

Kalle Hakala

Maanvarainen villaeristeinen kuitubetonilattia

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriytyö

21.4.2015

Alkusanat

Tämän insinööriyön aihe saatiin Suomen Betonilattiyhdistykseltä ja työtä oli mukana toteuttamassa ja ohjaamassa yhdistyksen valitsema työryhmä. Työryhmään kuuluivat seuraavat henkilöt:

- Martti Matsinen, PiiMat Oy, toimitusjohtaja, Suomen Betonilattiyhdistyksen puheenjohtaja
- Jukka Sevón, Paroc Oy, kehityspäällikkö
- Veikko Leino, Sweco Rakennetekniikka Oy, osastopäällikkö
- Teuvo Meriläinen, Sweco Rakennetekniikka Oy, erikoisasiantuntija
- Vesa Anttila, Rudus Oy, kehityspäällikkö
- Harri Tikkinen, Keski-Suomen Lattiapinnoite Ky, toimitusjohtaja

Haluan kiittää Martti Matsista ja Jukka Sevónia työn ohjaamisesta ja koekohteen järjestykseen liittyvistä asioista. Kiitän Veikko Leinoa ja Teuvo Meriläistä ohjauksesta ja rakennetekniikan asiantuntemuksesta. Kiitän Vesa Anttilaa ja Harri Tikistä projektin alkupuolella saaduista kommentteista. Lisäksi kiitän Metropolia AMK:n puolesta ohjaavana opettajana toiminutta Jouni Kalliomäkeä.

Haluan kiittää myös perhettä, sukulaisia ja ystäviä tuesta ja ymmärryksestä aikaa vievän projektin edetessä.

Helsingissä 29.4.2015

Kalle Hakala

Tekijä Otsikko	Kalle Hakala Maanvarainen villaeristeinen kuitubetonilattia
Sivumäärä Aika	84 sivua + 3 liitettä 21.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Työryhmän nimittämä ohjaaja Veikko Leino Ohjaajaopettaja Jouni Kalliomäki
<p>Tämän opinnäytetyön toimeksianto saatiin Suomen Betonilattiaiyhdistykseltä ja mukana toteutuksessa oli Betonilattiaiyhdistyksen kokoama työryhmä. Opinnäytetyössä perehdyttiin maanvaraisten betonilaattojen toimintaan kuormitettuina rakenteina sekä rakennusfysikaalisesti. Aiheen lähtökohtana oli työryhmän idea uudenaikaisesta maanvaraisesta lattiarakenteesta, jossa laatan eristeenä ja alustan osana toimii betonisandwichelementeissä käytetty Paroc Oy:n COL 40g tuuletusurilla varustettu kivivillalamelli. Alun perin projekti sai alkunsa ideasta, että kyseisellä eristeellä voitaisiin saavuttaa joitain hyötyjä maanvaraisissa betonilattioissa.</p> <p>Työn tavoite oli selvittää rakennelaskelmin ja koekohteesta saatujen tulosten avulla tutkitavan rakennetyypin toiminta asuinpientalon lattiana staattisen sekä rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta. Kirjallisuustutkimuksella selvitettiin maanvaraisille betonilaatoille Suomessa yleisesti asetettuja laatuvaatimuksia, maanvaraisten betonilaattojen voimasuureiden laskentamenetelmiä, kuituraudoitteisten betonilaattojen mitoituskäytäntöjä ja maanvaraisten laattojen rakennusfysikaalisen toiminnan perusteita.</p> <p>Rakennelaskelmilla selvitettiin kirjallisuustutkimuksiin pohjautuen tutkimusrakenteen laskennallinen toiminta asuinpientalon lattiana perus kuormitustapauksissa sekä rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta. Koekohteen tutkimuksilla pyrittiin saamaan mahdollisimman kattavaa tietoa villaeristeen vaikutuksesta rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan.</p> <p>Rakennelaskelmien tulokseksi saatiin selville, että tutkitavan rakenteen laatan paksuutta voidaan pienentää jopa 50 mm:iin yleisestä pientalojen maanvaraisten lattioiden laattapaksuudesta 80 mm. Pääteltiin rakennusfysikaaliseen toimintaan perustuen, että tutkimuksen rakenteessa nurkkien nousut jäävät pienemmiksi kuin solumuovieristeisissä lattioissa. Tämä yhdessä kuituraudoituksen kanssa mahdollistaa laatan paksuuden pienentämisen. Koekohteesta saatujen kosteus- ja lämpötilatietojen perusteella tämä päätelmä vahvistui entisestään, sillä koerakenteen laatta kuivui solumuovieristeen päälle valettuun vertailulaattaan verrattuna huomattavasti nopeammin. Alustan ja laatan valmistustoleranssit on tosin huomioitava entistä tarkemmin alle 80 mm:n laattaa suunniteltaessa ja toteutettaessa.</p>	
Avainsanat	maanvarainen, lamellivilla, kuitubetoni, lattia

Author Title	Kalle Hakala Stone Wool Insulated Fiber Reinforced Concrete Floor on Ground
Number of Pages Date	84 pages + 3 appendices 21 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Veikko Leino, Project Counselor Jouni Kalliomäki, Principal Lecturer
<p>The assignment of this thesis was given by Concrete Floor Association of Finland and there was a group of specialists defined by the association involved in the implementation. This thesis was to examine the principles of concrete slabs on ground loaded by external and internal loads. The building physics of slabs-on-ground was also examined. This project was originally started by an idea to explore new applications for Paroc COL 40g stone wool insulation. This insulation material is typically used in concrete sandwich wall panels and it has ventilation gaps in it to dry the structure if water or excessive humidity occurs.</p> <p>The main goal of this thesis was to clarify with calculations and knowledge from the experiment structure what kind of effects static loading and building physics have on the researched structure type. One of the research methods was literature review which included, for example, a clarification of common quality requirements used in Finland for concrete floors. Different methods to calculate structural forces were found during the literature review. Dimensioning of fiber reinforced concrete and the basic principles of building physics were also looked into in the Finnish literature.</p> <p>The researched structure was examined with structure calculations based on literature review. The structure was calculated under the influence of basic load types and combinations that were noted to be applicable. By examining the experiment structure built in Pieksämäki it was crucial to get as much comprehensive research material as possible. Real life experiments are the best way to get information on something new. Calculations can be then used to support or to question the received results.</p> <p>The results derived from the structure calculations and building physics reviews propose that this new on-ground floor structure with stone wool insulation could be the solution for shorter drying times of the concrete slab. It is also to be noticed that on-ground slab could be just 50 mm thick instead of 80 mm in single family houses without a great risk of corners lifting up. Stone wool's water permeability and ventilation allow water and humidity to flow from the concrete to the ground and along the ventilation pipes into the outside air. However, the substrate tolerances must be taken into account more accurately with thinner slabs.</p>	
Keywords	stone wool, fiber reinforced concrete, slab on ground

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Maanvaraiset betonilattiat	2
2.1	Betonilattioiden luokittelu ja siihen liittyvät laatuvaatimukset	2
2.1.1	Suoruuden ja tasaisuuden määrittäminen	3
2.1.2	Kulutuskestävyys	3
2.1.3	Maanvaraisen lattian halkeilu	5
2.2	Mitoitusperiaatteet ja kuormitukset	7
2.3	Mitoitettavien voimasuureiden määrittäminen	9
2.3.1	Alustaluku ja sen määrittäminen	10
2.3.2	Käsinlaskumenetelmä pistekuormista aiheutuville rasituksille	18
2.3.3	FEM-laskenta	26
2.3.4	Kitkavoiman laskenta	38
2.4	Lattian mitoitus kuituraudoitteisena	40
2.5	Rakennusfysikaalinen toiminta	45
3	Maanvarainen villaeristeinen kuitubetonirakenne	51
3.1	Vertailu tankoraidoitettuun EPS-eristeiseen betonilattiaan	54
3.1.1	Rakennelaskelmat	56
3.1.2	Rakennusfysikaalinen toiminta	57
3.1.3	Lattialämmitys ja lattioiden kustannuserot	62
4	Koekohde	65
4.1	Koekohteen tutkimusten tavoitteet ja rajaukset	66
4.2	Koejärjestelyt ja toteutussuunnitelmat	67
4.3	Koekohteen tulokset	73
5	Johtopäätökset ja yhteenveto	79
	Lähteet	83

Liitteet

Liite 1. Tutkimusrakenteen rakennetyyppi ja tuuletusperiaate

Liite 2. Vertailulaskelmat

Liite 3. Koekohteen kosteus- ja lämpötilatarkastelut

Lyhenteet

FEM	<i>Finite elements method</i> . Elementtimenetelmä, jolla voidaan määrittää staattisen rakenteen siirtymät ja sitä kautta rakenteiden sisäiset voima- masuureet.
EPS	<i>Expanded polystyrene</i> . Paisutettu polystyreeni. Puhekielessä tunnetaan nimellä styrox.
XPS	<i>Extruded polystyrene</i> . Suulakepuristettu polystyreeni
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto

1 Johdanto

Tämän insinööriyön aihe saatiin Suomen Betonilattiyhdistyksen toimeksiannosta ja sitä on ollut mukana toteuttamassa BLY:n kokoama työryhmä. Aihe pitää sisällään työryhmän kehittämän idean uudeltaisesta maanvaraisesta betonilattiarakenteesta, joka on eristetty betonisandwichelementeistä tutulla Paroc Oy:n COL 40g kivivillalla ja betonilaatta on raudoitettu rakenteellisilla kuiduilla. Lattiaan asennetun eristelamellin alapinnassa on tuuletusurat, joiden vaikutus rakenteen toimintaan oletetaan olevan positiivinen.

Työn tavoite on selvittää rakennelaskelmin ja koekohteesta saatujen tulosten avulla tutkittavan rakennetyypin toiminta asuinpientalon lattiana staattisen sekä rakennusfysikaalisen toiminnan kannalta. Kirjallisuustutkimuksena selvitetään maanvaraisille betonilaatoille yleisesti asetettuja laatuvaatimuksia, maanvaraisten betonilaattojen voimasuurteiden laskentamenetelmiä, kuituraudoitteisten betonilaattojen mitoituskäytäntöjä ja maanvaraisten laattojen rakennusfysikaalisen toiminnan perusteita. Rakennelaskelmilla selvitetään kirjallisuustutkimuksiin pohjautuen rakenteen laskennallinen toiminta asuinpientalon lattiana. Selvitetään rakenteen mahdollisia etuja ja haittapuolia verrattuna normaaliin pientalon maanvaraiseen lattiatyyppiin. Koekohteen tutkimuksilla pyritään saamaan mahdollisimman kattavaa tietoa villaeristeen vaikutuksesta rakenteen rakennusfysikaaliseen toimintaan. Lopuksi yhdistetään eri tutkimusmenetelmillä saadut tiedot ja ehdotetaan rakenteen jatkotutkimukset.

Rajataan kirjallisuustutkimuksen laattojen käsittely ainoastaan pientalojen ja kevyesti kuormitettujen lattioiden tarkasteluun. Tutkimuksessa käsiteltävät maanvaraiset laatat ovat aina eristeen päälle valettuja, joten suoraan maa-ainesten päälle tukeutuvat maanvaraiset laatat jätetään kokonaan pois tarkasteluista. Lisäksi käsitellään vain laattoja, jotka ovat kaikkialta irti pystyrakenteista ja näin ollen tukeutuvat pelkän elastisen alustan päälle. Lattioiden luokittelusta ja laatuvaatimuksista sekä kuitubetonin mitoituksesta esitetään vain Suomessa tehdyt uusimmat ohjeet. Rakennelaskelmat suoritetaan pääosin murtorajatilassa, mutta mainitaan taipumien ja pohjapaineiden vaikutus kokonaisuuden toimivuuteen. Tutkimuksen kokeellinen osio rajataan Pieksämäellä sijaitsevaan koekohteeseen tehtyihin suunnitelmiin ja koekohteella suoritettuihin toimenpiteisiin.

2 Maanvaraiset betonilattiat

2.1 Betonilattioiden luokittelu ja siihen liittyvät laatuvaatimukset

Suomessa Betoniyhdistys yhdessä Betonilattiyhdistyksen kanssa on kehittänyt betonilattioiden tärkeimmät laatuvaatimukset huomioivan betonilattioiden luokitusjärjestelmän. Sen tarkoituksena on esittää valmiin betonilattian yleisimmät laatutekijät siten, että ne ovat sovitulla tavalla mitattavissa. Laatutekijät on valittu lattian käytön kannalta oleellisesti ja ne esitetään luokiteltuina vaativuuden mukaan taulukossa 1.

Taulukko 1. Betonilattioiden yleisimmät laatutekijät ja niiden luokittelu minimilaatutason mukaan [1, s. 14.]

Laatutekijät	Luokittelu, vaativuus kasvaa vasemmalle päin			
Suoruus	A ₀	A	B	C
Kulutuksenkestävyys	1	2	3	4
Sallittu halkeamaleveys	I	II	III	

Luokitusjärjestelmä toimii siten, että lattian suunnittelija sekä tilaaja määrittelevät käyttötarkoitus ja toteutettavuus huomioiden lattian vähimmäislaatutason. Tämä lattian luokka merkitään asiakirjoihin ja piirustuksiin kirjain – numero – roomalainen numero - yhdistelmänä. Esimerkiksi A – 2 – II -merkinnästä voidaan lukea lattian suoruuden minimivaatimukseksi luokka A, kulutuskestävyydeksi vähintään luokan 2 mukainen tulos mittauksissa ja luokan II mukaisesti suurimmat sallitut halkeamaleveydet.

Mikäli lattian toteutus on erityisen vaativa, voidaan luokitusmerkinnän perään merkata kirjain T, joka ei oikeastaan ole lattian laatutekijä vaan lattiaurakoitsijan pätevyyttä määrittävä varmistus. Merkintä voisi tällöin olla esimerkiksi A – 1 – I – T. Käytännössä merkintä asettaa vaatimuksen, että aloituspalaverissa lattiaurakoitsijan edustaja omaa Suomen Betoniyhdistyksen ja Suomen Betonilattiyhdistyksen toteaman, voimassa olevan betonilattiatyönjohtajan pätevyyden. Kyseisen henkilön on myös oltava rakennuspaikalla työn aloitusvaiheessa ja muina aikoina saatavissa paikalle kohtuajassa. Pätevyyden omaava henkilö voi olla myös pääurakoitsijan tai rakennuttajan palkkaama, jatkuvasti paikalla oleva valvoja. [1, s. 14 – 15.]

2.1.1 Suoruuden ja tasaisuuden määrittäminen

Suunniteltu käyttötarkoitus ja esimerkiksi vedenpoisto-ominaisuudet kaltevissa lattioissa ja lattiakaadoissa asettavat vaatimuksia lattian suoruudelle ja tasaisuudelle. Lisäksi päällysteet ja pinnoitteet asettavat omat tuotekohtaiset vaatimuksensa päällystettävän pinnan suoruudelle ja tasaisuudelle.

Taulukko 2. Suurimmat sallitut poikkeamat suoruudesta [1, s. 18.]

Suoruuspoikkeama	Mittausluokka L [mm]	Suurin sallittu poikkeama [mm]			
		A ₀	A	B	C
Hammastus		0	0	1	1
Poikkeama vaakasuorasta tai nimelliskaltevuudesta	enintään 200	1	2	3	4
	enintään 700	2	4	6	8
	enintään 2000	4	7	10	14
	enintään 7000	7	10	14	20
	Yli 7000	10	14	20	28

Betonilattian suoruuden mittauksissa arvosteluperusteena käytetään kaltevuusvirheitä. Jos lattia on vaakasuora, sen tietyllä vaakasuoralla matkalla mitatut korkopoikkeamat on pysyttävä taulukon 2 asettamissa rajoissa valitun suoruusluokan mukaan. Kaltevilla lattioilla nimelliskaltevuudesta voidaan määrittää, kuinka paljon lattian pinnan korko tulee muuttua tietyllä vaakasuoralla matkalla kaltevuussuunnassa. Poikkeamat tästä arvosta tulee pysyä valitun suoruusluokan asettamissa rajoissa.

Suoruuksien mittaus tehdään yleensä vaaitsemalla lattia vähintään 2x2 m ruuduissa vaaituskojeella tai takymetrillä ja vaaittavan pinnan tulee olla vähintään 20 % koko lattian pinta-alasta. Vaaituspisteet suositellaan valittavaksi samoihin pisteisiin, joista alustan tasaisuus on vaaittu ennen lattiavalua, jotta voidaan arvioida laatan paksuuspoikkeamia. Tiheimmät mittausluokat 200 mm ja 700 mm on tarkoitettu lattioille, joilla on trukki liikennettä tai muuta tasaisuuspoikkeamille herkkää toimintaa. [1, s. 17 – 19.]

2.1.2 Kulutuskestävyys

Betonilattian kulutuskestävyyttä mitataan tarkoitukseen kehitetyllä laitteistolla. Tässä tutkimuksessa käsitellään ainoastaan Suomessa yleisesti käytettyä mittaustapaa, VTT:n teräspyöräkoetta, mutta mainittakoon, että muita kansallisiksi standardeiksi yltä-

neitä mittalaitteistoja ja menetelmiä on olemassa. VTT:n teräspyöräkoe ei ole standardoitu eikä sen tuloksia voi verrata muilla laitteistoilla ja menetelmillä tehtyihin kokeisiin.

VTT:n laitteen toimintaperiaate on, että kolme teräspyörää kiertää ympyrää, jonka halkaisija on 500 mm pyörän jäljen keskeltä mitattuna. Pyörät ovat ympyrän kehään nähden 5° kulmassa ulospäin ja jokaista pyörää kuormittaa voima, jonka suuruus on 3 kN. Pyörien kuluttavan vaikutuksen seurauksena betonista irtoaa ainesta, joka imetään pois yhden pyörän perässä olevalla suulakkeella. Näin kokeessa ei ole kulutusta lisäävää hioma-ainesta betonin ja pyörien välissä. Kokeessa pyörät kulkevat 2000 täyttä kierrosta, ellei valitun kulutuskestävyysluokan määrittelemiä kulutusarvoja (taulukko 3) ylitetä jo kokeen aikana. Koe suoritetaan kohteessa valmiin käsittelemättömän betonilattiapinnan päällä tai lopullisen käsittelyn betonipinnan päällä, jos pintakäsittelyn tavoitteena on lisätä kulutuksen kestoa. [1, s. 19 – 22.]

Taulukko 3. 3 kk vanhan lattian kulutuskestävyysvaatimukset VTT:n teräspyöräkokeessa [1, s. 19.]

Luokka	Sallittu kuluminen [mm]	
	Kierrosta	
	2000	800
1	1	-
2	3	-
3	-	6
4	Ei vaatimusta	

Kulutuskestävyyskoe tehdään yleensä vain tarvittaessa. Yleensä silloin, jos voidaan perustellusti epäillä, ettei lattia täytä sille asetettua kulutuskestovaatimusta. Koe voidaan tehdä aikaisintaan 3 kuukauden kuluttua betonivalusta, jos sen kypsyysikä t_{20} on vähintään 50 vuorokautta. [1, s.20.] Kypsyysikä t_{20} kuvaa betonin lujuudenkehitystä 20 °C lämpötilassa. Sadgroven menetelmällä voidaan laskea kypsyysiän perusteella lujuudenkehitysnopeus muissakin lämpötiloissa. Lisäksi tarvitaan menetelmään liittyvät käyrästöt eri lujuusluokan betoneille. [5, s.351 – 355.]

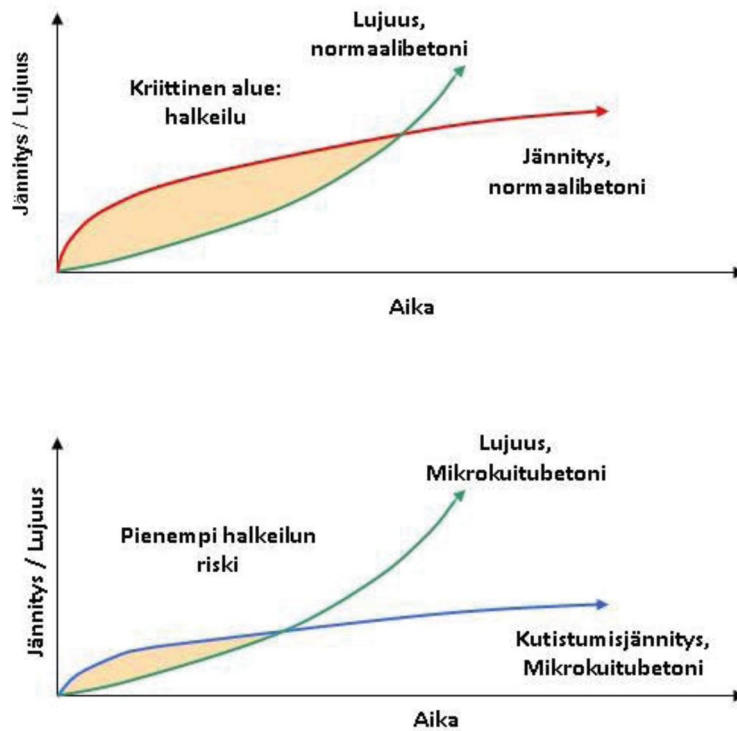
2.1.3 Maanvaraisen lattian halkeilu

Betonin halkeilulle on monia eri syitä ja sitä tapahtuu aina kun betonin vetolujuus ylittyy. Plastinen painuma ja plastinen kutistuma ovat parin tunnin aikana betonivalun jälkeen tapahtuvia ilmiöitä, jolloin betonimassa ei ole vielä ehtinyt kunnolla sitoutua.

Plastinen painuma tarkoittaa betonin raskaan runkoaineen painumista painovoiman vaikutuksesta ja kevyemmän veden erottumista valun pinnalle. Jos valussa on siis paksuusmuutoksia tai teräkset lähellä pintaa, voivat ne aiheuttaa halkeilua epäjatkuvuuskohtiin.

Plastinen kutistuma on laatan vaakasuuntaista kutistumaliikettä, joka aiheutuu veden haihtumisesta tuoreen betonivalun pinnalta. Kun osittain sitoutunut betoni alkaa vastustaa plastista kutistumaa, alkaa sen pintaan muodostua plastista halkeilua, mikäli kuivumisnopeus on tarpeeksi suuri. [5, s. 72, 73.]

Plastisen tilan halkeilu rajoittuu yleensä melko lyhyelle matkalle betonin pinnasta, joten lattian staattisen toiminnan kannalta se ei ole kovin kriittistä vaan se vaikuttaa lähinnä pinnan laatuun ja säilyvyyteen. Tätä halkeilua voidaan vähentää onnistuneella betonin suhteituksella, laadukkaalla runkoaineella, tarpeeksi isolla runkoaineen maksimirakokolla ja kuivumisnopeuden hillitsemisellä. [5, s. 92.] Myös mikropolymeerikuitujen lisääminen betonimassan sekaan pienentää plastisen halkeilun riskiä (kuva 1), koska kuidut lisäävät massan koossapysyvyyttä ja vähentävät vedenerottumista sekä plastista painumaa. Mikropolymeerikuidut auttavat myös plastisen kutistuman tapauksessa siirtämällä kutistumavoimia mikrohalkeamien yli tuoreessa betonissa. [6.]



Kuva 1. Plastisen halkeilun riski betonilla ilman kuituja verrattuna mikrokuitubetoniin [6.]

Kuivumiskutistuminen on kriittinen ilmiö etenkin maanvaraisissa lattioissa, koska se aiheuttaa suurimman osan koko laatan läpi ulottuvista halkeamista. Kuivuessaan laatta kutistuu, jolloin sen reunat pyrkivät liukumaan alustan päällä kohti keskipistettä. Harvoin alusta on kuitenkaan ideaalinen laakerikerros, joka ei vastusta laatan liikettä haittaavassa määrin. Todellisuudessa laatan ja alustan väliin syntyy aina kitkaa kutistuman takia. Tällöin laatan reunojen siirtymän estyminen aiheuttaa vetoa lattialaatan keskellä ja pyrkii halkaisemaan sen. Laatan läpäisevät pystyrakenteet ja esimerkiksi L-mallisen laatan sisänurkat ovat kriittisiä kohtia lattian suunnittelussa juuri kuivumiskutistuman takia. [7, s. 428 – 429.]

Maanvaraisissa laatoissa halkeamaleveydet kasvavat harvoin niin suuriksi, että ne vaikuttaisivat kovintaan paljon rakenteen staattiseen toimintaan. Lähinnä halkeamat aiheuttavat esteettistä haittaa ja vaikuttavat betonirakenteen säilyvyyteen negatiivisesti. Jos laatuluokituksen mukainen halkeamaleveyden maksimiarvo (taulukko 4) ylittyy, lattia harvoin on käyttökelvoton. Injektoimalla voidaan korjata esiintyneet halkeamat, jonka jälkeen lattia toimii normaaliin tapaan ja on jälleen tiivis. [1, s. 23.]

Taulukko 4. Suositeltava suurin sallittu halkeamaleveys maanvaraisissa lattioissa [1, s. 24.]

Halkeamaleveysluokka				
	I	II	III	IV
Kuvaus	Vaativa	Normaali	Merkityksetön	Erikoisluokka
Sallittu halkeamaleveys [mm]	0,3	1,0	Ei vaatimuksia	Ilmoitetaan erikseen

Taulukon 4 mukainen halkeamaleveysluokka I on vaatimustaso, jonka saavuttaminen edellyttää erityistoimenpiteitä. Varmin tapa saavuttaa kyseinen vaatimustaso on tehdä lattia jälkijännitettynä. Myös oikeilla suunnitteluratkaisuilla, huolellisella toteutuksella ja ennakkokokeilla voidaan saavuttaa kyseinen taso. Luokka I voi olla perusteltu, jos on asetettu tiukat vaatimukset ulkonäön ja pinnan kestävyuden suhteen.

Halkeamaleveysluokka II on normaali vaatimustaso esimerkiksi teollisuuslattioille ja pinnoitettaville lattioille. Luokka III tarkoittaa, että halkeamia ei tarvitse rajoittaa. Se on yleinen esimerkiksi pientalojen päällystettävissä lattioissa, joissa halkeamat jäävät piiloon päällysteen alle. Luokka IV on erikoisluokka, jossa halkeamaleveydet halutaan rajoittaa erikseen määriteltyjen rajojen mukaan. Luokan IV käyttöön voi olla syynä esimerkiksi erittäin vaativa ulkonäkö tai kloridirasitus. [1, s. 24.]

2.2 Mitoitusperiaatteet ja kuormitukset

Maanvaraisten betonilattioiden suunnittelu on betonirakenteiden suunnittelun osa-alue, johon ei ole olemassa kattavaa ohjeistusta lähteessä SFS-EN 1992-1-1. Eurokoodi esittelee tavan, jolla maanvaraisia perusrakenteita, anturoita ja paalulaattoja, voidaan suunnitella mutta edes mainintaa maanvaraisista lattioista ei ole [4]. Toistaiseksi on siis turvaututtava tietyiltä osin muiden lähteiden antamiin ohjeisiin joustavalla alustalla olevien betonilattioiden suunnittelusta.

Suomessa maanvaraisten betonilattioiden suunnittelussa voidaan käyttää apuna ja ohjeistuksena julkaisua by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014. Kirjan ohjeistus on pääsääntöisesti eurokoodien mukaista, mutta siinä annetaan myös omia näkökulmia Suomen olosuhteisiin rakennettavien lattioiden suunnitteluun ja toteutukseen. Maanvaraisen lattian betonirakenteiden mitoituksessa noudatetaan standardin SFS-EN 1992-1-1 ja sen kansallisen liitteen ohjeita. Kuituraudoituksen alustavassa laskennassa viitataan

julkaisuun by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011. Kuitubetonin mitoitus ei tois-
taiseksi ole olemassa eurokoodia. Maanvaraisen betonilaatan voimasuureiden, pohja-
paineen ja taipumien laskentaan by 45 / BLY 7 sekä by 56 tarjoavat Westergaardin
yhtälöihin perustuvan käsilaskumenetelmän, joka käsitellään tarkemmin luvussa 2.4.1.

Eurokoodeilla suunniteltaessa standardin SFS-EN 13670 mukainen betonirakenteiden
toteutusluokka on esitettävä suunnitelmissa. Seuraamusluokan CC2 (*consequence
class 2*) rakenteille asetetaan vähintään toteutusluokka 2 (EC2, *execution class 2*) ja
CC3 seuraamusluokan rakenteet kuuluvat automaattisesti toteutusluokkaan 3. Tole-
ranssiluokan ollessa 2, jolloin pienennettyjen osavarmuuslukujen käyttö on mahdollista,
toteutusluokaksi määräytyy 3. [7.]

Maanvaraisten lattioiden eurokoodien mukaisessa suunnittelussa käytetään yleensä
seuraamusluokkaa CC2, ja seuraamusluokka voidaan miettiä ennemminkin taloudellis-
ten vahinkojen kuin henkilövahinkojen kannalta. Toteutusluokka valitaan kohteen vaati-
vuuden mukaan. Toleranssiluokka 1 valitaan aina maanvaraisten lattioiden suunnitte-
lussa.

Laatan halkeilu tulee ottaa suunnitelmissa huomioon. Laatta voidaan suunnitella ja
toteuttaa kutistumasauvoilla varustettuna, jolloin sen halkeamat pyritään keskittämään
näiden saumojen kohdille. Näin tehtäessä saumajaon laskemiseen tulee kiinnittää
huomiota ja laatan sekä alustan välinen kitka tulisi olla mahdollisimman pieni. Saumat-
toman rakenteen suunnittelu on myös mahdollista, jolloin periaatteena on suunnitella
laatta siten, että halkeamat jakautuvat tasaisesti ja tarpeeksi tiheästi koko laatan alu-
eelle. Näin halkeamaleveydet pysyvät tarpeeksi pieninä. Tähän lopputulokseen pääs-
tään riittävällä rauditusmäärällä ja laatan sekä alustan välisellä suurella kitkalla.

Kuormitusten määrittäminen ja mitoitus perustuu eurokoodin mukaiseen rajatilamenet-
elyyn. Murtorajatilassa laatan kuormituksia ovat pysyvät kuormat, pakkovoimat ja
muuttuvat kuormat. Pakkovoimiin kuuluvat lämpötilaerosta, kutistumasta ja lämpöti-
lanmuutoksista johtuvat vetovoimat ja taivutusmomentit. Taulukossa 5 on esitetty mur-
torajatilassa kuormitusyhdistelyt ja kuormien osavarmuusluvut seuraamusluokissa CC2 ja
CC3. [1, s. 85 – 86.]

Taulukko 5. Maanvaraisen laatan kuormitusyhdistelyt ja osavarmuusluvut murtorajatilassa [1, s. 85 – 86.]

Maanvaraisen laatan kuormitusyhdistelyt ja osavarmuusluvut murtorajatilassa				
Seuraamusluokka	Kuormitusyhdistely	Määrävä muuttuva kuorma	Pysyvät kuormat	Pakkovoimat
CC2	1	1,3	1,0	Ei huomioida
	2	1,0	1,0	1,0
CC3	1	1,4	1,0	Ei huomioida
	2	1,0	1,0	1,0

Dynaamisten eli liikkuvien kuormien ollessa yhtenä lattiaa kuormittavana osana, otetaan se suunnittelussa huomioon kertomalla kuorma normaalin osavarmuusluvun lisäksi sysäskertoimella 1,4. Dynaamisia kuormituksia voi aiheutua esimerkiksi trukkilienteestä, autoista ja muista kuormista, jotka liikkuessaan jossain vaiheessa kiihdyttävät ja jarruttavat. Koneisiin liittyvät tietyllä taajuudella olevat dynaamiset kuormat on käsiteltävä aina erikseen niihin tehdyillä ohjeilla. [2, s.19.]

Maanvaraisten betonilaattojen materiaaliosavarmuusluvut määräytyvät SFS-EN 1992-1-1 kansallisen liitteen mukaan Suomessa niin, että betonille luku on 1,5 ja betoni- ja jänneteräksille 1,15 normaalitilanteessa [8, s. 3]. Teräskuitubetonille voidaan käyttää normaalia betonin osavarmuuslukua 1,5 [2, s. 97]. Maanvaraisten lattioiden onnettomuustapauksessa kaikkien edellä mainittujen materiaaliosavarmuutena käytetään lukua 1,0 [1, s. 86].

2.3 Mitoittavien voimasuureiden määrittäminen

Kuten luvussa 1 on kerrottu, rajataan betonilaattojen voimasuureiden tarkastelu lattioihin, jotka tukeutuvat pelkästään maanvaraiseen eristeeseen. Laatta on irrotettu kaikista pystyrakenteista. Eristeen alla oletetaan olevan kapillaarikatkerros, joka on esimerkiksi 300 mm paksu kerros 16 – 32 mm:n raekolla olevaa kapillaarisoraa. Betonilaatan raudoitustavan ei oleteta vaikuttavan voimasuureiden määrittämiseen. Käydään läpi eri menetelmiä mitoittavien taivutusmomenttien, pohjapaineiden ja taipumien laskemiseen.

Tarkastellaan julkaisun by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014 [1.] esittämiä laskentatapoja pakkovoimien aiheuttamien vetovoimien ja taivutusmomenttien määrittämiseen sekä laatan lävistyskapasiteetin ja nurkkien nousun selvittämiseen.

2.3.1 Alustaluku ja sen määrittäminen

Pystysuuntaisten kuormitusten aiheuttamien laatan sisäisten voimasuureiden laskenta maanvaraisissa lattioissa perustuu useimmissa menetelmissä alustan toimintaa kuvaavaan alustalukuun tai -lukuihin. Winklerin alustamalli (kuva 2a) on yksi yleisimmistä käytetyistä malleista sen yksinkertaisuutensa takia. Siinä kuvataan alustaa yhdellä alustaluvulla k , jolloin oletetaan alusta jousiksi, jotka ovat riippumattomia toisistaan ja joilla on kaikilla sama jousivakio. Toisin sanoen alustan ei oleteta omaavan leikkauslujuutta ja laatan jokainen kohta painuu samasta kuormasta yhtä paljon, mikä johtaa esimerkiksi siihen, että koko laatan alueella oleva tasainen kuorma ei aiheuta laattaan taivutusmomenttia tai leikkausvoimaa. [3, s. 2 – 5.]

Todellisessa tilanteessa maanvaraisen laatan alustan toimintaa ei voi kuvata yhdellä luvulla, koska niin monet asiat vaikuttavat siihen. Suunnittelijan onkin päätettävä millä tarkkuudella alustan toiminta halutaan kuvata, jotta tarvittava työmäärä saavutettuun hyötyyn nähden ei kasva liian suureksi. Lähteen by 45 / BLY 7 [1, s. 66.] mukaan jopa 50 % virhe alustaluvun määrittämisessä aiheuttaa arviolta maksimissaan 5 % virheen laatan paksuudessa. Tästä voisi ajatella, että rakennettaessa tasalaatuisilla rakennusmateriaaleilla ja laadukkailla työsuorituksilla ja suunnitelmilla, voidaan huoletta tyytyä käyttämään Winklerin alustamallia tyypillisissä lattialaskelmissa.

Monet tutkijat ovat pyrkineet kehittämään Winklerin mallin mukaista alustaluvun määrittäystä niin, että se vastaisi mahdollisimman hyvin todellisuutta. Biot (1937) ratkaisi maksimimomentin määrittäksen äärettömän pitkässä palkissa, joka on jatkuvalla elastisella kolmiulotteisella maaperällä ja palkin kuormituksen ollessa pistekuorma. Hän halusi löytää ratkaisun alustaluvun määrittäykseen, niin että kyseisellä alustaluvulla saavutetut momentit Winklerin mallilla laskettuna täsmäisivät jatkuvan maaperän teorialla lasketuihin momentteihin. Näin ollen hän kehitti alustaluvulle k empirisen yhtälön:

$$k = \frac{0,95E_s}{(1-\nu_s^2)} \left[\frac{B^4 E_s}{(1-\nu_s^2)EI} \right]^{0,108} \quad (1)$$

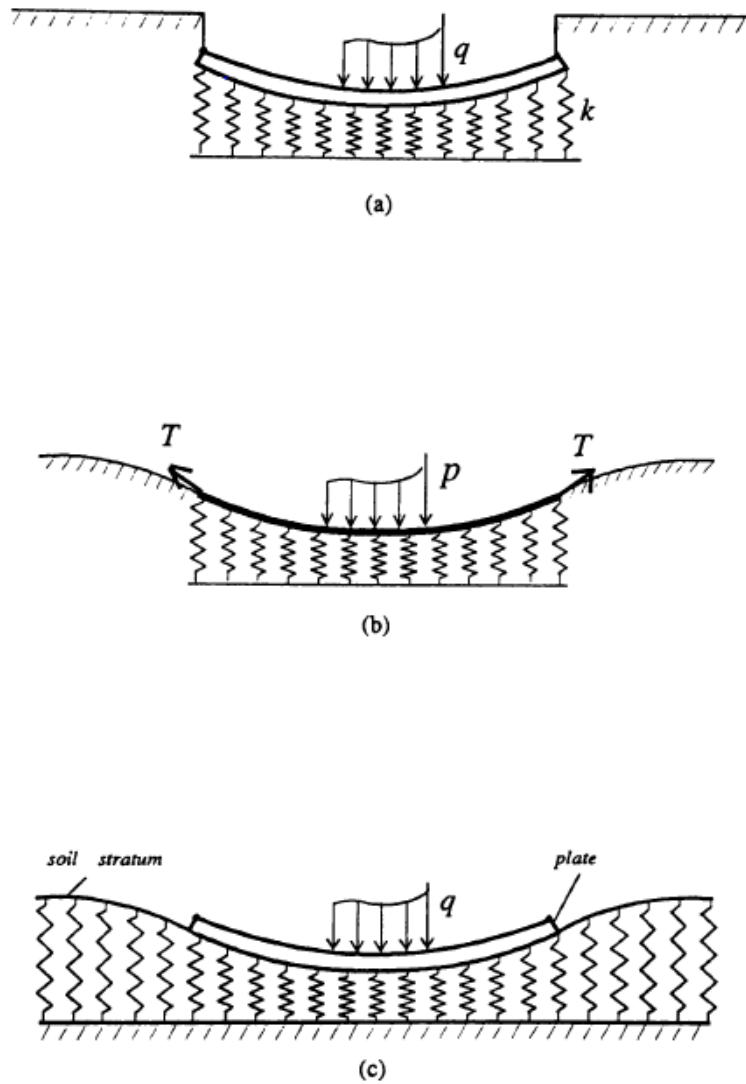
jossa E_s kuvaa maaperän kimmokerrointa, ν_s maaperän Poissonin lukua, B palkin leveyttä ja EI palkin jäykkyyttä. Vesic (1961) kehitti samalla periaatteella oman versionsa alustaluvun k laskemisesta. Hän kuitenkin suurimman taivutusmomentin lisäksi pyrki saamaan maksimi siirtymän arvon täsmäämään Winklerin mallissa ja jatkuvan maaperän teoriassa. Kyseinen yhtälö on esitetty kaavassa 2, jossa termeillä on samat merkitykset kuin kaavassa 1.

$$k = \frac{0,65E_s}{(1-\nu_s^2)} \sqrt[12]{\frac{B^4 E_s}{EI}} \quad (2)$$

Tutkijoiden tyytymättömyys Winklerin alustamalla kohtaan on johtanut yrityksiin kehittää mallista realistisempi. Alustan elastisuutta kuvaavien jousien toiminta ilman vuorovaikutusta toistensa kanssa on yksi mallin suurimmista heikkouksista. Tähän ratkaisuksi Filonenko-Borodich (1940) esitti mallin, jossa jousien yläpää on kiinnitetty venytettyyn kalvoon, jossa on vakio vetojännitys T . Tämän kaksiparametrisen mallin (kuva 2b) sisältämien alustaluvun k ja kalvojännityksen T arvojen määrittäystä ei ollut tarkemmin esitetty. Hetenyi (1946; 1950) saavutti vuorovaikutuksen jousien välille lisäämällä alustaan laatan, jolla on tietty taivutusjäykkyys D , jonka arvon laskemista ei kuitenkaan esitetty. Pasternak (1954) kehitti oman mallinsa tajuttuaan, että pystysuorien rasiusten lisäksi jatkuvassa maaperässä ilmenee leikkausrasituksia. Hän kehitti kuormapainuma-yhtälöönsä termin, joka otti alustan leikkausvoimat huomioon. Alustaluvulle k ei tosin esitetty mitään laskentatapaa.

Vlasov ja Leont'ev (1966) kehittivät alustamallin (kuva 2c) käyttämällä uutta matemaattista lähestymistapaa ongelman ratkaisemiseksi. Tuloksena syntyi kaksiparametrinen malli elastisen alustan päällä olevalle laatalle. Tähtäimessä oli hyödyntää maaperän leikkauskapasiteettiä. Tarvittavien alustaparametrien laskemiseksi esitettiin uusi parametri, γ , kuvaamaan alustan pystysuuntaisten muodonmuutosten profiilia. Kyseisen parametrin määrittämiseen mallin esittäjät eivät kuitenkaan antaneet mitään ohjeita. 1970-, 1980- ja 1990-luvuilla monet tutkijat pyrkivät ratkaisemaan ongelman. Vallabhan ja Das (1987) kehittivät iteratiivisen menetelmän γ parametrin laskemiseen, kun tarkastellaan palkkia elastisella alustalla. Kehittelemäänsä mallia he kutsuivat nimellä a modified Vlasov model. Laskeminen kyseisen mallin mukaan vaatii laajaa matematiikan hallintaa sekä tietokoneavusteista lähestymistapaa iteratiivisten differentiaaliyhtälöiden selvittämiseen. Lisäksi lattian voimasuureiden selvittäminen differenssimenetelmän tai elementtimenetelmän avulla tarvitaan tietokonetta suorittamaan laskutoi-

mitukset. Nykyään tietokoneavusteinen laskenta ei ole enää ongelma samalla tavalla kuin yhtälöiden kehittämisen aikakaudella. Matemaattisten lausekkeiden ymmärtäminen ja saattaminen tietokonelaskennan vaatimaan muotoon saa varmasti monet valitsemaan yksinkertaisen Winklerin alustamallin. Ayse Turhanin väitöskirjassa [3.] ovat kaikki tarvittavat yhtälöt ja menetelmät esitettynä, jos mallia halutaan käyttää lattian suunnittelussa Winklerin mallin sijaan. [3, s. 5 – 9.]



Kuva 2. (a) Winklerin alustamalli (b) Kaksi-parametrinen alustamalli (c) Vlasovin alustamalli [3, s. 4.]

Julkaisu by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014 esittää alustaluvun laskentaan yhdelle rakennekerrokselle kaavan 3.

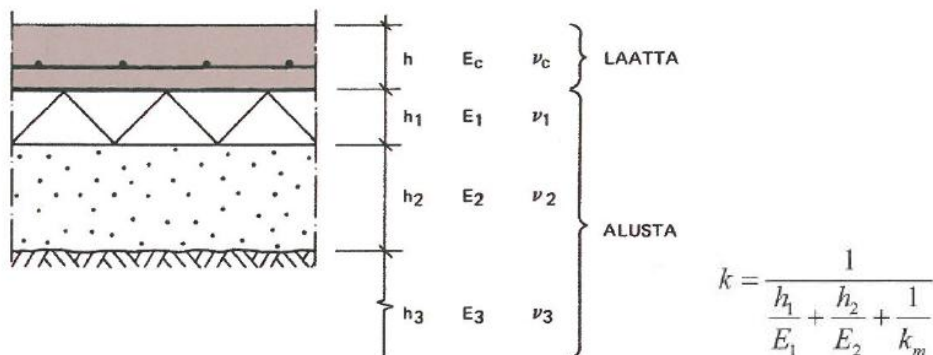
$$k = \frac{E}{h} \quad (3)$$

kaavassa k on alustaluku [MN/m³]
 E on kimmomoduuli, joka saadaan kantavuuskokeesta [MN/m²]
 h on aluskerroksen paksuus [m]

Monen kerroksen alustarakenteen alustaluku voidaan taas arvioida seuraavalla kaavalla 4. Kuvassa 3 on esimerkki tällaisesta rakenteesta.

$$k = \frac{1}{\sum_i \frac{h_i}{E_i} + \frac{1}{k_m}} \quad (4)$$

kaavassa k on alustaluku, MN/m³
 E_i on tietyn rakennekerroksen kimmomoduuli, joka saadaan kantavuuskokeesta tai taulukkoarvoista, MN/m²
 h_i on tietyn aluskerroksen paksuus, m
 k_m on perusmaan alustaluku, MN/m³

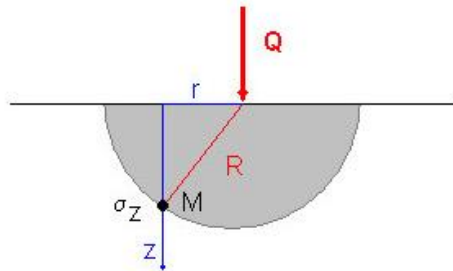


Kuva 3. Monikerroksisen alusrakenteen alustaluvun määrittäminen [1, s. 66 – 67.]

Opinnäytetyön liitteissä on käytetty tätä jälkimmäisintä tapaa alustaluvun määrittämiseksi, koska se on nopea ja tehokas tapa päästä laskelmissa eteenpäin. Lattian alustarakenteen muodonmuutokset ovat useimmiten niin pieniä, että kyseisellä alustalukumenetelmällä päästään tarpeeksi hyvään tarkkuuteen [2, s. 44].

Alustaluvun ja -mallin merkitys lattian toiminnan kannalta kasvaa laatan jäykkyyden vähentyessä. Näin ollen voidaan arvioida, että ohuemmillä laatoilla, joiden kyky vastustaa taivutusta on pieni, alustan tarkempi määrittely voi olla tarpeen.

Robot Structural Analysis on tietokoneohjelma, joka perustuu FEM-laskentaan. Ohjelmassa on työkalu maanvaraisten laattojen laskentaan, mistä kerrotaan enemmän luvussa 2.4.3. Lisäksi ohjelmasta löytyy aihepiiriin soveltuva laskuri alustaluvun K määrittämiseksi yhden tai usean rakennekerroksen alustalle. Laskurista löytyy materiaalikirjasto, mutta sinne voi lisätä myös omia materiaaleja. Näin voi määrittellä haluamansa arvot kuvaamaan materiaalin ominaisuuksia. [12.]



Kuva 4. Boussinesq'n yhtälön parametreja havainnollistava kuva. R , r ja z muodostavat suorakulmaisen kolmion, jonka hypotenuusa on R . [13.]

Robotin alustalukulaskurin toiminta perustuu Boussinesq'n yhtälöön, joka kuvaa pystysuuntaisten jännitysten jakautumaa pistekuorman kuormittamassa kimmoisassa puoliäärettömässä tilajatkumossa (*elastic semi-space*). Tällä tarkoitetaan tässä yhteydessä siis aluetta, joka rajoittuu johonkin vaakatasoon xy korkeudella z_0 ja tämän vaakatason toisella puolella oleva kimmoisa tila jatkuu x - ja y -suunnissa äärettömään. Kimmoisan tilan korkeus z on kuitenkin vain puoliääretön, sillä sen toinen raja-arvo on määritetty korkeuteen z_0 . Ulkoinen pistekuorma vaikuttaa kimmoisan tilan z -suunnassa. Pystysuuntainen jännitys σ_z voidaan laskea Boussinesq'n yhtälöllä (kaava 5) halutussa pisteessä etäisyydellä R pistekuorman vaikutuskohdasta kuvan 4 mukaisesti. [13.]

$$\sigma_z = \frac{3Qz^3}{2\pi R^5} \quad (5)$$

Suorakulmaisesta kolmiosta (kuva 4) saadaan Pythagoraan lauseella:

$$R = \sqrt{z^2 + r^2} \quad (6)$$

Kaava 6 sijoitetaan kaavaan 5 ja sievennetään, jolloin pystysuuntaiseksi jännitykseksi saadaan kaava 7.

$$\begin{aligned}
\sigma_z &= \frac{3Qz^3}{2\pi \left[(z^2 + r^2)^{\frac{1}{2}} \right]^5} \\
&= \frac{3Qz^3}{2\pi (z^2 + r^2)^{\frac{5}{2}}} \\
&= \frac{3Qz^3}{2\pi \sqrt{(z^2 + r^2)^5}} \\
&= \frac{3Qz^3}{2\pi \sqrt{\left[z^2 \left(1 + \frac{r^2}{z^2} \right) \right]^5}} \\
&= \frac{3Qz^3}{2\pi \sqrt{z^{10} \left(1 + \frac{r^2}{z^2} \right)^5}} \\
&= \frac{3Qz^3}{2\pi z^5 \sqrt{\left(1 + \frac{r^2}{z^2} \right)^5}}
\end{aligned}$$

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z} \right)^2 \right]^{\frac{5}{2}}} \quad (7)$$

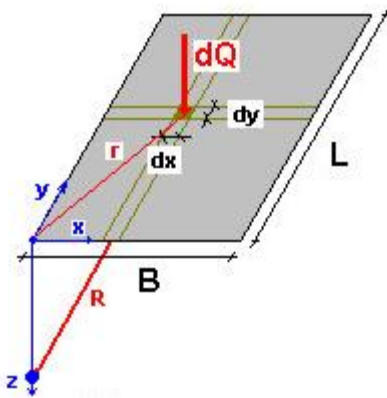
Kaava 7 toimii sinällään kaksiulotteisessa koordinaatistossa, mutta käytettäessä kolmiulotteista koordinaatistoa vaakasuora etäisyys r saa muodon:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (8)$$

Kun kaava 8 sijoitetaan kaavaan 7, saadaan kolmiulotteisen koordinaatiston parametreilla toimiva pystysuuntaisen jännityksen kaava:

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2 \left(1 + \frac{x^2 + y^2}{z^2} \right)^{\frac{5}{2}}} \quad (9)$$

Kaavan 9 avulla saadaan z-suuntainen jännitys pisteessä $P(x, y, z)$ pistekuormalla Q . Alustalukulaskurin algoritmi käyttää kuitenkin tasaisen kuormituksen aiheuttamaa pystysuuntaisen jännityksen keskiarvoa tietyssä maakerroksessa eli tietyllä korkeuden z arvolla. Maakerrokselle on myös asetettu x- ja y-koordinaattien raja-arvot niin, että $x \in [0, B]$ ja $y \in [0, L]$ B :n ja L :n ollessa tarkasteltavan alueen reunojen mitat (kuva 5). Soveltamalla superposition periaatetta kaavaan 9 voidaan laskea mielivaltaisen tasaisesti kuormitetun alan, jonka sivumitat ovat B ja L , aiheuttama pystysuuntainen jännitys pisteessä $P(0, 0, z)$. Tällöin kaavaan 9 sovelletaan pistekuorman tilalle tasaista kuormaa q kerrottuna kuormitusalueen differentiaaleilla dx ja dy . Nämä kolme yhdessä edustavat pistekuormadifferentiaalia dQ (kuva 5). [13.]



Kuva 5. Pisteessä $P(0, 0, z)$ vaikuttavan pystysuuntaisen jännityksen laskentaparametrit [13.]

Superpositioperiaatteen mukaan alueen $B \times L$ jokaisessa pisteessä erikseen vaikuttavien pistekuormadifferentiaalien dQ aiheuttamat pystysuuntaiset jännitykset pisteessä $P(0, 0, z)$ voidaan laskea yhteen, jolloin tulokseksi saadaan tasaisesta kuormasta samalla alueella kyseisessä pisteessä vaikuttava pystysuuntainen jännitys $\sigma_z(P)$. Tämä jännityksen arvo saadaan siis integroimalla kuorman osalta muokattu kaava 9 x- ja y-suunnassa kaavan 10 mukaisesti. Kuorman muokkauksena siis pistekuorman Q paikalle on laitettu termit q , dx ja dy , joiden merkityksen on kerrottu jo aiemmin. [13.]

$$\sigma_z(P) = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3q dx dy}{2\pi z^2 \left(1 + \frac{x^2 + y^2}{z^2}\right)^{\frac{5}{2}}} \quad (10)$$

Tietyllä korkeudella z olevan maakerroksen keskimääräinen pystysuuntainen jännitys voidaan lähteen [13.] mukaan laskea seuraavalla integraalikaavalla

$$\bar{\sigma}_{zq}(z) = \frac{1}{A} \int \sigma_z dA = \frac{1}{BL} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \sigma_z(x, y, z) dx dy \quad (11)$$

josta saadaan ratkaisuksi kaava 12.

$$\sigma_{zq}(z_n) = \bar{q} \frac{z}{\pi} \left\{ \tan^{-1} \frac{\frac{L}{B}}{\frac{z}{B} \sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2}} - \left(-\frac{z}{B} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{z}{B}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2} - \frac{z}{B} \right] \right) \right\} \quad (12)$$

Robot Structural Analysis -ohjelman alustalukulaskuri jakaa määritetyn alustarakenteen 0,2 metrin paksuisiin laskentakerroksiin. Jos määritetyn alustarakenteen yhden materiaalikerroksen paksuus on alle kyseisen mitan, suoritetaan laskenta aina koko kerrokselle. Jokainen laskentakerros n analysoidaan kyseisen laskentakerroksen paksuuden puolivälissä, korkeudella z_n saavutetuilla arvoilla. Korkeudella z_n olevan ulkoisen tasaisen kuorman aiheuttama pystysuuntaisten jännitysten keskiarvo lasketaan kaavalla 12. Kaavalla 13 lasketaan tietyn laskentakerroksen puristuvuusmoduuli (compressibility modulus). Kyseisessä kaavassa E_n ja ν_n ovat laskentakerroksen n kimmomoduuli ja Poissonin vakio. [13.]

$$M_{0n} = E_n \frac{(1-\nu_n)}{(1+\nu_n)(1-2\nu_n)} \quad (13)$$

Jokaisen laskentakerroksen n painuma lasketaan kaavalla 14, jossa h_n on kerroksen korkeus. Painumat summataan yhteen kaavalla 15.

$$\Delta u_n = h_n \frac{\sigma(z_n)}{M_{0n}} \quad (14)$$

$$\Delta u = \sum_n \Delta u_n \quad (15)$$

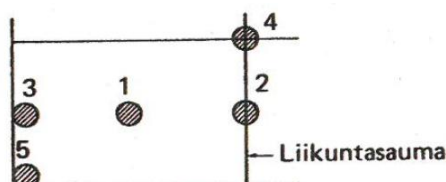
$$K = \frac{1}{\Delta u} \quad (16)$$

Viimein alustaluku K (*elasticity coefficient*) saadaan kaavalla 16 laskettua. Alustalukulaskurin antaman tuloksen voi nyt asettaa alustaa kuvaavien jousitukien jäykköysvakiksi. Elementtimenetelmässä maanvaraisen laatan joustavaa alustaa kuvataan niin, että laatta jaetaan elementtiverkoksi, jonka kaikkiin solmupisteisiin asetetaan tuet, jotka joustavat määritetyn alustaluvun mukaan. [13.]

2.3.2 Käsineläskumenetelmä pistekuormista aiheutuville rasituksille

Tässä luvussa käsitellään julkaisujen by 45 / BLY7 Betonilattiat 2014 [1.] ja by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011 [2.] esittelemän käsineläskumenetelmän pääpiirteet. Menetelmän tarkoituksena on tuottaa mitoittavat taivutusmomentit maanvaraiselle betonilaatalle kuormituksen ollessa pistemäinen. Menetelmä huomioi pistekuorman sijainnin viidessä eri kohdassa laattaa: keskellä, liikuntasauaman päällä, laatan vapaan reunan vieressä, liikuntasauojen risteyskohdassa ja laatan vapaassa nurkassa (kuva 6). Käytännössä lattioiden mitoitus tapahtuu useimmiten lattian keskellä sijaitsevan pistekuorman mukaan, koska ei ole mielekäsää mitoittaa koko laattaa nurkan ja reunan mukaan. Menetelmä antaa maanvaraisen laatan taipumalle tuloksen kuvan 6 pisteissä 1,2 ja 3. Lisäksi pohjapaineen arvo voidaan laskea pisteessä 1. [1, s. 89 – 99.]

Todellisen rakenteen pistekuormien sijainteja arvioitaessa joudutaan ne luokittelemaan kuvan 6 mukaisesti. Luokitteluun on esitetty ohje, jonka perusteella pistekuormat voidaan laskea kuvan mukaisiin sijainteihin liittyvillä kaavoilla. Nurkka-alueella (kuva 6, piste 5) sijaitsevan pistekuorman keskipisteen tulee olla laatan molemmista reunoista enintään etäisyydellä $l_k + r$ (kaavat 8 ja 6). Reuna-alueella sijaitsevan pistekuorman keskipiste on enintään etäisyydellä $l_k + r$ laatan lähimmästä reunasta, eikä se ole nurkka-alueella. Muut alueet kuuluvat laatan keskellä sijaitsevan pistekuorman laskentaan. Pientalojen lattioissa on todella harvoin liikuntasauvoja eli ne suunnitellaan saumattomina. Liikuntasauvoja koskevat alueet voidaan silloin jättää huomiotta. [1, s. 89.]



Kuva 6. Pistekuorman tarkastelupisteet. Nykyisin suunnitellaan entistä enemmän saumattomia lattioita ja pientalojen maanvaraiset lattiat ovat lähes poikkeuksetta saumattomia. Tällöin pisteitä 2 ja 4 ei huomioida laskelmissa. [1, s. 98.]

Laskennan lähtötietona tarvitaan pistekuormien lähteet, ja niiden suunnitteluarvot. Murtorajatilan taivutusmomentteja laskettaessa pistekuormat kerrotaan taulukon 5 mukaisilla osavarmuusluvuilla seuraamusluokka, kuormatyyppi ja kuormitusyhdistelmä huomioiden. Kuormitusyhdistelmää 2 voidaan käyttää käyttörajatilan tarkasteluissa, koska kertoimet ovat kaikille kuormatyypeille 1,0. Rakenteen tyyppi ja rakennekerrosten paksuudet on oltava selvillä ja rakenteelle on oltava alustaluku Winklerin malliin perustuen määritettynä. Betonin lujuusluokka, raudoitustapa ja tankoraidoiteita käytettäessä raudoituksen tehollinen korkeus on valittava ennen laskentaa.

Menetelmässä pistekuormalle oletetaan ympyrän muotoinen kuormituspinta. Harvoin todellisissa tilanteissa pistekuorman kuormitusala on kuitenkin ympyrän muotoinen, joten lasketaan pistekuorman säde kaavalla 17 kuorman ollessa pyöräkuorma tai kaavalla 18 kuorman ollessa pistekuorma, joka jakautuu kuormitusalueelle A . [1, s. 96 – 97.]

$$r = \sqrt{\frac{P}{\pi q}} + \frac{1}{2}h \quad (17)$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} + \frac{1}{2}h \quad (18)$$

kaavoissa	P	on pyöräkuorma, kN
	q	on rengaspaine tai kosketuspaine, kN/m ²
	h	on betonilaatan paksuus, m
	A	on pistekuorman kuormitusala, m ²

Betonilaatan jäykkyyttä kuvataan termillä D , jonka laskenta on esitetty kaavassa 19. Mitä suurempi laatan jäykkyys on, sitä suuremmat taivutusmomentit se kerää pienemmillä taipumilla. Tällöin myös alustan merkitys pienenee, koska laatta jakaa pistekuorman laajemmalle alueelle alustaansa. Toisaalta suunnitteleamalla ja toteuttamalla alusta huolellisesti ja kantavuudeltaan hyväksi voidaan laatan paksuutta ja rauditusmäärää saada pienennettyä. [1, s. 96.]

$$D = \frac{E_{cm}d^3}{12} \quad (19)$$

kaavassa	E_{cm}	on betonin keskimääräinen kimmokerroin, MN/m ²
	d	on raudoituksen tehollinen korkeus, m

Kaavassa 19 laatan raudoituksen tehollisena korkeutena voidaan keskeisellä raudoituksella käyttää 0,85 -kertaista laatan korkeutta [1, s. 96]. Teräskuituraudoitetun betonin tapauksessa voidaan tehollisena korkeutena pitää laatan koko korkeutta, jolloin $d = h$ [2, s. 47].

$$l_k = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} \quad (20)$$

$$a_k = \frac{r}{l_k} \quad (21)$$

Betoniastian jäykkyyden D ja alustaluvun k avulla voidaan laskea Winklerin alustamallin mukainen elastisen laatan jäykkyyssäde l_k , jonka yksikkö on metri (kaava 20). Pistekuorman kuormitusäteen r ja elastisen laatan jäykkyyssäteen l_k avulla lasketaan suhteellinen kuormitusjakauma a_k (kaava 21). Tämä kuormitusjakauma yhdessä pistekuorman suuruuden kanssa määrittävät laatan momenttijakauman ja mitoittavien momenttien arvot. Kuvan 6 mukaisten pistekuormasijaintien maksimi- ja minimimomenttien laskenta on esitetty kaavoissa 22 – 29. [1, s. 96 – 98.]

$$M_{1max} = (M_0) = P(0,056 - 0,211 \log a_k) \quad (22)$$

$$M_{1min} = -0,02P \quad (23)$$

$$M_{2max} = P(0,049 + 0,015a_k - 0,263 \log a_k) \quad (24)$$

$$M_{2min} = -0,033P \quad (25)$$

$$M_{3max} = P(0,013 + 0,068a_k - 0,526 \log a_k) \quad (26)$$

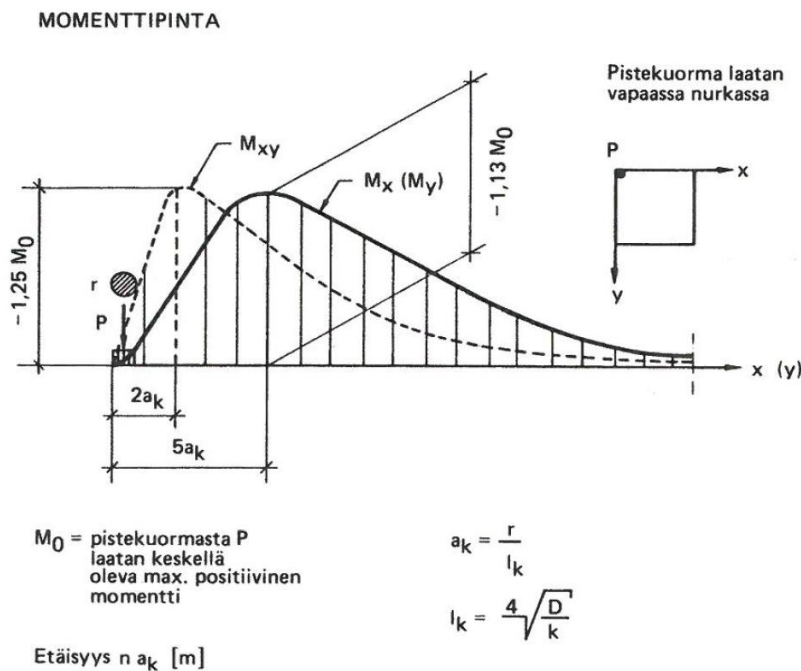
$$M_{3min} = -0,066P \quad (27)$$

$$M_{4min} = \frac{P}{8} (1 - 0,74a_k^{0,6}) \quad (28)$$

$$M_{5min} = \frac{P}{2} (1 - 1,23a_k^{0,6}), \text{ kun } a_k \leq 0,5 \quad (29)$$

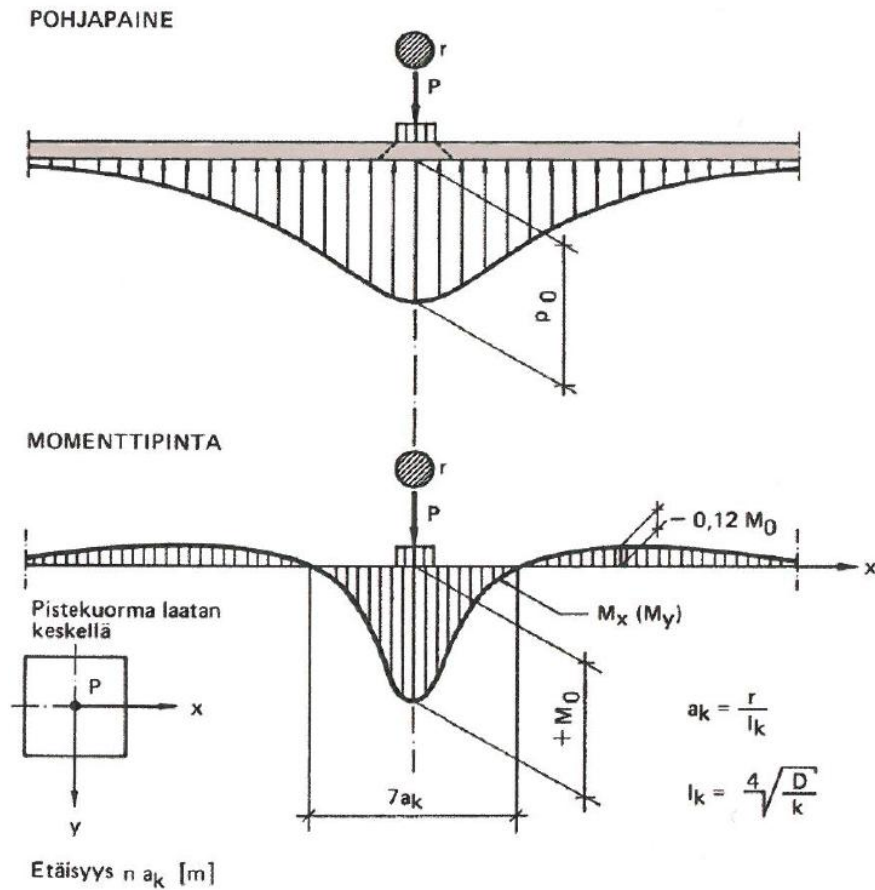
Kaavoissa 22 – 29 pistekuormien yksikkö on kN ja laatan momenttien yksiköiksi tulee kNm / m. Momentin arvon ollessa positiivinen aiheuttaa se vetorasitusta laatan alapintaan, kun taas negatiivinen momentti aiheuttaa vetoa laatan yläpintaan. Kuvan 6 pisteissä 4 ja 5 ilmenee ainoastaan negatiivista taivutusmomenttia laatan nurkan toimiesä ikään kuin ulokkeena. [1, s. 97.]

Laatan nurkka-alueilla vääntömomentin osuus voidaan olettaa lähes yhtä suureksi kuin kaavasta 29 saatu vapaan nurkan taivutusmomentti (kuva 7). Nurkan mitoitusmomentti on siis lähes kaksinkertainen, joka täytyy ottaa laatan mitoituksessa huomioon. [1, s. 93.]



Kuva 7. Momenttipinnat pistekuorman sijaitessa laatan vapaassa nurkassa [1, s. 93.]

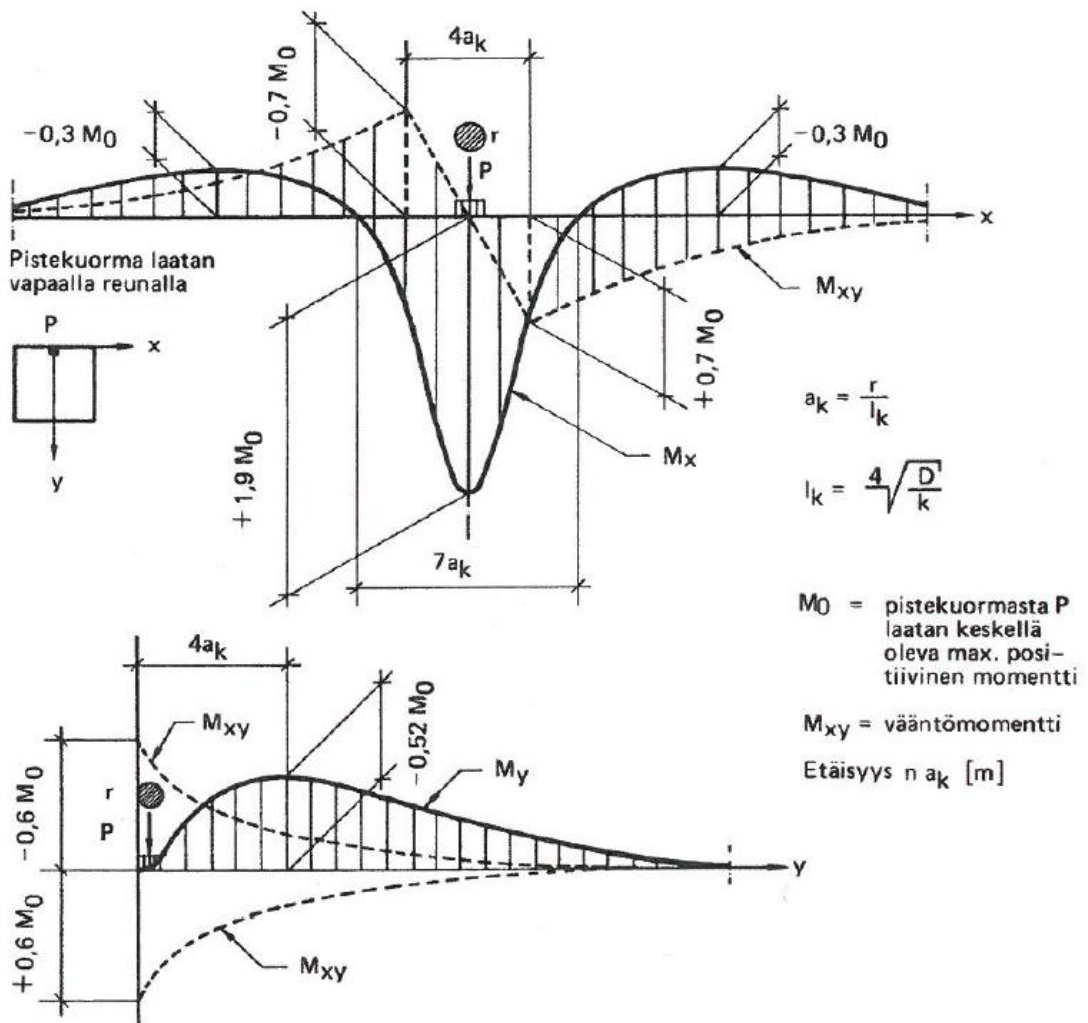
Laatan pohjapainetta ja keskellä sijaitsevan pistekuorman aiheuttamaa momenttipintaa esitetään kuvassa 8. Kuvan mukaisesti momenttipinnan muotoa ja nollakohtien sijaintia voidaan arvioida laskennassa määritetyn suhteellisen kuormitusjakauman avulla. Lisäksi laatan keskellä pistekuormasta aiheutuvan pohjapaineen arvon avulla voidaan kuvan 11 mukaan arvioida pohjapaineen arvoja pistekuorman sijaitessa laatan eri kohdissa. Myös vierekkäisten pistekuormien vaikutus pohjapaineen arvoihin on huomioitu kyseisessä kuvassa. [1, s. 89-90, 94.]



Kuva 8. Pohjapainekuvio pistekuormituksesta sekä momenttipinta laatan keskellä [1, s. 90.]

Laatan vapaalla reunalla vaikuttavan pistekuorman taivutusmomenttien maksimi- ja minimiarvot ovat eri kohdissa kuin vääntömomentin maksimi- ja minimiarvot (kuva 9). Ei siis tarvitse ottaa vääntömomentin vaikutusta huomioon, sillä yläpinnan vetorasituksen kannalta suurimmat momentit saavutetaan laatan vapaassa nurkassa. [1, s. 92.]

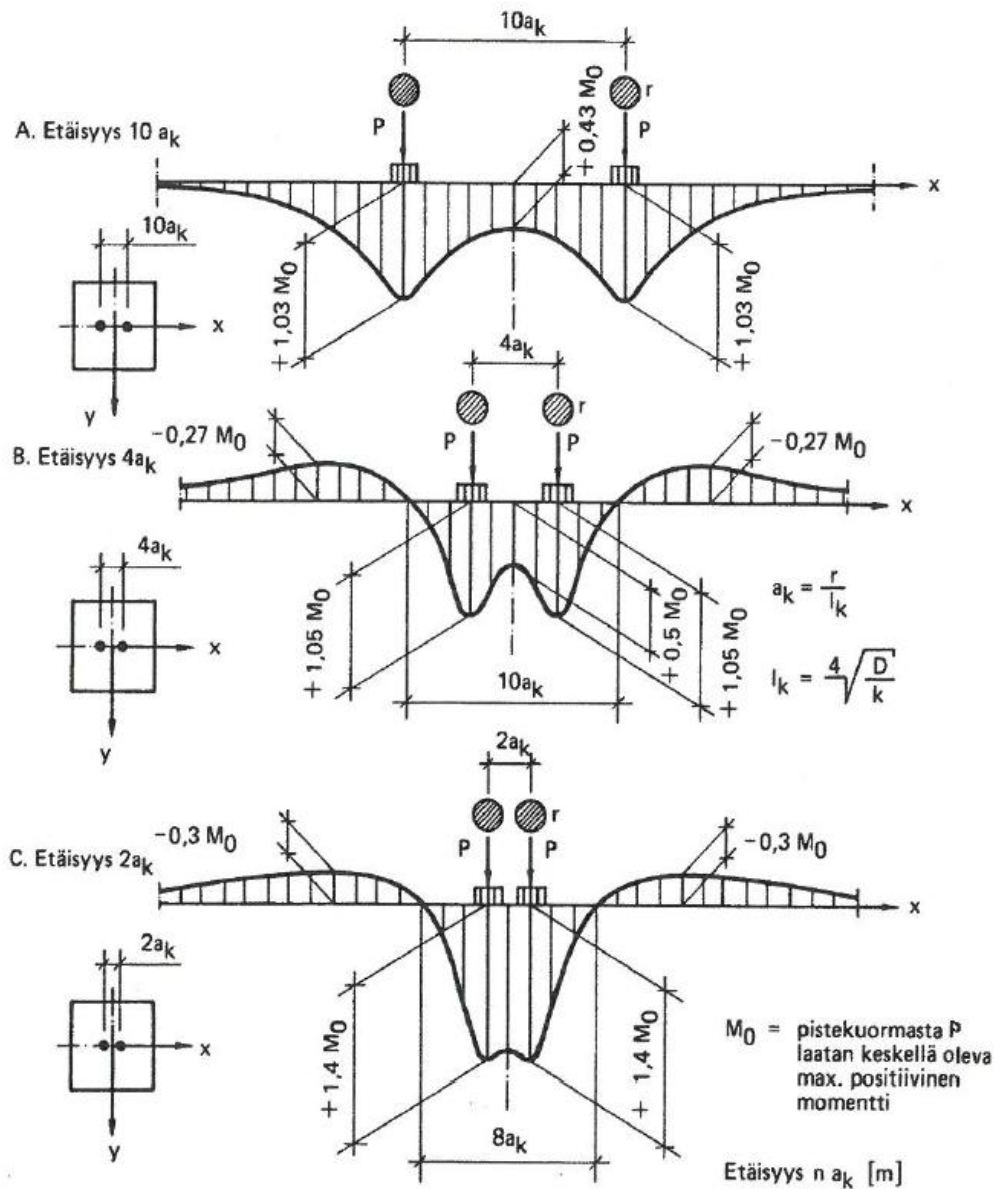
MOMENTTIPINTA



Kuva 9. Momenttipinnat pistekuorman sijaitessa laatan vapaalla reunalla [1, s. 92.]

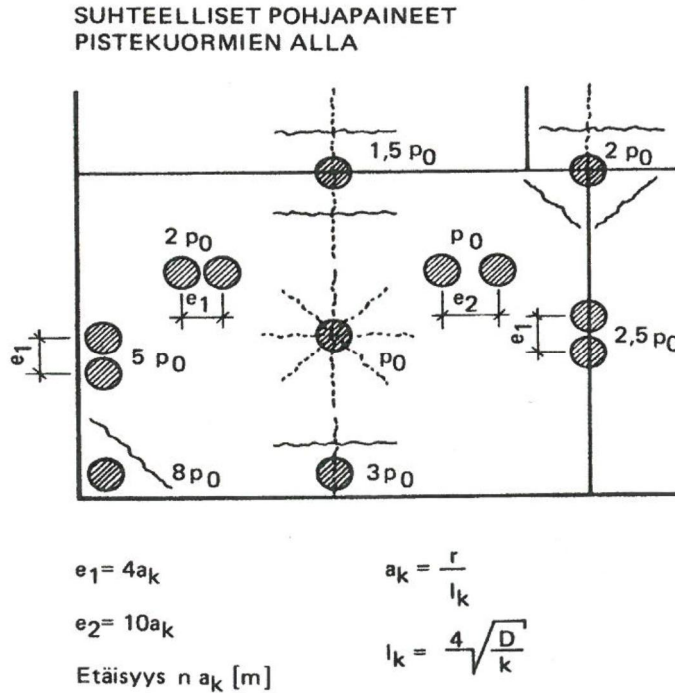
Pistekuormien lähekkäisyyden vaikutusta maanvaraisen laatan momenttipintaan on esitetty kuvassa 10. Voidaan todeta, että vasta todella lähekkäin olevat pistekuormat vaikuttavat momenttipintaan suurentavasti. Kun kerrotaan suhteellinen kuormitusjakauma luvulla 2 ja annetaan laskutoimitukselle yksiköksi metri, saadaan arvio millä etäisyydellä pistekuormat ovat toisistaan, kun maksimimomentti on 1,4-kertainen verrattuna yksittäisen pistekuorman aiheuttamaan maksimimomenttiin M_0 (kaava 22) keskellä laattaa (kuva 10, kohta c). [1, s. 90 – 91.]

MOMENTTIPINNAT



Kuva 10. Vierekkäisten pistekuormien välisen etäisyyden vaikutus momenttipintaan [1, s. 91.]

Kuvassa 11 on pohjapaineiden lisäksi esitetty raudoituksen kannalta määräävät halkeamissuunnat. Huomion arvoista on, että ainoastaan reuna- ja nurkka-alueilla pistekuormat aiheuttavat suuren negatiivisen momentin, joka merkitsee vetorasitusta laatan yläpintaan. Betonin vetolujuuden ylittyessä laatan yläpintaan muodostuu siis halkeama, jonka leveyden tulee pysyä tarpeeksi pienenä valitun halkeamaleveysluokan mukaan (taulukko 4). [1, s. 94.] Halkeamaleveyttä voidaan rajoittaa esimerkiksi riittävällä raudoitusmäärällä tarpeeksi lähellä laatan pintaa. Kuituraudoitus on erinomainen halkeamaleveyksien rajoittamiseen, koska se on jakautunut tasaisesti laatan koko korkeudelle. [9.]



Kuva 11. Pohjapaineiden suhteelliset arvot on esitetty paineeseen p_0 verrattuna. p_0 on keskellä sijaitsevan pistekuorman aiheuttama pohjapaine. Myös kriittisten halkeamien suunnat on esitettyinä. Yläpinnan halkeama on merkitty pisteiviivalla ja alapinnan halkeama jatkuvalla viivalla. [1, s. 94.]

Pohjapaine keskellä laattaa sijaitsevan pistekuorman vaikutuksesta voidaan laskea kaavalla 30 ja sitä vastaava laatan taipuma kaavalla 31. Kaavan 30 antamaa pohjapaineen arvoa voidaan soveltaa laatan muihin osiin kuvan 11 mukaisesti. [1, s. 98.]

$$p_0 = \frac{P}{8l_k^2} [1 - a_k(0,217 - 0,367 \log a_k)] \quad (30)$$

$$y_1 = \frac{Pl_k^2}{8D} [1 - a_k(0,217 - 0,367 \log a_k)] \quad (31)$$

Kuvassa 6 osoitetuissa pisteissä 2 ja 3, jotka ovat laatan liikuntasäama ja vapaa reuna, voidaan taipumat laskea seuraavilla kaavoilla 32 ja 33. [1, s. 99.]

$$y_2 = \frac{P}{kl_k^2} (0,216 - 0,075a_k) \quad (32)$$

$$y_3 = \frac{P}{kl_k^2} (0,433 - 0,354a_k), \text{ kun } a_k \leq 0,5 \quad (33)$$

Kaavat 17 – 33 perustuvat alun perin H.M. Westergaardin kehittämiin ratkaisuihin maanvaraisten rakenteellisesti raudoitettujen betonilaattojen voimasuureiden laske-
miseksi. Anders Losberg on Chalmersin teknillisen yliopiston tohturityössään [11.] jat-
kanut Westergaardin ratkaisujen tutkintaa. T. Meriläinen on käyttänyt Losbergin väitös-
kirjaa viitteenä teoksen by 45 / BLY 7 [1.] suunnitteluosion käsilaskumenetelmissä.
Lähteessä by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011 [2.] on viitattu kyseisten kaavojen ja
kuvien kohdalla edellä mainittuun Meriläisen kokoamaan suunnitteluosioon. Kuvat 7 –
11 perustuvat tietokoneohjelmalla määritettyihin voimasuurepintoihin pistekuormituksen
sijaitessa kuvan 6 mukaisissa pisteissä 1,3 ja 5. Tietokoneohjelma oli differenssimene-
telmää käyttävä maanvaraisten lattioiden suunnitteluun kehitetty ohjelma. Ohjelmalla
saadut tulokset on suhteutettu käsilaskumenetelmällä saatuihin taivutusmomentin ja
pohjapaineen arvoihin keskellä laattaa. [10.]

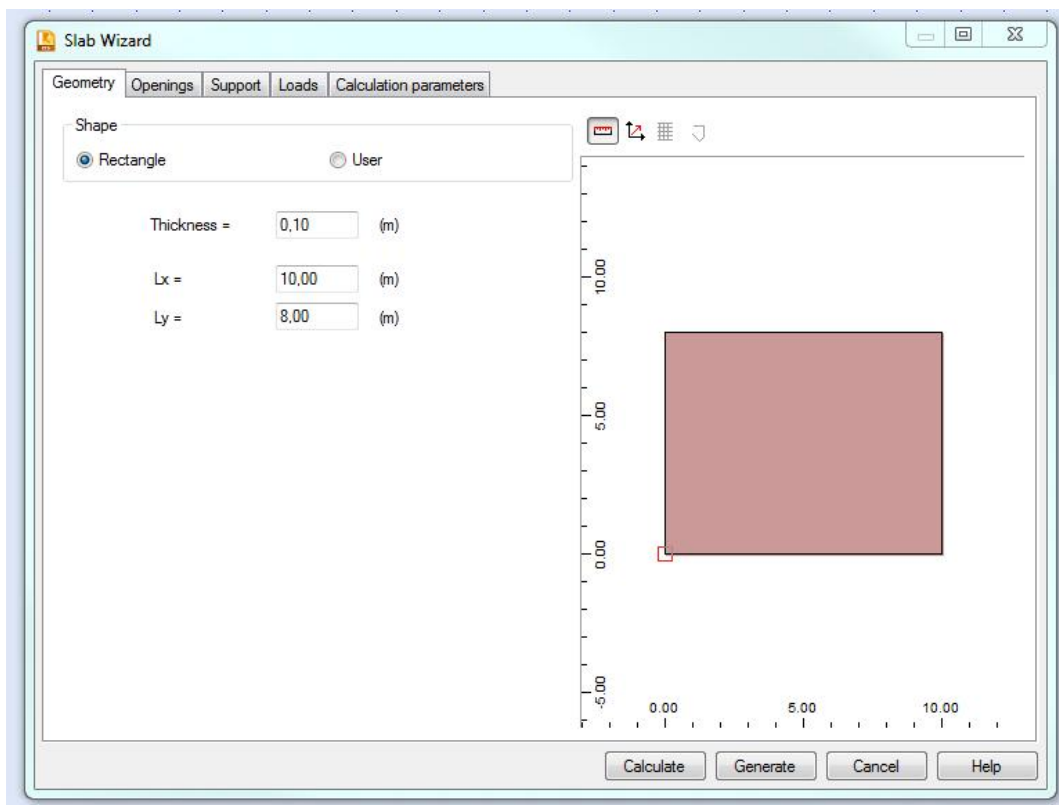
2.3.3 FEM-laskenta

Tässä luvussa käydään pääperiaatteet maanvaraisen laatan mallintamisesta ja laske-
misesta Robot Structural Analysis Professional 2015 -ohjelmalla, joka on rakenteiden
siirtymien, sisäisten voimasuureiden ja tukireaktioiden laskentaan soveltuva työkalu.
Ohjelma käyttää elementtimenetelmää (FEM) kyseisten suureiden laskemiseen. Oh-
jelman käyttäjän on hyvä osata vähintään perusteet kyseisestä menetelmästä ja raken-
teiden mekaniikan sekä lujuusopin tunteminen on välttämätöntä, jotta rakennemallin
luomisessa ja kuormien määrittämisessä ei tehdä vakavia virheitä. Jos rakennemallissa
tai kuormissa on vakava virhe, saattaa laskenta onnistua kumminkin mutkitta, mutta
lopputulokset ovat täysin virheellisiä. Kokeneenkin mallintajan ja laskijan tulee jatku-
vasti tarkastella kriittisesti saatujen tulosten suuruusluokkia sekä momentti-, leikkaus-
ja normaalivoimapintojen muotoja ja niiden esiintymiskohtia. On myös hyvä tarkistaa
nopeilla ja luotettavilla käsilaskumenetelmillä tulosten suuruusluokkia. Todettakoon
vielä, että elementtimenetelmä perustuu rakenteiden toimintaan kimmoisalla alueella eli
mahdolliset plastisoituvat rakenneosat tulisi suunnitella erikseen niille tarkoitetuilla oh-
jeilla. Maanvaraisissa teräskuiduilla raudoitetuissa betonilaatoissa plastisuusteorialla
päästään ohuempaan laattapaksuuteen ja vähäisempään kuitumäärään mutta myös
halkeamaleveydet kasvavat, mitä pidetään yleisesti melko suurena heikkoutena.

Rakennemallin vakava virhe voi olla esimerkiksi keskituen mallintaminen painumatto-
mana tukena kaksiaukkoiselle palkille, joka tukeutuu keskeltä toisen palkin kentan va-
raan. Todellisuudessa kaksiaukkoista palkkia keskeltä kannattava palkki taipuu sille

tulevasta kuormasta. Tästä seuraa tuella olevan negatiivisen taivutusmomentin piene-
neminen ja kentän positiivisten taivutusmomenttien kasvu. Pahimmillaan kannattava
palkki taipuu niin paljon, että tuen taivutusmomentti muuttuu kokonaan positiiviselle
puolelle. Jos puhutaan tankoraidoitettu betonipalkista, jonka raudoitukset on lasket-
tu painumattoman tuen mukaan, vetoa vastaanottavat teräkset ovat kentässä palkin
alapinnassa ja tuella palkin yläreunassa. Usein tässä tilanteessa alapinnan teräkset
katkaistaan tuella ilman jatkospituuksia, koska rakennemallin mukaan tuella ei ole posi-
tiivista taivutusmomenttia, joka aiheuttaa vetoa palkin alareunaan. Kun kannattava
palkki taipuu niin paljon, että taivutusmomentti on tuella positiivinen, palkin alareunassa
onkin vetorasitusta mutta sinne ei ole suunniteltu vetoa vastaanottavaa raudoitusta.
Palkki siis murtuu betonin vetolujuuden ylittyessä ja pahimmassa tapauksessa romah-
taa alas.

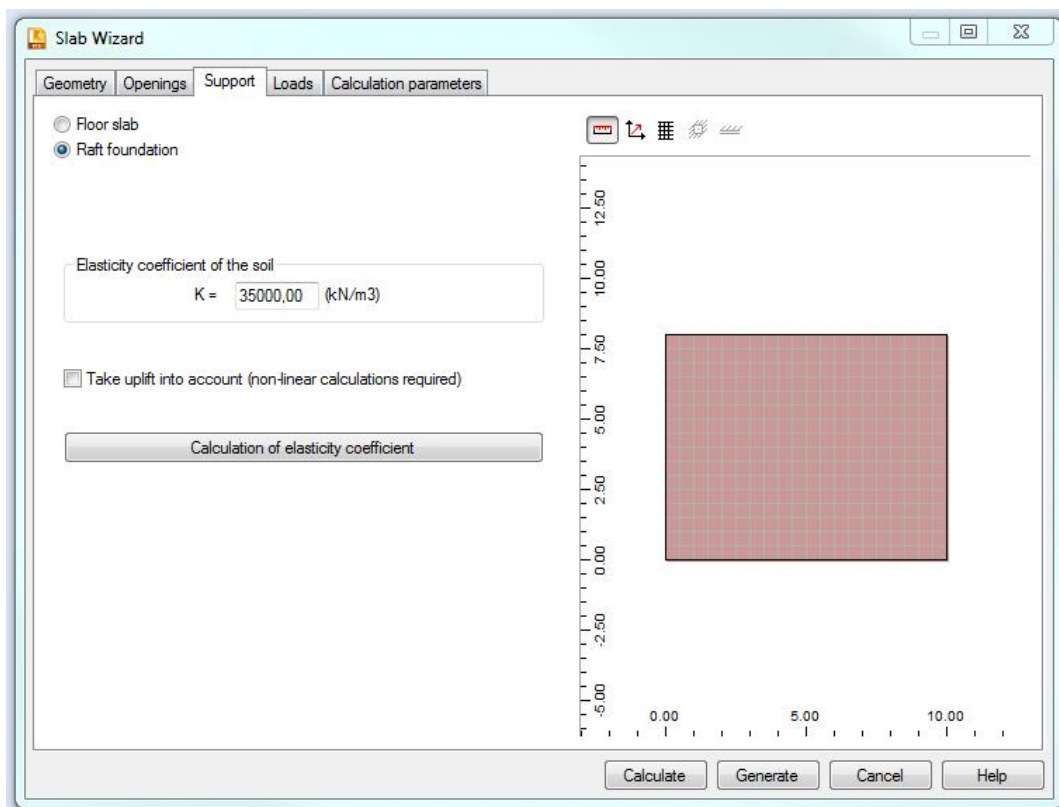
Kauttaaltaan elastisen alustan päällä olevaa maanvaraista laattaa mitoitettaessa Robo-
tin laskentamallin luomisessa on hyvä valita alkuvalikosta projektin tyyppiä Plate De-
sign. Tällä varmistetaan, että laattojen mallintamisessa tarvittavat työkalut on helposti
käytettävissä. Jos haluaa mallintaa erikseen laatan, alustan ja kuormat, kannattaa aloit-
taa mallintaminen gridin luomisella. On myös olemassa erikseen laattojen mallintami-
sen työkalu nimeltä Slab wizard. Tällä yhdellä työkalulla saadaan mallinnettua ja määri-
tettyä kaikki tarvittava maanvaraiseen laattaan, joten käydään tarkemmin työkalun toi-
mintaa läpi.



Kuva 12. Slab wizard -työkalun ulkoasu. Geometrian määrittäminen välilehti.

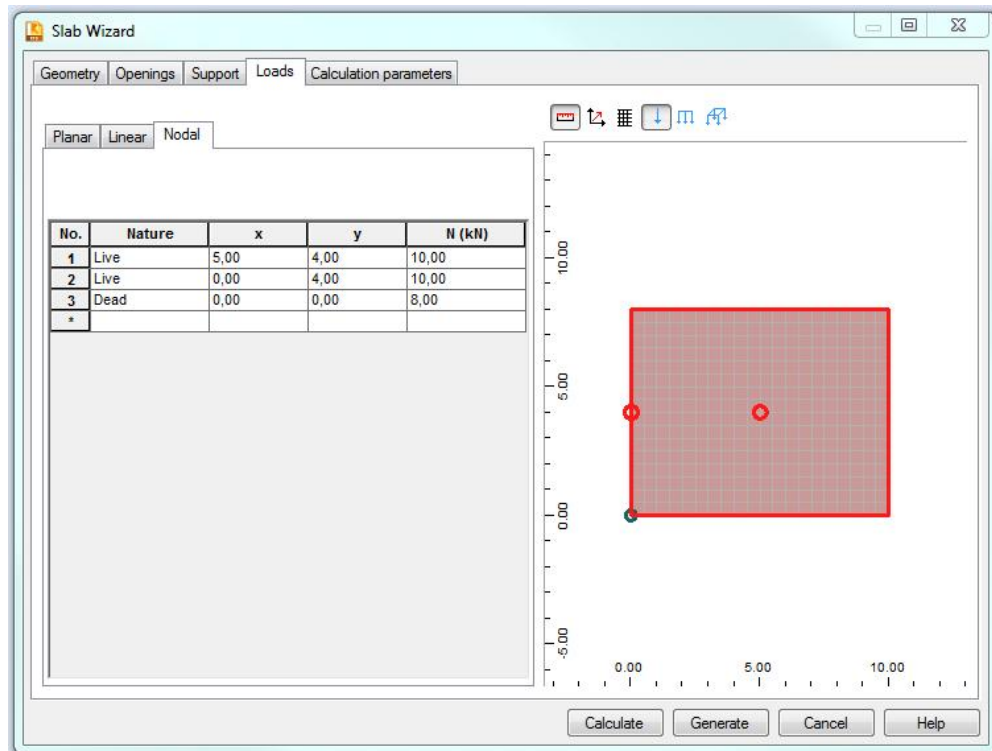
Avattaessa Slab wizard laattatyökalu on näkymä kuvan 12 kaltainen. Ensimmäisessä välilehdessä voidaan määrittää laatan paksuus, muoto ja mitat. Kuvassa 12 on laatan paksuudeksi valittu 100 mm ja suorakulmion muotoisen laatan sivumitoiksi x-suuntaan 10 m ja y-suuntaan 8 m. Valitsemalla muodoksi User eli käyttäjä voitaisiin määrittellä koordinaattien avulla laatalle haluttu muoto. Openings-välilehdeltä voidaan tehdä aukkoja laattaan samalla tavalla.

Välilehdellä Support (kuva 13) valitaan maanvaraisen laatan tuennaksi Raft foundation eli laatta elastisella alustalla. Jos alustaluku on jo tiedossa, voidaan asettaa se K :n arvoksi kuvan 13 mukaisessa yksikössä kN / m^3 . Mikäli alustalukua ei ole tiedossa, voidaan se laskea esimerkiksi luvussa 2.3.1 esitellyllä Winklerin alustamalliin perustuvalla kaavalla 4. Myös Robotin oman alustalukulaskurin, joka on esitelty samassa luvussa, saa avattua kuvassa 13 näkyvällä painikkeella Calculation of elasticity coefficient.



Kuva 13. Laatan tuennaksi valitaan Raft foundation, jolloin tuenta on elastinen.

Laatan kuormien määrittäminen tapahtuu välilehdellä Loads (kuva 14). Tasaisten kuormien arvot ja vaikutusalueet määritellään kohdassa Planar, viivakuormat kohdassa Linear ja pistekuormat kohdassa Nodal. Kuormien arvot tulee laittaa miinusmerkkisinä taulukkoon, jotta ne osoittavat laatan päältä kohti laattaa. Plusmerkkinen kuorma tulee laatalle alustasta nostavana kuormana. Kuvan 14 kuormien etumerkit jouduttiin muuttamaan jälkikäteen kuormitustaulukosta. Kuvassa 14 on määritetty tasaista kuormaa koko laatan alueelle (punainen kehys) ja kolme pistekuormaa punaisilla ympyröillä osoitettuna. Nurkassa oleva pistekuorma on valittu rakenteiden oman painon luokkaan.



Kuva 14. Laatan kuormitusten määrittäminen.

Slab wizard -laattatyökalun viimeisessä välilehdessä Calculation parameters asetetaan laskennan parametrit (kuva 15). Kun ne on asetettu, voidaan painaa kuvan alareunassa olevaa painiketta Calculate. Toiminto mallintaa laatan, muodostaa kuormituksista automaattiset kuormitusyhdistelmät ja laskee muun muassa kuvissa 17 – 21 esitetyt suuret. Toiminto Generate edellisen vieressä ainoastaan mallintaa rakenteen, joten laskenta on silloin suoritettava erikseen. Kuvan 16 laatalle on laskennan jälkeen tehty manuaalinen kuormitusyhdistelmä, jossa kaikki määritetyt kuormat vaikuttavat samanaikaisesti. Kuormien kertoimet on valittu taulukon 5 mukaisesti seuraamusluokassa CC2 kuormitusyhdistelmällä 1. Muuttuvat kuormat on siis kerrottu arvolla 1,3 (kaikki määrääviä), pysyvät kuormat arvolla 1,0 ja pakkovoimien vaikutusta ei huomioida.

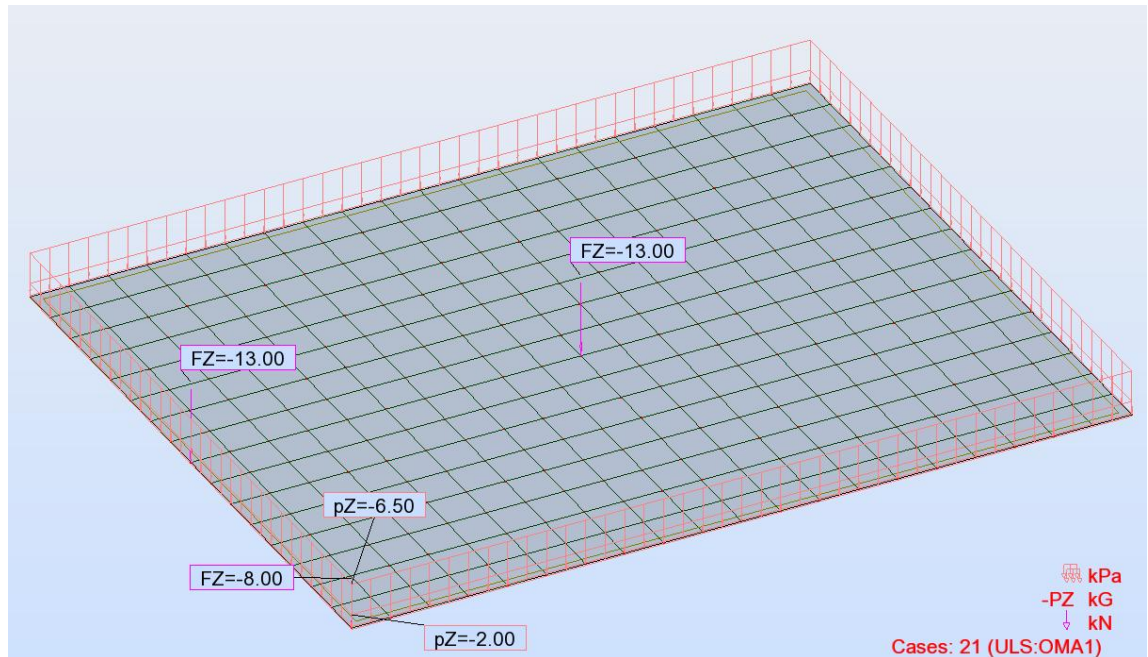
The screenshot shows the 'Slab Wizard' software window with the 'Calculation parameters' tab selected. The interface is organized into several sections:

- Concrete:** Class is set to 'C25/30', F_{ck} is 25.00 (MPa), and Unit weight is 2549.29 (kG/m³).
- Reinforcing steel:** Grade is 'HA', and F_{yk} is 500.00 (MPa).
- Direction of main reinforcement:** Radio buttons are set to 'Along X axis'. The 'Unidirectional reinforcement' checkbox is unchecked.
- Deflections:** A value of 1 (cm) is entered.
- Element size:** The checkbox is checked, and the value is 0.5 (m).
- Reinforcement details (Top and Bottom):**
 - Main reinforcement: 5.0 (mm)
 - Perpendicular reinforcement: 5.0 (mm)
 - Cover: 2 (cm)
 - Environment class: Mild

Buttons at the bottom include 'Calculate', 'Generate', 'Cancel', and 'Help'. An 'Advanced' button is also present in the lower right area of the parameter grid.

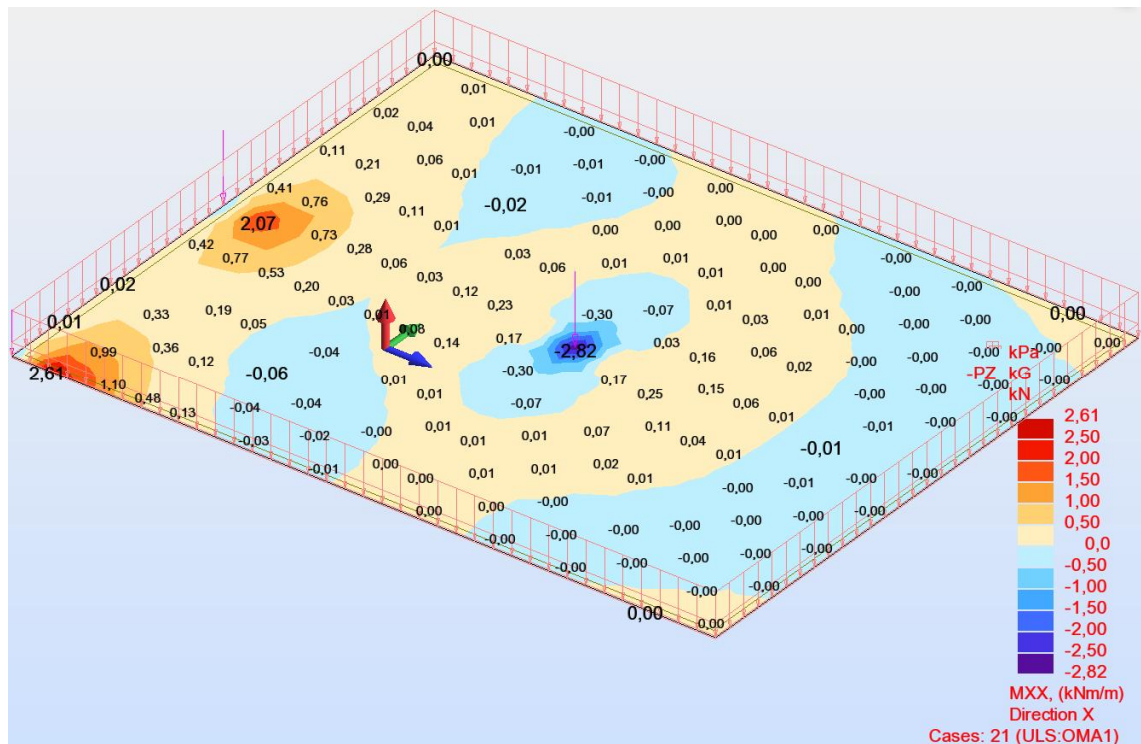
Kuva 15. Laatan laskennassa käytetyt parametrit.

Kuvan 16 maanvarainen laatta on Slab wizardilla luotu rakennemalli, jossa elementtijako on asetettu tasaiseksi verkoksi 0,5 metrin silmäjaolla x- ja y-suuntiin. Laattatyökälässä elementtijakoa voi säätää jo ennen laskelmien suorittamista kuvan 15 kohdassa Element size. Laskemisen jälkeen sitä voidaan muuttaa halutunlaiseksi painamalla laattaa hiiren oikealla painikkeella ja valitsemalla Object Properties. Muutosten jälkeen laskenta on suoritettava aina uudestaan.



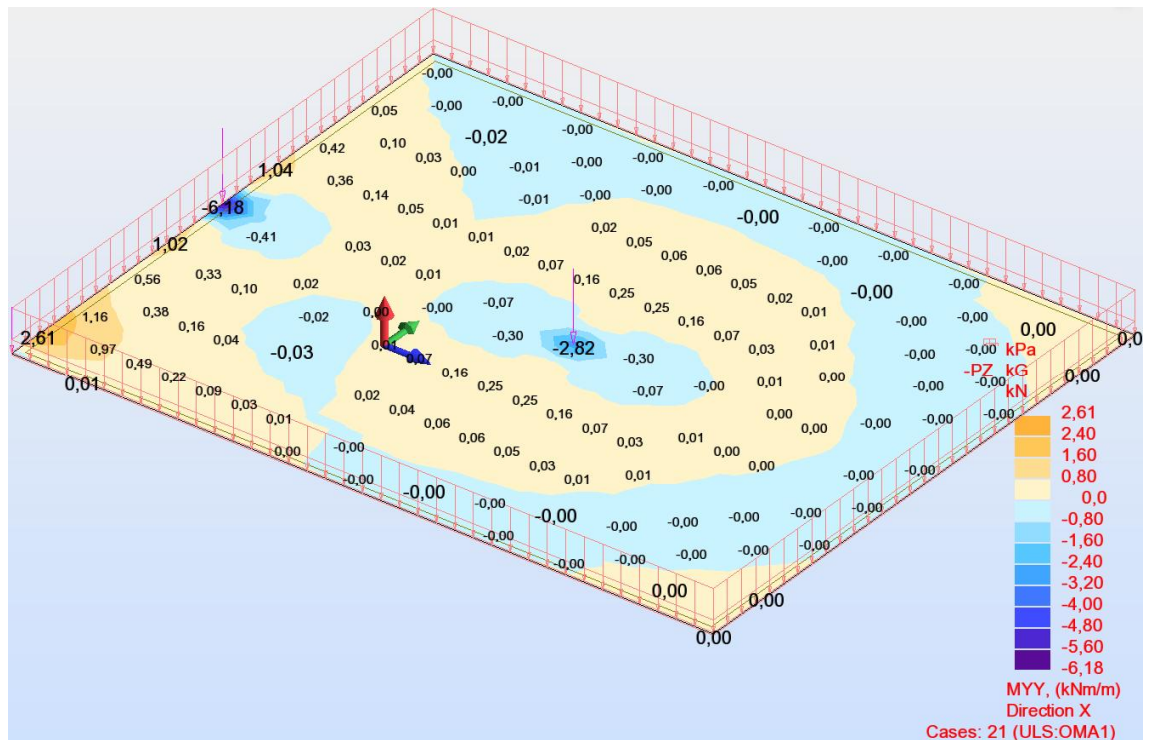
Kuva 16. Manuaalinen kuormitusyhdistelmä, jossa pysyvät kuormat kerrottu arvolla 1,0 ja muuttuvat kuormat arvolla 1,3. Kuvassa on nähtävissä kuormien laskenta arvot, kuormasymbolit ja laatan elementtijako.

Kun Robot Structural Analysis -ohjelma on suorittanut laskennan, painetaan Results-valikosta Maps...-painiketta, jolloin avautuu työkalu, millä saadaan luotua kuvien 17 – 20 mukaisia voimasuurekarttoja ja kuvan 21 mukaisen laatan siirtymäkartan. Ohjelmalla saa todella paljon muitakin tuloksia, mutta esitetään nämä maanvaraisen laatan mitoituksen kannalta oleelliset tulokset ja selitetään hieman niiden merkityksiä.



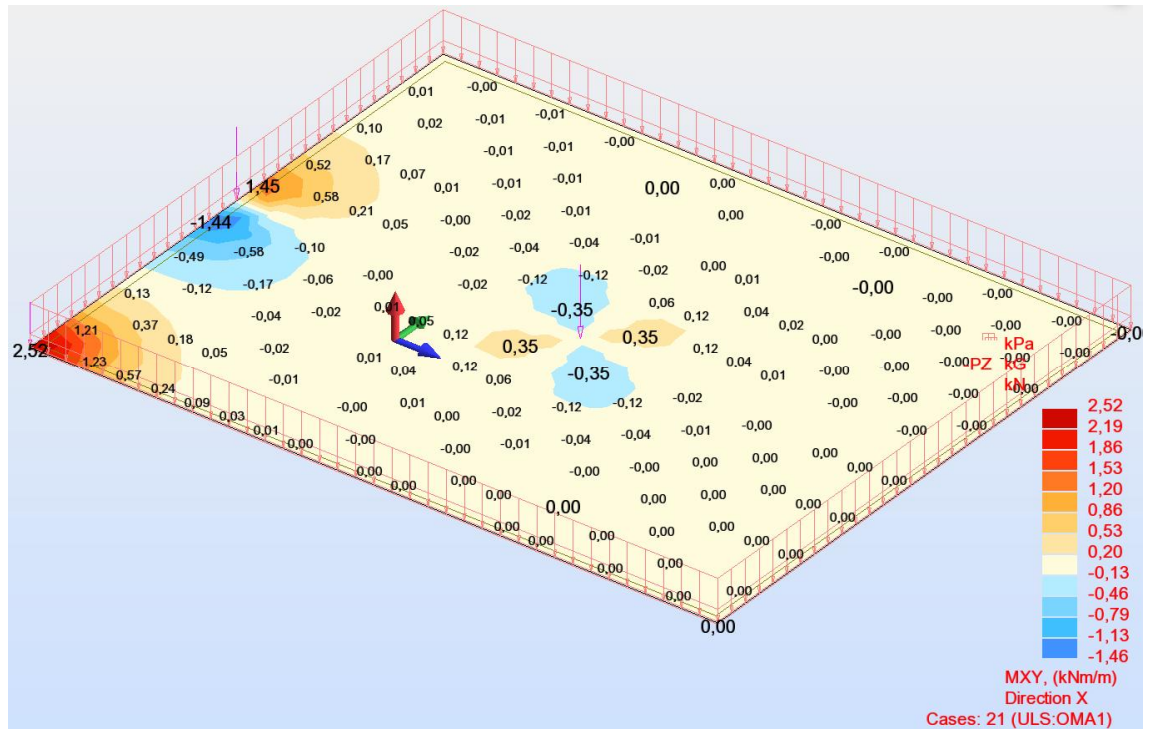
Kuva 17. Taivutusmomentit x-suunnassa (sininen nuoli). Huomautuksena todetaan, että momenttien etumerkit ovat väärin päin eli kuvassa miinusmerkinen momentti tarkoittaa vetoa laatan alapintaan ja puristusta yläpintaan. Plusmerkinen momentti on päinvastoin.

Kuvassa 17 on esitetty kuvien 12 – 15 mukaisesti Slab wizard -laattatyökalulla tehdyn maanvaraisen laatan taivutusmomenttikartta x-suunnassa. X-suuntaisella taivutusmomentilla tarkoitetaan tässä yhteydessä momenttia, joka pyrkii pyörittämään rakenteen poikkileikkausta x-suunnassa y-akselin ympäri. Suomessa on yleisemmin totuttu käyttämään merkintää M_{yy} tämänsuuntaisesta momentista mutta Robot Structural Analysis -ohjelmassa merkintä on M_{xx} . Kuvassa 18 on taas y-suuntainen taivutusmomenttikartta. Vertaamalla kuvia 17 ja 18 voidaan todeta, että nurkan pistekuorma aiheuttaa yhtä suuren maksimimomentin x- ja y-suuntaan. Nurkan pistekuorma ja neljän metrin päässä oleva pistekuorma laatan reunalla eivät siis juurikaan vaikuta toistensa maksimimomentteihin. Voidaan myös todeta, että Winklerin alustamalliin perustuvassa laskennassa tasaisesti jakautuneista kuormista ei aiheudu laatalle taivutusrasituksia taivutusmomentin ollessa lähes nolla kaikkialla muualla kuin pistekuormien vaikutusalueilla. Kuvien 17 ja 18 suurin eroavaisuus on reunalla vaikuttavan pistekuorman aiheuttamat taivutusmomentit eri suunnissa. X-suunnassa 2,07 kNm:n momentti aiheuttaa vetoa laatan yläpintaan, kun taas y-suunnassa lähes kolminkertainen momentti 6,18 kNm aiheuttaa vetoa laatan alapinnassa.



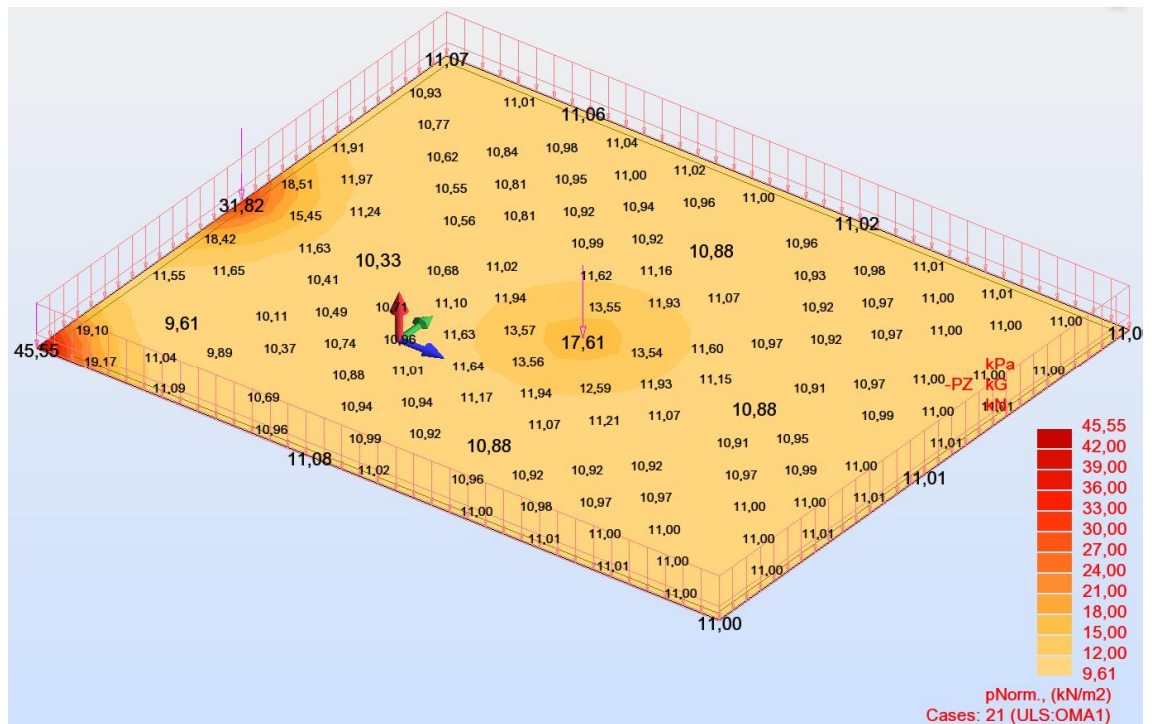
Kuva 18. Taivutusmomentit y-suunnassa (vihreä nuoli). Huomautuksena todetaan, että momenttien etumerkit ovat väärin päin. Kuvassa sii miinusmerkinen momentti tarkoittaa vetoa laatan alapintaan ja puristusta yläpintaan. Plusmerkinen momentti on päinvastoin.

Pistekuorman aiheuttaman vääntömomentin osuus on muissa kohdissa maanvaraista laattaa lähes merkityksetön paitsi nurkassa (kuva 19). Kun verrataan kuvien 17 ja 18 maksimimomenttien paikkoja kuvan 19 maksimivääntömomenttien paikkoihin, huomataan, että ne sijaitsevat eri kohdissa nurkkaa lukuun ottamatta. Mitoitettaessa laattaa momenttien aiheuttamille rasituksille on syytä huomioida myös nurkan vääntömomentti, kuten luvussa 2.3.2 kuvan 7 yhteydessäkin on mainittu. Nurkka- ja reuna-alueiden kuormien määrittämisessä kannattaa tosin aina miettiä, kuinka suuria pistekuormia sinne todellisuudessa pääsee syntymään. Ei ole välttämättä aina järkevää mitoittaa koko laattaa pelkän nurkan tai reunan momenttiarvoilla.



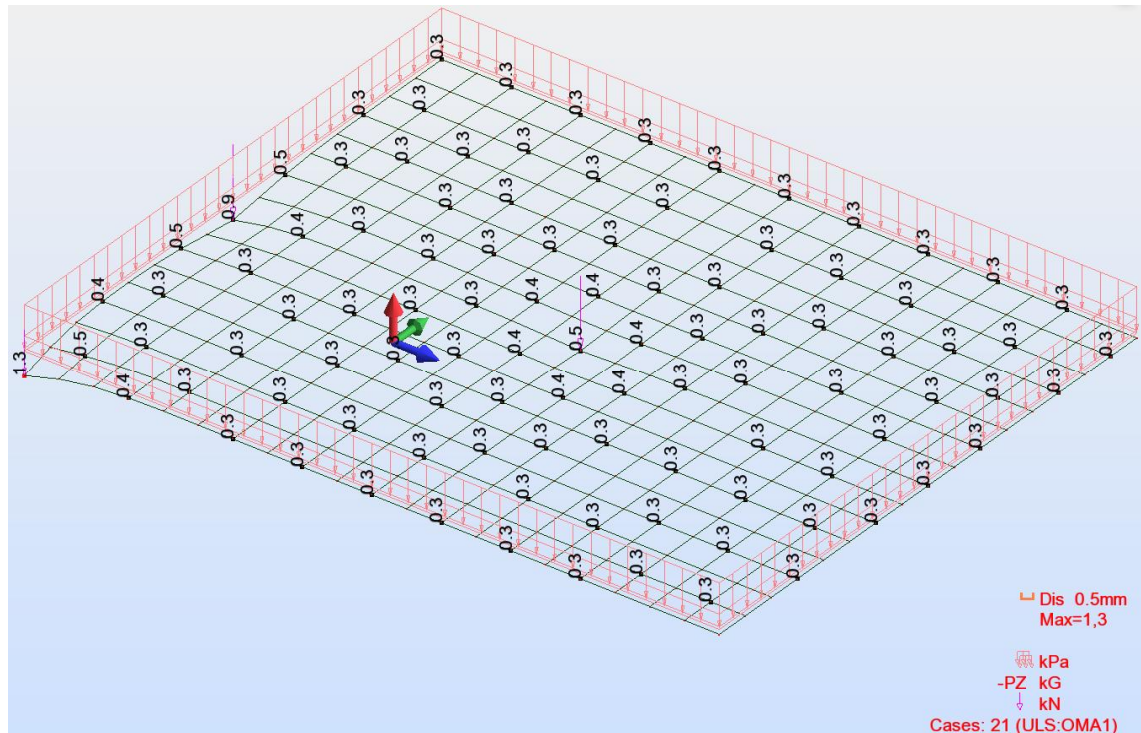
Kuva 19. Pistekuormien aiheuttamat vääntömomentit.

Kuvan 16 mitoituskuormista voidaan lukea laatan tasaiset kuormat 6,5 kPa ja 2,0 kPa. Lisäksi laatan omapaino aiheuttaa tasaista kuormaa 2,5 kPa. Yhdessä tasaiset kuormat ovat 11,0 kPa. Koska Winklerin alustamallissa tasainen kuorma ei aiheuta maanvaraiseen laattaan momentteja, voidaan tasaisten kuormien osalta pystysuuntaisten voimien tasapainoehdolla olettaa pohjapaineeksi 11,0 kPa. Tällä oletuksella voidaan tulkita kuvaa 20, jossa on esitetty maanvaraisen laatan pohjapaineet tasaisten kuormien ja pistekuormien vaikutuksesta. Siis kaikki lukemat, jotka poikkeavat luvusta 11,0 kPa, johtuvat pistekuormien vaikutuksesta. Tällöin pistekuormasta keskellä aiheutuu paine 6,61 kPa, reunalla 20,82 kPa ja nurkassa 34,55 kPa. Toisin sanoen pistekuorman vaikutuksesta reunalla on 3,15- ja nurkassa 5,22-kertainen pohjapaine verrattuna keskellä olevaan pohjapaineeseen. Täytyy tosin muistaa, että esimerkkirakenteen nurkassa on käytetty pienempää pistekuorman arvoa kuin reunalla tai keskellä. Jos nurkan pistekuorman laskenta-arvoksi muutetaan sama 13 kN, saadaan nurkan pohjapaineeksi 8,49-kertainen lukema keskipohjapaineeseen verrattuna. Kertoimet 3,15 ja 8,49 ovat melko lähellä kuvassa 11 esitettyjä kertoimia samoille pohjapaineiden arvoille.



Kuva 20. Alustan tukireaktiot.

Maanvaraisen laatan siirtymien maksimiarvot kuormien vaikutuksesta riippuvat kuormien suuruuksista, laatan jäykkydestä ja alustaluvun suuruudesta. Kuvassa 21 on esitetty laatan siirtymät aiemmin selostettujen pistekuormien vaikutuksesta. Nurkan siirtymä 1,3 mm muuttuu 1,9 mm:ksi, jos nurkkaan asetetaan samansuuruinen piste-kuorma kuin keskellä ja reunalla. Voidaan myös päätellä, että suurimmassa osassa laattaa oleva siirtymän arvo 0,3 mm on tasaisten kuormien aiheuttama laatan tasainen painuma. Tämä voidaan laskea myös helposti käsin harmonisen voiman periaatetta soveltamalla. Jaetaan tasaisen kuorman arvo $11 \text{ kN} / \text{m}^2$ alustaluvulla $35\,000 \text{ kN} / \text{m}^3$, josta saadaan tulokseksi $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ eli noin 0,3 mm.



Kuva 21. Maanvaraisen laatan siirtymät. Tasaisista kuormista siirtymä 0,3 mm koko laatan alueella -z-suunnassa (punainen nuoli) ja pistekuormista siirtymä samaan suuntaan 0,2 ... 1,0 mm lisää.

Alun perin differentiaalimenetelmän käyttö oli yleisempää kuin elementtimenetelmän, koska sen käyttäminen vaatii vähemmän resursseja laskijalta, oli laskija tietokone tai ihminen. Nykyään tietokoneiden tehokkuuksien eksponentiaalisen kasvun myötä FEM-laskenta on kuitenkin syrjäyttänyt differentiaalimenetelmän käytön lähes kokonaan. FEM-ohjelmat ovatkin nykyään todella kehittyneitä suunnittelutyökaluja ja niillä voidaanakin melko kattavasti suorittaa myös rakenteiden mitoitusta.

Kuvien 12 – 21 mukainen maanvaraisen laatan analyysi Robot Structural Analysis -ohjelmalla on erittäin kätevä tapa selvittää tutkittavan rakenteen toimintaa. Koko prosessiin ei mene aikaa tottuneelta ohjelman käyttäjältä ja maanvaraisten rakenteiden toimintaan tutustuneelta henkilöltä kuin noin puoli tuntia. Laattojen erilaiset muodot, aukot ja kuormien yksityiskohtaisempi määrittäminen lisää tietenkin analyysiin käytettyä aikaa. Oikeassa suunnittelukohteessa kuormitusten, rakennemallin, alustaluvun selvittämiseen menee aina myös oma aikansa, jota ei tässä tapauksessa otettu huomioon.

2.3.4 Kitkavoiman laskenta

Maanvaraisten betonilattioiden mitoituksen kannalta merkittävä tekijä on laatan ja alustan väliin syntyvä kitka laatan kutistumislisäliikkeiden takia. Kitkan suuruuteen vaikuttavat kutistumislisäliikkeen suuruus, laatan omapainon ja kuormien suuruus sekä laatan ja alustan välinen kitkakerroin. Olettamuksena kitkan laskennassa on, ettei laatan kutistuminen ole estetty. Laatassa ei siis ole kutistumaliikkeitä kokonaan estäviä paksunnoksia tai kiinnityksiä liittyviin pystyrakenteisiin. [1, s. 61 – 32.]

Täysin estetyn kutistuman aiheuttamaa vetojännitystä voidaan arvioida Hooken lain avulla käyttämällä suhteellisena muodonmuutoksena kokonaiskutistuman aiheuttamaa laatan suhteellista lyhenemää. Kimmokertoimen valinta on toisaalta hankalampi asia, koska halkeamien kohdissa veto siirtyy kokonaan teräksille, joiden kimmokerroin on seitsenkertainen verrattuna betonin kimmokertoimeen. Voidaan esimerkiksi ratkaista syntyvä vetojännitys käyttämällä betonin kimmokerrointa ja laskea tarvittava raudoitus vastaanottamaan kaikki aiheutunut vetovoima.

Taulukossa 6 on esitetty erilaisten ratkaisujen vaikutus laskelmissa käytettävän kitkakerroimen arvoon. Taulukon arvot ovat ohjeellisia ja niistä voidaan poiketa esimerkiksi osoittamalla kokeellisesti suunniteltavan rakenteen laatan ja alustan välinen kitkakerroin. [2, s. 56.]

Taulukko 6. Kitkakertoimien arvoja eri laatan ja alustan välisille ratkaisuille [2, s. 56.]

Kitkakerroin μ_F	Rakenne
1,0	Laatan alla on tasainen hiekkakerros (20...40 mm), raekooltaan 0...8 mm
1,0	Laatta on valettu solumuovieristeen päälle tai laatan alla on kaksi 0,15 mm paksua muovikalvoa laakerikerroksena
1,3	Laatta on valettu karkean sepelin päälle [22.]
1,5	Laatan alla on yksi 0,15 mm paksu muovikalvo laakerikerroksena
2,0	Laatan alla ei laakerikerrosta
$\geq 3,0$	Laatan alapinnassa on paksunnoksia, jotka estävät kutistumis- ja lämpöliikkeitä

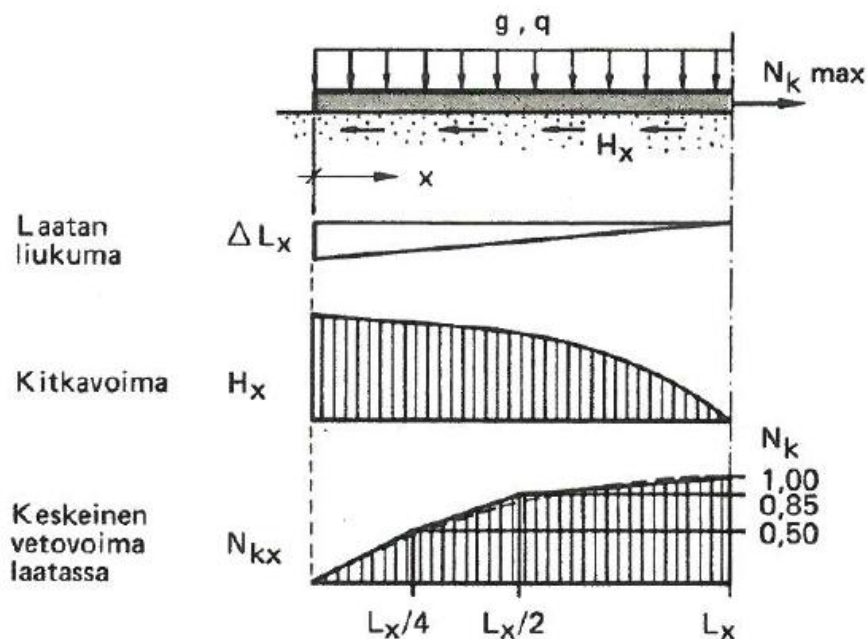
Tasapaksu, laakeroitu ja reunoiltaan pystyrakenteista irrotettu laatta liukuu kutistuesaan kaikkialta kohti painopistettään. Esimerkiksi neliön muotoisella laattalla siis keski-

piste pysyy paikallaan ja laatan jokainen reuna siirtyy saman verran kohti laatan keskustaa.

Laatan reunan liukuma (kohdassa $x = 0$ kuvassa 22) kokonaiskutistuman vaikutuksesta saadaan laskettua kaavalla 34, jossa ϵ_{cs} on suhteellinen kokonaiskutistuma ja L_x laatan leveyden puolikas $L / 2$. Ilman liikuntasauvoja L on koko laatan suurin leveys ja liikuntasauvoilla tehdyssä laatussa L on liikuntasaumavälin suurin mitta.

$$\Delta L_x(0) = \epsilon_{cs} L_x \quad (34)$$

Jos laatussa on esimerkiksi reunoilla paksunnokset, jotka estävät liukumaliikkeen syntymisen, valitaan L_x :n arvoksi koko laatan leveys ja kitkakertoimen μ_F arvoksi vähintään 3,0. Näin saadaan tietynlainen arvio estetyn kutistuman aiheuttamasta vetovoimasta laatussa. Laatan paksuuden vaihtelut kannatta tehdä viistettynä, jotta laatta pääsee liukumaan kutistuessaan. Tällöin voidaan soveltaa pienempiä kitkakertoimen ja L_x :n arvoja. Sopiva viiste on 1:10. [1, s. 100.]



Kuva 22. Laatan kutistumasta aiheutuva liukuma, kitkavoima ja keskeinen vetovoima [1, s. 62.]

Laatan keskeinen vetovoima lasketaan kaavalla 35. Kitkavoiman voidaan olettaa saavuttavan maksiminsa, kun laatan liukuma on yli 1,5 mm. Kaavassa g on laatan oma-

paino ja q on pitkäaikainen hyötykuorma. L_x on matka jolla laatan liukuma tapahtuu ja μ_F on laatan ja alustan välinen kitkakerroin. [1, s.100.]

$$N_{k,max} = (g + k_t q)L_x \mu_F \quad (35)$$

$$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0 \quad (36)$$

Kaavalla 36 laskettava kerroin k_t ottaa huomioon, kuinka suuri liukuma lämpötilaeron ja kutistuman takia laatasta tapahtuu pitkäaikaisen hyötykuormituksen jälkeen. Toisin sanoen kerroin pienentää kitkan aiheuttaman vetovoiman laskennassa hyötykuorman osuutta kitkan muodostumiseen. Esimerkiksi voi olla tilanne, että suurin osa laatan kutistumisesta tapahtuu ennen hyötykuormitusta ja laatta on hyötykuormituksen jälkeen tasalämpöisessä tilassa, jolloin laattaa liikuttavia lämpötilaeroja ei ole. Tällöin kitkan syntymiseen vaikuttava pitkäaikainen hyötykuormakin on melko vähäinen. [1, s.100.]

Kaavassa 36 ΔL_1 on lämpötilaeron aiheuttama lyhenemä matkalla L_x , joka voidaan laskea yleisellä pituuden lämpölaajenemisen kaavalla käyttäen betonin lämpölaajenemiskerrointa. ΔL_2 on taas kutistuman aiheuttama lyhenemä hyötykuormituksen jälkeen matkalla L_x , joka voidaan laskea betonirakenteiden eurokoodin (SFS-EN 1992-1-1) kaavoilla hyötykuormituksen alkamisajankohdan ja silloin vallitsevan betonin suhteellisen kosteuden mukaan verraten lopputilanteen kutistumiin. ΔL on laatan liukuman arvo, jolloin kitka saavuttaa maksiminsa. Aiemmin mainittua 1,5 mm:ä tai sitä pienempää arvoa voidaan käyttää. [1, s. 100][4, s. 31, 33, 34 ja 198.]

2.4 Lattian mitoitus kuiturautoitteisena

Tässä luvussa tarkastellaan maanvaraisen betonilattian mitoitusta teräskuiturautoitetuna kirjassa by 56 Teräskuitubetonirakenteet [2.] esitellyn virtuaalikuituperiaatteen mukaan. Maailmalla on olemassa paljon kuitubetonin mitoitukseen liittyvää ohjeistusta mutta yksikään kansallisista ohjeista ei ole saavuttanut vielä kansainvälisen standardin asemaa. Suomessa rakenteiden suunnittelun perustuessa eurokoodiin, ei ole siis käytössä virallista menettelytapaa kuitubetonin mitoitukseen. Toistaiseksi kantavien rakenteiden mitoitus kuiturautoitteisena on Suomessa ollut melko vähäistä paalulaattoja lukuun ottamatta mutta ei-kantavina rakenneosina pidettyjä maanvaraisia laattoja on tehty niin melko paljon. Pääasiassa mitoitus tapahtuu silloin kuitutoimittajan omien las-

kelmien mukaan toimitetun kuidun ominaisuuksiin perustuen. Yksityiskohtaisesti kantavien kuitubetonirakenteiden mitoitusta eri maiden suunnitteluohjeilla on käyty läpi Mikko Mäntyrannan diplomityössä [14.] vuodelta 2013. [14, s. 4, 44 – 45][2, s. 3, 16.]

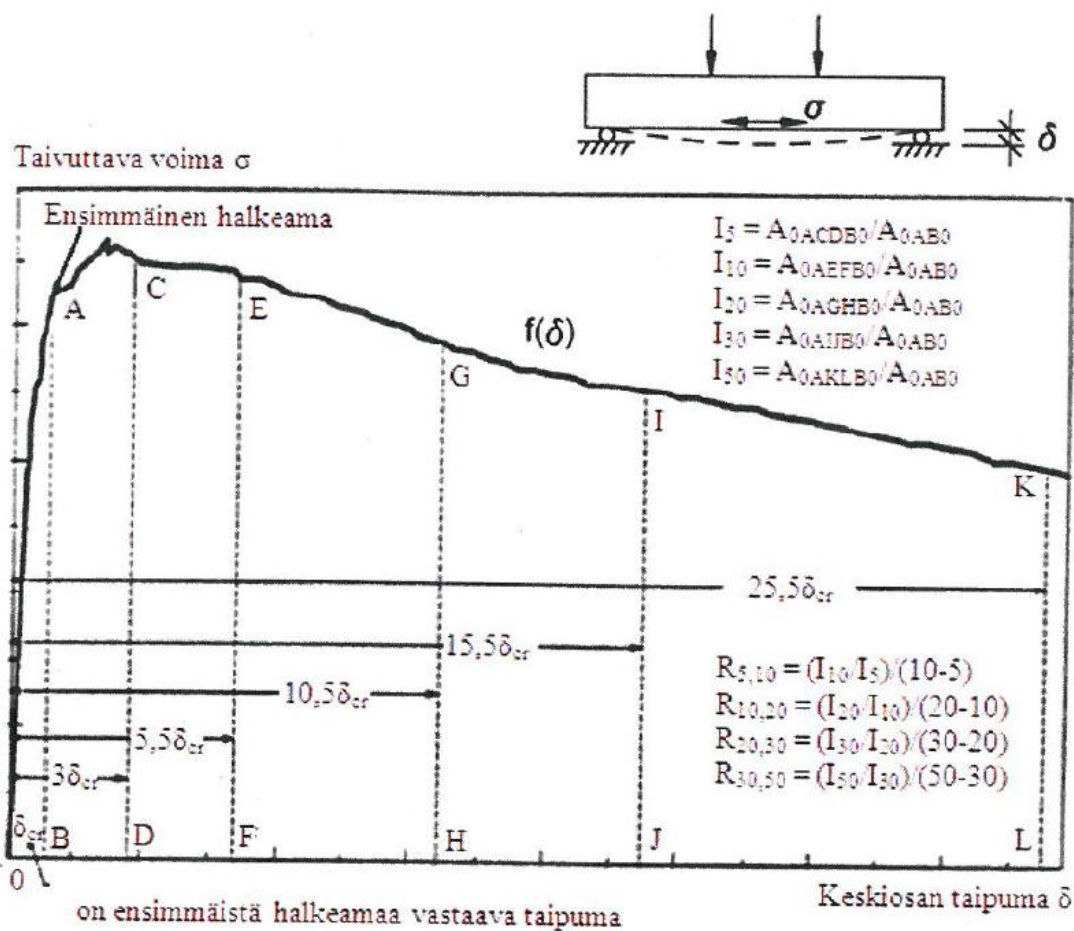
Kuitubetonin mitoitus perustuu useimmiten palkkikokeella määritettyyn halkeilun jälkeiseen taivutusvetolujuuteen eli jäännöstaivutusvetolujuuteen, joka kertoo, kuinka suuri osa betonin taivutusvetolujuudesta on jäljellä tietyllä halkeamaleveyden tai taipuman arvolla. Palkkikoe tehdään tietyllä kuitutyypillä eri annostuksilla, jonka jälkeen määritetään jokaiselle annosmäärälle tietyjä halkeamaleveyksiä tai taipumia vastaavat jäännöslujuudet. [2, s. 15 – 16.] Ulkomaiset palkkikoestandardit on yksityiskohtaisesti esitetty Mäntyrannan diplomityössä. [14, s. 23 – 29.]

Käytettäessä jäännöslujuuden määrittämisessä jännitys-taipuma-yhteyttä hyödyntävää menetelmää, kuten standardia ASTM C1018-97, koejärjestely on kuvan 23 yläreunan mukainen. Kehitettäessä virtuaalikuituja kirjaan by 56, koepalkin leveytenä ja korkeutena on käytetty 150 mm:ä. Palkin pituutena on käytetty 700 mm:ä ja jännevälinä 675 mm:ä. Vaikka standardi ASTM C1018-97 oli kirjan tekovaiheessa jo poistettu käytöstä, sitä käytettiin ohjeiden perustana, sillä siihen aikaan kuitujen ominaisuudet oli suomessa ilmoitettu kyseisen standardin mukaan määritettyinä. Ohjeistus tulee varmasti muuttamaan jossakin vaiheessa. Kuvan 23 kuvaajasta saadaan tiettyä taipumatilaa kuvaava sitkeysindeksi I_n määritettyä kaavalla 37. [2, s. 14 – 15.]

$$I_n = \frac{\int_0^{\frac{n+1}{2}\delta_{cr}} f(\delta)d\delta}{\int_0^{\delta_{cr}} f(\delta)d\delta} \quad (37)$$

$$R_{X,Y} = \frac{I_Y - I_X}{Y - X} \quad (38)$$

Koska funktion $f(\delta)$ kaavaa ei tiedetä, sitkeysindeksit on integroitava numeerisesti kuvaajasta määrittämällä integraalien osoittamat pinta-alat. Kuvassa 23 kuvaajan yläpuolella on esitetty kaavat sitkeysindeksien numeeriseen laskentaan. Kaavan 37 sitkeysindeksit määritetään kuvassa 23 $n:n$ arvoilla 5, 10, 20, 30, 50. Tiettyä taipuman raja-arvoa vastaava jäännöslujuuskerroin saadaan laskettua kaavan 38 avulla. Esimerkit jäännöslujuuskertoimien laskemisesta on kuvan 23 oikeassa alareunassa. [2, s. 15 – 16.]



Kuva 23. ASTM C1018-97 mukaisella palkkikokeella saadaan taivutusvetojännitys taipuman kuvaajana. Ylhäällä on koejärjestelyn periaate. Kuvaajan yläpuolella oikeassa reunassa on sitkeysindeksien laskentaperiaatteet numeerisilla integraaleilla. Kuvaajan alapuolella oikeassa reunassa on jäännöslujuuskertoimien laskentaperiaatteet sitkeysindeksejä käyttäen. [2, s. 15.]

Suomen betoniyhdistyksen julkaisuun by 56 on kehitetty kaksi erilaista virtuaalikuitua kuvaamaan teräskuidun toimintaa taivutetussa betonirakenteessa. $R_{10,20}$ on tarkoitettu maanvaraisten lattioiden suunnitteluun, kun taas $R_{20,50}$ on kehitetty paalulaattojen mitoittamiseen. Kumpikin on suunniteltu käytettäväksi rakenteiden alustavassa suunnittelussa siten, ettei kuitumäärää tai laatan paksuutta tarvitse ainakaan lisätä tarkan mitoituksen jälkeen. Arvoja käytettäessä saadaan noin 10 – 20 %:n tarkkuudella oikea varman puolella oleva lopputulos. Virtuaalikuitujen jäännöslujuusarvot on esitetty taulukossa 7. Lopullisen kuitubetonirakenteen mitoituksen tulee aina perustua rakenteessa käytetyn kuidun ominaisuuksiin. Kuitumäärän ja laattapaksuuden lopullinen määrittäminen tapahtuu siis kuitutoimittajan kanssa yhteistyössä. Kuitujen annostelu tapahtuu viiden kilon porrastuksella ja teräskuitujen minimiannostuksen ohjearvoksi annetaan 25 kiloa betonikuutiosta. [2, s. 16 – 17.]

Taulukko 7. Virtuaalikuidun jäännöslujuuskertoimet $R_{10,20}$ ja $R_{20,50}$ eri kuitumäärillä [2, s. 17.]

Kuitumäärä (kg / m ³ _{bet})	$R_{10,20}$ Maanvaraisille laatoille	$R_{20,50}$ Paalulaatoille
25	57	52
30	64	58
35	70	65
40	77	71
45	83	77
50	90	84

Mitoittavan taivutusmomentin M_d aiheuttama jännitys σ_{bd} maanvaraisessa laatussa lasketaan kaavalla 39, laatan korkeuden ollessa h . Laatan normaalivoiman F_{ft} aiheuttama vetojännitys σ_{td} lasketaan kaavalla 40. Normaalivoimana käytetään esimerkiksi luvussa 2.3.4 laskettua kitkan aiheuttamaa vetovoimaa $N_{k,max}$. [2, s. 60 – 61.]

$$\sigma_{bd} = \frac{6M_d}{h^2} \quad (39)$$

$$\sigma_{td} = \frac{F_{ft}}{h} \quad (40)$$

Maanvaraisen kuitubetonilaatan lujuudet taivutusta ja vetoa vastaan lasketaan kaavoilla 41 – 43. Kaava 41 on tarkoitettu taivutusvetolujuuden f_{bd} laskentaan laatoille, jotka on suunniteltu kutistumissaumoilla varustettuna. Voidaan siis olettaa, ettei laatta halkeile saumojen välillä. Kaava 42 on myös taivutusvetolujuuden laskentaan tarkoitettu, mutta siinä oletetaan laatta kutistumissaumattomaksi, jolloin halkeamat jakautuvat tasaisesti laatan alueelle. Kaavalla 43 saadaan laskettua teräskuitubetonin suoran vetolujuuden arvo f_{td} . Kaavoissa f_{ctk} on betonin ominaisvetolujuus, $R_{10,20}$ on jäännöslujuuskertoimen taulukko 7 perustuen ja γ_c on kuitubetonin osavarmuuskerroin, jona käytetään arvoa 1,5. [2, s. 58 – 59.]

$$f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = f_{ctk}(0,0115R_{10,20} + 0,478) \quad (41)$$

$$f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = \frac{1,7f_{ctk}R_{10,20}}{100\gamma_c} \quad (42)$$

$$f_{td} = 0,6f_{bd} \quad (43)$$

Taulukon 5 kuormitustapauksen 1 mukaisessa tarkastelussa tulee seuraavan kuormitusehdon toteutua (kaava 44). Rakenteen käyttöaste taivutustarkastelussa ei saa olla siis yli 1,0. Tällöin määräävä muuttuva kuorma kerrotaan osavarmuusluvulla 1,3 ja muut kuormat osavarmuusluvulla 1,0 seuraamusluokan ollessa CC2. Pakkovoimien vaikutusta ei huomioida. [2, s. 59 – 60.]

$$\frac{\sigma_{bd}}{f_{bd}} \leq 1,0 \quad (44)$$

Taulukon 5 kuormitustapauksen 2 mukaisessa tarkastelussa tulee kaavan 45 mukaisen mitoitus ehdon täytyä. Taivutusrasitusten ja vetorasitusten yhteenlaskettu käyttöaste ei saa ylittää arvoa 1,0. Nyt kaikki kuormat kerrotaan osavarmuusluvulla 1,0 ja pakkovoimat otetaan huomioon. [2, s. 60.]

$$\frac{\sigma_{bd}}{f_{bd}} + \frac{\sigma_{td}}{f_{td}} \leq 1,0 \quad (45)$$

Kun maanvaraisen kuitubetonilaatan on todettu toteuttavan kaavojen 44 ja 45 asettamat ehdot, voidaan olettaa laatan kestävän sille tulevat taivutus- ja vetorasitukset. Tarkastetaan laatta vielä lävistykselle suurten pistekuormien aiheuttaessa leikkausrasituksia pistekuormien läheisyyteen. Teräskuitujen kasvattama leikkauskestävyyden laskenta-arvo määritetään kaavalla 46, jossa f_{cbk} on raudoittamattoman betonin taivutusvetolujuuden ominaisarvo. [2, s. 64] Kaavassa jäännöslujuuskerroin $R_{10,20}$ laitetaan muodossa 0...1,0 kaavoista 41 ja 42 poiketen [10].

$$\tau_{fd} = 0,12R_{10,20}f_{cbk} \quad (46)$$

Kerroin β lasketaan kaavalla 47. Kaavassa e on lävistysvoiman epäkeskisyyden leikkautuvan alueen painopisteestä ja A_u on pistekuorman reunasta puolikkaan laatan korkeuden etäisyydellä olevan leikkauksen rajoittama pinta-ala. Kun epäkeskisyyden $e = 0$ mm, β saa arvon 0,40. Kerroin k lasketaan kuitubetonilaatalle kaavalla 48, johon laatan korkeus h laitetaan metreinä. Kerroin on kuitenkin yksikötön. [2, s. 64 – 65.]

$$\beta = \frac{0,40}{1 + \frac{1,5e}{\sqrt{A_u}}} \quad (47)$$

$$k = 1,6 - h \quad (48)$$

Lopulta päästään maanvaraisen teräskuitubetonilaatan lävistyskestävyyden laskentaan (kaava 49). Kaavaan termit ovat edellä laskettuja arvoja kaavoista 46 ja 47. Lisäksi on laatan korkeus h , pistekuorman reunasta $0,5h$ etäisyydellä olevan leikkauksen rajoittama piiri u ja betonin vetolujuuden laskenta-arvo f_{ctd} . [2, s. 64 – 65.]

$$V_c = k\beta uh(f_{ctd} + \tau_{fd}) \quad (49)$$

Varmalla puolella ollaan, jos kaavan 49 leikkauskapasiteetin arvoa verrataan suoraan pistekuorman suuruuteen. Tarkemmin lävistävää voimaa voidaan arvioida laatan alla vaikuttavan pohjapaineen avulla, kun ajatellaan maanvaraista laattaa ylösalaisin, jolloin pohjapaine on laattaa kuormittava jakautunut kuorma, ja pistekuorma on laatta lävistämään pyrkivä tuki. Tällöin pistekuorman kuormitusalueen reunasta laatan korkeuden etäisyydellä olevan piirin sisällä vaikuttavan pohjapaineen resultantti voidaan vähentää koko pohjapaineen resultantista. Pohjapaine tulee tällöin selvittää pelkän pistekuorman vaikutuksesta. [15, s. 41 – 42.]

2.5 Rakennusfysikaalinen toiminta

Tässä luvussa käsitellään maanvaraisten, eristeen päälle valettujen betonilattioiden ja alustarakenteiden rakennusfysikaalista toimintaa uudisrakennuksissa. Routasuojauksia ei käsitellä. Rakennusfysiikkaa tarkastellaan kosteuden, lämpötilan ja tiiveyden kannalta. Käydään myös läpi tavanomaisten maanvaraisten lattiaeristeiden EPS:n ja XPS:n vaikutus rakennusfysikaaliseen toimintaan ja lisäksi tarkastellaan kivivillaa lattiaeristevaihtoehtona. Lopuksi tutkitaan rakennusfysikaalisia olosuhteita homeen kasvun kannalta.

Maanvastaisille rakenteille on ominaista, että lämpötilan ja kosteuden muutokset tapahtuvat hitaammin kuin ilmaan rajoittuvissa rakenteissa. Voi mennä esimerkiksi vuosi rakennuksen valmistumisen jälkeen ennen kuin rakenteen lämpötilat ovat asettuneet. Ulkoseinien läheisyydessä maaperän lämpötilassa saattaa tapahtua heittoja verratessa kesä- ja talviaikaa mutta keskellä rakennusta maapohjan lämpötila hakee pikkuhiljaa tason, johon se jää. Alusmaan lämpötilat heittelevät entistä vähemmän, jos rakennuksen ilmastointi pitää sisäilman ympäri vuoden saman lämpöisenä. Sisäilmayhdistyksen

mukaan tyypillinen maapohjan lämpötila tasaantumisen jälkeen on noin 15 – 16 °C. Tämän lämpöisen alustarakenteen tapauksessa sisäilmaan suuntautuva diffuusio on otettava aina huomioon, sillä maaperään oletetaan suunnitteluvaiheessa aina 100 % suhteellinen kosteus. Tällöin maaperän vesihöyryn määrä saattaa olla suurempi kuin rakennuksen sisäilman vesihöyryn määrä, jolloin pitoisuuden pyrkivät tasoittumaan diffuusiolla. [16][17, s. 151 – 157.]

Maanvastaisen alapohjan kosteus voi siirtyä diffuusion, konvektion ja kapillaari-ilmion avulla, joista vesihöyryn diffuusio ja kapillaarinen veden nousu ovat yleisimmät. Rakenteiden sisäinen konvektiokin tosin on mahdollista esimerkiksi hyvin ilmaa läpäisevissä maakerroksissa ja villaeristeessä. EPS eli paisutettu polystyreeni on muovieriste, jonka vesihöyryn vastus on suuri. Diffuusio tapahtuu siis melko hitaasti sen läpi. Jos eristeen saumat ovat tiiviitä ja päällekkäisten kerrosten saumat on limitetty, myöskään konvektio ei pääse tässä materiaalissa tapahtumaan. EPS-eristeen kapillaarisuus on myös melko pieni. Näistä voidaan päätellä, että kyseisen eristeen kosteustekninen toiminta on kosteusliikkeitä estävä. Suulakepuristettu polystyreeni XPS on vielä tehokkaampi kosteusliikkeiden estäjä umpisoluisen rakenteensa takia. Lisäksi eristeen pinnassa on ”pintanahka”, joka koostuu yhtenäisestä polystyreenikerroksesta ilman solurakennetta. Pinta on vettä hylkivä, joten eristeen veden imukyky on todella heikko. [16][17, s. 47, 154, 416 – 417.]

Muovieristeitä käytettäessä maanvaraisen lattian kuivuminen alaspäin on melko hidasta ja joissain tapauksissa lähes pysähtynyt. Lattiapinnoitteet tulisi valita tällöin siten, että kuivuminen olisi mahdollista pinnoitteiden läpi ylöspäin. Kivivillaeristeessä taas vesihöyryn diffuusio ja konvektio pääsevät tapahtumaan melko vapaasti huokoisen rakenteen ansiosta. Tämä mahdollistaa maanvaraisen betonilattian kuivumisen alaspäin, koska diffuusiosta vesihöyryä siirtyy suuremmasta pitoisuudesta pienempään. Lisäksi nestemäinen vesi pääsee hitaasti valumaan villan läpi alusrakenteisiin ja sieltä eteenpäin esimerkiksi salaojiin. Villan sisäisen konvektion vaikutusta on taas hankala arvioida, ellei se ole hallittu ilmiö. Oikealla suunnittelulla ja toteutuksella konvektion voi saada lattiaa kuivattavaksi ilmiöksi. Kivivillan alhainen vesihöyrynvastus voi olla myös heikkous. Se mahdollistaa tietyissä olosuhteissa kosteuden siirtymisen maapohjasta ylöspäin betonilaattaan asti. [16][17, s. 154 – 155, 412 – 417.]

Maanvaraisen betonilaatan ilmatiiveys on aina suunniteltava ja toteutettava huolellisesti riippumatta radonin esiintymismäärästä rakennettavalla alueella, sillä maaperässä on

lähes aina jonkin verran mikrobikasvua. Nykyaikana rakennusten ilmanvaihto säädetään useimmiten hieman alipaineiseksi, joten mikrobeja ja radonia saattaa päästä kulkeutumaan laatan epätiivetykskohdista sisäilmaan. Maanvaraisten laattojen ilmatiiveyden varmistamisessa voidaan käyttää radonin torjuntaan olevaa ohjeistusta. Laatan reunoilla bitumikermi ulotetaan vähintään 150 mm laatan alle ja se on joko liimattu pystyrakenteeseen, tai tulee sokkelirakenteen ja seinärakenteen välistä laatan alle. Putkilävistyskohdissa taas voidaan kierittää ennen betonivalua putken ympärille muutama kierros elastista saumanauhaa siten, että laatan yläpinnassa valu ei kosketa putkea. Valun jälkeen nauha otetaan pois ja, kun laatta on kuivunut tarpeeksi, laitetaan putken ja laatan väliin elastinen saumamassa. Lisää rakenteiden tiivistämisestä löytyy RT-ohjekortista RT 81-11099. [16][17, s. 46 – 47, 153, 156 – 157][18.]

Taulukko 8. Parannetun homemallin homehtumisherkkyyssluokat ja niihin kuuluvat rakennusmateriaalit [17, s. 61.]

Homehtumisherkkyyssluokka	Rakennusmateriaalit
Hyvin herkkä HHL1	Karkeasahattu ja mitallistettu puutavara (mänty ja kuusi), höylätty mänty
Herkkä HHL 2	Höylätty kuusi, paperipohjaiset tuotteet ja kalvot, puupohjaiset levyt, kipsilevyt
Kohtalaisen kestävä HHL 3	Mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit, kevytbetoni, kevytsorabetoni, karbonatisoitunut vanha betoni, sementtipohjaiset tuotteet, tiilet
Kestävä HHL 3	Lasi ja metallit, alkalinen uusi betoni, tehokkaita homeensuoja-aineita sisältävät materiaalit

Homeen kasvua voidaan tarkastella eri rakennusmateriaalien pinnoilla muuttuvissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona VTT:n ja TTY:n yhdessä kehittämän parannetun homemallin avulla. Kyseinen homemalli on tällä hetkellä pisimmälle kehitetty työkalu maailmassa homeriskin arviointiin. Mallissa rakennusmateriaalit jaotellaan taulukon 8 mukaan homehtumisherkkyyssluokkiin. Homehtumisherkkyyss taas määrittää useimmissa tapauksissa materiaalin homeen taantumislukon (taulukko 9), joka kertoo, kuinka nopeasti home vähenee rakenteen pinnalla olosuhteiden muuttuessa epäedulliseksi homeen kasvun kannalta. EPS, XPS ja kivivilla voidaan kyseisten taulukoiden mukaan luokitella homehtumisherkkyyssluokkaan HHL 3 (mineraalivillat, muovipohjaiset materiaalit) ja sitä vastaavaan homeen taantumislukkaan HTL 4. [17, s. 60 – 62.]

Taulukko 9. Homeen taantumaluokan määräytyminen homehtumisherkkyyden mukaan useimmissa tapauksissa parannetussa homemallissa [17, s. 62.]

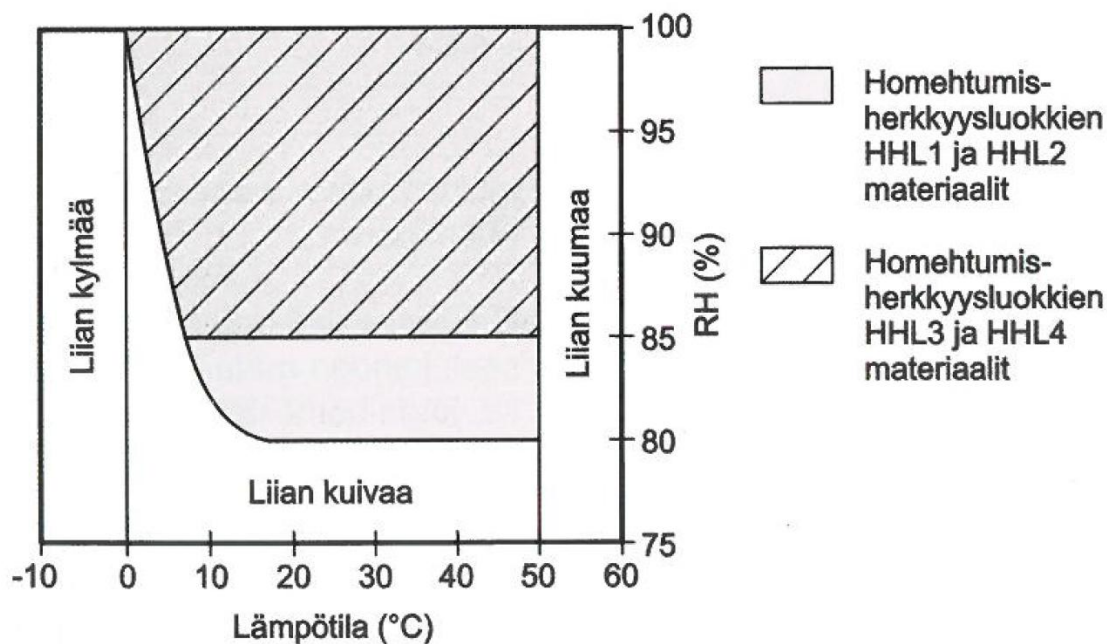
Homehtumisherkkyydsluokka	Homeen taantumaluokka
Hyvin herkkä HHL1	Merkittävä taantuma HTL 2
Herkkä HHL 2	Kohtalainen taantuma HTL 3
Kohtalaisen kestävä HHL 3	Vähäinen taantuma HTL 4
Kestävä HHL 3	Vähäinen taantuma HTL 4

VTT:n ja TTY:n parannetussa homemallissa rakennusmateriaalien pinnalla esiintyvää homekasvustoa vertaillaan malliin kehitetyllä homeindeksillä (taulukko 10). Homeindeksin M vaihteluväli on 0 – 6 ja sen avulla kuvataan tietyn materiaalin pinnalla olevan homeen lisääntymistä ajan funktiona tietyissä kosteus ja lämpötilaolosuhteissa. [17, s. 60.]

Taulukko 10. Parannetun homemallin homeindeksitasot ja niiden selitykset [17, s. 60.]

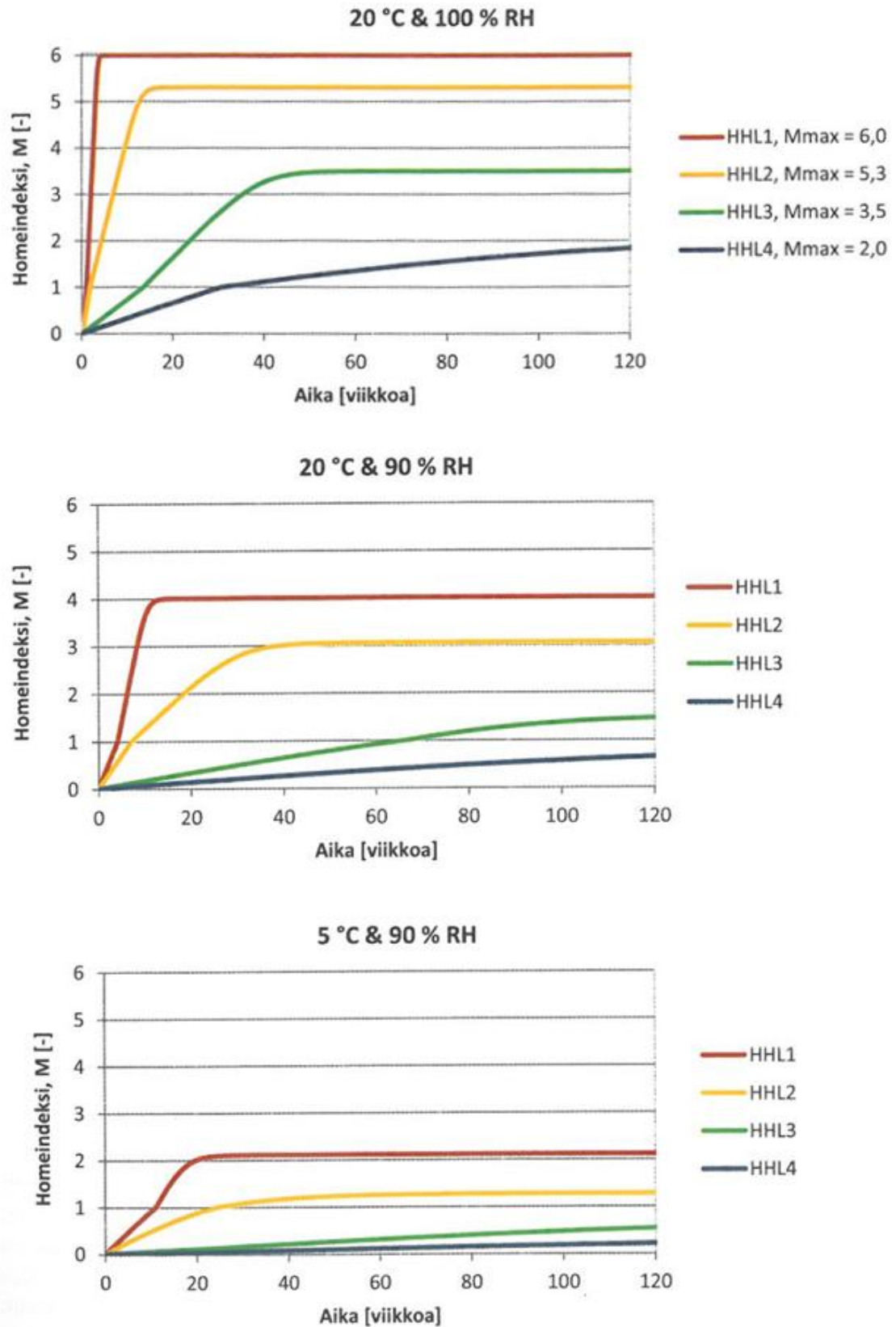
Homeindeksi M	Havaittu homekasvu	Huomautuksia
0	Ei kasvua	Pinta puhdas
1	Mikroskoopilla havaittava kasvu	Paikoin alkavaa kasvua, muutama rihma
2	Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Homerihmasto peittää 10 % tutkitavasta alasta (mikroskoopilla). Useita rihmastopesäkkeitä
3	Silmin havaittava kasvu Selvä mikroskoopilla havaittava kasvu	Alle 10 % peitto alasta (silmillä) Alle 50 % peitto (mikroskoopilla) Uusia itiöitä alkaa muodostua
4	Selvä silmin havaittava kasvu Runsas mikroskoopilla havaittava kasvu	Yli 10 % peitto alasta (silmillä) Yli 50 % peitto (mikroskoopilla)
5	Runsas silmin havaittava kasvu	Yli 50 % peitto alasta (silmillä)
6	Erittäin runsas kasvu	Lähes 100 % peitto, tiivis kasvusto

Kuvassa 24 on esitetty parannellun homemallin mukaisesti homeen kasvulle otolliset kosteus- ja lämpötilaolosuhteet. Kuvasta voidaan huomata, että taulukon 8 luokkaan HHL 3 kuuluvien materiaalien suhteellisen kosteuden yläraja on yli 16 °C:n lämpötilassa 85 %. Tätä korkeammilla suhteellisen kosteuden arvoilla homeriski alkaa kasvaa. Alle 16 °C:n lämpötilassa suhteellisen kosteuden arvot saavat olla korkeampia ennen kuin homehtuminen on todennäköistä. [17, s. 60 – 61.]



Kuva 24. Parannetun homemallin homeen kasvun kannalta suotuisat olosuhteet eri homeutumisherkkyysluokissa [17, s. 61.]

Kuvassa 25 on esitetty homeindeksin kasvun kuvaajat tietyn homeutumisherkkyysluokan materiaaleille annetuissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa ajan funktiona. EPS, XPS ja kivivilla ovat homeutumisherkkyysluokan HHT 3 rakennusmateriaaleja. Maanvaraisissa lattioissa voidaan eristeen yläpinnan ajatella olevan lähellä lämpötilaa 20 °C. Tällöin ylintä kuvaajaa tulkitsemalla 100 %:n suhteellisessa kosteudessa olevan eristeen homeindeksin maksimi-arvo on 3,5, joka saavutetaan kyseisissä olosuhteissa noin 40 viikossa. 90 % suhteellisessa kosteudessa samassa lämpötilassa olevan eristeen homeindeksin maksimi-arvo on noin 1,5, joka saavutetaan noin 120 viikon aikana mikäli olosuhteet pysyvät samoina. Homeindeksien merkitykset on kerrottu taulukossa 10. [17, s. 62 – 63.]



Kuva 25. Homeindeksien kehittyminen ja maksimiarvot homehtumisherkkyysluokissa kuvaajien yläpuolella merkityissä lämpötila- ja kosteusolosuhteissa [17, s. 62 – 63.]

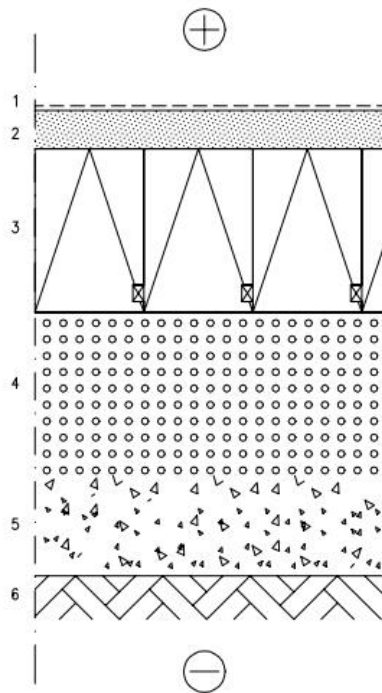
Homeen kasvu tapahtuu useimmiten rakenteen pinnalla, mutta huokoisissa rakenteissa kuten mineraalivillassa hometta voi kasvaa myös huokoisen rakenteen sisällä koko materiaalin alueella. Tällaisissa tapauksissa homeen kokonaismäärä on paljon suurempi kuin homeindeksillä rakenteen pinnalla mitattu määrä. Kahden erilaisen rakenteen rajapinnassa pinnan homehtumista tulee suurimmassa osassa tapauksista tarkastella sen materiaalipinnan mukaan, joka kuuluu heikompaan homehtumisherkkyyssluokkaan. Huonomman homehtumisherkkyyssluokan materiaali usein myös lisää viereisen paremman luokan materiaalin homehtumisherkkyyttä. Poikkeuksena ovat homeenes-toaineella käsitellyt materiaalit ja alkalinen uusi betoni, jotka heikentävät homeen kasvua kosketuksessa olevassa viereisessä materiaalissa. Tämä kuitenkin edellyttää täydellistä kosketusta pintojen välillä, mikä on harvinaista. Jos pintojen välillä on vähänkin rakoa, home pääsee kasvamaan siinä normaalisti. [17, s. 62 – 65.]

3 Maanvarainen villaeristeinen kuitubetonirakenne

Tämän insinööriyön tärkeimpinä tavoitteina on selvittää tutkittavan maanvaraisen villaeristeisen kuitubetonilattiarakenteen statiikan ja rakennusfysiikan toiminta sekä vertailla tuloksia EPS-eristeiseen lattiaan. Tässä luvussa käsitellään teoreettiselta pohjalta tutkimuksen kohteena olevaa rakennetta ja sen staattista sekä rakennusfysikaalista toimintaa. Tutkitaan, kuinka ohuisiin laattarakenteisiin voidaan villaeristeisen rakenteen tapauksessa mennä, jotta rakenne kantaa sille suunnitellut kuormat. Laatan ohentaminen alle 80 mm:n on suotavaa vain kuituraudoitteisena, koska tankorautoitteet vaativat tarvittavan määrän suojabetonia ympärilleen. Lisäksi ohentaminen lisää laatan nurkien käyristymisen riskiä. EPS -eristeinen lattia kuivuu todella hitaasti alaspäin mutta alkuvaiheessa kuivuminen on ylöspäin nopeaa. Tästä syntyy laatan alapinnan ja yläpinnan välille kutistumaero, joka pyrkii käyristämään laattaa. Villarakenteella pyritään saamaan kuivuminen tapahtumaan alaspäin lähes yhtä tehokkaasti kuin ylöspäin, jotta kutistumaero ja sitä myötä laatan käyristymät jäisivät pienemmiksi. Näillä perusteiden voitaisiin ohentaa betonilaatan paksuutta.

Tutkimuksen kohteena olevassa rakenteessa on kaksi päärakenneosaa, jotka ovat rakenteellisilla kuiduilla vahvistettu betonilaatta ja laatan alustarakenne (kuva 26). Kuituina betonin seassa voidaan käyttää sekä makropolymeerikuituja, että teräskuituja tarvittava määrä laatan kantavuuden ja pakkovoimien kannalta. Alusta koostuu lämmöneristekerroksesta, kapillaarikatkona toimivasta sorakerroksesta, mahdollisista maa-

täytöistä ja perusmaasta. Eristeenä tutkimuksen rakenteessa käytetään Paroc Oy:n COL 40g [19.] kivivillaa, jonka alapinnasta 20 mm:n etäisyydellä on 20 mm leveä ja 30 mm korkea pituusuntainen tuuletusura. Kivivillalamellin leveys on 200 mm, pituus 1500 mm ja sen villakuidut ovat kohtisuorasti betonirakenteen pintaan nähden poiketen villalevyeristeistä. Parocin verkkosivuilla [19.] lamellin paksuudelle on annettu arvoiksi 145 ja 225 mm:ä mutta tarvittaessa saa valmistettua muitakin paksuuksia. Lamellin leveyden ollessa 200 mm myös tuuletusurat toistuvat 200 mm:n välein valmiissa eristerakenteessa, jossa lamellit on ladottu tiiviisti vierekkäin (kuva 27).



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. Kuitubetonilaatta rakennesuunnitelmien mukaan
3. Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. Kapillaarisora, esim. pesty 16–32
5. Mahdollinen täyttömaa, esim. hiekkasora
6. Perusmaa

Kuva 26. Tutkittavan rakenteen rakennetyyppi.

Villaeristeen asennuksessa on huolehdittava alustan tasaisuudesta, jotta tuuletusurat ovat mahdollisimman jatkuva verkosto. Tasolaser on hyvä apuväline alustan tasaisuuden tarkastuksessa. Villa voidaan latoa kuvan 27 mukaisesti vierekkäin siten, että lyhyet saumat tulevat aina samaan kohtaan yhteen riviin. Näin toimittaessa tulee ladonnas-

sa olla kuitenkin melko tarkka, etteivät pidemmät saumalinjat lähde työn edetessä harittamaan. Jos lamellien päät eivät ole täysin kohdakkain, eivät myöskään tuuletusurat kohtaa täydellisesti. Vaihtoehtoinen tapa ladontaan on siten, että pidemmän saumalinjat ovat suoria viivoja ja lyhyet saumat on limitetty. Tämä onnistuu käytännössä esimerkiksi aloittamalla joka toinen rivi puolikkaalla lamellilla. Tällöin siis lyhyisiin saumoihin tulee $\frac{1}{2}$ limitys.

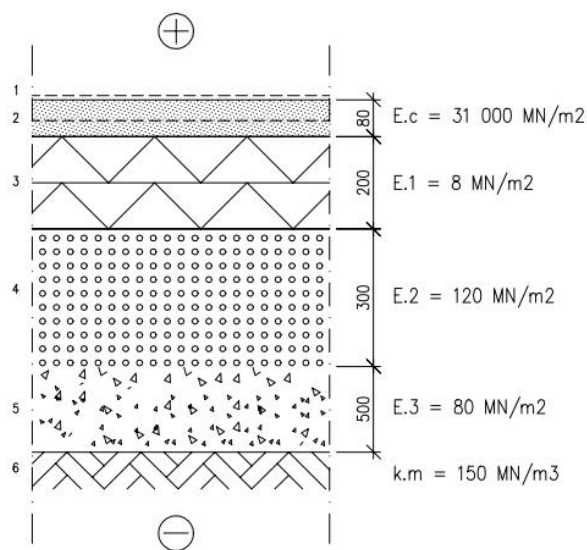


Kuva 27. Tutkittavan rakenteen Paroc COL 40g eristettä ladottuna Pieksämäen koekohteella. Kohteelle tilatut lamellit ovat mitoiltaan 200 x 1500 x 300 mm (leveys, pituus, paksuus).

Huomion arvoinen asia eristeen asennuksessa on saumojen tiiveys. Lamellit tulisi pyrkiä asentamaan mahdollisimman tiiviisti kiinni toisiinsa, ettei niiden välille jäisi rakoja. Sen lisäksi, että raot heikentävät rakenteen lämmöneristävyyttä, ne voivat aiheuttaa tuuletusurien toiminnan heikkenemistä betonivalun jälkeen. Jos rako on tarpeeksi suuri, saattaa tuore betoni valua saumaa pitkin tuuletusuraan ja täyttää sen umpeen. Eristeen päälle voidaan laittaa suodatinkangas estämään betonin pääsy saumoihin ja sitä kautta tuuletusuriin. Se voidaan laittaa koko lattiaan taikka vain tarpeellisiksi huomattuihin kohtiin.

3.1 Vertailu tankoraidoitettuun EPS-eristeiseen betonilattiaan

Koska lamellivillalattiarakenne on ainakin toistaiseksi suunnattu pientalojen suhteellisen pienipinta-alaisiin maanvaraisiin lattioihin, käytetään vertailussa kaikissa rakenteissa eurokoodin mukaisia asuinrakennuksen hyötykuorman ja pistekuorman arvoja. Vertailurakenteena käytetään yleisesti pientaloissa käytettyä rakennetyyppiä, jossa laatan alla on EPS-eriste ja laatta on raudoitettu keskeisellä rauditusverkolla (kuva 28). Liitteessä 2 on esitetty rakenteen raudituksen mitoitus kun laatan paksuus on pientalojen laatoille tyypillinen 80 mm.



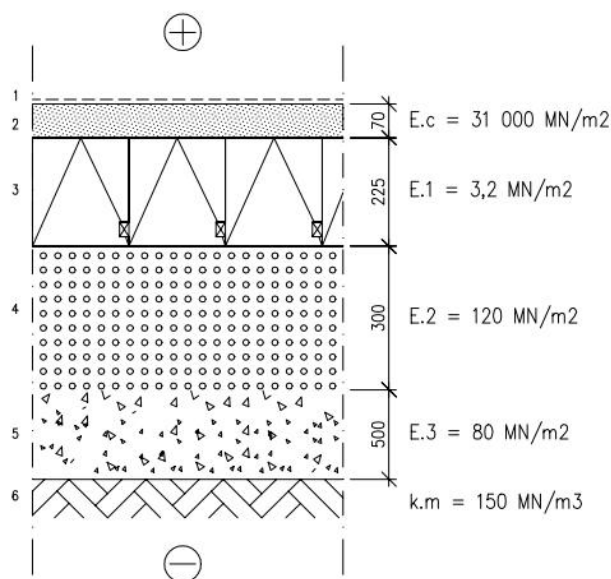
1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 80 mm Teräsbetoni-laatta keskeisellä raudoituksella, C25/30
3. 200 mm Lämmöneriste: EPS 100 LATTIA
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16–32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (RakMK C3 vaatimus)

Kuva 28. Vertailurakenteen laskentarakennetyyppi.

Tutkittavasta rakenteesta on tehty kolme erilaista rakennetyyppiä, joissa ainoastaan lattialaatan paksuus vaihtelee. Kuvassa 29 on esitetty rakennetyyppi, jossa laatan paksuus on 70 mm ja eriste laatan alla on tuuletusurilla varustettu lamellivilla. Laatan kuidut mitoitetaan tämän tapauksen lisäksi myös 60:n ja 50 mm:n laattapaksuuksilla, sillä alaspäin suuntautuva kuivuminen mahdollistaa laatan ohentamisen vähemmällä käyris-

tymillä. Ohuesta laatasta aiheutuvia toimenpiteitä ja vaatimuksia jatkotutkimuksille pohditaan tutkimuksen johtopäätöksissä. Näillä kolmella laatan paksuudella on laskettu kuitumäärä virtuaalikuidun jäännöslujuuksia ja lujuuskaavoja käyttäen teoksen by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011 [2.] mukaisesti. Vaikka laskenta suoritetaan teräskuitu- ja mallintavia virtuaalikuituja käyttäen, voidaan rakenne tehdä myös makropolymeeri- kuituilla. Tämä edellyttää, että voidaan osoittaa makropolymeerikuiturakenteen saavut- tavan samanarvoinen jäännöslujuus laatan haljenneessa tilassa. Tuotetoimittajan suo- situkset liikuntasaumajaosta tulee myös ottaa huomioon. Makropolymeerikuitulaatoille suositellaan usein tiettyä maksimikutistumissaumaväliä riippuen kuiduista.



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 70 mm Kuitubetonilaatta teräskuituilla, betoni C25/30
3. 225 mm Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16–32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

Kuva 29. Maanvaraisen villaeristetyn kuitubetonilattian laskentarakenntyyppi. Liitteessä 2 on esitetty rakennetyypit jokaiselle laattapaksuudelle erikseen.

Rakennusfysikaalisten tarkastelujen yhteydessä kerrotaan tarkemmin, millä reunaehdoilla lämpötilat ja kosteudet on määritetty eri vuodenaikoina ja erilaisissa olosuhteissa. Rakenteiden mitat pysyvät näissä tarkasteluissa samoina.

3.1.1 Rakennelaskelmat

Liitteessä 2 on tarkat rakennelaskelmat EPS-eristeiselle vertailulaskentarakenteelle ja kolmelle villaeristeiselle laskentarakenteelle. Laskennan tarkat yksityiskohdat on käyty liitteessä läpi ennen laskennan suorittamista. Seuraavaksi esitetty taulukko 11 esittää näiden laskelmien yhteenvedon.

Taulukko 11. Vertailulaskennan yhteenvedo. Kuitubetonirakenteiden kuitumäärät ovat virtuaalikuuduilla laskettuja arvoja.

	Rakenne 1	Rakenne 2	Rakenne 3	Rakenne 4
Betonin lujuusluokka	C25/30	C25/30	C25/30	C25/30
Raudoitustapa	kuitu	verkko	kuitu	kuitu
Betonilaatan paksuus [mm]	70	80	60	50
Eriste	COL 40g	EPS 100	COL 40g	COL 40g
Eristeen lujuus, 10 % [kPa]	40	100	40	40
Eristeen lujuus, 2 % [kPa]	14	35	14	14
Eristeen kimmokerroin [MPa]	3,2	8,0	3,2	3,2
Alustaluku k [MN/m³]	11,7	24,7	11,7	11,7
Suhteellinen kuormitusjakauma	0,1205	0,2385	0,1245	0,1305
KY1: Mitoittava momentti [kNm]	0,65	0,49	0,65	0,64
KY1: Kuitumäärä / raudoitus	25 kg/m ³	5T #150	25 kg/m ³	45 kg/m ³
Jäännöslujuusarvo R_{10,20} [%]	57	-	57	83
KY2: Mitoittava momentti [kNm]	0,50	0,38	0,50	0,49
KY2: Mitoittava vetovoima [kN/m]	11,75	13,00	10,50	9,25
KY2: Kuitumäärä / raudoitus	25 kg/m ³	5T #150	30 kg/m ³	45 kg/m ³
Jäännöslujuusarvo R_{10,20} [%]	57	-	64	83

Taulukossa 11 KY1 ja KY2 tarkoittavat luvun 2.2 taulukon 5 mukaisia kuormitusyhdistelmiä maanvaraiselle lattialle seuraamusluokassa CC2. Voidaan todeta, että asuinrakennuksen kuormituksilla rakenteet 1, 2 ja 3 kestävät kuormien ja pakkovoimien aiheuttamat rasitukset varsin pienellä raudoitusmäärällä, mikäli voidaan olettaa, ettei nurkkatai reuna-alueilla sijaitse suuria pistekuormia. Rakenteen 4 todella ohut laattakin vaikuttaisi kestävän kuormitukset, jos kuitumäärä nostetaan 45 kiloon betonikuutiota kohden. Mikäli voidaan olettaa laatan kuivuminen villaeristeen läpi maakerrokseen ja, että tällöin kuivumiskutistumaero alapinnan ja yläpinnan välillä ei ole kovin suuri, voidaan pitää laatan nurkkien käyrityksiä melko pieninä huolimatta laatan ohuudesta. Rakenteen toteutettavuuteen otetaan kantaa luvussa 5.

Asuinrakennuksen kuormilla kaikkien 4 rakenteen taipumat ovat niin pieniä, ettei niillä normaalitilanteissa ole juurikaan vaikutusta. Taipumien arvot vaihtelivat välillä 0,1 mm ja 0,6 mm. Pohjapaineiden laskenta on suoritettu kuormitusyhdistelmässä KY3, joka muodostettiin hyötykuormien pitkäaikaisyhdistelmäksi. Näin voidaan verrata saatuja pohjapaineen arvoja eristeiden pitkäaikaiseen kuormankestoon 2 %:n painumalla. 3,75 kPa on suurin rakenteiden pohjapaine ja se on saavutettu rakenteessa 1 kuormitusyhdistelmällä 3. Rakenteen 1 eriste on Paroc COL 40g lamellivilla, jonka pitkäaikaiseksi puristuslujuudeksi on saatu 14 kPa (taulukko 11). Voidaan siis sanoa, että pohjapaineiden lasketut arvot eivät saavuta lähellekään eristeiden puristuslujuutta laatan ollessa asuinrakennuksen maanvarainen lattia ja rakennetyypin ollessa jokin neljästä lasketusta.

3.1.2 Rakennusfysikaalinen toiminta

Villaeristeisen maanvaraisen betonilattian rakennusfysikaalinen toiminta voi olla useiden mielestä riskialtis rakenne, koska villaa, kosteutta ja tiivistä suljettua tilaa ei mielletä toimivaksi yhdistelmäksi. Kuitenkin julkaisussa RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 [17.] on esitetty VTT:n ja TTY:n yhdessä työstämä parannettu homemalli, joka luokittelee sekä kivivillan, että solumuovieristeen samaan homehtumisherkkyyssluokkaan HH3, joka tarkoittaa kohtalaisen kestävästä materiaalista homehtumisen kannalta. Ei voida siis sanoa, että tutkittavan rakenteen lamellivillaeriste Paroc COL 40g olisi yhtään vertailurakenteen EPS 100 LATTIA -eristettä herkempi homehtumaan. Kuvan 25 mukaan homehtumisherkkyyssluokan HH3 materiaaleilla homehtumisen vaatima vähimmäiskosteus on 85 % maanvaraisille lattioille ominaisissa lämpötiloissa. Eristeiden toiminta kosteusliikkeiden kannalta on tosin melko erilainen ja pyritäänkin selvittämään, miten diffuusio ja konvektio vaikuttavat molemmissa rakenteissa. Myös painovoimainen veden siirtyminen rakenteissa huomioidaan. Luvussa 2.5 on kerrottu maanvaraisten lattioiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta yleisellä tasolla.

Tutkittavan rakenteen villaeristeen höyty sekä haitta on sen huokoisuus. Villan ehdoton etu laatan käyritysmien kannalta on, että se päästää betonilaatan kuivumisvaiheessa heti valun jälkeen ylimääräisen veden kulkemaan painovoimaisesti maakerroksiin ja parhaimmassa tapauksessa pohjaveteen tai salaojajärjestelmään asti. Vesihöyryn diffuusio eli yksittäisten vesimolekyylien siirtyminen suuremmasta kosteuspitoisuudesta pienempään tapahtuu villassa yhtä herkästi molempiin suuntiin. EPS-solumuovieristeen diffuusiovastuskerroin on vähintään noin 30-kertainen kivivillaeris-

teeseen verrattuna [17, s. 412 – 417.] Se hidastaa siis diffuusiota 30-kertaisesti kiviviliaan verrattuna toimien näin osittaisena höyrynsulkurakenteena. 0,2 mm paksun höyrynsulkumuovin diffuusiovastuskerroin on noin 10000 – 50000 -kertainen verrattuna kiviviliaan [17, s. 406 - 407.] Suhteellinen diffuusiovastuskerroin eli S_d -arvo kuvaa, kuinka paksua ilmakerrosta tarkasteltava rakenne vastaa diffuusiovastukseltaan. Kivivillan S_d -arvo on 0,05 m ja EPS 100 LATTIA -eristeellä se on 1,3 ... 3,1 m. Höyrynsulkumuovin suhteellinen diffuusiovastus on taas 20 ... 94 m. [17, s. 406 - 417.]

Vesihöyryn diffuusion suunnan arvioiminen rakenteessa vaatii aina ilman vesihöyrypitoisuuksien selvittämistä eri rakenneosien rajapinnoilla. Taulukossa 12 on esitetty lämpötilasta riippuvat ilman kylläisen vesihöyryn maksimikosteuden arvot asuinrakennusten maanvaraisille lattioille ominaisissa lämpötiloissa. Arvot kuvaavat siis, kuinka paljon kuutiometrissä ilmaa on vettä grammoina tietyssä lämpötilassa suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. [20.]

Taulukko 12. Kylläisen vesihöyryn maksimikosteus lämpötilan mukaan [20.]

$t / ^\circ\text{C}$	$\rho_{\text{kyll}} / (\text{g}/\text{m}^3)$
10	9,4
11	10,0
12	10,7
13	11,3
14	12,1
15	12,8
16	13,6
17	14,5
18	15,4
19	16,3
20	17,3
21	18,3
22	19,4
23	20,6
24	21,8
25	23,0

Kaavalla 50 voidaan laskea vesihöyryn määrä grammoina kuutiometrissä ilmaa tietyllä suhteellisen kosteuden arvolla tietyssä lämpötilassa [20.] Kaavassa RH on prosentteja

ja ρ_{kyl} on esimerkiksi taulukosta 12 valittu kylläisen vesihöyryn maksimikosteus haluttussa lämpötilassa. Joitakin arvoja on laskettu taulukkoon 13.

$$\rho_v = \frac{RH * \rho_{kyl}}{100\%} \quad (50)$$

Taulukko 13. Vesihöyryn määrä grammoina kuutiometrissä ilmaa tietyllä lämpötilan ja suhteellisen kosteuden arvolla.

RH / % ->	90	80	70	60	50
t / °C	$\rho_v / (g/m^3)$	$\rho_v / (g/m^3)$	$\rho_v / (g/m^3)$	$\rho_v / (g/m^3)$	$\rho_v / (g/m^3)$
10	8,5	7,5	6,6	5,6	4,7
11	9,0	8,0	7,0	6,0	5,0
12	9,6	8,6	7,5	6,4	5,4
13	10,2	9,0	7,9	6,8	5,7
14	10,9	9,7	8,5	7,3	6,1
15	11,5	10,2	9,0	7,7	6,4
16	12,2	10,9	9,5	8,2	6,8
17	13,1	11,6	10,2	8,7	7,3
18	13,9	12,3	10,8	9,2	7,7
19	14,7	13,0	11,4	9,8	8,2
20	15,6	13,8	12,1	10,4	8,7
21	16,5	14,6	12,8	11,0	9,2
22	17,5	15,5	13,6	11,6	9,7
23	18,5	16,5	14,4	12,4	10,3
24	19,6	17,4	15,3	13,1	10,9
25	20,7	18,4	16,1	13,8	11,5

Luodaan villarakenteesta taulukko 14, jossa selvitetään eri lämpötila- ja kosteusolosuhteissa rakenneosien vesihöyryn määrät. Näin voidaan arvioida rakenteen diffuusion suuntaa eri tilanteissa. Taulukossa diffuusion suunnat on kuvattu nuolilla. Perusmaan suhteellisen kosteuden arvona käytetään kaikissa tapauksissa 100 %, koska ilman tarkempaa tietoa rakennuksen pohjaolosuhteista ei voida tehdä päätelmiä, että suhteellinen kosteus olisi alle sen. Esimerkeissä oletetaan myös eristeen alapinnan olevan 100 %:n suhteellisessa kosteudessa, jotta saataisiin vähän varmalla puolella olevia tuloksia. Tapaukset pätevät sekä villa-, että EPS -eristeelle. Vasta arvioitaessa diffuusion nopeutta eristemateriaalin ominaisuudet ovat ratkaisevassa asemassa.

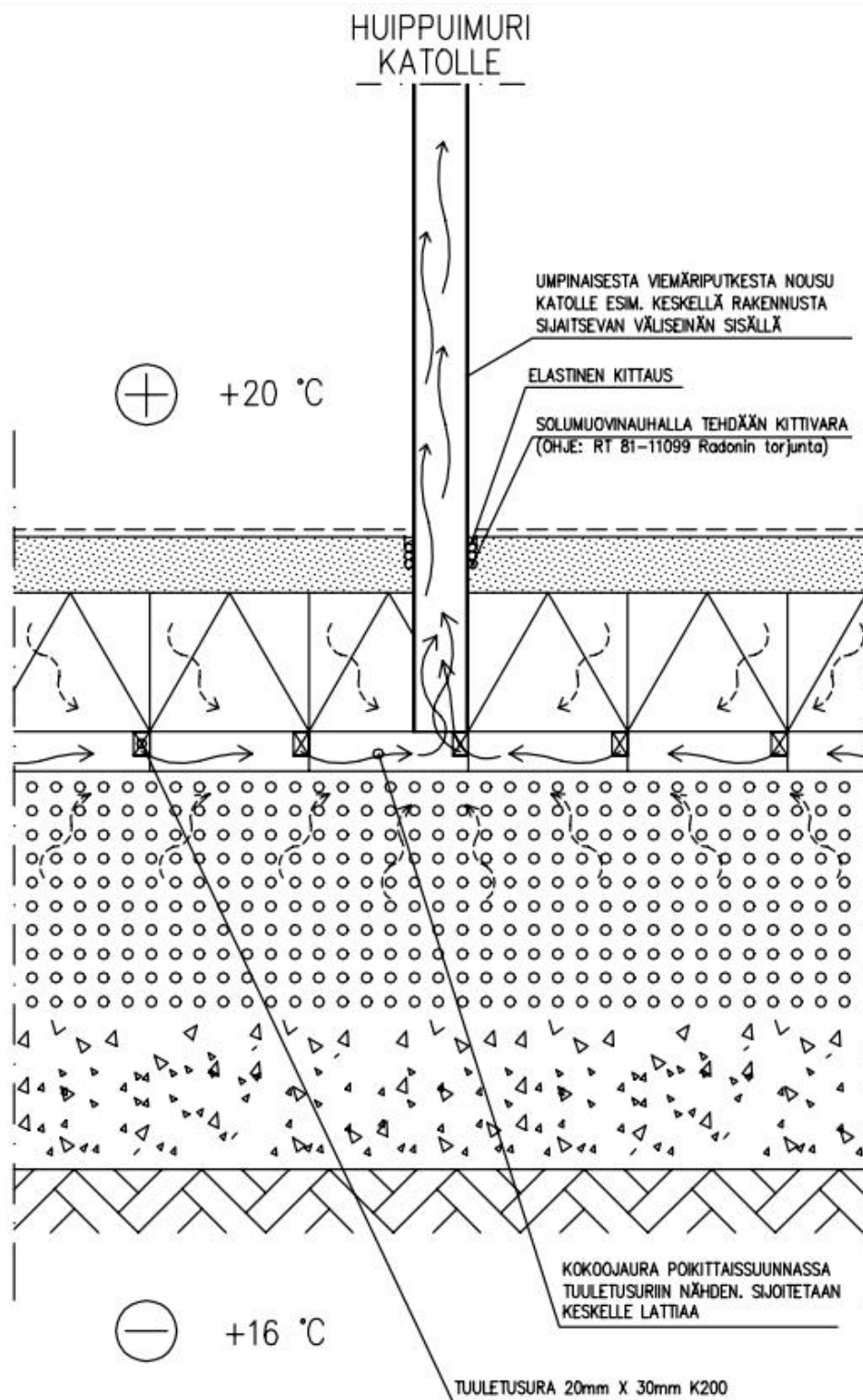
Taulukosta 14 voidaan huomata, että tapaukset 1, 3 ja 5 ovat betonilaatan kuivumisen kannalta parhaita, koska vesi siirtyy diffuusion avulla laatasta sekä ylös, että alas. Tapaus 6 on kriittinen laatan pinnoitusmateriaalin kannalta, koska kaikki diffuusio suuntautuu ylöspäin laatan läpi. Pinnoitusmateriaalin diffuusiovastus ei siis saisi olla liian suuri, jotta voidaan varmistua, ettei laatan kosteus kasva liian suureksi. Tapaukset 2 ja 4 ovat hieman tapausta 6 parempia mutta niissäkin ylöspäin suuntautuva diffuusio on melko suuri. On tietysti huomioitava, että diffuusion jatkuessa kaikki taulukon arvot voivat muuttua kosteuden siirtyessä. Hyvin paljon on maanperän kosteudesta kiinni, miten lattian kosteudet tasaantuvat ajan kuluessa.

Taulukko 14. Case-luonteisia diffuusion suunnan tarkasteluja maanvaraisissa betonilatioissa eri olosuhteissa ja vuodenaikoina. Diffuusion suunta on merkitty nuolilla.

Selite	1. Talvi, kuivuminen				2. Talvi, kuiva			
	t / °C	RH / %	ρ_v / (g/m ³)		t / °C	RH / %	ρ_v / (g/m ³)	
Sisäilma	20	50	8,7	↑	20	50	8,7	↑
Betonilaatta	20	80	13,8	↑↓	20	60	10,4	↑↓
Eristeen alapinta	16	100	13,6	↓	16	100	13,6	↓
Perusmaa	15	100	12,8	↓	15	100	12,8	↓
	3. Talvi, lat.läm., kuivuminen				4. Talvi, lattialämmitys, kuiva			
Sisäilma	22	50	9,7	↑	22	50	9,7	↑
Betonilaatta	24	80	17,4	↑↓	24	60	13,1	↑↓
Eristeen alapinta	16	100	13,6	↓	16	100	13,6	↓
Perusmaa	15	100	12,8	↓	15	100	12,8	↓
	5. Kesä, kuivuminen				6. Kesä, kuiva			
Sisäilma	24	60	13,1	↑	24	50	10,9	↑
Betonilaatta	22	80	17,5	↑↓	22	60	11,6	↑↓
Eristeen alapinta	16	100	13,6	↓	16	100	13,6	↓
Perusmaa	16	100	13,6	↓	16	100	13,6	↓

Eristetyyppi vaikuttaa suuresti diffuusion nopeuteen. Voidaan todeta, että alkuvaiheessa valun jälkeen, kun laatan kosteus on vielä korkea, diffuusion salliva villaeriste edistää laatan kuivumista alaspäin. Diffuusiota moninkertaisesti vastustava solumuovieriste taas estää suurimman osan alaspäin pyrkivästä kosteudesta, joten laatta kuivuu paljon hitaammin. Tarkasteltaessa laattaa pidemmän ajanjakson kuluttua, kun suhteellinen kosteus on saavuttanut arvon 60 %, villaeriste päästää maasta nousevan kosteuden laattaan päin monin verroin helpommin kuin solumuovieriste. Tällöin voidaankin ajatel-

la, että käytettäessä Parocin COL 40g villaa, alapinnan tuuletusurat tulevat tarpeellisiksi. Kuvassa 30 on esitetty rakenteen tuuletusperiaate.



Kuva 30. Paroc COL 40g eristeellä toteutetun maanvaraisen kuitubetonilaatan tuuletusperiaate.

Maanvaraisen villaeristeisen kuitubetonilattian tuuletus on ajateltu koko lattian alle ulottuvaksi tuuletuskanavien verkostoksi (kuva 30). Verkosto toimii hyvin samankaltaisesti kuin monihaarainen radonputkisto, jossa keskellä rakennusta on kokoojakanava ja tästä kanavasta lähtee imuhaaroja molemmille puolille rakennusta. Kuvan 30 rakennemallilla toimiva tuuletus on ajateltukin myös radonputkiston korvaavaksi rakenteeksi.

Tutkimuksen rakenteessa kokoojakanava leikataan määrättyyn kohtaan, esimerkiksi villaveitsellä eristeitä asennettaessa. Imuhaarakkeet ovat jo valmiina jokaisessa villalamellissa 20 cm:n välein. Kokoojaura kannattaa suunnitella rakennuksen pidemmän suunnan mukaan, jotta imuhaarakkeet eivät tule liian pitkiä ja menetä tuuletustehoaan rakennuksen reunoilla. Lamellien asennus tulee tällöin tehdä niin, että tuuletusurat kulkevat rakennuksen lyhyemmässä suunnassa ulkoseinältä ulkoseinälle. Kokoojaurasta nostetaan tarvittava määrä tuuletusputkia lattian läpi, jotta voidaan varmistua koko lattian olevan tuuletettu. Tuuletusputken tiivistys lattialaatan, yläpohjan ja vesikaton läpivienneissä on tärkeä. Katolla tuuletusputken päähän asennetaan huippumuri, joka varmistaa ilman liikkeen lattian alta ulos. Kyseessä on siis hallittu konvektio, jolla pyritään tuulettamaan sekä laatan alla oleva ylimääräinen kosteus, että mahdolliset radonkaasut ja muut haitalliset aineet pois maanvaraisen lattian alustasta.

3.1.3 Lattialämmitys ja lattioiden kustannuserot

Asuinrakennusten maanvaraisissa betonilattioissa on hyvin usein lattialämmitys. Käytettäessä laatan toteutuksessa kuitubetonia, ei lattialämmitysputkia tai -kaapeleita voida sitoa rauditusverkkoon kuten useimmissa tapauksissa tehdään. Mikäli laattaan halutaan laittaa verkko sitomista varten, joudutaan suojabetonietäisyydet huomioimaan ja laatan paksuudeksi suositellaan tällöin vähintään 80 mm:ä. Tällöin kannattaa suunnitella rauditusverkko saman tien kantavaksi, jolloin rakenteellisia kuituja ei välttämättä tarvita.

Vesikiertoisen lattialämmityksen putken ovat paksuudeltaan useimmiten noin 20 mm:ä. Kuitubetonirakenteessa voitaisiin sitoa putket suoraan eristeen pinnalle. Tällöin putken kohdalla laatan tehollinen korkeus joudutaan pienentämään putken halkaisijan verran. Rakenne tulee siis mitoittaa tämän pienennetyn tehollisen korkeuden mukaan. Esimerkiksi 70 mm:n laatasta lattialämmitysputken pienentävät tehollisen korkeuden noin 50 mm:iin. Luvun 3.1.1 mukaisella rakenne 4:llä voitaisiin siis tehdä kyseinen rakenne 70 mm paksuna teräskuitumäärän ollessa 45 kg/m³bet. Kiinnikkeiden pitävyydestä valun

aikana on varmistuttava, koska ilmaa täynnä olevat putket pyrkivät nousemaan ylöspäin betonivalussa. Esimerkiksi Uponor Oy:llä on eräänlaista putkipidikelistaa, joka on tarkoitettu suoraan eristeen päälle asennettavaksi. Listan pohjassa on piikit, joissa on tartuntaa lisäävät väkäset. Paroc COL 40g eristeen kanssa kiinnitys on tosin ongelmallinen, koska piikit eivät kiinnity kunnolla pystysuuntaisiin villakuituihin. Pidikelistan kiinnitykseen on siis keksittävä, millä tartuntaa lisätään. Tutkimuksen johtopäätöksissä tähän annetaan eräs vaihtoehto, jota ei ole tämän tutkimuksen aikana kokeiltu.

Sähkövastuksella toimivaa lattialämmitystä ei suositella tutkittavan rakenteen kanssa ilman raudoitusverkkoa. Lämmityskaapelit tulee olla kokonaan valun sisällä eikä ne saisi koskettaa eristettä ylikuumentumisvaaran takia. Eristeeseen osuva sähkövastus siis kuumenee liikaa ja palaa poikki. Tällöin koko lämmityspiiri lakkaa toimimasta.

Taulukossa 15 on esitetty vertailurakenteiden karkeat kustannukset sekä kokonaishintana, että neliöhintana. Kustannusvertailun tarkoitus ei ole saada rakenteista todenmukaista hintaa vaan verrata hinta-arvioita keskenään. Vertailun perusteella rakenteet ovat melko samassa hintaluokassa. Parocin COL 40g eriste on kalliimpaa kuin Thermisolin EPS 100 LATTIA. Kustannukset tasaantuvat kuitenkin verkkoraudoitteiden puuttumisen myötä.

Vertailtaessa tankoraudoitettua betonilattiaa kuitubetonilattiaan kustannusten näkökulmasta tulisi huomioida kuitubetoniratkaisun vaikutus koko rakennusaikatauluun. Koska raudoitusta ei tarvitse tehdä työmaalla, se lyhentää työmaan aikataulua lattiaan liittyviltä osilta. Tämä taas tuo säästöjä kustannuksiin, koska raudoitustyön puuttumisen lisäksi lyhempi kokonaisaikataulu tarkoittaa pienempiä rakennustyömaan ylläpitokustannuksia. Alaspäin kuivuvan villaeristeen lattiaan lyhempi kuivumisaika tuo myös säästöjä samaan perustuen.

Taulukko 15. Laskentarakenteiden karkeat kustannusarviot. Taulukoissa ei ole huomioitu rakennusaikataulun eroista johtuvia kustannuseroja eikä rakennuksen muodon vaikutusta raudoitustyön määrään.

Kustannuslaskelma

Maanvarainen 80 mm betonilattia, T5 #150 raudoitusverkko keskeisesti, EPS 100 Lattia -eriste 200 mm
Lattian koko: 100 m²

€/tth= 25,00 €

	Kustannuserä	Määrä	Yksikkö	Yksikköhinta	Kustannuserän hinta Alv. 0%	YHT.:
Eristys	Eriste: Thermisol EPS 100 Lattia 100mm	34,0	pkt	44,10 €	1 499,40 €	
	Eristetoimitus, rahti	1,0	kpl	85,00 €	85,00 €	
	Levyjen ladonta tasaiselle pohjalle	2,0	tth	25,00 €	50,00 €	
	Reunalevyjen sahaus oikeaan mittaan	1,0	tth	25,00 €	25,00 €	
	Läpiviennit eristeeseen	1,0	tth	25,00 €	25,00 €	1 684,40 €
Raudoitus	Raudoitusverkko: T5 #150 (5m*2,35m)	10,0	kpl	32,00 €	320,00 €	
	Raudoitustarvikkeet	1,0	kpl	20,00 €	20,00 €	
	Raudoitustyöt, surraus, korokkeet, leikkaus	8,0	tth	25,00 €	200,00 €	540,00 €
Valuvalmistelut	Irritoituskaisista	2,0	pkt	12,54 €	25,08 €	
	Irritoituskaisian asennus, tiivistykset, topparit	1,0	tth	25,00 €	25,00 €	50,08 €
Betonivalu	Betoni: Rudus LA C25/30#16 S3	8,0	m ³	120,60 €	964,80 €	
	Betonin kuljetus: n. 30km	2,0	kpl	140,43 €	280,86 €	
	Betonin pumppaus: PUMI 30min	1,0	kpl	245,00 €	245,00 €	
	Valutyöt, jälkityöt	5,0	tth	25,00 €	125,00 €	1 615,66 €
	KOKONAISHINTA:					
NELIÖHINTA:						38,90 €

Kustannuslaskelma

Maanvarainen 70 mm kuitubetonilattia, kuitumäärä 30 kg/m³, Paroc COL 40g
Lattian koko: 100 m²

	Kustannuserä	Määrä	Yksikkö	Yksikköhinta	Kustannuserän hinta Alv. 0%	YHT.:
Eristys	Eriste: Paroc COL 40g 225 mm 100 m ²	1,0		1 612,00 €	1 612,00 €	
	Eristetoimitus, rahti	1,0	kpl	280,00 €	280,00 €	
	Levyjen ladonta tasaiselle pohjalle	2,0	tth	25,00 €	50,00 €	
	Reunalevyjen sahaus oikeaan mittaan	1,0	tth	25,00 €	25,00 €	
	Läpiviennit eristeeseen	1,0	tth	25,00 €	25,00 €	1 992,00 €
Raudoitus	Raudoitusverkko: T8 #150 (5m*2,35m)	0,0	kpl	58,52 €	- €	
	Raudoitustarvikkeet	0,0	kpl	130,60 €	- €	
	Raudoitustyöt, surraus, korokkeet, leikkaus	0,0	tth	25,00 €	- €	- €
Valuvalmistelut	Irritoituskaisista	2,0	pkt	12,54 €	25,08 €	
	Irritoituskaisian asennus, tiivistykset, topparit	1,0	tth	25,00 €	25,00 €	50,08 €
Betonivalu	Betoni: Rudus LA C25/30#16 S3 + kuitu	7,0	m ³	150,00 €	1 050,00 €	
	Betonin kuljetus: n. 30km	2,0	kpl	140,43 €	280,86 €	
	Betonin pumppaus: PUMI 30min	1,0	kpl	245,00 €	245,00 €	
	Valutyöt, jälkityöt	5,0	tth	25,00 €	125,00 €	1 700,86 €
	KOKONAISHINTA:					
NELIÖHINTA:						37,43 €

Taulukossa 15 ei ole huomioitu rakennuksen muodon vaikutusta raudoitustyöhön. Mitä monimuotoisempi rakennus on kyseessä, sitä enemmän aikaa raudoitusten tekemiseen kuluu. Myös useimmiten raudoitusverkkojen hävikki kasvaa lattian monimuotoisuuden kasvaessa, sillä verkkoja ei saada välttämättä yhtä tehokkaasti käytettyä. Käytettäessä kuitubetonia lattiavalussa kuituraudoitus leviää yhtä tehokkaasti yksinkertaisen kuin monimuotoisen lattian alueelle. Tässä mielessä voidaan ajatella lattian monimuotoisuuden tuovan lisäkustannuksia tankoraidoitettuun lattiaan mutta kuitubetonilattian kustannukset pysyvät ennallaan riippumatta lattian muodosta. Molemmissa tapauksissa monimuotoinen laatta lisää lattian valuun liittyviä kustannuksia.

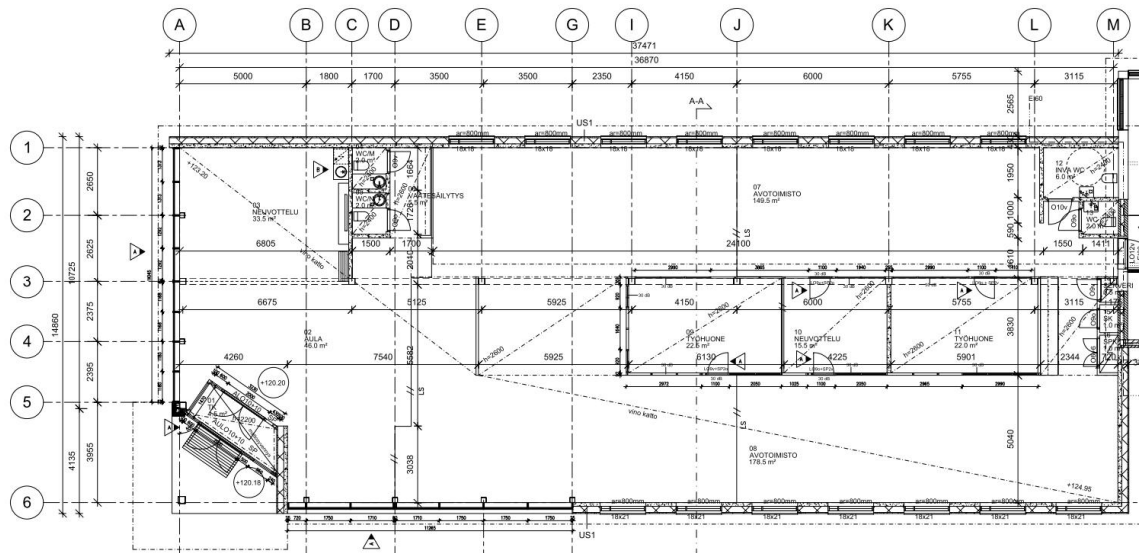
4 Koekohde

Tämän insinööriyön toinen iso osuus laskennallisten tarkasteluiden ohella on koekohteella testattava täysinmittainen koerakenne. Koekohteeksi tutkittavalle rakenteelle saatiin Pieksämäellä sijaitsevan Lipa-Betonin betonielementtitehtaan ja Rakennusliike U. Lipsanen Oy:n konttorin laajennus (kuva 31). Koerakenteen pinta-alaksi saatiin hieman yli 1/3 laajennuksen pinta-alasta (noin 560 m²), eli noin 200 m².



Kuva 31. Tutkimuksen koekohde. Toimiston laajennusosan takana näkyy Lipa-Betonin betonielementtitehdas.

Kuvassa 32 on koekohteen arkkitehtiplaani. Laajennusosa on pidemmässä suunnassa noin 37,5 m pitkä ja lyhyemmässä noin 15,0 m leveä. Paroc COL 40g lamellivillalla ja kuitubetonilla tehtävä koerakenne käsittää lähes kokonaan moduulilinjan J rajaaman oikeanpuolisen alueen.



Kuva 32. Tutkimuksen koekohte. Laajennusosan arkkitehtiplaani.

Kuvassa 32 moduulilinjan J vasemmanpuolinen alue tehdään eristettynä EPS 200 LATTIA -eristeellä ja verkkoraudoitettuna. Liikuntasauva erottaa koerakenteen ja vertailurakenteen toisistaan. Näin samasta koekohteesta saadaan arvokasta vertailudataa kivillapuolen ja solumuovipuolen toiminnasta.

4.1 Koekohteen tutkimusten tavoitteet ja rajaukset

Maanvaraisen villaeristetyn kuitubetonilattiarakenteen koekohtetutkimukset kohdistuvat lähes täysin rakennusfysikaalisen toiminnan seurantaan. Opinnäytetyön raportin kirjoitusvaiheessa koekohteen kaikki tuotannolliset toimenpiteet ovat olleet muutaman kuukauden valmiina ja rakennus käyttöön otettuna. Koekohteen tulosten seuranta jatkuu opinnäytetyön jälkeenkin. Tavoitteena on selvittää miten koerakenne toimii verrattuna koekohteen EPS-rakenteeseen ja luvussa 3.1.2 tehtyihin laskelmiin. Lattiaan sijoitetaan kosteus- ja lämpötilaolosuhteita mittaavia antureita molempiin rakennetyyppeihin. Lisäksi koekohteen toteutuksen aikana tehdään havaintoja tuotannollisista seikoista, mahdollisista ongelmakodista ja koerakennesuunnitelmien toteutettavuudesta. Koolattia ja vertailulattia myös vaaitaan kahteen kertaan mahdollisten siirtymien selvittämiseksi.

Alkuperäisen tutkimussuunnitelman mukaan koekohteella olisi tehty kuormituskokeita ja tutkittu niiden avulla alustarakenteen ja kuitubetonilaatan yhteistoimintaa verrattuna

vertailurakenteeseen ja rakennelaskelmiin. Samalla olisi voitu kokeellisesti osoittaa tapa, jolla lattialämmitysputkiston kiinnitys olisi ratkaistu ilman raudoitusverkkoa eristeiden yläpinnalle. Tilaajan toiveesta muutettiin kuitenkin koelattian laatan paksuus 100 mm:iin ja laitettiin laattaan teräskuituraudoituksen lisäksi raudoitusverkko, johon lattialämmitysputkisto sidottiin kiinni. Näiden vuoksi luovuttiin kuormituskokeiden tekemisestä, sillä ne eivät olisi tarjonneet hyödyllistä ja luotettavaa tietoa alkuperäisten suunnitelmien mukaisen rakenteen toiminnasta.

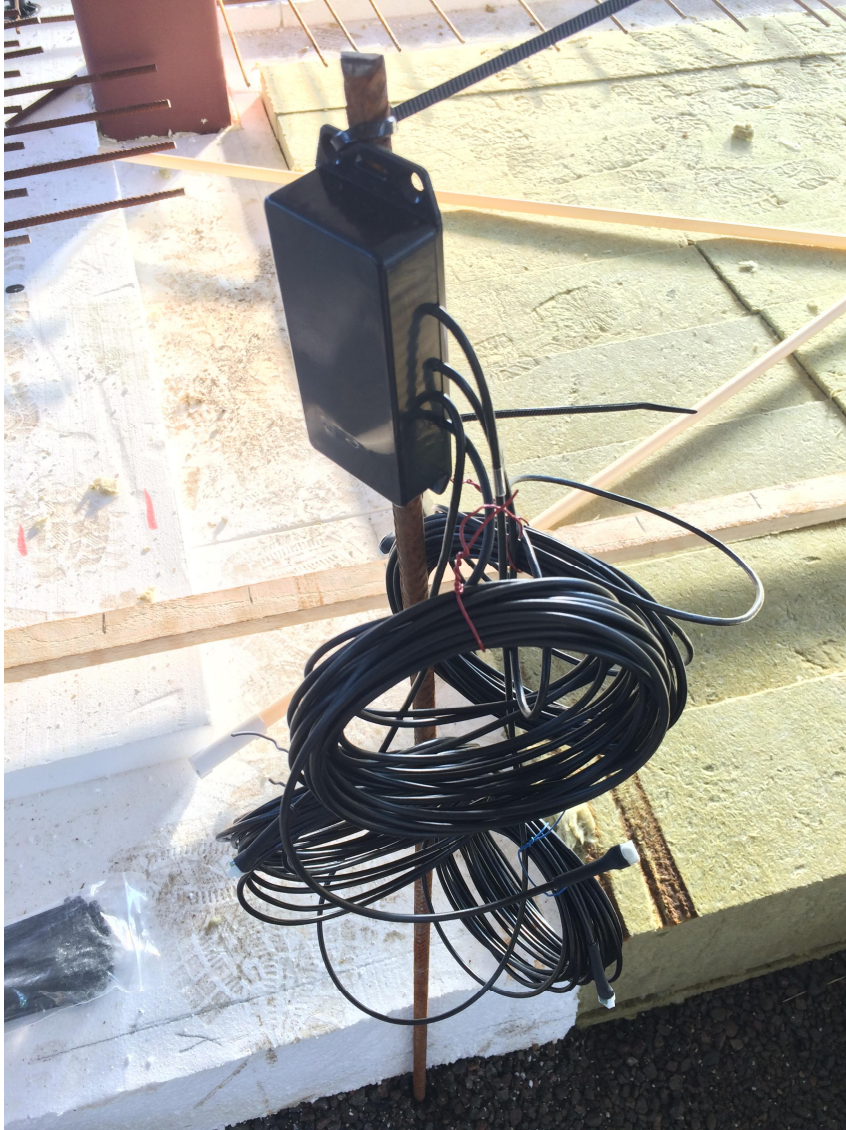
Koerakenteen betonilaatassa käytettävät kuidut vaihdettiin makropolymeerikuiduista teräskuituihin kuitutoimittajan suosituksesta, koska 200 m²:n kokoinen alue aiottiin tehdä saumattomana lattiarakenteena. Loppujen lopuksi kuitutyypillä ei ole lattiassa kovin paljon merkitystä lattialämmitysputkien sitomiseen käytetyn raudoitusverkon takia.

Rakenteen toimintaa ei voida tässä tutkimuksessa arvioida kuin rakennuksen ja rakenteiden elinkaarien alkumetreiltä, joten tulokset saattavat olla pidemmällä aikavälillä täysin erilaisia. Siksi onkin tärkeää jatkaa koekohteen tulosten seuraamista mahdollisimman pitkälle opinnäytetyön jälkeen.

Koekohteen EPS-eristeinen puoli on niin järeästi raudoitettu ala- ja yläpinnan raudoitusverkoilla, että nurkkien nousut jäävät luultavasti todella pieniksi. Lisäksi nurkkien käyritymät saattavat viedä kauan aikaa ennen kuin ne ilmenevät. Näin ollen vaaitustuloksista ei välttämättä saada muuta hyödyllistä tietoa kuin lattian pinnoitteiden kannalta vaadittavien tasoitustoimenpiteiden tarve.

4.2 Koejärjestelyt ja toteutussuunnitelmat

Koekohteen koejärjestelyihin kuului koerakenteen rakennetyypin ja tuuletusjärjestelmän suunnittelu sekä kosteus- ja lämpötilamittausten suunnittelu molemmille lattiatyypeille. Kohteessa toteutuneet suunnitelma-asiakirjat ovat esitettyinä liitteessä 3 ennen kosteus- ja lämpötilamittausten analysointidataa. Lisäksi vaaitustulokset on esitetty. Lattioiden ensimmäinen vaaitus suoritettiin heti lattiavalujen jälkeen ja toinen vaaitus neljän viikon päästä tästä.



Kuva 33. RFSensIT Oy:n anturimoduuli. Moduulista lähtee neljä 9 m:n johtoa, joiden päissä on suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mittaavat anturit.

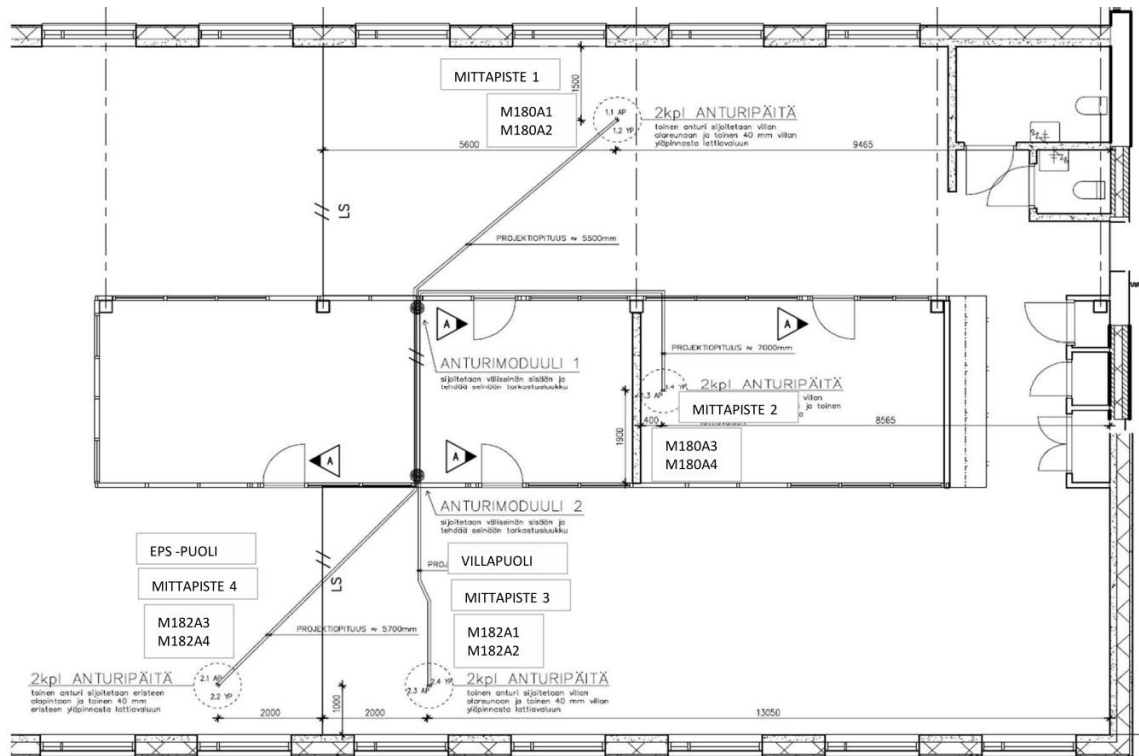
Kohteeseen tilattiin RFSensIT Oy:n kehittämät, jatkuvaan kosteuden seurantaan tarkoitettut laitteistot. Laitteisto koostuu kolmesta eri osasta: rakenteeseen sijoitettavista anturipäistä, anturipäiden mittatietoa langattomasti lähettävästä anturimoduulista ja tätä tietoa vastaanottavasta tukiasemasta, joka lähettää tiedon RFSensIT Oy:n verkkopalveluun. Yhdestä anturimoduulista lähtee neljä johtoa, joiden maksimipituudet ovat 9 m:ä (kuva 33). Johdon päässä on anturipää, joka mittaa lämpötilaa sekä suhteellista kosteutta. Anturimoduuli lähettää tunnin välein antureista saadun mittatiedon tukiasemalle bluetooth -yhteyden kautta. Verkkoyhteyteen kytketty tukiasema (kuva 34) lähettää nämä tiedot pilvipalvelimelle, josta niitä voidaan seurata annetulla käyttäjätunnuksella ja salasanalla. Anturien mittaamaa dataa voidaan lukea monessa eri muodossa

sivuston kautta. Opinnäytetyössä anturien mittaustiedot ovat ladattu Excelliin ja niistä on tehty omat versiot kosteus- ja lämpötiläkäyristä ajan funktiona. Koekohteelle tilattiin kaksi kappaletta anturimoduuleita, joten käytössä on kahdeksan anturipäätä mittaamassa lämpötilan ja kosteuden arvoja eri puolilta rakennusta. [21.]



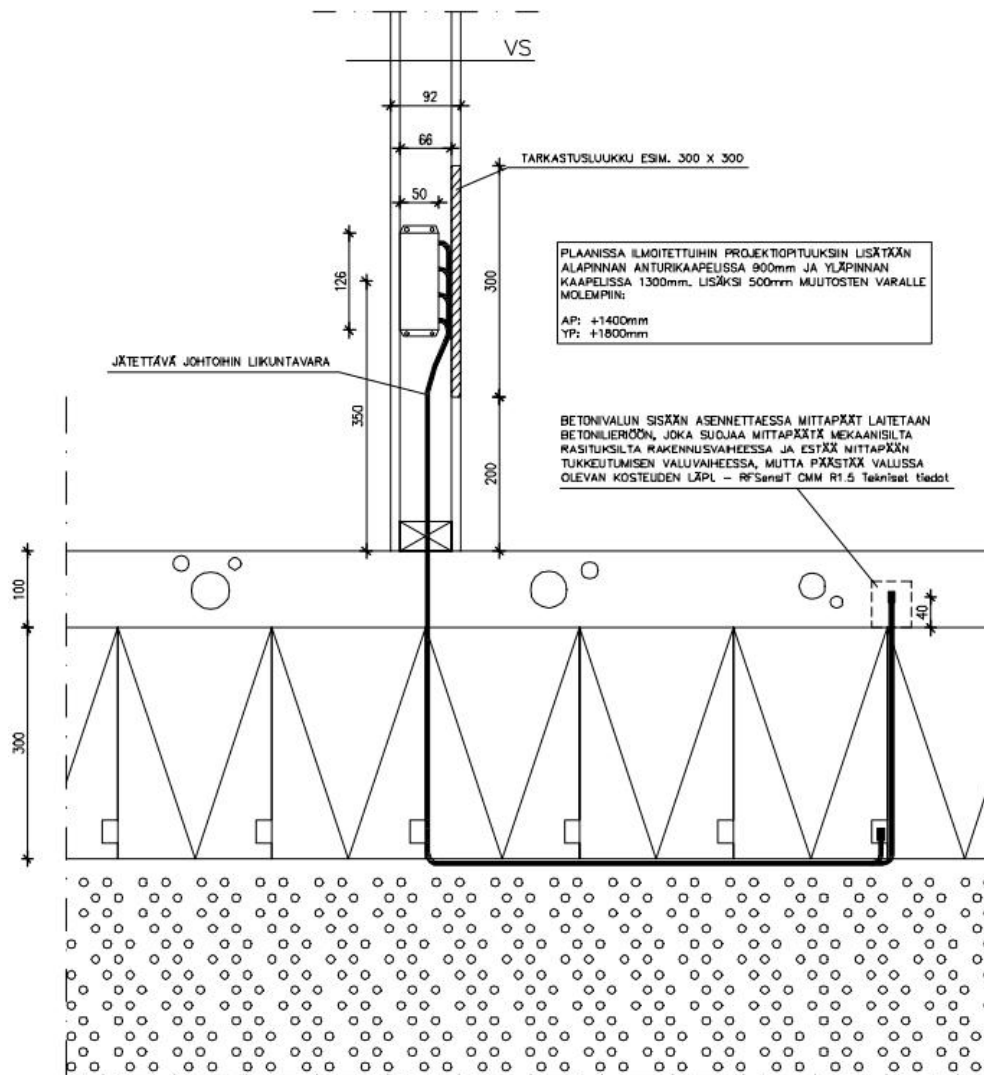
Kuva 34. RFSensIT Oy:n tukiasema valmiissa rakennuksessa.

Mitta-anturit sijoitettiin koekohteella kuvan 35 mukaisesti. Kuvaan on muokattu mittapisteiden numerointi ja anturipäiden merkinnät kosteus- ja lämpötiläkäyrien merkintöjä vastaaviksi. Jokaisessa mittapisteessä on kaksi anturipäätä. Mittapisteen 1 sijainti on valittu rakennuksen ulkoseinän läheisyyteen mahdollisimman pitkän matkan päähän katolle nousevista tuuletusputkista. Mittapiste 2 on taas sijoitettu tuuletetun villarakenteen kokoojauran kohdalle. Mittapisteen 3 ja 4 ovat toistensa vertailupisteitä. Mittapiste 3 on villapuolella ja sijaitsee metrin etäisyydellä ulkoseinästä ja kahden metrin etäisyydellä liikuntasaumasta, jonka kohdalla eriste vaihtuu. Mittapiste 4 taas on samojen etäisyyksien päässä ulkoseinästä ja liikuntasaumasta solumuovieristepuolella.



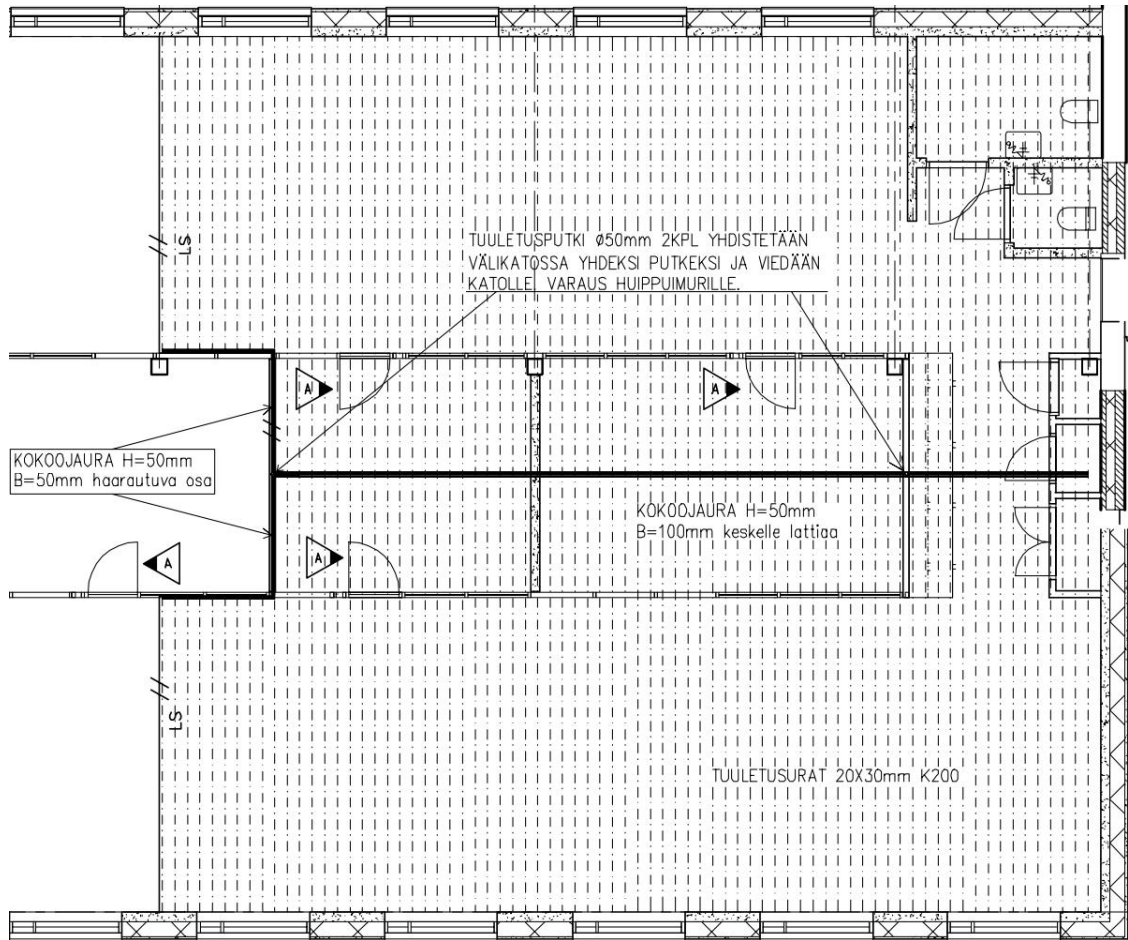
Kuva 35. Kosteus- ja lämpötila-anturien sekä anturimoduulien sijainnit. Koerakennepuolella on yhteensä kuusi anturia kolmessa eri mittapisteessä 1, 2 ja 3. Vertailurakenteen puolella on kaksi anturia yhdessä mittapisteessä 4.

Kuvassa 36 on koekohteelle suunnitellun kosteuden ja lämpötilan mittausjärjestelmän anturimoduulien ja mitta-antureiden asennuspiirros. Anturimoduulit sijoitetaan kevyen väliseinän sisään pois näkyvistä mutta seinään asennetaan tarkastusluukku, jonka kautta anturimoduuliin on mahdollista vaihtaa paristo. Mitta-antureiden asennusvaiheessa vaihdettiin johdot kulkemaan betonilaatan raudoitusta pitkin mittapisteelle, jossa anturipäät sijoitettiin piirustuksen mukaan. Mittapisteellä toinen anturipäistä tiivistettiin epoksimassalla pienen betonilieriön sisään, jotta tuore betoni ei tuki anturia mutta kosteus liikkuu kuten muussakin betonissa. Toinen anturi laitettiin taas eristeen alapintaan ja reiän yläpää tiivistettiin polyuretaanivaahdolla, ettei tuore betoni pääse valumaan reikää pitkin ja vahingoita anturin toimintaa.



Kuva 36. Anturimoduulin ja antureiden asennuseriaate koekohteella

Kuvan 34 tukiasema oli työmaa-aikana pölyltä ja roiskeilta suojaavassa muovisalkussa. Tosin osan ajasta se on ollut muovisalkun kansi auki mutta mitään vaurioita ei ole päässyt tapahtumaan. Tukiasema oli aluksi nettitikun avulla yhteydessä verkkoon, koska työmaalla ei ollut kiinteää verkkoyhteyttä saatavissa. Rakennuksen käyttöönoton yhteydessä nettitikun tarve poistui ja tukiasema liitettiin kiinteään verkkoyhteyteen.



Kuva 37. Koerakenteen tuuletussuunnitelma.

Koekohteen tuuletusurien suunnan valinnassa kriteerinä olivat väliseinien sijainnit ja sitä kautta tuuletusputkien ylösnostojen mahdolliset paikat. Koerakenteen alueen ollessa lähes neliö, sivujen pituuksilla ei ollut vaikutusta valintaan. Kuvan 37 mukaisesti sijoitettiin kokoojaura keskelle lattiaa. Toisessa päässä kokoojaura haarautuu liikunta-
sauman kohdalla kahdeksi, jotta tuuletus toimisi myös vertailurakennetta vasten olevilla nurkka-alueilla. Nuolten osoittamista kohdista nousee tuuletusputket väliseinän sisällä välikattoon, jossa ne yhdistetään yhdeksi isommaksi putkeksi. Kuvan 37 oikean yläreunan kohdilla tuuletusputki vietiin katosta läpi ja sen päähän asennettiin huippuimuri takaamaan tuuletuksen toimivuuden.



Kuva 38. Koerakenteen valupäivä. Kuvassa on liikuntasauaman tekemä mutka, jonka keskeltä nousee villarakenteen kokoojaurasta tuuletusputki. Vertailurakenteen valu on tehty jo edellisenä päivänä.

Kuvassa 38 on nähtävissä kuvissa 35 ja 37 oleva liikuntasauمامutka. Anturimoduulit on sidottu oikeisiin kohtiin tulevan väliseinän kohdalle ja tuuletusputki nousee villarakenteeseen tehdystä kokoojaurasta lattian läpi. Väliseinien valmistusvaiheessa putket jatketaan välikattoon ja sieltä katolle.

4.3 Koekohteen tulokset

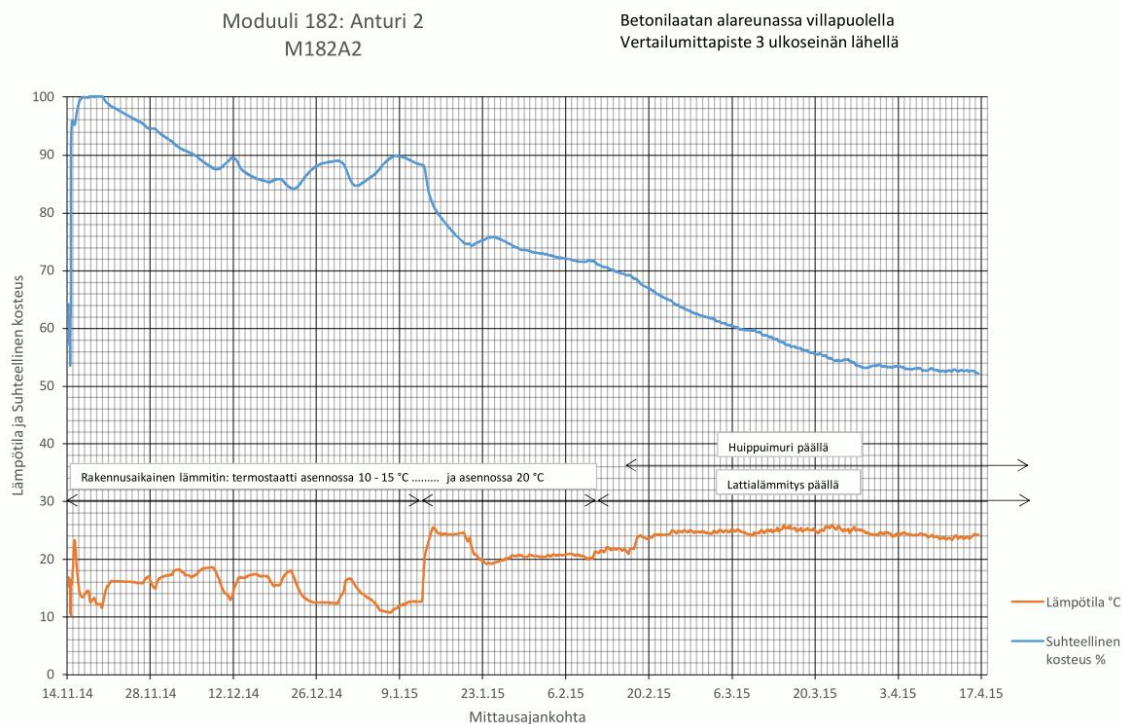
Koekohteen kosteus- ja lämpötilaraportti on kokonaisuudessaan liitteessä 3 (sivut 12 – 30). Tässä luvussa käydään tärkeimmät tulokset läpi. Kosteus- ja lämpötilakäyrät on tehty Excel-ohjelmalla ja mittauksien tiedot käyrien tekemiseen on ladattu RFSensIT Oy:n verkkopalvelusta. Kuvajissa on aikavälinä perjantai 14.11.2014 – perjantai 17.4.2015:

koelattian valupäivästä opinnäytetyön viimeiseen seurantaan. Kuvaajiin on merkitty lattian lämpötilojen ja kuivumisen kannalta olennaisia asioita.

Tavallisten kosteus- ja lämpötilakuvaajien lisäksi Exceliin on laskettu kaikkien anturien suhteellisen kosteuden arvo ajan funktiona, jos lämpötila olisi 20 °C lämpötilassa. Näitä suhteellisen kosteuden arvoja voidaan soveltaa teoksen RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1 avulla vertaamalla saatuja tuloksia kirjan esittämiin materiaali-kohtaisiin desorptio- ja adsorptiokäyriin. Desorptiokäyrä kuvaa kuivumistilanteessa materiaalin vedensitomiskykyä tietyllä huokosilman suhteellisen kosteuden arvolla 20 °C lämpötilassa. Adsorptio kuvaa samaa asiaa mutta kastumistilanteessa. Käyrät siis kertovat, kuinka paljon rakennusmateriaalin huokosissa on nestemäistä vettä, kun tiedetään huokosilman suhteellinen kosteus.

Koerakenteen betonilaatan kuivuminen on ollut anturien mittatietojen mukaan heti valun jälkeen tasaista. Ulkoseinän vieressä olevan yksittäisen mittapisteen kohdalla betonilaatan suhteellinen kosteus on kuukaudessa laskenut arvoon 90 %. Koska mittaanturi on betonilaatan alareunassa ja kuivuminen tapahtuu varmasti yhtä tehokkaasti myös ylöspäin, voidaan olettaa koko laatan korkeudella olevan suunnilleen sama kosteus.

Kaikista nopein betonilaatan kuivuminen on huomattavissa mittapisteessä 3 moduulin 182 anturissa 2 (kuva 39). Anturi on siis EPS -rakenteen vieressä villapuolella oleva vertailuanturi. Neljässä ja puolessa viikossa anturin mittaama kosteus on pudonnut arvosta 100 % arvoon 84 %. Tämän jälkeen lattian lämpötila on laskenut, jolloin suhteellinen kosteus luonnollisesti nousee. Lattian lämmön tasaantuessa lattialämmityksen käyttöönoton jälkeen 24 °C:n tuntumaan laatan alapinnan suhteellinen kosteus on laskenut arvoon 52 % opinnäytetyön tulosten seurannan lopussa. Luettaessa käyrää tulee aina ottaa lämpötilanmuutos huomioon, mikäli suhteellisen kosteuden arvossa on tapahtunut muutosta. Lämpötilan muutos jo yksinään muuttaa suhteellisen kosteuden arvoa vaikka huokosilman vesihöyryn määrä pysyisi samana. Ei voida puhua rakenteen kuivumisesta, jos suhteellinen kosteus muuttuu lämpötilan muutoksen takia.



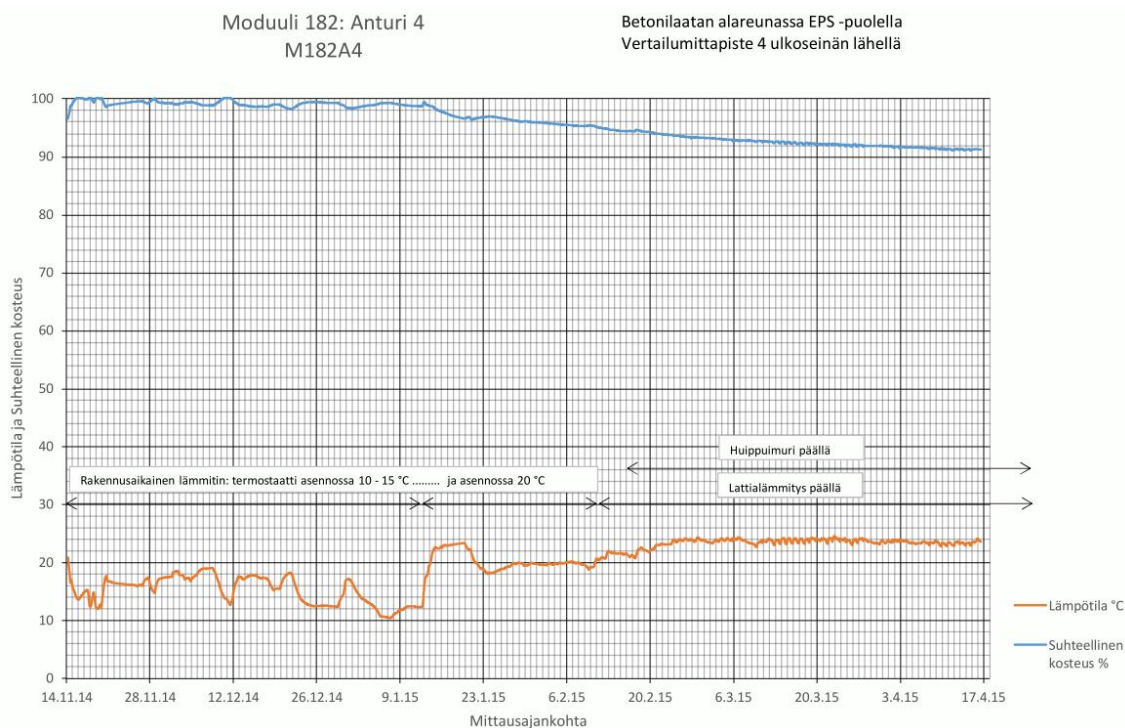
Kuva 39. EPS – kivivilla -vertailu, mittapiste 3. Anturi on betonilaatan alapinnassa villapuolella.

Kuvan 39 kuvaajan ruudukossa tummien pystyviivojen väli on aina 14 vuorokautta eli kaksi viikkoa. Vaaleampien pystyviivojen väli on taas yksi vuorokausi. Vaakasuunnassa tummat viivat ovat 10 %:n välein suhteellista kosteutta luettaessa ja 10 °C:n välein luettaessa lämpötilan kuvaajaa. Vaaleammat viivat jakavat tummien viivojen välin viiteen osaan, joten ne ovat kahden yksikön välein. Kaikissa kuvaajissa asteikot ovat samoilla välistyksillä.

Kuvassa 40 on ainoan EPS-puolella betonilaatassa sijaitsevan anturin mittaustietoa. Kuvaajasta voidaan lukea, että laatan kosteus on alapinnassa ensimmäisen yhdeksän viikon ajan vaihdellut välillä 100 % - 98 %. Yhdeksän viikon jälkeen suhteellinen kosteus laskee seuraavan neljän viikon aikana 95 % osittain lattian lämpötilan kohoamisen johdosta. 14 viikkoa valun jälkeen, kun lattian lämpötila alkaa tasaantua lattialämmityksen ollessa jo käytössä, laatan suhteellinen kosteus alkaa pikkuhiljaa laskea kohti 90 %:a. Opinnäytetyön seurannan lopussa EPS-puolen laatan alapinnan suhteellinen kosteus on alittanut arvon 92 % lämpötilan ollessa noin 24 °C.

Kuvien 39 ja 40 vertailupisteiden välinen kuivumisero laatan alapinnassa on todella huomattava. Luvun 3.1.2 taulukon 13 avulla voidaan vertailla laattojen huokosilman vesihöyryn määrää. Kun oletetaan villapuolen rakenteen lämpötilaksi 24 °C ja suhteel-

liseksi kosteudeksi 50 % saadaan vesihöyryn määrä $10,9 \text{ g / m}^3$. Vastaavasti oletetaan EPS -puolen lämpötilaksi sama $24 \text{ }^\circ\text{C}$ mutta suhteelliseksi kosteudeksi 90 % niin saadaan vesihöyryn määräksi $19,6 \text{ g / m}^3$. EPS 200 LATTIA -eristeen päälle valetun betonilaatan huokosilman vesihöyryn määrä on 22 seurantaviikon jälkeen 1,85 kertainen verrattuna Paroc COL 40g eristeen päälle valettuun laattaan.

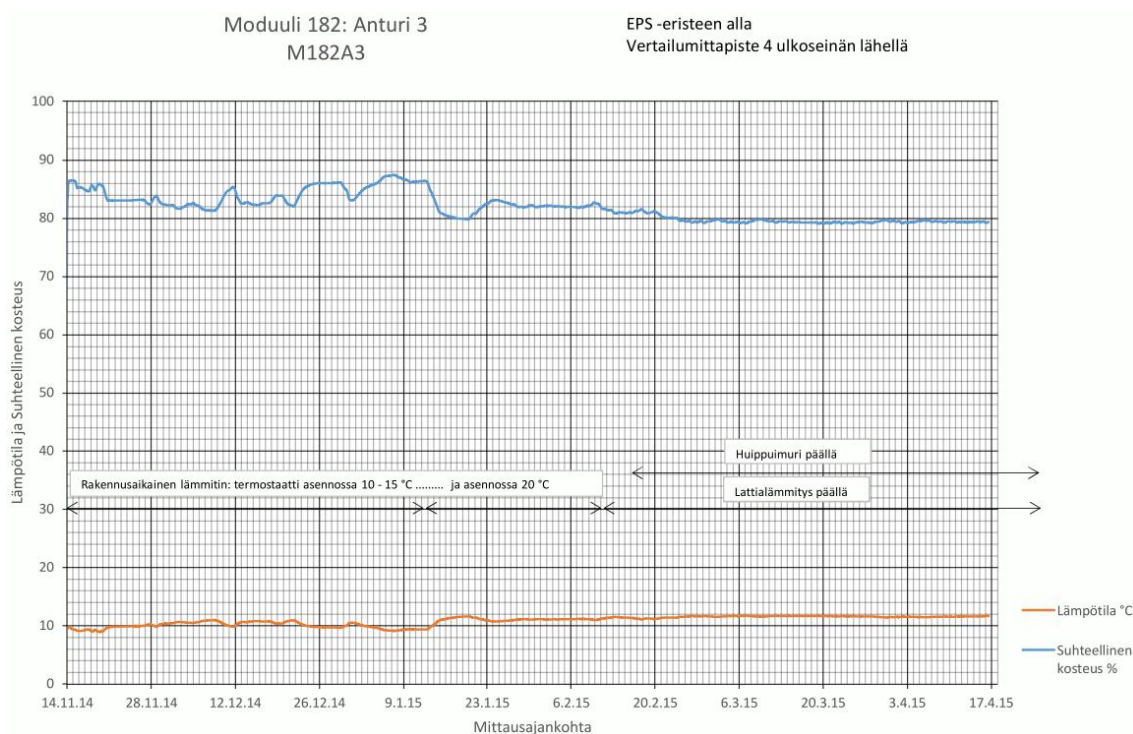


Kuva 40. EPS – kivillä -vertailu, mittapiste 4. Anturi on betonilaatan alapinnassa EPS-puolella.

Liitteen 3 lopussa on esitetty kaikkien anturien mitatun suhteellisen kosteuden muuttaminen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaa vastaavaksi suhteelliseksi kosteudeksi. Kuvan 39 mukaisen datan muunneltu suhteellinen kosteus seurannan lopussa on noin 68 % (liite 3, s. 28). Kuvan 40 tapauksessa se on 100 % (liite 3, s. 30). Koska rakenteet ovat kuivumistilassa, luetaan liitteen 3 sivulla 22 olevan betonin desorptiokäyrän mukaan molempien laattojen huokosten sisältämät nestemäisen veden määrät. Villapuolen laatalle saadaan nestemäisen veden määräksi noin 70 kg / m^3 . Solumuovipuolella laatassa on täydet 120 kg / m^3 . Jotta EPS -puolen laatta kuivuisi suhteellisen kosteuden arvoon 60 % $20 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa, tarvitsee sen luovuttaa huokosissa olevaa nestemäistä vettä 60 kiloa yhtä betonikuutiota kohden. Tämä tekee 100 mm:n laattavahvuudella 6 kg / m^2 .

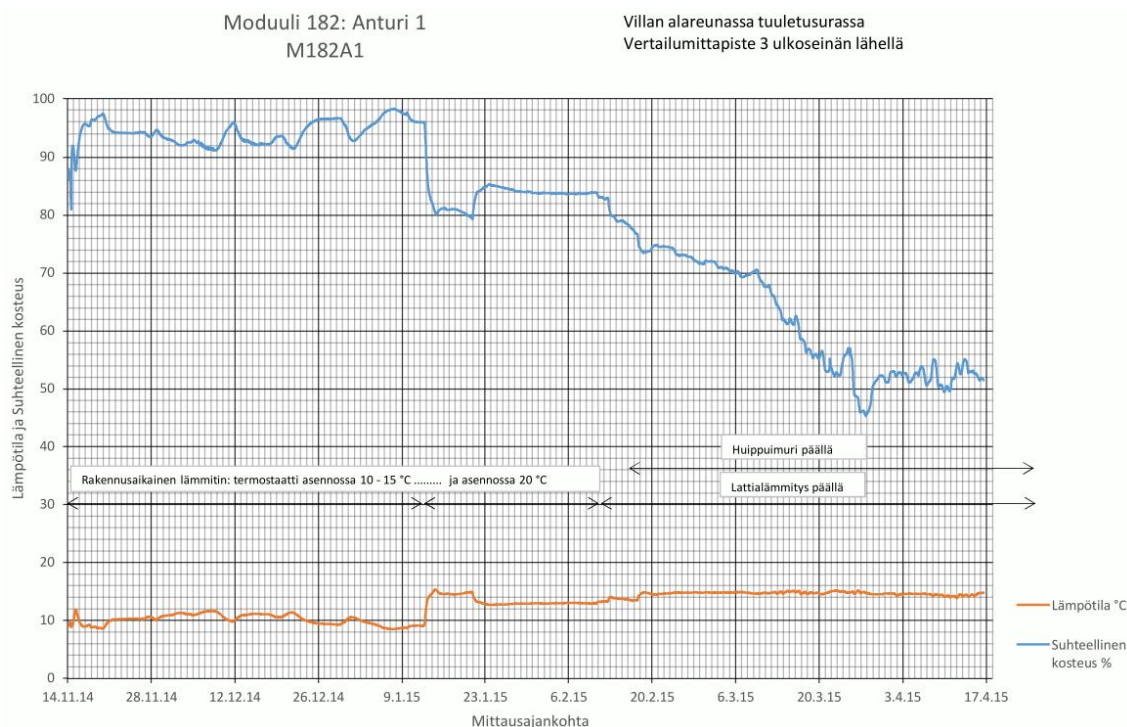
Koekohteen perusmaan huokosilman suhteellisesta kosteudesta saa varmasti hyvän arvion EPS -puolelle eristeen alle sijoitetun anturin mittaustiedoista (kuva 41). Valun

jälkeisen 16 viikon aikaiset lämpötilan vaihtelut aiheuttava lähes täysin suhteellisen kosteuden heittälyt. Sama ilmiö on havaittavissa myös muunnetun suhteellisen kosteuden käyrästä, joka tässä tapauksessa on melko suora viiva (liite 3, s. 29). Alusmaan lämpötila on lattialämmityksen käyttöönoton jälkeen tasaantunut melko tarkasti arvoon 12 °C ja suhteellinen kosteus hieman alle 80 %. Taulukon 13 avulla saadaan huokosilman vesihöyryn määräksi 8,6 g / m³.



Kuva 41. EPS – kivivilla -vertailu, mittapiste 4. Anturi on betonilaatan alapinnassa EPS-puoella.

Villarakenteen puolella vertailumittapisteessä 3 sijaitseva eristeen alapinnan anturi on opinnäytetyön seurantajakson (22 viikkoa) aikana mitannut kuvan 42 mukaisia tuloksia. Valun jälkeen 13 viikon ajan villan alapinnan huokosilman suhteellinen kosteus on reagoinut lämpötilan muutoksiin mutta erikoisempaa rakenteen kuivumista ei ole tapahtunut sinä aikana. Sama on huomattavissa liitteessä 3 sivulla 27 olevassa muunnellun suhteellisen kosteuden kuvaajassa. Lattialämmityksen pistäminen päälle on tasaannuttanut alustan lämpötilan ja samalla alkanut kuivattaa rakennetta. Seurannan viimeisen kahdeksan viikon aikana alusta on kuivunut lähes vakio­lämpötilassa (14 °C) arvosta 74 % arvoon 52 %. Seurantajakson lopussa rakenteen huokosilman vesihöyryn määrä on noin 6,1 g / m³ (taulukko 13).



Kuva 42. EPS – kivivilla -vertailu, mittapiste 3. Anturi on eristeen alapinnassa villapuolella.

Mittapisteissä 1 ja 2, jotka ovat molemmat kivivillapuolella, anturien mittatiedot vastaavat melko tarkasti muodoltaan mittapisteen 3 kosteus- ja lämpötiläkäyriä (kuvat 39 ja 42) mutta kyseisissä mittapisteissä suhteellisen kosteuden muutokset ovat hillitympiä. Mittapisteessä 1 betonilaatan alapinnassa olevan anturin mittaama lämpötila on viimeisen kahdeksan viikon aikana tasaantunut melko lähelle arvoa 24 °C. Suhteellisen kosteuden arvo on noin 66 % seurannan loputtua. Keskellä laattaa olevassa mittapisteessä 2 betonilaatan alapinnan suhteelliseksi kosteudeksi on saatu seurannan loppuun noin 77 %. Lämpötila on sama kuin edellisessä.

Mittapisteiden 1 ja 2 villan alareunassa sijaitsevien antureiden mittatiedoissa on jokseenkin eroavaisuutta verrattuna aiemmin läpikäytyihin. Mittapisteen 1 eristeen alareunan suhteellinen kosteus on seurannan viimeisen kahdeksan viikon aikana vakiintunut arvoon 90 % lämpötilan ollessa 14 °C. Mittapisteen 2 suhteellinen kosteus seuranta-jakson lopulla on noin 82 % ja lämpötila on jopa 16 °C. Molemmissa taulukon 13 mukaan määritetty huokosilman vesihöyryn määrä on noin 10,9 g / m³. Liitteen 3 sivuja 24 ja 26 vertailemalla voidaan todeta näiden kahden mittapisteen muunnellun suhteellisen kosteuden käyrän olevan todella lähellä toisiaan.

Koelattian ja vertailulattian vaaituksista todettakoon, että koelattian puolella vaaitut kohdat ovat neljän viikon aikana pysyneet melko kattavasti alkuperäisissä koroissaan. Muutamia satunnaisia korkovaihteluita on mutta ei voi olla varma johtuvatko ne esimerkiksi lattiassa paikallisesti olevista koloista tai kohoumista. Vertailulattian puolella koko lattia vaikuttaisi painuneen alaspäin suurimmillaan jopa 8 mm:ä. Syytä tähän on hankala arvioida, koska kyseisen lattian alustan pitäisi olla jäykempi. EPS-eristeen puristuslujuus ja kimmokerroin ovat paljon suuremmat verrattuna kivivillan arvoihin.

5 Johtopäätökset ja yhteenveto

Suoritettujen rakennelaskelmien, rakennusfysikaalisten tarkasteluiden ja koekohteesta saatujen havaintojen perusteella maanvarainen villaeristetty kuitubetonilattia on tehtyjen lyhyen seuranta-ajan tutkimusten puitteissa toimiva rakenne. Paroc Oy:n COL 40g tuuletusurilla varustettu kivivilla on rakenteeseen sopiva eristemateriaali, jotta tuuletus voidaan järjestää järkevästi lattian alle. Lisäksi villan puristuslujuus riittää etenkin asuinrakennusten kuormien kantamiseen ja pystysuuntaisten kuitujen rakenne helpottaa ylimääräisen veden poistumista rakenteesta valun jälkeen.

Pieksämäen kohteella lattioiden rakennusfysikaalinen toiminta on tasaantumaan päin sekä kosteuksien, että lämpötilojen osalta. Koekohteelta saadut koerakenteen tulokset ovat olleet opinnäytetyön seuranta-ajan yllättävän hyviä. Etenkin ensimmäisten viikkojen aikana kuivumisen nopeus on ollut odotettua suurempaa. Tämä johtunee siitä, ettei rakennusfysiikan tarkasteluissa laskukaavoilla huomioida painovoimaisesti siirtyvää vettä. Kaikissa villapuolen mittapisteissä kuivuminen laatan alapinnassa on ollut nopeaa verrattuna EPS-puolen mittapisteeseen. Villapuolella vertailumittapisteen tulokset ovat kuivumisen kannalta parhaimmat. Erillään seinänvieressä ja kokoojauran kohdalla olevien mittapisteiden kosteudet ovat hieman korkeampia. Voidaan olettaa maaperän kosteus suuremmaksi näissä kohdin, jolloin diffuusio laatasta alaspäin hidastuu. Ainaakaan toistaiseksi ei ole havaittu diffuusion suunnan kääntymistä ylöspäin maaperästä villaan.

Tehtyjen rakennelaskelmien mukaan kuitubetonilaatan paksuuden ohentaminen tulisi onnistua hyvin jopa 50 mm:iin asti asuinrakennusten maanvaraisissa lattioissa. Tämä mahdollistaisi esimerkiksi lattialämmityksen tekemisen 70 mm:n laattaan, kun lattialämmityspotket kiinnitetään eristeen yläpintaan. Laatan ohentaminen vaatii kuitenkin

jonkin asteista varmuutta siitä, etteivät nurkat pääse käyristymään laatan kutistumien myötä. Koekohteen tutkimuksissa on todettu laatan todella tehokas kuivuminen myös alaspäin käytettäessä COL 40g villaa eristeenä. Vaikka koekohteen lattian vaaituksilla ei saatukaan tarvittavaa tietoa laatan käyristymisistä, voidaan olettaa villarakenteen ehkäisevän niitä tehokkaan alaspäin kuivumisen myötä.

Laatan paksuuden pienentäminen alle 80 mm:n asettaa alustan suunnittelulle ja toteutukselle kovemmat tarkkuusvaatimukset, koska laatan paksuuden pienentyessä vakiona pysyvän paksuusvirheen suhteellinen osuus kasvaa. Etenkin 50 mm ja 60 mm laattojen tapauksessa suositellaan jo suunnitteluvaiheessa huomioimaan alustan valmistoleranssi siten, että suunnitelmissa vaaditaan suorittamaan korkojen mittaus eristeen päältä esimerkiksi metrin välein tasolaserilla. Mittaustulokset merkataan ylös lattian pohjakuvaan mittauskohtiin. Etsitään tuloksista korkeimmassa asemassa oleva kohta ja tutkitaan onko kyseinen mittaustulos yksittäinen vai toistuva. Toistuvan mittaustuloksen tapauksessa määritetään lattian alapinnan korko kyseisestä pisteestä lattian suunnitellun paksuuden ja negatiivisen toleranssin verran korkeammalle. Lisäksi 50 mm:n laattapaksuudella todellisen kuitumäärän mitoituksessa voisi olla perusteltua käyttää eurokoodin mukaisia varmuuskertoimia eri kuormituksille. Tällöin pysyvät kuormat kerrottaisiin osavarmuuskertoimella 1,15 ja muuttuvat kuormat kertoimella 1,5.

Mikäli 50 mm:n kuitubetonilaattaa kokeillaan todellisessa kohteessa, on kuitujen valintaan kiinnitettävä erityistä huomiota. Olisi hyvä etukäteen osoittaa esimerkiksi valetuilla 1 m x 1 m koepaloilla kuitutyypin ja kuitumäärän toimivuus toteutusteknisestä näkökulmasta kyseisellä lattiapaksuudella. Esimerkiksi tavanomaiset teräskuidut ovat noin 50 mm pitkiä, mikä voi aiheuttaa vaikeuksia lattian valuvaiheessa. Jatkotutkimuksena tälle tutkimukselle suositellaan yleisimpien teräskuitujen ja makropolymeerikuitujen tutkimista eri kuitumäärillä 50, 60 ja 70 mm:n laattapaksuuksilla toteutettavuuden kannalta. Tuloksena saataisiin kullekin lattiapaksuudelle suositellut kuitutyypit ja niiden maksimimäärät. Voi olla mahdollista, että kyseisen tutkimuksen tuloksista huomataan 50 mm lattiapaksuuden olevan turhan vaativa toteutettavuuden kannalta, kun kuitumäärää joudutaan kasvattamaan suuremmaksi paremman jäännöslujuuden takia.

Asuinrakennusten maanvaraisissa betonilattioissa on melko harvoin liikuntasauvoja tai työsauvoja suhteellisen pienen lattiapinta-alan takia. Mikäli sellaisia kuitenkin joudutaan joihinkin kohteisiin tekemään, on ne suunniteltava liikuntasauvalaitteiden ja sau-

moissa vaadittujen raudoitusten asettamilla ehdoilla. Ohuen laatan tapauksessa on siis suunniteltava laatan paksunnos liikunta- tai työsauman kohdalle.

Rakennusfysiikan jatkotutkimuksia tämän opinnäytetyön rinnalle ehdottomasti vaaditaan rakenteen todellisen tuntemuksen saavuttamiseksi. Koekohdetta seurattiin opinnäytetyön aikana 22 viikkoa, joka on rakenteen ja rakenneosien eliniän kannalta todella lyhyt aika. Maanvaraisilla rakenteilla voi mennä todella pitkiä aikoja, että kosteudet ja lämpötilat ovat tasoittuneet lopullisille sijoilleen. Voi myös olla, etteivät ne missään vaiheessa asetu ja alkavat ajan saatossa mennä heikompaan suuntaan. Näistä syistä suositellaan Pieksämäen koekohteen kosteus- ja lämpötilatietojen seurannan jatkamista ja muiden mahdollisesti tämän opinnäytetyön laskentarakenteita hyödyntävien koekohteiden etsintää. Mikäli tuleva koekohde löytyy, olisi ensiarvoisen tärkeää päästä suunnittelun alkuvaiheeseen mukaan, jotta voitaisiin vaikuttaa loppurakenteen rakeneratkaisuihin tarvittavissa määrin.

Pieksämäen koekohteella rakennusfysiikan alkuseuranta-ajaksi suositellaan vuosi rakennuksen käyttöönotosta eteenpäin, jolloin saadaan alkuvaiheen kuivumisesta kuva kaikkina vuodenaikoina. Tämän jälkeen anturien mittaamat lämpötila- ja kosteusarvot ovat luultavasti tasaantuneet, jolloin alkaa jälkiseuranta-aika. Jälkiseurannassa suurin huomio tulisi kiinnittää vuodenaikojen vaikutuksiin lattian kosteus- ja lämpötilatuloksissa. Lisäksi koekohteella tulisi tällöin testata huippuimurin vaikutusta tutkimuspuolen toimintaan. Tätä voitaisiin tutkia esimerkiksi sulkemalla huippuimuri pari viikoksi, jonka aikana seurattaisiin kosteuden ja lämpötilan liikkeitä mitta-antureilla. Luotettavien tulosten kannalta olisi hyvä toistaa tämä eri vuodenaikoina muutamia kertoja.

Lattialämmityksen kiinnitykseen villan yläpintaan voitaisiin kokeilla jo aiemminkin todella pienessä mittakaavassa kokeiltuja Uponorin putkipidikelistoja. Suihkuttamalla listan alle polyuretaanivaahtoa koko listan matkalle, voitaisiin saada tarpeeksi hyvä tartunta villan pystysuuntaisiin kuituihin. Polyuretaani olisi myös helppo tapa toteutuksen kannalta liimata putkipidikelistat villaan.

Nykypäinä betonilattioiden kuivumisen nopeus ja niiden nopea päällystettävyyys ovat erittäin arvostettuja seikkoja rakentamisen ammattilaisten piirissä etenkin, jos nopea kuivuminen onnistutaan saavuttamaan vähällä betonirakenteiden halkeilulla. Tähän tilanteeseen ovat johtaneet kiristyneet aikataulut ja tulosodotteet sekä tilaajien, että urakoitsijoiden keskuudessa. Tämän tutkimuksen rakenteella on hyvää potentiaalia

kehittyä nopeasti päällystettävien maanvaraisten lattioiden rakennetyypiksi alaspäin kuivumisen ja toisaalta myös ohuemman betonilaatan avulla. Asuinkerrostalorakentamisessa rakennetta voitaisiin soveltaa kelluvan laatan rakennetyypiksi. Jos tuuletus laatan alla olevassa villassa ja ylimääräisen veden poistuminen kantavan rakenteen ja kelluvan laatan välistä saataisiin järkevästi ja kustannustehokkaasti toimimaan, voisi kelluvan laatan kuivuminen olla hyvinkin nopeaa. Jälleen alaspäin kuivumisen ansiosta laatan nurkkien nousut voitaisiin saada pysymään pieninä, vaikka käytettäisiin ohutta-kin laattaa.

Samalla, kun suunnitellaan ja tutkitaan aina vain nopeammin ja nopeammin kuivuvia lattioita ja betonimassoja, on syytä pitää mielessä, ettei ensimmäisten viikkojen kuivuminen kuitenkaan saisi olla liian nopeaa liiallisen halkeilun välttämiseksi. Riittävää betonin jälkihoitoa ei tule missään tapauksessa jättää toissijaiseksi tavoitteeksi. Olisikin syytä tutkia mahdollisuuksia kuivumisnopeuden säätelyyn riippuen lattiabetonin lujuudenkehityksestä.

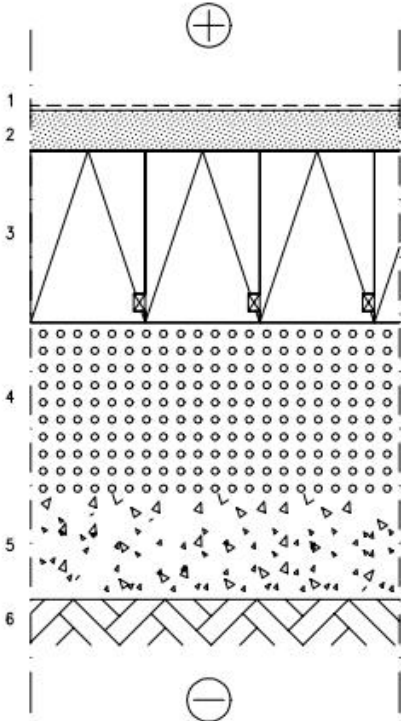
Lähteet

- 1 Suomen Betoniyhdistys r.y. ja Suomen Betonilattiayhdistys r.y., by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014, Tammerprint, 2014
- 2 Suomen Betoniyhdistys r.y., by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011, Multiprint Oy, Vantaa 2013
- 3 Turhan, Ayse, A Consistent Vlasov Model for Analysis of Plates on Elastic Foundations Using The Finite Element Method, a dissertation in civil engineering, Texas Tech University 1992
- 4 SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, 2004, Suomen standardisoimisliitto
- 5 Suomen Betoniyhdistys r.y., by 201 Betonitekniikan oppikirja 2004, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä 2005
- 6 Suomen Betoniyhdistys r.y. ja Suomen Betonilattiayhdistys r.y., by / BLY 13 Polymeerikuidut betonissa 2012, PDF – julkaisu, <http://www.bly.fi/File/BLY-13.pdf?rnd=1356602715>, luettu 19.3.2015
- 7 SKOL r.y., YM:n ohje 2012: Rakentamismääräykset ja eurokoodisuunnittelu, PDF-julkaisu, <http://www.skolry.fi/sites/default/files/Eurokoodit.pdf>, luettu 23.3.2015
- 8 Ympäristöministeriö, Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Helsinki 2009
- 9 Komonen, Juha, Betonirakenteiden kutistuminen ja halkeamien ehkäisy, Rakentajan kalenteri 2010, PDF-julkaisu, <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK100402.pdf>, luettu 19.3.2015
- 10 Haastattelu, Teuvo Meriläinen, DI, Erikoisasiantuntija, Sweco Rakennetekniikka Oy, Espoo 27.3.2015
- 11 Losberg, Anders, Design methods for Structurally reinforced concrete pavements, Chalmers University Books, Göteborg 1961
- 12 Autodesk Knowledge Network -verkkosivu, Robot Structural Analysis tuotteiden ohjeet, Building Soils – Calculator, <http://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-68C071E7-7318-4A5D-9FC7-43D02F547892-htm.html>, luettu 30.3.2015

- 13 Autodesk Knowledge Network -verkkosivu, Robot Structural Analysis tuotteiden ohjeet, Description of the Algorithm of Calculating the K Equivalent Coefficient, <http://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-797045CF-F656-4635-A467-848A57314256-htm.html>, luettu 30.3.2015
- 14 Mikko Mäntyranta, Kantavien teräskuitubetonirakenteiden mitoitus, diplomityö, Tampere 2013
- 15 Suomen Betoniyhdistys r.y., by 50 Betoninormit 2012, ESA Print Oy, Lahti 2011
- 16 Sisäilmäyhdistyksen verkkosivut, Maanvastainen betonilaatta, <http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat-tietojarjestelma/kunnossapito-ja-korjaaminen/maanvastaiset-rakenteet/maanvastainen-betonilaatta/>, luettu 9.4.2015
- 17 Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, RIL 255-1-2014 Rakennusfysiikka 1: Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset, Tammerprint Oy, Helsinki 2014
- 18 Rakennustietosäätiö RTS, RT-ohjekortti RT 81-11099 Radonin torjunta, 2012
- 19 Paroc Oy:n verkkosivut, <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/tuotteet/pages/betonirakenne-eristeet/paroc-col-40g>, luettu 14.4.2015
- 20 Suvanto, Kari, Metropolia AMK Rakennustekniikka, Rakennusfysiikan luentomateriaalit powerpoint- ja word-tiedostoina, luettu 17.4.2015
- 21 RFSensIT Oy:n verkkosivut, <http://rfsensit.fi/palvelut-ja-teknologia/>, luettu 17.4.2015
- 22 Sähköpostilla saatu taulukko, Jürgen Mandl, Head of fiber division, Severstal-Metiz, Friction-coefficients between faces of sub-structure and concrete, Helsinki 28.4.2015

Tutkimusrakenteen rakennetyyppi ja tuuletusperiaate

	Piir.no	/		Sivu
	Päiväys	Tekijä	Detaili	
Rakennuskohde	14.4.2015	KaHa		
OPINNÄYTETYÖ	Sisältö	MAANVARAINEN VILLAERISTETTY LATTIA		



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan

2. Kuitubetonilaatta rakennesuunnitelmien mukaan

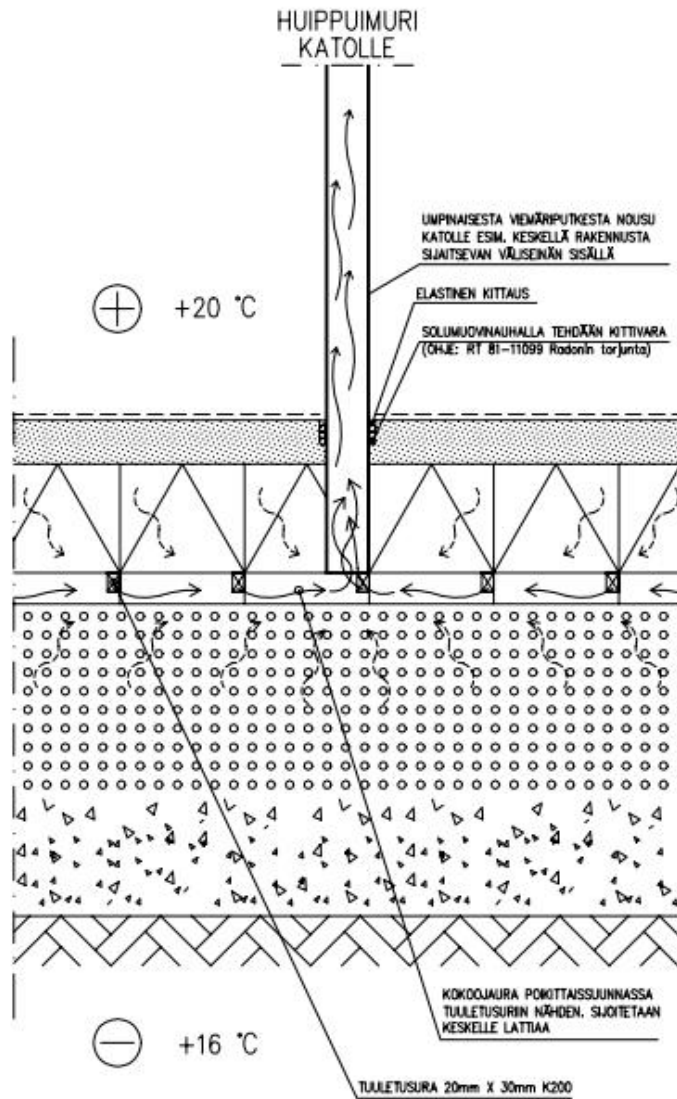
3. Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla

4. Kapillaarisora, esim. pesty 16-32

5. Mahdollinen täyttömaa, esim. hiekkasora

6. Perusmaa

Piiir.no	/		Sivu
	Päiväys	Tekijä	Detaili
14.4.2015	KaHa		
Rakennuskohde	Sisäitö		
OPINNÄYTETYÖ	MAANVARAINEN VILLAERISTETTY LATTIA TUULETUSPERIAATE		



TUULETUSPERIAATE POISTAA SAMALLA PERUSTUSTEN RADONIA
JA KUIVATTAÄ LAATAN ALLA OLEVAA ALUSTARAKENNETTA

IMUPUTKEN JA BETONILAATAN LIITOKSEN TIIVEYS ON TÄRKEÄ
PUTKI JA KOKOOJAURA SJOITETTAVA SITEN, ETTÄ NE KOHTAAVAT

Vertailulaskelmat

Maanvarainen villaeristetty kuitubetonilattia Insinööriytyö

Voimasuurelaskelmien ja mitoituksen lähtötiedot

Työssä vertaillaan tutkimuksen kohteena olevaa lamellivillaeristettyä maanvaraista kuitubetonilattiarakennetta (laskentarakenteet 1, 3 ja 4) tankoraidoitettuun EPS -eristettyyn maanvaraiseen teräsbetonilattiaan (laskentarakenne 2). Tässä dokumentissa annetaan rakenteiden staattisen toiminnan laskennallisen vertailun kannalta oleelliset lähtötiedot, joita käytetään rakennelaskelmissa. Vertailun kumpikin lattiatyypin on ajateltu pientalon asuintilan lattiaksi ja kuormitukset valitaan Eurokoodin mukaan käyttötarkoitus huomioiden. Betonilaatoissa ei ole lattialämmitystä. EPS -eristetyn lattiarakenteen rakennetyypiksi on valittu hyvän rakennustavan ja pientalorakentamisen kokemuksen perusteella yleinen ja toimiva rakenneratkaisu.

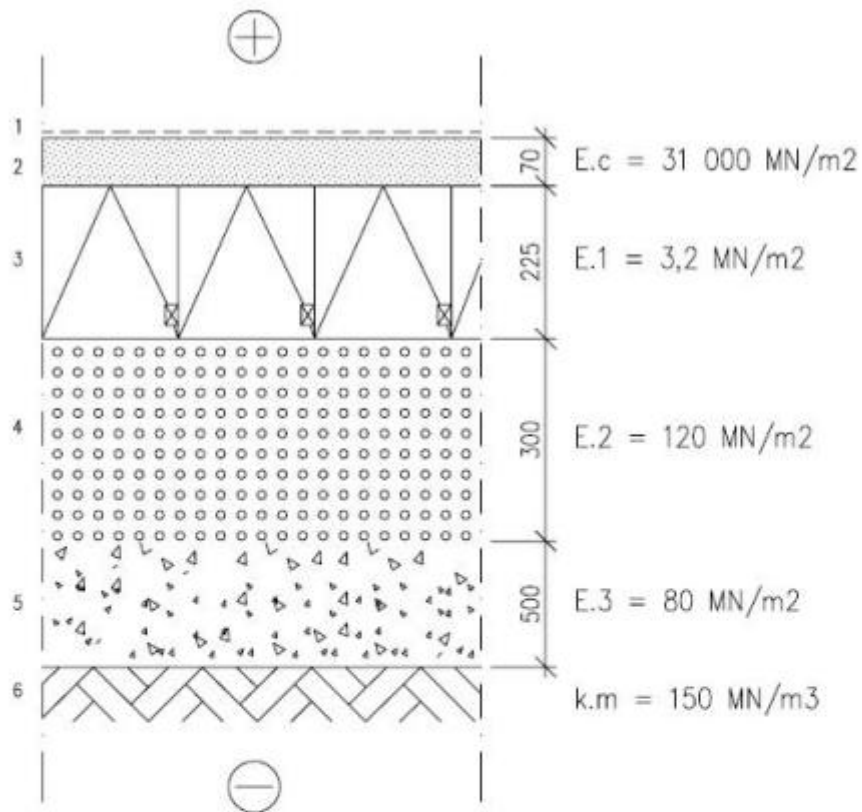
1. Laskentalattioiden mitat ja rakennetyypit sekä vertailun perusteet

- Molemmat lattiarakenteet on valittu reunamitoiltaan $(10 \times 10) \text{ m}^2$ eli lattian **L = B = 10 m**.
- Laatan reunat on 10 mm:n irrotuskaistalla irrotettu ympäröivistä seinistä, mikä tarkoittaa että laatta on kauttaaltaan elastisen alustan päällä. Myös kutistuma pääsee tapahtumaan vapaasti.
- Lattia on **saumaton**, joten laskelmissa olevat liikuntasaumojen mitoittavat momentit voidaan jättää huomiotta.
- **Villaeristeen kimmokertoimeksi on arvioitu 3,2 MN/m²**, koska Parocin tuotetiedoista ei löytynyt COL 40g:n kimmokertoimen suunnittelu-arvoa.
 - o Arvio perustuu EPS 100 LATTIA -eristeen suunnittelukimmokertoimeen 8 MN/m² ja näiden kahden eristeen puristuslujuuksien suhteeseen ($40 \text{ kPa} / 100 \text{ kPa} = 0,4$).

Lattiarakenteiden laskennallinen vertailu perustuu alustan eristeiden erilaisiin ominaisuuksiin, eroon laattojen korkeudessa ja laattojen erilaiseen raudoitustapaan. Paroc COL 40g lamellivillaeristeen lujuus ja sitä myötä kimmokerroin ovat pienempiä kuin EPS 100 LATTIA -eristeen. Alustan muut osat pidetään laattojen laskennassa samana. Villaeristeen lattiarakenteen laatan korkeus on valittu pienemmäksi, koska suojaetonietäisyyksiä ei tarvitse huomioida kuituraudoituksen vuoksi. Lisäksi on oletettu, että laatta kuivuu villan läpi ja tuuletuskanavien ansiosta alaspäin, jolloin laatan nurkkien käyristymien voidaan olettaa jäävän pieniksi. Laatan tasainen kuituraudoitus ei myöskään ainakaan edesauta käyristymien syntyä. EPS -eristeen rakenteen laattaa ei yhdensuuntaisen kuivumisen vuoksi voi ohentaa, koska se johtaisi suurempiin nurkkien nousuihin.

Seuraavilla sivuilla on esitetty laskentarakenteiden rakennetyypit.

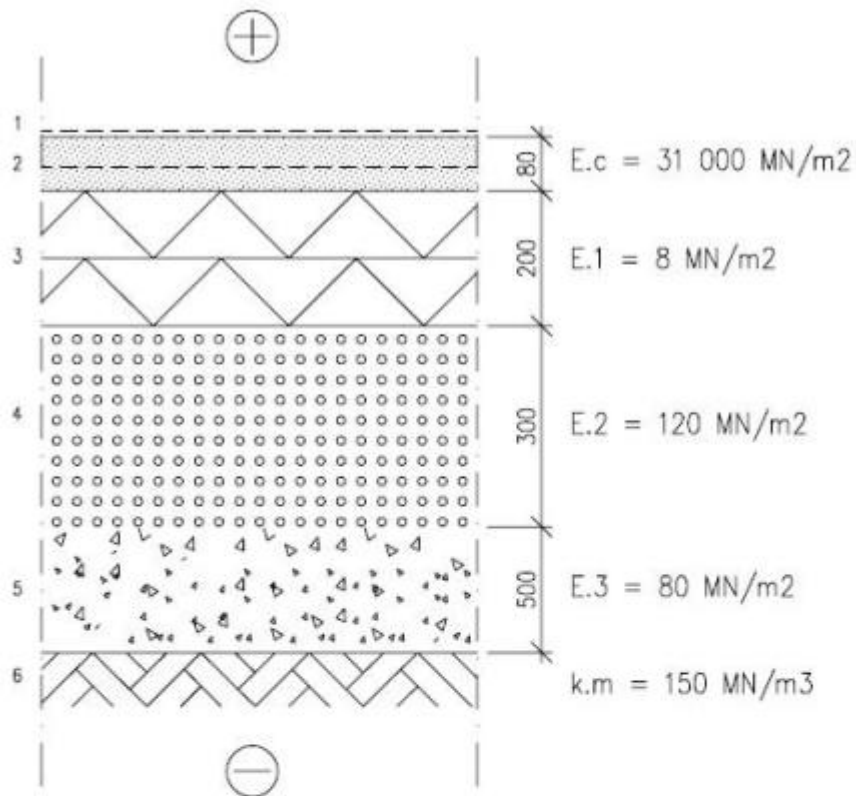
(1.) Tutkimusrakenteen rakennetyyppi :



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 70 mm Kuitubetonilaatta teräskuiduilla, betoni C25/30
3. 225 mm Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16-32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

(2.) Vertailurakenteen rakennetyyppi:

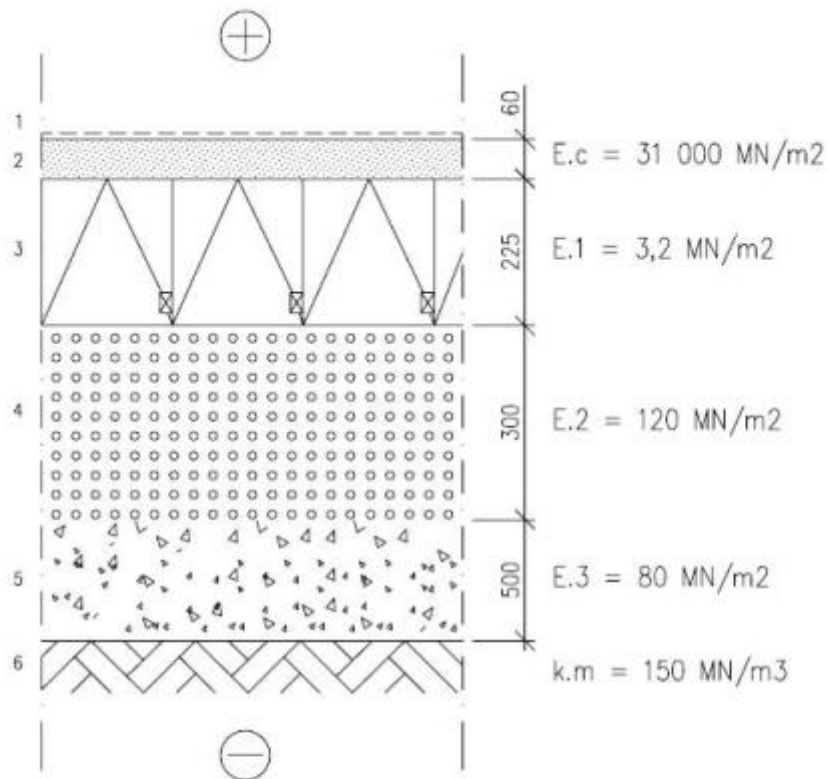


1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 80 mm Teräsbetoni-laatta keskeisellä raudoituksella, C25/30
3. 200 mm Lämmöneriste: EPS 100 LATTIA
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16–32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16\ \text{W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

Lisäksi kaksi kokeilua tutkimusrakenteesta ohuemmilla laatoilla 60 mm ja 50 mm.

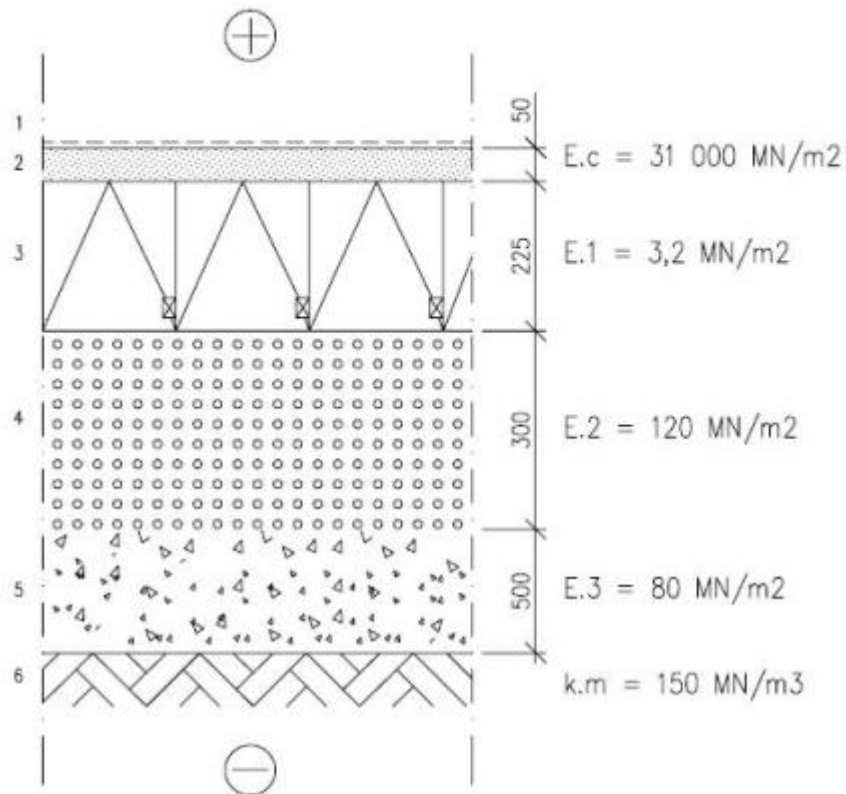
(3.) Tutkimusrakenteen rakennetyyppi:



- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | | Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan |
| 2. | 60 mm | Kuitubetonilaatta teräskuiduilla, betoni C25/30 |
| 3. | 225 mm | Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla |
| 4. | 300 mm | Kapillaarisora, pesty 16–32 |
| 5. | 500 mm | Täyttömaa, hiekkasora |
| 6. | | Perusmaa |

Lämmönläpäisykerroin < 0.16 W/m²K (RakMK C3 vaatimus)

Tutkimusrakenteen rakennetyyppi:



- | | | |
|----|--------|---|
| 1. | | Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan |
| 2. | 50 mm | Kuitubetonilaatta teräskuiduilla, betoni C25/30 |
| 3. | 225 mm | Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletturilla |
| 4. | 300 mm | Kapillaarisora, pesty 16–32 |
| 5. | 500 mm | Täyttömaa, hiekkasora |
| 6. | | Perusmaa |

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

2. Betonilaattojen mitoitusperusteet

- Betonin lujuusluokka Eurokoodin mukaan **C25/30**, lujuudet määräytyvät tämän mukaan
- Tankorautoitteet **A500HW**, lyhenne **T**
- Laatat mitoitetaan pistekuormien aiheuttamille momenteille ja kutistuman aiheuttamalle kitkavoimalle, joka ilmenee laatussa normaalivoimana
- Pistekuormien aiheuttamat momentit lasketaan käsilaskukaavoilla perustuen Westergaardin ratkaisuihin
- **TÄSSÄ VERTAILUSSA LATTIAT MITOITETAAN LAATAN KESKELLÄ SIJAITSEVAN PISTEKUORMAN POSITIIVISELLE MOMENTILLE**
 - o Syynä pistekuormien harvinainen sijainti asuintalossa laatan nurkassa tai reunalla
 - o Lisäksi kitkan aiheuttama normaalivoima on suurimmillaan laatan keskellä
- Kutistuman ja tasaisten kuormien aiheuttama normaalivoima lasketaan teoksen by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014 mukaisesti laatan keskellä
- Teräskuitubetonin mitoitus tehdään teoksen by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011 virtuaalikulitujen jäännöslujuusarvoilla ja kirjassa esitetyillä teräskuitubetonin lujuuksien laskentakaavoilla
- Teräskuitubetonin tehollinen korkeus **d = h = 70 mm ; 60 mm ; 50 mm**
- **EPS -lattian raudoitus lasketaan keskeisenä**, jonka suojabetoni laatan alapinnasta on 35 mm, tällöin käytetään tehollisena korkeutena **d = 0,5h = 40 mm**
- EPS -lattian raudoitus lasketaan teoksen by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014 mukaisesti kahdessa eri kuormitusyhdistelmässä
- Molempien lattioiden alustaluvun laskussa noudatetaan teoksen by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014 kerroksellisen alustarakenteen laskentamenetelmää

3. Eurokoodin mukaiset kuormat asuinrakennuksessa

- Pysyvät kuormat:
 - o Rakenteiden omat painot
 - Teräsbetoni:
 - Tutkimusrakenne (1.) h = 0,07 m $g_{d1} = 1,75 \text{ kN/m}^2$
 - Vertailurakenne (2.) h = 0,08 m $g_{d2} = 2,00 \text{ kN/m}^2$
 - Pintamateriaalien painoa ei huomioida
- Muuttuvat kuormat
 - o Hyötykuormat
 - Tasainen hyötykuorma: $q_d = 2,00 \text{ kN/m}^2$
 - Pitkäaikaisuus: $q_{dp} = 0,60 \text{ kN/m}^2$
 - Pistemäinen hyötykuorma: $Q_{cl} = 2,00 \text{ kN}$
 - Pitkäaikaisuus: $Q_{d,p} = 0,60 \text{ kN}$
 - Kuormitusala: $A = 50 \times 50 \text{ mm}^2 = 2500 \text{ mm}^2$

4. Maanvaraisen laatan mitoituksen kuormitusyhdistelmät

Muodostetaan maanvaraisen laatan kuormitusyhdistelmät teoksen by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014 mukaisesti:

Tarkasteltava rakenne kuuluu seuraamusluokkaan CC2.

- **KY1:** (maanvaraisen lattian kestävyys pistekuormien momenteille ilman vetorasituksia)
 - o **Kaikki pysyvät kuormat** kerrotaan osavarmuusluvulla **1,0**
 - o **Määrävä muuttuva kuorma** kerrotaan osavarmuusluvulla **1,3**
 - Hyötykuorma on määrävä
 - o **Pakkovoimia**, kuten kutistuman aiheuttamaa kitkaa, **ei huomioida**

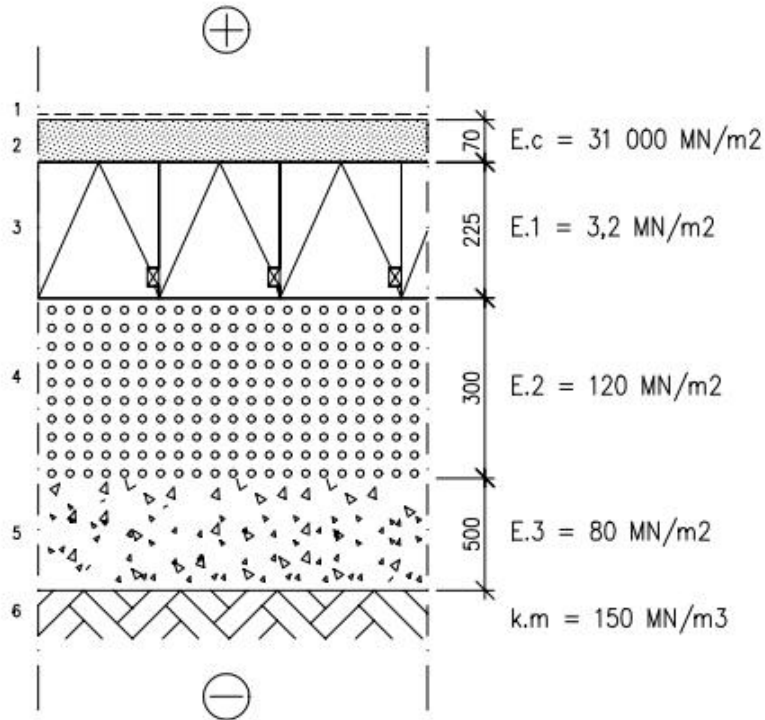
- **KY2:** (rakenteen kestävyys momentin ja vedon yhteisrasitukselle, taipumatarkastelu sekä pohjapaineen vertaaminen eristeen lyhytaikaiseen puristuslujuuteen)
 - o **Kaikki pysyvät kuormat** kerrotaan osavarmuusluvulla **1,0**
 - o **Muuttuvat kuormat** kerrotaan osavarmuusluvulla **1,0**
 - o **Pakkovoimat** otetaan huomioon osavarmuusluvulla **1,0**

Lisäksi muodostetaan yksi oma kuormitusyhdistelmä:

- **KY3:** (pohjapaineen vertaaminen eristeen pitkäaikaiseen puristuslujuuteen)
 - o **Kaikki pysyvät kuormat** kerrotaan osavarmuusluvulla **1,0**
 - o **Muuttuvien kuormien** pitkäaikaisuudet kerrotaan osavarmuusluvulla **1,0**
 - o **Pakkovoimia ei huomioida**

KY1: $Q_d = 2,6 \text{ kN}$	$g_d = \text{ei huomioida}$	<- (eivät aiheuta momenttia) ->	$q_d = \text{ei huomioida}$
KY2: $Q_d = 2,0 \text{ kN}$	$g_{d1} = 1,75 \text{ kN/m}^2$	$g_{d2} = 2,0 \text{ kN/m}^2$	$q_d = 2,0 \text{ kN/m}^2$
KY3: $Q_{dp} = 0,6 \text{ kN}$	$g_{d1} = 1,75 \text{ kN/m}^2$	$g_{d2} = 2,0 \text{ kN/m}^2$	$q_{dp} = 0,6 \text{ kN/m}^2$
	$g_{d3} = 1,50 \text{ kN/m}^2$	$g_{d4} = 1,25 \text{ kN/m}^2$	

	Pöir.no /		Sivu
	Päiväys 14.4.2015	Tekijä KaHa	Detalji
Rakennuskohde OPINNÄYTETYÖ	Sisältö MAANVARAINEN VILLAERISTETTY LATTIA LASKENTARAKENNE 70 mm		



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 70 mm Kuitubetonilaatta teräskuiduilla, betoni C25/30
3. 225 mm Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16–32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16\ \text{W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

Rakennuskohde	Sisältö
LASKENTARAKENNE LAMELLIVILLA	U-arvon määrittäminen (EN ISO 13370)

RAKENTEEN TIEDOT

Info

Perusmaan tyyppi	Hiekka tai sora
Alapohjan tyyppi	Maanpäällinen alapohja
Reunan lisäeristys	Pystyeriste
Kellarin seinätyyppi	Ei kellaria

REUNAN PYSTYERISTEEN TIEDOT

Lämmönjohtavuus [λ]	0,036 W/mK
Paksuus [d]	100 mm
Korkeus [D]	500 mm

Alapohjan pinta-ala [A]	100,0 m ²
Alapohjan ympärysmitta [P]	40,0 m
Perusmuurin paksuus [w]	200 mm

RAKENNEKERROKSET

Sisäpinta

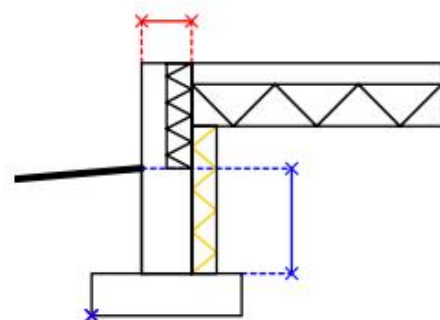
1	Betoni-laatta	
	Kerroksen paksuus [d]	70,0 mm
	Lämmönjohtavuus [λ]	2,200 W/mK
2	Kivivilla	
	Kerroksen paksuus [d]	225,0 mm
	Lämmönjohtavuus [λ]	0,038 W/mK
3	Ei rakennekerrosta	
4	Ei rakennekerrosta	
5	Ei rakennekerrosta	
6	Ei rakennekerrosta	

Ulkopinta

LAATAN REUNAN RAKENNE

Mittaviivojen selitykset

- x→x = perusmuurin paksuus [w]
- x→x = pystyeristeen korkeus [D]



ALAPOHJA	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Sisäpinta			0,17
1 Betonilaatta	70	2,200	0,03
2 Kivivilla	225	0,038	5,92
Ulkopinta			0,04

SUHTEELLINEN LATTIAMITTA		
A	100,0	m ²
P	40,0	m
B'	5,000	m

LATTIAN EKVIVALENTTI PAKSUUS		
w	0,200	m
d _t	12,526	m
$\lambda_{\text{perusmaa}}$	2,000	W/mK
R _{si}	0,170	m ² K/W
R _{se}	0,040	m ² K/W
R _f	5,953	m ² K/W
R _g	1,143	m ² K/W

SEINÄN EKVIVALENTTI PAKSUUS		
z	-	m
d _w	-	m
R _w	-	m ² K/W

U-ARVO		
$\Psi_{g,a}$	-0,01	
U _o	0,14	W/m ² K
U _{bf}	-	W/m ² K
U _{bw}	-	W/m ² K

ALAPOHJAN U-ARVO

U_c = 0,1293 W/m²K

VIRHEILMOITUKSET

·

·

Alustaluku k

muutettava arvo

sisältää lausekkeen

Levykuormituskoe: kimmomoduulilaskuri

a=	1	m
P=	0	N
s=	1	mm

E= 0,0 MPa

$$E = 1,5 \frac{P \cdot a}{s}$$

missä

E on kantavuusmoduuli, [MPa]
P on jännitys kosketuspinnassa = P/(x a²), [Pa]
P on maksimikuormitus, [N]
a on kuormituslevyn säde, [m]
s on mitattu maksimpainuma, [mm]

Yhden rakennekerroksen alustaluku: yksinkertaistettu (21)

E.m=	0	MPa
h=	1	m

k= 0 MN/m3

$$k = \frac{E_m}{h} \quad (21)$$

E_m on perusmaan kimmomoduuli [MN/m²]
ja se voidaan määrittää myös levykuormituskokeen avulla.

h on aluskerroksen paksuus [m].

Yhden rakennekerroksen alustaluku: tarkempi (11)

E.m=	0	MPa
h=	0,2	m
v.m=	0,2	
E.c=	34000	MPa

k= 0,0 MN/m3

$$k = \frac{0,9E_m}{(1-v_m^2)h} \sqrt{\frac{E_m}{E_c(1-v_m^2)}} \quad (11)$$

E_m is modulus of elasticity of subsoil [MN/m²] and it can also be determined by a plate loading test

v_m is Poisson constant of subsoil

E_c is modulus of elasticity of concrete [MN/m²]

Usean rakennekerroksen alustaluku: (22)

Jos rakenteessa on vähemmän rakennekerroksia, laitetaan ylimääräisten rakennekerrosten korkeus lähelle nolaa [0,000001] ja kimmomoduulille arvo 1. Tällöin kyseinen kerros ei vaikuta tulokseen merkittävästi.

h.1=	0,225	m
h.2=	0,3	m
h.3=	0,5	m
h.4=	0,000001	m
E.1=	3,2	MPa
E.2=	120	MPa
E.3=	80	MPa
E.4=	1	MPa
k.m=	150	MN/m3

k.1= 14,22222 MN/m3
k.1= 400 MN/m3
k.1= 160 MN/m3
k.1= 1000000 MN/m3

Perusmaa	E _m [MN/m ²]	v _m
Savi ¹⁾	2...10	0.30
Hiekka	10...30	0.25
Tiivis hiekka	40...80	0.35
Tiivis sora	100...200	0.40
Tiivis murskesora	300...350	0.40

Perusmaa	k _m [MN/m ³]
Hiekka	10...30
Tiivis hiekka	30...80
Tiivis hiekkasora	80...150
Karkea sora	150...250
Tiivis sora	200...300

Suunnittelussa suositellaan käytettävän vaihteluvälin alarajaa.

$$k = \frac{1}{\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} + \frac{h_3}{E_3} + \frac{1}{k_m}} \quad (22)$$

h_i on alustan eri kerrosten paksuus
E_i on alustan eri kerrosten kimmomoduuli
k_m on perusmaan alustaluku [MN/m³],
joka voidaan määrittää levykuormitus kokeella.

Vaihtoehtoinen tapa: (33)

Jos rakenteessa on vähemmän rakennekerroksia, laitetaan ylimääräisten rakennekerrosten kimmomoduuli todella suureksi, esim. 1 000 000. Tällöin kyseinen kerros ei vaikuta tulokseen merkittävästi.

k.1=	14,22222	MN/m3
k.2=	400	MN/m3
k.3=	160	MN/m3
k.4=	1000000	MN/m3
k.m=	150	MN/m3

k= 11,7 MN/m3

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_m}} \quad (33)$$

Maanvaraisen laatan momentit - Westergaard (by45/BLY7)

Rakenne 1 KY1

Pistekuorma:	P=	2,6	kN
--------------	----	-----	----

Pistekuorman kuormituspinta-ala:	A=	0,0025	m ²
----------------------------------	----	--------	----------------

Betonilaatta:	C25/30	h=	0,07	m
		E.cm=	31000	MN/m ²
		d=	0,07	m

Alustaluku:	k=	11,7	MN/m ³
-------------	----	------	-------------------

Pistekuorman säde:	r=	0,0632	m
--------------------	----	--------	---

Elastinen laatan jäykkyyssäde (l.k):	D=	0,8861	MNm
--------------------------------------	----	--------	-----

l.k=	0,5246	m
------	--------	---

Suhteellinen kuormitusjakauma:	a.k=	0,1205
--------------------------------	------	--------

Pistekuorman sijainnit: 1.= keskellä laattaa 4.= liikuntasauaman nurkassa
 2.= keskellä liikuntasauamaa 5.= laatan nurkassa
 3.= laatan reunalla

Momentit: positiivinen momentti -> veto laatan alapinnassa
 negatiivinen momentti -> veto yläpinnassa

1.	M.1max=	0,65	kNm	M.1min=	-0,06	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

2.	M.2max=	0,77	kNm	M.2min=	-0,09	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

3.	M.3max=	1,32	kNm	M.3min=	-0,18	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

4.	-			M.4min=	-0,26	kNm
----	---	--	--	---------	-------	-----

5.	-			M.5min=	-0,86	kNm
----	---	--	--	---------	-------	-----

Taipuma ja pohjapaine tapaukselle 1. sekä taipumat tapauksille 2. ja 3.:

Taipuma

pohjapaine

1.	y.1=	0,2	mm	p.0=	5,7	kPa
----	------	-----	----	------	-----	-----

2.	y.2=	0,2	mm	-		
----	------	-----	----	---	--	--

3.	y.3=	0,4	mm	-		
----	------	-----	----	---	--	--

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{l,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	0,80 MPa	$\sigma.b1=$	0,08 MPa
2.	$\sigma.b2=$	0,95 MPa	$\sigma.b2=$	0,12 MPa
3.	$\sigma.b3=$	1,62 MPa	$\sigma.b3=$	0,23 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,32 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	0,80 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
KITKAVOIMA:	N.k=	0,00 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0 MPa

Maanvaraisen laatan momentit - Westergaard (by45/BLY7)

Rakenne 1 KY2

Pistekuorma: P= 2 kN

Pistekuorman kuormituspinta-ala: A= 0,0025 m²

Betonilaatta: C25/30
 h= 0,07 m
 E.cm= 31000 MN/m²
 d= 0,07 m

Alustaluku: k= 11,7 MN/m³

Pistekuorman säde: r= 0,0632 m

Elastinen laatan jäykkyyssäde (l.k): D= 0,8861 MNm

l.k= 0,5246 m

Suhteellinen kuormitusjakauma: a.k= 0,1205

Pistekuorman sijainnit: 1.= keskellä laattaa 4.= liikuntasauaman nurkassa
 2.= keskellä liikuntasauamaa 5.= laatan nurkassa
 3.= laatan reunalla

Momentit: positiivinen momentti -> veto laatan alapinnassa
 negatiivinen momentti -> veto yläpinnassa

1. M.1max= 0,50 kNm M.1min= -0,04 kNm

2. M.2max= 0,59 kNm M.2min= -0,07 kNm

3. M3max= 1,01 kNm M.3min= -0,14 kNm

4. - M.4min= -0,2 kNm

5. - M.5min= -0,66 kNm

Taipuma ja pohjapaine tapaukselle 1. sekä taipumat tapauksille 2. ja 3.:

Taipuma

pohjapaine

1. y.1= 0,1 mm p.0= 4,4 kPa

2. y.2= 0,2 mm -

3. y.3= 0,3 mm -

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{l,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	0,62 MPa	$\sigma.b1=$	0,05 MPa
2.	$\sigma.b2=$	0,73 MPa	$\sigma.b2=$	0,09 MPa
3.	$\sigma.b3=$	1,24 MPa	$\sigma.b3=$	0,18 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,25 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	0,62 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	1,75 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0,6 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
KITKAVOIMA:	N.k=	11,75 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0,17 MPa

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{l,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	0,19 MPa	$\sigma.b1=$	0,03 MPa
2.	$\sigma.b2=$	0,23 MPa	$\sigma.b2=$	0,03 MPa
3.	$\sigma.b3=$	0,38 MPa	$\sigma.b3=$	0,05 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,08 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	0,19 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	$g=$	0 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	$q=$	0 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	$L=$	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	$L_x=$	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L_x :	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	$k.t=$	1
KITKAVOIMA:	$N.k=$	0,00 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0 MPa

Teräskuitubetonin taivutusvetolujuuden ja vetolujuuden määrittäminen virtuaalikuludulla sekä rakenteen jännitysten vertaaminen saatuihin lujuuksiin

(by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011)

Rakenne 1 KY1 ja 2

Betonilattian tyyppi: kutistumissaamaamaton, halkeilu taisaisesti laatan alueella

Betonin ominaispuristuslujuus: $f_{ck} = 25$ MPa

Betonin ominaisvetolujuus: $f_{ctk} = 1,7$ MPa

(Kuitu)betonin osavarmuuskerroin: $\gamma_c = 1,5$

Kuitumäärä ρ_k [kg/m ³ .bet]	Jäännöslujuuskerroin R.10,20 (maanvaraisille laatoille)	Taivutusvetolujuuden laskenta-arvo $f_{bd}(R.10,20 ; f_{ctk})$ [MPa]
25	57	1,098
30	64	1,233
35	70	1,348
40	77	1,483
45	83	1,599
50	90	1,734
55	97	1,868
60	100	1,926

Taivutusvetolujuuden laskentakaavat:

kutistumissaumaton lattia: $f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = f_{ctk}(0,0115R_{10,20} + 0,478)$

kutistumissaumattu lattia: $f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = \frac{1,7f_{ctk}R_{10,20}}{100\gamma_c}$

KY1: Mitoittava taivutusvetojännitys:	$\sigma_{bd} = 0,8$ MPa	KY1 OK
Suosittelu kuitumäärä betonikuutiossa:	$\rho_k = 25$ kg/m ³	
Tällöin taivutusvetolujuus on siis:	$f_{bd} = 1,098$ MPa	

Vetolujuuden laskentakaava: $f_{td} = 0,6f_{bd}$

KY2: Mitoittava taivutusvetojännitys:	$\sigma_{bd} = 0,62$ MPa	KY2 OK
Valittu kuitumäärä betonikuutiossa:	$\rho_k = 25$ kg/m ³	
Tällöin taivutusvetolujuus on siis:	$f_{bd} = 1,098$ MPa	
Suoran vetolujuuden laskenta-arvo:	$f_{td} = 0,658$ MPa	
Mitoittava vetojännitys:	$\sigma_{td} = 0,17$ MPa	
Mitoitusehto: $\frac{\sigma_{bd}}{f_{bd}} + \frac{\sigma_{td}}{f_{td}} \leq 1$ =	$0,82 \leq 1$	

Maanvaraisen betonilattian taipumien ja pohjapaineiden tarkastelu

Rakenne 1

KY 3

Kaikissa lattiarakenteissa taipumat ovat todella pieniä, joten niiden vertailu jätetään tekemättä.

Pistekuormien aiheuttamien pohjapaineiden arvot ovat myös todella pieniä mutta niissä ei ole huomioitu tasaisten pysyvien ja muuttuvien kuormien tuomaa lisäystä.

Lasketaan siis tasaisten pitkäaikaisten kuormien aiheuttama pohjapaine, joka määräytyy suoraan näiden kuormien summana.

Pysyvät kuormat:	g.d1=	1,75 kPa
Pitkäaikainen, tasainen hyötykuorma:	q.dp=	0,6 kPa
Näiden summa:	p.s=	2,35 kPa
Pistekuorman aiheuttama pohjapaine:	p.0=	1,4 kPa
Pohjapaineen kokonaisarvo:	p.d=	3,75 kPa

Paroc COL 40g kivivillan puristuslujuus 10 %:n kokoonpuristumalla on 40 kPa

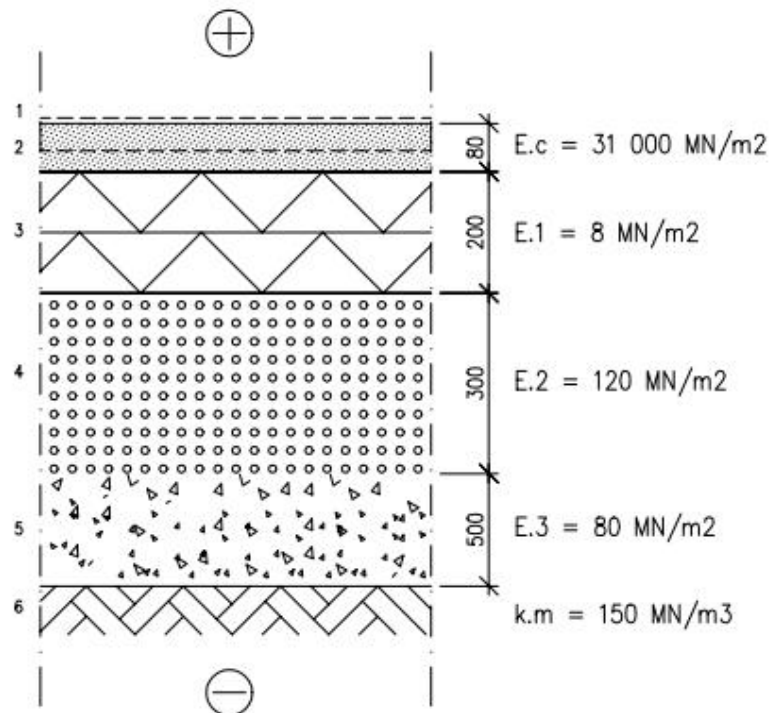
EPS 100 LATTIA solumuovieristeen puristuslujuus samalla puristumalla on 100 kPa

EPS 100 LATTIA solumuovieristeen pitkäaikaispuristuslujuus 2 %:n puristumalla on 35 kPa

Arvioidaan tämän perusteella Paroc COL 40g eristeen pitkäaikaispuristulujuudeksi 35 % lyhytaikaispuristuslujuudesta.

Tällöin	f.col,2=	14 kPa
f.col,2 >> p.d	OK	

	Piir.no	/		Sivu
	Päiväys	Tekijä		Detaili
Rakennuskohde	14.4.2015	KaHa		
OPINNÄYTETYÖ	Sisältö	MAANVARAINEN EPS-ERISTETTY LATTIA VERTAILULASKENTARAKENNE 80 mm		



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 80 mm Teräsbetoni-laatta keskeisellä raudoituksella, C25/30
3. 200 mm Lämmöneriste: EPS 100 LATTIA
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16-32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16\ \text{W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

Rakennuskohde	Sisätilä
LASKENTARAKENNE EPS-ERISTE	U-arvon määrittäminen (EN ISO 13370)

RAKENTEEN TIEDOT

Info

Perusmaan tyyppi	Hiekka tai sora
Alapohjan tyyppi	Maanpäällinen alapohja
Reunan lisäeristys	Pystyeriste
Kellarin seinätyyppi	Ei kellaria

REUNAN PYSTYERISTEEN TIEDOT

Lämmönjohtavuus [λ]	0,036 W/mK
Paksuus [d]	100 mm
Korkeus [D]	500 mm

Alapohjan pinta-ala [A]	100,0 m ²
Alapohjan ympärysmitta [P]	40,0 m
Perusmuurin paksuus [w]	200 mm

RAKENNEKERROKSET

Sisäpinta

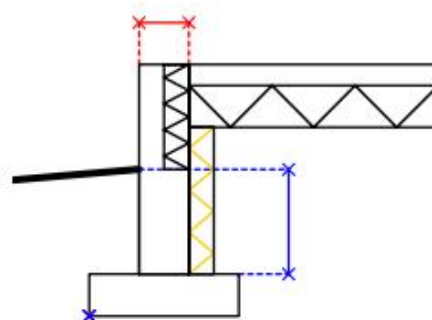
1	Betoni-laatta	
	Kerroksen paksuus [d]	80,0 mm
	Lämmönjohtavuus [λ]	2,200 W/mK
2	Polystyreeni (EPS)	
	Kerroksen paksuus [d]	200,0 mm
	Lämmönjohtavuus [λ]	0,036 W/mK
3	Ei rakennekerrosta	
4	Ei rakennekerrosta	
5	Ei rakennekerrosta	
6	Ei rakennekerrosta	

Ulkopinta

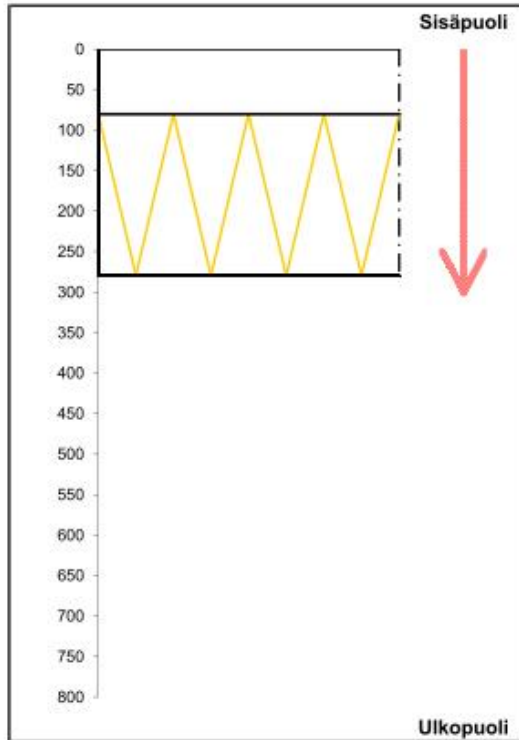
LAATAN REUNAN RAKENNE

Mittaviivojen selitykset

- x-x = perusmuurin paksuus [w]
- x-x = pystyeristeen korkeus [D]



ALAPOHJA	d [mm]	λ [W/mK]	R [m ² K/W]
Sisäpinta			0,17
1 Betonilaatta	80	2,200	0,04
2 Polystyreeni (EPS)	200	0,036	5,56
Ulkopinta			0,04



SUHTEELLINEN LATTIAMITTA

A	100,0	m ²
P	40,0	m
B'	5,000	m

LATTIAN EKVALENTTI PAKSUUS

w	0,200	m
d _t	11,804	m
$\lambda_{\text{perusmaa}}$	2,000	W/mK
R _{si}	0,170	m ² K/W
R _{se}	0,040	m ² K/W
R _t	5,592	m ² K/W
R _g	1,143	m ² K/W

SEINÄN EKVALENTTI PAKSUUS

z	-	m
d _w	-	m
R _w	-	m ² K/W

U-ARVO

$\Psi_{g,e}$	-0,02	
U _o	0,14	W/m ² K
U _{bf}	-	W/m ² K
U _{bw}	-	W/m ² K

ALAPOHJAN U-ARVO

$$U_c = 0,1356 \text{ W/m}^2\text{K}$$

VIRHEILMOITUKSET

-
-

Alustaluku k muutettava arvo sisältää lausekkeen

Levykuormituskoe: kimmomoduulilaskuri

a=	1	m
P=	0	N
s=	1	mm

E= 0,0 MPa

$$E = 1,5 \frac{P \cdot a}{s}$$

missä

E on kantavuusmoduuli, [MPa]
P on jännitys kosketuspinnassa = P/(π a²), [Pa]
P on maksimikuormitus, [N]
a on kuormituslevyn säde, [m]
s on mitattu maksimipainuma, [mm]

Yhden rakennekerroksen alustaluku: yksinkertaistettu (21)

E _m =	0	MPa
h=	1	m

k= 0 MN/m³

$$k = \frac{E_m}{h} \quad (21)$$

E_m on perusmaan kimmomoduuli [MN/m²]
ja se voidaan määrittää myös levykuormituskokeen avulla.

h on aluskerroksen paksuus [m].

Yhden rakennekerroksen alustaluku: tarkempi (11)

E _m =	0	MPa
h=	0,2	m
v _m =	0,2	
E _c =	34000	MPa

k= 0,0 MN/m³

$$k = \frac{0,8E_m}{(1 - \nu_m^2)h} \sqrt{\frac{E_m}{E_c(1 - \nu_m^2)}} \quad (11)$$

E_m is modulus of elasticity of subsoil [MN/m²] and it can also be determined by a plate loading test

ν_m is Poisson constant of subsoil

E_c is modulus of elasticity of concrete [MN/m²]

Usean rakennekerroksen alustaluku: (22)

Jos rakenteessa on vähemmän rakennekerroksia, laitetaan ylimääräisten rakennekerrosten korkeus lähelle nolaa (0,000001) ja kimmomoduulille arvo 1. Tällöin kyseinen kerros ei vaikuta tulokseen merkittävästi.

h ₁ =	0,2	m
h ₂ =	0,3	m
h ₃ =	0,5	m
h ₄ =	0,000001	m
E ₁ =	8	MPa
E ₂ =	120	MPa
E ₃ =	80	MPa
E ₄ =	1	MPa
k _m	150	MN/m ³

k ₁ =	40	MN/m ³
k ₂ =	400	MN/m ³
k ₃ =	160	MN/m ³
k ₄ =	1000000	MN/m ³

k= 24,7 MN/m³

Perusmaa	E _m [MN/m ²]	ν _m
Savi ¹⁾	2...10	0,30
Hiekka	10...30	0,25
Tiivis hiekka	40...80	0,35
Tiivis sora	100...200	0,40
Tiivis murskesora	300...350	0,40

Perusmaa	k _m [MN/m ³]
Hiekka	10...30
Tiivis hiekka	30...80
Tiivis hiekkasora	80...150
Karkea sora	150...250
Tiivis sora	200...300

Suunnittelussa suositellaan käytettävän vaihtelualan alarajaa.

$$k = \frac{1}{\frac{h_1}{E_1} + \frac{h_2}{E_2} + \frac{h_3}{E_3} + \frac{1}{k_m}} \quad (22)$$

h_i on alustan eri kerrosten paksuus
E_i on alustan eri kerrosten kimmomoduuli
k_m on perusmaan alustaluku [MN/m³],
joka voidaan määrittää levykuormitus kokeella.

Vaihtoehtoinen tapa: (33)

Jos rakenteessa on vähemmän rakennekerroksia, laitetaan ylimääräisten rakennekerrosten kimmomoduuli todella suureksi, esim. 1 000 000. Tällöin kyseinen kerros ei vaikuta tulokseen merkittävästi.

k ₁ =	40	MN/m ³
k ₂ =	400	MN/m ³
k ₃ =	160	MN/m ³
k ₄ =	1000000	MN/m ³
k _m =	150	MN/m ³

k= 24,7 MN/m³

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_m}} \quad (33)$$

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava: $N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0	kN/m ²
---------------------------	----	---	-------------------

Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0	kN/m ²
-------------------------------------	----	---	-------------------

Laatan pisin sivumitta:	L=	10	m
-------------------------	----	----	---

Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
---	-------	-----

Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5	m
--	------	---	---

Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
---------------	----------	---

Aikavaikutuskertoimen laskukaava: $k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$

Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0	mm
----------------------------------	---------------	---	----

Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5	mm
---	---------------	-----	----

Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5	mm
---	-------------	-----	----

Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
----------------------	------	---

KITKAVOIMA:	N.k=	0,00	kN/m
--------------------	-------------	-------------	-------------

Kuitubetonilaatan vetojännitys: $\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$

VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0	MPa
----------------------	--------------------------------	----------	------------

Maanvaraisen laatan momentit - Westergaard (by45/BLY7)

Rakenne 2 KY2

Pistekuorma:	P=	2	kN
--------------	----	---	----

Pistekuorman kuormituspinta-ala:	A=	0,0025	m ²
----------------------------------	----	--------	----------------

Betonilaatta:	C25/30	h=	0,08	m
		E.cm=	31000	MN/m ²
		d=	0,04	m

Alustaluku:	k=	24,7	MN/m ³
-------------	----	------	-------------------

Pistekuorman säde:	r=	0,0682	m
--------------------	----	--------	---

Elastinen laatan jäykkyyssäde (I.k):	D=	0,1653	MNm
--------------------------------------	----	--------	-----

I.k=	0,2860	m
------	--------	---

Suhteellinen kuormitusjakauma:	a.k=	0,2385	
--------------------------------	------	--------	--

Pistekuorman sijainnit:

1.= keskellä laattaa	4.= liikuntasauaman nurkassa
2.= keskellä liikuntasauamaa	5.= laatan nurkassa
3.= laatan reunalla	

Momentit: positiivinen momentti -> veto laatan alapinnassa
 negatiivinen momentti -> veto yläpinnassa

1.	M.1max=	0,38	kNm	M.1min=	-0,04	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

2.	M.2max=	0,44	kNm	M.2min=	-0,07	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

3.	M.3max=	0,72	kNm	M.3min=	-0,14	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

4.	-			M.4min=	-0,18	kNm
----	---	--	--	---------	-------	-----

5.	-			M.5min=	-0,48	kNm
----	---	--	--	---------	-------	-----

Taipuma ja pohjapaine tapaukselle 1. sekä taipumat tapauksille 2. ja 3.:

	Taipuma		pohjapaine			
1.	y.1=	0,2	mm	p.0=	1,3	kPa
2.	y.2=	0,2	mm	-		
3.	y.3=	0,4	mm	-		

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava: $N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	2	kN/m ²
---------------------------	----	---	-------------------

Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0,6	kN/m ²
-------------------------------------	----	-----	-------------------

Laatan pisin sivumitta:	L=	10	m
-------------------------	----	----	---

Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
---	-------	-----

Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5	m
--	------	---	---

Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
---------------	----------	---

Aikavaikutuskertoimen laskukaava: $k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$

Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0	mm
----------------------------------	---------------	---	----

Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5	mm
---	---------------	-----	----

Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5	mm
---	-------------	-----	----

Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
----------------------	------	---

KITKAVOIMA:	N.k=	13,00	kN/m
--------------------	-------------	--------------	-------------

Kuitubetonilaatan vetojännitys: $\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$

VETOJÄNNITYS:	$\sigma_{td}=$	0,17	MPa
----------------------	----------------------------------	-------------	------------

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava: $N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0	kN/m ²
---------------------------	----	---	-------------------

Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0	kN/m ²
-------------------------------------	----	---	-------------------

Laatan pisin sivumitta:	L=	10	m
-------------------------	----	----	---

Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
---	-------	-----

Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5	m
--	------	---	---

Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
---------------	----------	---

Aikavaikutuskertoimen laskukaava: $k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$

Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0	mm
----------------------------------	---------------	---	----

Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5	mm
---	---------------	-----	----

Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5	mm
---	-------------	-----	----

Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
----------------------	------	---

KITKAVOIMA:	N.k=	0,00	kN/m
--------------------	-------------	-------------	-------------

Kuitubetonilaatan vetojännitys: $\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$

VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0	MPa
----------------------	--------------------------------	----------	------------

Keskeisesti tankoraidoitettun maanvaraisen laatan mitoitus annetuille rasituksille
(by 45 / BLY 7 Betonilattiat 2014)

Rakenne 2 KY1 ja 2

Laatan korkeus:	h=	0,08	m
tehollinen korkeus:	d=	0,04	m

Betonin ominaispuristuslujuus:	f _{ck} =	25	MPa
Betonin mitoituslujuus:	f _{cd} =	14,2	MPa
Teräksen ominaislujuus:	f _{yk} =	500	MPa
Teräksen mitoituslujuus:	f _{yd} =	434,8	MPa

KY1:

Mitoittava momentti:	M _d =	0,49	kNm/m	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">KY1 OK</td> </tr> </table>	KY1 OK
KY1 OK					
Suhteellinen momentti:	μ=	0,0216			
Mekaaninen raudoitussuhde:	ω=	0,0219			
Vaadittu teräspinta-ala:	A _{s,rqd} =	28,5	mm ² /m		
Valitaan raudoitus:					
	T 5	# 150			
	A _s =	130,9	mm ² /m		

KY2:

Mitoittava momentti:	M _{Ed} =	0,38	kNm/m	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">KY2 OK</td> </tr> </table>	KY2 OK
KY2 OK					
Mitoittava normaalivoima:	N _{Ed} =	13	kN/m		
Epäkeskisyyys (M _d /N _d):	e _d =	0,029231	m		
Raudoituksen etäisyys keskilinjalta:	a _s =	0	m		
e _d > a _s -> suuri epäkeskisyyys:					
	M _{sd} =	0,38	kNm/m		
	μ=	0,0168			
	ω=	0,0169			
	A _{s,rqd} =	51,9	mm ² /m		
$A_{s,rqd} = \frac{\omega b d f_{cd}}{f_{yd}} + \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$					
Valitaan raudoitus:					
	T 5	# 150			
	A _s =	130,9	mm ² /m		

Maanvaraisen betonilattian taipumien ja pohjapaineiden tarkastelu

Rakenne 2

KY 3

Kaikissa lattiarakenteissa taipumat ovat todella pieniä, joten niiden vertailu jätetään tekemättä.

Pistekuormien aiheuttamien pohjapaineiden arvot ovat myös todella pieniä mutta niissä ei ole huomioitu tasaisten pysyvien ja muuttuvien kuormien tuomaa lisäystä.

Lasketaan siis tasaisten pitkäaikaisten kuormien aiheuttama pohjapaine, joka määräytyy suoraan näiden kuormien summana.

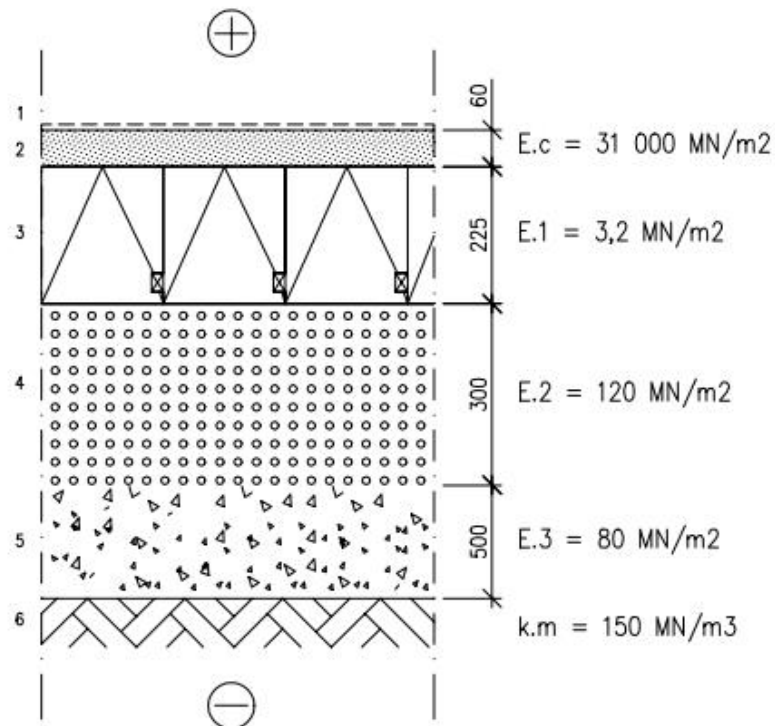
Pysyvät kuormat:	$g.d1=$	2 kPa
Pitkäaikainen, tasainen hyötykuorma:	$q.dp=$	0,6 kPa
Näiden summa:	$p.s=$	2,6 kPa
Pistekuorman aiheuttama pohjapaine:	$p.0=$	0,4 kPa
Pohjapaineen kokonaisarvo:	$p.d=$	3 kPa

EPS 100 LATTIA solumuovieristeen puristuslujuus samalla puristumalla on 100 kPa

EPS 100 LATTIA solumuovieristeen pitkäaikaispuristuslujuus 2 %:n puristumalla on 35 kPa

Tällöin	$f.eps,2=$	35 kPa
$f.col,2$	>>>	$p.d$
		OK

	Piiir.no		Sivu
	Päiväys	Tekijä	Detaili
Rakennuskohde	14.4.2015		KaHa
OPINNÄYTETYÖ	Sisältö MAANVARAINEN VILLAERISTETTY LATTIA LASKENTARAKENNE 60 mm		



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 60 mm Kuitubetonilaatta teräskuiduilla, betoni C25/30
3. 225 mm Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16-32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin $< 0.16 \text{ W/m}^2\text{K}$ (RakMK C3 vaatimus)

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{i,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	1,09 MPa	$\sigma.b1=$	0,10 MPa
2.	$\sigma.b2=$	1,27 MPa	$\sigma.b2=$	0,15 MPa
3.	$\sigma.b3=$	2,17 MPa	$\sigma.b3=$	0,30 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,44 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	1,09 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
KITKAVOIMA:	N.k=	0,00 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0 MPa

Maanvaraisen laatan momentit - Westergaard (by45/BLY7)

Rakenne 3 KY2

Pistekuorma: P= 2 kN

Pistekuorman kuormituspinta-ala: A= 0,0025 m²

Betonilaatta: C25/30
 h= 0,06 m
 E.cm= 31000 MN/m²
 d= 0,06 m

Alustaluku: k= 11,7 MN/m³

Pistekuorman säde: r= 0,0582 m

Elastinen laatan jäykkyyssäde (l.k): D= 0,5580 MNm

l.k= 0,4673 m

Suhteellinen kuormitusjakauma: a.k= 0,1245

Pistekuorman sijainnit: 1.= keskellä laattaa 4.= liikuntasauaman nurkassa
 2.= keskellä liikuntasauamaa 5.= laatan nurkassa
 3.= laatan reunalla

Momentit: positiivinen momentti -> veto laatan alapinnassa
 negatiivinen momentti -> veto yläpinnassa

1. M.1max= 0,50 kNm M.1min= -0,04 kNm

2. M.2max= 0,58 kNm M.2min= -0,07 kNm

3. M3max= 1 kNm M.3min= -0,14 kNm

4. - M.4min= -0,2 kNm

5. - M.5min= -0,65 kNm

Taipuma ja pohjapaine tapaukselle 1. sekä taipumat tapauksille 2. ja 3.:

Taipuma

pohjapaine

1. y.1= 0,1 mm p.0= 3,5 kPa

2. y.2= 0,2 mm -

3. y.3= 0,4 mm -

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{i,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	0,84	MPa	$\sigma.b1=$	0,07	MPa
2.	$\sigma.b2=$	0,97	MPa	$\sigma.b2=$	0,12	MPa
3.	$\sigma.b3=$	1,67	MPa	$\sigma.b3=$	0,24	MPa
4.	-			$\sigma.b4=$	0,34	MPa
5.	-			$\sigma.b4=$	0,84	MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	1,5	kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0,6	kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10	m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?		Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5	m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1	
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$		
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0	mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5	mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5	mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1	
KITKAVOIMA:	N.k=	10,50	kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$		
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0,18	MPa

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{i;max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	0,25 MPa	$\sigma.b1=$	0,04 MPa
2.	$\sigma.b2=$	0,30 MPa	$\sigma.b2=$	0,04 MPa
3.	$\sigma.b3=$	0,50 MPa	$\sigma.b3=$	0,07 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,10 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	0,25 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
KITKAVOIMA:	N.k=	0,00 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0 MPa

Teräskuitubetonin taivutusvetolujuuden ja vetolujuuden määrittäminen virtuaalikuidulla sekä rakenteen jännitysten vertaaminen saatuihin lujuuksiin

(by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011)

Rakenne 3 KY1 ja 2

Betonilattian tyyppi: kutistumissaumaamaton, halkeilu taisaisesti laatan alueella

Betonin ominaispuristuslujuus: f.ck= 25 MPa

Betonin ominaisvetolujuus: f.ctk= 1,7 MPa

(Kuitu)betonin osavarmuuskerroin: γ.c= 1,5

Kuitumäärä ρ.k [kg/m ³ .bet]	Jäännöslujuuskerroin R.10,20 (maanvaraisille laatoille)	Taivutusvetolujuuden laskenta-arvo f.bd(R.10,20 ; f.ctk) [MPa]
25	57	1,098
30	64	1,233
35	70	1,348
40	77	1,483
45	83	1,599
50	90	1,734
55	97	1,868
60	100	1,926

Taivutusvetolujuuden laskentakaavat:

kutistumissaumaton lattia: $f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = f_{ctk}(0,0115R_{10,20} + 0,478)$

kutistumissaumattu lattia: $f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = \frac{1,7f_{ctk}R_{10,20}}{100\gamma_c}$

KY1: Mitoittava taivutusvetojännitys:	σ.bd=	1,09 MPa	KY1 OK
Suosittelu kuitumäärä betonikuutiossa:	ρ.k=	25 kg/m ³	
Tällöin taivutusvetolujuus on siis:	f.bd=	1,098 MPa	

Vetolujuuden laskentakaava: $f_{td} = 0,6f_{bd}$

KY2: Mitoittava taivutusvetojännitys:	σ.bd=	0,84 MPa	KY2 OK
Valittu kuitumäärä betonikuutiossa:	ρ.k=	30 kg/m ³	
Tällöin taivutusvetolujuus on siis:	f.bd=	1,233 MPa	
Suoran vetolujuuden laskenta-arvo:	f.td=	0,658 MPa	
Mitoittava vetojännitys:	σ.td=	0,18 MPa	
Mitoitusehto: $\frac{\sigma_{bd}}{f_{bd}} + \frac{\sigma_{td}}{f_{td}} \leq 1$	=	0,95 ≤ 1	

Maanvaraisen betonilattian taipumien ja pohjapaineiden tarkastelu

Rakenne 3

KY 3

Kaikissa lattiarakenteissa taipumat ovat todella pieniä, joten niiden vertailu jätetään tekemättä.

Pistekuormien aiheuttamien pohjapaineiden arvot ovat myös todella pieniä mutta niissä ei ole huomioitu tasaisten pysyvien ja muuttuvien kuormien tuomaa lisäystä.

Lasketaan siis tasaisten pitkäaikaisten kuormien aiheuttama pohjapaine, joka määräytyy suoraan näiden kuormien summana.

Pysyvät kuormat:	$g.d1=$	1,5 kPa
Pitkäaikainen, tasainen hyötykuorma:	$q.dp=$	0,6 kPa
Näiden summa:	$p.s=$	2,1 kPa
Pistekuorman aiheuttama pohjapaine:	$p.0=$	1,1 kPa
Pohjapaineen kokonaisarvo:	$p.d=$	3,2 kPa

Paroc COL 40g kivivillan puristuslujuus 10 %:n kokoonpuristumalla on 40 kPa

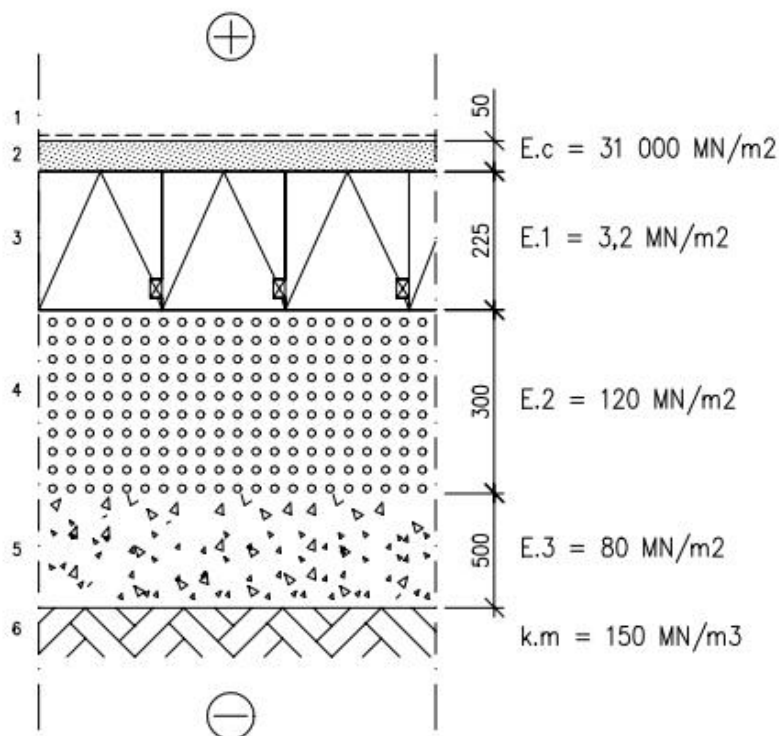
EPS 100 LATTIA solumuovieristeen puristuslujuus samalla puristumalla on 100 kPa

EPS 100 LATTIA solumuovieristeen pitkäaikaispuristuslujuus 2 %:n puristumalla on 35 kPa

Arvioidaan tämän perusteella Paroc COL 40g eristeen pitkäaikaispuristulujuudeksi 35 % lyhytaikaispuristuslujuudesta.

Tällöin	$f.col,2=$	14 kPa
$f.col,2$	>>	$p.d$
		OK

	Piir.no	/		Sivu
	Päiväys	Tekijä		Detalji
Rakennuskohde	14.4.2015		KaHo	
OPINNÄYTETYÖ	Sisältö			
MAANVARAINEN VILLAERISTETTY LATTIA LASKENTARAKENNE 50 mm				



1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 50 mm Kuitubetonilaatta teräskuiduilla, betoni C25/30
3. 225 mm Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. 300 mm Kapillaarisora, pesty 16–32
5. 500 mm Täyttömaa, hiekkasora
6. Perusmaa

Lämmönläpäisykerroin < 0.16 W/m²K (RakMK C3 vaatimus)

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{i,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	1,54 MPa	$\sigma.b1=$	0,15 MPa
2.	$\sigma.b2=$	1,78 MPa	$\sigma.b2=$	0,22 MPa
3.	$\sigma.b3=$	3,05 MPa	$\sigma.b3=$	0,44 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,63 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	1,54 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
KITKAVOIMA:	N.k=	0,00 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0 MPa

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{i,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	1,18 MPa	$\sigma.b1=$	0,10 MPa
2.	$\sigma.b2=$	1,37 MPa	$\sigma.b2=$	0,17 MPa
3.	$\sigma.b3=$	2,36 MPa	$\sigma.b3=$	0,34 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,48 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	1,18 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	1,25 kN/m ²
Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0,6 kN/m ²
Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
Aikavaikutuskertoimen laskukaava:	$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$	
Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
KITKAVOIMA:	N.k=	9,25 kN/m
Kuitubetonilaatan vetojännitys:	$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$	
VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0,19 MPa

Maanvaraisen laatan momentit - Westergaard (by45/BLY7)

Rakenne 4 KY3

Pistekuorma:	P=	0,6	kN
--------------	----	-----	----

Pistekuorman kuormituspinta-ala:	A=	0,0025	m ²
----------------------------------	----	--------	----------------

Betonilaatta:	C25/30	h=	0,05	m
		E.cm=	31000	MN/m ²
		d=	0,05	m

Alustaluku:	k=	11,7	MN/m ³
-------------	----	------	-------------------

Pistekuorman säde:	r=	0,0532	m
--------------------	----	--------	---

Elastinen laatan jäykkyyssäde (l.k):	D=	0,3229	MNm
--------------------------------------	----	--------	-----

l.k=	0,4076	m
------	--------	---

Suhteellinen kuormitusjakauma:	a.k=	0,1305
--------------------------------	------	--------

Pistekuorman sijainnit: 1.= keskellä laattaa 4.= liikuntasauaman nurkassa
2.= keskellä liikuntasauamaa 5.= laatan nurkassa
3.= laatan reunalla

Momentit: positiivinen momentti -> veto laatan alapinnassa
negatiivinen momentti -> veto yläpinnassa

1.	M.1max=	0,15	kNm	M.1min=	-0,02	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

2.	M.2max=	0,18	kNm	M.2min=	-0,02	kNm
----	---------	------	-----	---------	-------	-----

3.	M3max=	0,3	kNm	M.3min=	-0,04	kNm
----	--------	-----	-----	---------	-------	-----

4.	-			M.4min=	-0,06	kNm
----	---	--	--	---------	-------	-----

5.	-			M.5min=	-0,2	kNm
----	---	--	--	---------	------	-----

Taipuma ja pohjapaine tapaukselle 1. sekä taipumat tapauksille 2. ja 3.:

	Taipuma		pohjapaine			
1.	y.1=	0,1	mm	p.0=	0,8	kPa
2.	y.2=	0,1	mm	-		
3.	y.3=	0,2	mm	-		

Momenttien aiheuttamat taivutusvetojännitykset kuitubetonilaatalle:

Laskukaava:
$$\sigma_b = \frac{6|M_{i,max/min}|}{h^2}$$

1.	$\sigma.b1=$	0,36 MPa	$\sigma.b1=$	0,05 MPa
2.	$\sigma.b2=$	0,44 MPa	$\sigma.b2=$	0,05 MPa
3.	$\sigma.b3=$	0,72 MPa	$\sigma.b3=$	0,10 MPa
4.	-		$\sigma.b4=$	0,15 MPa
5.	-		$\sigma.b4=$	0,36 MPa

Kitkavoiman laskenta ja sen aiheuttama vetojännitys kuitubetonilaatassa:

Laskukaava:
$$N_k = (g + k_t q)L_x \mu_F$$

Pysyvät kuormat yhteensä:	g=	0 kN/m ²
---------------------------	----	---------------------

Pitkäaikainen tasainen hyötykuorma:	q=	0 kN/m ²
-------------------------------------	----	---------------------

Laatan pisin sivumitta:	L=	10 m
-------------------------	----	------

Pääseekö laatta kutistumaan reunoiltaan vapaasti?	Kyllä	0,5
---	-------	-----

Matka, jolla kitka pääsee kehittymään:	L.x=	5 m
--	------	-----

Kitkakerroin:	$\mu.F=$	1
---------------	----------	---

Aikavaikutuskertoimen laskukaava:
$$k_t = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{\Delta L} \leq 1,0$$

Lämpötilasta aiheutuva lyhenemä:	$\Delta L.2=$	0 mm
----------------------------------	---------------	------

Hyötykuormituksen jälkeinen kutistuma matkalla L.x:	$\Delta L.2=$	1,5 mm
---	---------------	--------

Laatan liukuma, jolla kitka saavuttaa täyden arvonsa: $\leq 1,5$ mm	$\Delta L=$	1,5 mm
---	-------------	--------

Aikavaikutuskerroin:	k.t=	1
----------------------	------	---

KITKAVOIMA:	N.k=	0,00 kN/m
--------------------	-------------	------------------

Kuitubetonilaatan vetojännitys:
$$\sigma_{td} = \frac{N_k}{h}$$

VETOJÄNNITYS:	$\sigma.td=$	0 MPa
----------------------	--------------------------------	--------------

Teräskuitubetonin taivutusvetolujuuden ja vetolujuuden määrittäminen virtuaalikuidulla sekä rakenteen jännitysten vertaaminen saatuihin lujuuksiin

(by 56 Teräskuitubetonirakenteet 2011)

Rakenne 4 KY1 ja 2

Betonilattian tyyppi: kutistumissaamaamaton, halkeilu taisysesti laatan alueella

Betonin ominaispuristuslujuus: $f_{ck} = 25$ MPa

Betonin ominaisvetolujuus: $f_{ctk} = 1,7$ MPa

(Kuitu)betonin osavarmuuskerroin: $\gamma_c = 1,5$

Kuitumäärä p.k [kg/m3.bet]	Jäännöslujuuskerroin R.10,20 (maanvaraisille laatoille)	Taivutusvetolujuuden laskenta-arvo $f_{bd}(R.10,20 ; f_{ctk})$ [MPa]
25	57	1,098
30	64	1,233
35	70	1,348
40	77	1,483
45	83	1,599
50	90	1,734
55	97	1,868
60	100	1,926

Taivutusvetolujuuden laskentakaavat:

kutistumissaumaton lattia: $f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = f_{ctk}(0,0115R_{10,20} + 0,478)$

kutistumissaumattu lattia: $f_{bd}(R_{10,20}f_{ctk}) = \frac{1,7f_{ctk}R_{10,20}}{100\gamma_c}$

KY1: Mitoittava taivutusvetojännitys:	$\sigma_{bd} = 1,54$ MPa	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">KY1 OK</div>
Suosittelut kuitumäärä betonikuutiassa:	$\rho_k = 45$ kg/m ³	
Tällöin taivutusvetolujuus on siis:	$f_{bd} = 1,599$ MPa	

Vetolujuuden laskentakaava:

$$f_{td} = 0,6f_{bd}$$

KY2: Mitoittava taivutusvetojännitys:	$\sigma_{bd} = 1,18$ MPa	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">KY2 OK</div>
Valittu kuitumäärä betonikuutiassa:	$\rho_k = 45$ kg/m ³	
Tällöin taivutusvetolujuus on siis:	$f_{bd} = 1,599$ MPa	
Suoran vetolujuuden laskenta-arvo:	$f_{td} = 0,959$ MPa	
Mitoittava vetojännitys:	$\sigma_{td} = 0,19$ MPa	
Mitoitusehto: $\frac{\sigma_{bd}}{f_{bd}} + \frac{\sigma_{td}}{f_{td}} \leq 1$ =	$0,93 \leq 1$	

Maanvaraisen betonilattian taipumien ja pohjapaineiden tarkastelu

Rakenne 4

KY 3

Kaikissa lattiarakenteissa taipumat ovat todella pieniä, joten niiden vertailu jätetään tekemättä.

Pistekuormien aiheuttamien pohjapaineiden arvot ovat myös todella pieniä mutta niissä ei ole huomioitu tasaisten pysyvien ja muuttuvien kuormien tuomaa lisäystä.

Lasketaan siis tasaisten pitkäaikaisten kuormien aiheuttama pohjapaine, joka määräytyy suoraan näiden kuormien summana.

Pysyvät kuormat:	g.d1=	1,25 kPa
Pitkäaikainen, tasainen hyötykuorma:	q.dp=	0,6 kPa
Näiden summa:	p.s=	1,85 kPa
Pistekuorman aiheuttama pohjapaine:	p.0=	0,8 kPa
Pohjapaineen kokonaisarvo:	p.d=	2,65 kPa

Paroc COL 40g kivivillan puristuslujuus 10 %:n kokoonpuristumalla on 40 kPa

EPS 100 LATTIA solumuovieristeen puristuslujuus samalla puristumalla on 100 kPa

EPS 100 LATTIA solumuovieristeen pitkäaikaispuristuslujuus 2 %:n puristumalla on 35 kPa

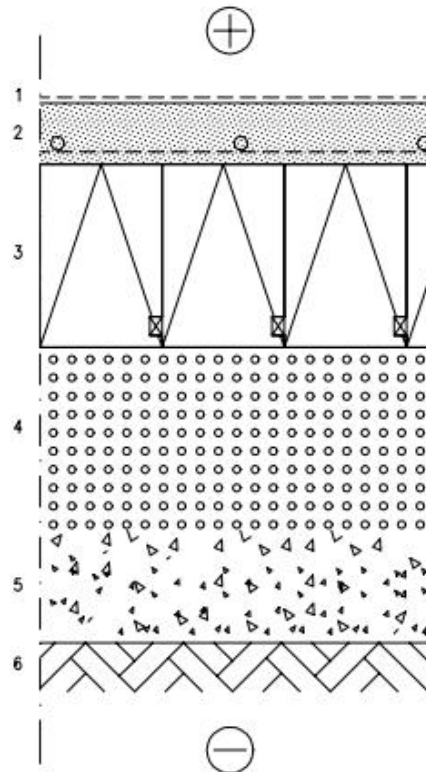
Arvioidaan tämän perusteella Paroc COL 40g eristeen pitkäaikaispuristuslujuudeksi 35 % lyhytaikaispuristuslujuudesta.

Tällöin	f.col,2=	14 kPa
f.col,2 >>	p.d	OK

Koekohteen kosteus- ja lämpötilatarkastelut

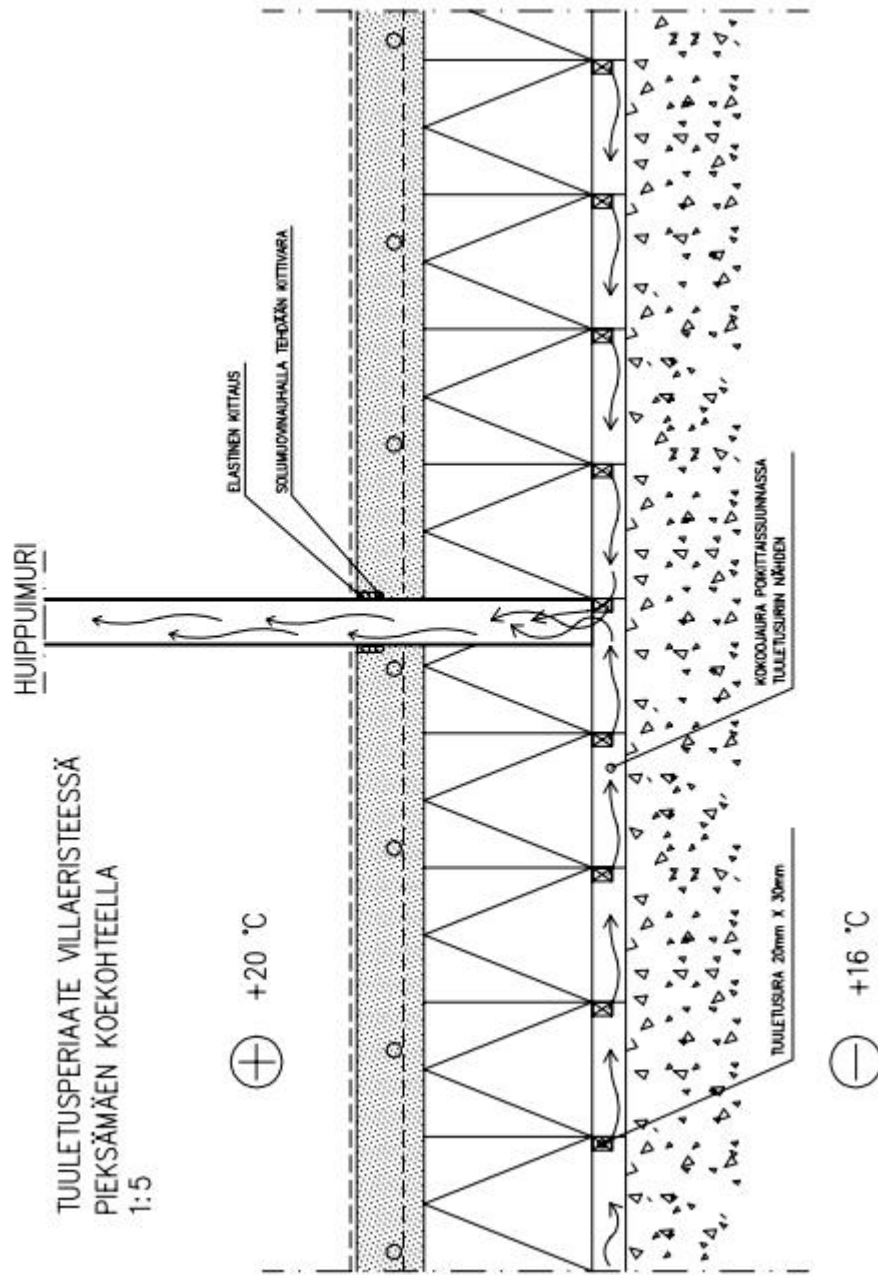


	Piir.no	/	Sivu
	Päiväys	14.4.2015	Tekijä KaHa
Rakennuskohde LIPSANEN HQ	Sisältö MAANVARAINEN VILLAERISTETTY LATTIA KOEKOYTEELLA TOTEUTETTU		

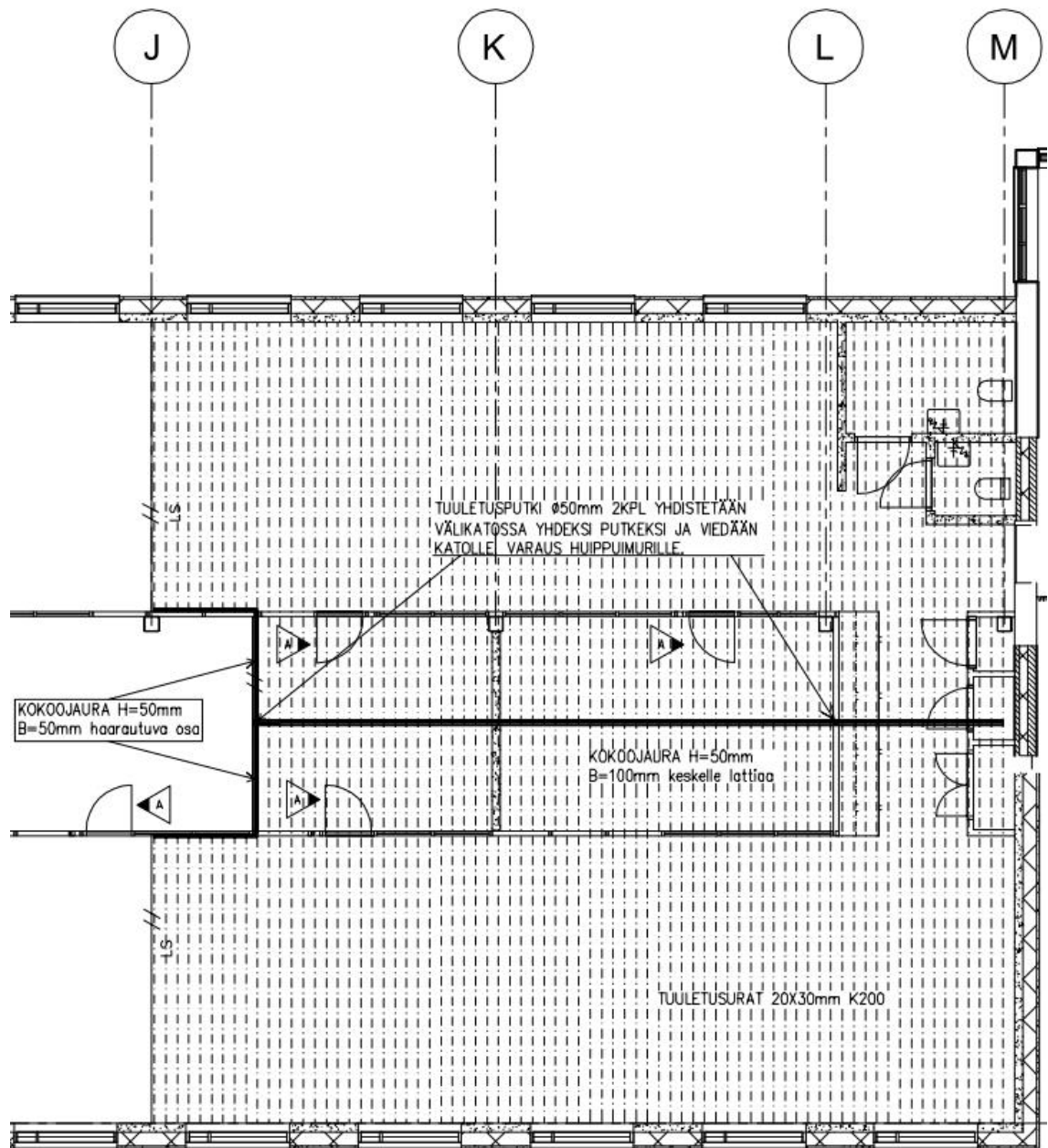


1. Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2. 100 mm Kuitubetoni laatta, lattialämmitys sidottu rauditusverkkoon
Teräskuitu Hendix Prime 75/52 30 kg/m³bet, betoni C35/45
3. 300 mm Lämmöneriste: Paroc COL 40 g tuuletusurilla
4. >300 mm Kapillaarisora, koneellisesti tiivistetty, 6–30 mm
5. Mahdollinen täyttömaa, tiivistetty hiekkasora
6. Perusmaa

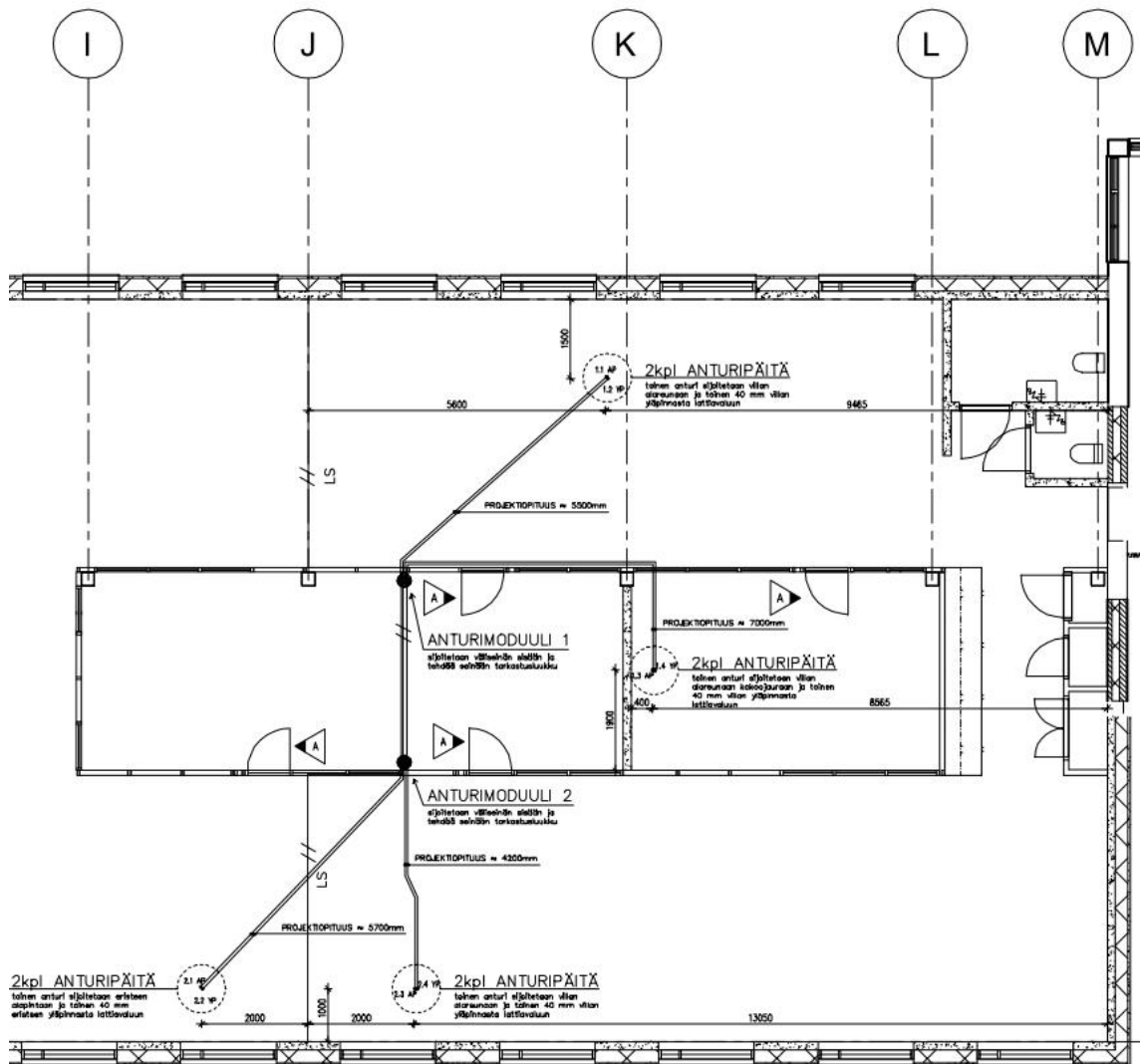
Lämmönläpäisykerroin 0.09 W/m² K



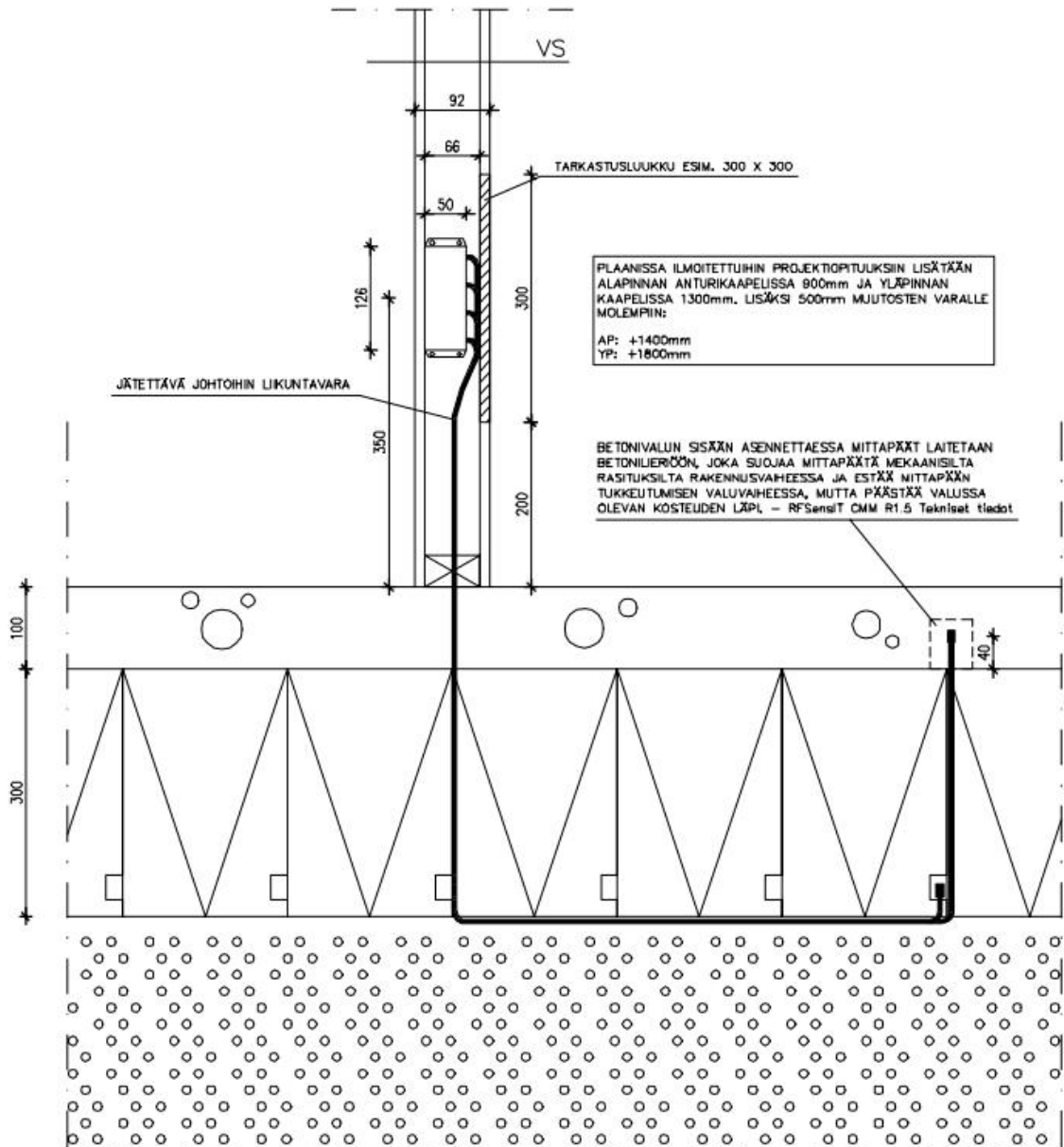
LATTIARAKENTEEN TUULETUS 1:100
Kalle Hakala 17.10.2014

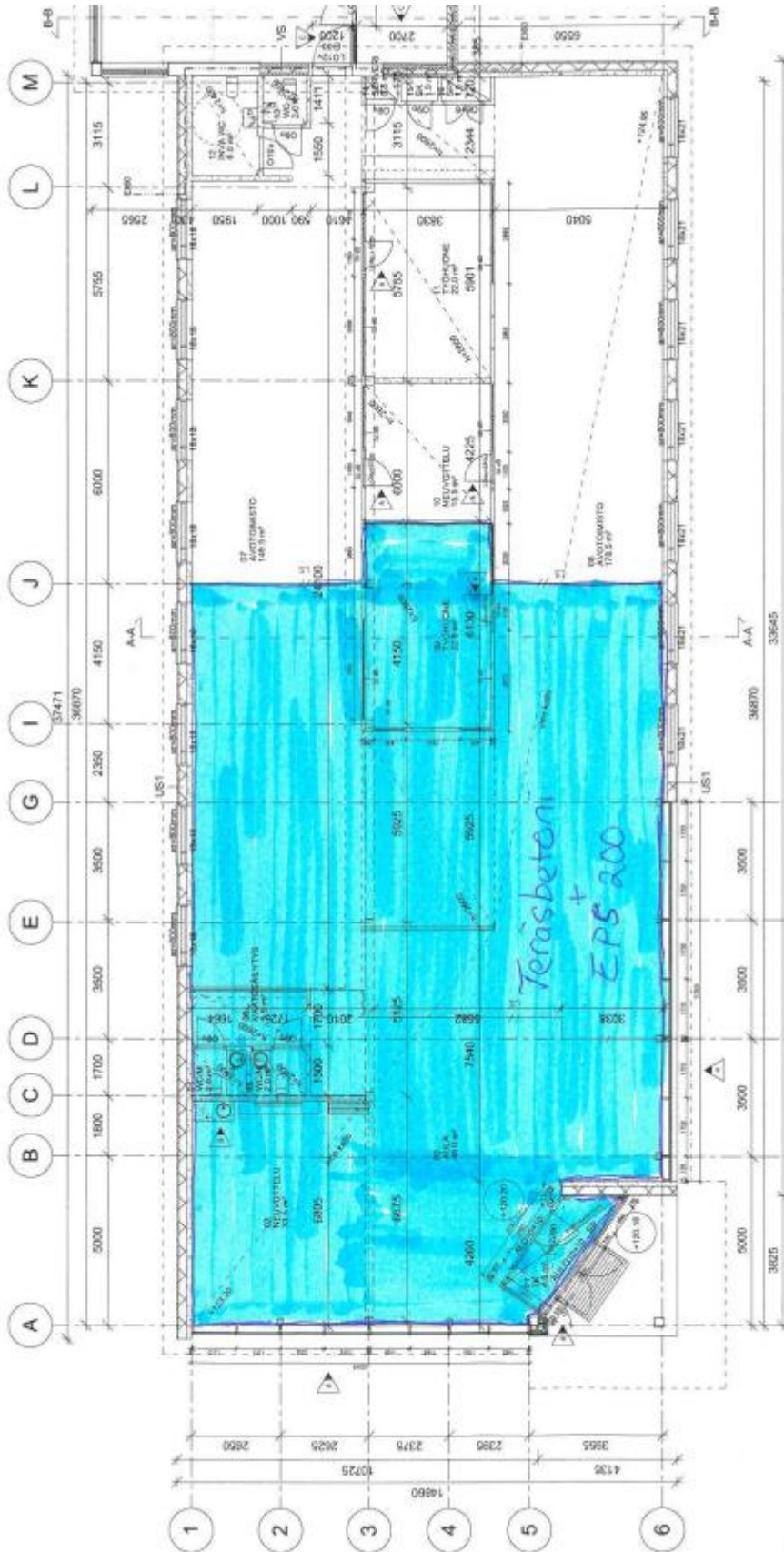


LATTIARAKENTEEN ANTURISIOITTELUT 1:100
Kalle Hakala 21.10.2014



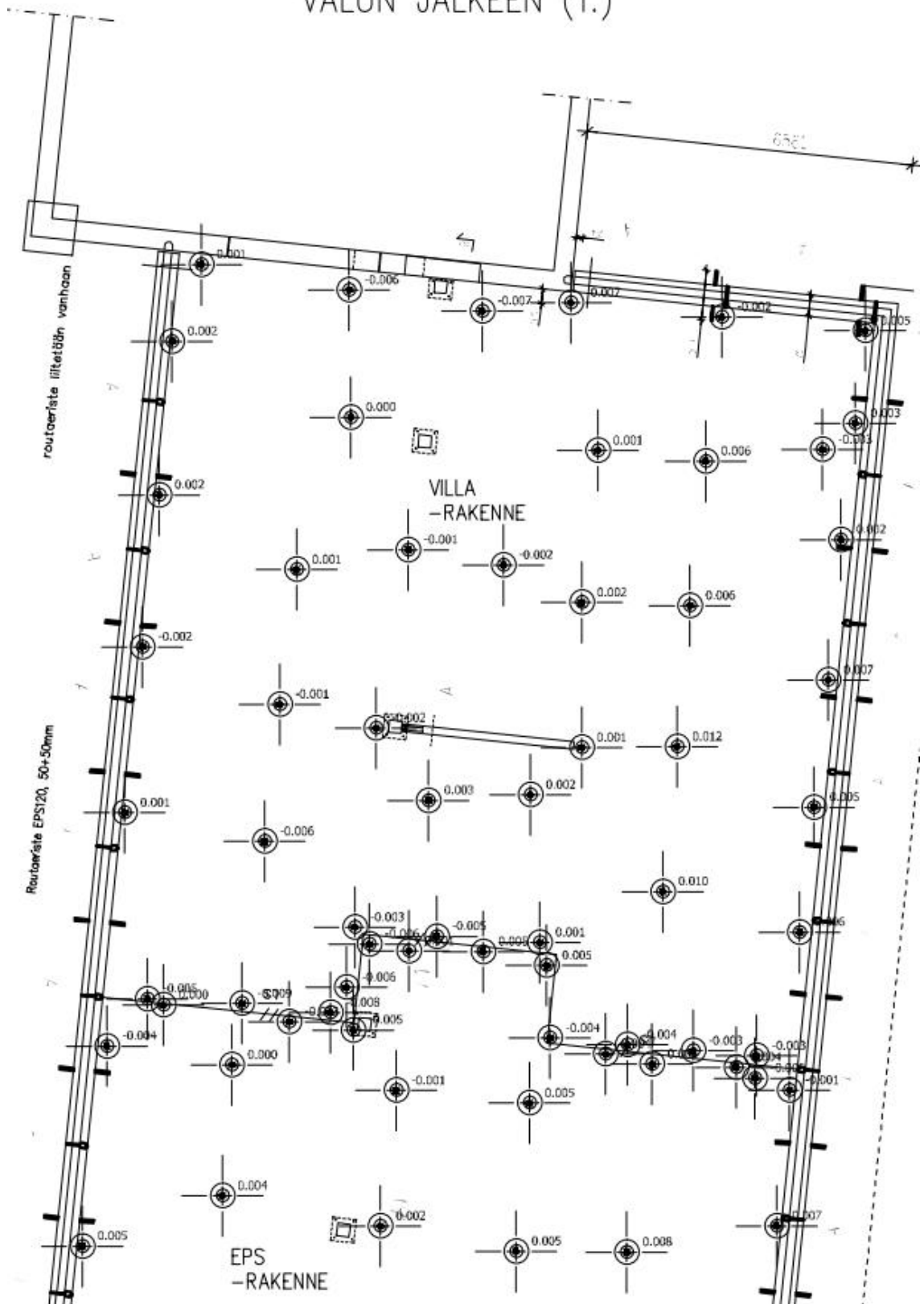
ANTURIDETALJI 1:10

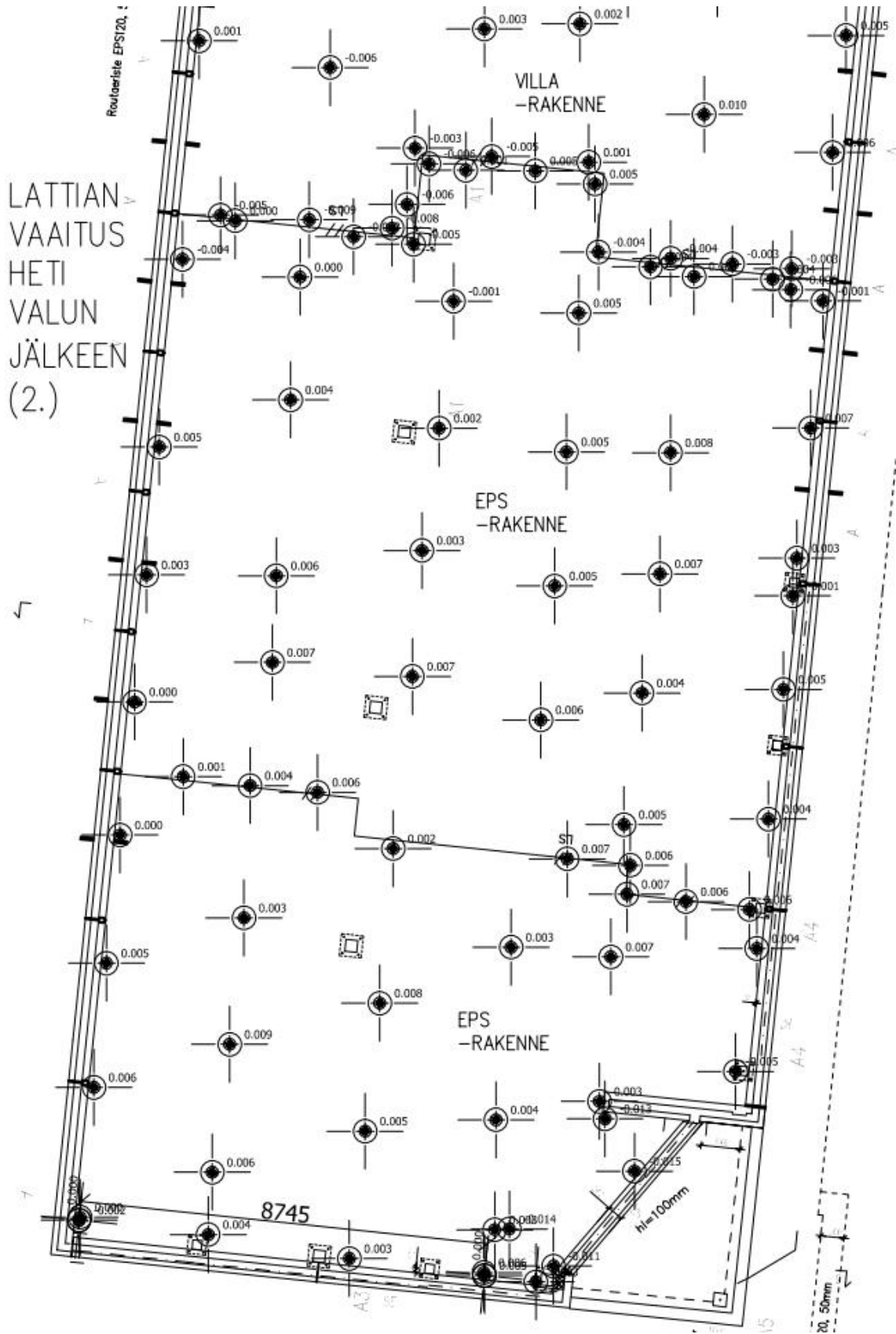




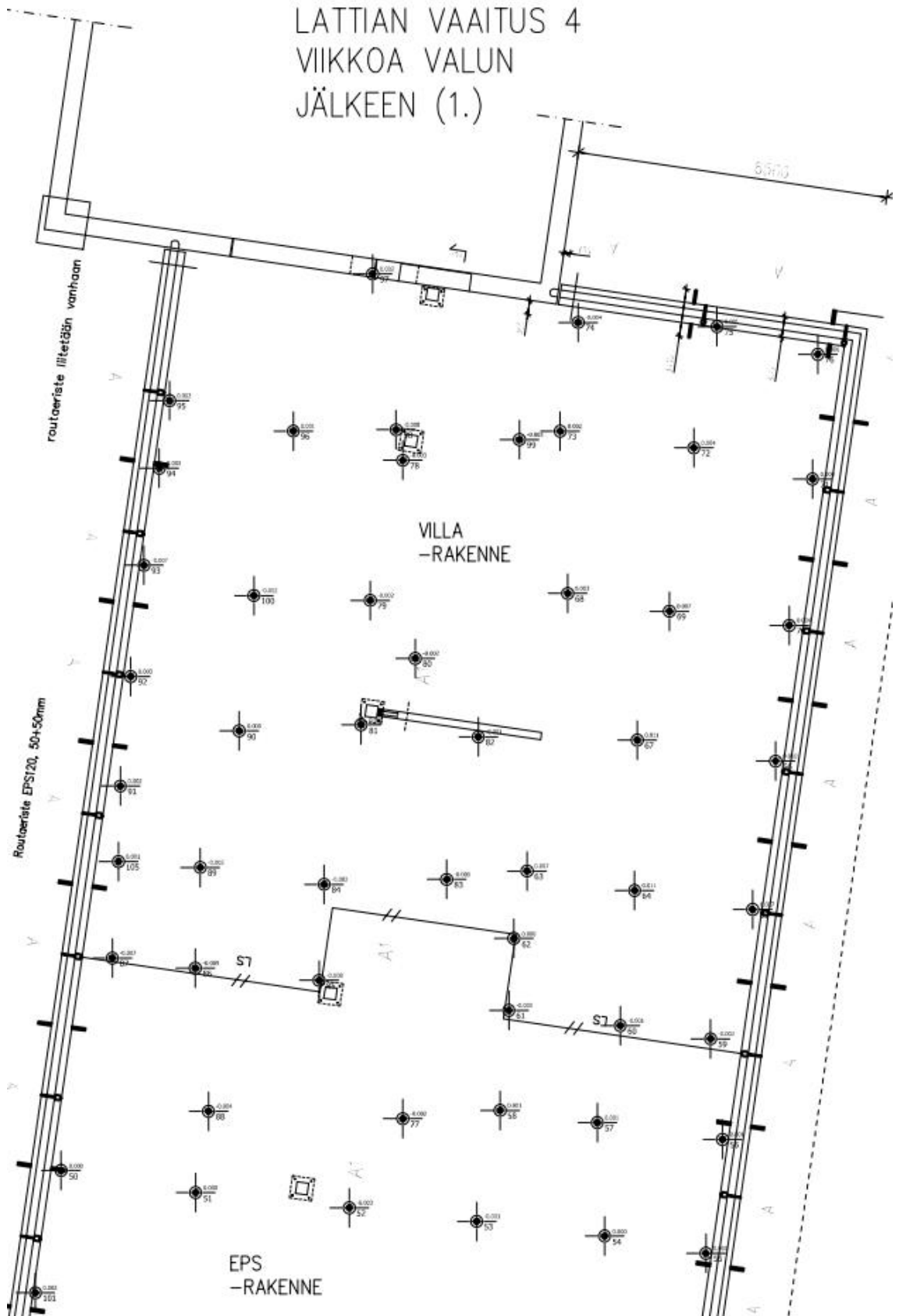
	Piir.no	Sivu
	Päiväys	Tekijä
	14.4.2015	KaHa
Rakennuskohde	Sisältö	
LIPSANEN HQ	MAANVARAINEN EPS-ERISTETTY LATTIA KOEKOYTEELLA TOTEUTETTU	
1.		Pintamateriaali ja -käsittely, huoneselityksen mukaan
2.	100 mm	Teräsbetoni-laatta, C35/45, T5+T5 # 150 A500HW Lattialämmitysputket sidottu alempaan verkkoon
3.	250 mm	Lämmöneriste: EPS 100 LATTIA
4.	300 mm	Kapillaarisora, koneellisesti tiivistetty, 6-30 mm
5.	500 mm	Täyttömaa, tiivistetty hiekkasora
6.		Perusmaa
Lämmönläpäisykerroin 0.09 W/m ² K		

LATTIAN VAAITUS HETI VALUN JÄLKEEN (1.)

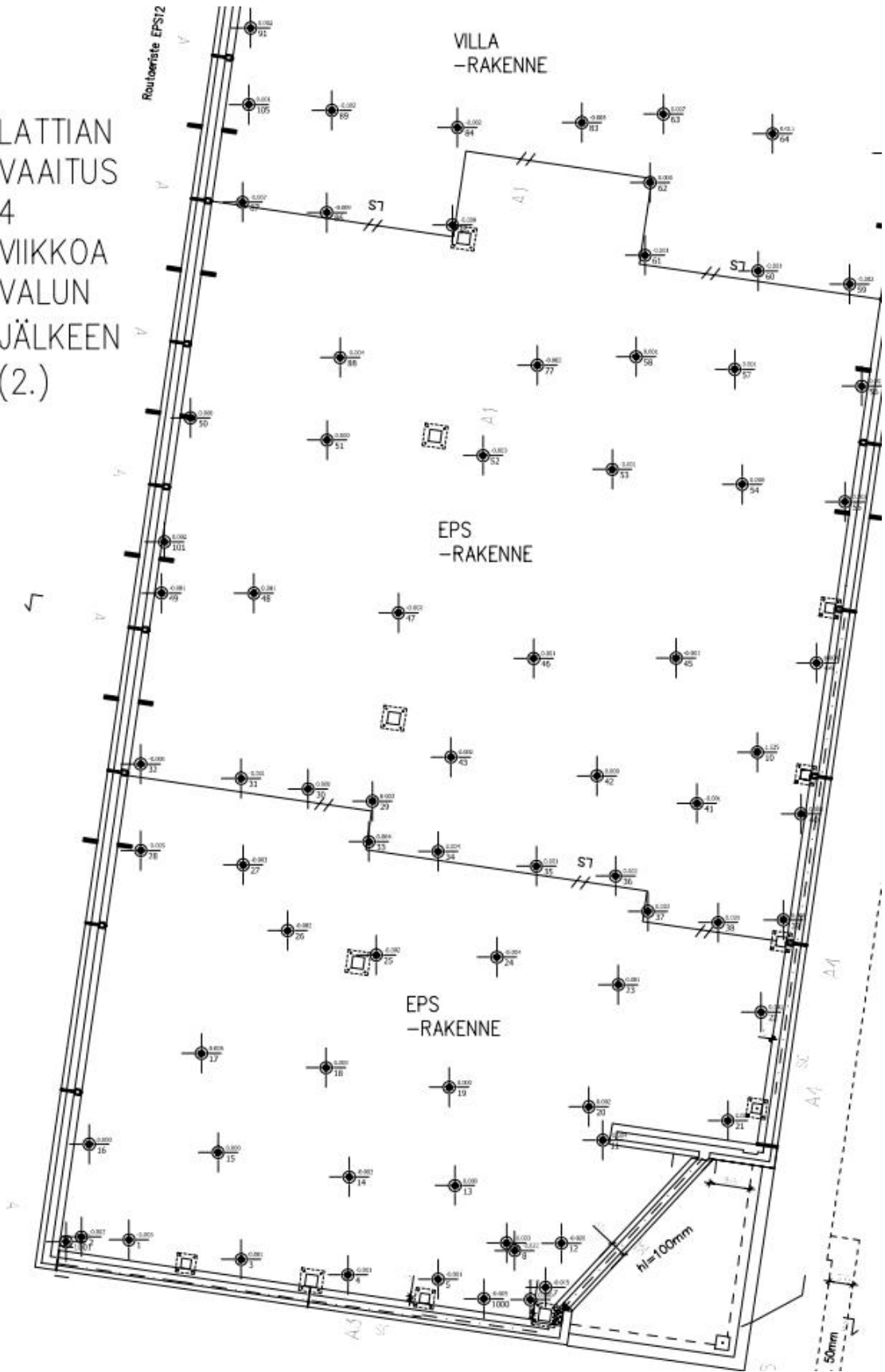




LATTIAN VAAITUS 4 VIKKOA VALUN JÄLKEEN (1.)

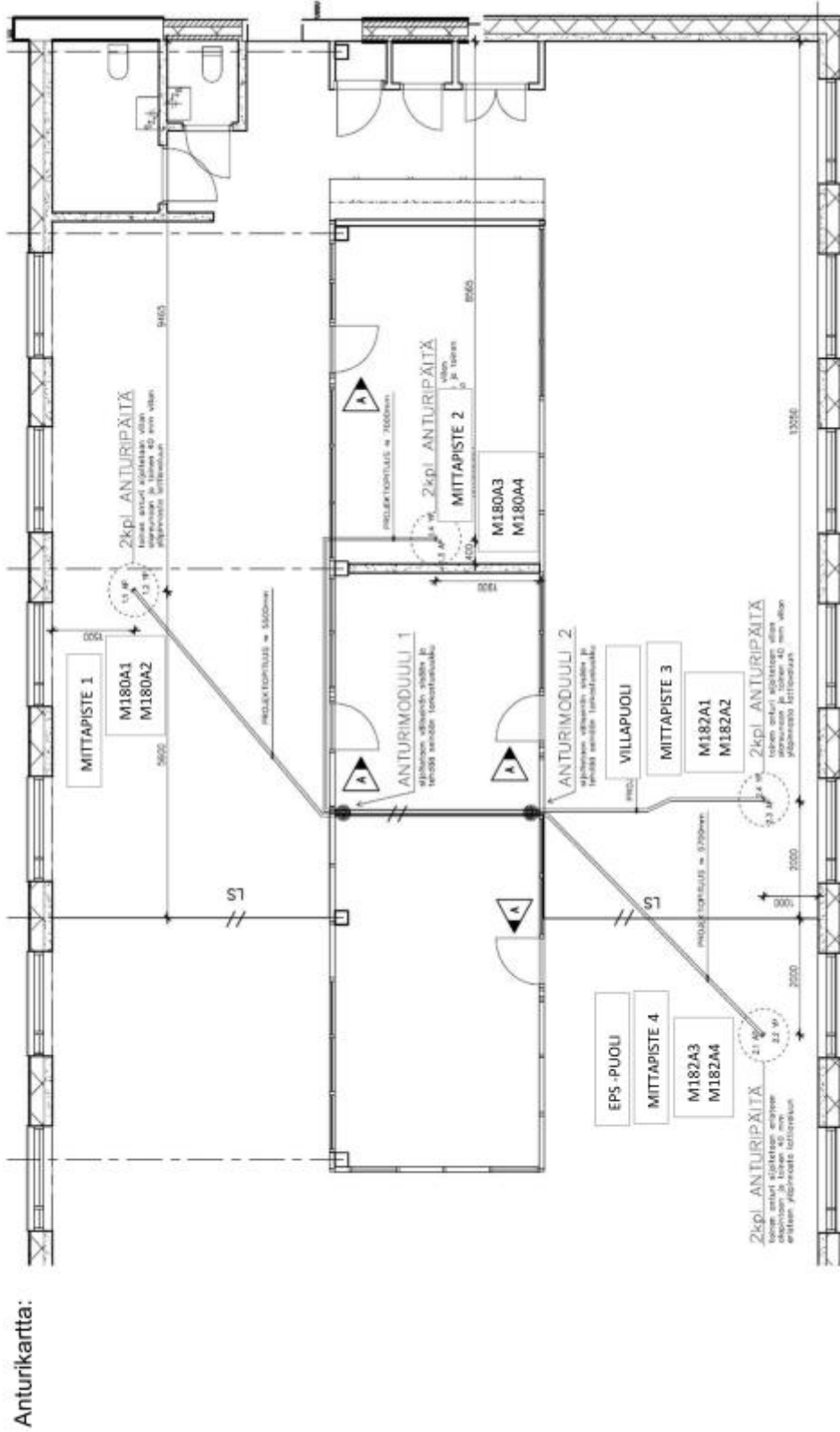


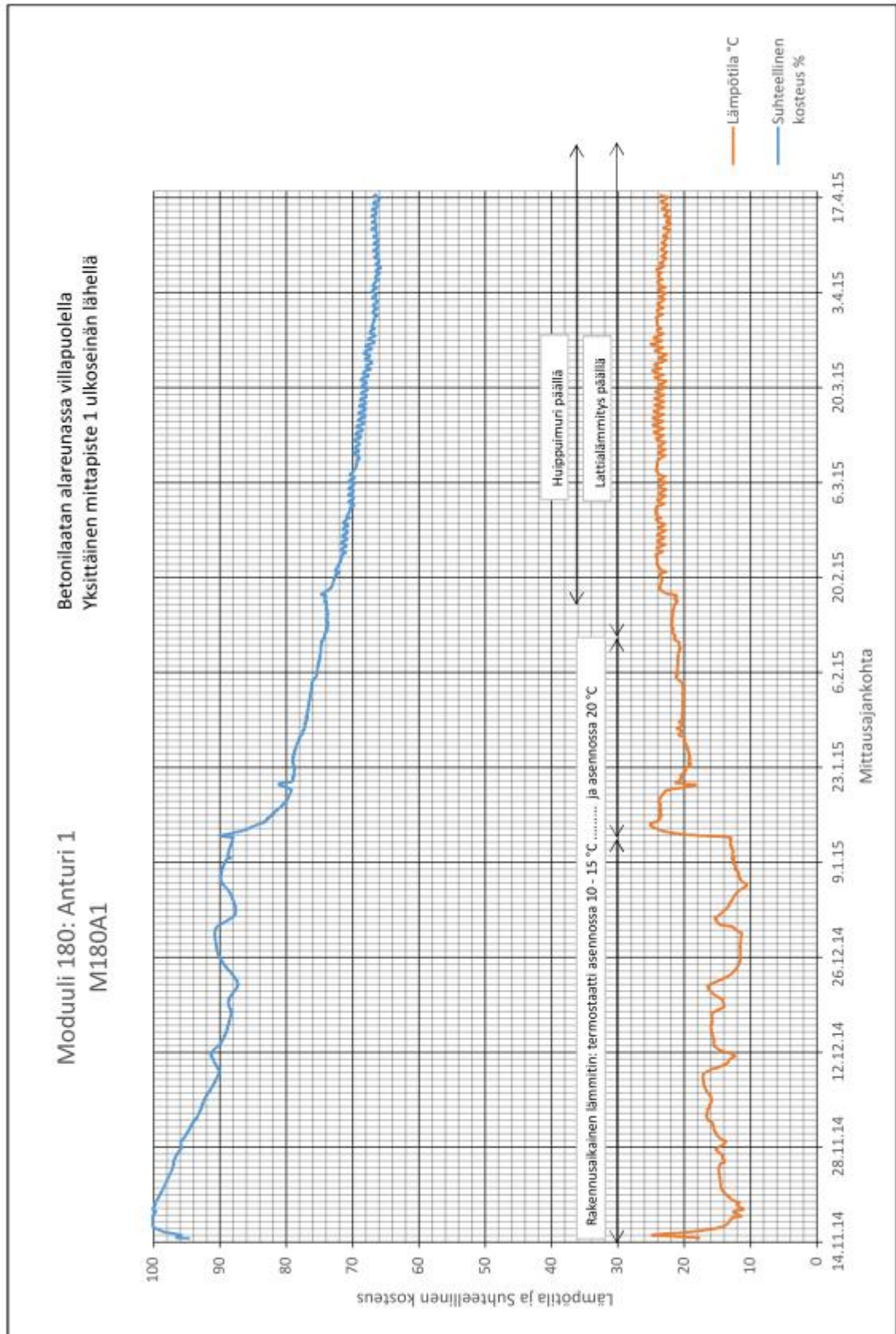
LATTIAN
VAAITUS
4
VIIKKOJA
VALUN
JÄLKEEN
(2.)

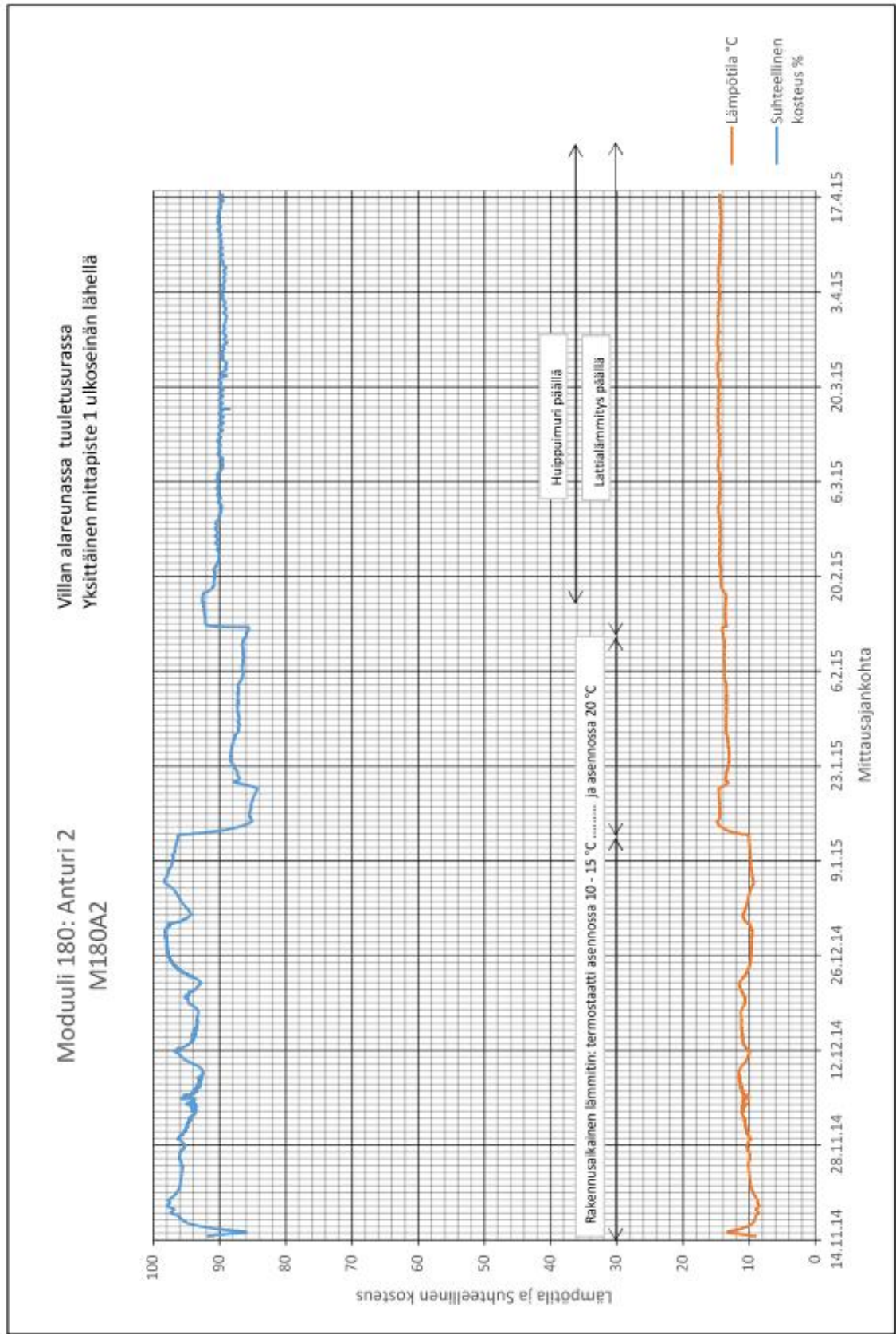


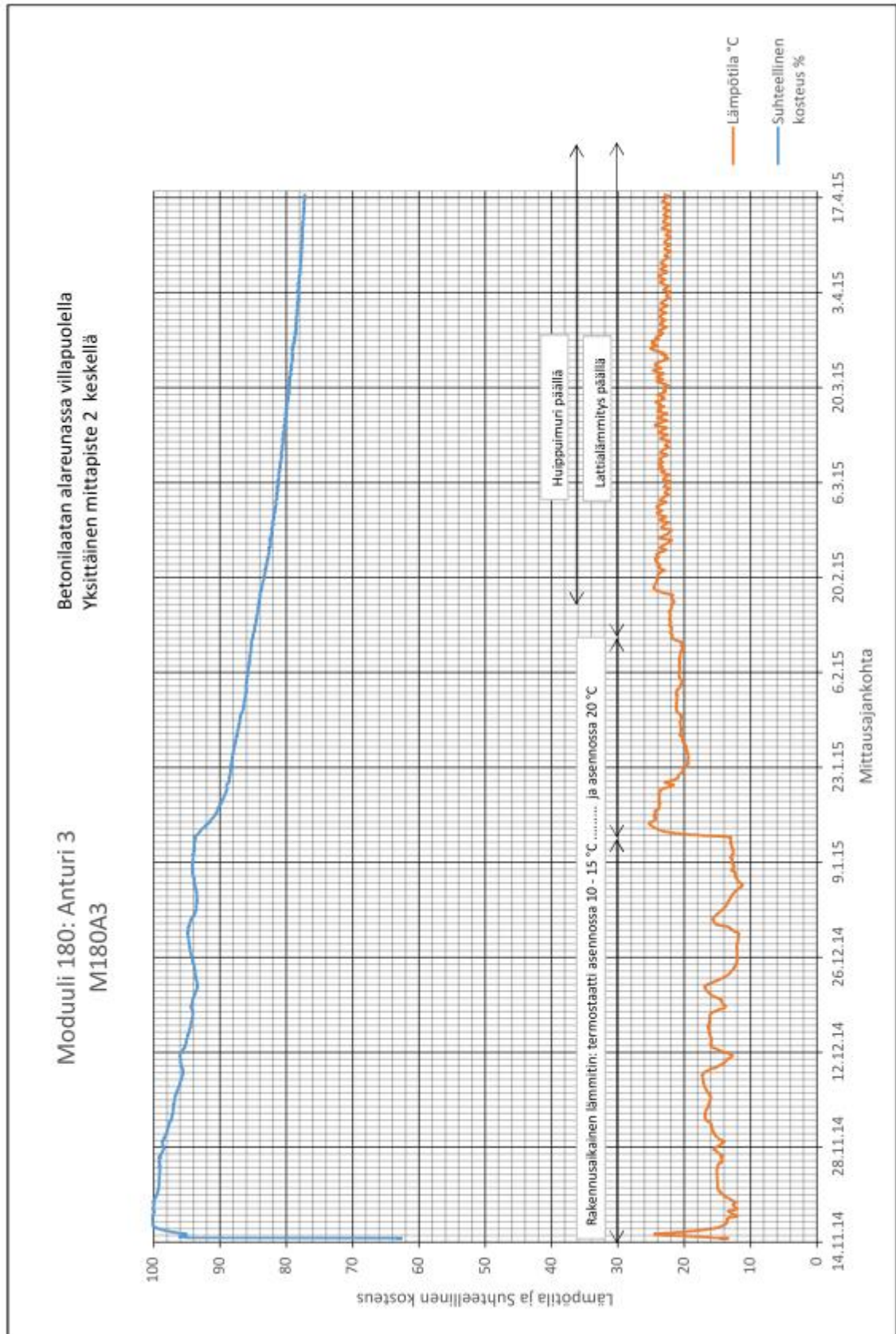
KOEKOHTTEEN LIPSANEN HQ KOSTEUS- JA LÄMPÖTILARAPORTTI

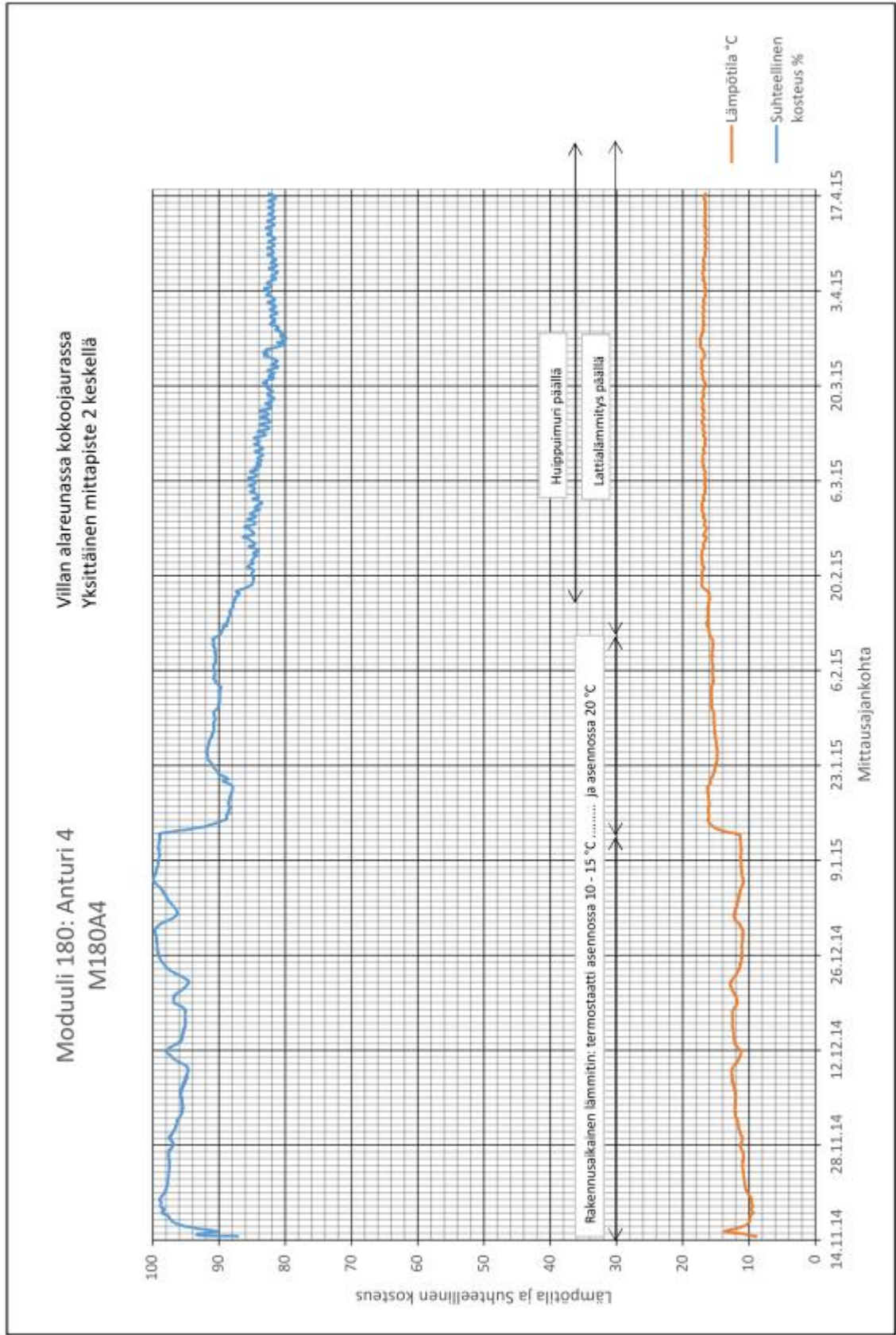
Dataa alettu keräämään: 14.11.2014 Dataa analysoidaan opinnäytetyössä: 17.4.2015 asti

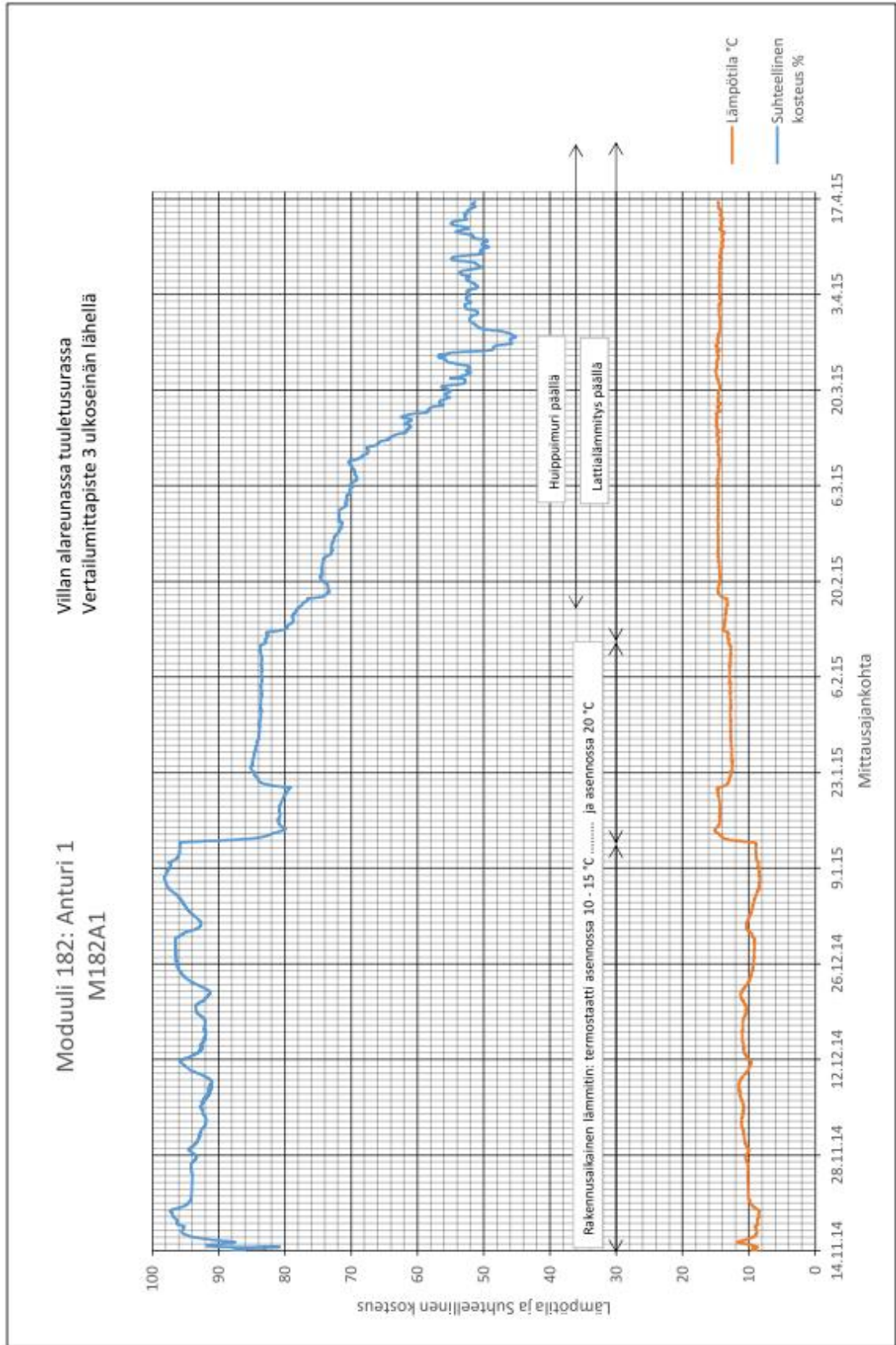


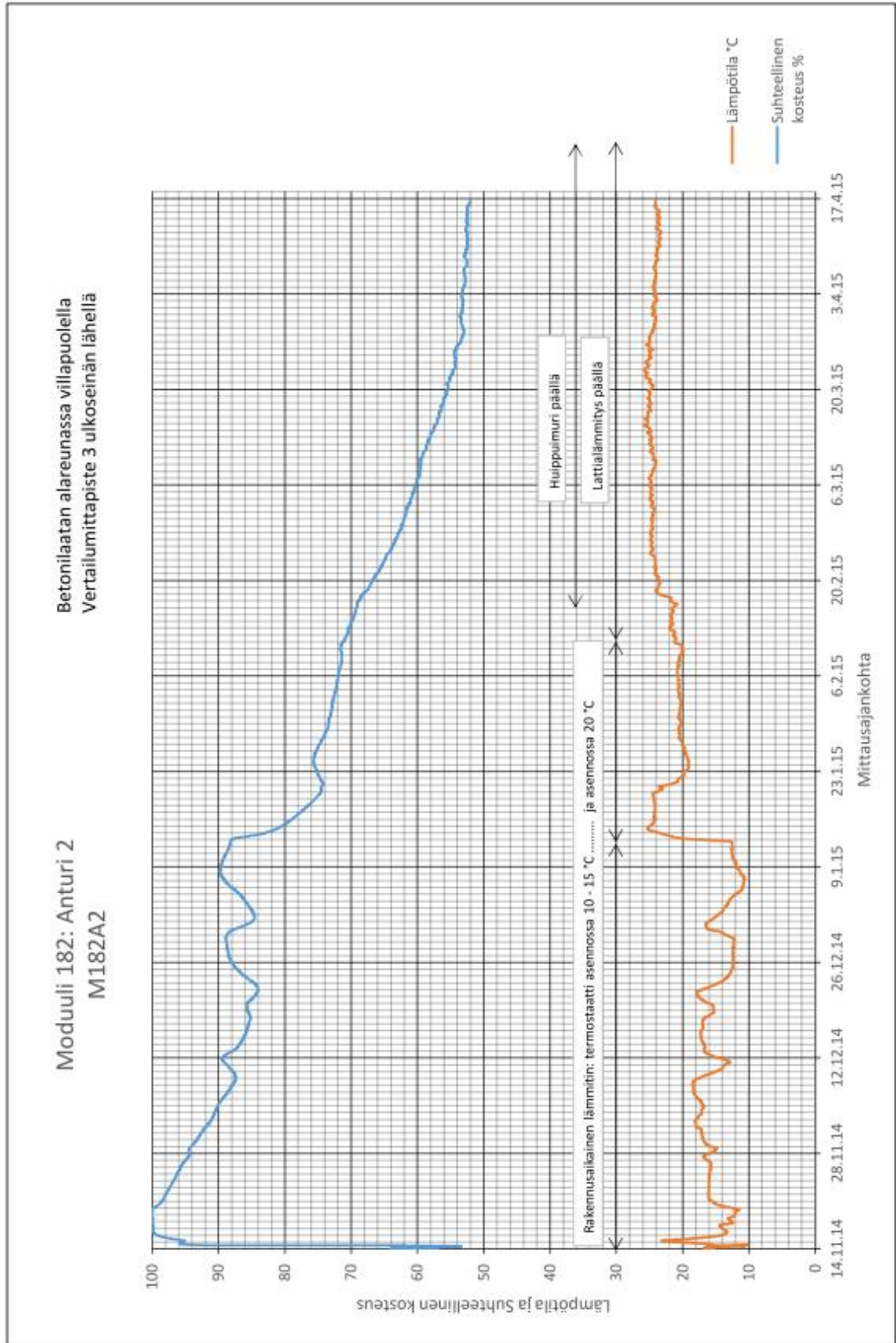


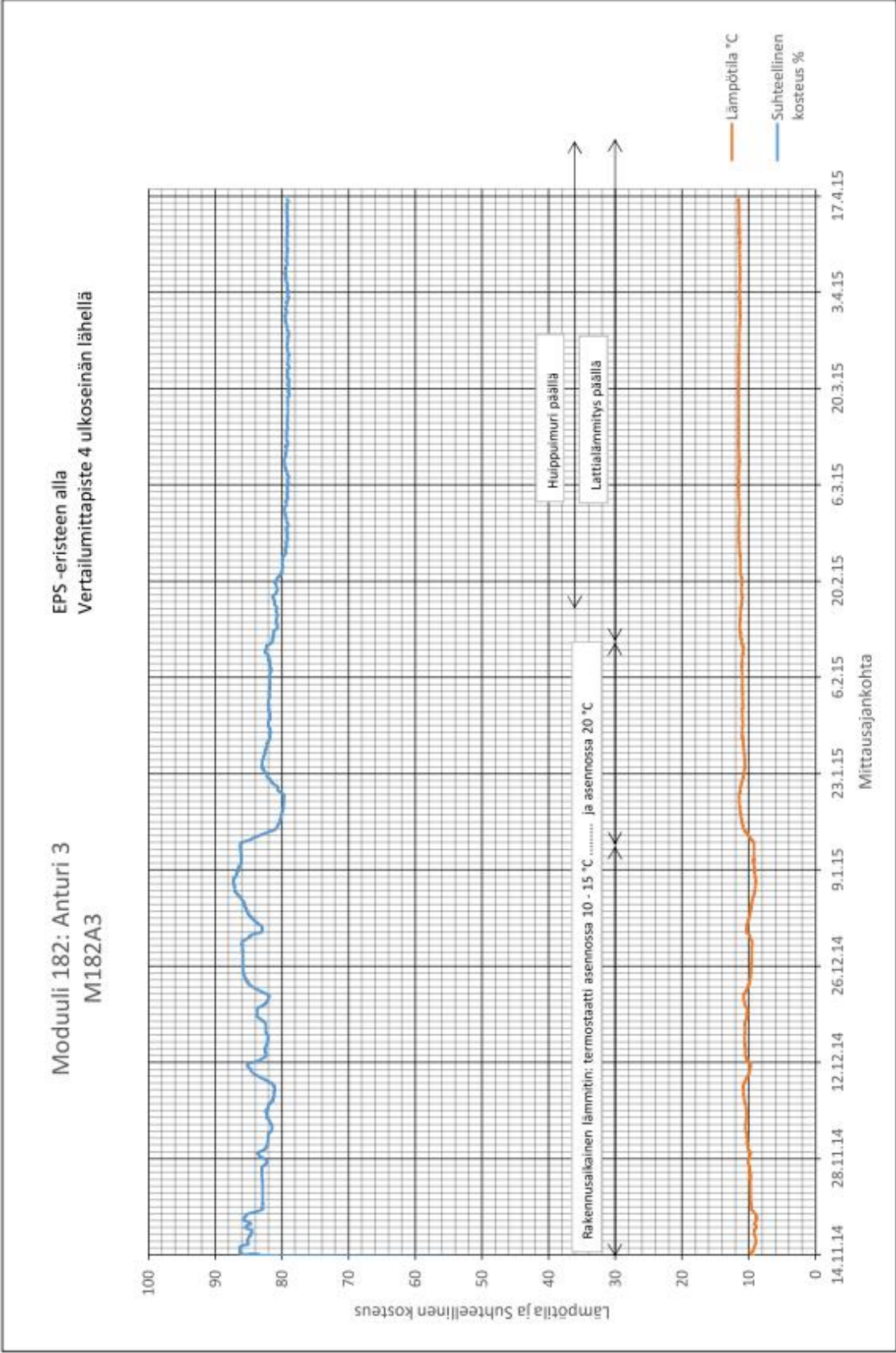


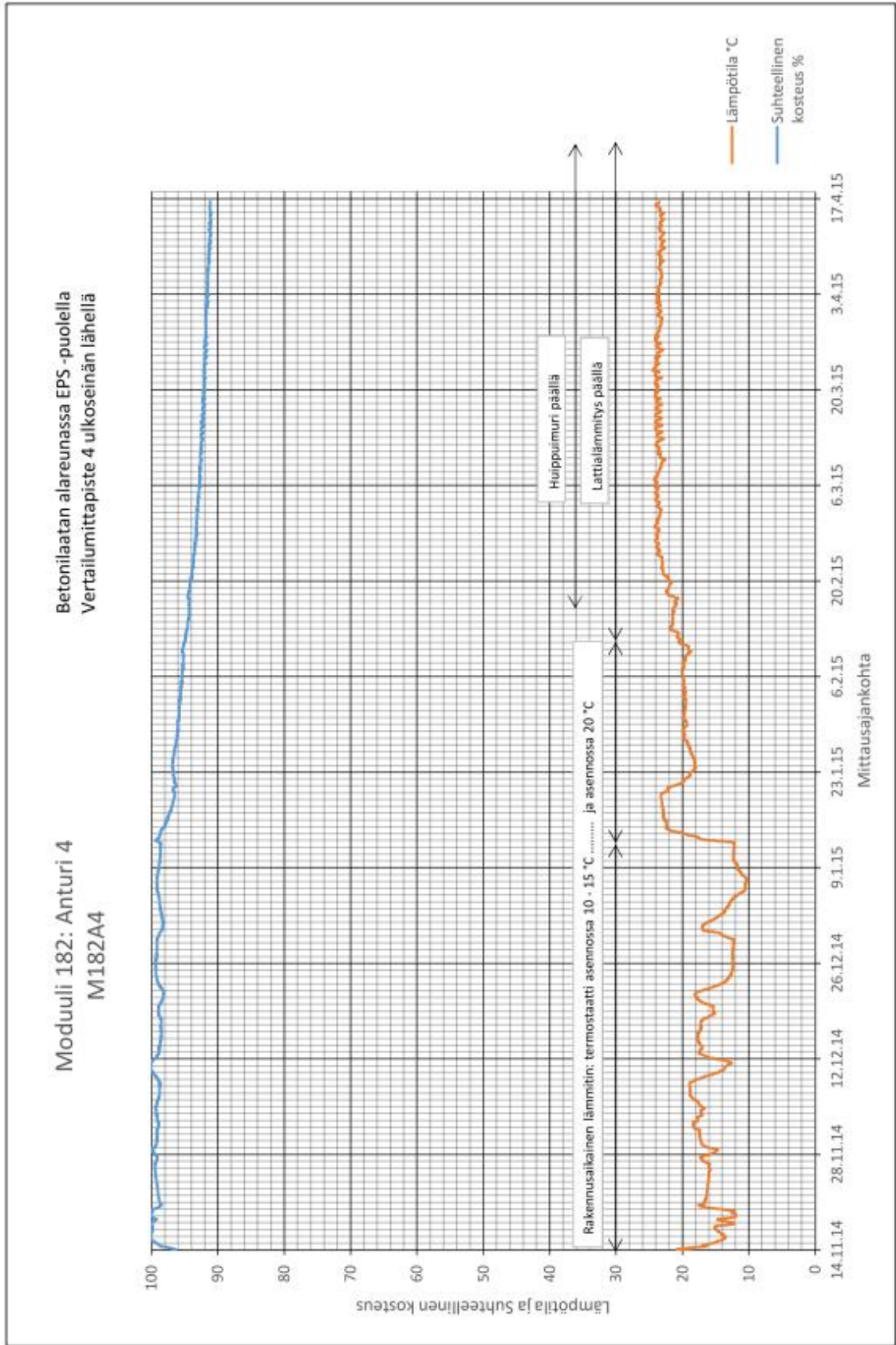












SOVELLETTU ANTURIDATA

Suhteellisen kosteuden heittelyistä ei voida päätellä varmasti mitään rakenteessa olevasta veden absoluuttisesta määrästä [g / m³], jos lämpötilankin arvot heittelevät.

Tämän vuoksi johdetaan laskukaava, jolla saadaan vakioitua lämpötila arvoon 20 °C ja muunnettua suhteellisen kosteuden arvo tätä lämpötilaa vastaavaksi.

Laskukaavan avulla lasketaan kaikki anturidata uudelleen ja piirretään kuvaajat.

Nyt, kun kuvaajien lämpötilan arvo on vakio 20 °C ja vain RH vaihtelee, voidaan kirjallisuudesta (esim RIL 255-1-2014) löytyvillä adsorptio- ja desorptiokäyrillä arvioida rakennusmateriaalissa olevaa veden määrää.

Laskukaavan johtaminen: Lähteenä RIL 255-1-2014

Merkinnät:

Alkuperäinen RH	= RH_1	[%]
Alkuperäinen lämpötila	= T_1	[°C]
Vesihöyryn osapaine	= p_v	[Pa]
Kylläisen vesihöyryn osapaine	= $p_{v,sat}$	[Pa]
Muunnettu RH, kun lämpötila on 20 °C	= RH_{T20}	[%]

Suhteellinen kosteus:
$$RH_1 = \frac{p_v}{p_{v,sat}} * 100\%$$

RIL 255-1-2014 s. 480:
$$p_{v,sat} = 610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * T_1}{237,3 + T_1}\right)}$$

Lämpötilasta ja RH:sta saadaan vesihöyryn osapaine rakenteessa:
$$p_v = \frac{RH_1 * 610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * T_1}{237,3 + T_1}\right)}}{100\%}$$

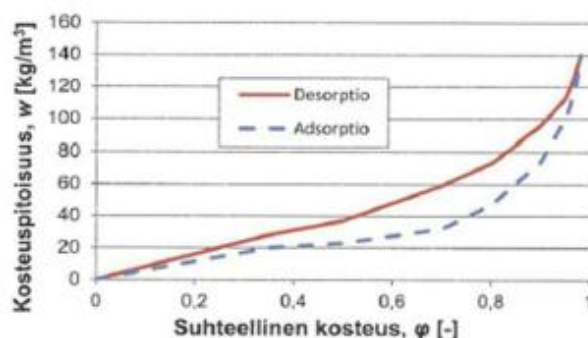
Muunnettu RH:
$$RH_{T20} = \frac{p_v}{610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * 20^\circ C}{237,3 + 20^\circ C}\right)}} * 100\%$$

Sijoitetaan p.v:
$$RH_{T20} = \frac{\frac{RH_1 * 610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * T_1}{237,3 + T_1}\right)}}{100\%}}{610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * 20^\circ C}{237,3 + 20^\circ C}\right)}} * 100\%$$

100 %:t supistuvat pois, joten saadaan lopulliseksi laskukaavaksi:
$$RH_{T20} = \frac{RH_1 * 610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * T_1}{237,3 + T_1}\right)}}{610,5 * e^{\left(\frac{17,269 * 20^\circ C}{237,3 + 20^\circ C}\right)}}$$

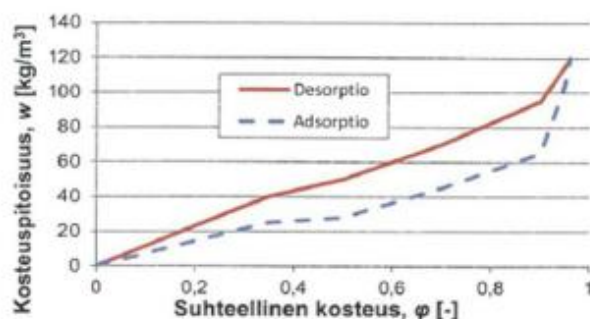
BETONIN JA KIVIVILLAN SORPTIOKÄYRÄT: RIL 255-1-2014 s. 463, 469, 470

φ [-]	W_{des} [kg/m ³]	W_{ads} [kg/m ³]
0	0	0
0,35	28	20
0,5	37	23
0,7	59	32
0,8	73	47
0,9	96	74
0,95	113	100
0,96	120	109
0,97	128	120
0,98	140	140



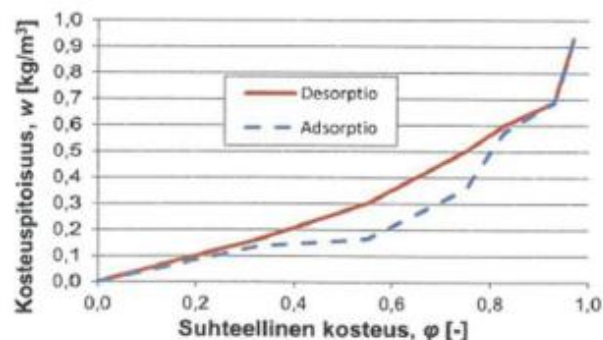
Kuva L8.1. Betonin (W/C = 0,7) tasapainokosteuskäyrät (adsorptio ja desorptio) taulukoituina /1/.

φ [-]	W_{des} [kg/m ³]	W_{ads} [kg/m ³]
0	0	0
0,35	40	25
0,5	50	28
0,7	70	45
0,9	95	65
0,95	115	105
0,96	120	120



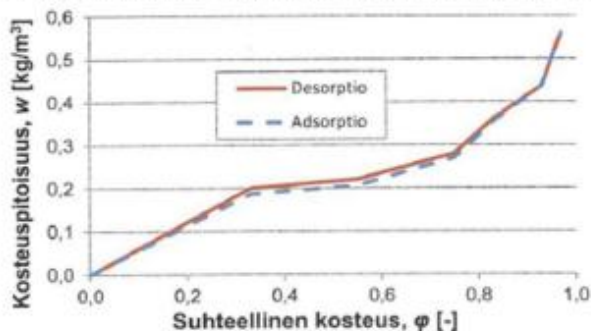
Kuva L8.2. Betonin (W/C = 0,4) tasapainokosteuskäyrät (adsorptio ja desorptio) taulukoituina /1/.

φ [-]	W_{des} [kg/m ³]	W_{ads} [kg/m ³]
0	0	0
0,33	0,16	0,14
0,55	0,30	0,16
0,75	0,50	0,36
0,83	0,60	0,58
0,93	0,69	0,69
0,97	0,93	0,93



Kuva L8.20. Kivivillan tasapainokosteuskäyrät (adsorptio ja desorptio, $\rho_0 = 35 \text{ kg/m}^3$) taulukoituina /4/.

φ [-]	W_{des} [kg/m ³]	W_{ads} [kg/m ³]
0	0	0
0,33	0,20	0,19
0,55	0,22	0,21
0,75	0,28	0,27
0,83	0,36	0,35
0,93	0,44	0,44
0,97	0,56	0,56



Kuva L8.21. Kivivillan (tuulensuojalevy, 30 mm) tasapainokosteuskäyrät (adsorptio ja desorptio, $\rho_0 = 90 \text{ kg/m}^3$) taulukoituina /4/.

