiden etäisyyden lyheneminen voidaan laskea kaavalla

$$\varepsilon_\theta = 1 - \frac{\sin(L\theta/2)}{L\theta/2}, \quad (5.19)$$

missä L on laatan pituus. Jos tämä päiden lyheneminen estetään kuvan 30 mukaisilla sivusuuntaan jäykillä tuilla, aiheutuu laattaan vetojännityksiä, jotka voidaan laskea kaavalla

$$\sigma = \varepsilon_\theta E_c. \quad [21] \quad (5.20)$$



Kuva 30. Sivusuunnassa jäykästi tuettu laatta lineaarisesti jakautuneen lämpötilakuorman alaisena [21]

Kuvan 30 mukaisen tilanteen laatan taipumat eri pisteissä voidaan laskea kaavalla

$$\delta(x) = -\frac{\theta}{k^2} \left(\frac{\cosh(kL)-1}{\sinh(kL)} \sinh(kx) - \cosh(kx) + 1 \right) \quad (5.21)$$

$$k = \sqrt{\frac{P}{E_c I}}. \quad [21] \quad (5.22)$$

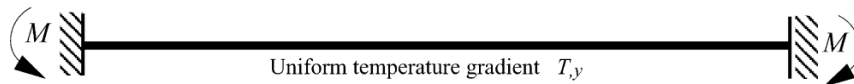
Jos taas kiertymä on estetty kuvan 31 mukaisilla jäykillä tuilla, syntyy laattaan vakiomomentti, joka pitää laatan suorana. Momentin suuruus lasketaan kaavasta

$$M = E_c I \theta = E_c I \alpha \Delta T_{pinta}, \quad (5.23)$$

missä I (m^4) on laatan neliömomentti. [21] Jos raudoitusta ei huomioida suorakaiteen muotoisen rakenteen neliömomentti lasketaan kaavalla

$$I = \frac{bh^3}{12}, \quad (5.24)$$

missä b on rakenteen leveys ja h rakenteen korkeus. Momentti aiheuttaa laatan lämpimämmälle puolelle puristusjännityksiä ja kylmemmälle vetojännityksiä. [21] Neliömomentti voidaan tarvittaessa laskea tarkemmin. Laskentamenetelmä esitetään kappalessa 5.4.

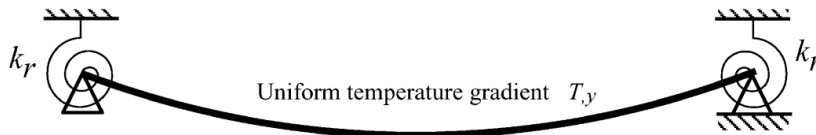


Kuva 31. Jäykästi tuettu laatta lineaarisesti jakautuneen lämpötilakuorman alaisena [21]

Todellisissa rakenteissa kiertymää täydellisesti estävää jäykkää liitosta ja tukea on vaikea saavuttaa, jolloin osa käyristymästä ja sen johdosta taipumasta pääsee syntymään. Kun laatan liitos tukiin on osittain jäykkä, lasketaan laattaan läpi vaikuttava vakiomomentti kaavalla

$$M = \frac{E_c I \alpha \Delta T_{\text{pinta}}}{1 + \frac{2E_c I}{k_r L}}, \quad (5.25)$$

missä k_r on liitoksen jäykkyys (EI/L), joita kuvaa kuvan 32 kiertymäjouset. [21]



Kuva 32. Osittain jäykästi tuettu laatta lineaarisesti jakautuneen lämpötilakuorman alaisena [21]

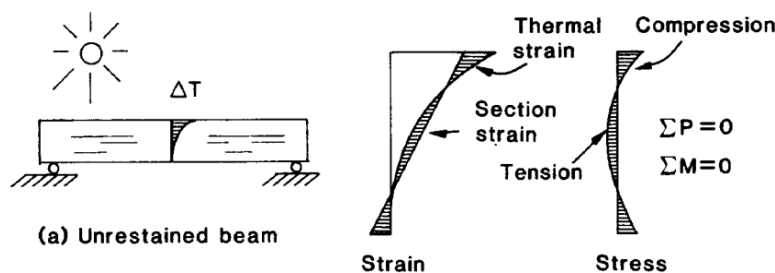
Kaavasta 5.25 huomataan, että jos tuen kiertymäjäykkyys on sama kuin laatan taivutusjäykkyys, putoaa rakenteeseen vaikuttava momentti kolmasosaan täysin jäykän tuen tapaukseen verrattuna.

5.2.3 Epälineaarisesti jakautunut lämpötilajakauma

Tavanomaisessa suunnittelussa tyypillisesti lämpöjakauman oletetaan olevan lineaarinen, jolloin lämpögradienttina voidaan käyttää suoraan pintojen lämpötilaeroa. Esimerkiksi eurokoodin rakennusten lämpökuormien laskennassa rakenteisiin syntyvät lämpöjakauma oletettiin lineaariseksi.

Useimmissa tapauksissa rakenteen lämpiäminen tapahtuu pintojen kautta, jolloin lämpöenergia johtuu syvemmälle rakenteeseen. Tilanteessa rakenteen pinta lämpiää muuta rakennetta nopeammin ja rakenteeseen syntyy vahvasti epälineaarinen lämpöjakauma. Tällaisessa tilanteessa lämpöjakauman oletaminen lineaariseksi ei ole järkevää, sillä se johtaa liian suureen lämpögradientin käyttöön mikä voi johtaa rakenteen ylirajoitukseen. [30] Ääriolosuhteiden lämpökuormista syntyvien pakkovoimien määrittämisessä on siis hyvä huomioida lämpöjakaumien mahdollinen epälineaarisuus.

Vecchio jakaa kappaleessa 5.1.1 esitetyt lämpöjakauman komponentit primäärilämpöjännityksiä (primary thermal stress) aiheuttaviin ja jatkuvuuslämpöjännityksiä (continuity thermal stress) aiheuttaviin. Jatkuvuuslämpöjännityksiä aiheuttavat tasainen lämpötilan muutos ΔT_u ja lineaariset lämpötilaerot ΔT_{My} ja ΔT_{Mz} . Jatkuvuuslämpöjännitykset syntyvät, kun rakenteen muodonmuutoskykyä rajoitetaan. Primäärilämpöjännityksiä taas aiheuttaa epälineaarisesti jakautunut lämpöjakauma ΔT_E . Lämpöjakaumista ΔT_u ja ΔT_M poiketen, epälineaarinen lämpöjakauma ΔT_E aiheuttaa rakenteeseen tasapainossa olevia sisäisiä veto- ja puristusjännityksiä myös vapaasti tuettuihin rakenteisiin kuvan 33 mukaisesti. Primäärijännityksiä syntyy aina, kun rakenteessa vaikuttaa epälineaarinen lämpöjakauma. Primäärijännitykset syntyvät kahden vaatimuksen yhteensopimattomuudesta, jotka ne tasapainottavat syntyvällä jännitystilalla. Vaatimukset ovat poikkileikkauksen säilyminen tasana ja jännityksettömien partikkelien lämpölaajeneminen suhteessa lämmön kasvuun. Yleensä jatkuvuuslämpöjännitykset ovat merkittävämpiä kuin primäärijännitykset, ja niillä on suurempi vaikutus, kun tarkastellaan lämpökuormien vaikutuksia rakenteisiin. [29] Myös eurokoodissa mainitaan, että epälineaarisesti jakautunut lämpötilaero ΔT_E aiheuttaa järjestelmään tasapainossa olevien jännitysten kokonaisuuden, josta ei aiheudu rakenneosaan voimana tai momenttina vaikuttavaa kuormaa [7].



Kuva 33. Vapaasti tuettuun palkkiin epälineaarista lämpöjakaumasta syntyvä sisäinen primäärijännitys- ja venymätila [29]

Rakenteisiin syntyviä epälineaarisia lämpöjakaumia voidaan määrittää erilaisilla simulointiohjelmilla, joissa voidaan halutessa huomioida erilaisia fysikaalisia ilmiöitä samanaikaisesti. Tässä työssä selvitetään pihakansiin syntyviä lämpöjakaumia COMSOL Multiphysics -ohjelmalla. Myös käsin laskentaan on olemassa menetelmiä, kuten esimerkiksi

kappaleessa 5.1.2 esitelty eurokoodin epälineaarisen lämpöjakauman määrittäminen 2.

Larsson ja Svensson kertovat väitöskirjassaan, että kun epälineaarinen lämpöjakauma on määritetty, voidaan komponentit ΔT_U ja ΔT_M laskea käsin jakamalla poikkileikkaus pieniin siivuihin, joiden lämpötila määritetään alkuperäisestä lämpöjakaumasta. Poikkileikkauksen keskilämpötilan muutos, eli komponentti ΔT_U voidaan laskea kaavalla

$$\Delta T_U = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n T_i h_i, \quad (5.26)$$

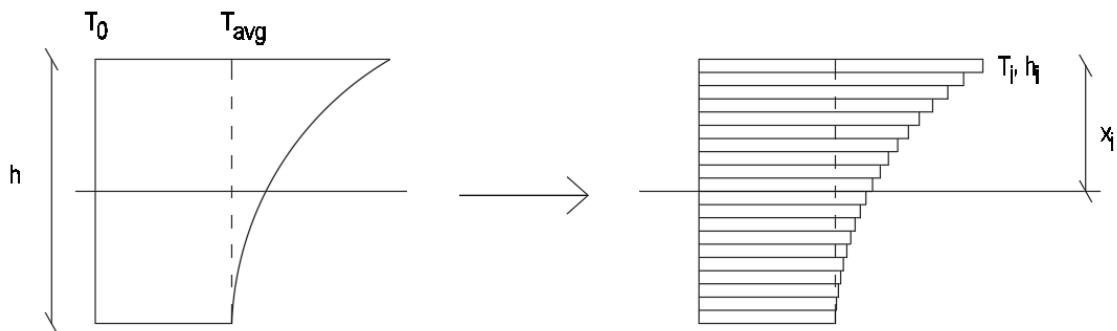
missä h on poikkileikkauksen korkeus, T_i tarkasteltavan siivun keskilämpötila ja h_i tarkasteltavan poikkileikkaussiivun korkeus. [28] Tällä poikkileikkauksen keskilämpötilan muutoksella voidaan laskea rakenteen tason suuntaisia pituudenmuutoksia ja estettyä siitä syntyviä pakkovoimia.

Epälineaarisen lämpöjakauman lineaarinen lämpögradientti $\Delta T_{M,E}$ voidaan laskea kaavalla

$$\Delta T_{M,E} = \frac{12}{h^2} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{avg}) h_i x_i - \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n (T_i - T_{avg}) h_i, \quad (5.27)$$

missä T_{avg} on keskilämpötilan muutos, joka on saavutettu kokoa poikkileikkauksessa ja x_i on tarkasteltavan siivun keskiö etäisyys poikkileikkauksen keskiöön.

Alla kuvassa 34 on esitelty laskennassa huomioitavat parametrit. Kuvassa T_0 kuvaa rakenteen alkulämpötilaa, jossa muodonmuutosten ja jännitysten ajatellaan olevan nolla. Epälinearisesta lämpögradientista syntyvien taipumien ja momenttien laskenta voidaan suorittaa sijoittamalla laskettu lineaarinen lämpötilajakauma $\Delta T_{M,E}$ kaavan 5.15 pintojen lämpötilaeron kohdalle.



Kuva 34. Lämpöjakauman muuttaminen lämpögradientiksi ja laskennassa käytettävät parametrit

Edellä laskettu $\Delta T_{M,E}$:n arvo sisältää eurokoodin mukaiset lämpökomponentit ΔT_M ja ΔT_E . Epälineaarinen osa ΔT_E voidaan halutessa laskea erikseen kaavalla

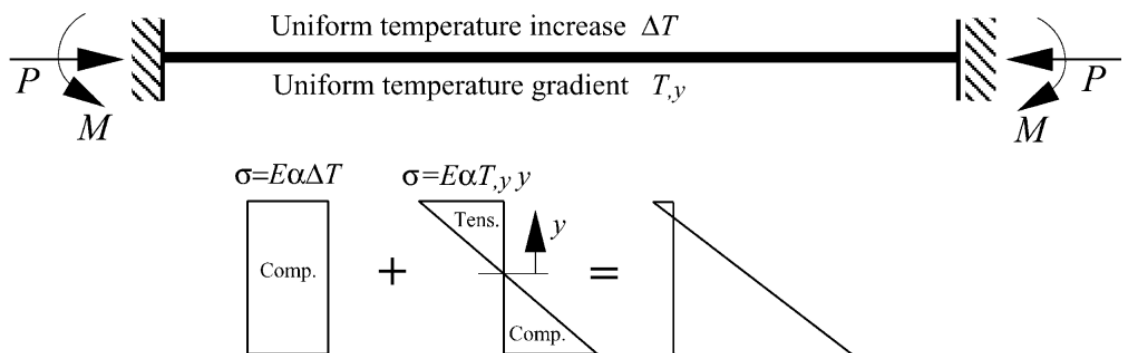
$$\Delta T_E = T_{tot} - T_{avg} - \Delta T, \quad (5.28)$$

missä T_{tot} on alkuperäinen lämpöjakauma, T_{avg} keskilämpötilan muutos ja ΔT lineaarinen lämpöjakauma [28].

5.2.4 Pakkovoimien yhdistelmä

Rakenteen sisäiset lämpötilat vaihtelevat harvoin tasaisesti. Yleensä rakenteen keskilämpötila muuttuu samaan aikaan kuin siinä vaikuttaa lineaarisesti tai epälineaarisesti jakautunut lämpötilajakauma jolloin, lämpötilakäyrityminen ja -laajeneminen tai -kutistuminen vaikuttavat rakenteeseen samaan aikaan. Esimerkiksi kesällä aurinkoisena päivänä pihakannen yläpinta lämpiää auringon säteilyn vaikutuksesta, jolloin rakenteen pintojen lämpötilaero kasvaa pihakannen keskilämpötilan kasvaessa samalla. Estettyinä nämä molemmat muodonmuutokset aiheuttavat rakenteeseen jännityksiä, jotka tulee summata yhteen kuvan 35 mukaisesti.

Kuvasta huomataan, että kun yksi aukkoisen jäykästi kiinnitetyn laatan keskilämpötila kasvaa lineaarisen lämpötilajakauman vaikuttaessa samalla, laatan lämpimälle puolelle syntyy aina suuri puristava jännitys. Laatan kylmälle puolelle voi taas syntyä joko huomattavaa vetoa tai puristusta, riippuen keskimääräisen lämpötilamuutoksen ja lineaarisesti tai epälineaarisesti jakautuneen lämpötilagradientin aiheuttamien jännitysten keskinäisistä suuruuksista.



Kuva 35. Laatan jännitys jakauma, kun lämpölaajeneminen ja -käyrityminen ovat estetty (kuvassa laatan alapinta on lämpimämpi kuin yläpinta) [21]

Kappaleissa 5.2.1–5.2.4 tehdyistä laskennallisista tarkasteluista voidaan päätellä, että pihakannen lämpötilavaihteluista johtuvia pakkovoimia voidaan pienentää kahdella tavalla: rajoittamalla laattaan syntyviä lämpötilavaihteluja sekä minimoimalla lämpöliikkei-

den vapaata tapahtumista estävien rakenteiden vaikutus. Lämpöliikkeiden vapaata tapahtumista voidaan edistää käyttämällä jäykkyydeltä pieniä pystyrakenteita tai sallimalla muodonmuutosten syntyminen irrottamalla pihakansi pystyrakenteista laatan reunoilta sekä sijoittamalla jäykät liitokset ja rakenteen jäykistävät pystyrakenteet laatan keskelle.

5.3 Pakkovoimat eurokoodissa

Eurokoodeissa pakkovoimien laskentaa on esitetty varsin suppeasti. Kuitenkin standardin EN 1992-3 liitteessä L esitetään laskentamenetelmä pakkovoimien betonileikkaukseen aiheuttamien muodonmuutosten ja jännitysten laskentaan, joka kattaa muutaman tyyppillisen perustapauksen. Laskentamenetelmä esitetään vain halkeilemattomassa tilassa olevalle poikkileikkaukselle. Ainoa poikkileikkauksen jäykkyyttä heikentävä tekijä on viruma, joka voidaan ottaa tarvittaessa huomioon betonin tehollisella kimmokertoimella $E_{c,eff}$. Viruman huomioiva tehollinen kimmokerroin lasketaan kaavalla

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (5.29)$$

missä $\varphi(t, t_0)$ on virumaluku, jonka määrittäminen on esitetty luvussa 3.1.2. [16, 18].

Kuitenkin etenkin pintalämpötilaeron aiheuttama rasiustila on lyhytaikainen, jota viruma ei redusoi. Puolestaan keskilämpötilan muutoksesta muodostuu pidempiaikaisia rasiustiloja. Pidempiaikaisissakin rasiustiloissa viruma redusoi jännitystilaa vain osittain, ja lähinnä liittyvien rakenteiden toiminnan kautta, koska aksiaalinen muodonmuutos tapahtuu yleensä lähes täysimääräisesti. Viruman vaikutus riippuu siis syntyvien jännitystilojen tapaan liittyvien rakenteiden jäykkyyksistä.

Betonipoikkileikkauksen mielivaltaisella korkeudella tapahtuva muodonmuutos saadaan kaavasta

$$\varepsilon_{az} = (1 - R_{ax})\varepsilon_{iav} + (1 - R_m)(1/r)(z - \underline{z}), \quad (5.30)$$

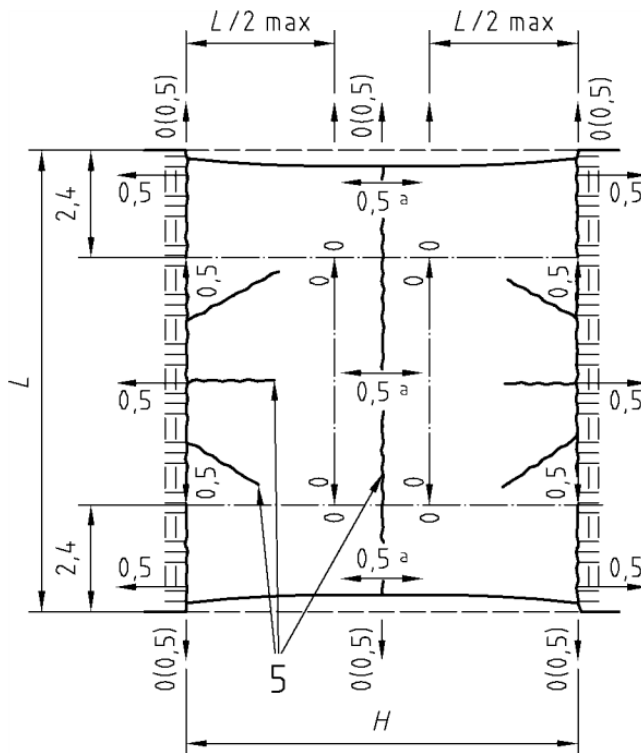
jossa R_{ax} ja R_m ovat pakkovoimakertoimia, ε_{iav} keskimääräinen muodonmuutos, joka tapahtuisi, jos rakenneosaa pääsisi esteettä liikkumaan, $1/r$ käyristymä, z korkeus poikkileikkaukseen ja \underline{z} korkeus poikkileikkauksen painopisteeseen. Samalla poikkileikkauksen korkeustasolla vallitseva jännitys voidaan laskea kaavasta

$$\sigma_z = E_{c,eff}(\varepsilon_{iz} - \varepsilon_{az}), \quad (5.31)$$

missä ε_{iz} pakkovoiman aiheuttama muodonmuutos korkeustasolla z ja ε_{az} todellinen muodonmuutos korkeustasolla z . [22]

Pakkovoimakertoimista R_{ax} määrittelee tarkasteltavaan rakenneosaan liittyvien rakenneosien aiheuttaman ulkoisen aksiaalisen pakkovoiman asteen. Pakkovoimakerroin R_m

puolestaan määrittelee tarkasteltavaan rakenneosaan liittyvien rakenneosien aiheuttaman kiinnitysmomenttiasteen. Pakkovoimakertoimet voidaan laskea, kun tunnetaan rakenneosan ja siihen liittyvien rakenteiden jäykkyydet. Usein voidaan olettaa, että suurta käyritystä ei pääse tapahtumaan, jolloin pakkovoimakertoimelle R_m voidaan käyttää arvoa 1. Standardi esittelee myös kuvilla muutaman tyypillisen tilanteen pakkovoimia. Pakkovoimakertoimen R_{ax} arvon voi kahden seinän välisen laatan yhteydessä määrittää kuvasta 36 ja taulukosta 10. [22] Kuvassa 36 numero viisi kuvaa mahdollisia ensimmäisiä halkeamia.



Kun $H \leq L$, yläindeksillä a merkityt kertoimet = $0,5 \left(1 - \frac{H}{L}\right)^1$

(b) Kiinteiden seinien välinen vaakasuuntainen laatta

Kuva 36. Pakkovoimakertoimet, kun kahden seinän välissä on jäykästi kiinnitetty laatta [22]

Taulukko 10. Kuvassa 36 näkyvien seinien keksivyyöhykkeiden pakkovoimakertoimia [22]

Suhde L/H	Pakkovoimakerroin alareunassa	Pakkovoimakerroin yläreunassa
1	0,5	0
2	0,5	0
3	0,5	0,05
4	0,5	0,3
>8	0,5	0,5

5.4 Teräsbetonilaatan kestävyys ja jäykkyyden riippuvuus halkeilusta

Kappaleessa 5.2 esitetyissä laskentaesimerkeissä betonilaatan oletettiin käyttäytyvän kimmoisasti ja poikkileikkauksen jäykkyyden pysyvän vakiona. Myöskään yllä esitellyssä Eurokoodin laskentamenetelmässä ei huomioida lainkaan rakenteen halkeilua. Tämä tarkoittaa, että laskumenetelmät ja -esimerkit pätevät vain, kun betonirakenne on vielä halkeilemattomassa tilassa. Tämä pätee useimmissa käyttörajatilan tilanteissa, joissa varsinkin jännitetyt rakenteet ovat halkeilemattomassa tilassa.

Murtorajatilassa näillä laskentamenetelmillä pakkovoimat kasvavat kuitenkin suuriksi jo varsin pienillä lämpökuormilla. Teräsbetonirakenteen taivutusjäykkyys pienenee momentin kasvaessa, siihen syntyvien halkeamien johdosta. Halkeamien määrä kasvaa momentin kasvaessa, kunnes niiden määrä on niin tiheä, että halkeamien välille ei pääse syntymään riittävää vetojännitystä, jotta uusi halkeama aukeaisi [18]. Halkeamien syntyessä vetojännitykset siirtyvät betonilta raudoitukselle. Samalla rakenteen jäykkyys laskee minkä johdosta pakkovoimat pienentyvät. Jotta ylimitoitukselta vältytään, on tärkeää tietää rakenteeseen vaikuttavat todelliset jännitykset, jotka riippuvat vahvasti siitä onko betonirakenne haljenneessa tai halkeamattomassa tilassa. Jännityksiin vaikuttaa luonnollisesti rakenteen kokonaiskuormitus, jolloin kokonaiskuormitus tulee tuntea ennen halkeiluasteen määrittystä.

Jännitetyt laatat tulisi lähtökohtaisesti suunnitella siten, että ne olisivat myös lämpörasitusten alaisena pääosin halkeilemattomassa tilassa, jolloin laatan halkeilusta ei saada rasituksia keventävää vaikutusta.

Laatta halkeaa, kun sen halkeamiskestävyys M_{cr} tai N_{cr} ylittyy. Betonilaatan halkeilumomentti M_{cr} voidaan laskea joko betonin vetolujuuden $f_{ctm,fl}$ tai vetomurtovenymän ε_{ct1} avulla. M_{cr} lasketaan kaavoilla

$$M_{cr} = f_{ctm,fl} W \quad (5.32) [18,23]$$

tai

$$M_{cr} = 5000 \sqrt{f_{ck,cube} \varepsilon_{ct1}} W, \quad (5.33) [18]$$

joissa W on kimmoteorian mukainen poikkileikkauksen vetopuolen taivutusvastus. Matalissa poikkileikkauksissa, kuten laatoissa voidaan betonin vetolujuutena käyttää $f_{ctm,fl} = 1,2f_{ctm}$. Betonin vetomurtovenymän ε_{ct1} arvona käytetään 0,00012. Kaavat 5.32 ja 5.33 antavat matalissa poikkileikkauksissa samansuuruisia arvioita halkeamiskestävyydelle,

mutta poikkileikkauksen korkeuden kasvaessa murtovenymään perustuva laskentatapa antaa suuremman kestävyuden. [18]

Laatan halkeilulle normaalivoimasta on olemassa ehto, jonka mukaan epäkeskisyyden e tulee olla suurempi kuin poikkileikkauksen sydänpiste-etäisyys, joka lasketaan kaavalla W/A . Laatan halkeaman aiheuttava vetovoima N_{cr} voidaan laskea kaavalla

$$N_{cr} = \frac{5000 \sqrt{f_{ck.cube} \varepsilon_{ct1} W}}{e - \frac{W}{A}}, \text{ kun } e > \frac{W}{A}. \quad (5.34)$$

Suorakaidepoikkileikkaustapauksessa epäkeskisyysehto voidaan muuttaa muotoon $e > h/6$. [18]

Kun betonirakenteeseen on syntynyt halkeamia, sen jäykkyys laskee minkä johdosta pakkovoimat pienenevät, joka tulee ottaa huomioon laskuissa. Eurokoodi 2:ssa ja betoninormeissa betonirakenteiden halkeilun jälkeiseen teholliseen jäykkyydenlaskentaan käytetään interpolointia haljenneen ja halkeamattoman poikkileikkauksen jäykkyyksien kesken. Tehollinen taivutusjäykkyys haljenneelle betonipoikkileikkaukselle lasketaan kaavasta

$$(EI)_{eff} = \zeta(EI)_{II} + (1 - \zeta)(EI)_I, \quad (5.35)$$

missä $(EI)_I$ on halkeilemattoman betonileikkauksen taivutusjäykkyys, $(EI)_{II}$ taivutusjäykkyys halkeaman kohdalla ja ζ jakautumakerroin, joka ottaa huomioon betonin vetojäykistysvaikutuksen. Halkeilemattomassa tilanteessa jakautumakerroin $\zeta = 0$. Jakautumakerroin lasketaan kaavasta

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_s} \right)^m ; \zeta = 0, \text{ kun } \sigma_s < \sigma_{sr} \quad (5.36)$$

missä kerroin β ottaa huomioon kuormituksen keston tai toistuvan kuormituksen vaikutuksen keskimääräiseen venymään. $\beta = 1$, kun rakenne altistuu yksittäiselle lyhytaikaiselle kuormitukselle ja $\beta = 0,5$, kun rakenne altistuu pitkäaikaisille kuormille tai monesta jaksosta muodostuvalle toistuvalla kuormitukselle. Lämpökuormat laskettanevat jälkimäiseen joukkoon. Eurokoodi käyttää kaavan 5.36 potenssin m paikalla arvoa 2, kun taas betoninormeissa vastaava arvo on 3. Kaavassa 5.36 σ_{sr} on vetoterästen jännitys halkeilleen poikkileikkauksen mukaan laskettuna heti halkeaman avauduttua. σ_{sr} voidaan laskea halkeamiskestävyuden M_{cr} avulla. σ_s on rakenteen vetoraidoituksen jännitys halkeilleessa tilassa. Raidoituksen jännityksen suhteen σ_{sr}/σ_s tilalla voidaan käyttää puhtaan taivutuksen tapauksessa suoraan suhdetta M_{cr}/M ($M > M_{cr}$) ja aksiaalivetojännitystilassa N_{cr}/N ($N > N_{cr}$). [16,18]

Halkeilemattoman teräsbetonipoikkileikkauksen jäykkyyttä laskettaessa sen raudoitus voidaan huomioida kolmella eri tarkkuustasolla. Poikkileikkaussuureet voidaan laskea bruttoleikkauksen, nettoleikkauksen tai muunnetun poikkileikkauksen mukaan. Bruttoleikkauksessa raudoitusta ei huomioida, jolloin raudoituksen viemä tila huomioidaan betonina. Nettoleikkauksessa raudoituksen viemä pinta-ala vähennetään betonipoikkileikkauksesta. Muunnetussa poikkileikkauksessa raudoitus huomioidaan betonipoikkileikkauksessa betonin ja teräksen kimmokertoimien suhteella kerrottuna. [23]

Halkeilemattoman suorakaidebetonileikkauksen taivutusjäykkyys $(EI)_I$ muunnetulla poikkileikkauksella, eli raudoitus huomioiden, lasketaan kaavoilla

$$x_c = \frac{h^2 + 2(d_c d \rho_c + d^2 \rho)(\alpha_e - 1)}{2(h + d(\alpha_e - 1)(\rho_c + \rho))} \quad (5.37)$$

$$I_c = b \left(\frac{h^3}{12} + h \left(\frac{h}{2} - x_c \right)^2 + d^3 (\alpha_e - 1) \left(\rho \left(1 - \frac{x_c}{d} \right)^2 + \rho_c \left(\frac{x_c}{d} - \frac{d_c}{d} \right)^2 \right) \right) \quad (5.38)$$

$$(EI)_I = E_{cm} I_c, \quad (5.39)$$

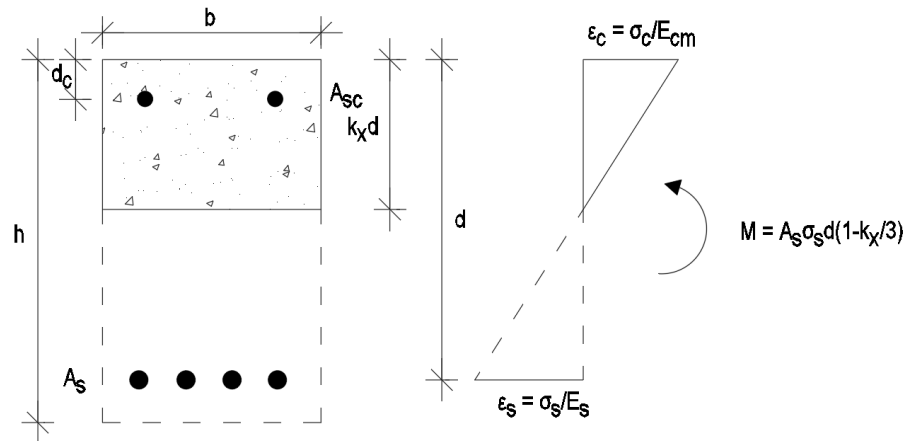
missä b on poikkileikkauksen puristetun reunan leveys, d vetoraudoituksen A_s painopisteen etäisyys puristetusta reunasta, d_c puristusraudoituksen A_{sc} painopisteen etäisyys puristetusta reunasta, A_s vetoraudoituksen ala, A_{sc} puristusraudoituksen ala, x_c puristetun osan korkeus, α_e on teräksen ja betonin kimmokertoimien suhde E_s/E_{cm} , ρ vetoraudoituksen suhde rakenteen poikkileikkaukseen A_s/bd ja ρ_c puristusraudoituksen suhde rakenteen poikkileikkaukseen A_{sc}/bd . [18]

Haljenneen poikkileikkauksen $(EI)_{II}$ jäykkyys muunnettua poikkileikkausta käyttäen lasketaan kaavoilla

$$(EI)_{II} = E_s A_s d^2 (1 - k_x)^2 + E_s A_{sc} d^2 \left(k_x - \frac{d_c}{d} \right) + \frac{k_x}{3} b d^3 E_{cm} \quad (5.40)$$

$$k_x = \sqrt{(\rho + \rho_c)^2 \alpha_e^2 + 2 \left(\rho + \rho_c \frac{d_c}{d} \right) \alpha_e - (\rho + \rho_c) \alpha_e}. \quad [18] \quad (5.41)$$

Missä k_x on poikkileikkauksen puristetun osan korkeuden määrittävä kerroin. Alla kuvassa 37 on esitetty haljenneen poikkileikkauksen laskentasuureita, sekä muodonmuutosjakauma halkeaman kohdalla.



Kuva 37. Betonipoikkileikkauksen merkinnät ja muodonmuutosjakauma haljenneessa poikkileikkauksessa, sekä momentin likimääräinen riippuvuus veto-raudoituksen jännityksestä [muokattu lähteestä 18]

Haljenneen tilan reunajännitys puristuspuolella voidaan laskea kaavoilla

$$\sigma_c = M \frac{X_{II}}{I_{II}} \quad (5.42)$$

$$I_{II} = \frac{bX_{II}^3}{3} + \alpha_e A_s (d - X_{II})^2 + (\alpha_e - 1) A_{sc} (d_c - X_{II})^2 \quad (5.43)$$

$$X_{II} = \frac{1}{b} \left((\alpha_e A_s + (\alpha_e - 1) A_{sc})^2 + 2b(\alpha_e d A_s + (\alpha_e - 1) d_1 A_{sc}) \right)^{0,5} - \frac{1}{b} (\alpha_e A_s + (\alpha_e - 1) A_{sc}). \quad (5.44)$$

Laatan raudoitusten jännitykset haljenneessa poikkileikkauksessa voidaan laskea kaavalla

$$\sigma_s = \alpha_e M \frac{(d(\text{tai } d_c) - X_{II})}{I_{II}}. [23] \quad (5.45)$$

5.5 Pihakannen liitosten vaikutus pakkovoimiin

Kuten edellä on kerrottu lämpökuormista syntyvät pakkovoimat riippuvat siitä, kuinka vapaasti betonirakenteen muodonmuutokset pääsevät tapahtumaan. Pihakannen jako osiin ja sen irrotukset pystyrakenteista tulee siis suunnitella huolella, jotta pihakansi käyttäytyy halutusti. Pihakannen muodonmuutosten tulee päästä tapahtumaan hallitusti, ilman liiallista pihakannen halkeilua tai pystyrakenteiden pakkovoimia.

Pihakannen geometriaan voidaan vaikuttaa saumojen avulla. Saumoilla pihakansi voidaan jakaa pienempiin kokonaisuuksiin, jolloin pihakannen muodonmuutosten suuruutta ja niistä mahdollisesti syntyviä pakkovoimia voidaan rajoittaa. Saumoja tarvitaan lisäksi pihakannen epäjatkuvuusalueilla, joissa muodonmuutokset aiheuttavat pihakannen halkeiluriskin. Tällaisia epäjatkuvuuskohtia ovat esimerkiksi laatan paksuuden, tyypin, le-

veyden tai suunnan merkittävä muutos. Saumoja voidaan tarvita myös työtekniisten syiden takia. Erilaisia saumoja ovat liikunta-, kutistuma- ja työsaumat ja niiden suunnittelu on tärkeä osa jo alustavaa suunnittelua. Turhia saumoja on kuitenkin syytä välttää, sillä ne heikentävä pihakannta rakenteellisesti ja ovat riski toimivalle vedeneristykselle. [10]

Pihakannen reunaehdot määräytyvät pihakannen liitoksista pystyrakenteisiin. Muodonmuutokset pääsevät vapaasti tapahtumaan pystyrakenteista irrotetussa pihakanassa. Jäykästi kiinnitetyn pihakannen muodonmuutoksista taas syntyy pakkovoimia pystyrakenteille ja halkeilua laatastolle. Irrotus tehdään asettamalla laatan ja pystyrakenteen väliin riittävän muodonmuutoskyvyn omaava ja laatan liikkeiden mahdollistava työnaikainen liukulaakeri tai pitkäaikainen rakennuslaakeri.

Työnaikaiset laakerit mahdollistavat jännitystyöstä ja kutistumasta syntyvien muodonmuutosten tapahtumisen vapaasti. Niillä ei ole kuitenkaan kiertymiskykyä, joka estäisi pilarin tai seinän suojabetonin lohkeilun laatan tai palkin taipumasta. Työnaikaista laakeria ei voida siis käyttää nivelellisessä liitoksessa. Lisäksi työnaikaisen laakerin rakenteellinen toiminta heikkenee ajan myötä nopeasti, eikä sillä voida toteuttaa rakennuksen koko käyttöiän kattavaa liikevaraa. Pitkäaikainen laakeri tasaa kuormituksen tukipinnalle ja mahdollistaa palkin tai laatan kiertymän koko sen käyttöiän ajan, lisäksi pitkäaikaisissa laakereissa on liikevaraa myös vaakasuunnassa. [32] Pilari-palkkiliitoksissa käytetään pistelaakereita ja seinissä nauhalaakereita.

Laakerin valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat yleensä kuorma, liikevarat, kiertymä, kitkerroin, palonkesto, käyttölämpötila, käyttöikä, mitat ja tuotehyväksyntä [27]. Laakereilta vaadittaviin liikevarojä voidaan arvioida taulukosta 11. Taulukko huomioi lämpöliikkeiden lisäksi betoniholvien kutistumat. Taulukossa elementtirakenteisen holvin pintabetonin kutistumasta 50 % oletetaan pääsevän tapahtumaan vapaasti. Jälkijännitetyissä betoniholveissa on lisäksi huomioitu viruman vaikutus.

Taulukko 11. *Tyypillisten betoniholvien rakennuslaakereilta vaadittavat liikevarat eri olosuhteissa [muokattu lähteestä 27]*

	Elementtirakenteinen holvi, jossa pintabetoni	Paikallavalettu holvi	Jälkijännitetty holvi
Puolilämmin tila	0,25 mm/m	0,5 mm/m	0,54 mm/m
Maanalainen kylmä tila	0,4 mm/m	0,6 mm/m	0,68 mm/m
Ulkona oleva tila	0,67 mm/m	0,82 mm/m	0,91 mm/m

Myös laatan putoamista estävät teräkset tulee irrottaa laatasta tai palkista esimerkiksi irrotusputkia käyttämällä, jotka mahdollistava kannen liikkeet. Pysyvässä irrotuksessa putki täytetään kokoonpuristuvalla materiaalilla, joka mahdollistaa liikkeiden tapahtumisen esimerkiksi suljettusoluisella polyeteenimatolla. Jälkijännitetyissä pihakan-

silaatoissa tehdään usein jännitystyön aikaisia irrotuksia, jolloin jännityksestä syntyvät kokoonpuristuma pääsee tapahtumaan vapaasti. Jännitystyön jälkeen putki voidaan valaa umpeen ennalta määrätyn ajanjakson jälkeen.

Pihakannen muodonmuutokset tapahtuvat sen massakeskiön suuntaisesti, jolloin liikkeet ovat suurimmillaan laatan reunoilla ja keskellä liike on vähäisempää. Tästä syystä pihakannen jäykät liitokset ja jäykistys tulisi tapahtua pihakannen keskellä sijaitsevien pystyrakenteiden avulla, jolloin jäykät liitokset häiritsisivät muodonmuutoksia mahdollisimman vähän. Kaikilta reunoilta irrotetun pihakannen muodonmuutokset tapahtuvat tasaisesti kaikilla reunoilla. Jos pihakansi on yhdeltä reunalta jäykästi kiinnitetty muodonmuutokset tapahtuvat kokonaisuudessa vastakkaisella reunalla, mikä tulee huomioida laakerointia ja irrotuksia suunniteltaessa.

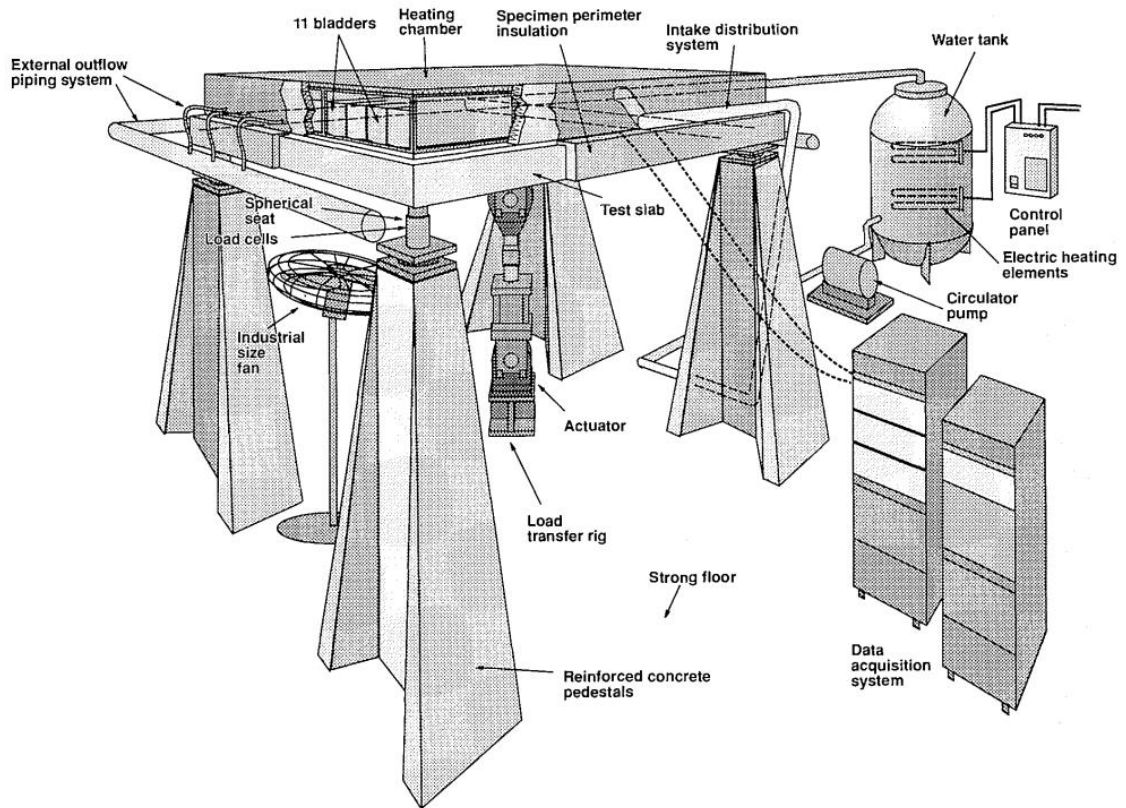
Pihakannen liitokset voidaan toteuttaa myös jäykkinä, jos rakenne täyttää kaikki murto- ja käyttörajatilan mitoitusvaatimukset sekä pihakannen halkeilusta ei synny vaaraa sen vedenpitävyydelle.

5.6 Tutkimustuloksia betonilaattojen lämpökuormittamisesta

Betonilaattojen käyttäytymistä lämpötilakuormien alaisena on tutkittu jonkin verran myös käytännön kokeilla laboratorio-olosuhteissa. Vuonna 1993 Vecchio, Agostino ja Angelakos [24] suorittivat kahdeksalle samankokoiselle teräsbetonilaatalle kokeita, joissa laatat altistettiin lämpötilakuormien alaisiksi. Laattojen pintojen välille aiheutettiin noin 30–40 °C lämpötilaero, jonka seurauksena estetyt muodonmuutokset aiheuttivat laattoihin suuria jännityksiä sekä laattojen sisäistä ja ulkoista halkeilua.

Laatat olivat neliön muotoisia sivupituudeltaan 2800 mm ja korkeudeltaan 150 mm ja ne raudoitettiin molemmista pinnoistaan. Raudoitusten suunta ja raudoitussuhde vaihteli eri laattojen välillä. Laatat altistettiin lämpökuormille lämmittämällä laattojen yläpintaa, samalla jäähdyttäen alapintaa. Näin laattoihin syntyi aluksi epälineaaraisesti jakautunut lämpöjakauma ja saavutettuaan stationääritilan laatoissa vaikutti lineaarinen lämpöjakauma. Epälineaarisia lämpöjakautumia laatussa tutkittiin kahdesta kohtaa 20 mm välein asennetuilla lämpömittareilla. Molempiin suuntiin ja molempiin pintoihin syntyviä jännityksiä mitattiin raudoitukseen asennetuilla mittalaitteilla. Taipumia tutkittiin laatan alapinnasta lineaarisilla siirtymäantureilla (LVDT = Linear Variable Differential Transformer). Laattojen kulmatuet varustettiin pakkovoimia mittaavilla voima-antureilla. Alla kuvassa 38 on esitelty kokeissa käytettyä testikalustoa. Laattoja lämmitettiin laatan päälle rakennetun lämmityskammion putkiston läpi kulkevalla kuumalla vedellä. Putkiston ympärillä käytettiin silikonipatjoja, jotka lämmittivät laatan pintaa tasaisesti myös laatan taipuessa. Laatan

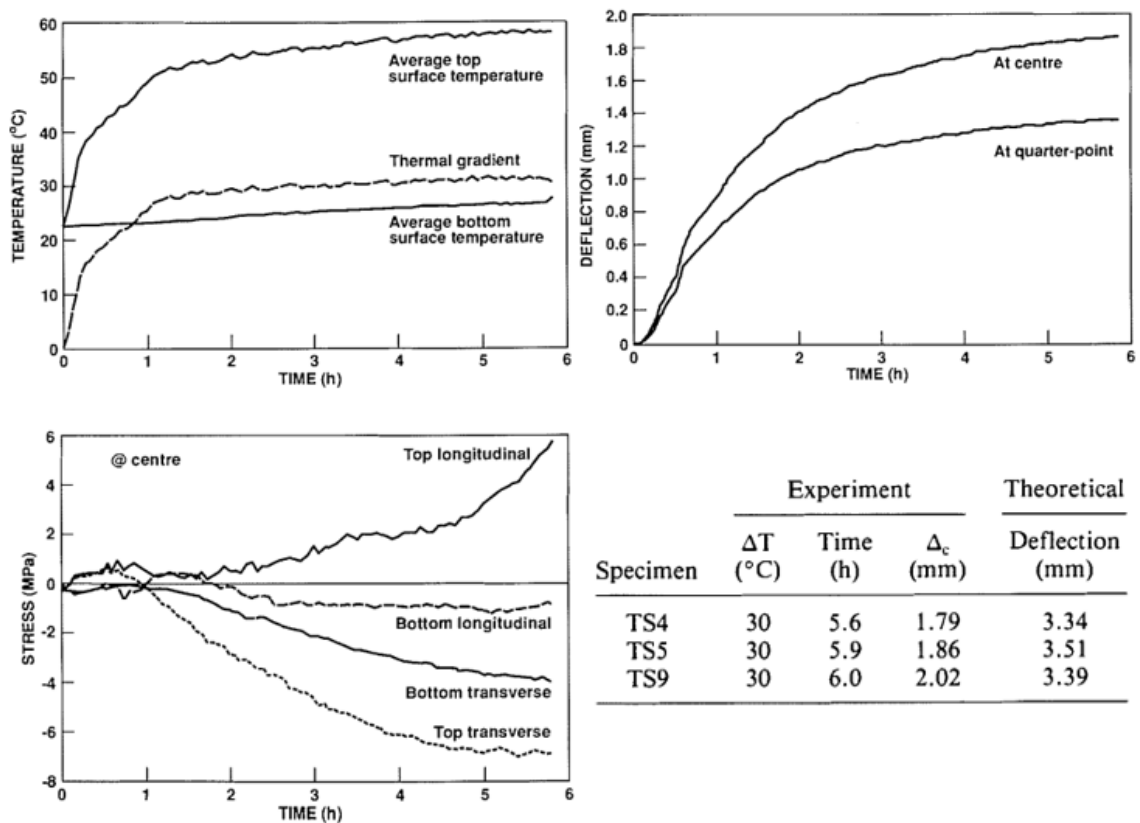
lyhyet reunat eristettiin ja alapinta pidettiin lähellä huoneenlämpöä tuulettimien avulla.
[24]



Kuva 38. Laattojen lämpötilakuormituskokeissa käytetty kalusto [24]

Laboratoriotutkimus sisälsi kolme vaihetta. Ensimmäisessä vaiheessa laatat olivat vapaasti tuettuina nurkista ja laattaan syntyvät muodonmuutokset annettiin tapahtua vapaasti. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin laattaan syntyvää muuttuvaa lämpötilajakaumaa ja sen aiheuttamia lämpöjännityksiä ja taipumia vapaasti tuetussa laatassa. Lämpökuormitus kesti noin 6 tuntia. Toisessa vaiheessa laattojen keskelle asennettiin mittaustunkki, joka kiinnitettiin jäykästi laatassa olevaan ankkurilevyyn. Mittaustunkki pakotti taipuman nolaksi samalla mitaten siihen kohdistuvia voimia. Toisessa vaiheessa tutkittiin laattaan syntyviä pakkovoimia, niiden riippuvuutta laatan raudoitukseen ja niissä syntyviä pakkovoimahäviöitä lyhytaikaisen lämpöviruman johdosta. Lämpökuorma oli samansuuruinen kuin ensimmäisessä vaiheessa, mutta nyt kuormitus kesti 24 tuntia. Kolmannessa vaiheessa laatat altistettiin lämpökuormien lisäksi mekaanisille kuormille laatan keskellä olevan tunkin avulla. Lineaarisen lämpötilajakauman vaikuttaessa laatassa mekaanista kuormaa kasvatettiin tasaisesti aina murtoon saakka. Viimeisessä tutkimusvaiheessa tutkittiin lineaarisen lämpötilajakauman vaikutusta laatan kestävyteen, kun laatta on voimakkaasti rasitettuna. [24]

Ensimmäiseen vaiheeseen otettiin mukaan vain kolme eri lailla raudoitettua laattaa. Tarkastellaan testilaatalla TS5 saatuja tuloksia, joita on esitelty alla kuvassa 39. Laatan yläpinnan lämpötilaa kasvoi testin aikana noin 35 °C. Alapinnan lämpötila kasvoi testin aikana jäähtymyksestä huolimatta noin 4 °C. Lämpögradientin kasvu oli suurinta testin alussa ja noin 6 tunnin lämpökuormituksen jälkeen laatta saavutti stationääritilan ja lineaarisen lämpötilajakauman lämpögradientin ollessa noin 30 °C. Oletetusti vapaasti tuetussa laatussa muodonmuutokset tapahtuivat vapaasti ja yhteenkään laattaan ei syntynyt halkeilua testin aikana. Laattojen taipumien kasvu oli suurinta heti lämpökuormituksen alkaessa ja kasvu tasoittui noin 4 tunnin lämmityksen jälkeen. Testitulosten perusteella, raudituksen suunnalla tai määrällä ei ollut vaikutusta laatan taipumiin, sillä kaikki laatat taipuivat testin aikana lähes saman verran, noin 2 mm laatan keskeltä mitattuna.



Kuva 39. Tutkimuksen vaiheen 1 testilaatan TS5 tulokset, sekä kaikkien laattojen taipumat

Kuvan 39 teoreettiset taipumat laatan keskellä on laskettu kaavalla

$$\Delta_c = \frac{\alpha_c \Delta T l^2}{4h}. \quad (5.46)$$

missä l on laatan jännemitta (2500 mm testeissä). Mitatut taipumat olivat huomattavasti pienempiä kuin laskennallisesti määritetyt, minkä oletettiin johtuvan kaavan oletusten ja

testin olosuhteiden eroista. Kaava olettaa, että betonilla ja raudoituksella on sama lämpölaajenemiskerroin ja, että koko laatan yläpinta on lämmitetty tasaisesti, kun taas kohteessa lämpölaajenemiskertoimet erosivat hieman toisistaan ja laatan ulkoreunoilta noin 150 mm leveä kaista jäi lämmityksen ulkopuolelle. Vapaasti tuettuihin laattoihin ei syntynyt ulkoisia voimia, mutta pieniä sisäisiä jännityksiä esiintyi raudoituksissa. Sisäisten jännitysten oletettiin johtuvan epälineaarista lämpötilajakaumasta sekä betonin ja teräksen aavistuksen erisuuruista lämpölaajenemiskertoimista. [24]

Tutkimuksen toisessa vaiheessa laattojen keskelle kiinnitettiin jäykästi taipuman estävä ja pakkovoimia mittaava tunkki. Lämpökuormitus oli samansuuruinen kuin ensimmäisessä vaiheessa, mutta kesti toisessa vaiheessa noin 24 tuntia. Lämmitysjakson aikana yläpinnan lämpötila kasvoi noin 40 °C lämpögradientin tasaantuessa noin 6 tunnin jälkeen arvoon 35 °C. Kaikkien testilaattojen testitulokset ovat esitelty taulukossa 12. Keskitulle syntyvät pakkovoimat saavuttivat huippuarvonsa jo noin 1,2–1,6 tunnin päästä lämpökuormituksen alkamisesta lämpögradientin ollessa vain 25–28 °C ja lämpöjakauman muodon ollessa vahvasti epälineaarinen. Samoihin aikoihin alkoivat laatat halkeilla alapinnastaan keskiosaa kohti. Halkeilun seurauksesta mitatut pakkovoimat laskivat äkillisesti, jonka jälkeen lasku tasoittui, mutta jatkoi pienentymistä. Vaikka lämpögradientin arvo jatkoi kasvamista, haljenneiden laattojen pakkovoimat eivät enää kasvaneet alun huippuarvojen tasolle. [24]

Taulukko 12. Tutkimuksen vaiheen kaksi kaikkien testilaattojen tulokset [24]

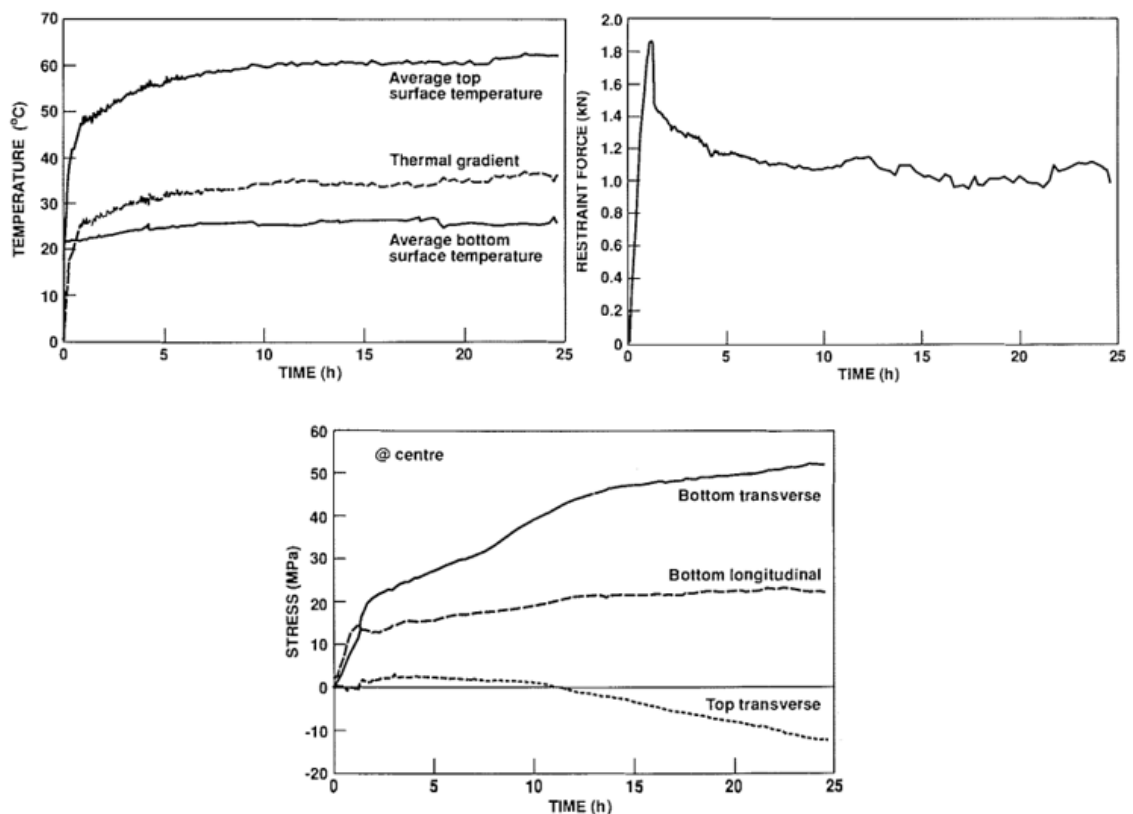
Specimen	At first cracking			At peak load			After 4 hours		At test conclusion		
	Time (h)	ΔT (°C)	P_r (kN)	Time (h)	ΔT (°C)	P_r (kN)	ΔT (°C)	P_r (kN)	Time (h)	ΔT (°C)	P_r (kN)
TS2	1.8	25	27.9	1.8	25	27.9	24	19.1	25.7	35	8.1
TS3	0.8	22	14.2	1.3	28	15.4	30	11.0	24.8	35	0.0
TS4	1.2	27	13.8	1.2	27	13.8	31	9.1	24.5	37	7.6
TS5	2.0	24	25.0	2.7	27	25.3	29	22.4	25.0	35	16.8
TS6	1.6	27	16.8	1.5	28	17.1	32	14.3	24.3	34	7.9
TS7	0.5	20	9.5	1.3	28	12.7	33	7.4	24.6	38	6.0
TS8	1.2	26	23.2	1.2	26	23.2	31	20.2	24.5	37	12.8
TS9	1.0	25	24.3	1.6	26	24.7	32	22.2	24.8	34	12.6

Kuvassa 40 on esitelty testilaatan TS8 tuloksia, jonka käyttäytyminen edustaa kaikkia testilaattoja. Tuloksista nähdään, että halkeilu aiheutti laattojen jäykkyyden putoamisen, mikä näkyi heti muodonmuutoskeskeisessä kuormituksessa pakkovoimien laskuna. Raudoituksen määrällä tai suunnalla ei vaikuttanut olevan suurta merkitystä kehittyvään pakkovoiman huippuarvoon, sillä huippuarvot mitattiin tyypillisesti, kun laatat olivat vielä halkeilemattomassa tilassa. Lisäksi huippuarvot määräytyivät pääsääntöisesti betonin

vetolujuuden mukaan. Suurin osa pakkovoimien relaksaatiosta tapahtui noin kolmen tunnin sisällä jäykkyyden putoamisesta, jonka jälkeen relaksaatio tasaantui. Relaksaation suuruus 24 tuntisen testin lopussa vaihteli taulukon 12 mukaisesti 34–100 %. Myöskään relaksaation suuruuteen ei raudoituksen määrä tai suunta näyttänyt oleellisesti vaikuttavan. [24]

Haljenneessa tilassa rakenteen vetojännitykset siirtyvät betonilta teräksille. Tämä vetojännityksen siirtyminen voidaan nähdä kuvan 40 alapinnan terästen vetojännityksen kasvaessa samaan aikaan, kun rakenteessa vaikuttavat pakkovoimat tippuvat.

Testissä huomattiin, että vaikka pakkovoimissa esiintyi suurta relaksaatiota, raudoitusten jännitykset jatkoivat kasvua koko testin ajan. Raudoituksen jännitykset myös kehittivät huomattavasti hitaammin kuin pakkovoimat ja saavuttivat huippuarvonsa vasta 12–24 tunnin kohdalla. Laattojen alapinnan teräksiin kehittyi testin aikana jopa 60 MPa suuruisen vetojännityksen. Laattojen yläpinnan teräksiin vaikutti testien eri vaiheissa puristus- ja vetojännityksiä, mutta jännitykset jäivät pieniksi. [24]



Kuva 40. Tutkimuksen vaiheen kaksi testilaatan TS8 tuloksia [24]

Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa kaikkiin testilaattoihin lisättiin tasaisesti mekaanista kuormitusta aina laattojen murtoon saakka lineaarisen 36 °C lämpögradientin vaikuttaessa samalla. Kaikissa testilaatat olivat jo haljenneita toisen vaiheen testissä, joten tuloksissa ei enää havaittu selvää poikkeileikkauksen jäykkyyden muutosta. Kasvavasta

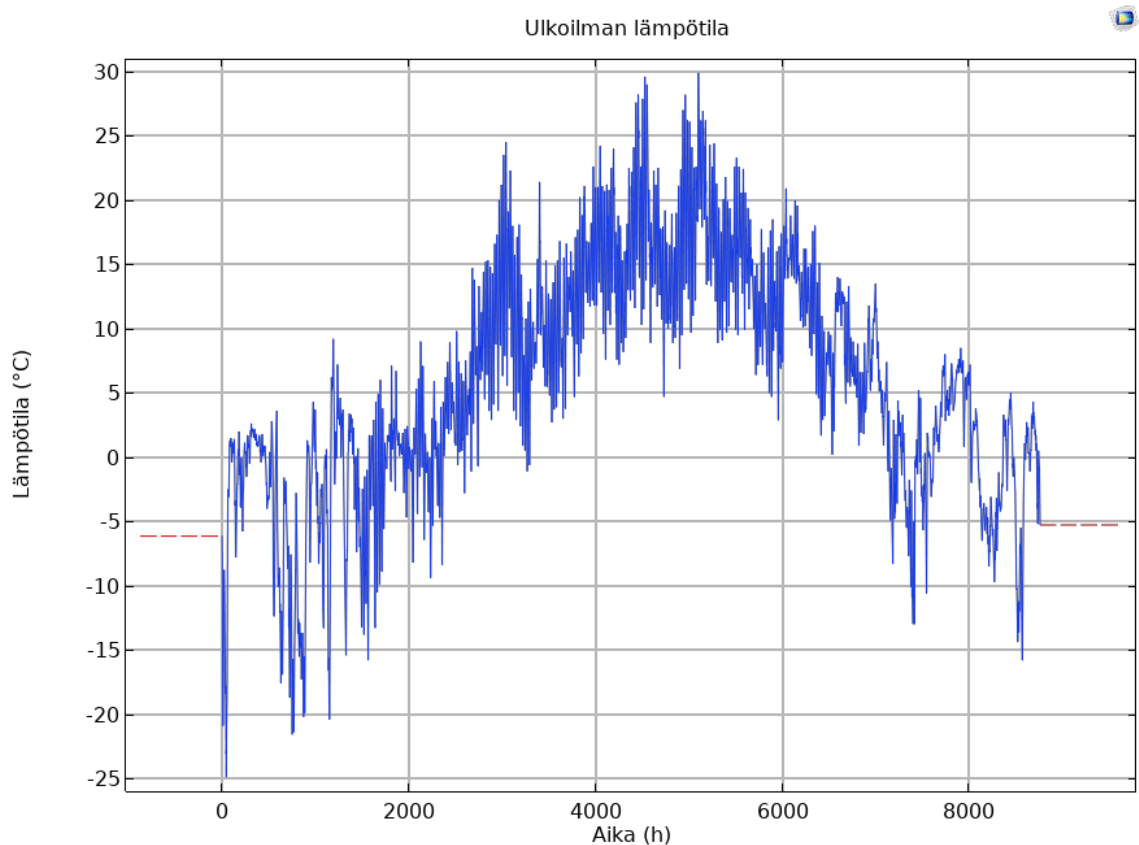
kuormituksesta johtuva halkeamien kasvaminen pudotti kuitenkin jatkuvasti rakenteen jäykkyyttä testin edetessä. Laattojen kestävyys ja murtotapa testissä riippui vahvasti laattojen raudoituksesta. Testituloksissa todettiin, että lämpökuormilla ei vaikuttanut olevan mitään vaikutusta rakenteen murtokestävyyteen, jos toisen vaiheen jäykkyyden pudotusta ei oteta huomioon. [24]

Vuonna 1990 Vecchio tutki laboratorionkokeilla myös teräsbetonikehän käyttäytymistä lämpökuormien alaisena, tällä kertaa Saton kanssa. Kokeita varten rakennettiin kolme teräsbetonikehää, jotka altistettiin erilaisille yhdistelmille lämpö- ja mekaanisia kuormia. Tutkimuksissa lämpögradienttien suuruudet vaihtelivat 10–80 °C. Tutkimus oli laaja ja sen aikana tehtiin yhteensä 61 testiä. Tutkimus sisälsi samat kolme vaihetta kuin edellä esitelty laattatutkimus ja sen oli määrä tuottaa suuri määrä dataa teoreettisten kaavojen tarkentamiseksi. Myös testitulokset olivat samankaltaisia kuin laattatutkimuksessa. Pakkovoimat, jännitykset ja muodonmuutokset olivat suurimmillaan lämmityskuormahuipun jälkeen, lämpöjakauman epälineaarisuudesta huolimatta. Testeissä tutkittiin myös lämmitysnopeuden vaikutusta syntyviin pakkovoimiin niin kutsuttujen shokkilämpökuormien avulla. Tutkimuksen mukaan pintojen nopea lämpötilaeron kasvu aiheutti rakenteeseen suurempia pakkovoimia kuin verkkaisesti kasvava lämpötilaero. Tällaisia shokkilämpökuormia ei kuitenkaan esiinny pihakansilla. Linkki tutkimukseen löytyy lähdeluettelosta. [26]

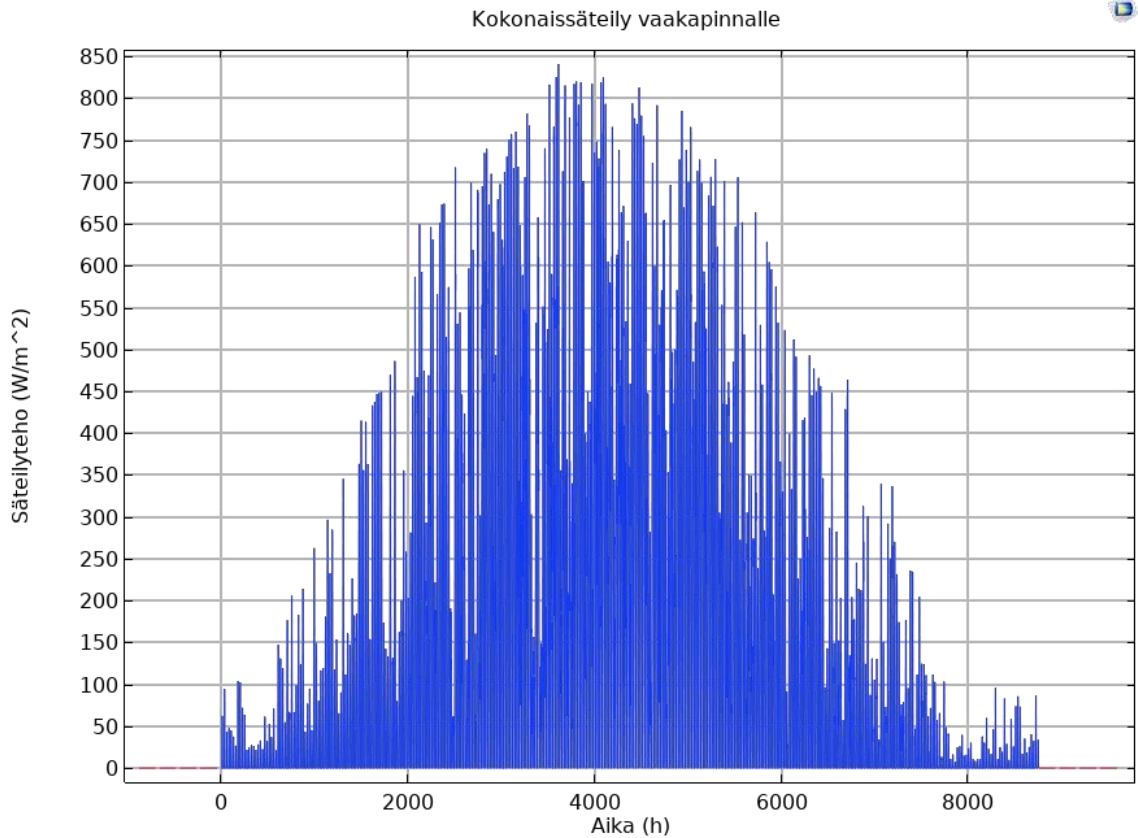
6. ILMATIETEENLAITOKSEN TESTIVUODET

6.1 Testivuosien esittely

Testivuosisimulaatioissa pihakannen käyttäytymistä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoi-
toissa tutkitaan Ilmatieteen laitoksen julkaisemien energialaskennan testivuosien
TRY2020 ja sen pohjalta tehtyjen tulevaisuuden testivuosien TRY2030 ja TRY2050 si-
sältämien säädatojen avulla. Simuloinnissa hyödynnetään testivuosien datasta varjossa
mitatun ilman lämpötilaa sekä auringon kokonaissäteilyenergiaa vaakapinnalle. Koko-
naissäteilyenergia pitää sisällään auringon suoran $I_{sol,N}$ ja diffuusin säteilyenergian I_D .
Alla kuvissa 41 ja 42 esitetään esimerkkinä Vantaan testivuoden TRY2020 ulkoilman-
lämpötila- ja säteilydata.



Kuva 41. Testivuoden TRY2020 lämpötilat Vantaalla (vyöhyke I)



Kuva 42. Testivuoden TRY2020 kokonaissäteily ($I_{sol,N} + I_D$) vaakapinnalle Vantaalla (vyöhyke I)

Testivuodet sisältävät tuntikohtaista dataa ilman varjossa mitatusta lämpötilasta, ilman suhteellisesta kosteudesta, auringon säteilystä sekä tuulennopeudesta ja suunnasta. [14,15] Energialaskennan testivuodet laadittiin alun perin rakennusten energiatarpeen laskennan pohjaksi. Tässä työssä niiden sisältämää tuntikohtaista säädätaa hyödynnetään pihakansien lämpöjakaumien määrittämiseen.

Energialaskennan testivuodet TRY2020 kasattiin vuosien 1989–2018 säähavainnoista ja ne ovat määritetty neljälle eri ilmastovyöhykettä edustavalle Suomen kaupungille: Vantaa (I), Jokioinen (II), Jyväskylä (III) ja Sodankylä (IV). Testivuosien tarkoitus on kuvata mahdollisimman hyvin kunkin ilmastovyöhykkeen keskimääräisiä ilmasto-oloja rakennusten energiakulutuksen näkökulmasta. Ne muodostettiin 30 vuoden säähavaintojen pohjalta standardiin SFS-EN ISO 15927-4 pohjautuvalla menetelmällä. Näistä 12 valitusta kuukaudesta syntyivät nykyilmaston aikasarjat eli eri vyöhykkeiden energialaskennan testivuodet TRY2020, jonka tyyppikuukausien vuosiluvut ovat esiteltynä kuvassa 43. [14]

Vyöhyke	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	2002	1998	2004	2012	2006	2005	1989	2003	1998	2012	2006	1998
II	2002	1998	2004	2012	2011	2005	1989	1994	1998	2004	2006	1998
III	2002	2003	1999	1991	2012	1996	2009	1990	1998	2014	2006	1998
IV	1998	1997	2009	1999	1993	2010	2013	2011	2012	2013	2017	2015

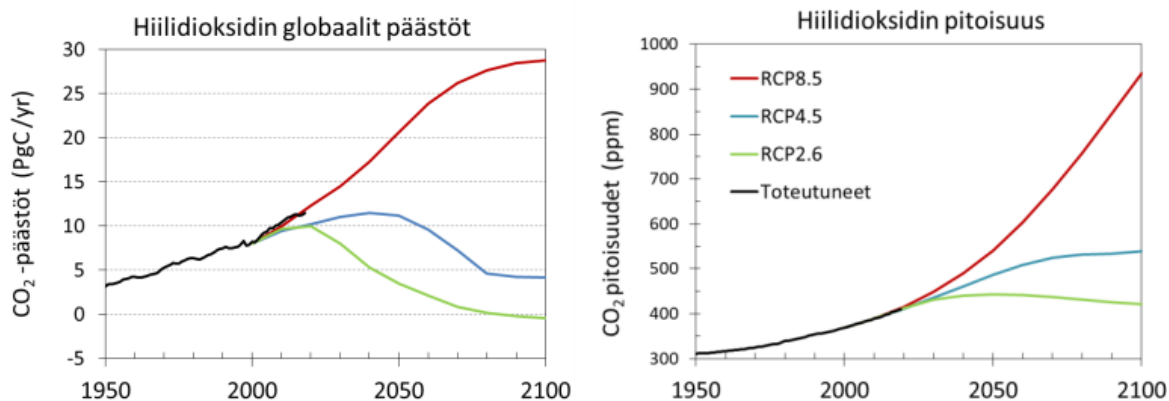
Kuva 43. Energialaskennan testivuoden TRY2020 tyyppikuukausien vuosiluvut vyöhykkeittäin [14]

Nykyilmaston testivuosien ja eri ilmastomallien ennusteiden pohjalta sääaikasarjat muutettiin kuvaamaan tulevaisuuden ilmastojen olosuhteita. Tulevaisuuden energialaskennan testivuodet tehtiin kolmelle ajan jaksolle: TRY2030 2030-luvun ilmastolle, joka kuvaa lähitulevaisuutta (vuodet 2015–2044), TRY2050 2050-luvun ilmastolle, joka kuvaa vuosisadan puoliväliä (vuodet 2035–2064) ja TRY2080 2080-luvun ilmastolle, joka kuvaa vuosisadan loppupuolta (vuodet 2065–2094). Kaikki nämä tulevaisuutta kuvaavat testivuodet ovat saatavilla kolmelle eri kasvihuoneskenaariolle RCP2.6, RCP4.5 ja RCP8.5. [14,15]

6.2 Päästöskenaariot

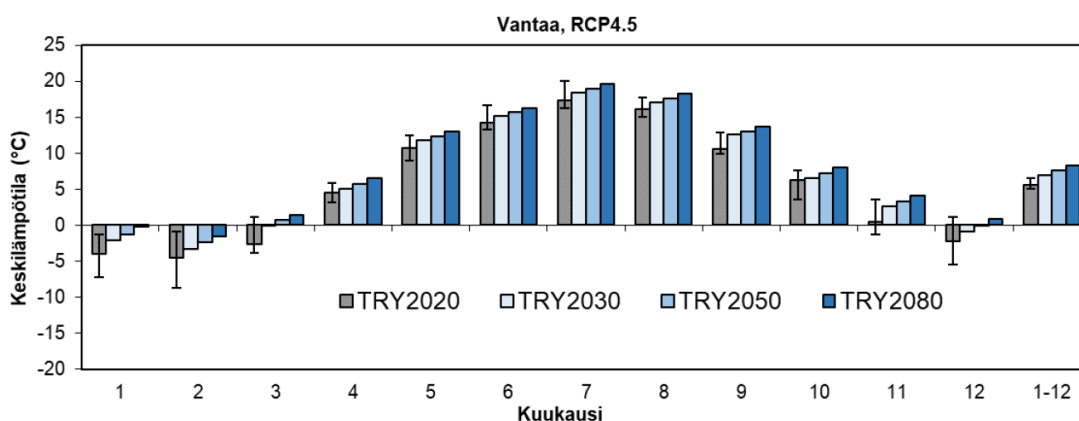
Päästöskenaariot eli kasvihuoneskenaariot kuvaavat ihmiskunnan ilmakehään päästämien kasvihuonekaasujen määrän ja pitoisuuden kehitystä ilmakehässä. Niitä käytetään arvioitaessa ilmaston muuttumista. Nykyään käytössä ovat niin sanotut RCP-skenaariot (Representative Concentration Pathways), jotka ovat RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 ja RCP8.5. Skenaarioiden numero kuvaa kuinka suuren säteilypakotteen nousuun päästöt johtavat vuosisadan lopulla (W/m^2). [14]

Tulevaisuuden energialaskennan testivuodet ovat määritetty kolmen, alla kuvassa 44 esitettyjen, päästöskenaarioiden mukaan. Ilmastomuutos on vahvasti sidoksissa kasvihuonepäästöihin. Jos ihmiskunta onnistuu rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousun kahteen asteeseen, päädyttäisiin hieman päästöskenaariota RCP4.5 alhaisempiin muutoksiin, mutta selvästi suurempiin kuin päästöskenaario RCP2.6 ennustaa. Päästöskenaario RCP2.6:n saavuttaminen vaatisi kunniahimoisen ilmastopolitiikan onnistumista. Päästöskenaario RCP8.5 kuvaa taas tilannetta, missä ilmastomuutoksen rajoittamiseksi ei tehdä käytännössä mitään. Näistä kolmesta skenaariosta RCP8.5 on epätodennäköisin ja ilmastomuutoksen vaikutusten arvioinnissa voidaan keskittyä kahteen muuhun skenaarioon. [14,15] Kuvasta 44 huomataan kuitenkin, että toistaiseksi toteutuneet hiilidioksidipäästöt ovat seuranneet päästöskenaario RCP8.5:tä.



Kuva 44. Hiilidioksidin maailman laajuisten päästöjen ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kehitys kolmen eri päästöskenaarion mukaan [14]

Alla kuvassa 45 on esitetty päästöskenaarion RCP4.5 mukaisten testivuosisien kuukausittaiset keskilämpötilat eri ajanjaksojen ilmastoissa. Kuvasta huomataan, kuinka tulevaisuudessa talvikuukausina keskilämpötila nousee lähelle nollaa ja jopa sen yli. Myös kesäkuukausien keskilämpötilat kasvavat, mutta lämpötilan kasvu on voimakkaampaa talvella kuin kesällä.



Kuva 45. Keskilämpötilat kuukausittain eri testivuosisina Vantaalla päästöskenaarion RCP4.5 mukaan [14]

6.3 Testivuosisien epävarmuudet

Nykyilmaston testivuodet TRY2020 perustuvat 30 vuoden tarkasteluajan säähavaintoihin, joten sen sisältämän säädäntä voidaan kuvitella kuvaavan nykyistä ilmastoa hyvin. Tulevaisuuden testivuodet ovat taas kehitelmiä testivuodesta TRY2020, jota on muokattu erilaisten päästöskenaarioiden ja ilmastomallien tulosten mukaan. On siis selvää, että nämä mahdolliset kehityskäytännöt sisältävät paljon epävarmuuksia.

Ilmastomallilla tarkoitetaan ilmakehän, merten, kasvillisuuden, jäätiköiden ja lumen vuorovaikutuksia kuvaavien mallien yhdistelmiä, jolla simuloidaan hetki hetkeltä esimerkiksi

ilmakehän kasvihuonepitoisuuksien kasvun vaikutuksia ilmastoon. Ilmatieteen laitos käyttää ilmastonmuutosarvioissaan CMIP5-malleihin ja RCP-kasvihuonekaasuskenaarioihin perustuvia ilmastomallituloksia, joita hallitusten välinen ilmastonmuutospaneeli IPCC käyttää arvioissaan. Eri ilmastomallit kuitenkin tuottavat toisistaan poikkeavia tuloksia samoilla päästöskenaarioilla. Tämä on huomioitu sääaika-arjoja laadittaessa käyttämällä johdonmukaisesti mallitulosten keskiarvoa. Siitä ei ole kuitenkaan varmuutta, että juuri mallitulosten keskiarvo kuvaisi parhaiten ilmaston kehitystä. [14]

7. PIHAKANNEN SIMULOINTI

7.1 COMSOL Multiphysics -ohjelman esittely

Comsol Multiphysics on monifysikaalinen simulointiohjelma, jolla voidaan tehdä simuloituja tilanteita, joissa otetaan huomioon useiden eri fysikaalisten ilmiöiden epälineaarinen yhteisvaikutus. [13] Esimerkiksi rakenteen lämpötila vaikuttaa moneen siinä tapahtuvaan prosessiin ja toisaalta rakenteen lämpötila on usein riippuvainen näistä prosesseista. Comsol Multiphysics perustuu variaatiolaskennan mukaiseen ongelmanasetteluun ja sillä etsitään osittaisdifferentiaaliyhtälöiden määrittämien ongelmien likiarvoratkaisuja elementtimenetelmällä, tarkemmin standardimuotoisen Galerkinin menetelmällä. Eri ilmiöiden kuvaaminen osittaisdifferentiaaliyhtälöiden avulla mahdollistaa laskennallisen tarkastelun erilaisten ilmiöiden vaikutuksia toisiinsa sekä tarkasteltavaan rakenteeseen. Ohjelma sisältää sisäänrakennettuja moduuleja eri fysikaalisista ilmiöistä, joiden sisällä on valmiiksi simulointiin tarvittavat laskentayhtälöt. Käyttäjälle jää määritettäväksi tarkasteltavan rakenteen geometria sekä erilaisten materiaaliominaisuuksien ja reunaehtojen asettaminen. Käyttäjän on mahdollista myös itse lisätä ja muokata simuloinnissa käytettäviä yhtälöitä. [6,13]

7.1.1 Simuloinnin kulku

Ennen simulointia, ohjelmassa luodaan laskentamalli, joko 0D, 1D, 2D tai 3D tilassa. Laskentamalli sisältää tarkastettavan rakenteen geometria- ja materiaalitiedot. Tarvittavat materiaaliominaisuudet riippuvat simuloinnissa tarkasteltavista fysikaalisista ilmiöistä. Tässä työssä tarkastellaan fysikaalisista ilmiöistä lämmönjohtumista ja lämmön säteilyä. Näitä varten tulee tuntea rakenteen eri materiaalien ominaislämpökapasiteetit, lämmönjohtavuudet, pintojen säteilyominaisuudet sekä materiaaliheydet.

Kun geometria on luotu ja materiaalitiedot syötetty, valitaan simulointiin mukaan otettavat fysikaaliset ilmiöt sekä tuodaan laskentamalliin sisä- ja ulkoympäristön olosuhteita kuvaavat datat ja asetetaan nämä vaikuttamaan rakenteeseen halutusti. Ympäristöolosuhteet voi tuoda ohjelmaan esimerkiksi txt- tai csv-tiedostoina tai ne voi luoda itse ohjelmassa. Tässä työssä ulkoympäristönä käytetään Ilmatieteen laitoksen julkaisemien testivuosien säädataa nykyisen ja tulevaisuuden ilmastoista sekä itsemuodostettua ääriolosuhdedataa. Testivuosien datasta hyödynnetään ulkoilman lämpötilaa ja kokonais säteily määrää vaakapinnalle. Sisälämpötilalle luodaan oma simulointiin sopiva lämpötiladata. Alkutilanteen lähtöarvot, kuten rakenteen osien alkulämpötilat, täytyy käyttäjän

itse määrittää. Testivuosien simuloinnin pituudeksi asetetaan kaksi vuotta, jolloin simulaatiossa käydään testivuosi kaksi kertaa läpi. Simuloinnin tulokset katsotaan toisen vuoden datasta. Tällä pyritään minimoimaan lähtöarvojen arvauksesta syntyvä virhe simulointituloksissa. Samoin ääriolosuhdesimulaatioiden pituus oli seitsemän vuorokautta ja tuloksia tarkastettiin viimeisen päivän tuloksista.

Lopuksi laskentamallille asetetaan laskentaverkko, jonka tiheyttä käyttäjä voi säädellä. Tiheämpi laskentaverkko antaa tarkempia tuloksia, mutta samalla se kasvattaa laskentaaikaa.

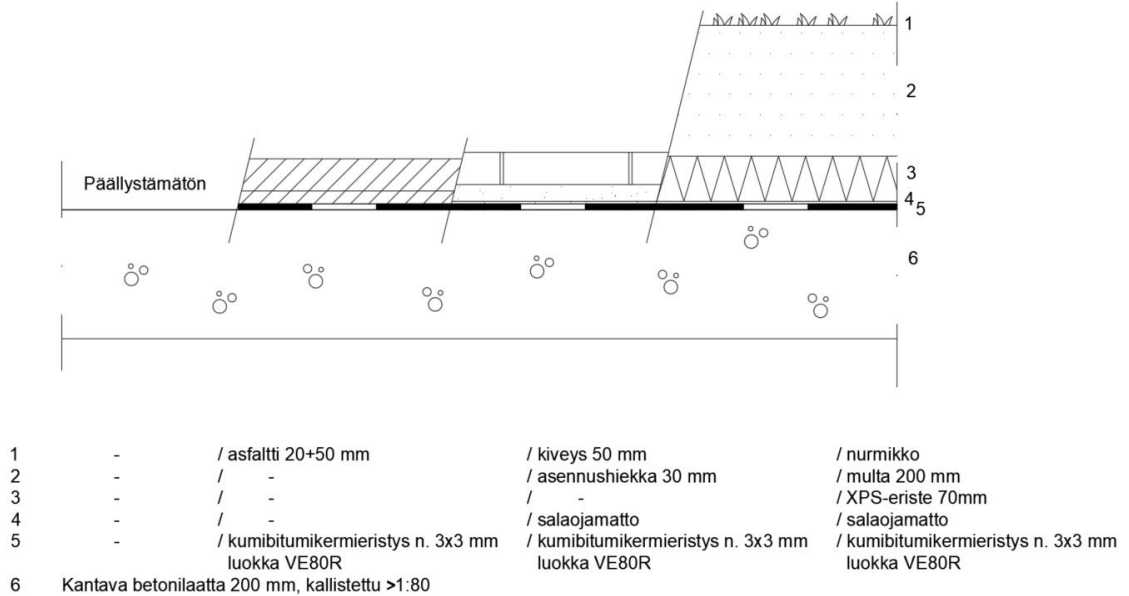
Kun kaikki edellä mainittu on määritetty, voidaan suorittaa itse simulointi. Kun simulointi on suoritettu, voidaan tuloksia tutkia eri tarkastelupisteistä ja -viivoista. Tuloksista voidaan tulostaa ulos esimerkiksi lämpökenttiä, taulukoita ja erilaisia kuvaajia analysointia varten.

7.2 Lähtöarvot ja laskentamalli

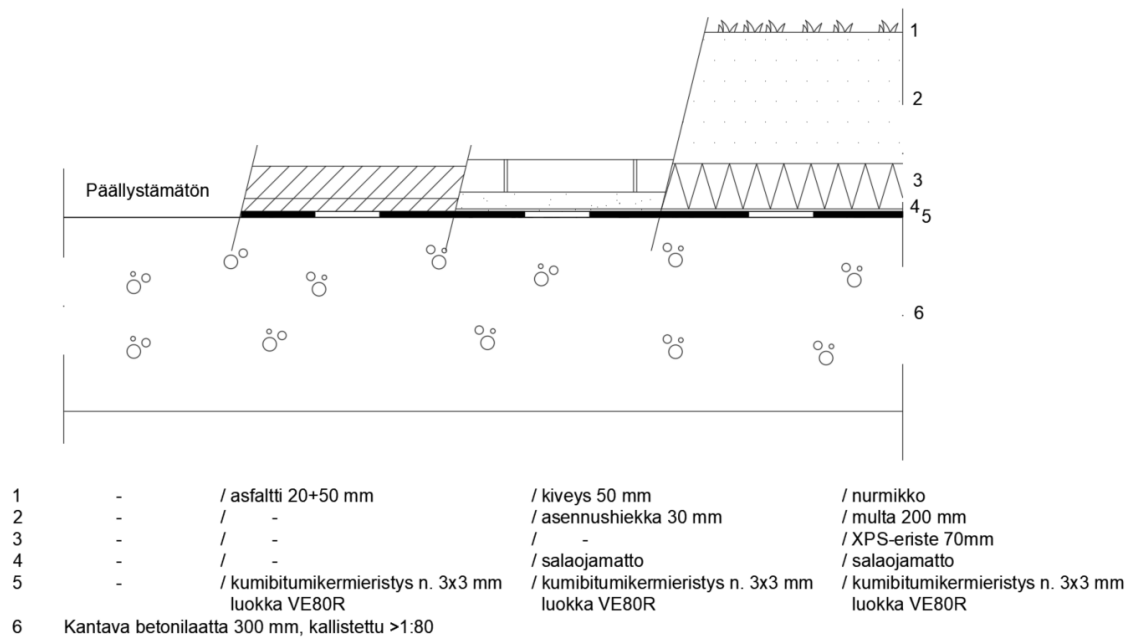
Tässä työssä tehdään kahdenlaisia simulointeja. Ensimmäiset simuloinnit tehdään energialaskennan testivuosien dataa hyödyntäen. Niiden tarkoitus on selvittää kuinka pihakannen muodonmuutokset tulevat muuttumaan tulevaisuuden ilmastoissa ja kuinka pihakannen pintarakenteet vaikuttavat pihakannen muodonmuutoksiin. Toisessa vaiheessa tutkitaan pihakannen käyttäytymistä ääriolosuhteissa ja selvitetään, kuinka suuria kokonaismuodonmuutoksia pihakansi voi kokea. Muodonmuutosten suuruudet selvitetään pihakansilaattaan syntyvien lämpöjakaumien perusteella.

Simulointia varten COMSOL Multiphysics -ohjelmaan (versio 5.6) luotiin yhteensä kahdeksan laskentamallia 2D tilassa. Tarkastelu olisi ollut mahdollista tehdä myös 1D tilassa, mutta 2D todettiin olevan havainnollisempi tätä työtä varten. Jokainen laskentamalli kuvaa kylmää pihakantta erilaisilla pintarakenteilla. Pintarakenteiksi valittiin paljas betonipinta, katukivetys, asfaltti ja nurmikko. Simuloinnissa käytettävät rakennetyypit ovat esitetty kuvissa 46 ja 47. Rakennetyyppien dimensiot ja rakennekerrokset ovat poimittu todellisista kohteista. Osassa kohteissa laatastoissa oli käytetty palkkikaistoja. Palkkikaistojen kohdalla palkin ja laatan kokonaispaksuus on ollut tyypillisesti 450 mm teräsbetonilaatan yhteydessä ja 500–600 mm jälkijännitetyssä betonilaatassa. Teräsbetonilaatoissa palkkien leveydet ovat olleet noin 2400 mm ja jälkijännitetyissä laatoissa kapeampi, noin 600–1200 mm [31]. Laskentamallit kuvaavat hyvin myös kuorilaattarakenteen käyttäytymistä, sillä kuorilaatan ja pintavalun yhteispaksuus pysäköintitaloissa on tyypillisesti noin 200–260 mm [20]. Pihakansien kallistukset ajatellaan tehtävän kantavilla laatastoilla, jolloin erillistä kallistusvalua ei ole otettu mukaan rakennetyyppeihin.

Teräsbetonilaattaa ei tyypillisesti voi jättää päällystämättä, sillä siihen syntyvät kutistumishalkeamat eivät sulkeudu itsestään, jolloin rakenne ei ole vesitiivis.



Kuva 46. 200 mm paksun pihakansilaatan rakennetyypit



Kuva 47. 300 mm paksun pihakansilaatan rakennetyypit

Simulointia varten jokaiselle laskentamallien kerrokselle määritettiin tarvittavat materiaaliominaisuudet, jotka on esitelty alla taulukossa 13.

Taulukko 13. *Simuloinneissa käytetyt materiaaliominaisuudet*

	Lämmönjohtavuus λ [W/(m°C)]	Tiheys ρ [kg/m ³]	Ominaislämpökapasiteetti c_p [J/(kg°C)]	Emissiviteetti ϵ [-]	Absorptiokerroin α_{sol}
Betoni (raudoitettu 1 %)	2,3 ¹⁾	2300 ¹⁾	1000 ¹⁾	0,91 ¹⁾	0,65 ¹⁾
Asfaltti	0,7 ²⁾	2100 ²⁾	1000 ²⁾	0,88 ¹⁾	0,91
Asennushiekka	2,0 ¹⁾	1900 ¹⁾	1000 ¹⁾	-	-
Kiveys	1,65 ¹⁾	2200 ¹⁾	1000 ¹⁾	0,91 ¹⁾	0,65 ¹⁾
Multa	0,4 ³⁾	900 ³⁾	1000 ³⁾	-	-
XPS-eriste	0,035 ¹⁾	32 ¹⁾	1450 ²⁾	-	-
Nurmikko (kasvillisuus)	-	-	-	0,94 ¹⁾	0,7 ¹⁾
Bitumikermi 3 mm	0,23 ¹⁾	1100 ¹⁾	1000 ¹⁾	-	-
Lähde: ¹⁾ RIL 255-1-2014 [6] ²⁾ C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma (luonnos) [9] ³⁾ WUFI materials [19]					

Materiaaliominaisuuksien arvoissa on monesti suuri haitari, joten materiaaliominaisuuksien syöttäminen simulointiohjelmaan oli haastavaa. Esimerkiksi maalajien lämmönjohtavuudet riippuvat voimakkaasti maan huokosissa olevasta ilmamäärästä, joita on vaikea ennakoita. Lisäksi maan lämmönjohtavuus kasvaa merkittävästi huokosverkoston vesimäärän kasvaessa. Pihakannen maakerrokset eivät kuitenkaan ole yhteyksissä pohjaveteen ja niiden voidaan ajatella kuivuvan nopeasti salaojamatton viedessä hulevedet kaivoihin. Maakerrosten materiaaliominaisuuksien arvot valittiin todennäköisiksi arvioitujen olosuhteiden perusteella diplomityöntekijän harkinnalla. Materiaaliominaisuuksien suuren haitarin vuoksi laskentamalleille suoritettiin myös herkkyysanalyysi, jossa materiaaliominaisuuksien arvoja vaihdettiin ääriarvoihin ja tutkittiin muutosten vaikutusta simulointituloksiin. Herkkyysanalyysistä kerrotaan enemmän kohdassa 8.3.

Asfaltin auringonsäteilyn absorptiokertoimelle ei löytynyt suoraa arvoa, mutta asfaltin pääseosaineiden bitumin ja kiviaineksen absorptiokertoimet ovat 0,93 ja 0,90 [6]. Tästä pääteltiin asfaltin absorptiokertoimeksi 0,91. Salaojamatton lämmönjohtavuudelle ja ominaislämpökapasiteetille ei löytynyt arvoja, mutta salaojamatton vaikutus simulointituloksiin arviointiin vähäiseksi, joten se päätettiin jättää pois laskentamallista.

Pintojen pinnanvastuksiksi valittiin ulkopuolen pinnanvastus $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{C/W}$ ja sisäpinnan pinnanvastus $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{C/W}$. Arvot ovat ympäristöministeriön suosituksia, jos pintavastus halutaan määrittää lämpövirran suunnasta riippumattomana tai jos lämpövirran suunta vaihtelee rakenteessa [9].

Laskentamallin eri kerroksiin asetettiin laskentaverkot ohjelman omilla fysiikkaohjatuilla laskentaverkkotasolla seuraavasti: vedeneristys normal-tasolla muut rakenteet finer-tasolla. Laskentamallien laskentaverkot on esitetty liitteessä 1. Laskentaverkon tiheyden riittävyys tarkastettiin erillisellä herkkyytestillä, jonka tulokset ovat esitelty kappaleessa 8.3.1.

Simuloinneissa käytettiin COMSOLin Heat Transfer in Solids -fysiikkamodulia. Lämpövirta asetettiin kulkemaan laatan ylä- ja alapinnan läpi. Laskentamallin lyhyet reunat ovat mallinnettu adiabaattisina, eli niiden läpi kulkevan lämpövirrantiheyden arvo on nolla. Myös säteilyn absorptio ja emitointi tapahtui vain laskentamallin yläpinnan kautta.

Simulaatiossa rakenteen yläpinta emittoi pitkäaaltoista säteilyä ympäristöönsä ja ympäristö yläpinnalle kaavan

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_{sky}^4 - T^4) \quad (8.1)$$

mukaisesti, missä T_{sky} (K) on taivaan lämpötila kelvineinä ja T (K) pihakannen pinnan lämpötila kelvineinä. Alapintaa ei asetettu emittoimaan lämpösäteilyä hallin sisälle. Kaavasta huomataan, että lämpövirran suunta voi muuttua ja se riippuu pinnan ja taivaan lämpötiloista. Taivaan lämpötilaa voidaan pilvisellä säällä pitää samana kuin ulkoilman lämpötila. Kirkkaalla säällä taivaan lämpötila on kuitenkin alhaisempi, jolloin lämpövirran suunta on pihakannen pinnalta taivaalle. Tällä on pihakannen lämpötilaa laskeva vaikutus, joka tulee ottaa tarvittaessa huomioon. Talvisimulaatioissa taivaan vastasäteilyn viilentävä vaikutus otettiin huomioon laskemalla T_{sky} kaavan 4.29 mukaisesti. Testivuosisimulaatioissa ja kesän ääriolosuhdesimulaatioissa T_{sky} oli sama kuin ulkolämpötila.

7.2.1 Testivuosisimulaatioiden olosuhteet

Laskentamalliin syötettiin csv-tiedostona energialaskennan testivuosien datasta tunti-kohtaiset pihakannen yläpuolisen ilman lämpötilat sekä auringon kokonaissäteilyteho vaakapinnalle. Säteily asetettiin vaikuttamaan rakenteen yläpintaan ja absorptiokerroin huomioitiin säteilytehosta. Simulointien rajoittamisen vuoksi simulointi suoritettiin vain Vantaan (vyöhyke I) testivuosien TRY2020, TRY2030 ja TRY2050 säädataa käyttäen. Vuoden TRY2080 katsottiin menevän liian pitkälle tulevaisuuteen ja sisältävän liikaa epävarmuuksia, jotta sen sisällyttäminen simulaatioihin olisi mielekäästä. Simulointikertojen rajoittamiseksi päästöskenaarioksi valittiin vain RCP4.5. Päästöskenaario RCP4.5:n katsottiin olevan kolmesta päästöskenaariosta todennäköisin, sillä kaksi muuta skenaariota tarkoittaisi käytännössä joko ilmastopolitiikan totaalista onnistumista tai epäonnistumista.

Simuloinnin yhdeksi haasteeksi osoittautui pysäköintihallin sisällä olevan ilman lämpötilan määrittäminen, sillä vastaavanlaista dataa kuin ulkoilmalle ei ollut tarjolla. Sisälämpötilat vaihtelevat tapauskohtaisesti ja siihen vaikuttaa moni asia, kuten hallin ilman vaihtuvuus ja hallin avonaisuus ulkoilmaan. On kuitenkin selvää, että maanalaisen pihakannellisen pysäköintihallin lämpötila on ulkolämpötilaa lämpimämpi talvella ja kesällä viileämpi. Ulkoilmaan avoinna olevan pysäköintihallin sisälämpötilan voidaan olettaa olevan sama kuin ulkoilma. Naulankanta Oy:n laakerien valintaohjeen mukaan maanalaisessa lämmitettävissä tilassa olevan betonirakenteen lämpötilan vaihteluväli on noin 30 °C (-10...+20 °C) [27].

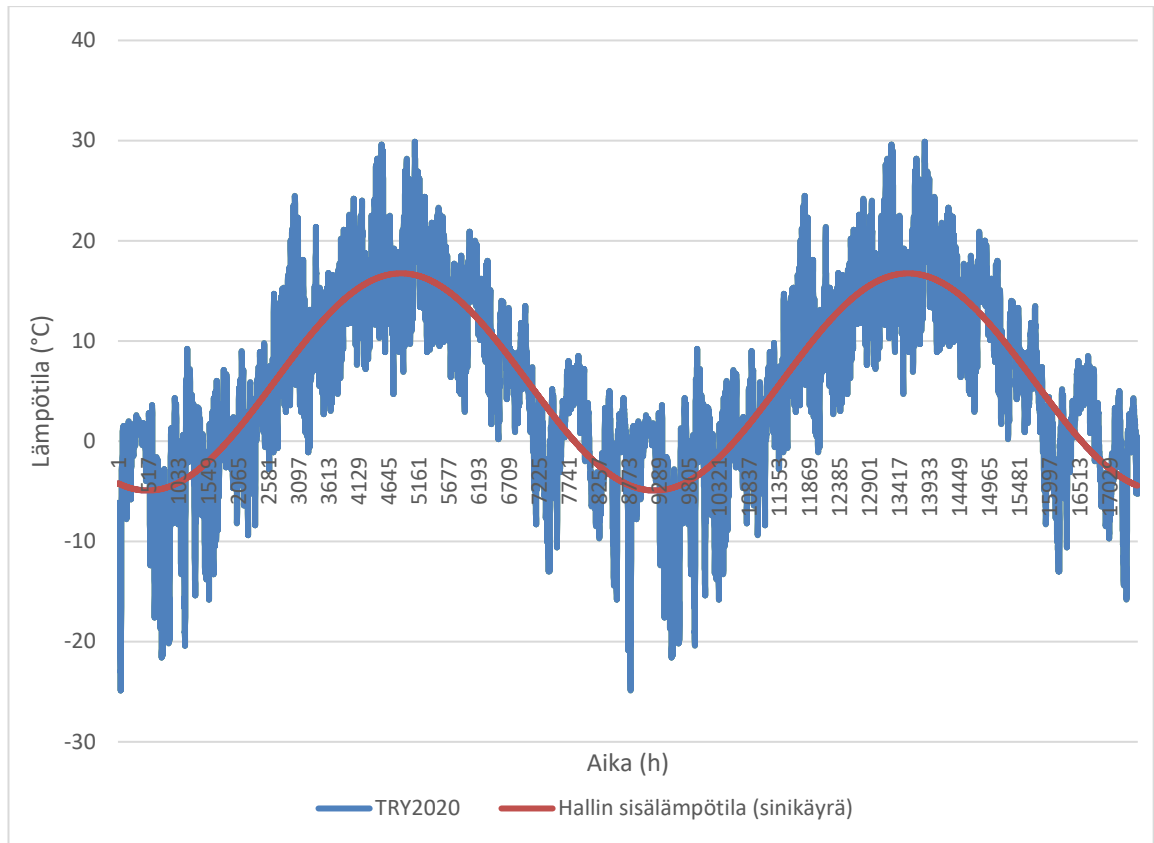
Simulointia varten pysäköintihallin sisälämpötilasta kehitettiin oma datansa, joka pohjautui kunkin testivuoden ulkoilman lämpötiloihin. Lämpötiladata kehiteltäessä haluttiin se tehdä edustamaan suljettua maanalaista pysäköintihallia, jonka lämpötila on talvella lämpimämpi ja kesällä kylmempi kuin ulkoilma. Lisäksi lämpötilavaihteluiden haluttiin olevan hitaampia kuin ulkoilmalla.

Sisäilman lämpötila mallinnettiin sovittamalla ulkolämpötilan dataan sopiva sinikäyrä. Sinikäyrä oli muotoa

$$T(t) = A * \sin(\omega t + \theta) + T_{keski}, \quad (8.2)$$

missä A on sinikäyrän amplitudi, ω kulmataajuus, θ aallon vaihe, kun $t=0$ ja T_{keski} hallin sisälämpötila aallon keskellä.

Sinikäyrän muoto määritettiin ja se asetettiin paikalleen käyttämällä pienimmän neliösumman menetelmää, jossa summattiin ulkolämpötilan ja sinikäyrän erotuksen neliöitä yhteen ja etsittiin sinikäyrän parametreille sellaiset arvot, jotka toteuttivat pienimmän arvon erotusten neliöiden summalle. Määrittäminen tehtiin Excelin ratkaisinta käyttämällä. Kuvassa 48 ratkaistu sinikäyrä on asetettu TRY2020 ulkoilmadatan päälle.



Kuva 48. Hallin sisälämpötila testivuoden TRY2020 simulaatioissa

Kuvan sinikäyrä on muotoa

$$T_{\text{sisä}}(t) = 10,839^{\circ}\text{C} * \sin\left(\frac{2\pi}{8711,637\text{ h}} * t - 1,939\right) + 5,911^{\circ}\text{C}, \quad (8.3)$$

missä t on aika tunteina. Hallin ääriämpötiloiksi määritettiin noin $-4,93^{\circ}\text{C}$ ja $16,75^{\circ}\text{C}$ ja ne osuivat tammikuun ja heinäkuun lopuille.

Edellä kuvatulla tavalla muodostettiin hallin sisälämpötilat myös 2030- ja 2050-luvun ilmastoille. Kaikkien kolmen testivuosien mukaan määritetyt hallin sisälämpötiladat ovat esiteltynä liitteessä 2.

7.2.2 Ääriolosuhdesimulaatioiden olosuhteet

Ääriolosuhdesimulaatioiden tarkoitus on selvittää suurimmat tason suuntaiset lämpötilamuutokset, jotka pihakansi voi kohdata. Simulaatiotulosten avulla voidaan laskea suurimmat muodonmuutokset ja pakkovoimat, mitä pihakansiin voi muodostua. Simulaatiota varten muodostettiin viikon mittaiset sää datat, jotka edustivat talven ja kesän ääriolosuhteita. Simulaatiotulokset määritettiin viimeisen vuorokauden tuloksista.

Auringon korkeuskulma β on Helsingissä kesällä korkeimmillaan noin $53,5^\circ$. Kaavoilla 4.14 ja 4.15 laskemalla saadaan kirkkaalla säällä vaakasuoralle pinnalle tulevan säteilytehon $I_{sol,N}$ arvoksi noin 830 W/m^2 . Kun diffuusi säteily kirkkaana päivänä huomioidaan saadaan pinnalle saapuvaksi säteilytehoksi $I_{sol,N+D}$ noin 900 W/m^2 . Keskipäivänseisauksen aikaan Vantaalla aurinko paistaa noin 19 tuntia (3:52-22:51). Tämän ajan auringon säteily asetettiin vaikuttamaan pihakannen yläpintaan seuraavalla teholla: ensimmäinen ja viimeinen tunti 300 W/m^2 , toinen ja toiseksi viimeinen tunti 600 W/m^2 ja muuten 900 W/m^2 . Päivän pituus Vantaalla talvipäivänseisauksena on noin 6 tuntia (9:25-15:12). Auringon säteilyn teho voi talvella jäädä huippuarvoltaan alle 7 W/m^2 , joten sen vaikutus pihakannen laatan lämpötilaan on olematon.

Ääriämpötilat valittiin suomen kansallisen liitteen lämpötilojen isotermikartasta, joka esiteltiin kappaleen 5.1.1 kuvassa 24. Kartan mukaan Vantaalla suurin varjossa mitattu lämpötila on 32°C ja pienin -36°C . Kesällä lämpötilan ajateltiin laskevan yöllä 24°C :n, mutta talvella pitkät kylmät jaksot ovat mahdollisia, joten lämpötilan ajateltiin pysyvän samana. Sisälämpötilat asetettiin ääriolosuhdesimulaatioissa vakioiksi: 20°C kesällä ja -10°C talvella. Laattojen lähtölämpötiloiksi asetettiin 20°C kesällä ja -10°C talvella. Ääriolosuhdesimulaatioissa käytetyt säädädatat ovat esitelty liitteessä 3.

8. TULOKSET

Laatan pintojen lämpötilat määritettiin asettamalla tarkastelupisteet laskentamallin betonilaatan ylä- ja alapintaan laatan keskellä. Laatan keskilämpötila määritettiin laatan keskiosan halkaisevan pystysuoran tarkasteluviivan avulla, joka huomioi mahdollisen lämpöjakauman epälineaarisuuden. Tässä kappaleessa on keskeisimmät simulaatiotulokset esiteltynä yhden desimaalin tarkkuudella. Lisäksi kappaleessa esitellään laskentamallien herkkyyshanalyysit lähtöarvojen ja laskentaverkon muutoksille.

8.1 Testivuosisimulaatiot

Testivuosisien simulointituloksista kehitetyt laatan pintojen lämpötilojen ja keskilämpötilojen kuvaajat ovat nähtävissä liitteessä 4. Alla taulukoissa 14–16 on esitelty keskeisimmät testivuosisimulaatioiden tulokset.

Taulukko 14. 200 mm laatan keskilämpötilat nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa

	Suurin keskilämpötila (°C)			Pienin keskilämpötila (°C)		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
200 mm laatta						
ilman pintarak.	31,4	32,4	33,0	-16,0	-13,7	-12,5
asfaltti	25,3	26,4	27,0	-10,8	-9,0	-7,9
kiveys	25,3	26,3	26,9	-12,2	-10,2	-9,1
nurmikko	17,4	18,3	18,8	-5,3	-3,9	-3,1

Taulukko 15. 300 mm laatan keskilämpötilat nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa

	Suurin keskilämpötila (°C)			Pienin keskilämpötila (°C)		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
300 mm laatta						
ilman pintarak.	28,6	29,7	30,3	-14,5	-12,5	-11,3
asfaltti	24,5	25,6	26,1	-10,2	-8,4	-7,4
kiveys	24,4	25,4	25,9	-11,4	-9,5	-8,5
nurmikko	17,4	18,3	18,8	-5,3	-3,9	-3,1

Taulukko 16. Suurin lämpötilaero laatan pintojen välillä nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastoissa

	Suurin lämpötilaero (°C)					
	200 mm laatta			300 mm laatta		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
ilman pintarak.	12,9	12,9	13,0	16,2	16,4	16,4
asfaltti	6,6	6,6	6,6	8,6	8,6	8,6
kiveys	6,9	6,9	6,9	8,9	8,9	8,8
nurmikko	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7

8.2 Ääriolosuhdesimulaatiot

Ääriolosuhteiden simulaatiotulosten pohjalta piirretyt pihakansien keski- ja pintalämpötilakuvaajat ovat katsottavissa liitteessä 5. Ääriolosuhdesimulaatioiden keskeisimpiä tuloksia on esitelty taulukoissa 17 ja 18.

Taulukko 17. *Laatan suurin keskilämpötila kesällä ja pienin keskilämpötila talvella*

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
ilman pintarak.	40,6	-31,9	38,6	-31,0
asfaltti	34,7	-24,0	34,2	-24,2
kiveys	34,1	-26,4	33,3	-26,3
nurmikko	21,5	-12,0	21,6	-12,2

Taulukko 18. *Suurin laatan pintojen välille syntynyt lämpötilaero (°C)*

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
ilman pintarak.	12,9	-11,0	16,0	-14,0
asfaltti	8,3	-7,0	11,1	-9,5
kiveys	8,0	-8,2	10,6	-10,9
nurmikko	0,8	-1,0	1,2	-1,5

Taivaan vastasäteilyn viilentävän vaikutuksen huomioiminen talvisimulaatioissa laski kaikkien laskentamallien betonilaattojen keskilämpötiloja. Eniten vastasäteily vaikutti pintarakenteettomiin laskentamalleihin, joiden keskilämpötilat laskivat noin 4 °C. Asfalttipäällysteisten laattojen keskilämpötilat laskivat noin 2,5 °C, kivetettyjen laattojen 3 °C ja nurmikkopäällysteisten laattojen 0,4 °C.

Keskilämpötilat ja pintojen väliset lämpötilaerot laskettiin vertailun vuoksi myös standardin EN 1991-1-5 mukaisesti. Ulkolämpötilat määritettiin kansallisen liitteen avulla ja sisälämpötiloina pidettiin kesällä 20 °C ja talvella -10 °C, kuten ääriolosuhdesimulaatioissa. Pintojen lämpötilat laskettiin kuvan 46 pihakansirakenteille, eli 200 mm laatalle käyttäen samoja materiaaliominaisuuksia kuin simuloinnissa. Pintojen lämpötilat laskettiin kaavalla 4.8. Tulokset ovat esitettynä alla taulukossa 19 ja laskut ovat esitetty liitteessä 7.

Taulukko 19. standardin EN 1991-1-5 mukaan lasketut 200 mm laatan keskilämpötilat ja pintojen lämpötilaerot (°C)

	Kesä		Talvi	
	keskilämpötila T	pintojen lämpötilaero ΔT_M	keskilämpötila T	pintojen lämpötilaero ΔT_M
ilman pintarak.	43,0	9,4	-26,4	-10,0
asfaltti	40,6	8,4	-20,2	-6,2
kiveys	37,9	7,3	-22,0	-7,3
nurmikko	22,4	1,0	-11,3	-0,8

Lasketut arvot vastaavat suuruusluokaltaan simulointituloksia, niissä on kuitenkin joitain eroja. Lasketut keskilämpötilat ovat suurempia kesällä, mutta talvella simulointitulokset ovat kylmempiä, jopa 5,5 °C. Talvitulosten ero johtuu todennäköisesti taivaan vastasäteilyn viilentävästä vaikutuksesta, jotka huomioitiin talvisimulaatioissa, mutta laskennassa ei. Standardi mainitsee, että takaisinsäteily aiheuttaa muutoksia rakennusosan lämpötilajakaumaan, mutta ei tarjoa menetelmää asian huomioon ottamiseksi laskelmissa. Myös pintojen lämpötilaerot jäivät lasketuissa arvoissa pääosin simulaatituloksia pienemmiksi.

8.3 Simulaatitulosten herkkyysanalyysi

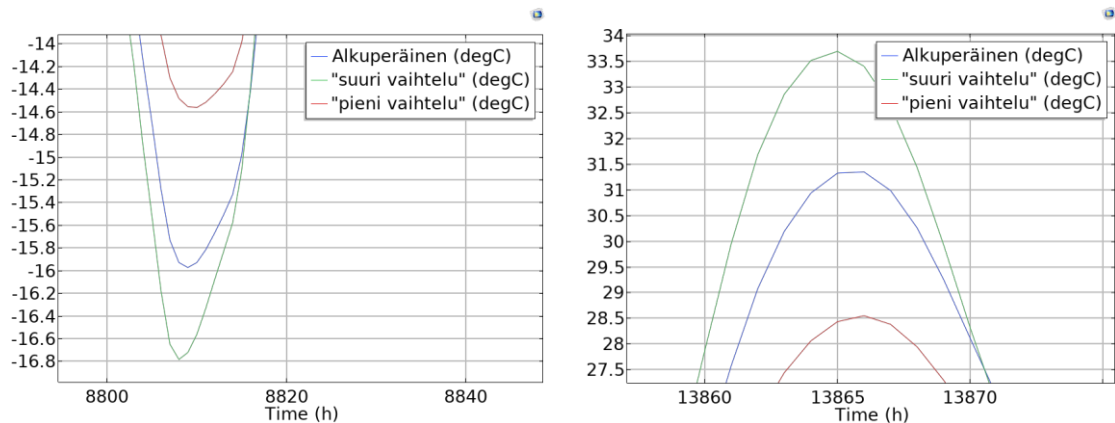
Moni simulaatioissa käytetyistä materiaaliominaisuusarvoista on valittu usean vaihtoehdon joukosta, jolloin on syytä selvittää kuinka tulokset muuttuvat, kun valittuja arvoja muutetaan. Herkkyysanalyysillä pyritään arvioimaan simulointitulosten epävarmuuksia ja tutkitaan kuinka herkkiä laskentamallien simulaatitulokset ovat eri materiaaliominaisuuksien arvoille. Herkkyysanalyysisimulaatioiden tulosten tulisi muuttua oikeaan suuntaan ja käyttäytyä oletetusti.

Koska simulaatioissa käytettyjä lähtöarvoja on niin useita, ei herkkyysanalyysiä voida tehdä valitsemalla sattumanvaraisesti lähtöarvoja ja katsoa mitkä arvot aiheuttavat suurimmat ja pienimmät lämpötilanvaihtelut laattaissa. Siksi herkkyysanalyysi tehdään valitsemalla simulaatioissa käytettyjen materiaaliominaisuuksien arvojen ympäriltä ala- ja yläarvot, jotka aiheuttavat diplomityöntekijän mielestä suurimmat ja pienimmät lämpötilanvaihtelut laattaan.

Suurimmat lämpötilavaihtelut saadaan aikaiseksi, kun laskentamallin materiaaleille valitaan mahdollisimman pienet tiheydet ja ominaislämpökapasiteetit, sekä mahdollisimman suuret lämmönjohtavuudet, emissiviteetit ja absorptiokertoimet. Vastaavasti pienimmät lämpötilavaihtelut saadaan valitsemalla suuret tiheydet ja ominaislämpökapasiteetit, sekä pienet lämmönjohtavuudet, emissiviteetit ja absorptiokertoimet.

Herkkyysanalyysi tehtiin simuloimalla 200 mm paksu laatta kaikilla neljällä pintarakenneratkaisulla testivuoden TRY2020 ilmastodataa käyttämällä. Materiaaliominaisuusarvojen ala- ja yläarvot ovat otettu pääosin lähteestä 6. Kaikilla simulaatioissa käytetyillä materiaaleilla ei kuitenkaan vaihteluväliä ole esitetty, jolloin vaihteluväli on valittu diplomityöntekijän harkinnalla.

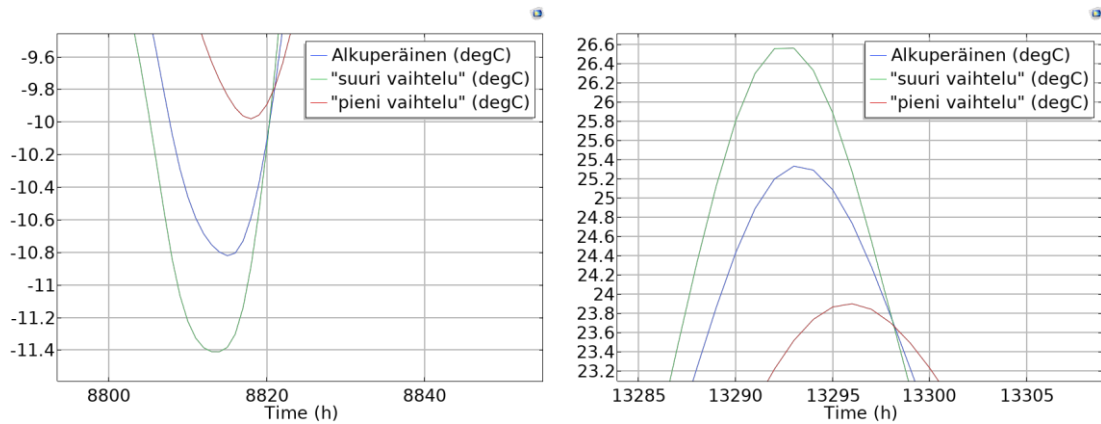
Ensimmäinen rakennetyyppi sisältää vain betonilaatan. Betonin lämmönjohtavuus voi vaihdella 1–3 W/(m°C), tiheys 2100–2300 kg/m³, ominaislämpökapasiteetti 840–1000 J/(kg°C), emissiviteetti 0,88–0,93 ja absorptiokerroin 0,6–0,7 [6]. Materiaaliominaisuuksien vaihteluvälit syötettiin edellä mainitulla tavalla simulointiohjelmaan muodostamalla kolme laskentamallia niin, että alkuperäisen laskentamallin lisäksi rakennettiin kaksi laskentamallia, jotka aiheuttivat mahdollisimman suuren ja mahdollisimman pienen keskilämmön vaihtelun tarkasteluvuodessa. Alla kuvassa 49 on esitettyä ensimmäisen herkkyyssanalyysisimuloinnin tulokset laatan keskilämpötilan ääripäissä.



Kuva 49. Herkkyyssanalyysin tulokset laatan keskilämpötilan ääripäissä, 200 mm laatta ilman pintarakenteita

Tuloksista nähdään, että suuren vaihtelun laskentamalli aiheutti laattaan alkuperäiseen laskentamalliin verrattuna talvella noin 0,8 celsiusastetta kylmemmän ja kesällä noin 2,3 celsiusastetta kuumemman keskilämpötilan. Vastaavasti pienen vaihtelun laskentamalli antoi talvella noin 1,4 celsiusastetta lämpimämpiä ja kesällä noin 2,8 celsiusastetta viileämpiä tuloksia kuin alkuperäinen laskentamalli.

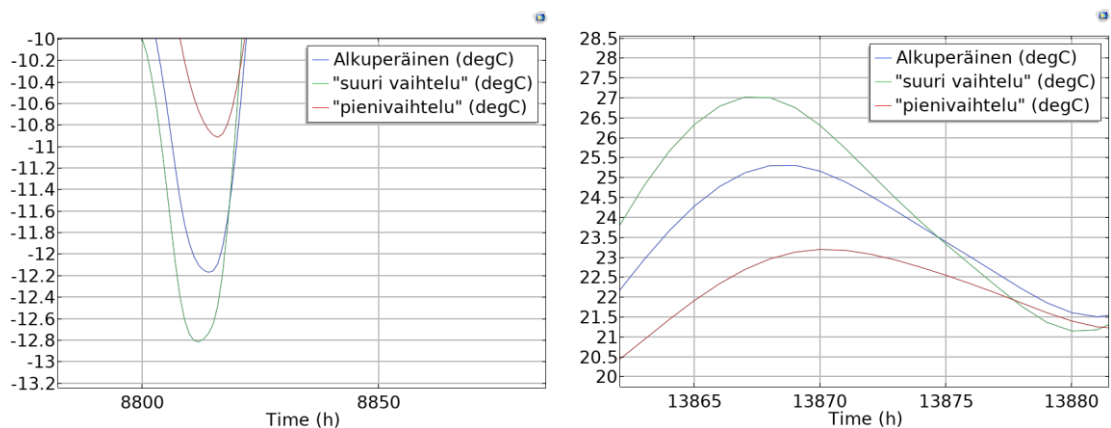
Toinen rakennetyyppi sisältää betonilaatan lisäksi bitumikermin- ja asfalttikerroksen. Bitumikermin lämmönjohtavuus voi vaihdella 0,15–0,23 W/(m°C), tiheys 1100–1200 kg/m³, ominaislämpökapasiteetti 1000–2000 J/(kg°C). Asfaltin emissiviteetti vaihtelee 0,85–0,93. [6] Asfaltin absorptiokerroin ala- ja yläarvoiksi valittiin 0,90 ja 0,93. Asfaltin ominaislämpökapasiteetin vaihteluväliksi valittiin 1700–2100 J/(kg°C), tiheyden 1100–2100 kg/m³ ja lämmönjohtavuuden 0,6–0,8 W/(m°C). Alla kuvassa 50 on esitettyä toisen herkkyyssanalyysisimulaation tulokset laatan keskilämpötilan ääripäissä.



Kuva 50. 200 mm laatta asfalttipintarakenteella, herkkyydestin tulokset keskilämpötilan ääripäissä

Alkuperäiseen laskentamalliin verrattuna suuren vaihtelun laskentamalli antoi talvella noin 0,6 celsiusastetta kylmempiä ja kesällä noin 1,3 celsiusastetta lämpimämpiä keskilämpötilan tuloksia. Vastaavasti pienen vaihtelun laskentamalli aiheutti alkuperäiseen laskentamalliin verrattuna laattaan noin 0,8 celsiusastetta lämpimämmän keskilämpötilan talvella ja noin 1,4 celsiusastetta viileämmän kesällä.

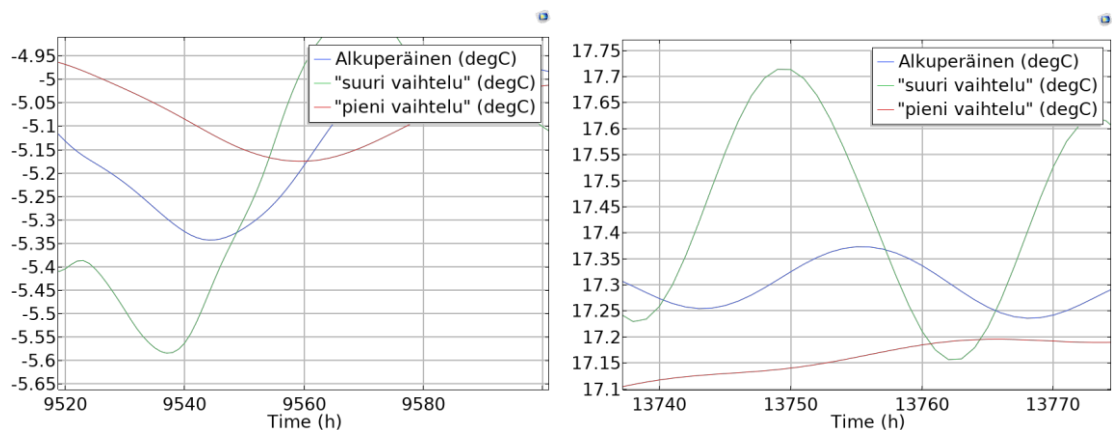
Kolmas rakennetyyppi sisältää betonilaatan lisäksi bitumikermi-, asennushiekka- ja kiveyskerroksen. Hiekan lämmönjohtavuus pohjaveden yläpuolella voi vaihdella 1–2,2 W/(m°C), tiheys 1700–2100 kg/m³ ja ominaislämpökapasiteetti 900–1200 J/(kg°C) [6]. Kiveys oletetaan tehtäväksi betonikivistä tai -laatoista. Raudoittamattoman betonin lämmönjohtavuus vaihtelee 1,15–2 W/(m°C), tiheys 1800–2400 kg/m³, ominaislämpökapasiteetti 840–1000 J/(kg°C), emissiviteetti 0,88–0,93 ja absorptiokerroin 0,6–0,7 [6]. Alla kuvassa 51 on esitelty herkkyyssanalyysisimulaation tulokset laatan keskilämpötilan ääripäissä.



Kuva 51. 200 mm laatta kiveyspintarakenteella, herkkyydestin tulokset keskilämpötilan ääripäissä

Suuren vaihteluvälin laskentamalli antoi alkuperäiseen laskentamalliin nähden noin 0,6 celsiusasteen verran kylmemmän tuloksen talvella ja noin 1,7 celsiusastetta lämpimämmän tuloksen kesällä. Vastaavasti pienen vaihtelun laskentamalli antoi simulaatiossa alkuperäiseen laskentamalliin verrattuna talvella noin 1,3 celsiusastetta lämpimämmän ja kesällä noin 2,1 celsiusastetta viileämmän äärikeskilämmön.

Neljäs rakennetyyppi sisältää betonilaatan lisäksi bitumikermi-, XPS-eriste-, multa- ja kasvillisuuskerroksen. XPS-eristeen lämmönjohtavuus vaihtelee 0,033–0,037 W/(m°C) [6]. XPS-eristeen tiheyden vaihteluväliksi valittiin 30–35 kg/m³ ja ominaislämpökapasiteetin 1300–1600 J/(kg°C). Multakerroksen lämmönjohtavuuden vaihteluväliksi valittiin 0,2–1,5 W/(m°C) ja tiheyden 400–1100 kg/m³, jotka vastaavat turpeen ominaisarvoja [6]. Mullan ominaislämpökapasiteetin vaihteluväliksi valittiin 900–1500 J/(kg°C). Nurmikon (kasvillisuuden) emissiviteetti vaihtelee 0,92–0,96 ja absorptiokerroin 0,6–0,76 [6]. Alla kuvassa 52 on esitelty neljännen rakennetyypin herkkyyssanalyysisimulaation tulokset laatan keskilämmön ääripäissä.



Kuva 52. 200 mm laatta nurmikkopintarakenteella, herkkyyssanalyysin tulokset keskilämpötilan ääripäissä

Tuloksista nähdään, että alkuperäiseen laskentamalliin verrattuna suuren vaihtelun laskentamalli aiheutti laattaan talvella noin 0,25 celsiusastetta kylmemmän ja kesällä noin 0,35 celsiusastetta lämpimämmän keskilämmön. Vastaavasti pienen vaihtelun laskentamalli aiheutti laattaan alkuperäiseen laskentamalliin verrattuna noin 0,4 celsiusastetta lämpimämmän keskilämmön talvella ja noin 0,15 celsiusastetta viileämmän kesällä (huippu ei näy kuvaajassa).

Herkkyyssanalyysisimulaation tuloksien perusteella voidaan todeta, että alkuperäisellä laskentamallilla saadut tulokset asettuvat hyvin kahden ääripäälaskentamallin tulosten väliin. Lisäksi laskentamallit käyttäytyivät oletetusti simulaatioissa, eli suuren lämmönjohtavuuden, emissiviteetin ja absorptiokertoimen sekä pienen tiheyden ja ominaisläm-

pökapasiteetin omaavien laskentamallien lämpötilavaihtelu oli voimakkaampaa kuin laskentamallien, joiden lämmönjohtavuus, emissiviteetti ja absorptiokerroin olivat pieniä sekä tiheys ja ominaislämpökapasiteetti suuria.

Herkkyysanalyysin tuloksista voidaan määrittää virhemarginaalit eri rakennetyypeille, jotka ovat ylöspäin pyöristettynä ja puolen asteen tarkkuudella annettuna seuraavat: ei pintarakenteita $\pm 3,0$ °C, asfaltti $\pm 1,5$ °C, kiveys $\pm 2,5$ °C ja nurmikko $\pm 0,5$ °C. Lämpöliikkeiden kannalta tärkeimmät tulokset ovat ehdottomasti suuren vaihtelun laskentamallilla saadut tulokset, sillä ne lisäävät pihakannen lämpöliikkeitä. Taulukosta 20 nähdään, että suurenvaihtelun laskentamallit kasvattivat kokonaisuutena eli laatan keskilämpötilan vaihteluväliä alle 7 % kaikissa rakennetyypeissä. Laskentamallit eivät siis olleet erityisen herkkiä materiaaliominaisuuksien vaihtelulle. Tulee muistaa, että tässä herkkyysanalyysissä valittiin tarkoituksenmukaisesti ominaisuudet niin, että ne aiheuttaisivat mahdollisimman suuren vaihtelun. Tilanteet eivät siis ole todennäköisiä ja esimerkiksi tiheyden kasvaminen yleensä kasvattaa myös materiaalin lämmönjohtavuutta ja pieni tiheys tarkoittaa yleensä pientä lämmönvastusta.

Taulukko 20. *Suuren vaihtelun ja alkuperäisen laskentamallin tulosten vertailu*

	Pienin keski-lämpötila	Suurin keski-lämpötila	Kokonaisuutos
ilman pintarak.	5.0 %	7.3 %	6.5 %
asfaltti	5.6 %	5.1 %	5.3 %
kiveys	4.9 %	6.7 %	6.1 %
nurmikko	4.7 %	1.9 %	2.5 %

8.3.1 Laskentaverkon riittävän tiheyden varmistaminen

Laskentaverkko on riittävän tiheä silloin, kun tiheämpi laskentaverkko ei enää vaikuta merkittävästi simulaatiotuloksiin. Simulaatiot suoritettiin käyttämällä laatoissa COMSOLin omaa fysiikkaohjattua laskentaverkkoa finer-tasolla. Laskentaverkon riittävän tiheyden varmistettiin toistamalla testivuoden TRY2020 simulaatiot kaikilla 200 mm laatan laskentamalleilla laatan laskentaverkon ollessa extra fine -tasolla. Tulokset nähdään alla taulukosta 21.

Taulukko 21. *Laskentaverkon tiheyden vaikutus laskentatuloksiin*

	Finer		Extra fine	
	Suurin keski-lämpötila	Pienin keski-lämpötila	Suurin keski-lämpötila	Pienin keski-lämpötila
Ilman pintarak	31,353	-15,976	31,351	-15,976
Asfaltti	25,330	-10,816	25,338	-10,818
Kiveys	25,334	-12,170	25,324	-12,169
Nurmikko	17,374	-5,343	17,374	-5,343

Tuloksista nähdään, että laskentaverkon tihentäminen ei vaikuttanut simulaatiotuloksiin merkittävästi. Tuloksia tarkasteltiin yhden desimaalin tarkkuudella, joten finer-tason laskentaverkko on riittävä kuvaamaan laattaan syntyviä lämpöjakaumia.

9. TULOSTEN ANALYYSINTI

Testivuosisimulaatioiden tuloksilla tutkitaan pintarakenteiden ja laattapaksuuden vaikutuksia laattaan lämpöliikkeisiin kokonaisen vuoden aikana. Lisäksi tuloksista voidaan tutkia kuinka ilmastonmuutos vaikuttaa pihakannen lämpöliikkeisiin yleisellä tasolla. Sään ääri-ilmiöitä ei ole huomioitu testivuosisimulaatiossa. Ääriolosuhdesimulaatioiden avulla tutkitaan taas pihakansien kokonaismuodonmuutoksia ja estettyinä niistä syntyviä lämpörasituksia talven ja kesän ääriolosuhteissa.

9.1 Keskilämpötilat

9.1.1 Testivuosisimulaatiot

Tarkastellaan ensin pihakansilaattojen keskilämpötilojen muutoksia eri vuosikymmenten ilmastoissa. Odotetusti pihakansien ääriämpötilat nousivat sekä talvella, että kesällä. Keskilämpötilat kasvoivat kuitenkin huomattavasti voimakkaammin talvella. Talvella lämpötilamuutokset olivat noin kaksinkertaiset kesän lämpötilamuutoksiin verrattuna. Tämä epätasainen lämpötilan muutos johtaa siihen, että kokonaislämpötilamuodonmuutosten ääripäät tulevat lähemmäksi toisiaan. Tällöin kokonaismuodonmuutokset keskimäärin pienevät tulevaisuuden ilmastossa, mutta niiden painopiste siirtyy muutaman asteen lämpimämpään. Alla taulukoissa 22 ja 23 on esitelty laattoihin syntyneiden äärikeskilämpötilojen muutos vuoden 2020 tasoon nähden.

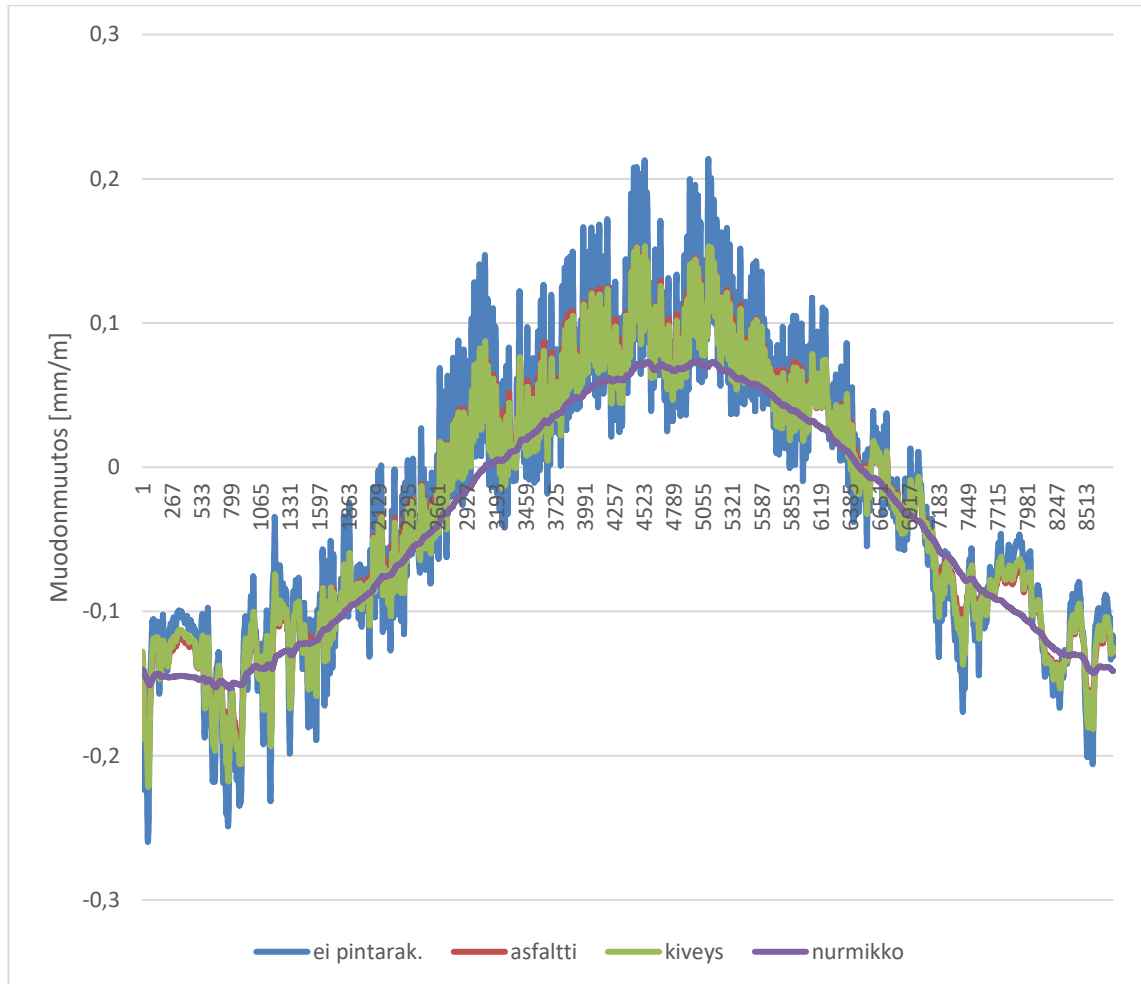
Taulukko 22. 200 mm laatan keskilämpötilojen ääriarvojen muutos (°C) vuoteen 2020 verrattuna

	2030	2050	2030	2050
200 mm laatta	Suurin keskilämpötila		Pienin keskilämpötila	
ilman pintarak.	1,0	1,7	2,3	3,5
asfaltti	1,1	1,6	1,8	2,9
kiveys	1,0	1,6	1,9	3,0
nurmikko	0,9	1,4	1,4	2,3

Taulukko 23. 300 mm laatan keskilämpötilojen ääriarvojen muutos (°C) vuoteen 2020 verrattuna

	2030	2050	2030	2050
300 mm laatta	Suurin keskilämpötila		Pienin keskilämpötila	
ilman pintarak.	1,1	1,7	2,1	3,2
asfaltti	1,0	1,6	1,7	2,8
kiveys	1,0	1,6	1,9	2,9
nurmikko	0,9	1,4	1,4	2,3

Testisimulaatioilla tutkittiin pintarakenteiden vaikutusta pihakannen pituuden muodonmuutoksiin. Kuvassa 53 on esitelty pihakansien lämpöliikkeiden suuruus hetki hetkeltä koko testivuoden aikana. Kuvassa pihakannen muodonmuutos on asetettu nolllaksi, kun pihakannen laatan lämpötila on 10 °C. Kuvasta huomataan, kuinka tehokkaasti pintarakenteet voivat lämpöliikkeitä hillitä.



Kuva 53. Pihakannen 200 mm paksun laatan muodonmuutokset rakennetyypeittäin testivuoden TRY2020 aikana ($T_0=10^{\circ}\text{C}$)

Simulaatiotuloksista laskettiin pintarakenteiden vaikutus muodonmuutosten huippuarvojen suuruuksiin, eli sitä kuinka paljon muodonmuutokset vähenivät verrattuna pintarakenteettomaan pihakanteen. Tulokset ovat esiteltyinä alla taulukoissa 24, 25 ja 26.

Taulukko 24. Pintarakenteiden vaikutus 200 mm laatan muodonmuutoksiin ($T_0=10^{\circ}\text{C}$)

200 mm laatta	Kutistuminen			Laajeneminen		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
asfaltti	-20 %	-20 %	-20 %	-28 %	-27 %	-26 %
kiveys	-15 %	-15 %	-15 %	-28 %	-27 %	-26 %
nurmikko	-41 %	-41 %	-42 %	-65 %	-63 %	-62 %

Taulukko 25. Pintarakenteiden vaikutus 300 mm laatan muodonmuutoksiin ($T_0=10^\circ\text{C}$)

300 mm laatta	Kutistuminen			Laajeneminen		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
asfaltti	-18 %	-18 %	-18 %	-22 %	-21 %	-21 %
kiveys	-13 %	-13 %	-13 %	-23 %	-22 %	-22 %
nurmikko	-38 %	-38 %	-39 %	-60 %	-58 %	-57 %

Taulukko 26. Pintarakenteiden vaikutus kokonaismuodonmuutoksiin

200 mm laatta	200 mm laatta			300 mm laatta		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
asfaltti	-24 %	-23 %	-23 %	-20 %	-19 %	-19 %
kiveys	-21 %	-21 %	-21 %	-17 %	-17 %	-17 %
nurmikko	-52 %	-52 %	-52 %	-47 %	-47 %	-47 %

Taulukosta 26 huomataan, että pintarakenteet pienentävät pihakannen laatan kokonaismuodonmuutoksia tehokkaasti. Nurmikkorakennetyypin 200 mm multakerros ja 70 mm XPS-eristelevy pudottavat pihakannen lämpöliikkeet puoleen verrattuna pintarakenteetomaan tapaukseen. Alkuoletuksesta poiketen edes asfalttipinta ei nostanut laatan huipukeskilämpötilaa, eikä siten kasvata pihakannen pituuden muutoksia. 70 mm asfalttikerroksen lämmönvastus on riittävän suuri, että se ei kasvata laatan keskilämpötilaa edes suuremman absorptiokertoimensa ansiosta. Asfalttikerroksen paksuus vaikuttaa tulokseen voimakkaasti, jolloin ohuempi kerros voi kasvattaa kantavan laatan keskilämpötilaa. Kiveys- ja asfalttipäällysteet hillitsivät pihakannen muodonmuutoksia testivuosi-simulaatiossa noin viidesosan verran.

Lisäksi taulukosta 26 ilmenee, että pintarakenteiden vaikutus kokonaismuodonmuutoksiin pienenee muutaman prosentin verran laattapaksuuden kasvaessa. Ero johtuu ohuemman laatan suuremmasta lämpöliikkeestä ilman pintarakenteita. Pintarakenteiden kanssa lämpöliikkeiden suuruudet olivat kuitenkin lähes samat molemmissa laattapaksuuksissa.

9.1.2 Ääriolosuhdesimulaatiot

Ääriolosuhdesimulaation tuloksien perusteella laskettiin eri pihakansirakenteiden kokeimia ääriämpöliikkeitä. Taulukossa 27 on esitelty pihakansien suurimmat tasonsuuntaiset lämpöliikkeet pituusmetriä kohden. Arvot on laskettu kaavaa 5.7 käyttäen ja niissä on käytetty betonin pituuden lämpötilakertoimen α arvoa $1 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$. Asennusaikaiseksi lämpötilaksi valittiin $T_0 = 10^\circ\text{C}$ kansallisen liitteen mukaisesti. Asennusaikaisen lämpöti-

lan muuttaminen vaikuttaa muodonmuutosten keskinäisiin suuruuksiin, mutta kokonaismuodonmuutoksen suuruuteen se ei vaikuta. Toisin sanoen asennusaikaisen lämpötilan kasvattaminen pienentää lämpölaajenemisen osuutta ja kasvattaa lämpökutistumisen osuutta ja sama toisinpäin, mikäli asennusaikaista lämpötilaa lasketaan.

Taulukko 27. Pihakansilaatan tason suuntaiset pituuden muodonmuutokset ääriolosuhteissa ($T_0=10^\circ\text{C}$)

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Lämpölaajeneminen [mm/m]	Lämpökutistuminen [mm/m]	Lämpölaajeneminen [mm/m]	Lämpökutistuminen [mm/m]
ilman pintarak.	0,31	-0,42	0,29	-0,41
asfaltti	0,25	-0,34	0,24	-0,34
kiveys	0,24	-0,36	0,23	-0,36
nurmikko	0,12	-0,22	0,12	-0,22

Muodonmuutosten perustella estetystä muodonmuutoksesta syntyvät jännitykset ja pakkovoimat laskettiin eri rakennetyyppien tapauksissa. Jännitykset ovat laskettu kaavalla 5.11 ja pakkovoimat kaavalla 5.12 olettaen pihakannta tukevat pystyrakenteet äärettömän jäykiksi. Esimerkkilaskuissa laattojen betoniluokan ajateltiin olevat C30/37, jolloin kimmokertoimena käytettiin arvoa $E_c = 33$ GPa. Tulokset ovat nähtävillä alla taulukoissa 28 ja 29.

Taulukko 28. Aksiaalinen jännitys (MPa) pihakannessa estetystä pituuden muodonmuutoksesta ($T_0=10^\circ\text{C}$)

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Laajeneminen	Kutistuminen	Laajeneminen	Kutistuminen
ilman pintarak.	-10,1	13,8	-9,4	13,5
asfaltti	-8,1	11,2	-8,0	11,3
kiveys	-7,9	12,0	-7,7	12,0
nurmikko	-3,8	7,3	-3,8	7,3

Taulukko 29. Aksiaalinen pakkovoima (kN/m) pihakannessa estetystä pituuden muodonmuutoksesta ($T_0=10^\circ\text{C}$)

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Laajeneminen	Kutistuminen	Laajeneminen	Kutistuminen
ilman pintarak.	-2017	2763	-2833	4058
asfaltti	-1629	2245	-2395	3386
kiveys	-1589	2402	-2311	3597
nurmikko	-761	1451	-1153	2197

Taulukoissa 29 ja 30 jännitykset ja pakkovoimat ovat määritetty oletuksilla, että betoni ei halkeile, lisäksi vetolujuuden ylittymistä ei ole huomioitu. Näillä oletuksilla jännitykset

nousevat suuriksi jäykästi tuetulla pihakannella ja on selvää, että pihakannen betoni ei kestä tulosten mukaisia vetojännityksiä halkeamatta. Pihakannen halkeilu ja pihakantta kantavien pystyrakenteiden myötääminen lieventävät pihakannella vallitsevaa jännitystä.

Tuloksista huomataan, että laatan paksuus ei vaikuta merkittävästi laatan tason suuntaisiin lämpöliikkeisiin. Estetystä muodonmuutoksesta syntyvät pakkovoimat ovat kuitenkin suoraan riippuvaisia laatan korkeudesta, joten niiden arvoon laatan paksuus vaikuttaa suuresti.

9.2 Pintojen lämpötilaerot

Pintojen lämpötilaero aiheuttaa vapaasti tuetussa laatussa käyritystä ja taipumaa. Laattaan syntyvän lämpötilajakauman muodolla on merkitystä, sillä taipumat tapahtuvat aina laatan lämpimämmän pinnan suuntaisesti ja estetyssä kaareutumisessa vetojännitykset syntyvät kylmemmälle pinnalle. Tyypillisesti kesällä laatan yläpinta on lämpimämpi kuin alapinta, jolloin laatan kaareutuminen tapahtuu pihakannen ulkopintaa kohden. Tätä kaareutumista hillitsee pihakannen päälliset rakenteet. Tilanne on toinen talvella, jolloin pihakannen alapinta saattaa olla ulkopintaa huomattavasti lämpimämpi. Tällöin pihakansi kaareutuu lämpötilaerosta hallin sisätilan suuntaan ja lisää jo valmiiksi kuormituksesta aiheutuvaa taipumaa.

9.2.1 Testivuosisimulaatiot

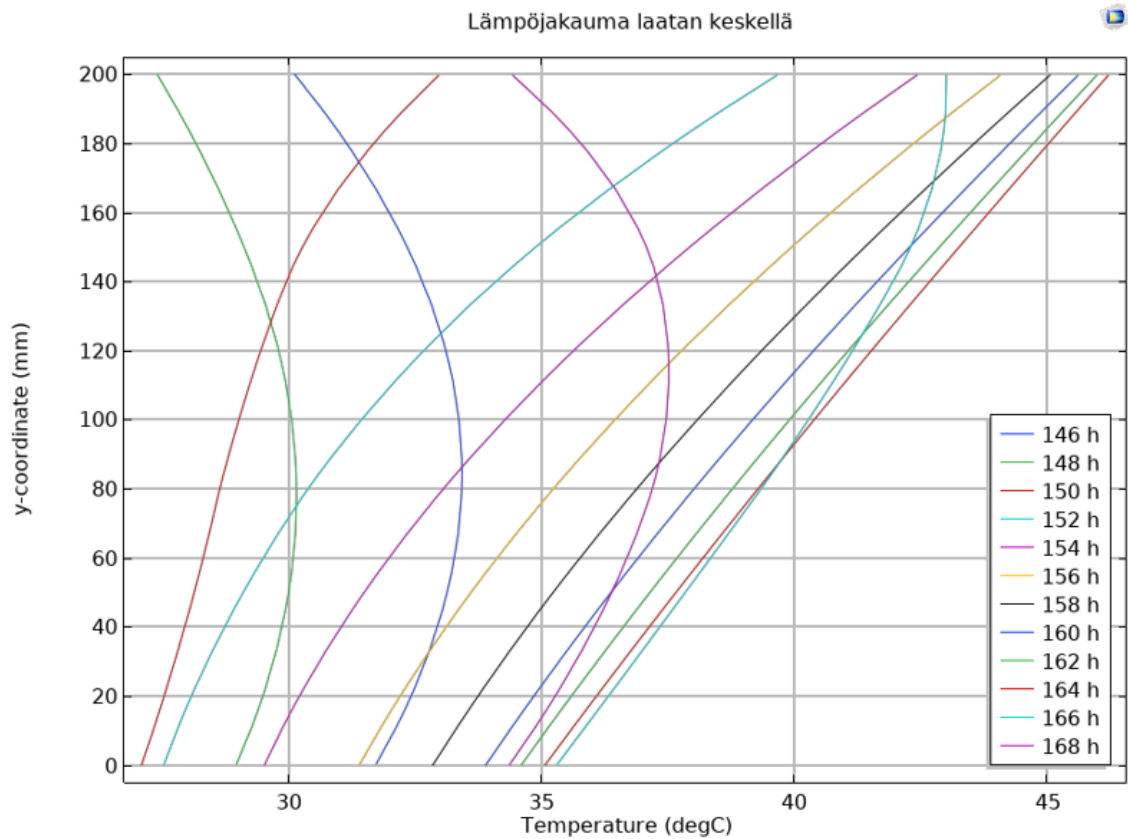
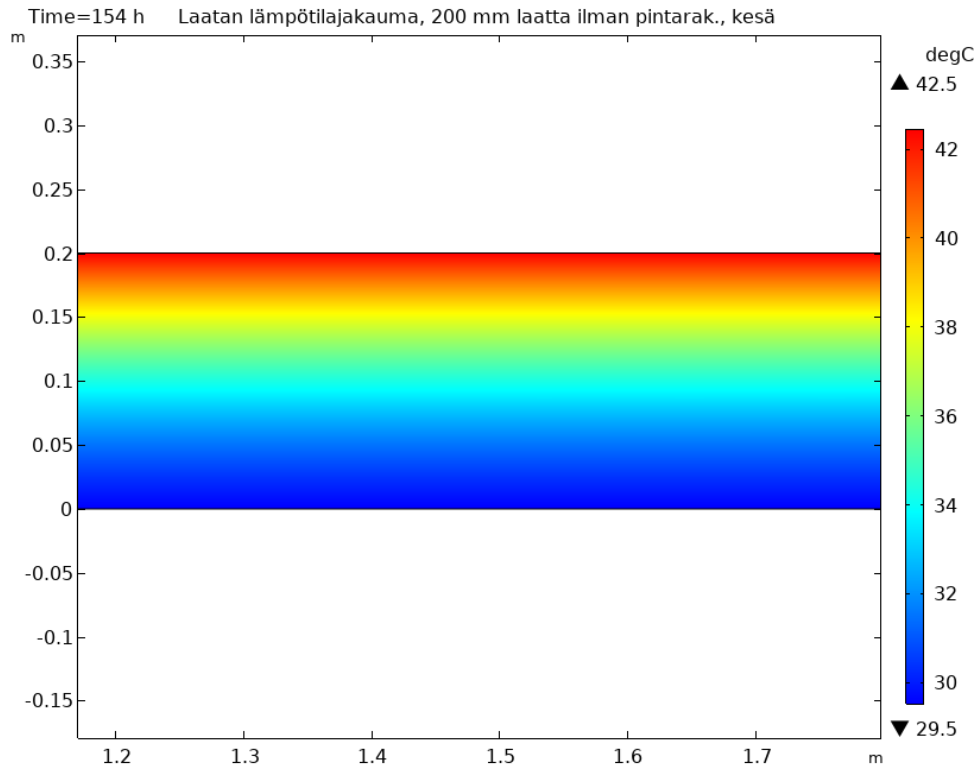
Taulukon 16 tuloksista nähdään, että ilmaston lämpeneminen ei vaikuttanut merkittävästi syntyviin lämpötilaeroihin. Testivuosisien suurimmat lämpötilaerot mitattiin kaikki kesällä, jolloin pihakannen ulkopinta oli sisäpintaa lämpimämpi. Pintojen lämpötilaerot pienenevät kaikissa päällystetyissä rakenteissa verrattuna paljaaseen betonilaattaan. Asfaltti- ja kiveyspäällyste pudottivat laatan lämpötilaeron noin puoleen ja nurmikkorakenne pudotti lämpötilaeron lähes olemattomaksi. Pintarakenteet toimivat siis tehokkaasti pintojen lämpötilaerosta johtuvien pakkomomenttien ja pihakannen taipumien hillitsijänä.

Paljaan laatan tapaus sai suuremman lämpötilaeron testivuosisimulaatiossa kuin ääriolosuhdesimulaatiossa. Tämä kertoo, että pintojen lämpötilaerojen kasvu ei välttämättä vaadi ääriolosuhteita vaan suuri lämpötilaero voidaan saavuttaa nopeilla lämpötilan muutoksilla tavallisissakin olosuhteissa. Tämä tekee mitoittavien lämpötilaerojen määrittämisestä hankalaa. Muilla rakennetyypeillä suurimmat pintojen väliset lämpötilaerot saavutettiin ääriolosuhdesimulaatioissa.

9.2.2 Ääriolosuhdesimulaatiot

Alkuoletusten mukaisesti, talvisimulaatiossa tunnitaiset lämpöjakaumat asettuivat muuttumattomiksi ja lineaarisiksi jo ensimmäisten vuorokausien jälkeen. Tämä johtuu vakioarvoisista sisä- ja ulkolämpötiloista, jolloin ainoaksi olosuhteita muuttavaksi tekijäksi jäi suuruudeltaan merkityksetön lyhytaaltainen lämpösäteily laatan yläpintaan ja taivaan vastasäteily. Taivaan vastasäteily viilentävän vaikutuksen huomioiminen laski eri laattarakenteiden keskilämpöä noin 0,4–4 celsiusastetta, mutta se ei muuttanut lämpöjakaumia epälineaariseksi. Talvisimulaatioiden tilanne vastasi siis lähes stationääritilannetta, jossa olosuhteet eivät muutu ajansuhteen.

Kesäsimulaatiossa tilanne oli toinen. Ulkolämpötila vaihteli vuorokauden aikana ja päivisin aurinko lämmitti voimakkaasti pihakannen yläpintaa. Tarkastellaan seuraavaksi kesäsimulaatiossa laattaan viimeisen vuorokauden aikana syntyneitä lämpöjakaumia. Kuvassa 54 on esitelty 200 mm paksun pintarakenteettoman pihakansilaatan lämpötilajakaumia ääriolosuhdesimulaatioiden viimeisiltä vuorokausilta. Pintarakenteeton laskentamalli on ainoa, jonka lämpöjakauma on aavistuksen epälineaarinen siinä vaiheessa, kun saavutetaan suurin mahdollinen pintojen välinen lämpötilaero ($t=154$ h). Epälineaarisuus ei kuitenkaan ole pintarakenteettomassakaan laskentamallissa merkitsevä, joten simulaatiotulosten perusteella epälineaarisuuden huomioimisella ei saavuteta hyötyä pihakansirakenteilla. Muilla rakennetyypeillä lämpöjakaumat olivat jo täysin lineaarisia, kun suurin lämpötilaero saavutettiin pintojen välille. Betonilaattojen lämpötilajakaumat voidaan siis olettaa lineaarisiksi kaikissa laskelmissa. Pintarakenteellisten rakennetyyppien ääriolosuhdesimulaation viimeisen vuorokauden lämpötilajakaumat ovat nähtävissä liitteessä 6. Esitetyt lämpöjakaumat vastaavat 300 mm laatoilla saatuja lämpöjakaumia eikä niitä esitellä erikseen.



Kuva 54. 200 mm paksun pintarakenteettoman pihakansilaatan lämpökartta kesällä, kun pintojen lämpötilaero on suurimmillaan sekä lämpötilajakaumat ääriolosuhdesimulaation viimeiseltä vuorokaudelta 2 h välein

Ääriolosuhdesimulaatioiden pintojen lämpötilaerojen perusteella laskettiin pihakanteen pintojen lämpötilaerosta syntyvä laatan käyritymän arvot. Arvot ovat laskettu kaavalla 5.14. Tulokset ovat esiteltynä alla taulukossa 30. Miinusmerkkisillä arvoilla laatan taipuma on alaspäin.

Taulukko 30. *Laatan käyritymä pintojen lämpötilaerosta ($\times 10^{-4}$ 1/m)*

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
ilman pintarak.	6,46	-5,48	5,32	-4,68
asfaltti	4,13	-3,51	3,70	-3,16
kiveys	3,98	-4,11	3,53	-3,64
nurmikko	0,41	-0,50	0,39	-0,49

Laatan käyritymän arvolla voidaan laskea yksiaukkoisen vapaasti tuetun laatan taipumia kaavalla 5.17. Esimerkiksi 200 mm paksun pintarakenteettoman laatan käyritymä pintojen lämpötilaeroista talvella aiheuttaisi 7,5 metrin jännevälillä laattaan noin 3,9 mm ja 9 metrin jännevälillä noin 5,5 mm taipuman alaspäin. 300 mm laatan vastaavat arvot ovat noin 3,3 mm ja 4,7 mm. 300 mm laatan suurempi korkeus siis pienentää syntyvää taipumaa, vaikka lämpötilaero pintojen välillä onkin suurempi 300 mm kuin 200 mm laalla.

Laattaan syntyvien pakkomomenttien arvot estetystä käyritymästä laskettiin kaavalla 5.23. Laskuissa betonin kimmokertoimena käytettiin arvoa $E_c = 33$ GPa ja neliömomentti laskettiin kaavalla 5.24, jossa leveytenä käytettiin arvoa 1 m. Tulokset ovat esitetty alla olevassa taulukossa 31.

Taulukko 31. *Laattaan syntyvä vakiopakkomomentti (kNm/m) ääriolosuhdesimulaatioiden perusteella estetystä kiertymästä*

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
ilman pintarak.	14,2	-12,1	39,5	-34,7
asfaltti	9,1	-7,7	27,5	-23,5
kiveys	8,8	-9,0	26,2	-27,0
nurmikko	0,9	-1,1	2,9	-3,6

Taulukko 32. *Laatan huippujännitykset (MPa) pintojen tasolla estetystä käyritymästä*

	200 mm laatta		300 mm laatta	
	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
ilman pintarak.	$\pm 2,1$	$\pm 1,8$	$\pm 5,9$	$\pm 5,2$
asfaltti	$\pm 1,4$	$\pm 1,2$	$\pm 4,1$	$\pm 3,5$
kiveys	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 3,9$	$\pm 4,1$
nurmikko	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$

Määritetyt pakkomomentit eivät ylitä halkeilukestävyyttä M_{cr} , joka voidaan laskea kaavalla 5.32, vaikka osassa 300 mm laatan rakennetyypeissä jännitystasot ylittävätkin betoniluokka C30/37:n vetolujuuden arvon 2,9 MPa. Kaavalla 5.32 laskettuna 200 mm laatan halkeilukestävyyden taivutusmomentille on 23,2 kN/m ja 300 mm laatalle 52,2 kN/m. Syntyvät vakiopakkomomentit aiheuttavat kuitenkin suuren jännityslisän jo valmiiksi voimakkaasti kuormitettuihin pihakansiin. Kun muita kuormia ei huomioida, lämpökäyrityksen estymisestä syntyvä vakiomomentti aiheuttaa aina laatan lämpimämmälle pinnalle puristusjännityksiä ja kylmälle pinnalle vetojännityksiä rakenteesta riippumatta, joten taulukon 32 jännityksistä vetojännitykset vaikuttavat laatan alapinnassa kesällä ja yläpinnassa talvella.

Ääriolosuhdesimulaation olosuhteet luotiin niin, että pihakansien laattoihin muodostuisi mahdollisimman suuret ja pienet keskilämpötilat. Ääriolosuhdesimulaatio ei siis välttämättä tarjoa suurinta mahdollista pintojen välistä lämpötilaeroa, joten saadut tulokset ovat niiden osalta vain suuntaa antavia. Ääriolosuhdesimulaatiotuloksista määritetyt pintojen lämpötilaerot olivat silti pääsääntöisesti suurempia, kuin standardin EN 1991-1-5 ohjeiden mukaan lasketut pintojen lämpötilaerot.

9.3 Pihakansien kokonaismuodonmuutokset

Lämpötilavaihteluiden lisäksi pihakansilla tason suuntaisia muodonmuutoksia aiheutuu kutistumasta, kimmoisasta kokoonpuristumasta ja virumasta. Nämä yhdessä muodostavat pihakannen kokonaismuodonmuutokset. Arvioidaan seuraavaksi erilaisten pihakansirakenteiden kokonaismuodonmuutoksia lisäämällä taulukon 27 ääriolosuhdemuodonmuutoksiin muut muodonmuutokset rakennetyypeittäin. Laskennassa käytetään tyypillisiä arvoja, jotka voivat vaihdella tapauskohtaisista arvoista.

Paikalla valetun holvin tyypillinen kutistuma maan alaisissa lämmittämättömissä tiloissa (RH 70 %) 0,4 mm/m. Jos betonirakenteeseen vaikuttaa puristusvoima esimerkiksi maanpaineesta tai jännitysvoimasta, se viruu. Tyypillinen viruman suuruusluokka jännitetyillä rakenteilla on noin 0,05–0,1 mm/m (1 MPa puristusjännitys). Kimmoisa kokoonpuristuman suuruus jännitetyissä rakenteissa on tyypillisesti noin 0,03 mm/m (1 MPa puristusjännitys). [27]

Kuorilaattaholvin pintabetonin kutistuman ajateltiin tapahtuvan 50 % vapaasti. Jälkijännitetyn holvin kokonaismuodonmuutoksissa huomioitiin viruma (0,1 mm/m) ja kimmainen muodonmuutos. Lämpömuodonmuutoksista huomioitiin taulukon 26 lämpökutistumisen arvot. Lasketut pihakannen kokonaismuodonmuutokset eri pintarakenteille ja rakennetyypeille on esitetty alla taulukossa 33.

Taulukko 33. *Pihakansien kokonaismuodonmuutokset rakenne- ja pintarakennetyypeittäin*

	kuorilaatta holvi [mm/m]	paikallavaluholvi [mm/m]	jälkijännitetty holvi [mm/m]
ilman pintarak.	0,62	0,82	0,95
asfaltti	0,54	0,74	0,87
kiveys	0,56	0,76	0,89
nurmikko	0,42	0,62	0,75

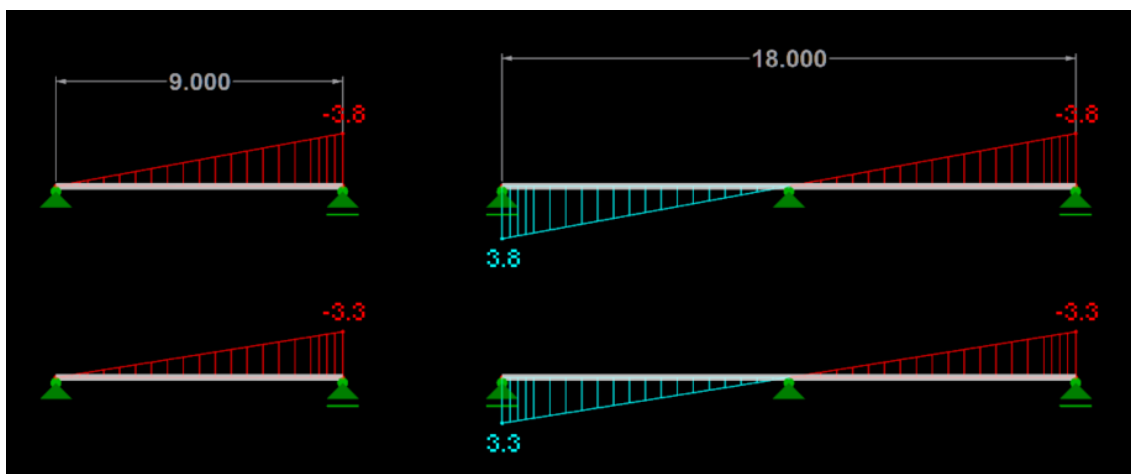
Taulukon 33 ilman pintarakenteita rivi vastaa suuruusluokaltaan hyvin Naulankanta Oy:n esittämiä ulkoilmassa olevan betoniholvin kokonaismuodonmuutoksia taulukossa 11. Nyt muodostetussa taulukossa on huomioitu paljaan betonirakenteen lisäksi eri pintarakenteiden muodonmuutoksia hillitsevä vaikutus.

9.4 Simulaatiotulosten vertailua standardin EN 1991-1-5 ohjeiden mukaan laskettuihin tuloksiin RFEM-ohjelmalla

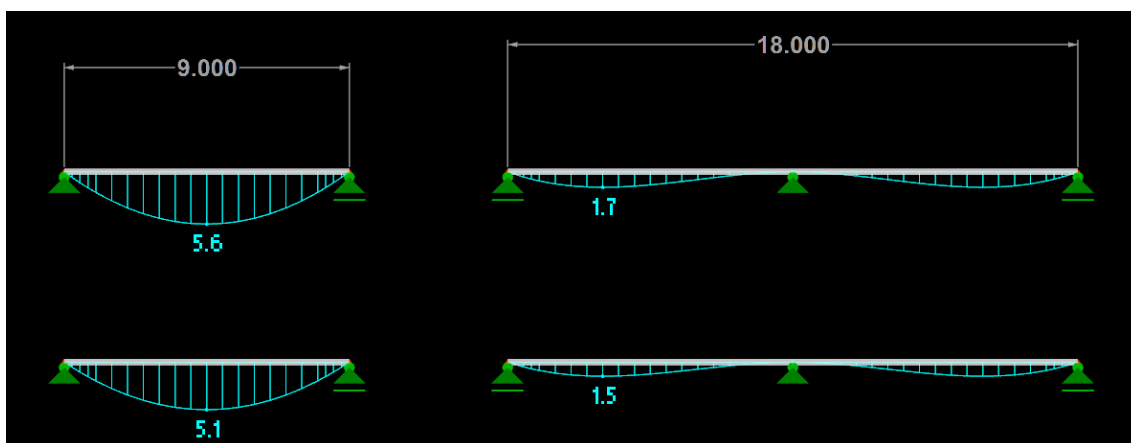
Työn lopuksi simulaatiotuloksia ja standardin EN 1991-1-5 ohjeilla saatuja tuloksia tutkittiin RFEM-nimisellä FEM-ohjelmalla. Ohjelmaan luotiin laskentamalleja, jotka koostuivat 200 mm paksuista ja metrin leveistä eri pituisista ja eri tapaan tuetuista palkeista. Laskentamallit ovat yksi- ja kaksiaukkoisia. Kaksiaukkoisessa laskentamallissa palkki on jatkuva keskituen yli. Palkkien betoniluokka on C30/37. Työssä tutkitaan lämpökuormien aiheuttamia muodonmuutoksia ja rasituksia, joten laskentamalleissa ei ole huomioitu laattojen omaa painoa.

Kuvissa 55–60 kaksi päällimmäistä laskentamallia altistettiin talven ääriolosuhdesimulaatioissa 200 mm paksun pintarakenteettoman laatan tuloksille (taulukot 17 ja 18) ja alemmat kaksi saman rakenteen standardin EN 1991-1-5 mukaisesti käsinlasketuille tuloksille (taulukko 19). Asennus tai valun aikaisen lämpötilan ollessa 10 °C keskilämpötilan muutos ylemmissä laskentamalleissa on -41,9 °C ja pintojen välinen lämpötila -11 °C. Alemmissä laskentamalleissa keskilämpötilan muutos on -36,4 °C ja pintalämpötilojen ero -10 °C. Kuvista voidaan havainnoida työssä määritettyjen ja standardin mukaisen tulosten eroja rakenteen muodonmuutoksissa ja rasituksissa.

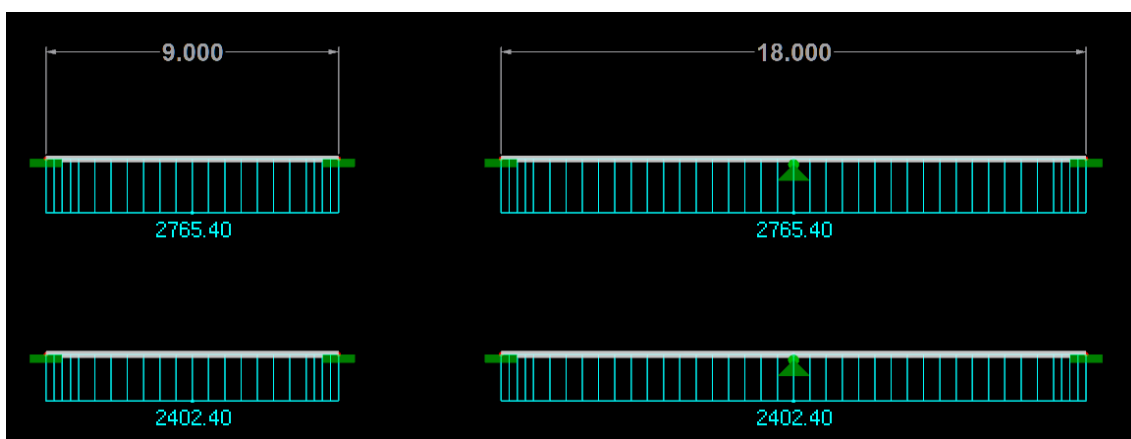
Kuvista 56 ja 58 huomataan kuinka vapaasti tuettujen kaksiaukkoisten laskentamallien keskituki rajoittaa syntyviä taipumia ja samalla palkkiin kohdistuu leikkaus- ja taivutusrasituksia. Jäykästi kiinnitetyissä laskentamalleissa ei synny lainkaan muodonmuutoksia.



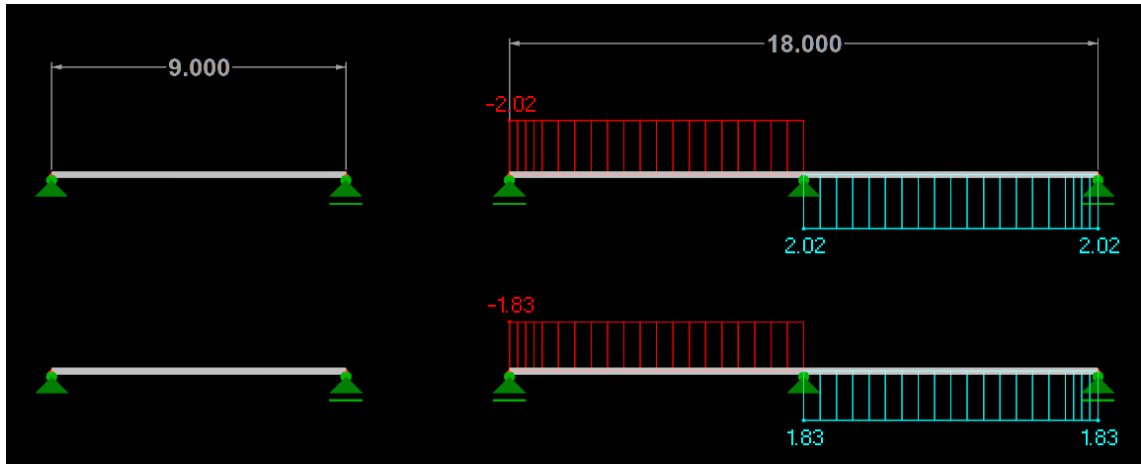
Kuva 55. Vapaasti tuettujen laskentamallien tason suuntaiset muodonmuutokset (mm)



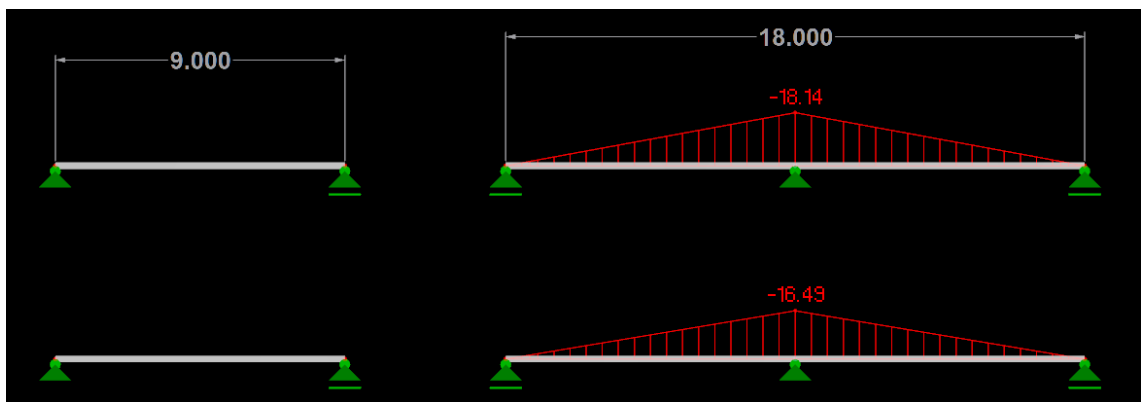
Kuva 56. Vapaasti tuettujen laskentamallien taipumat (mm)



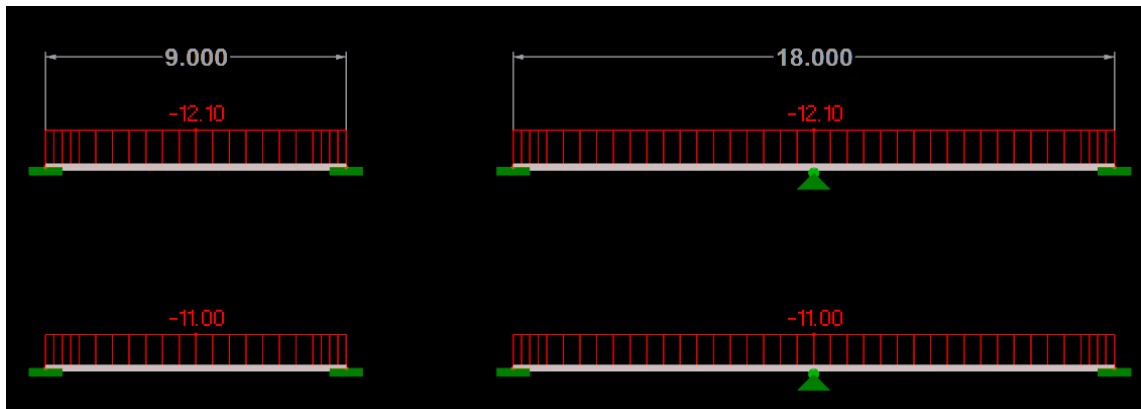
Kuva 57. Jäykästi tuettujen laskentamallien aksiaaliset normaalivoimat (kN)



Kuva 58. Vapaasti tuettujen laskentamallien leikkausvoimat (kN)



Kuva 59. Vapaasti tuettujen laskentamallien taivutusmomentit (kNm)



Kuva 60. Jäykästi tuettujen laskentamallien taivutusmomentit (kNm)

10. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

10.1 Keskeiset tutkimustulokset

Jotta betonirakenteiden lämpöliikkeitä ja pakkovoimia voidaan huomioida suunnittelussa, tulee rakenteeseen kohdistuvat lämpökuormat määrittää ja selvittää niiden vaikutus betonirakenteen sisäiseen lämpötilajakaumaan. Tässä työssä suoritettiin suuri määrä simulaatioita, joilla selvitettiin pihakansiin syntyviä lämpöjakaumia ulkoilman lämpötilasta, auringon säteilystä ja taivaan vastasäteilystä. Työssä saaduilla tuloksilla voidaan pihakansien lämpöliikkeiden ja -rasitusten suunnittelussa ottaa huomioon pintarakenteiden vaikutus.

Tutkimuksen tärkeimmät tulokset ovat pihakansiin ääriolosuhteissa syntyvät tason suuntaiset muodonmuutokset, jotka ovat esitetty taulukossa 30. Tutkimuksen mukaan kylmien pihakansien pintarakenteilla oli merkittävä lämpöliikkeitä pienentävä vaikutus sekä tason suunnassa, että taipumissa. Näin pintarakenteet pienentävät myös estetyistä liikkeistä syntyviä pihakanteen ja kantaviin rakenteisiin kohdistuvia rasituksia.

Simulaatioiden avulla määritettiin myös pintojen välille syntyviä ääriämpötilaeroja lämpöjakaumien perusteella. Lämpöjakaumia voidaan pitää lineaarisina. Siitä ei oli kuitenkaan varmuutta, että lämpötilaerot olisivat suurimmat mahdolliset, jotka voi maanalaisen pysäköintihallin pihakanteen syntyä. Määritetyt pintalämpötilaerot olivat kuitenkin pääosin suurempia kuin standardin EN 1991-1-5 ohjeiden mukaan laskettuna. Simulaatiotuloksista huomattiin myös, että pintojen välille syntyvät suuret lämpötilaerot eivät vaadi syntyäkseen ääriolosuhteita.

Simulaatioiden avulla määritettyjä lämpöjakaumia verrattiin laskettuihin lämpöjakaumiin ja tulosten perusteella standardin EN 1991-1-5 ohje lämpöprofiilien laskennasta rakennuksille antaa liian pieniä keskilämpötilan arvoja talviolosuhteissa, mikäli taivaan vastasäteilyn viilentävää vaikutusta ei huomioida. Tällöin standardilla määritetyt lämpöliikkeet jäävät talvella noin 0,055 mm/m liian pieniksi. Simulaatiotulosten ja standardin mukaan laskettujen tulosten eroista johtuvia vaikutuksia laatan kokemiin muodonmuutoksiin ja rasitukseen on havainnollistettu kappaleessa 9.4. Standardin mukaan lasketut kesän suurimmat keskilämpötilat olivat varmalla puolella simulaatiotuloksiin nähden.

Ääriolosuhdesimulaatioiden perusteella lämpöjakauman epälineaarisuuden huomioiminen ei tuo lisäarvoa pihakannen kaltaisissa ohuissa laatoissa, sillä lämpötilaeron pintojen välillä ollessa suurimmillaan oli lämpöjakauman muoto jo kokonaan tai lähes lineaarinen.

Tällöin myöskään kappaleessa 5.1.2 esitettyä standardin EN 1991-1-5 siltojen epälineaarisen lämpötilaprofiilin määrittämenetelmää ei voida käyttää maanalaisten pysäköintihallien pihakansien yhteydessä. Tilanne voi olla toinen ulkoilmaan avoimilla pihakansilla, joissa hallin sisälämpötila vastaa ulkolämpötilaa.

Testivuosisimulaatioiden mukaan ilmastonmuutoksella, ääri-ilmiöt pois lukien, ei ole suuria vaikutuksia pihakansien liikkeisiin, liikkeet jopa keskimäärin pienenevät lämpötilojen ääripäiden tullessa lähemmäksi toisiaan.

Laattapaksuus vaikutti vain vähän laattaan syntyvän keskilämpötilan arvoon, joten laattojen tasonsuuntaisen lämpöliikkeet olivat lähes samoja. Estetystä muodonmuutoksesta seurannut pakkovoima oli kuitenkin luonnollisesti suurempi paksummalla laatalle. Laattapaksuus vaikutti myös pintojen väliseen lämpötilaeroon siten, että paksumman laatan lämpötilaero oli suurempi. Vapaasti tuetulla laatalle paksumman laatan taipuma jäi kuitenkin pienemmäksi, sillä laattaan syntyvä taipuma riippuu rakenteen korkeudesta. Esitettyä paksumman laatan käyritystä aiheutti silti suuremman pakkomomentin johtuen laatan suuremmasta taiputusjäykkydestä.

Keskilämpötilan muutoksista johtuvat laatan tason suuntaiset muodonmuutokset aiheuttavat suuria pakkovoimia jo varsin pienillä lämpötilaeroilla. Lisäksi laatoilla on suuri aksiaalinen jäykkyys, joka pakottaa pystyrakenteita taipumaan muodonmuutoksista, jolloin pystyrakenteet kokevat suuria rasituksia. Tästä syystä on suositeltavaa suunnitella pihakannen liikkeiden tapahtuminen mahdollisimman vapaasti irrottamalla pihakansi pystyrakenteista reunoilla ja sijoittamalla jäykistävät rakenteet pihakannen keskialueelle.

Rakennusosan asennusaikaisella lämpötilalla on suuri vaikutus syntyviin muodonmuutoksiin ja parasta olisi, jos asennus tapahtuisi keskellä rakenteen kokemia lämpövaihtelua eli noin 5–10 °C. Tällöin lämpöliikkeet ovat yhtä suuret molempiin suuntiin.

Pihakansien kokonaismuodonmuutosten arviointiin voidaan käyttää taulukon 33 tuloksia, joka huomioi pihakannen pintarakenteet. Arvioinnissa tulee kuitenkin muistaa, että pintarakenteiden paksuudet vaikuttavat suuresti pihakansilaatan lämpöliikkeisiin. Tarkemmissa suunnitelmissa tulee viruman, kimmoisan kokoonpuristuman ja kutistuman arvot määrittää rakennekohtaisesti kappaleessa 3 esitetyillä menetelmillä.

10.2 Tutkimustulosten arviointi

Simuloinnin onnistumisen kannalta tärkein asia on oikeat lähtötiedot. Simulaatioissa käytettävien materiaaliominaisuuksien arvojen valinnassa oli haasteita, sillä osassa materiaaliominaisuuksien arvoissa oli iso skaala, josta arvot tuli valita. Materiaaliominaisuuksien

sien arvoihin vaikuttaa esimerkiksi materiaalin kosteus ja tiheys, jopa lämpötila. Simulointitulosten varmuutta tutkittiin kuitenkin herkkyyksianalyseillä, joiden perusteella laskentamallit eivät olleet erityisen herkkiä materiaaliominaisuuksien muutoksille ja siten simulaatiotuloksia voidaan pitää pätevinä. Myös pysäköintihallin sisälämpötilat vaikuttavat merkittävästi simulaatiotuloksiin. Maanalaisen pysäköintihallin sisälämpötiloille ei ollut tarjolla vastaavaa dataa kuin ulkolämpötiloista, joten ne jouduttiin määrittämään tutkimuksessa itse.

Tämän työn pakkovoimien ja -jännitysten laskennassa tuet oletettiin äärettömän jäykiksi ja laatan halkeilua ei huomioitu. Näin lasketut pakkovoimat ovat mitoituksen kannalta varmallalla puolella, mutta samalla ne nousevat herkästi suhteettoman suuriksi.

10.3 Jatkotutkimusaiheet

Jatkotutkimuksissa voitaisiin hyödyntää tässä työssä määritettyjä pihakansien lämpöliikkeitä ja tutkia pihakansiin ja niitä tukeviin pystyrakenteisiin syntyviä pakkovoimia pystyrakenteiden jäykkyys ja pihakansien halkeilu huomioiden. Tutkimuksessa voitaisiin tutkia myös, kuinka jännitetyn laatan lämpötilaero vaikuttaa sen taipumiin ja halkeiluun.

Lämpökuormat aiheuttavat estetyssä rakenteessa suuria pakkovoimia ja jännityksiä, silti Vecchion tutkimusten mukaan lämpökuormilla ei ollut merkittävää vaikutusta laatan murtokestävyysasteeseen. Jatkotutkimuksissa voitaisiin paneutua tarkemmin lämpökuormien rooliin murtorajatilatarkasteluissa.

Jatkotutkimuksissa voitaisiin tutkia, kuinka energialaskennan testivuosiin datasta saataisiin lämpöliikkeiden kannalta mitoittavat olosuhteet, myös pintojen välinen lämpötilaero huomioiden. Vaihtoehtoisesti jatkotutkimuksissa voitaisiin miettiä mitkä olisivat ehdot, joiden perusteella energialaskennan testivuosiin saaduista tuloksista voitaisiin johdattaa mitoittusehdot.

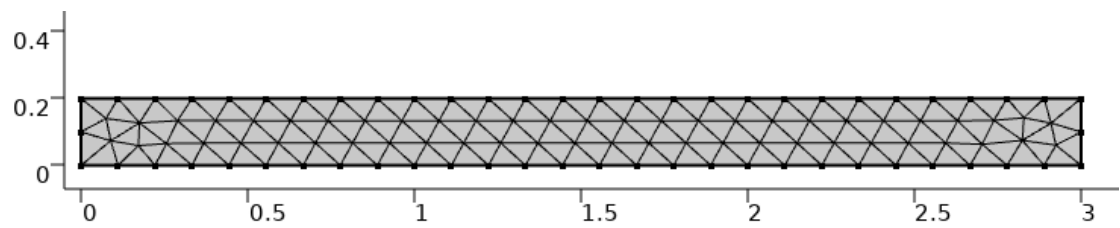
LÄHTEET

- [1] RT 98-11237, Pysäköintilaitokset, Rakennustietosäätiö, 2016, 16 s.
- [2] RT 98-11235, Pysäköintialueet, Rakennustietosäätiö, 2016, 12 s.
- [3] RT 82-10821, Betonielementtirunkorakenteet, Rakennustietosäätiö, 2004, 20 s.
- [4] RT 82-10814, Paikallavaletut betonirunkorakenteet, Rakennustietosäätiö, 2004, 15 s.
- [5] RT 103277, Liikennöidyn tason vedeneristykset, Rakennustietosäätiö, 2020, 21 s.
- [6] RIL 255-1-2014, Rakennusfysiikka 1. Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL, 2014, 500 s.
- [7] SFS-EN 1991-1-5 + AC, Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. osa 1–5: Yleiset kuormat. Lämpötilakuormat, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2004, 69 s.
- [8] SFS NA EN 1991 Suomen kansallinen liite, 2019, 51 s.
- [9] C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Lämmöneristys, Ohjeet 2012, Ympäristöministeriö, 2012, luonnos, 47 s.
- [10] J. Rajamäki, Jälkijännitetyt pihakansirakenteet, 2019, Diplomityö, 83 s.
- [11] BY 201, Betonitekniikan oppikirja, Suomen betoniyhdistys, 2018, 568 s.
- [12] J. Vinha, RAK-33501 Rakennusfysiikka, 2019, Tampereen yliopisto, luentomateriaali
- [13] P. Huttunen, Lämmönjohtumisen mallintaminen Comsol Multiphysics -ohjelmalla, Tampereen yliopisto, 2017, RAK-33501 Rakennusfysiikka kurssimateriaali, 51 s.
- [14] K. Jylhä et al., Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten, Raportti, Ilmatieteen laitos, 2020, 82 s.
- [15] Rakennusenergian testivuosien säätiedot: tiedostojen rakenne ja tarkastelua niiden käytön kannalta, Ilmatieteen laitos, 2020, 3 s.
- [16] SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2015, 219 s.
- [17] U. Kytölä, A. Laaksonen, RAK-33210 Jännitetyt betonirakenteet, 2020, Tampereen yliopisto, Luentomateriaali
- [18] M. Leskelä, BY 210, Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus, Suomen betoniyhdistys, 2008, s. 711

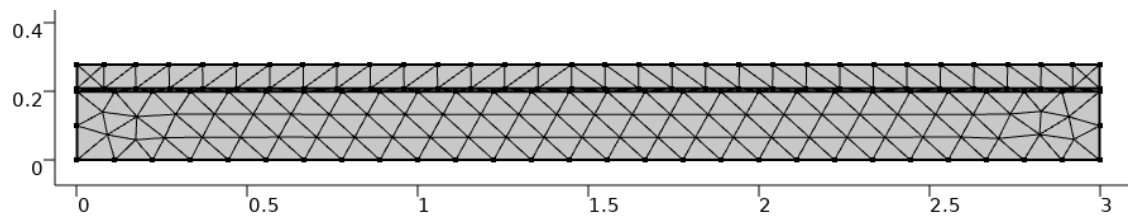
- [19] WUFI materials, WUFI2D 4.3, materiaalipankki ohjelmassa
- [20] Parman kuorilaatatot, Parma Oy, suunnitteluohje, 2012, 16 s. saatavissa (viitattu 20.9.21): https://parma.fi/userassets/uploads/documents/2018/06/parma_kuorilaataston_suunnitteluohje_2016.pdf
- [21] A.S. Usmani, J.M. Rotter, S. Lamont, A.M. Sanad, M. Gillie, Fundamental principles of structural behavior under thermal effects, Fire Safety Journal, vol.36, 2001, s. 721-744
- [22] SFS-EN 1992-3, Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 3: Nestesäiliöt ja siilot, Suomen standardisoimisliitto SFS, 2006, 23 s.
- [23] BY 211, Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1, Suomen betoniyhdistys, 2013, 251 s.
- [24] F.J. Vecchio, N. Agostino, B. Angelakos, Reinforced concrete slabs subjected to thermal loads, Canadian journal of civil engineering, vol.20, 1993, s. 741–753.
- [25] R.F. Barron, B.R. Barron, Design for Thermal Stresses, John Wiley & Sons, 2011, 510 s.
- [26] F. J. Vecchio, J.A. Sato, Thermal Gradient Effects in Reinforced Concrete Frame Structures, ACI Structural Journal, Title No. 87-S27, American Concrete Institute, 1990, 14 s. Saatavissa (viitattu 20.8.2021): http://vectoranalysisgroup.com/journal_publications/jp10.pdf
- [27] Laakerien valintaohje, Naulankanta, 2017, 5 s. Saatavissa (viitattu 30.8.2021): <https://www.naulankanta.fi/files/laakerien-valintaohje-1.pdf>
- [28] C. Larsson, G. Svensson, Realistic Modeling of Thermal Effects in Concrete Bridges, Lundin yliopisto, 2013, Väitöskirja, 68+28 s. Saatavissa (viitattu 1.9.2021): <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=4461221&fileId=4461241>
- [29] F. J. Vecchio, Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames Subjected to Thermal and Mechanical Loads, ACI Structural Journal, Title No. 84-S51, American Concrete Institute, 1987, 492-501 s.
- [30] A. Leminen, Lämpökuormien ja betonin kutistumisen aiheuttamien rasitusten laskenta fem-ohjelmalla ja niiden vaikutus betonisen allasrakenteen mitoittamiseen, 2014, Diplomityö, 85+58 s.
- [31] Risto Karjalainen, ohjaustilaisuudet syksy 2021, osastopäällikkö, Sweco Rakennetekniikka Oy, asiantuntijahaastattelu
- [32] P. Kankaanpää, Jälkijännitetyn betonipalkin pilariliitoksen toiminta pysäköintirakennuksissa, 2020, Diplomityö, 85+26 s.
- [33] Betoninormikortisto 23_EC: Liitosten suunnittelu ja mitoitus onnettomuuskuormille standardin SFS-EN 1991-1-7 yleiset kuormat, onnettomuuskuormat mukaan, Suomen betoniyhdistys, 2012, 59 s. Saatavissa (viitattu 27.1.2022): http://www.betoniyhdistys.fi/media/normikortit/normikortti_23ec.pdf

LIITE 1: LASKENTAMALLIT

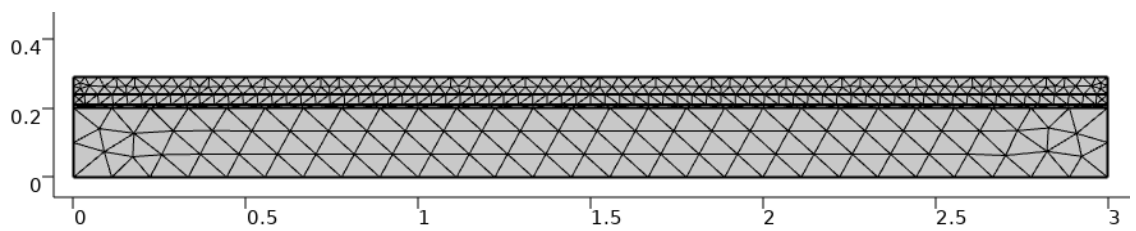
200 mm laatta



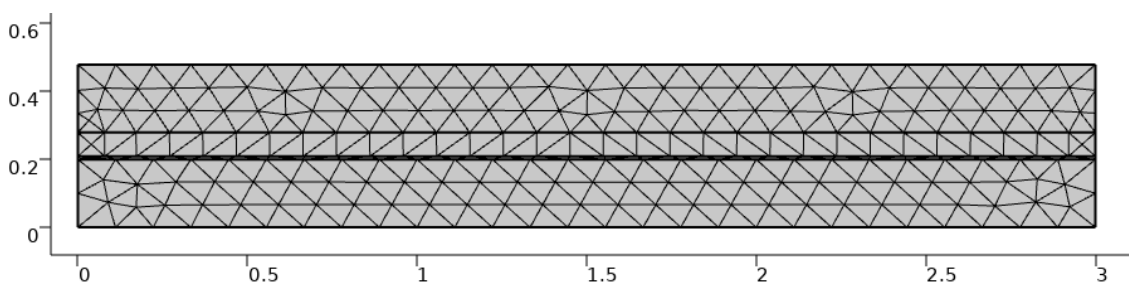
200 mm laatta, asfaltti



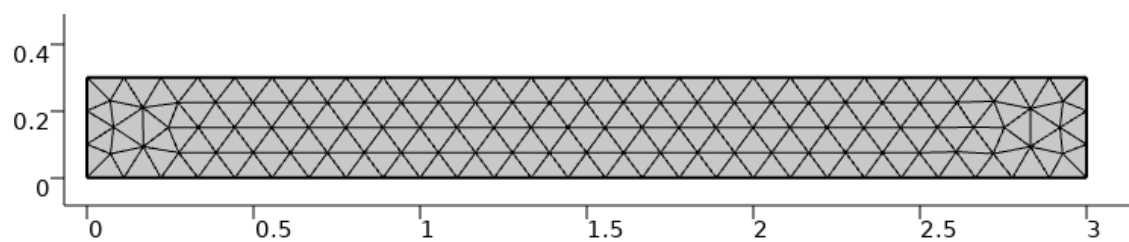
200 mm laatta, kiveys



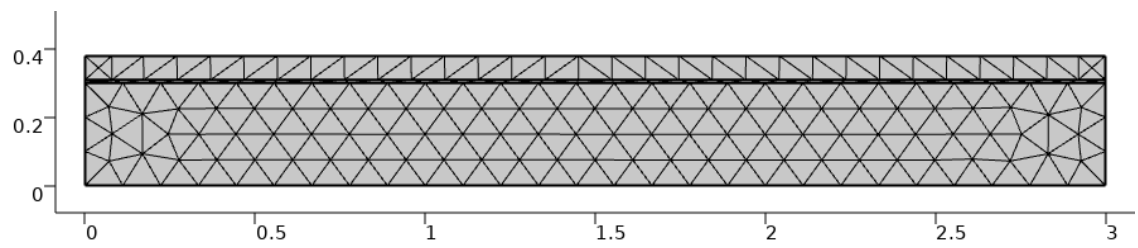
200 mm laatta, nurmikko



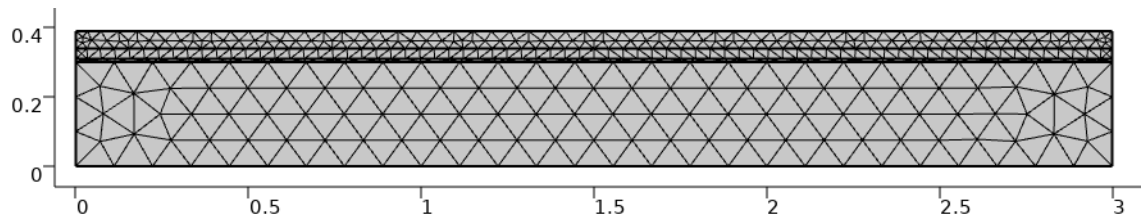
300 mm laatta



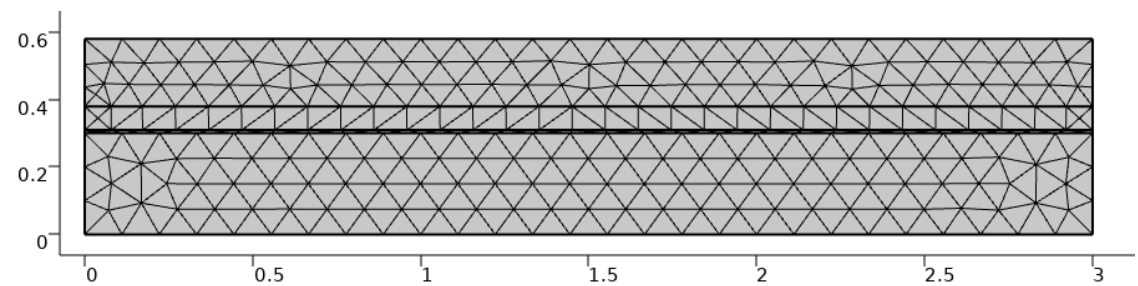
300 mm laatta, asfaltti



300 mm laatta, kiveys

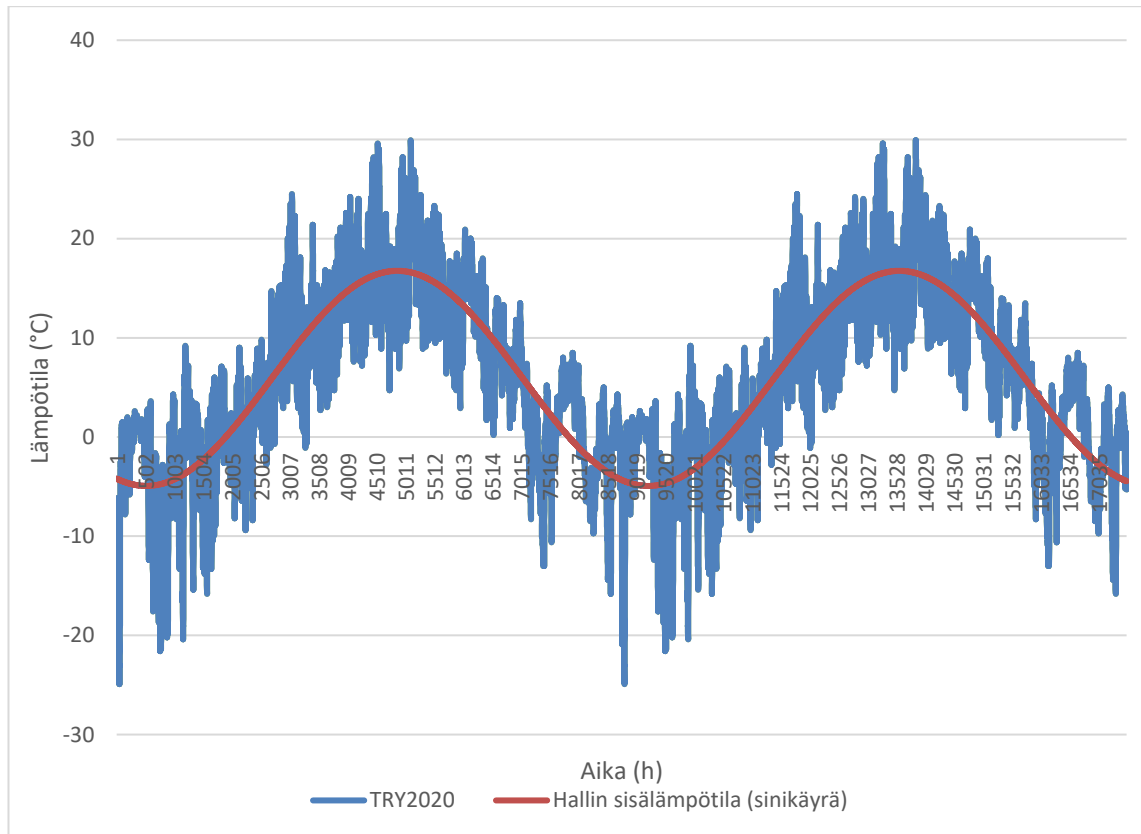


300 mm laatta, nurmikko



LIITE 2: HALLIN SISÄLÄMPÖTILAT TESTIVUOSISIMULAATIOISSA

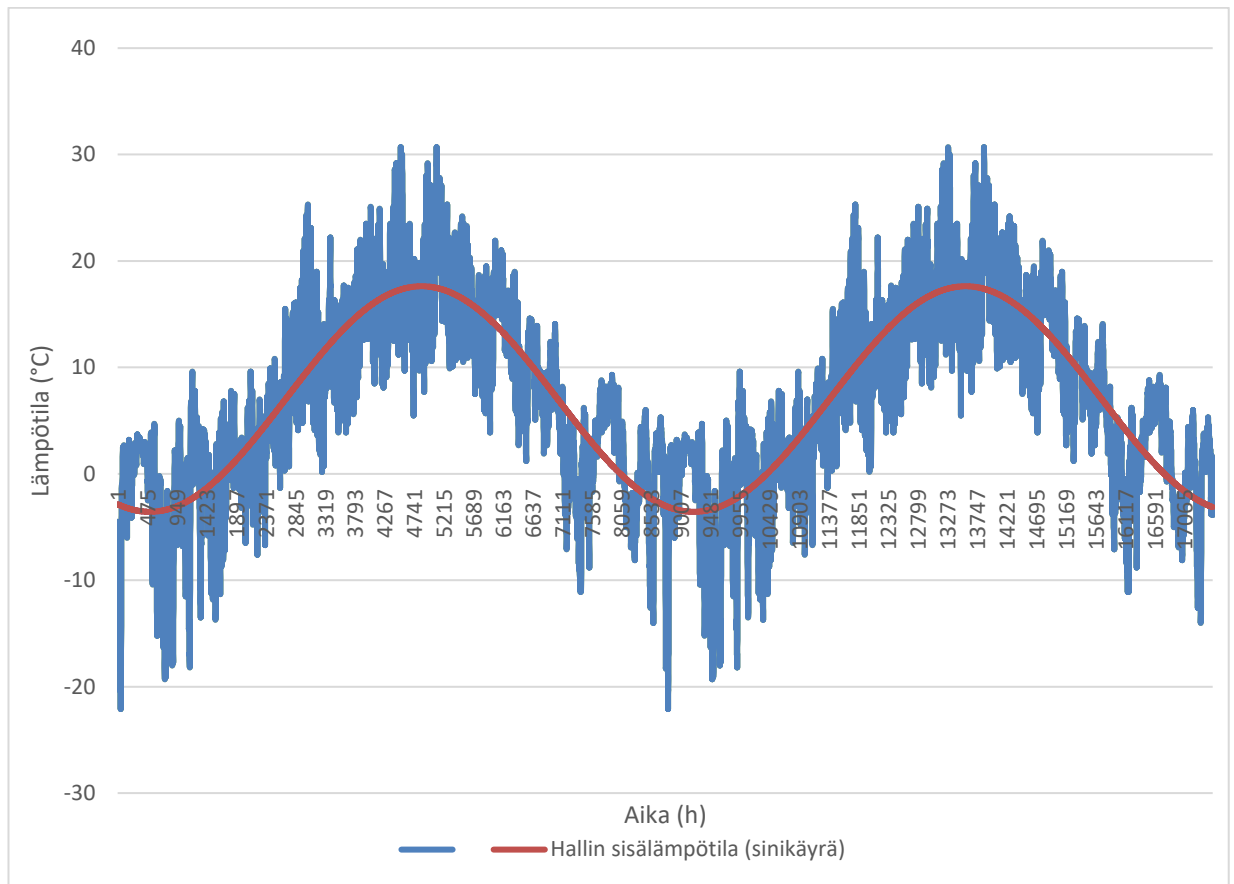
TRY2020



Sinikäyrän muoto:

$$T_{\text{sisä}}(t) = 10,839^{\circ}\text{C} * \sin\left(\frac{2\pi}{8711,637 \text{ h}} * t - 1,939\right) + 5,911^{\circ}\text{C}$$

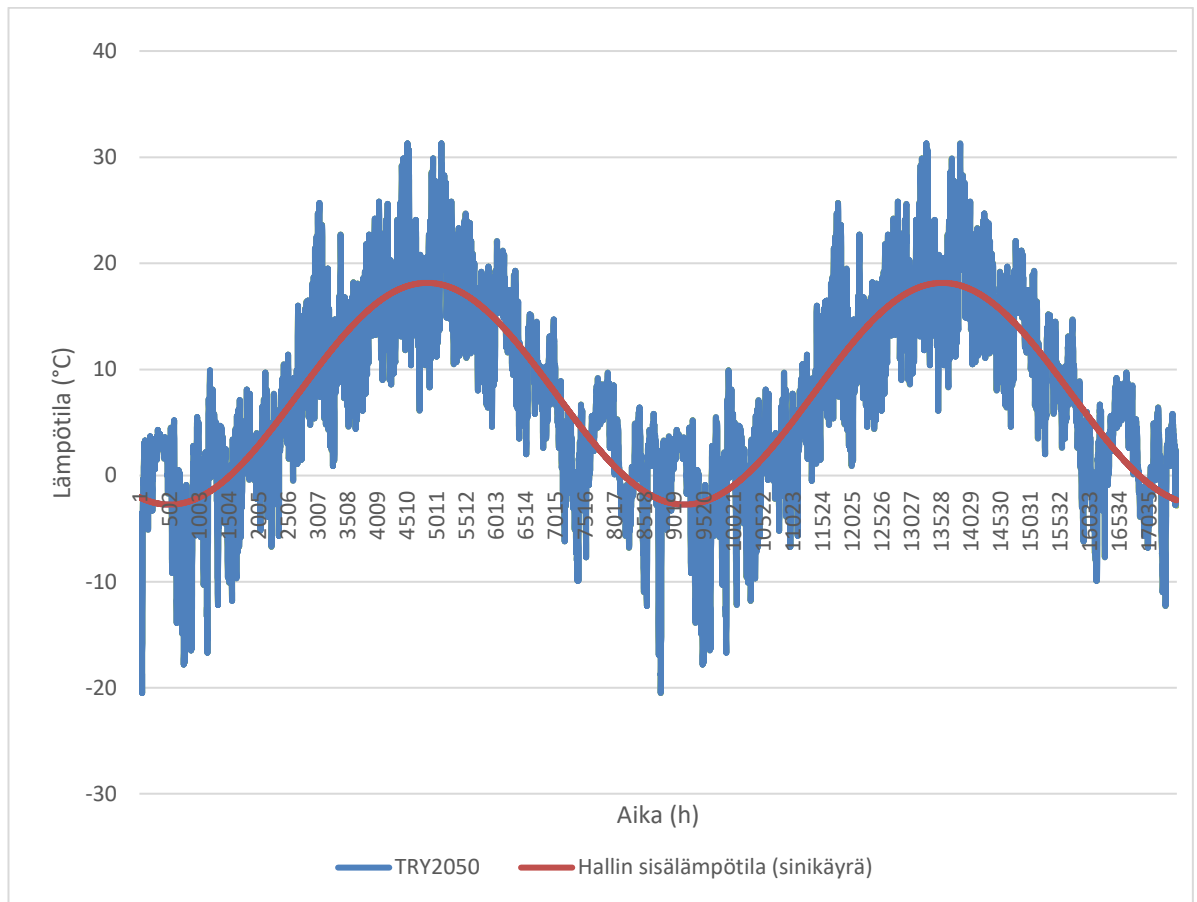
TRY2030



Sinikäyrän muoto:

$$T_{\text{sisä}}(t) = 10,596^{\circ}\text{C} * \sin\left(\frac{2\pi}{8703,787 \text{ h}} * t - 1,940\right) + 7,032^{\circ}\text{C}$$

TRY2050



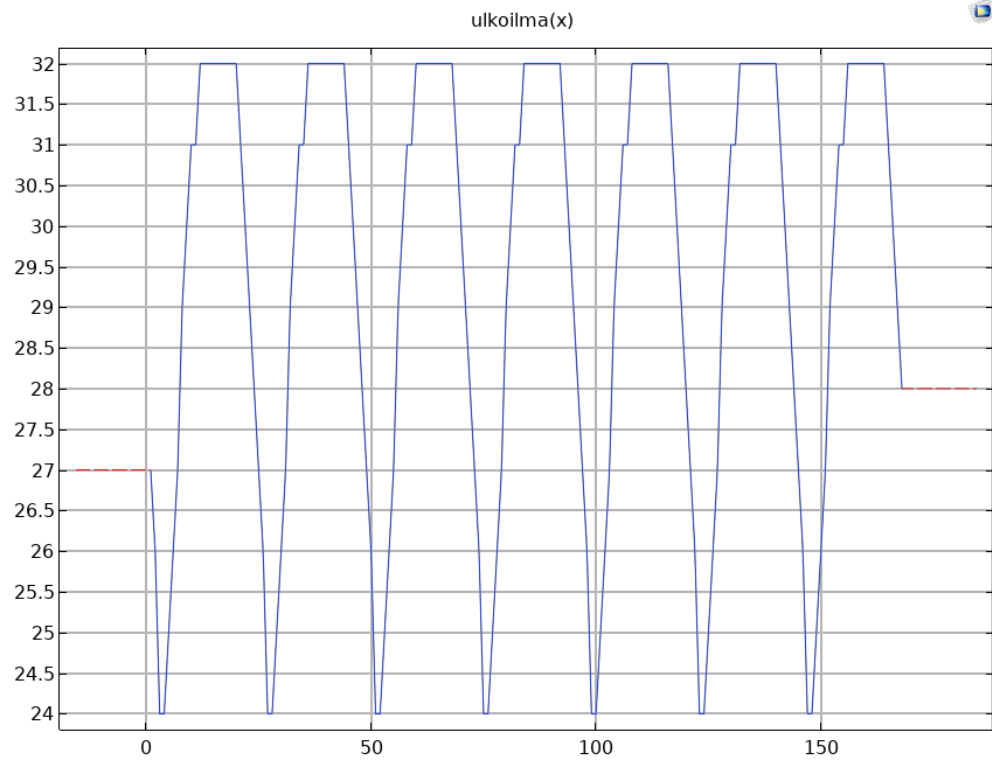
Sinikäyrän muoto:

$$T_{sisä}(t) = 10,450^{\circ}\text{C} * \sin\left(\frac{2\pi}{8701,931 \text{ h}} * t - 1,938\right) + 7,709^{\circ}\text{C}$$

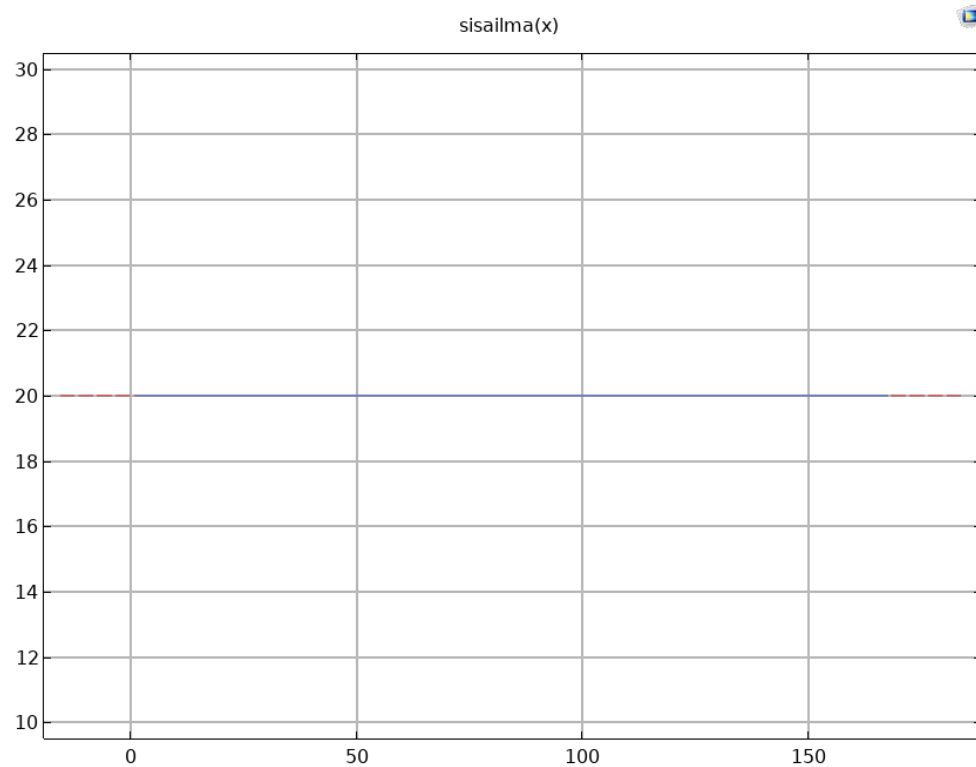
LIITE 3: ÄÄRIOLOSUHDESIMULAATIOIDEN SÄÄDATAT

Kesäsimulaatio

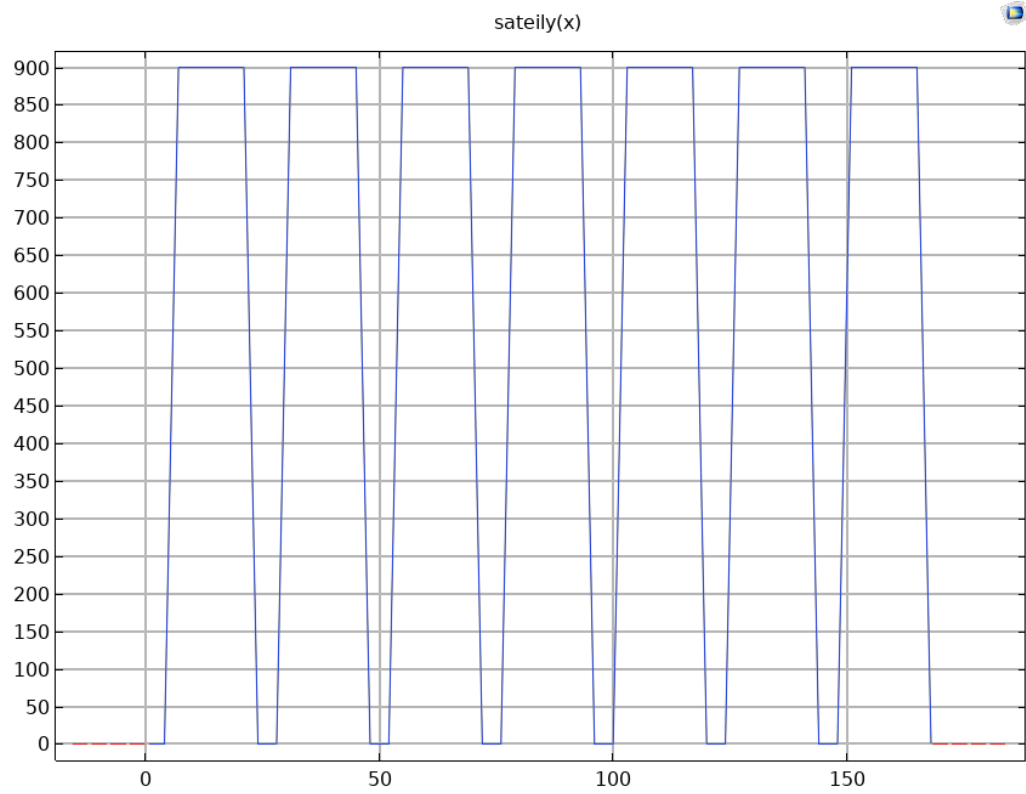
Ukolämpötila (°C):



Hallin sisäilman lämpötila (°C)

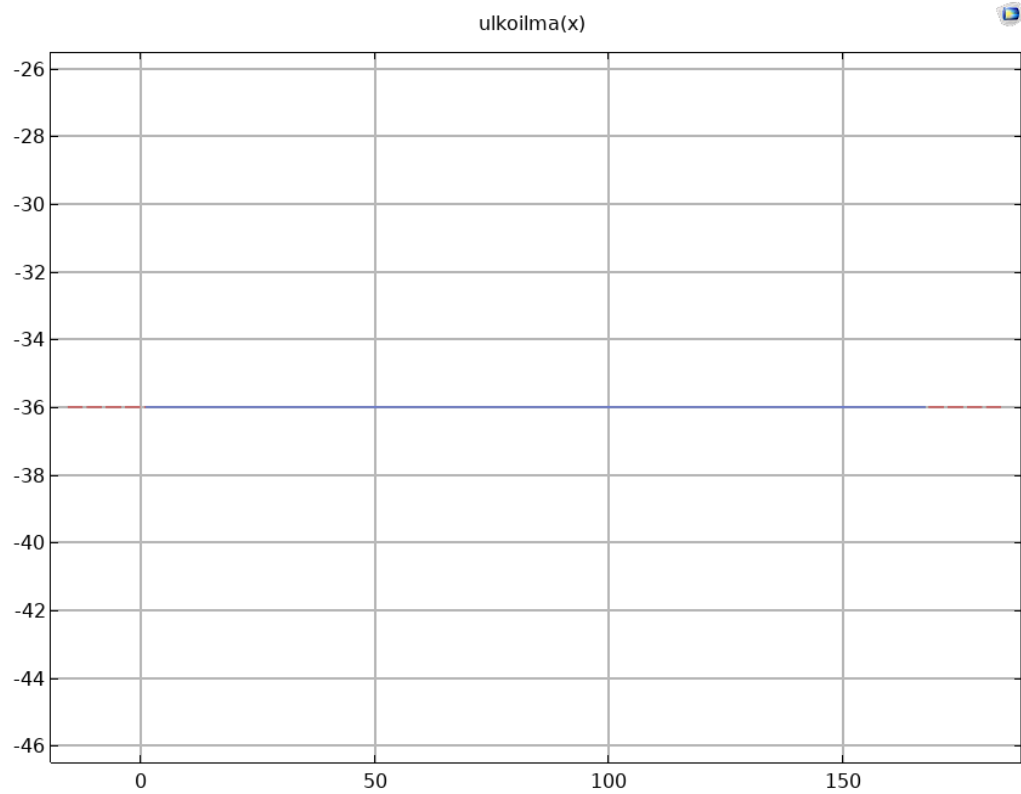


Auringon säteily yläpintaan (W/m^2):

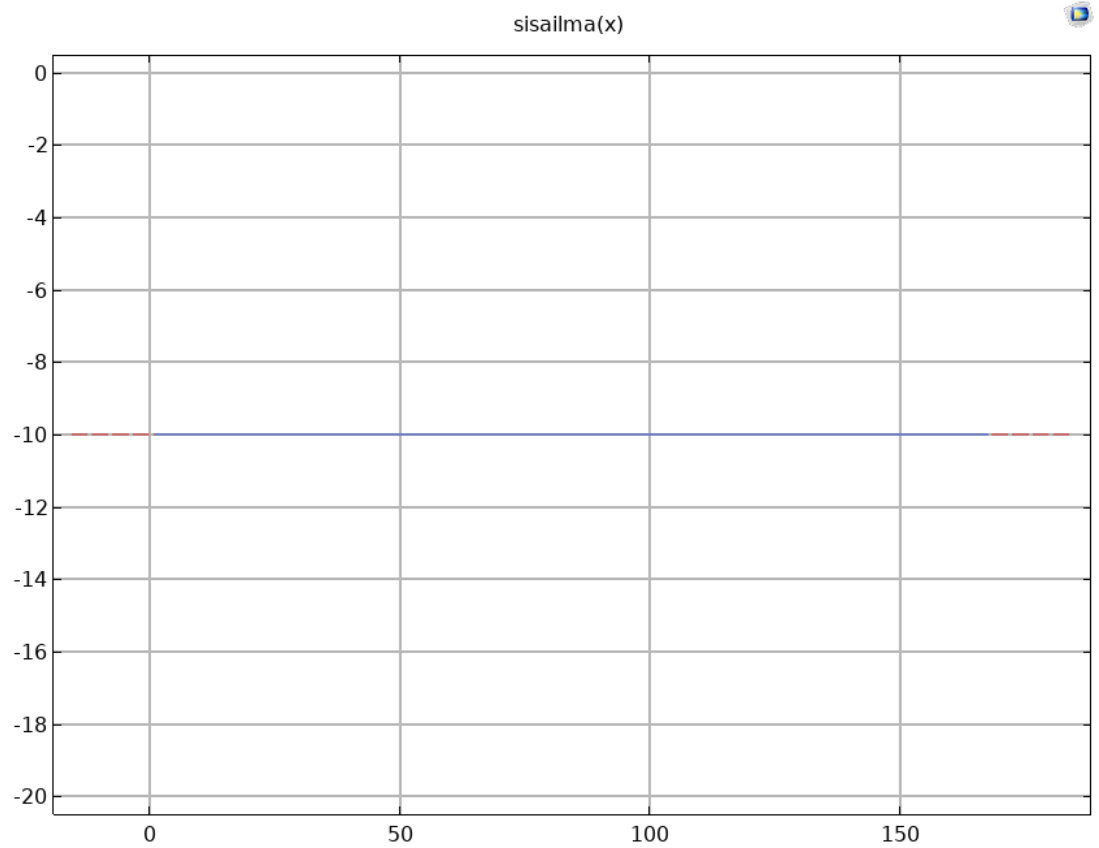


Talvisimulaatio

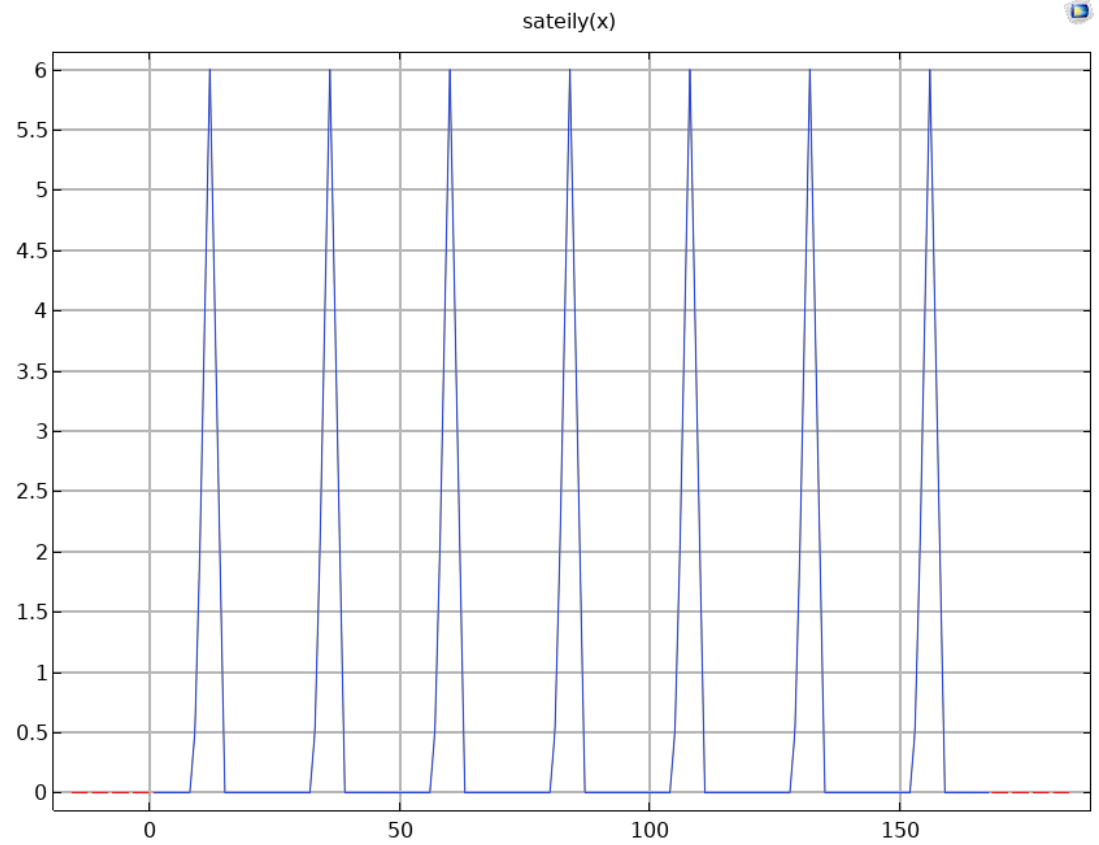
Ukolämpötila ($^{\circ}\text{C}$):



Hallin sisäilman lämpötila (°C)



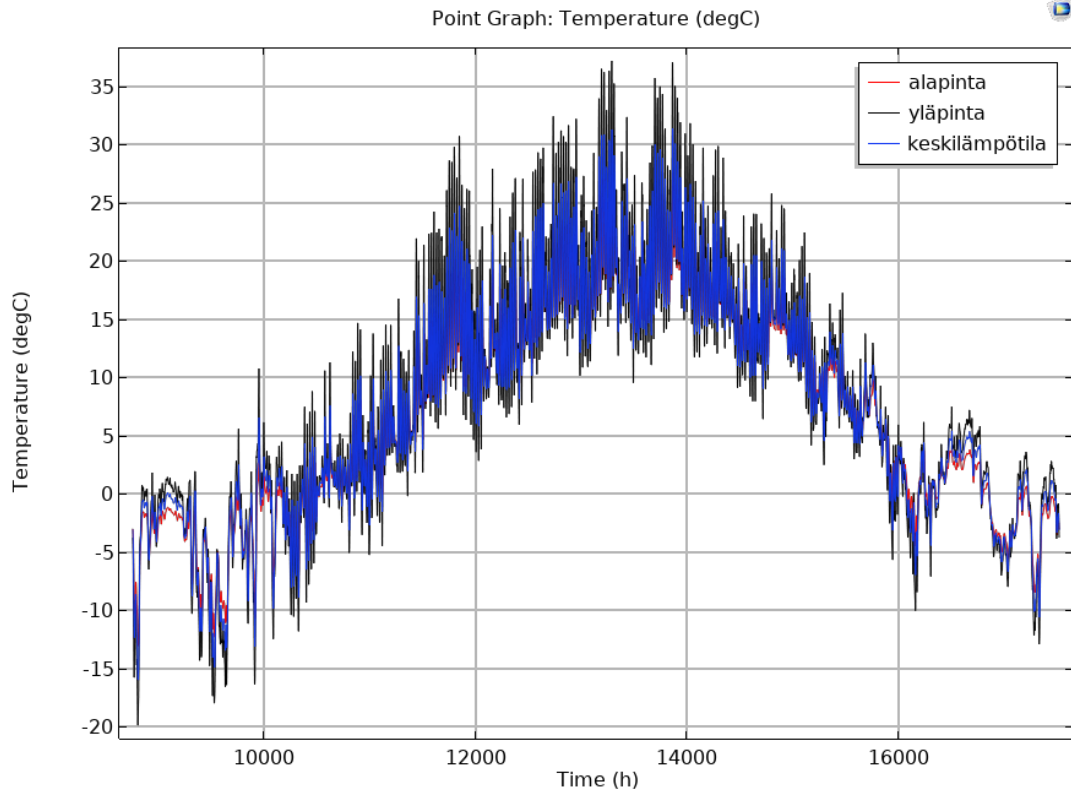
Auringon säteily yläpinnalle (W/m²):



LIITE 4: TESTIVUOSIEN SIMULAATIOTULOKSET

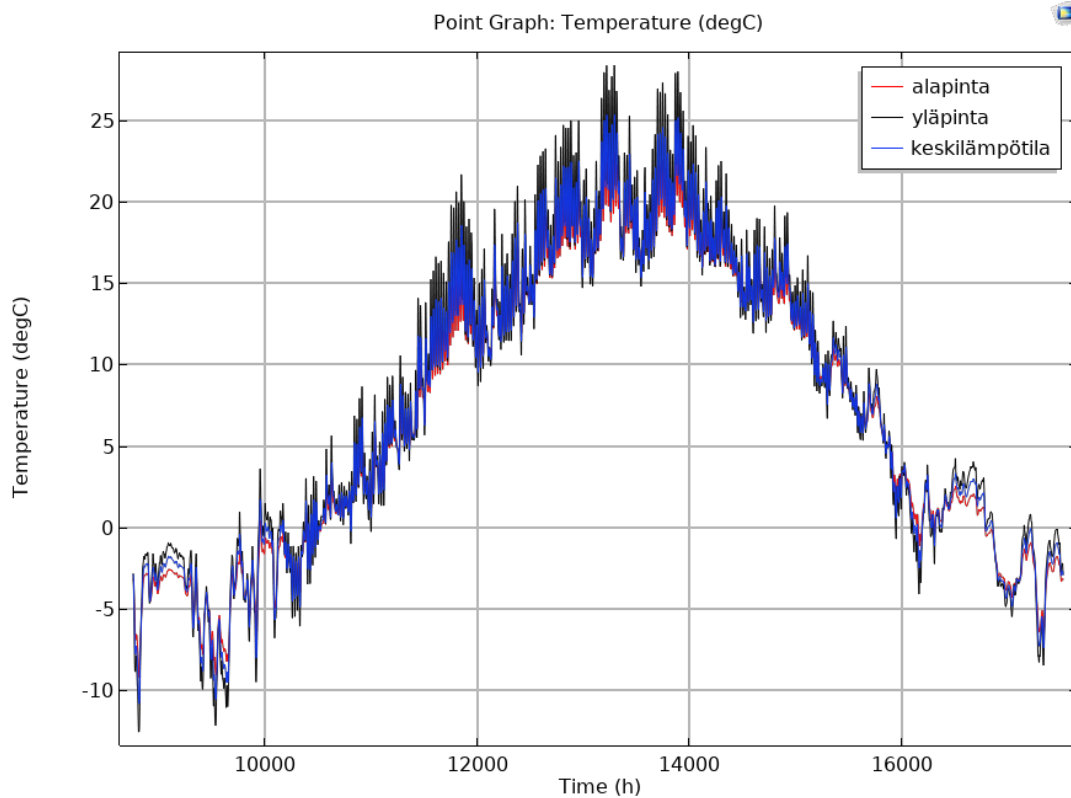
2020, 200 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



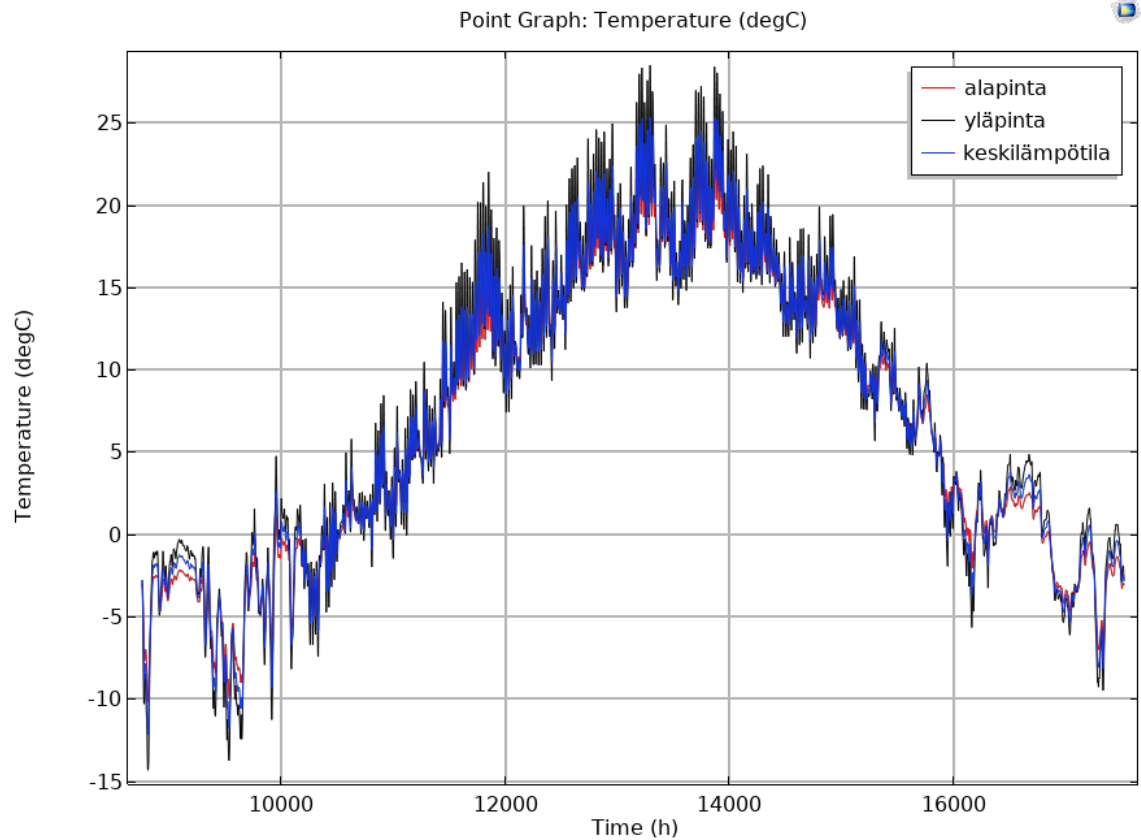
2020, 200 mm, asfaltti

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

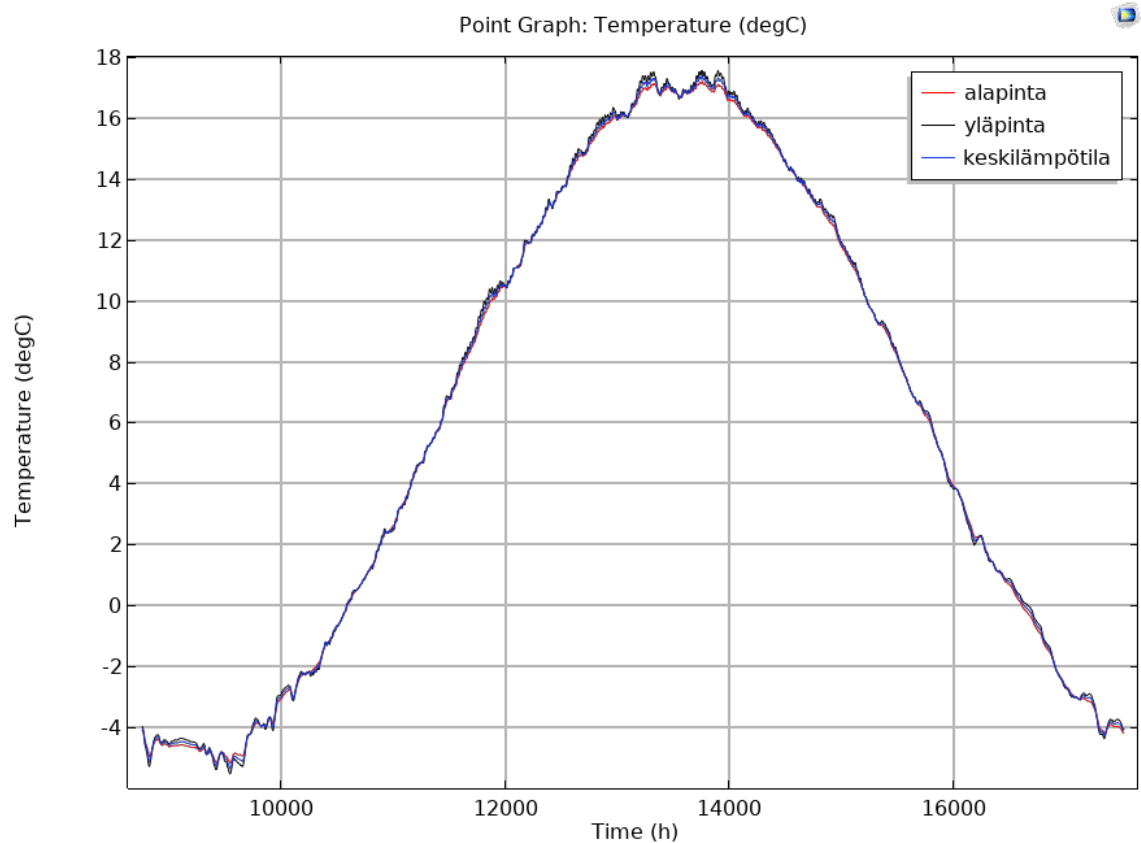


2020, 200 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

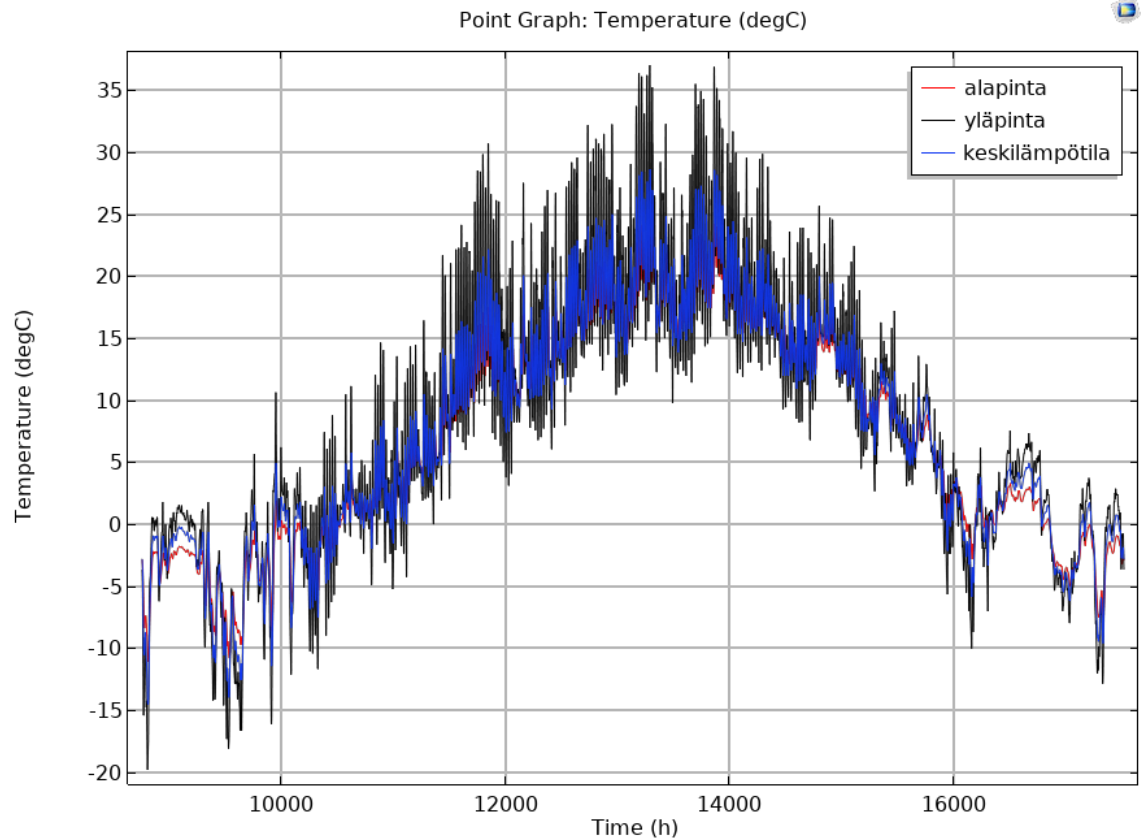
**2020, 200 mm, nurmikko**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

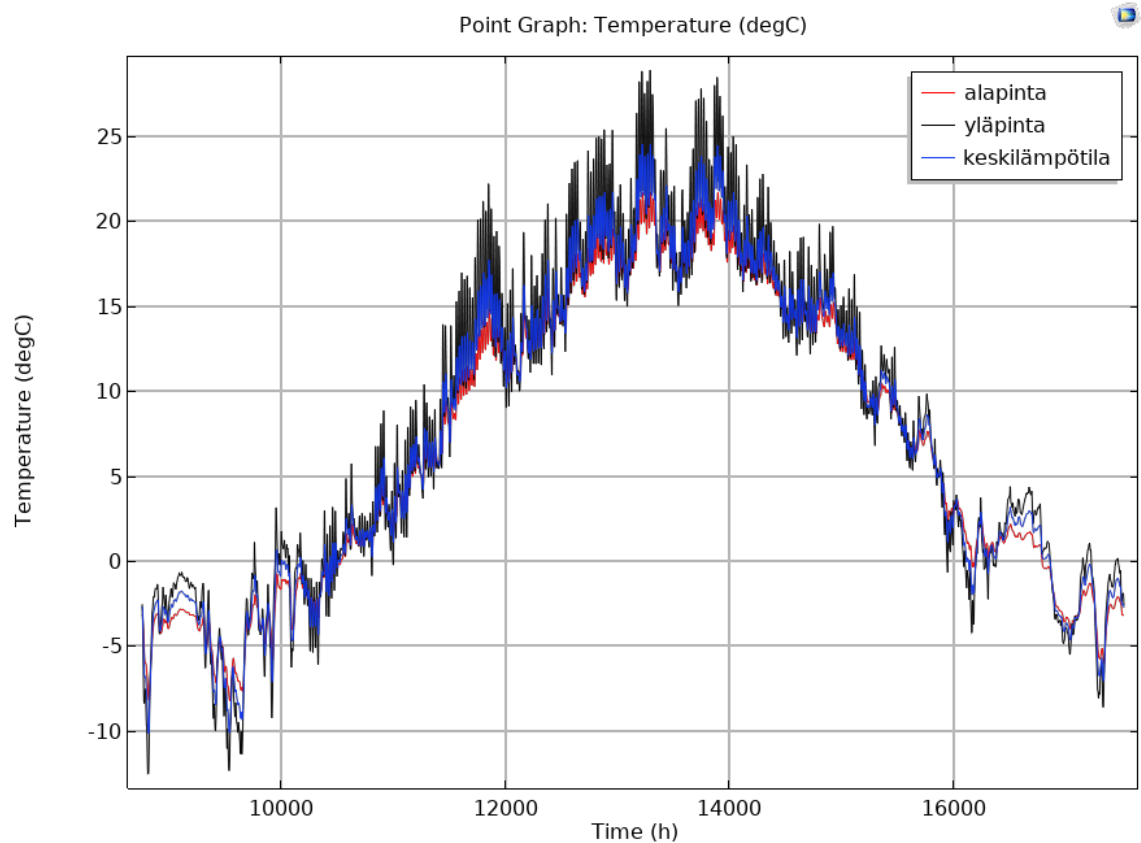


2020, 300 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

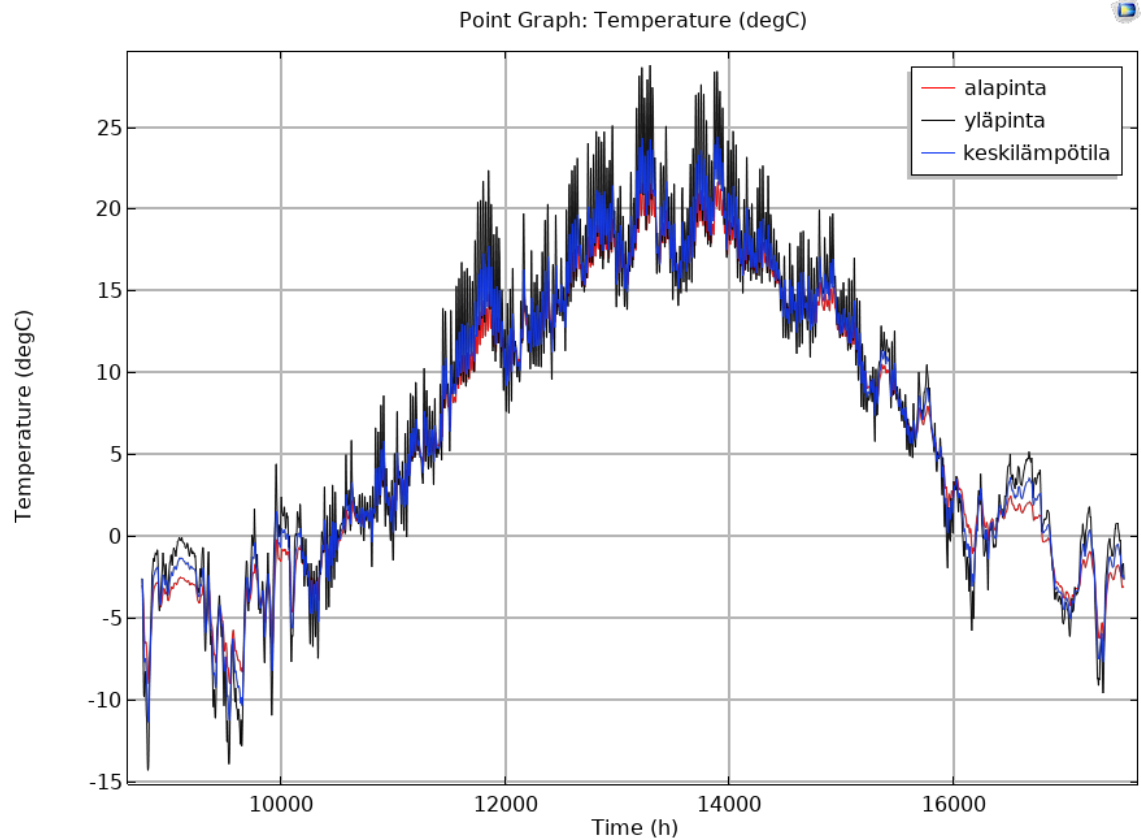
**2020, 300 mm, asfaltti**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

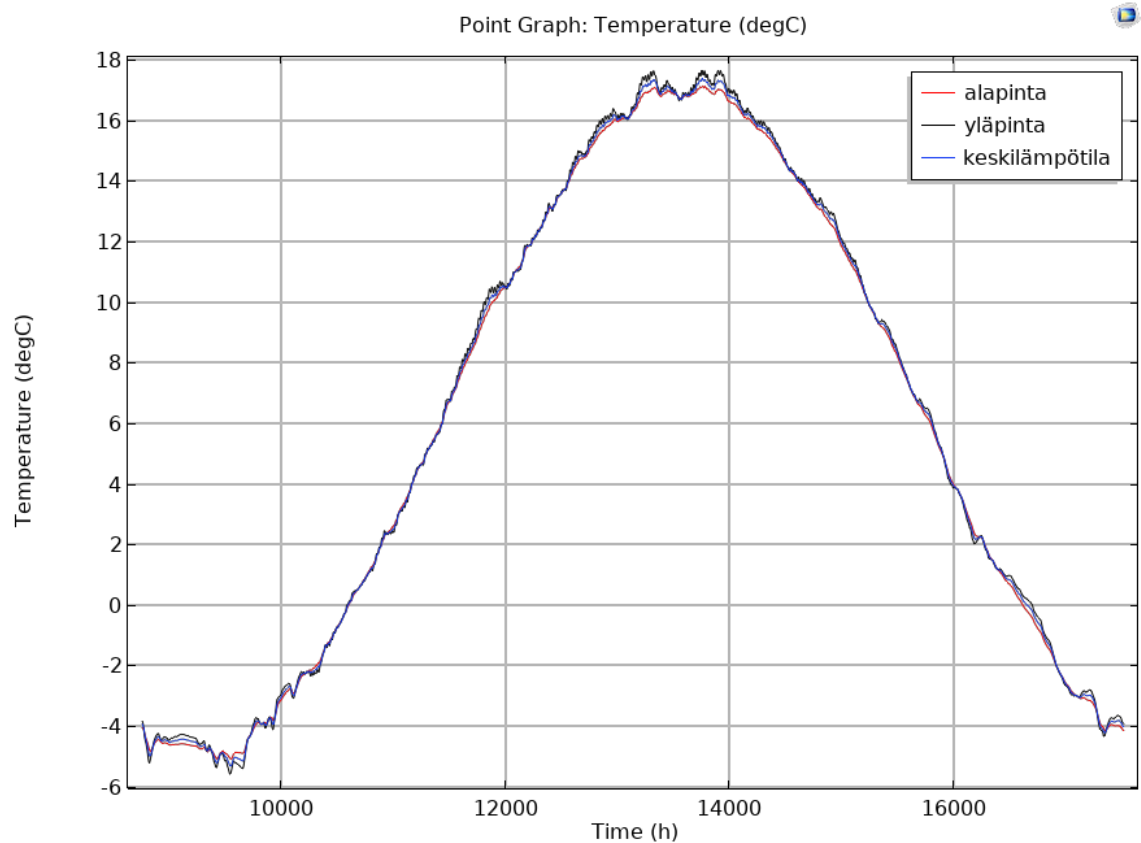


2020, 300 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

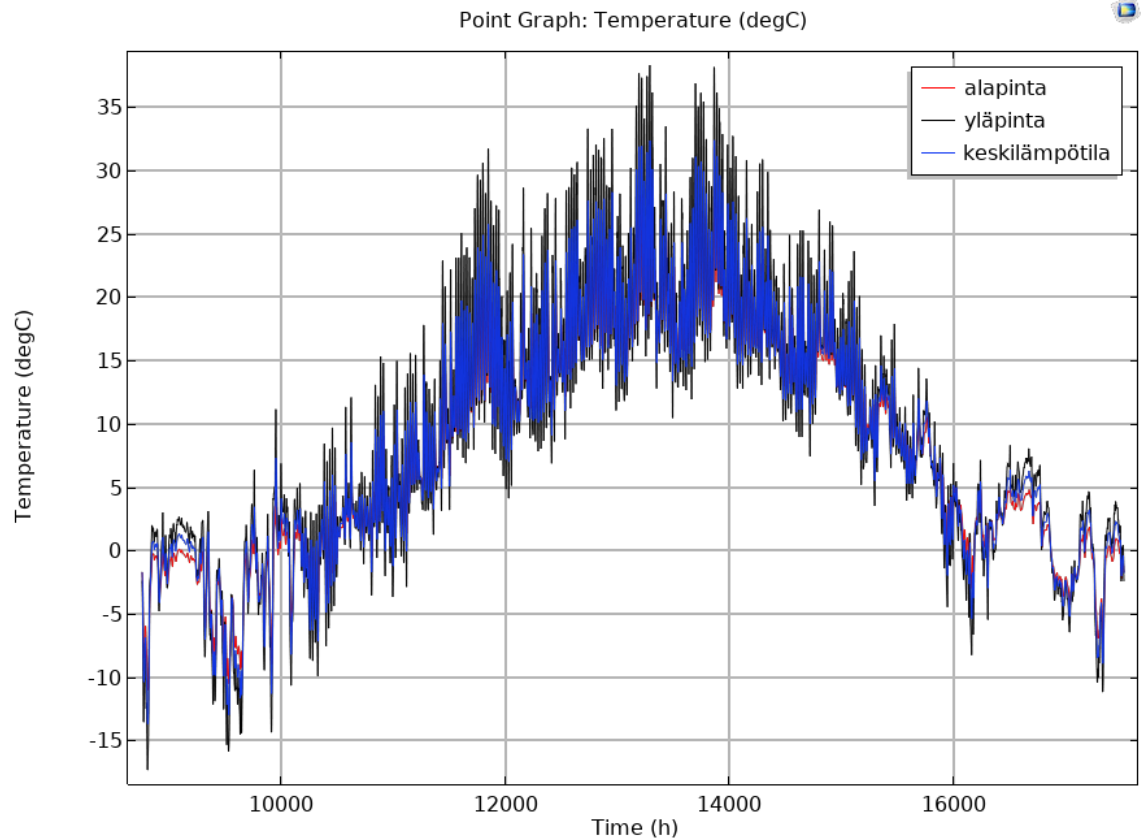
**2020, 300 mm, nurmikko**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



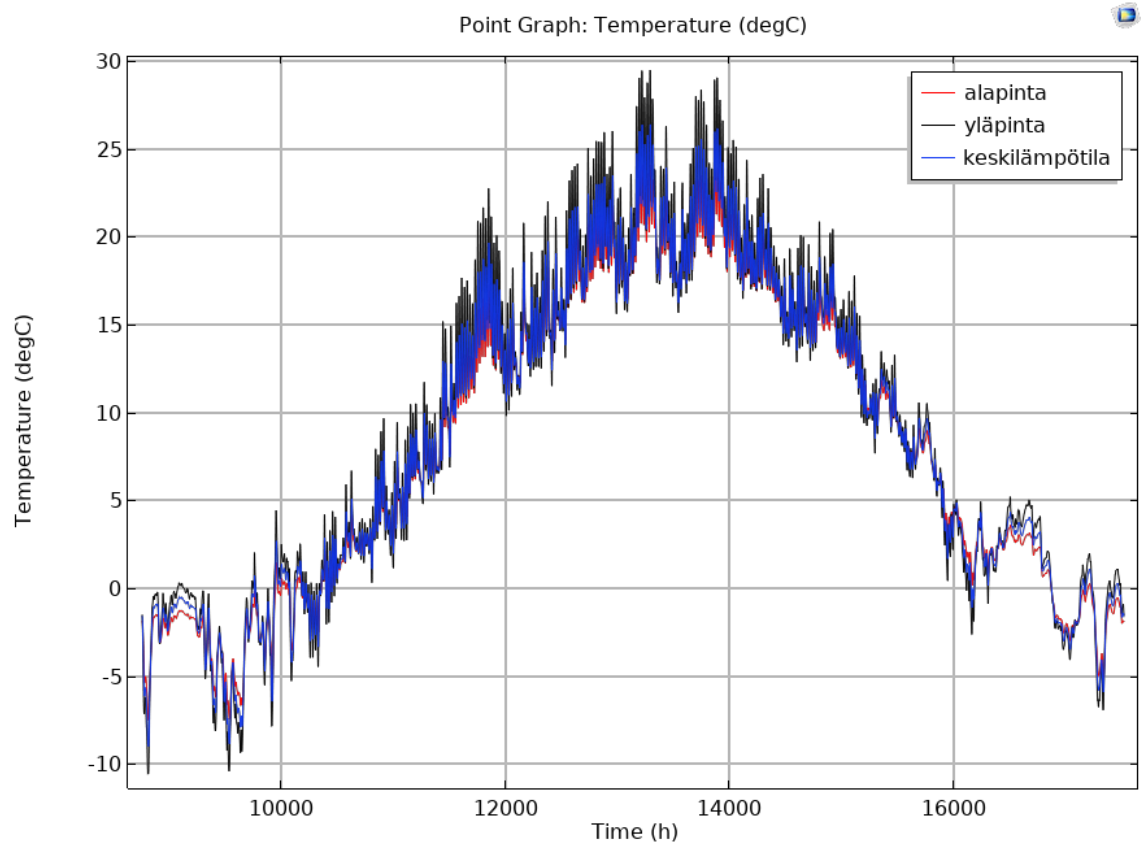
2030 RCP4.5, 200 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



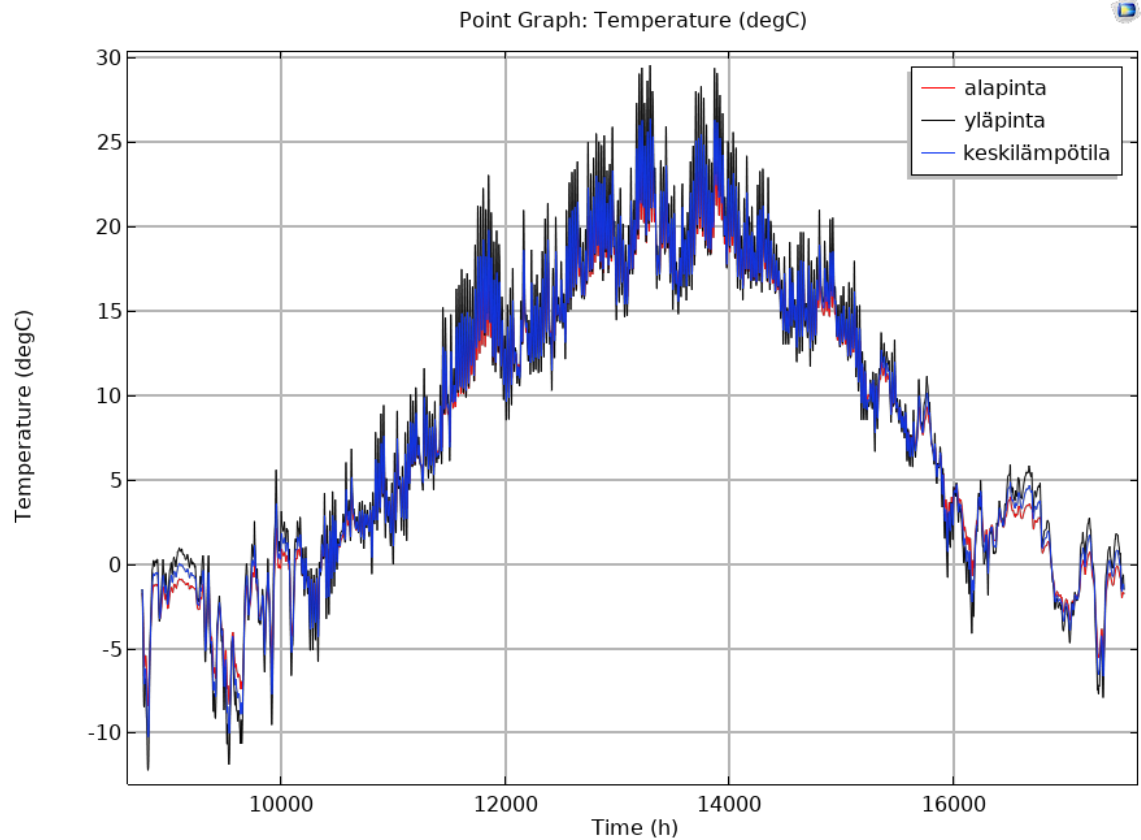
2030 RCP4.5, 200 mm, asfaltti

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



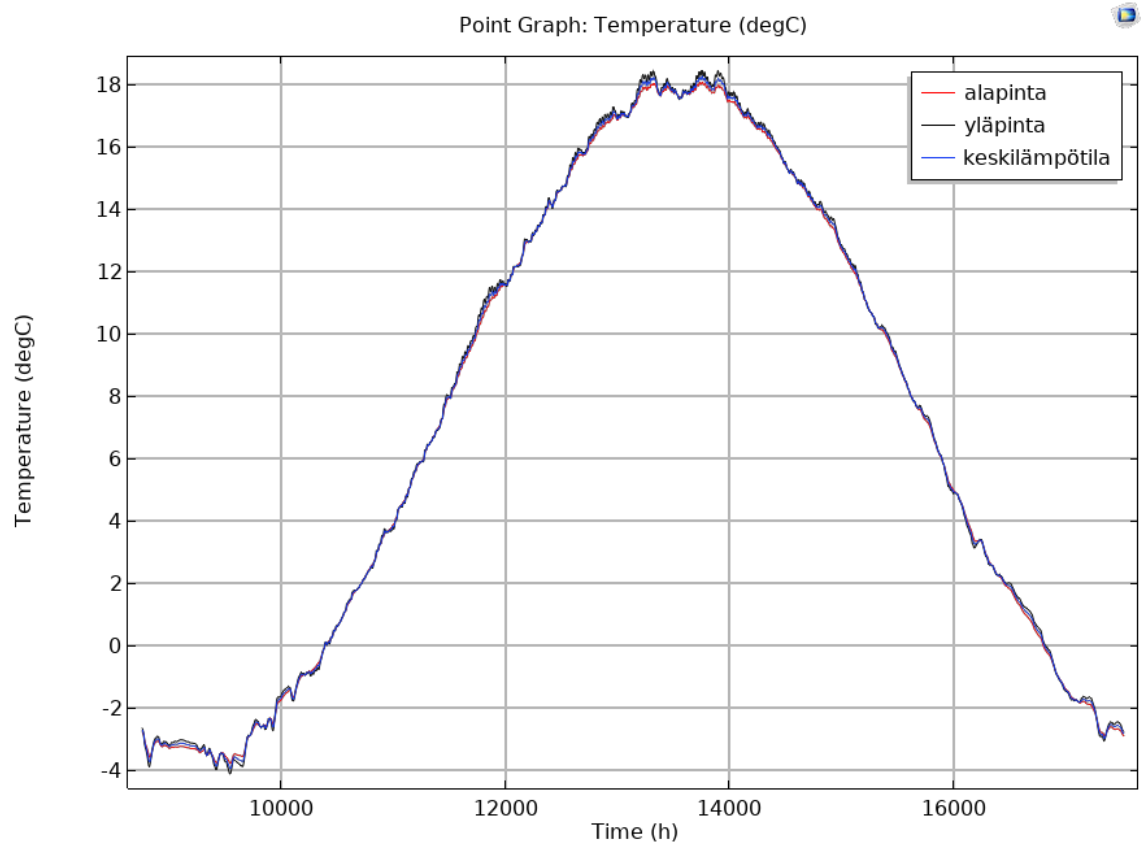
2030 RCP4.5, 200 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



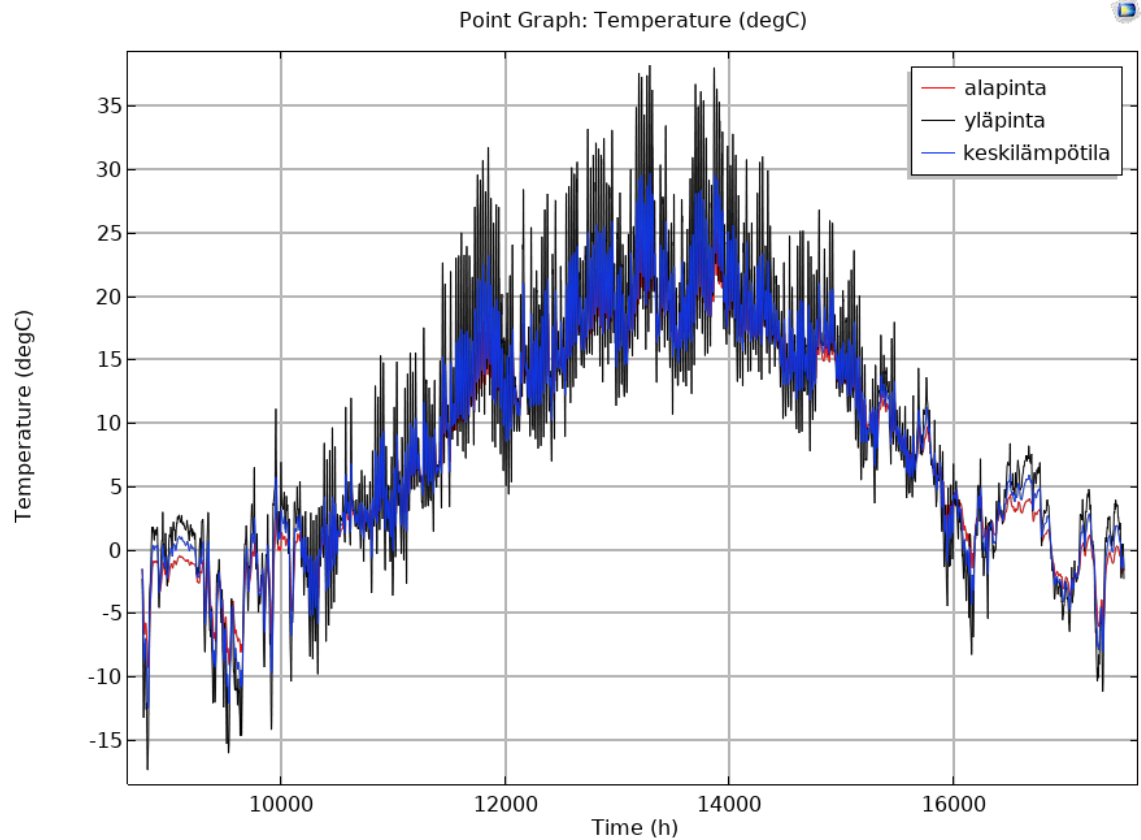
2030 RCP4.5, 200 mm, nurmikko

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

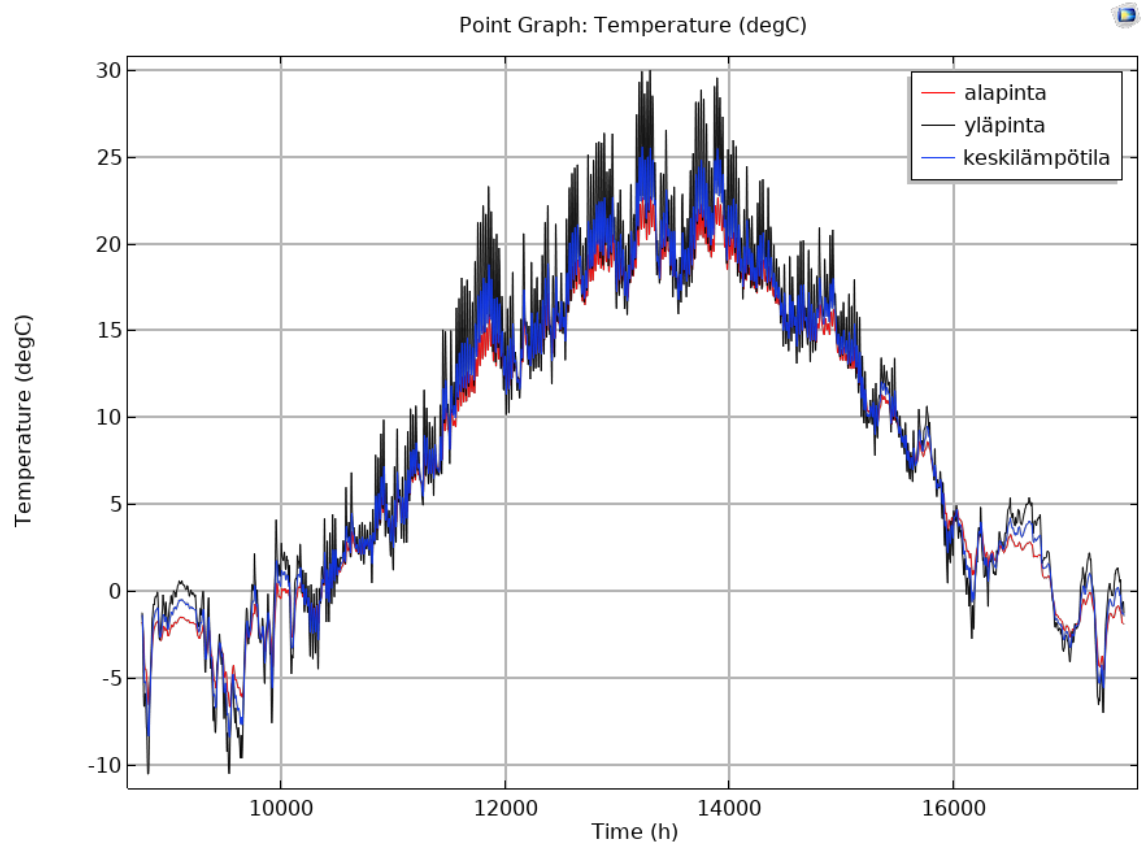


2030 RCP4.5, 300 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

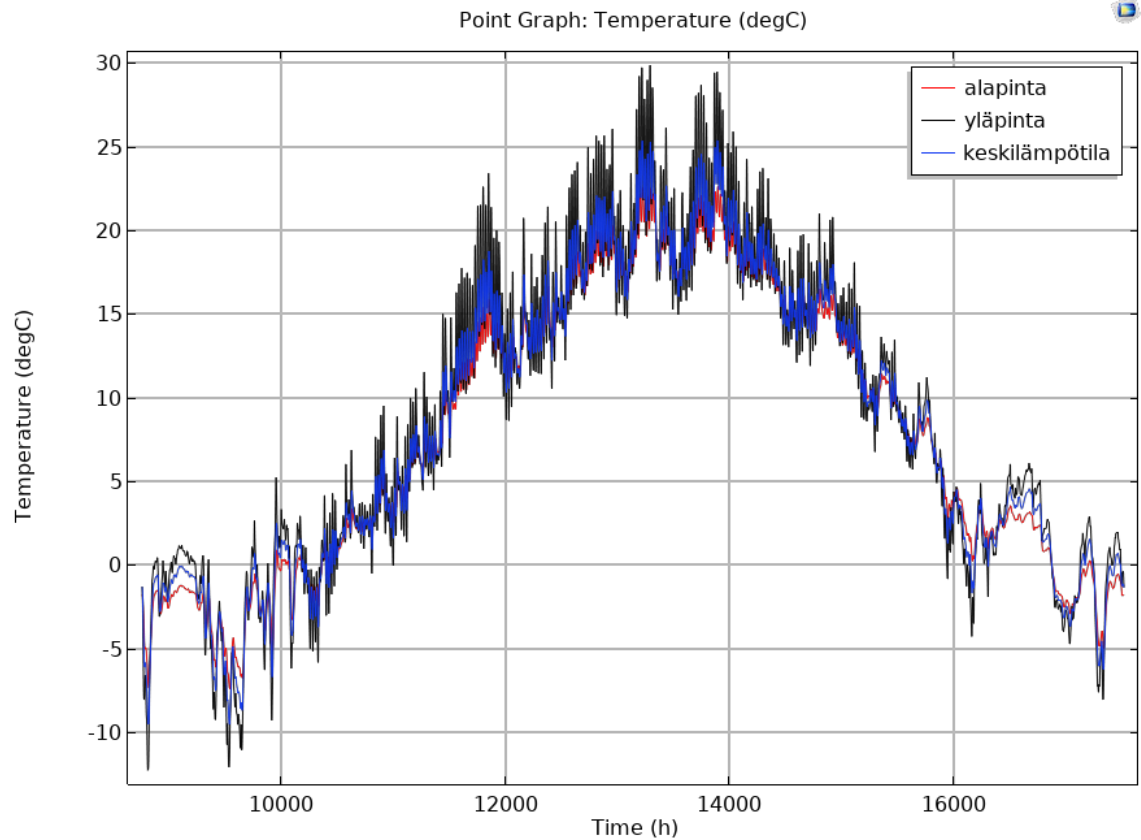
**2030 RCP4.5, 300 mm, asfaltti**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

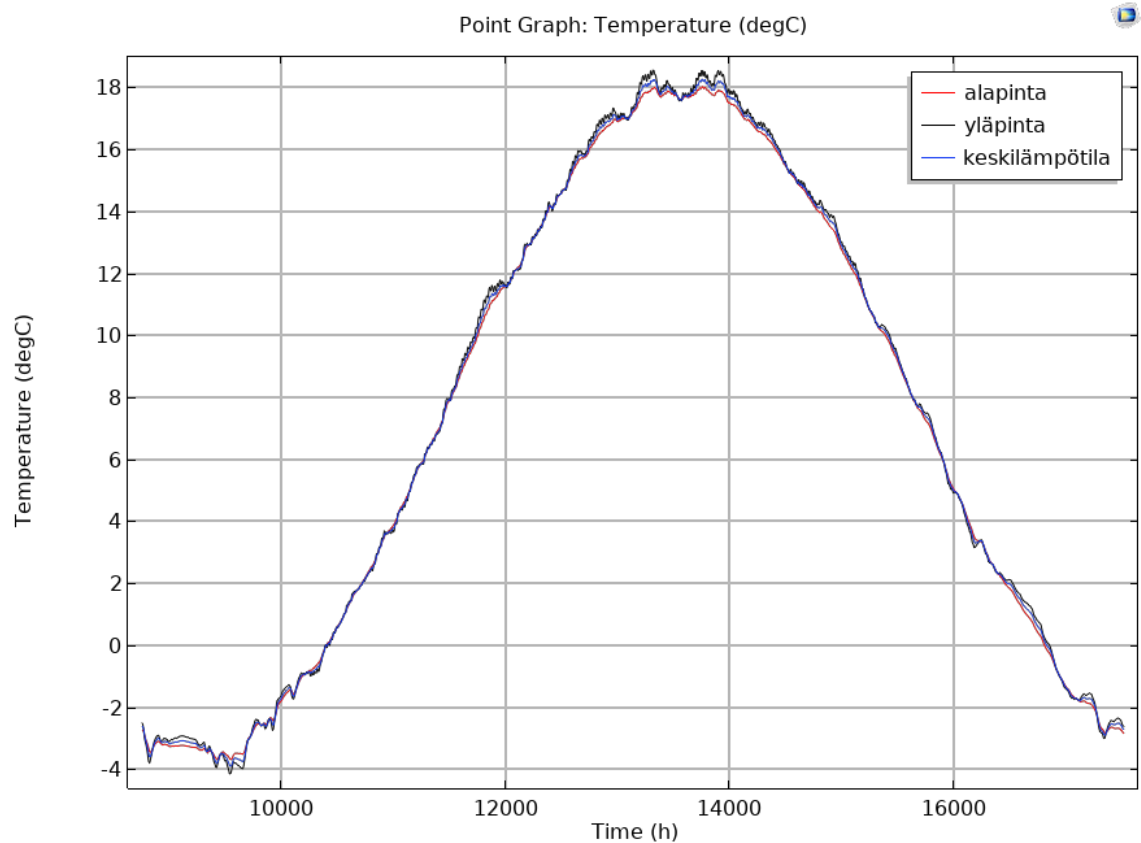


2030 RCP4.5, 300 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

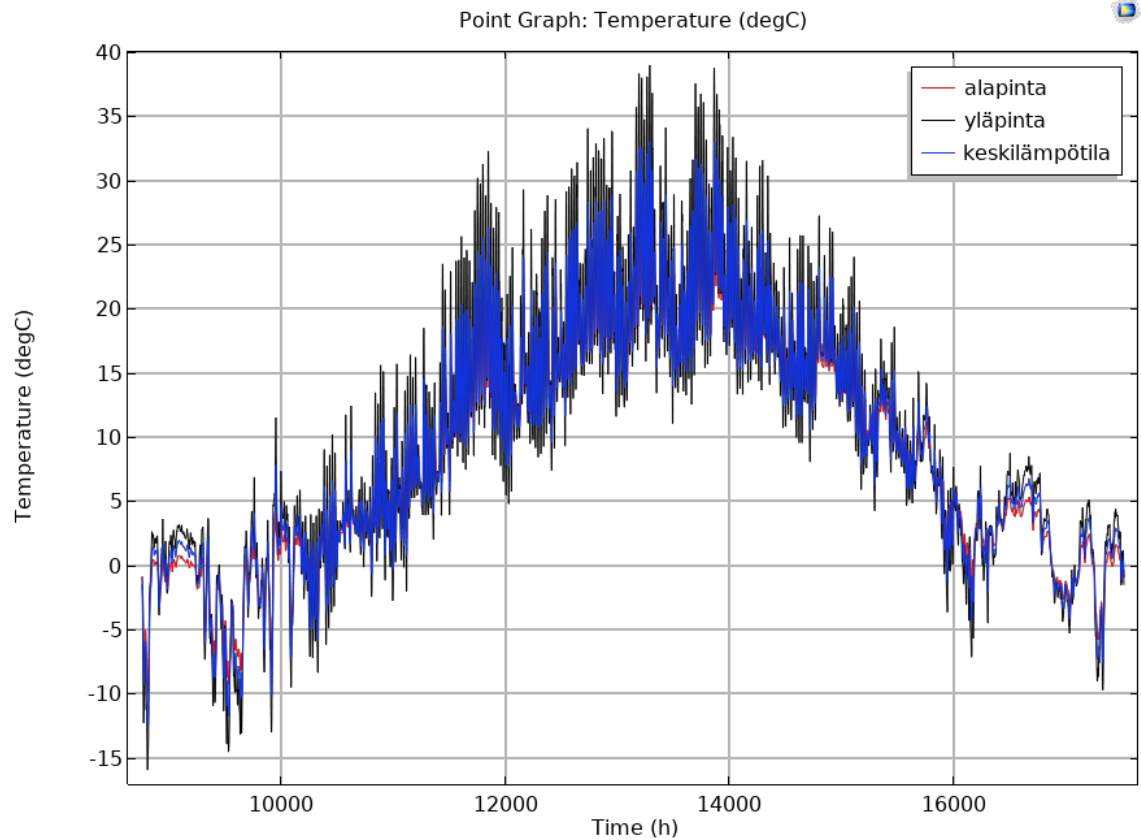
**2030 RCP4.5, 300 mm, nurmikko**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

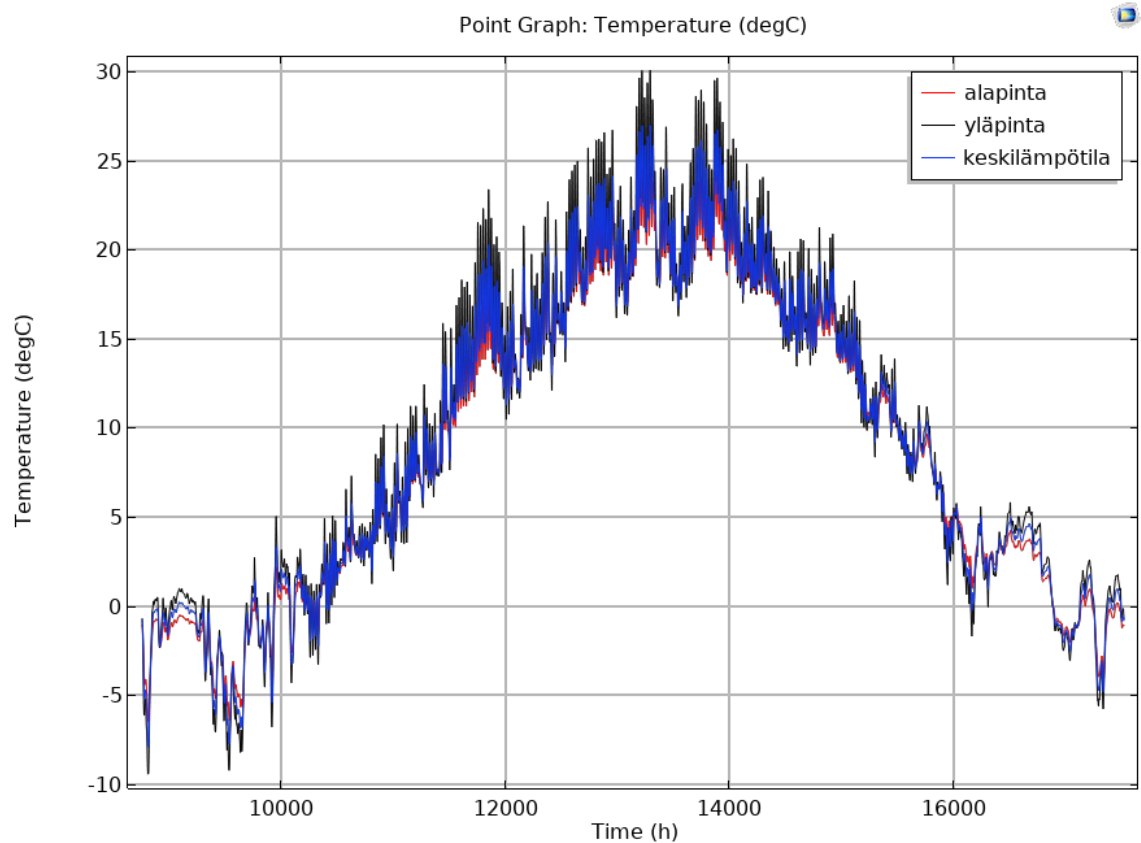


2050 RCP4.5, 200 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

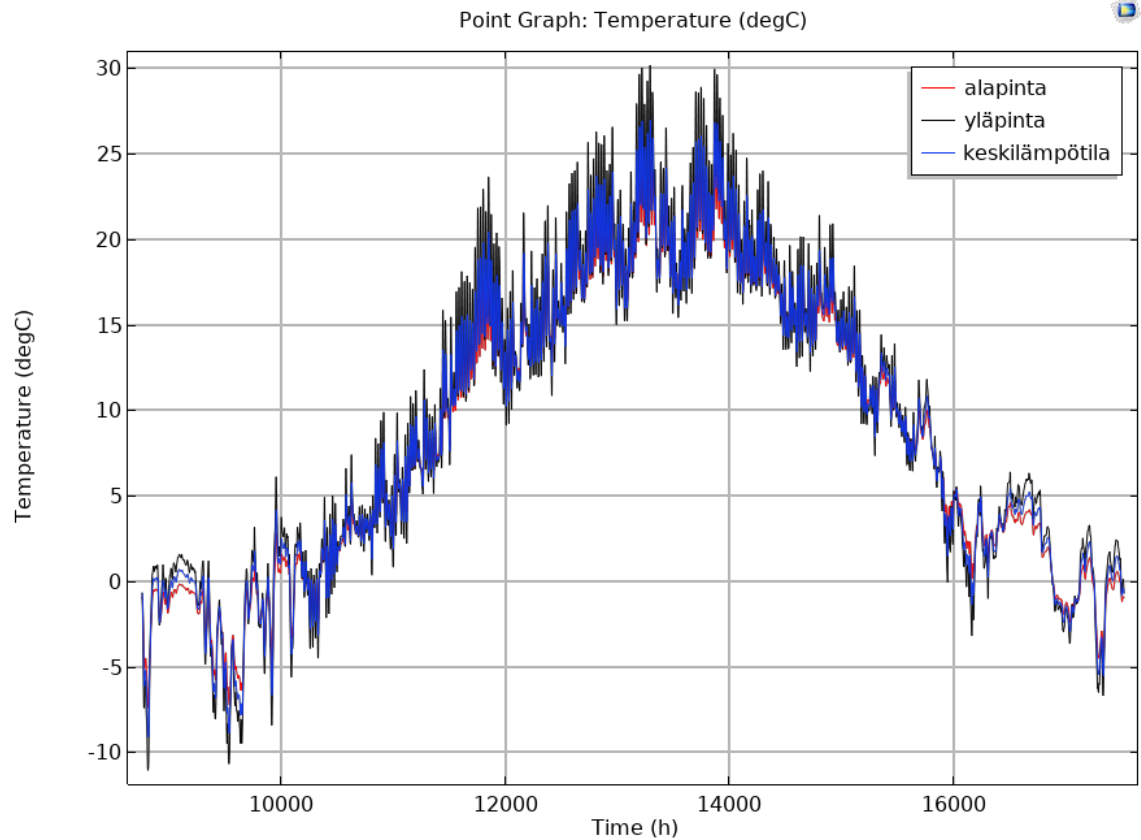
**2050 RCP4.5, 200 mm, asfaltti**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



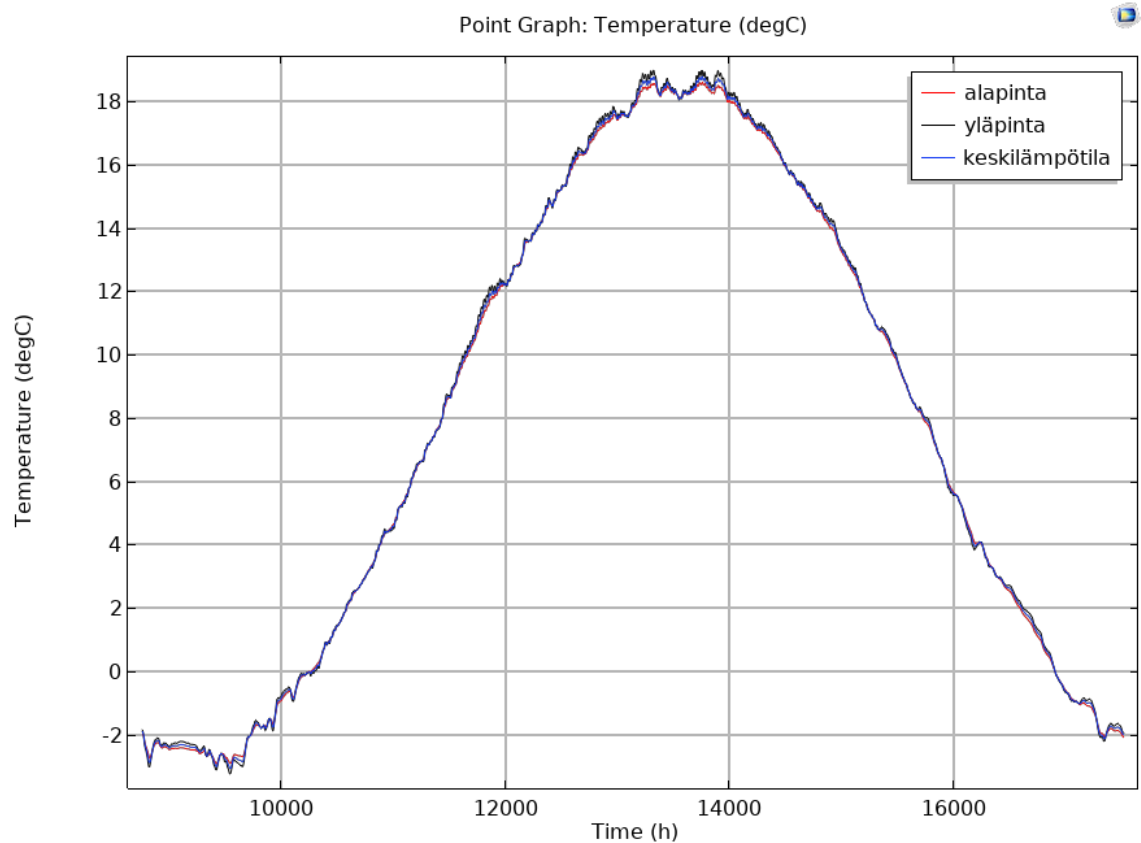
2050 RCP4.5, 200 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



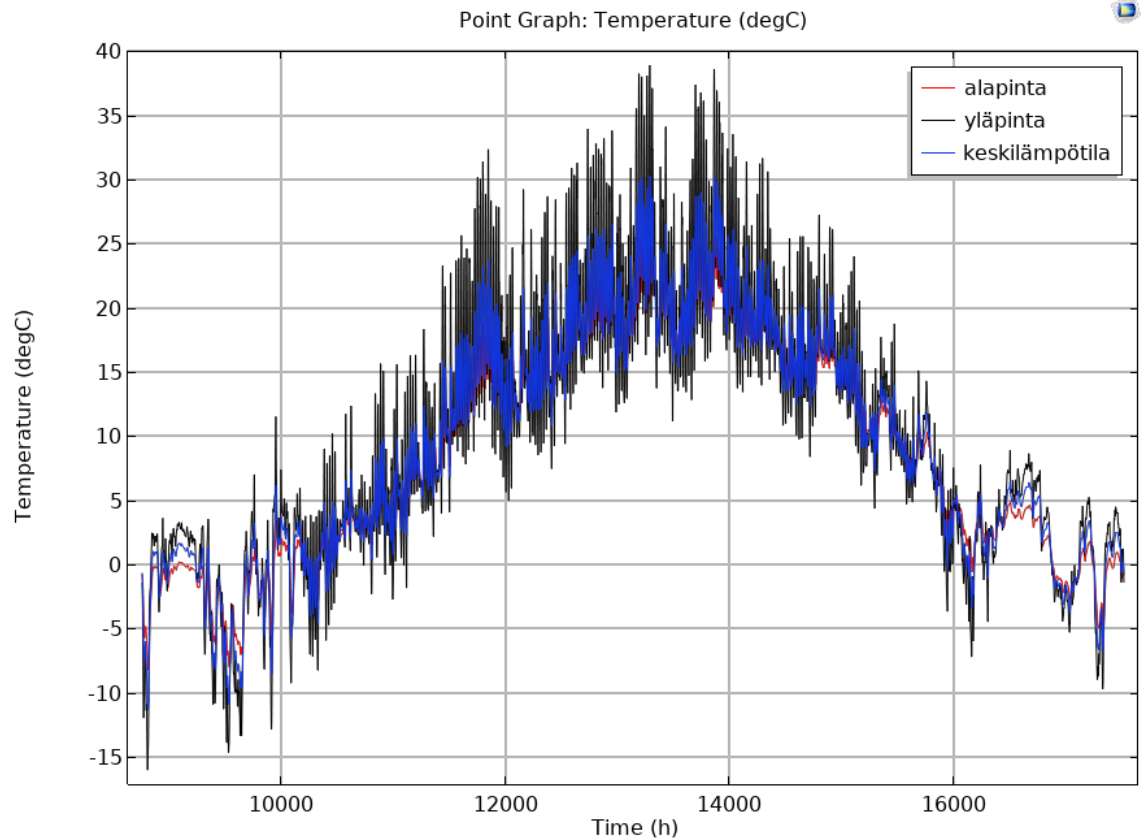
2050 RCP4.5, 200 mm, nurmikko

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

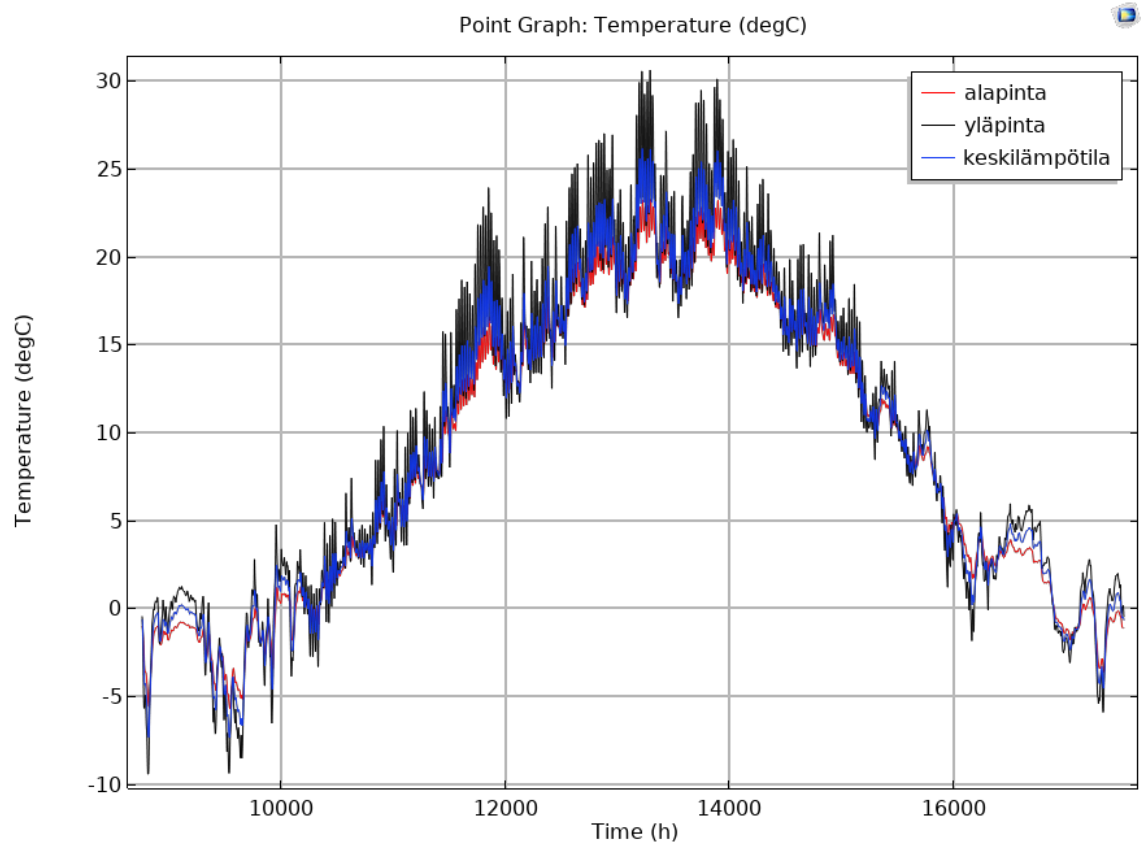


2050 RCP4.5, 300 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

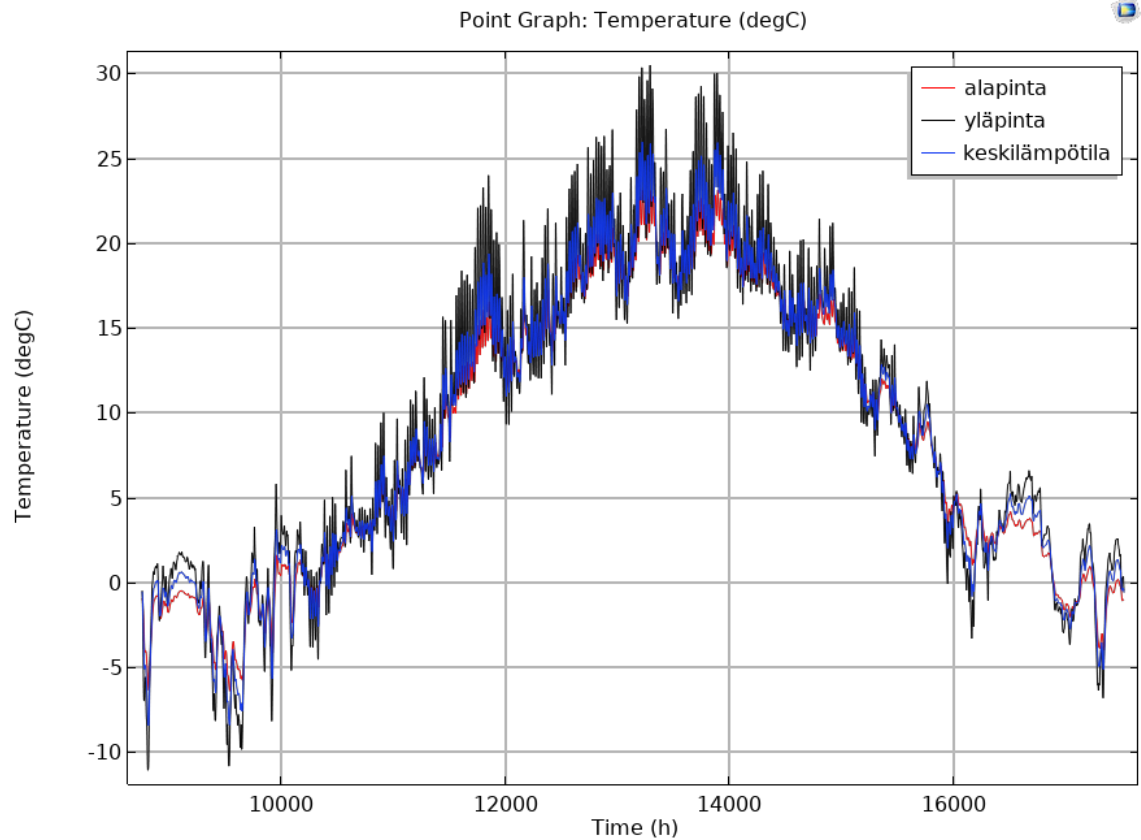
**2050 RCP4.5, 300 mm, asfaltti**

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

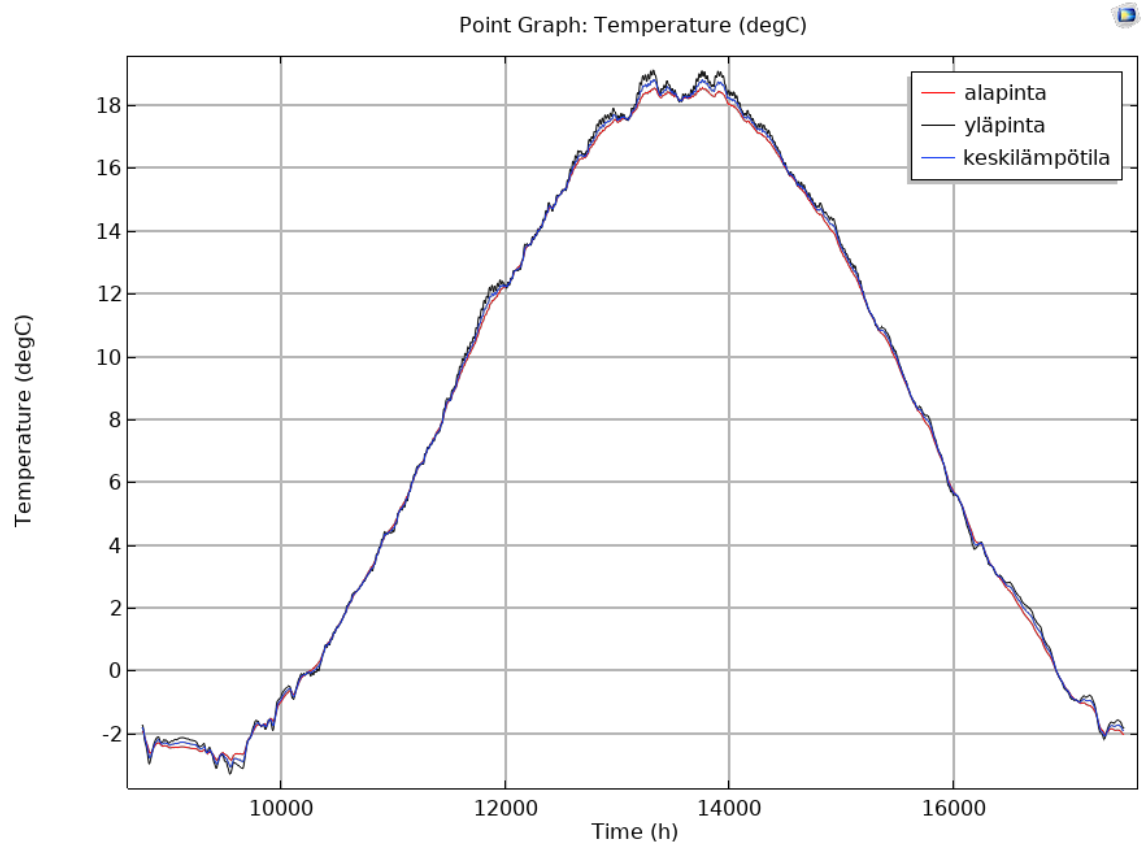


2050 RCP4.5, 300 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

**2050 RCP4.5, 300 mm, nurmikko**

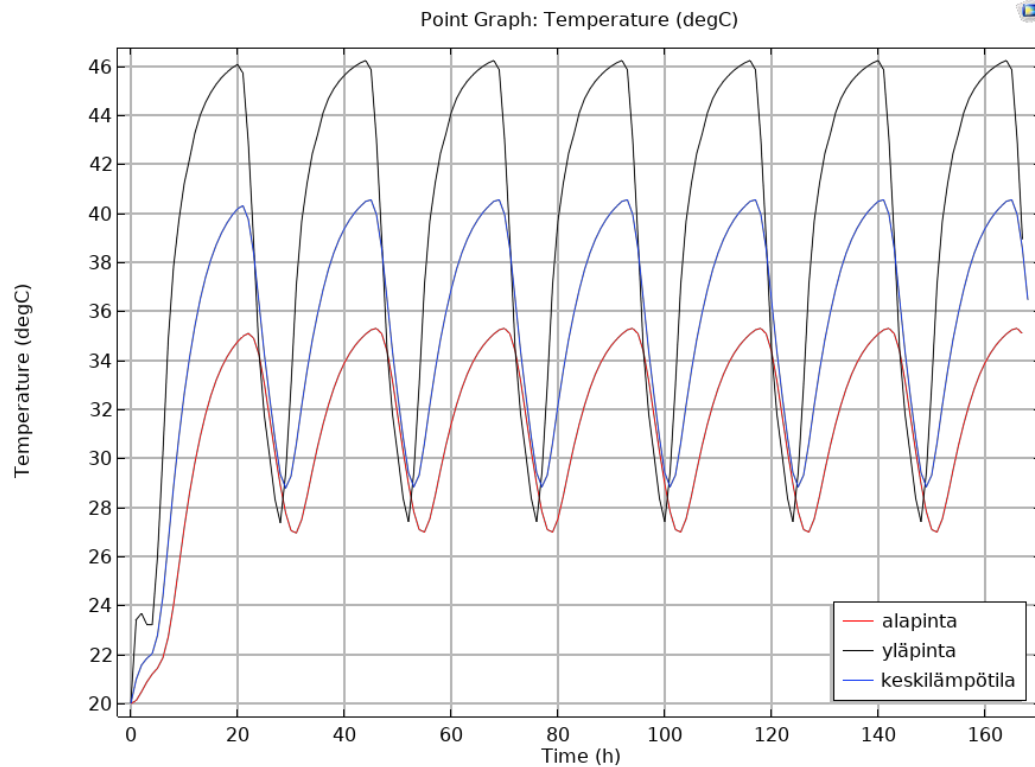
Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



LIITE 5: ÄÄRIOLOSUHDESIMULAATIOIDEN TULOKSET

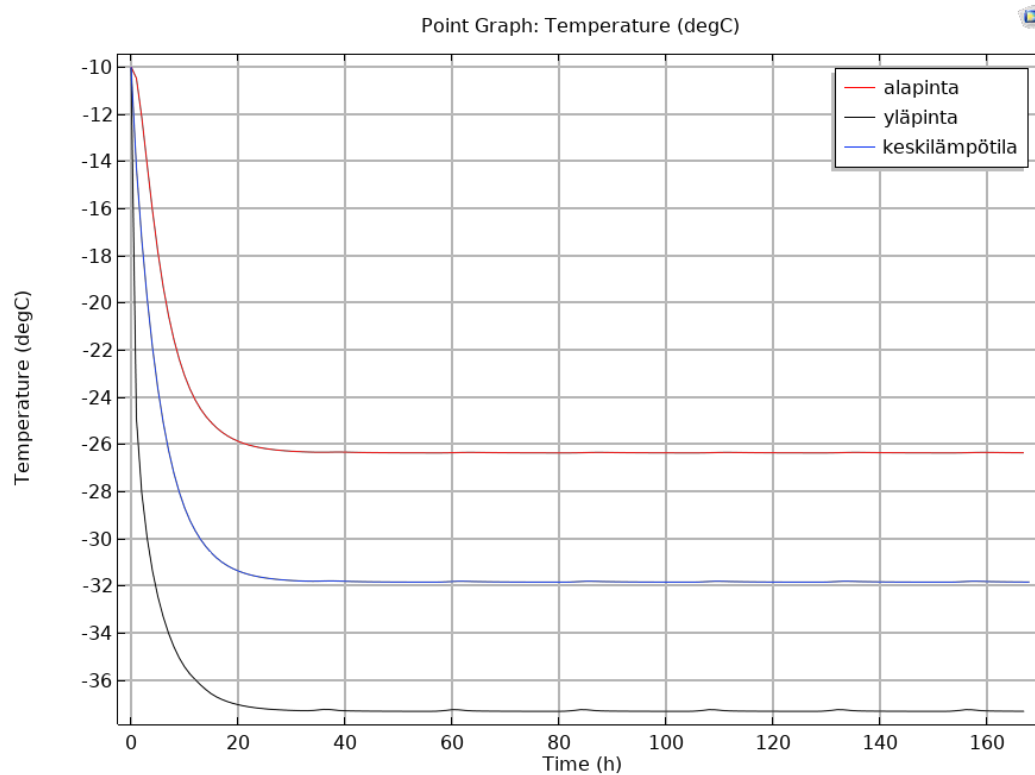
Kesä, 200 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



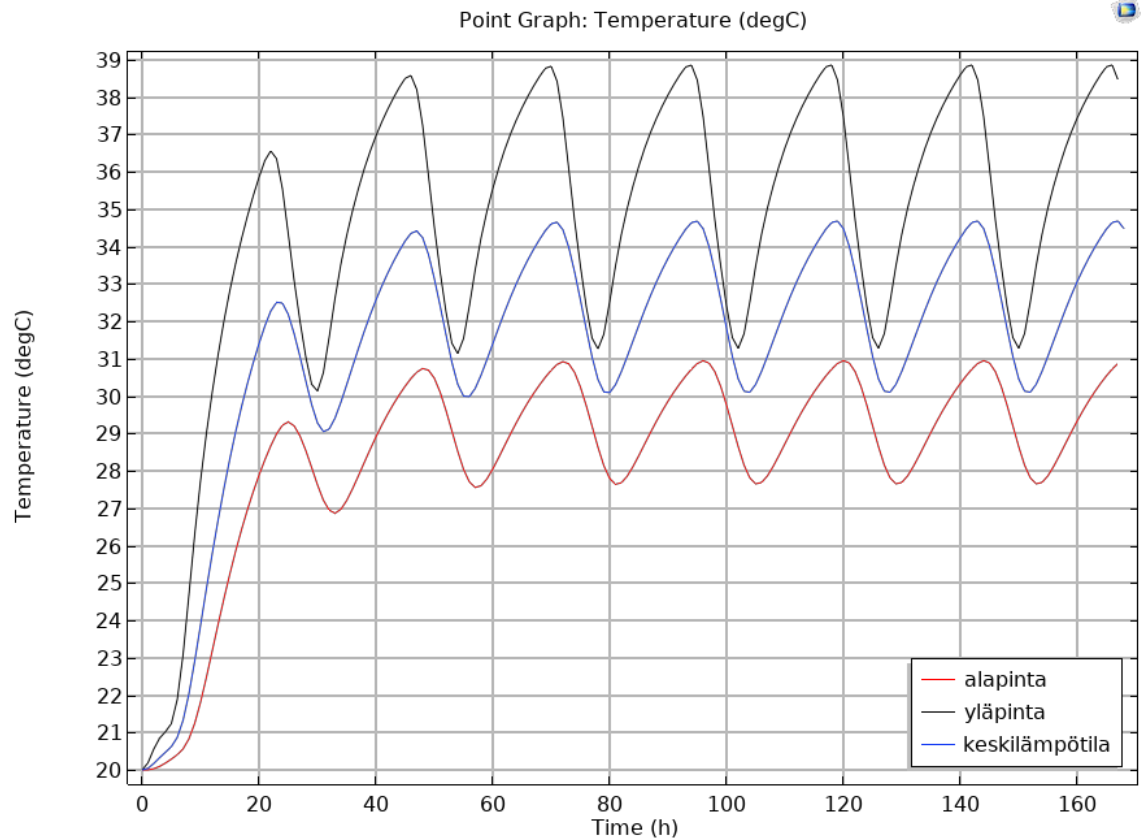
Talvi, 200 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



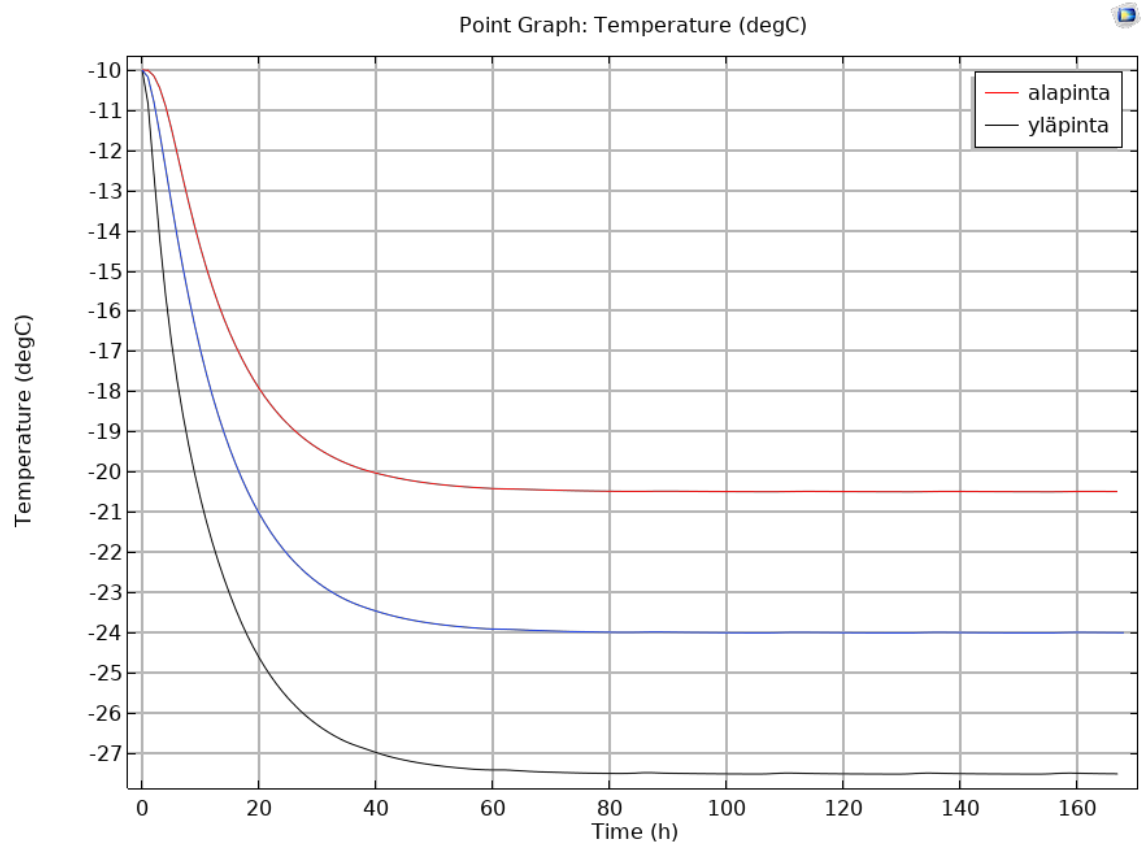
Kesä, 200 mm, asfaltti

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



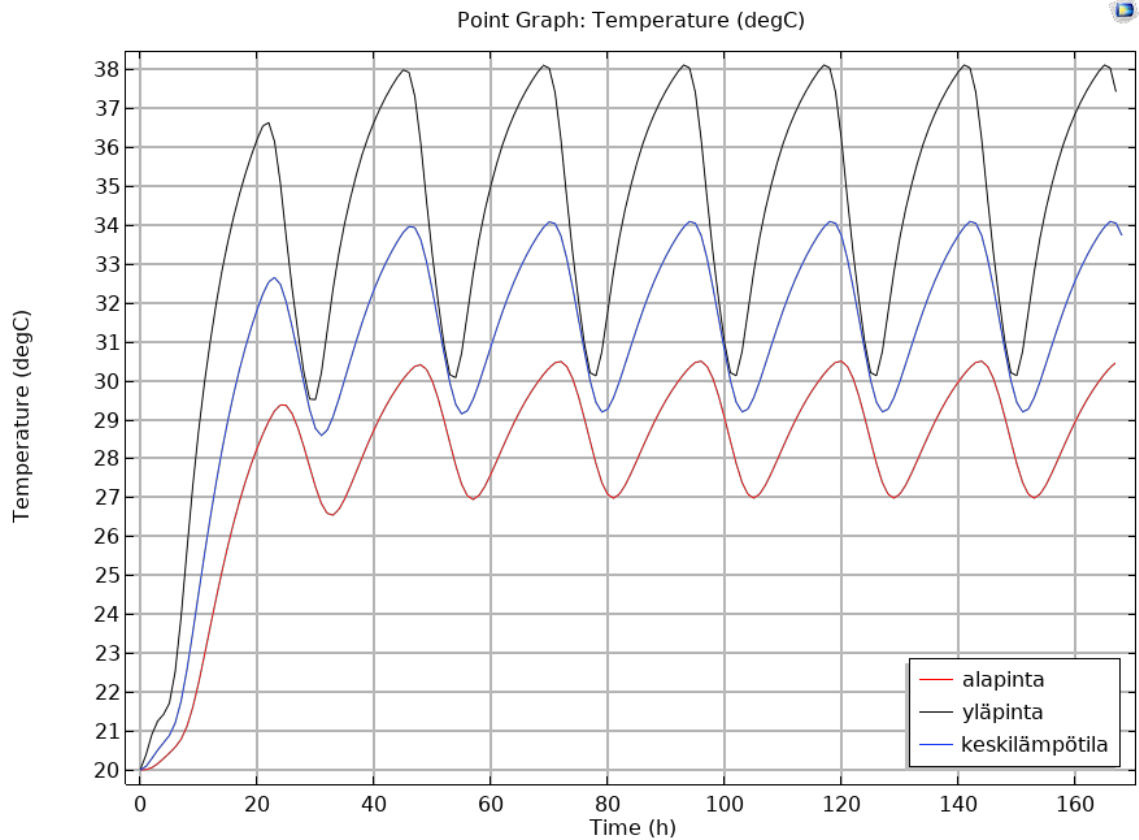
Talvi, 200 mm, asfaltti

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



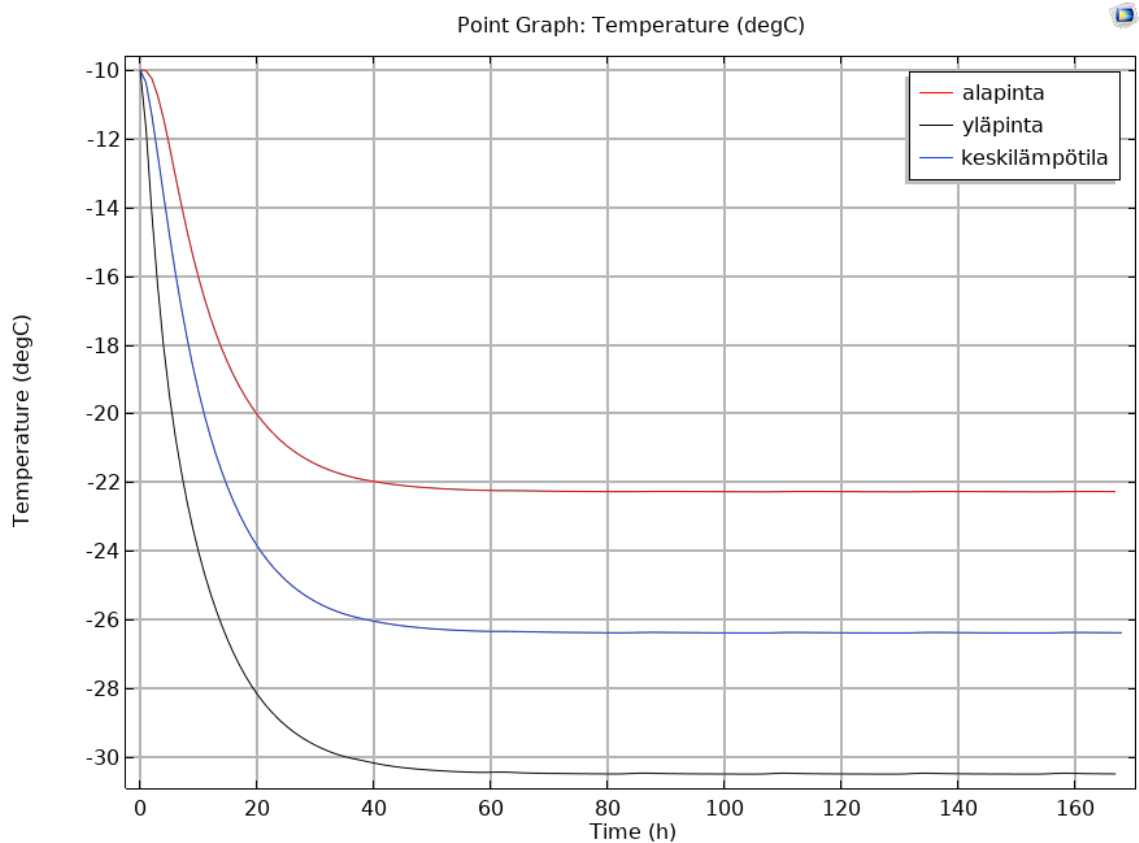
Kesä, 200 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



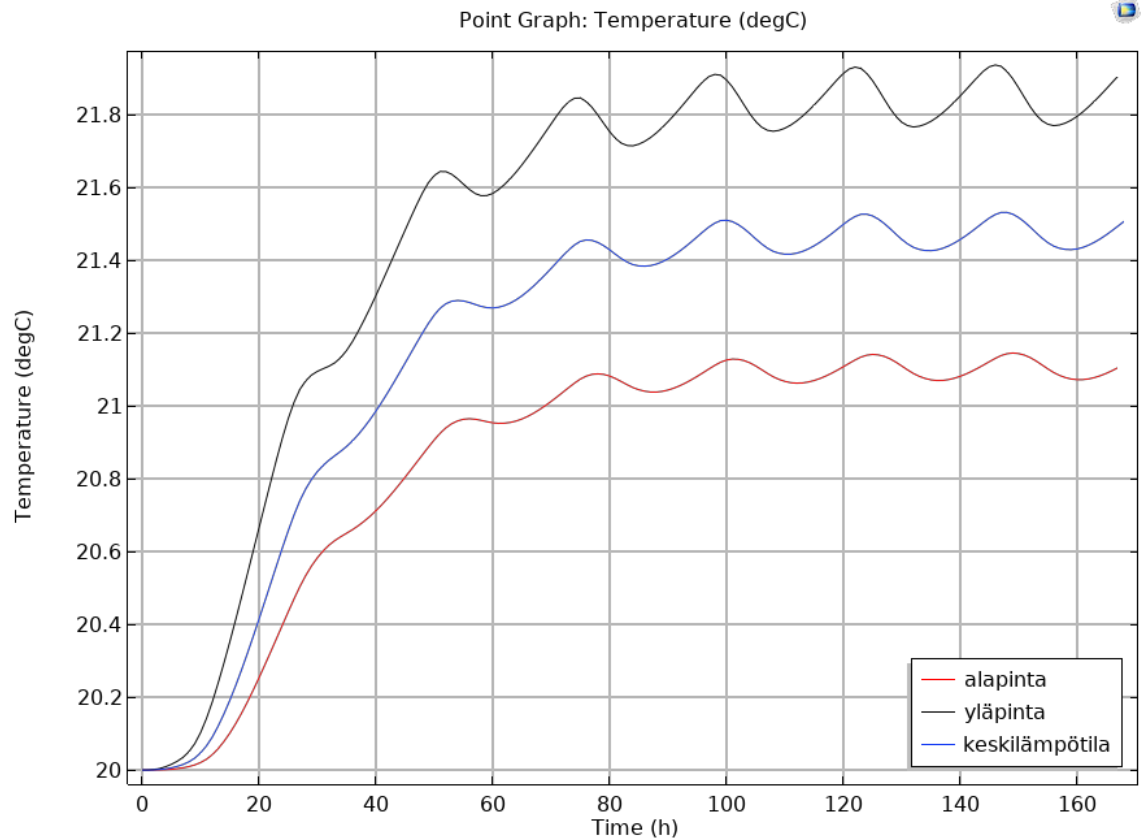
Talvi, 200 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



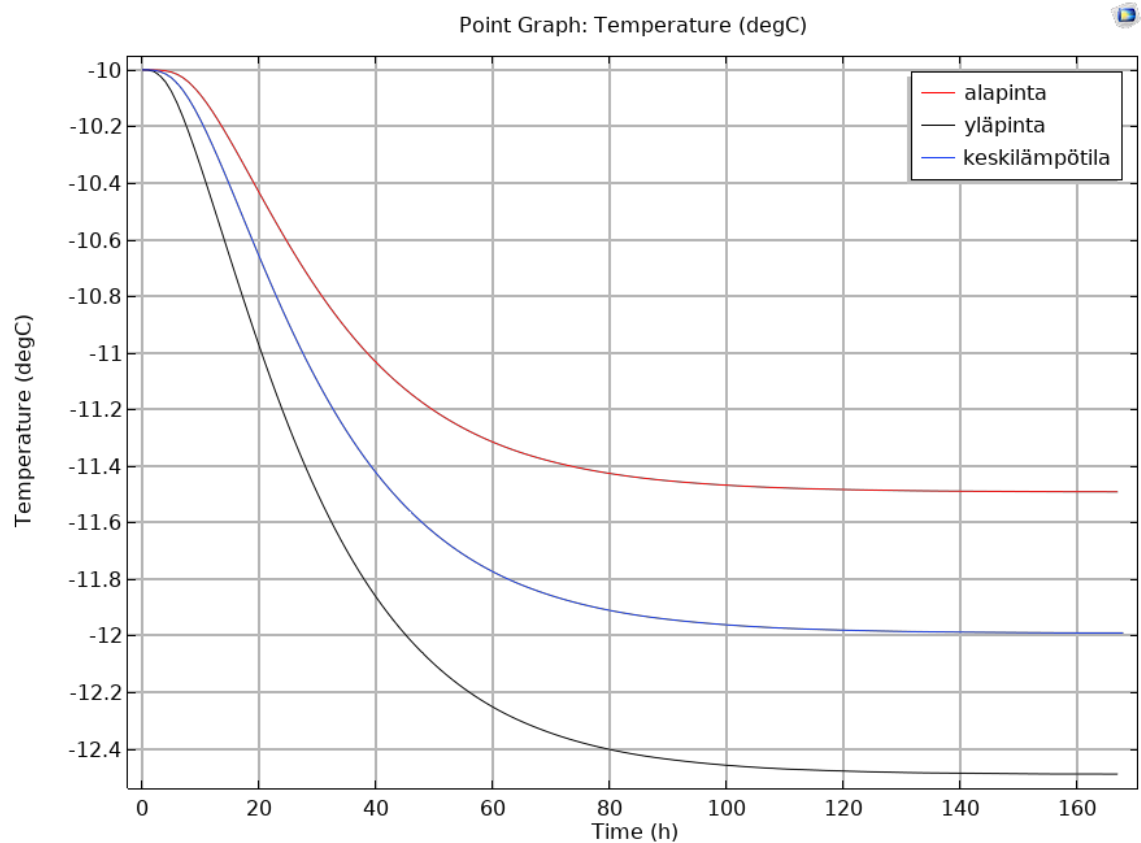
Kesä, 200 mm, nurmikko

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



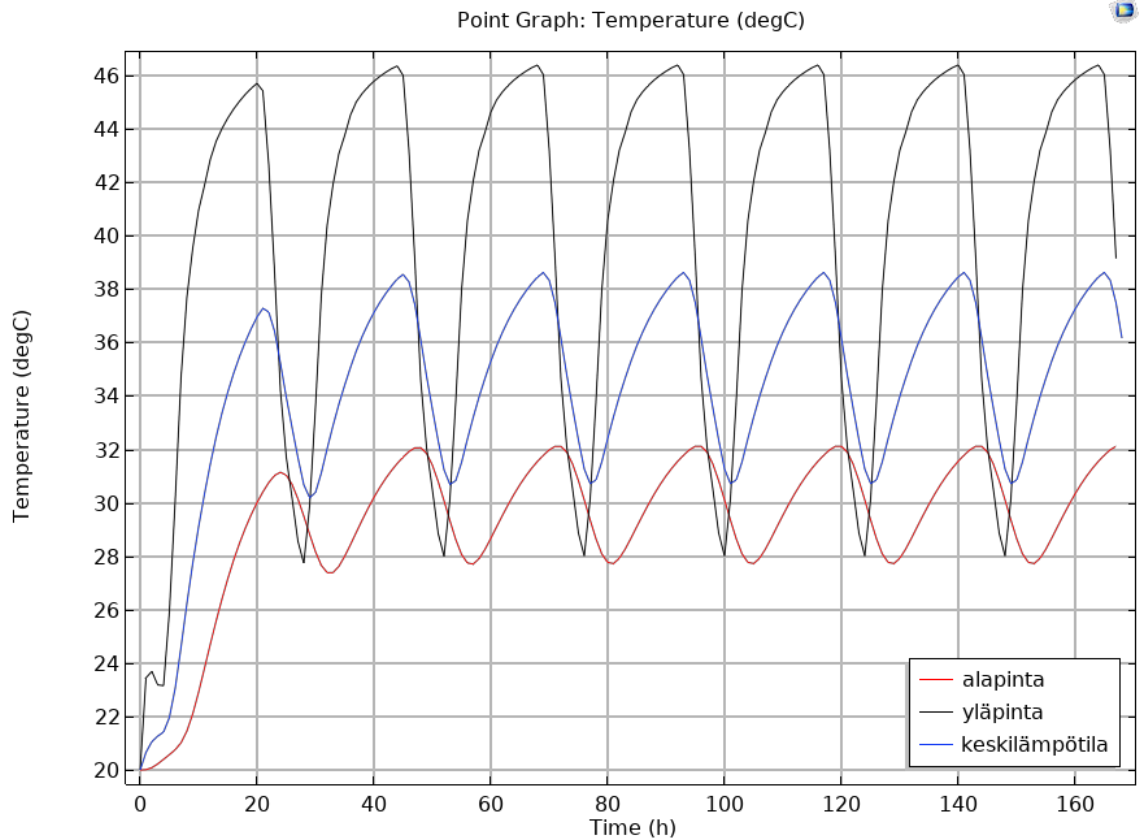
Talvi, 200 mm, nurmikko

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



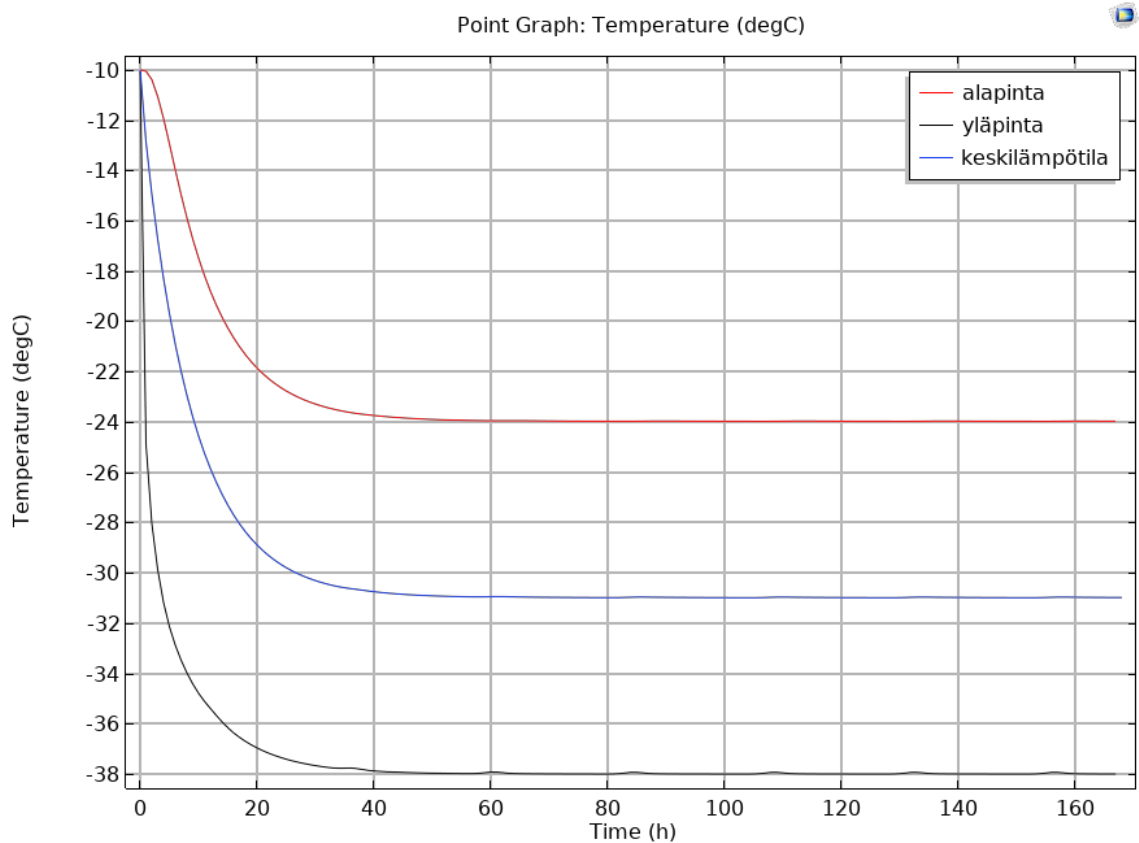
Kesä, 300 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



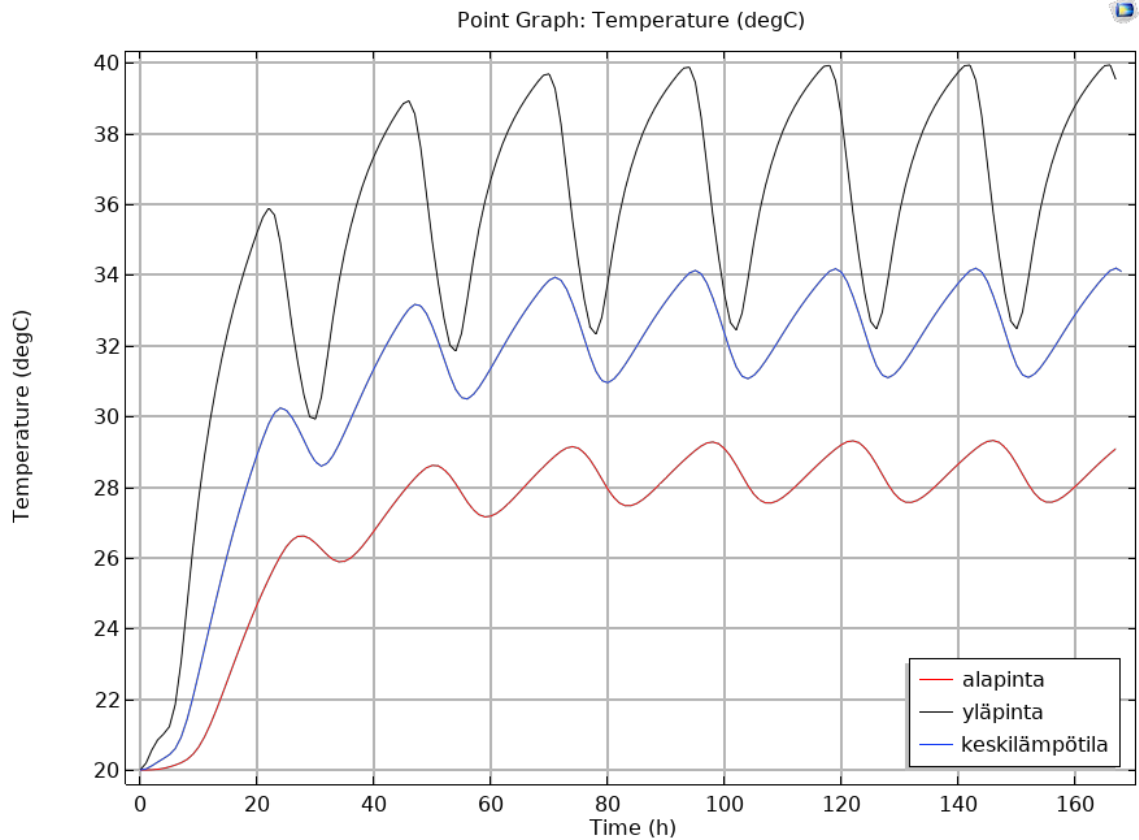
Talvi, 300 mm, ei pintarakenteita

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



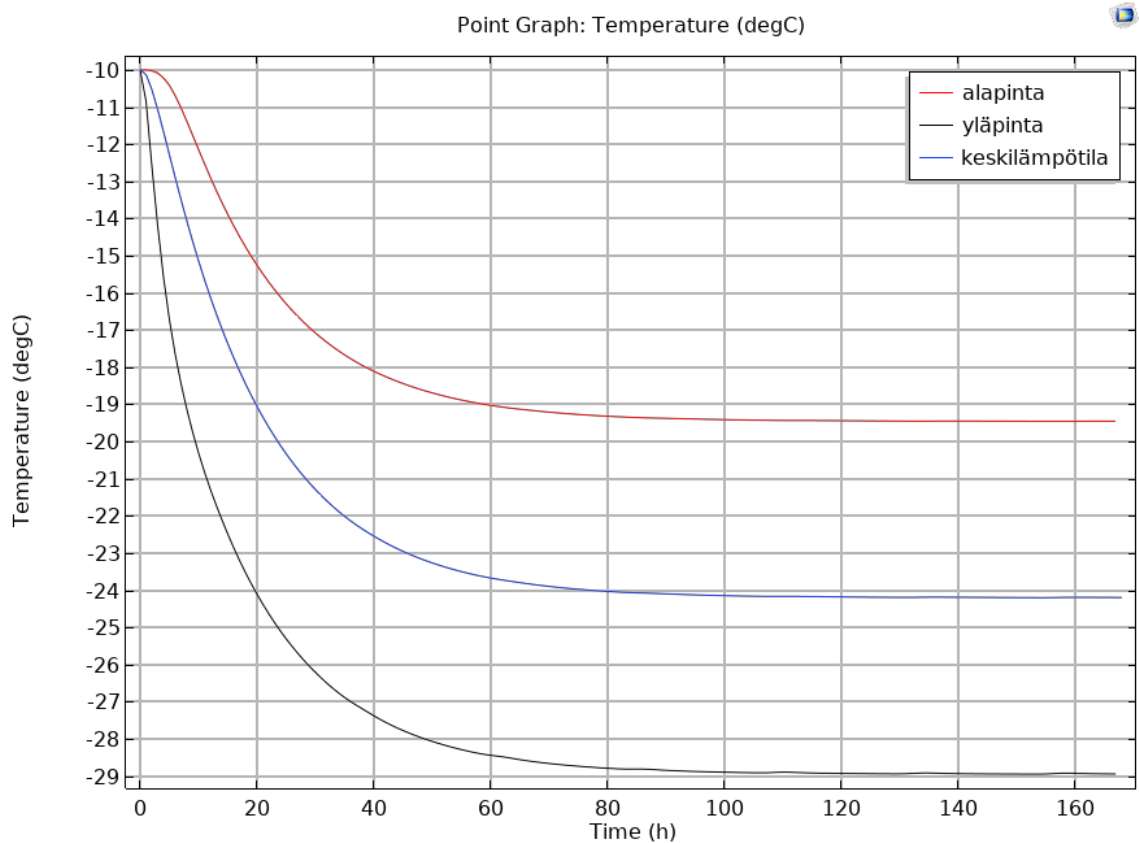
Kesä, 300 mm, asfaltti

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



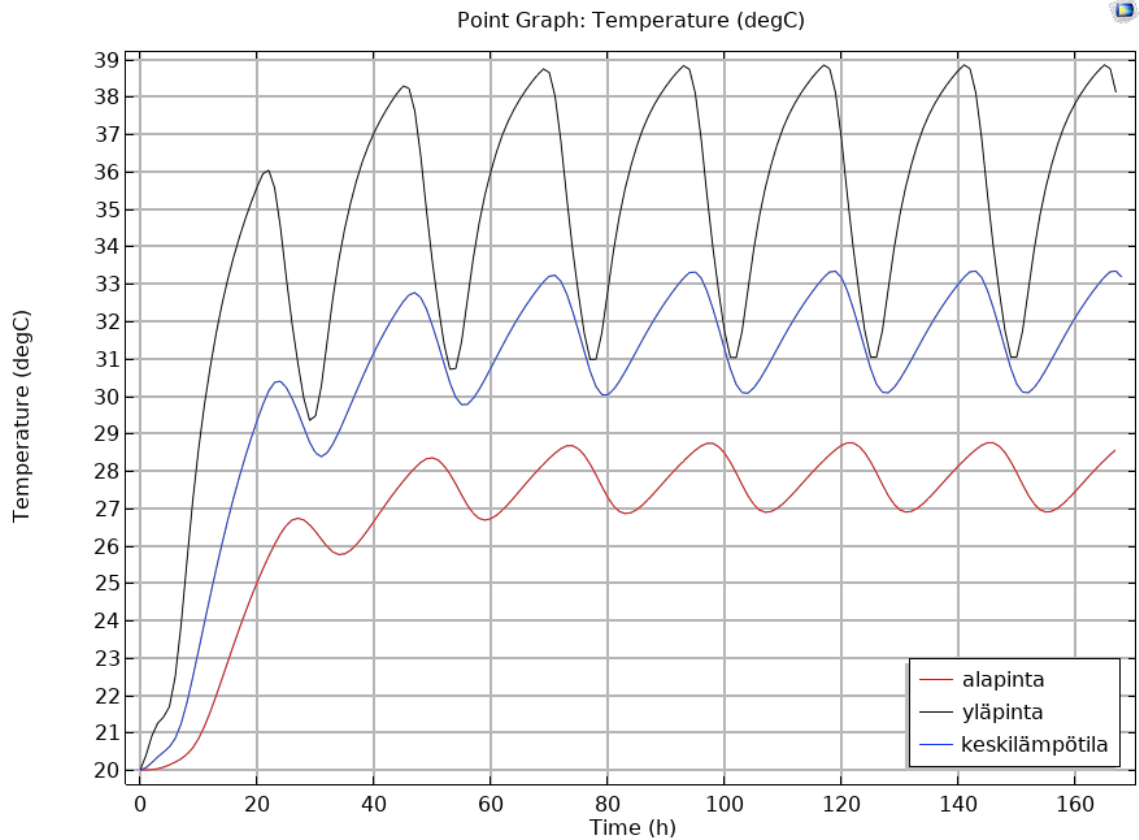
Talvi, 300 mm, asfaltti

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



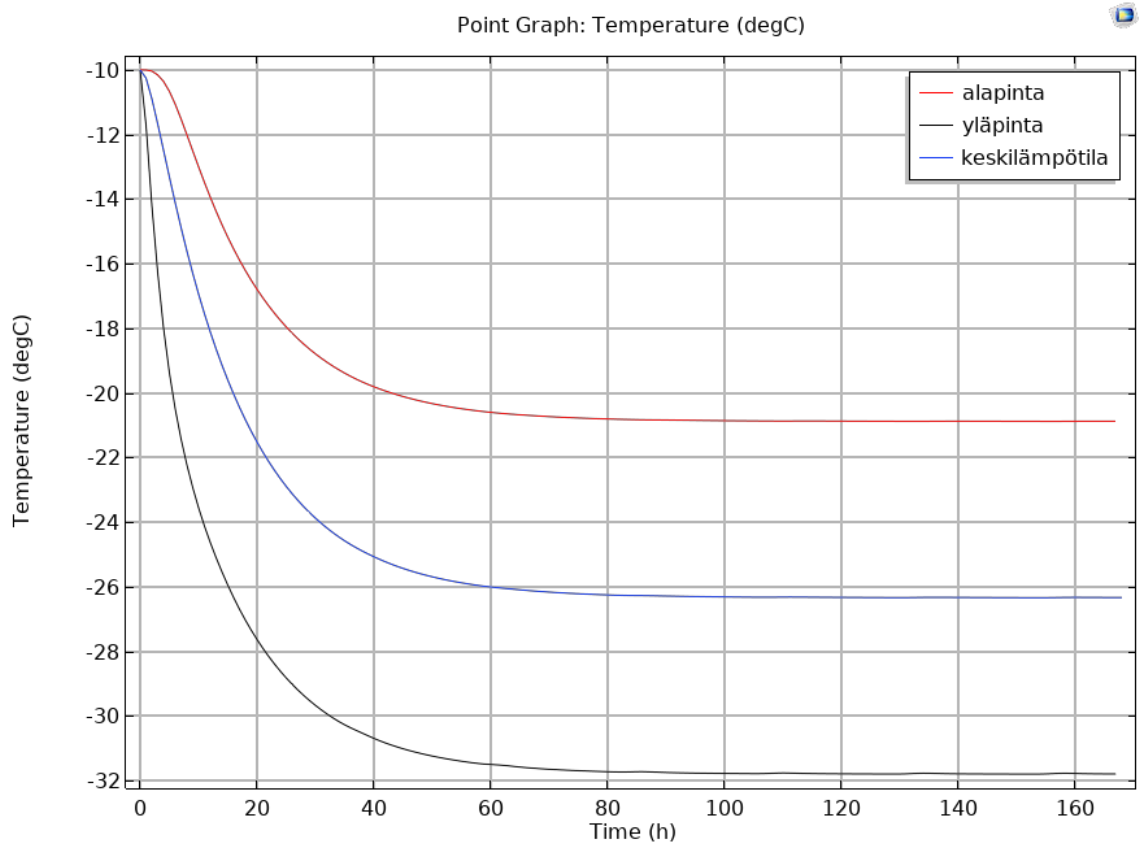
Kesä, 300 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



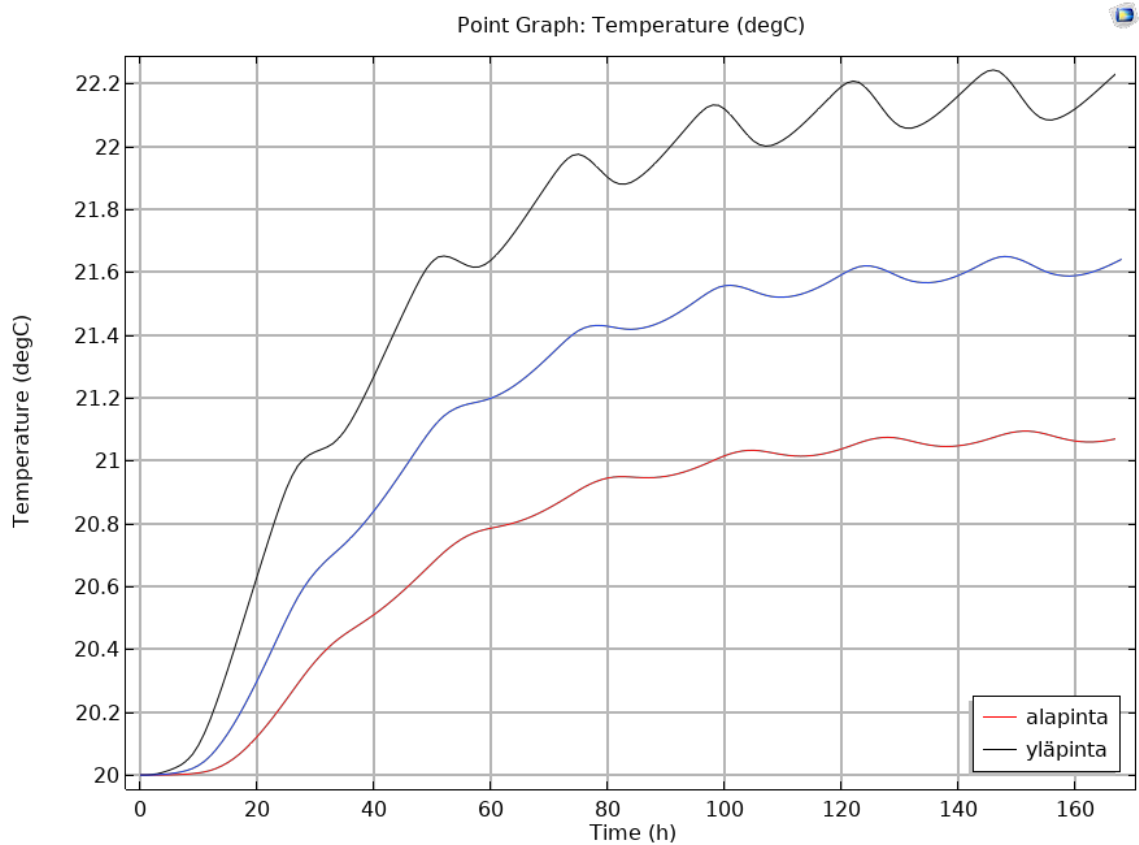
Talvi, 300 mm, kiveys

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



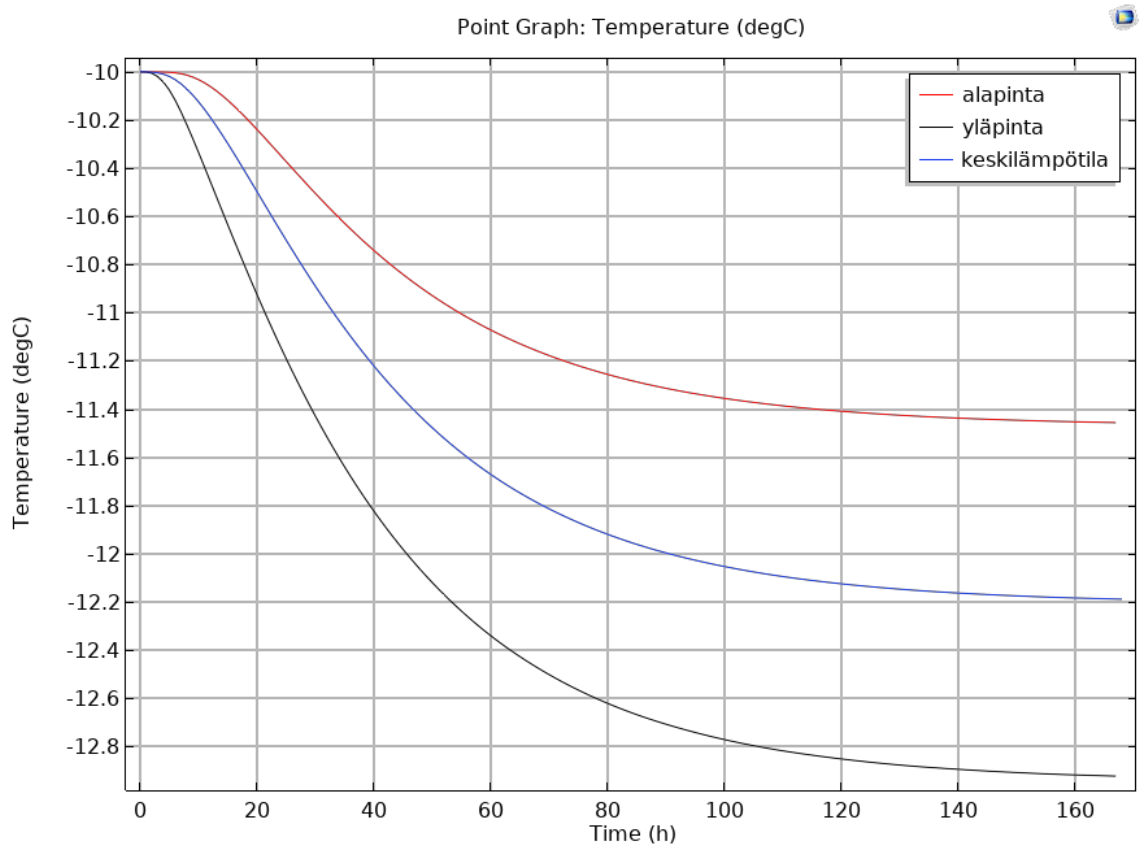
Kesä, 300 mm, nurmikko

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:



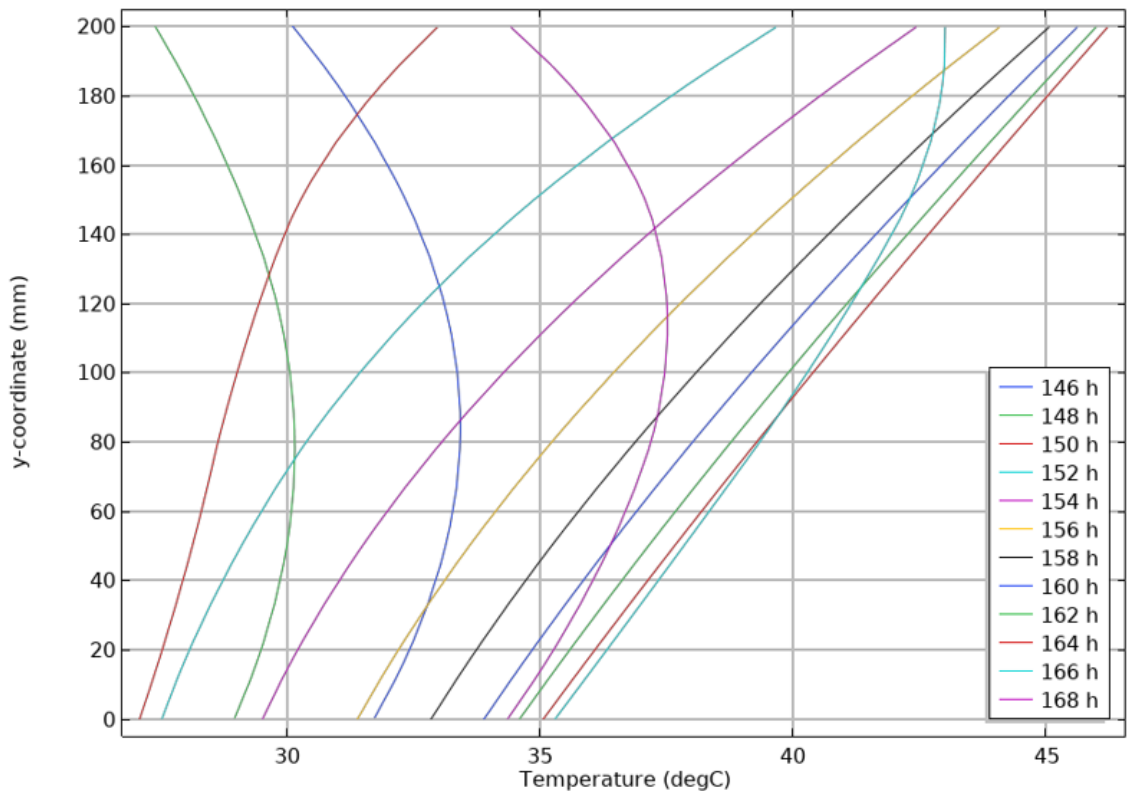
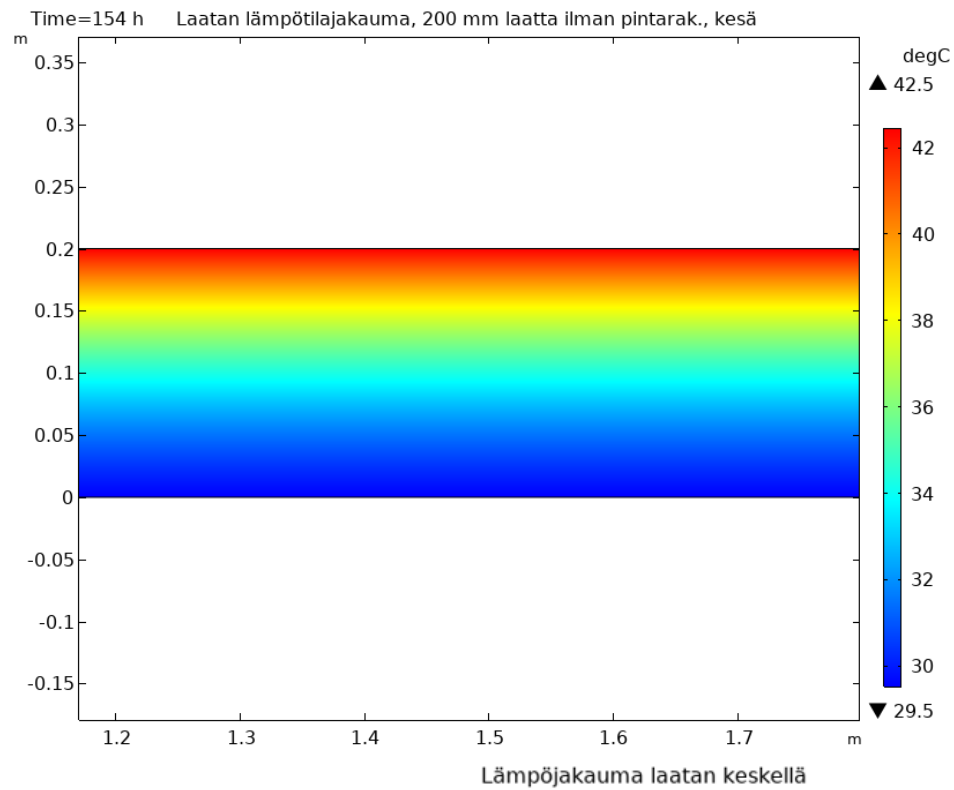
Talvi, 300 mm, nurmikko

Laatan pintojen lämpötilat ja laatan keskilämpötila:

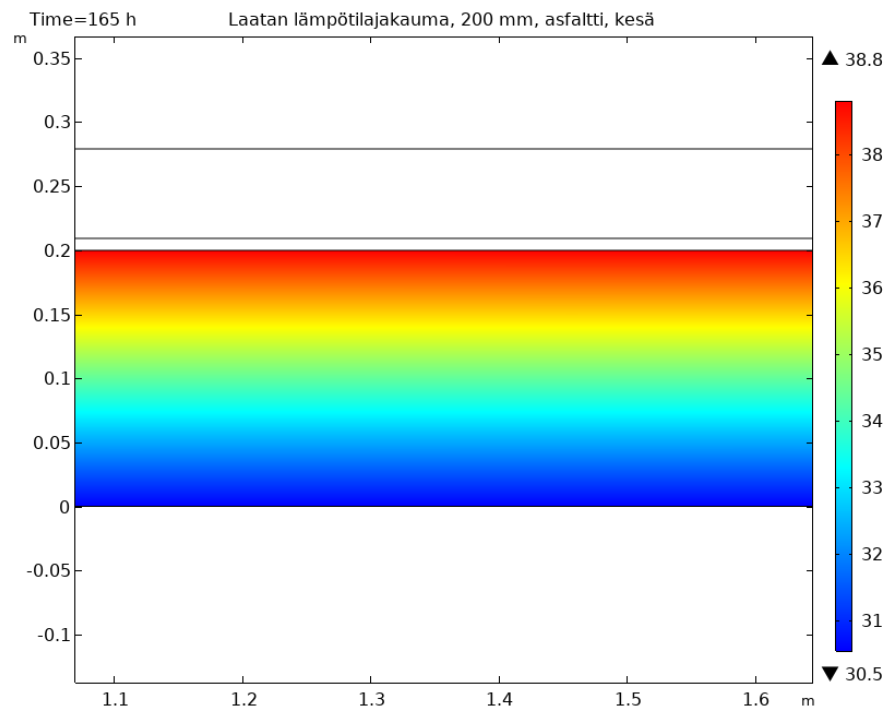


LIITE 6: LAATTOJEN LÄMPÖTILAJAUKAUMAT KESÄN ÄÄRILOSUHDESIMULAATIOIDEN VIIMEISELTÄ VUOROKAUDELTA

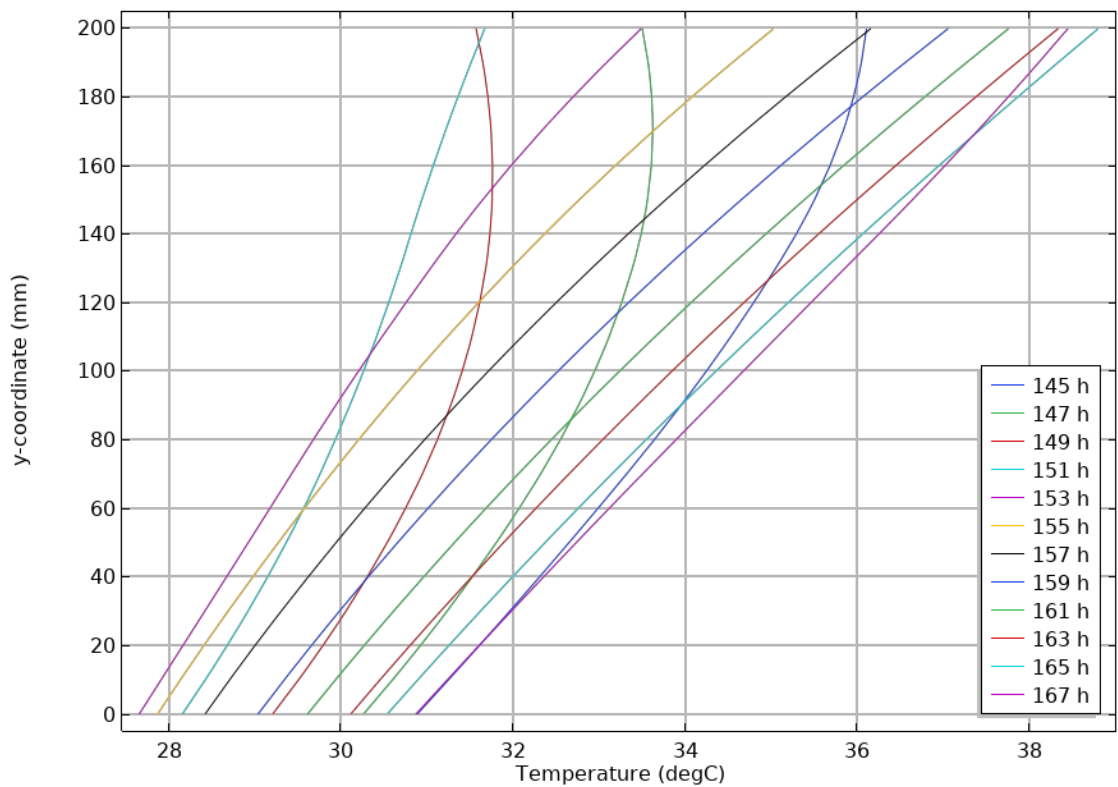
200 mm, ei pintarakenteita



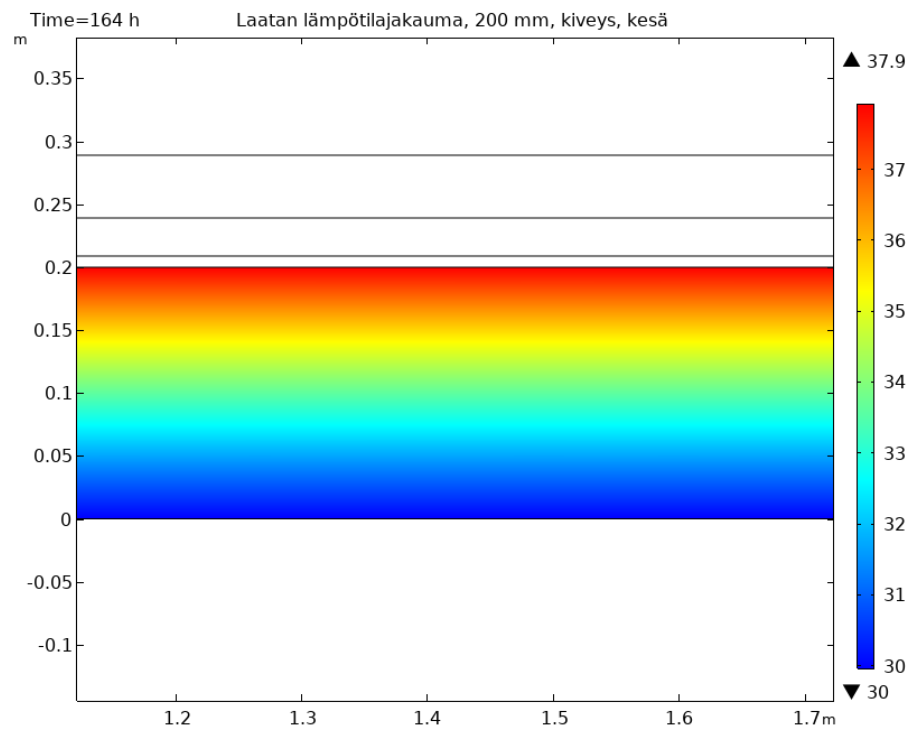
200 mm, asfaltti



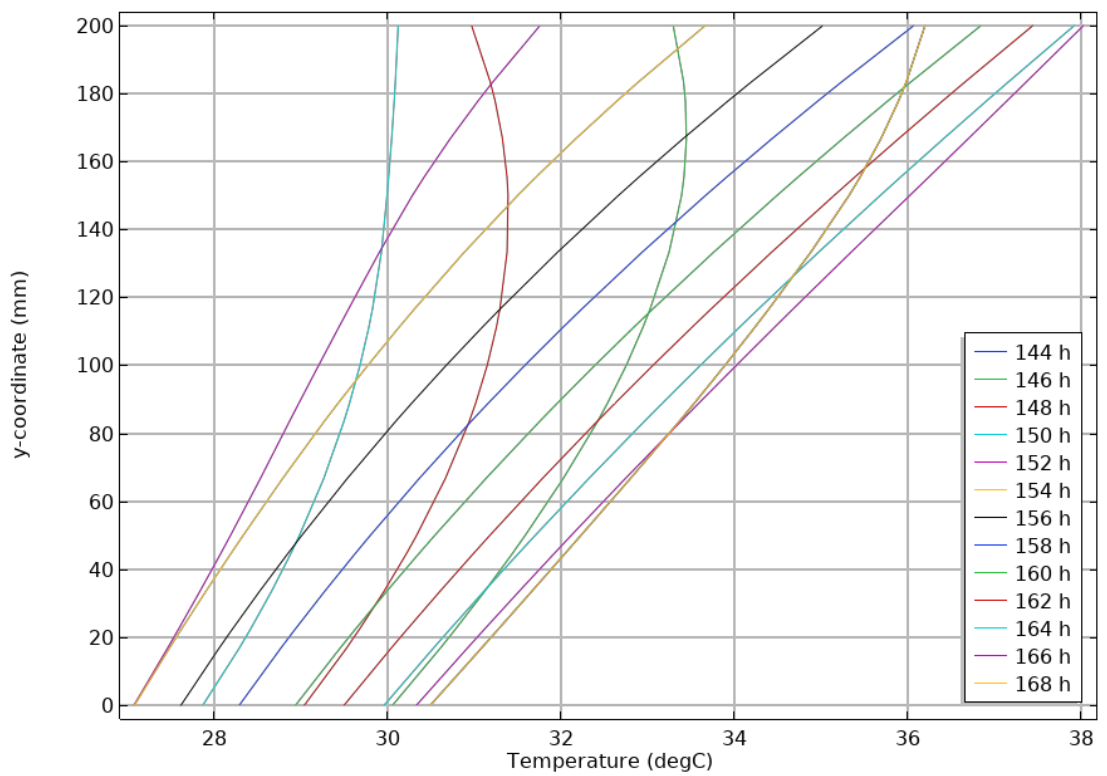
Lämpöjakauma laatan keskellä



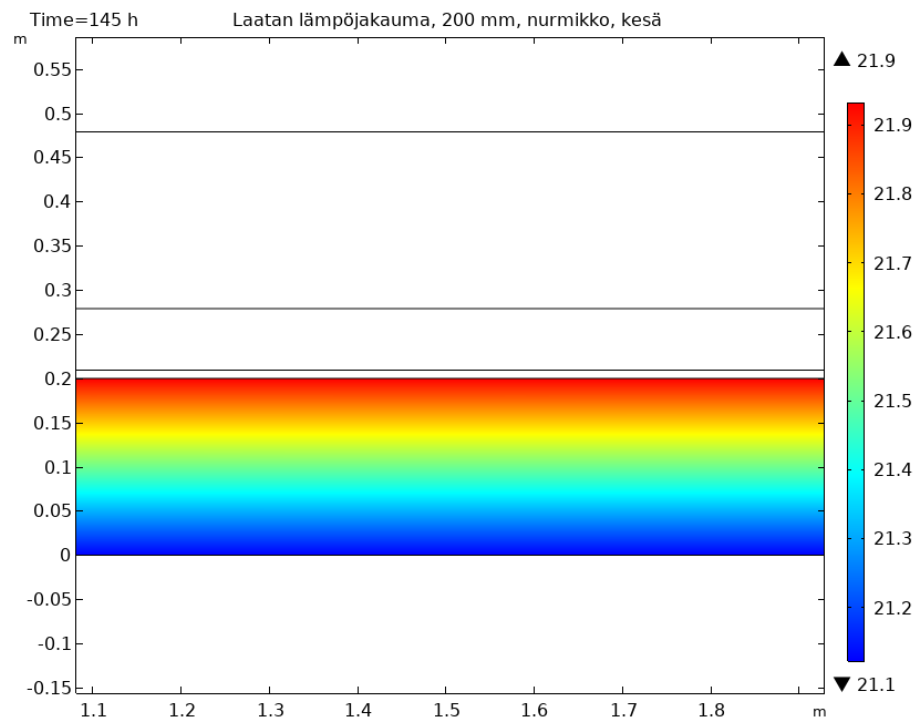
200 mm, kiveys



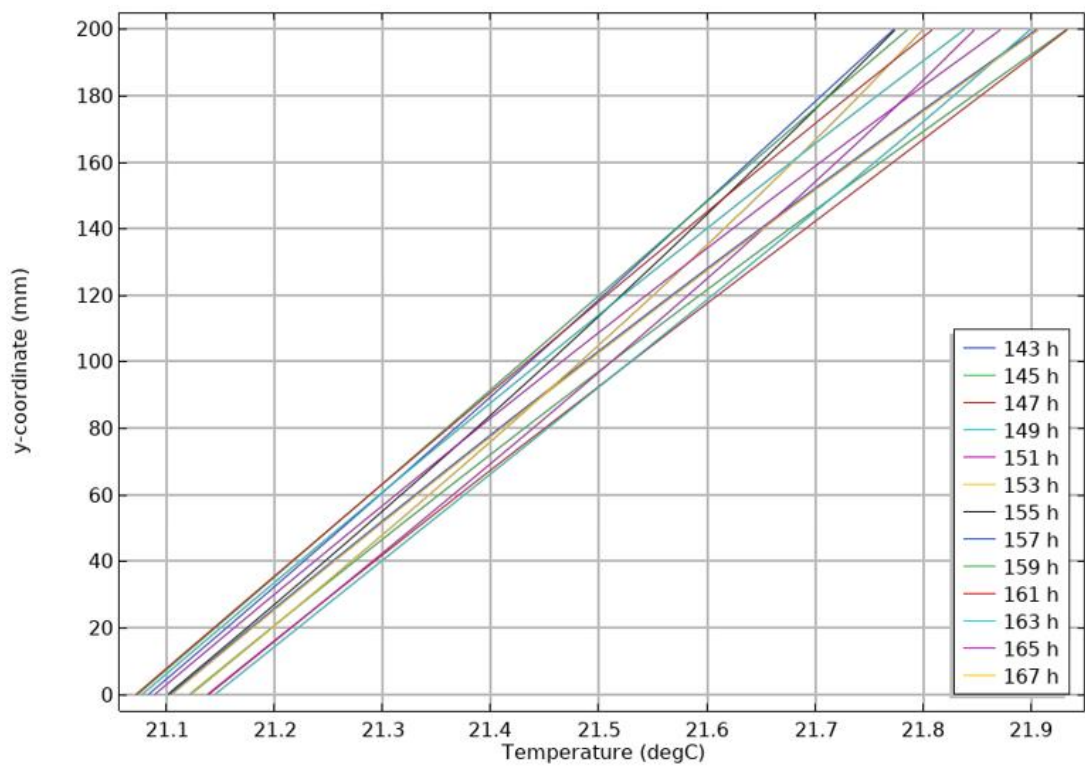
Lämpöjakauma laatan keskellä



200 mm, nurmikko

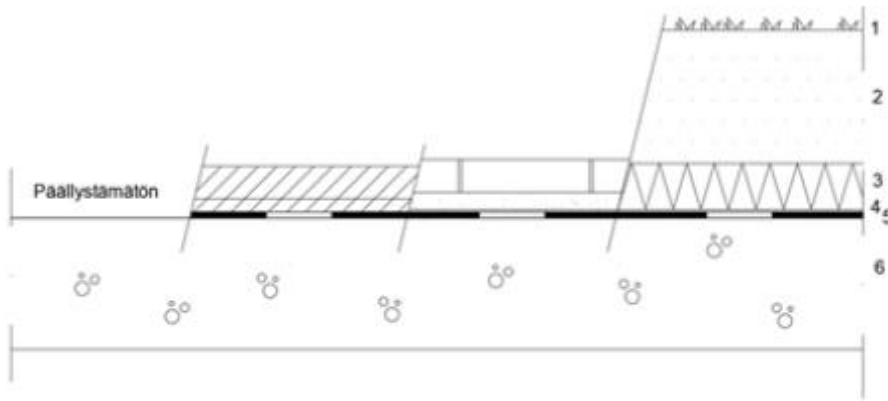


Lämpöjakauma laatan keskellä



LIITE 7: LAATAN LÄMPÖJAKAUMAN LASKENTA STANDARDIN EN 1991-1-5 MUKAAN

Pihakannen lämpöjakauman määrittäminen standardin EN 1991-1-5 mukaan



1	-	/ asfaltti 20+50 mm	/ kiveys 50 mm	/ nurmikko
2	-	/ -	/ asennushiekka 30 mm	/ multa 200 mm
3	-	/ -	/ -	/ XPS-eriste 70mm
4	-	/ -	/ salaojamatto	/ salaojamatto
5	-	/ kumibitumikermieristys n. 3x3 mm luokka VE80R	/ kumibitumikermieristys n. 3x3 mm luokka VE80R	/ kumibitumikermieristys n. 3x3 mm luokka VE80R
6	Kantava betonilaatta 200 mm, kallistettu >1:80			

Lämmönjohtavuudet:

$$\lambda_{betoni} := 2.3 \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_{asfaltti} := 0.7 \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_{hiekk} := 2.0 \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_{kiveys} := 1.65 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$\lambda_{multa} := 0.4 \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_{XPS} := 0.035 \frac{W}{m \cdot K} \quad \lambda_{kermi} := 0.23 \frac{W}{m \cdot K}$$

Paksuudet:

$$d_{betoni} := 200 \text{ mm} \quad d_{asfaltti} := 70 \text{ mm} \quad d_{hiekk} := 30 \text{ mm} \quad d_{kiveys} := 50 \text{ mm}$$

$$d_{multa} := 200 \text{ mm} \quad d_{XPS} := 70 \text{ mm} \quad d_{kermi} := 9 \text{ mm}$$

Pintavastukset kesällä (lämpövirran suunta alaspäin)

$$R_{si.k} := 0.17 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad R_{se.k} := 0.04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Pintavastukset talvella (lämpövirran suunta ylöspäin)

$$R_{si.t} := 0.10 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad R_{se.t} := 0.04 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Lämmönvastukset:

$$R_{betoni} := \frac{d_{betoni}}{\lambda_{betoni}} = 0.087 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad R_{asfaltti} := \frac{d_{asfaltti}}{\lambda_{asfaltti}} = 0.1 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{hiekk} := \frac{d_{hiekk}}{\lambda_{hiekk}} = 0.015 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad R_{kiveys} := \frac{d_{kiveys}}{\lambda_{kiveys}} = 0.03 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{multa} := \frac{d_{multa}}{\lambda_{multa}} = 0.5 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad R_{XPS} := \frac{d_{XPS}}{\lambda_{XPS}} = 2 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_{kermi} := \frac{d_{kermi}}{\lambda_{kermi}} = 0.039 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

Ei pintarakenteita:

Lämpötilat kesällä ($T_{\max}+T_4$):

$$T_{out} := 52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,k} + R_{betoni}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 47.69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,k}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 38.319 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = 43.004 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = 9.37 \text{ K}$$

Lämpötilat talvella:

$$T_{out} := -36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := -10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,t} + R_{betoni}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -31.418 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,t}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -21.456 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = -26.437 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = -9.962 \text{ K}$$

Asfaltti:

Lämpötilat kesällä ($T_{\max}+T_5$):

$$T_{out} := 62 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,k} + R_{betoni}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{asfaltti} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 44.748 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,k}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{asfaltti} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 36.373 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = 40.56 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = 8.375 \text{ K}$$

Lämpötilat talvella:

$$T_{out} := -36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := -10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,t} + R_{betoni}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{asfaltti} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -23.278 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,t}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{asfaltti} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -17.102 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = -20.19 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = -6.176 \text{ K}$$

Kiveys:

Lämpötilat kesällä ($T_{\max}+T_4$):

$$T_{out} := 52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,k} + R_{betoni}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{hiekkä} + R_{kiveys} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 41.56 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,k}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{hiekkä} + R_{kiveys} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 34.264 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = 37.912 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = 7.296 \text{ K}$$

Lämpötilat talvella:

$$T_{out} := -36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := -10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,t} + R_{betoni}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{hiekkä} + R_{kiveys} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -25.61 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,t}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{hiekkä} + R_{kiveys} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -18.35 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = -21.98 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = -7.261 \text{ K}$$

Nurmikko:

Lämpötilat kesällä ($T_{\max}+T_4$):

$$T_{out} := 52 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,k} + R_{betoni}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{XPS} + R_{multa} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 22.899 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,k}}{R_{si,k} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{XPS} + R_{multa} + R_{se,k}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = 21.918 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = 22.409 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = 0.981 \text{ K}$$

Lämpötilat talvella:

$$T_{out} := -36 \text{ } ^\circ\text{C} \quad T_{in} := -10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{yp} := T_{in} - \frac{R_{si,t} + R_{betoni}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{XPS} + R_{multa} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -11.757 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{ap} := T_{in} - \frac{R_{si,t}}{R_{si,t} + R_{betoni} + R_{kermi} + R_{XPS} + R_{multa} + R_{se,t}} \cdot (T_{in} - T_{out}) = -10.94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T := \frac{T_{yp} + T_{ap}}{2} = -11.349 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \Delta T_M := T_{yp} - T_{ap} = -0.817 \text{ K}$$