



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURI LEIKAS
KEVENNETYN
TARKASTELU
Diplomityö

PILARILAATAN

TEKNIS-TALOUDELLINEN

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekunnan tiedekuntaneuvoston
kokouksessa 4. syyskuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

LEIKAS, LAURI: Kevennetyn pilarilaatan teknis-taloudellinen tarkastelu

Diplomityö, 69 sivua, 46 liitesivua

Marraskuu 2013

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Ralf Lindberg

Avainsanat: Kevennetty pilarilaatta, kevennysrakenne, AirDeck, Bamtec, Beep-plate, BubbleDeck, Cobiax, New Nautilus, U-Boot Beton

Kevennetty pilarilaatta on paikallavalettu pilarilaatta, jonka rakennetta on kevennetty poistamalla eri menetelmin osa sen betonista ilman, että sen tehollinen korkeus muuttuu. Perinteiset kevennetyt paikallavalulaatat, kuten arinalaatat, ovat kalliita ja hankalia toteuttaa, ja siksi edulliset ja tehokkaat elementtirakenteet, kuten ontelolaatat, ovat vakiinnuttaneet asemansa markkinoilla. Tämän diplomityön tarkoitus on tutkia uudenlaisia kevennettyjä pilarilaattoja, sekä niiden mahdollisuuksia yleistyä Suomen markkinoilla teknis-taloudellisen tarkastelun kautta.

Työ voidaan laajemmin jakaa teoriaosaan ja laskennallinen osaan. Teoriaosassa esitellään olemassa olevat pilarilaatan kevennysrakennevaihtoehdot sekä niiden mitoitusperiaatteet. Laskennallisessa osassa mitoitetaan tavanomaisen toimistorakennuksen ontelolaattavälipohjalle vaihtoehtoinen rakenne kevennettynä pilarilaattana sekä lasketaan molempien vaihtoehtojen kustannukset. Esimerkkilaskelman kevennysmenetelmänä käytetään saksalaista Beeplate-järjestelmää.

Tutkimus osoittaa, että kevennetty pilarilaatta voidaan mitoittaa Eurokoodin mukaan paikallavaletun pilarilaatan periaatteiden mukaisesti käyttämällä keventäviä kuormia kevennysosien alueella. Mitoituksessa on huomioitava, että kevennysosat heikentävät laatan leikkauskestävyyttä ja taivutusjäykkyyttä. Vaikka taivutusjäykkyys heikenee, taipumat jäävät umpilaatan taipumia pienemmiksi laatan pienemmän omapainon vuoksi. Lävistysmitoitus tehdään kuten umpilaatalla, sillä laatta on umpinainen tukien kohdilla. Esimerkkilaskelmasta nähdään, että kevennetty pilarilaatta voidaan mitoittaa esitettyjen mitoitusperiaatteiden mukaisesti. Lisäksi esimerkkilaatan kustannuslaskenta osoittaa, että kevennetyn pilarilaatta on tässä tapauksessa noin kymmenen prosenttia ontelolaattarakennetta edullisempi.

Tutkimuksen johtopäätöksenä todetaan, että kevennetty pilarilaatta on kannattava vaihtoehto erityisesti suurissa paikallavalukohteissa. Tällaisia kohteita ovat muun muassa laatat, joissa rakennekorkeus on rajallinen, laatan muoto on monimutkainen tai pilarijako vaihtelee. Lisäksi jännevälien olisi oltava likimain yhtä suuria molempiin suuntiin ja pituudeltaan 12–16 metriä. Vaikka työssä esitettyssä kustannuslaskentaesimerkissä kevennetty pilarilaatta on ontelolaattavälipohjaa edullisempi, sen todelliset työmenekit sekä kustannukset voidaan osoittaa vasta yhden tai useamman pilottikohteen avulla. Jos kevennetty pilarilaatta todettaisiin toimivaksi myös Suomessa, olisi sille suotavaa tehdä jatkossa lisätutkimuksia, kuten kuormitus- ja palokokeita.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

LEIKAS; LAURI: Technical And Economical Consideration of Voided Biaxial Flat Slab

Master of Science Thesis, 69 pages, 46 Appendix pages

November 2013

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Ralf Lindberg

Keywords: Voided biaxial slab, void, flat slab, AirDeck, Bamtec, Beeplate, BubbleDeck, Cobiax, New Nautilus, U-Boot Beton

A voided flat slab is a cast in-situ slab that is lightened by reducing some of its concrete without changing the effective depth of the slab. Traditional lightened slabs, such as two-way joist slabs, are expensive and complicated to erect, therefore cheap and efficient precast structures, such as hollow-core slabs, have established their position on the market. This Master's thesis has been prepared based on technical and economical consideration, in order to research this new type of voided slab and its potential within the Finnish market.

The research can be divided into theoretical and computational parts. The existing ways to lighten flat slabs, as well as the principles of design, are presented in the theoretical part. In the computational part the floor system of a conventional office building is designed using two alternative floor types, a hollow-core slab type and a voided slab type. The costs of both options are calculated and compared. A German void structure called Beeplate[®] is presented in the example calculation.

Based on the research it is stated that the voided slab can be designed with Eurocode using the same principles as with solid slabs, and using lightening loads in the area where voids exist. It has to be taken into account in the design that the voids reduce shear capacity and flexural stiffness of the slab. Although the flexural stiffness decreases, deflections are smaller due to lower self-weight of the slab. Punching is calculated as with a solid slab because the voided slab is solid in support areas. The example calculation shows that the voided slab can be calculated in accordance with the principles presented in the study. Also the cost estimation shows that the costs of the voided slab in this case are 10 per cent lower than the costs of the hollow-core structure.

As a conclusion of the study it is stated that the voided slab is cost effective especially in large-scale projects where cast in-situ concrete is used. Such applications are slabs with high structural depth, complex shape or asymmetric positioning of columns and so on. Also the spans should be equal in both directions and from 12 to 16 meters in length. Although in the cost estimation example the voided slab is more economical than the hollow-core slab, the actual labour input and the costs can be found out only by one or more pilot projects. If the voided slab is successfully adopted in Finland it would be desirable to do further research, such as load and fire resistance tests.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty osana Tampereen teknillisen yliopiston diplomi-insinöörin tutkintoa. Diplomityön tilasi Rakennusteollisuus Ry, jota edusti Seppo Petrow. Ensisijaisena ohjaajana työssä toimi Ramboll Finlandin Tapio Aho, joka myös järjesti työn aiheen, sekä toisena ohjaajana Casper Ålander Celsa Steel Sevicestä. Diplomityön tarkasti professori Ralf Lindberg Tampereen teknillisestä yliopistosta. Rahoitus järjestyi yhdessä TTY:n Tukisäätiön lahjoittamalla stipendillä sekä Rakennusteollisuus Ry:n maksamalla palkalla. Työ tehtiin Ramboll Finlandin Espoon toimistolla ja sen tarjoamilla ohjelmistoilla.

Työn kulkuun vaikuttivat omalta osaltaan myös muut samassa ohjausryhmässä olleet henkilöt, sillä työn rinnalla tehtiin kaksi muuta pilarilaattoihin liittyvää diplomityötä. Heitä olivat diplomityöntekijät Mikko Mäntyranta ja Tuomas Toriseva, Pentti Lumme Rudus Oy:stä sekä Janne Helander Celsa Steel Servicestä. Ohjausryhmän kanssa kokoonnuimme noin kuukauden välein koko kevään ajan. Lisäksi tärkeitä neuvoja mitoitushjelman käyttöön sain Merja Kyttälältä sekä kustannuslaskentaan Pasi Kuivasniemeltä.

Haluaisin kiittää Tapio Ahoa työn järjestämisestä ja ohjaamisesta sekä Ralf Lindbergiä työn tarkastamisesta ja häneltä saaduista opeista. Kiitos kuuluu myös vanhemmilleni, sisaruksilleni ja ystäväilleni – ilman heidän tukeaan en olisi päässyt urallani näin pitkälle.

Espoossa 19.9.2013

Lauri Leikas

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	1
1.2	Tutkimuksen rajaukset.....	2
2	Yleistä.....	3
2.1	Perinteiset kevennetyt laatat.....	3
2.1.1	Betonilaatan keventämisen perusteet.....	4
2.1.2	Kevennetyt laatat Suomessa.....	5
2.1.3	Perinteisten kevennettyjen laattojen rajoitteet.....	6
2.2	Uudenlaiset kevennetyt pilarilaatat	6
2.2.1	Toimintaperiaate	7
2.2.2	Saavutettavat edut.....	8
2.2.3	Ongelmat	8
3	BubbleDeck	10
3.1	Rakenne.....	10
3.1.1	Paikallavalulaatta.....	11
3.1.2	Kuorielementit ja umpinaiset elementit	13
3.1.3	Kuorielementtien asentaminen	14
3.2	Mahdolliset laatan jännevälit ja paksuudet	15
3.3	BubbleDeck-laatalle tehdyt kokeet.....	16
3.3.1	Taivutusjäykkyys ja taipuma.....	16
3.3.2	Leikkaus	17
3.3.3	Lävistys	17
3.4	Suunnittelu	18
3.5	Järjestelmän edut	19
4	Beeplate	21
4.1	Laattatyypit ja mahdolliset jännevälit.....	21
4.2	Suosittelvat raudoitteet.....	22
4.2.1	Bamtec-mattoraudoite.....	22
4.2.2	Z-leikkausteräket.....	23
4.3	Suunnittelu	23
4.4	Asentaminen.....	24
4.5	Järjestelmän edut	26
5	Muut kevennysmenetelmät.....	27
5.1	AirDeck.....	27
5.1.1	Kupit ja kuorielementit	28
5.1.2	Suunnittelu	29
5.1.3	Menetelmän edut ja ominaisuudet	29
5.2	Cobiax	30
5.2.1	Suunnittelu	30
5.2.2	Paikallavalulaatan asennus.....	31

5.3	New Nautilus ja U-Boot Beton	32
5.3.1	Rakenteet.....	33
5.3.2	Suunnittelu	34
5.3.3	Asennus.....	34
6	Beeplate-laatan mitoitus	36
6.1	Voimasuureiden laskenta.....	36
6.1.1	Rakenneluokka ja betonin lujuus.....	36
6.1.2	Laatan paksuuden valinta.....	37
6.1.3	Kuormat, kuormakaaviot ja kuormayhdistelmät	37
6.2	Taivutus	38
6.3	Leikkaus.....	39
6.3.1	Beeplate-laatan leikkauskestävyyden yläraja.....	39
6.3.2	Mitoitus leikkaukselle leikkausraudoittamattomana	40
6.3.3	Leikkausraudoitteiden mitoitus	41
6.4	Lävistys.....	43
6.5	Laatan reunan teräkset	44
6.6	Taipuman rajoittaminen.....	45
6.7	Halkeilun rajoittaminen	46
6.8	Palonkesto.....	49
7	Esimerkkilaatan mitoitus	51
7.1	Lähtötiedot laatan suunnittelulle	51
7.2	Laatan mitoitusjärjestelyt.....	52
7.3	Laskennan tulokset	53
8	Määrä- ja kustannuslaskenta.....	55
8.1	Beeplate-laatan määrälaskenta	55
8.1.1	Kevennysosien ja leikkausterästen kappalemäärälaskenta	55
8.1.2	Betonin kuutiomäärälaskenta	56
8.1.3	Terästen kilomäärälaskenta.....	56
8.2	Beeplate-laatan kustannuslaskenta	57
8.2.1	Betonin kustannukset.....	57
8.2.2	Kevennyskennojen kustannukset.....	58
8.2.3	Teräsmäärän kustannukset	58
8.2.4	Muottien kustannukset.....	58
8.2.5	Muut kustannukset.....	59
8.3	Ontelolaatan määrä- ja kustannuslaskenta	59
8.3.1	Määrälaskenta.....	59
8.3.2	Kustannusten laskenta.....	60
8.3.3	Ontelolaattavälipohjan kokonaiskustannukset	61
8.4	Kustannusten keskinäinen vertailu	61
9	Johtopäätökset.....	63
	Lähteet.....	65
	Liite 1: Esimerkkikohteen tasokuva	70

Liite 2: Beeplate-laatan tasokuva.....	71
Liite 3: Mathcad-laskentapohja	72
Liite 4: FEM-Design-laskentatulokset	90
Liite 5: Beeplate-laatan kustannuslaskenta	111
Liite 6: Ontelolaattavälipohjan kustannuslaskenta	113

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

FEM-laskenta	Elementtimenetelmään perustuva laskenta
Kenno	Beeplate-laatan pyöreä, paljumainen, kierrätysmuovista valmistettu kevennysosa, joka ylösalaisin asennettuna muodostaa suuren ilmataskun massiivilaatan sisään.
Kupla	Kuplat ovat suuria, pallonmuotoisia, kierrätetystä muovista valmistettuja teräsbetonilaatan kevennysrakenteita, jotka laatan sisään valettuina voivat keventää laatan painoa enimmillään 35 %.
Mattorautoite	Betonirakenteen määrämittaiset raudoitteet, jotka toimitetaan työmaalle matoksi rullattuina.
Muunnettu laatan paksuus	Palomitoituksessa käytettävä laskennallinen laattarakenteen paksuus, joka ottaa huomioon muutokset poikkileikkauksessa.
Siderautoite	Ansasmainen, harjateräksistä hitsattu raudoiteosa, joka sitoo BubbleDeck-laatan ylä- ja alapinnan raudoitteet toisiinsa toimien samalla laatan leikkausteräksinä.
Z-leikkausteräs	Beeplate-laatan koukkumainen leikkausteräs, joka sitoo kennojen välissä ylä- ja alapinnan teräkset yhteen
α_{cw}	Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät
α_e	Suhde E_s/E_{cm}
γ_C	Betonin osavarmuusluku
γ_{el}	Kimmoisen taipuman osavarmuusluku Beeplate-laatalle
γ_S	Teräksen osavarmuusluku
ϵ_{sm}	Keskimääräinen raudoituksessa vaikuttava venymä kyseisen kuormayhdistelmän vallitessa
ϵ_{cm}	Keskimääräinen betonin venymä halkeamien välillä
ν_1	Leikkausvoiman vaikutuksesta halkeilleen betonin lujuuden pienennyskerroin
σ_s	Raudoituksen sallitun suurimman jännityksen itseisarvo välittömästi halkeaman muodostumisen jälkeen
A_c	Betonin poikkileikkausala
A_{ct}	Betonipoikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala juuri ennen ensimmäisen halkeaman muodostumista
$A_{s,min}$	Raudoituksen vähimmäisala vetoalueella
b_w	Kennojen välisen uuman kapeimman kohdan leveys
c	Vetoraudoituksen betonipeite
d	Poikkileikkauksen tehollinen korkeus

d_H	Kennon halkaisija
E_{cm}	Betonin sekanttimoduuli
f_{cd}	Betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
f_{ck}	Betonin puristuslujuuden ominaisarvo
$f_{ct,eff}$	betonin vetolujuuden keskiarvo ajankohtana, jolloin halkeamien voidaan aikaisintaan odottaa muodostuvan
f_{ctm}	Betonin keskimääräinen vetolujuus
f_{el}	Kimmainen taipuma
f_{yd}	Betoniteräksen myötölujuuden mitoitusarvo
f_{yk}	Betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
h	Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus
k	Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon erisuuruisten toisensa tasapainossa pitävien jännitysten suuruus
k_1	Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon tankojen tartuntaominaisuudet
k_2	Kerroin, jonka avulla otetaan huomioon venymäjakauma
k_t	Kerroin, joka riippuu kuorman vaikutusajasta
kk	Tankojen jakoväli
$s_{r,max}$	Suurin halkeamaväli
$V_{Rd,c}$	Leikkausraudoittamattoman rakenneosan leikkauskestävyyden mitoitusarvo
$V_{Rd,max}$	Leikkauskestävyyden yläraja, joka perustuu puristumurtumiseen
$V_{Rd,s}$	Leikkausraudoituksen myötäämiseen perustuva leikkauskestävyyden mitoitusarvo
x	Neutraaliakselin etäisyys puristetusta reunasta
z	Poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarsi

1 JOHDANTO

Suomessa on vallinnut tapa rakentaa kerrostaloja ja kauppakeskuksia elementeistä ja paikallavalurakentaminen on yleensä jäänyt vain erityiskohteisiin. Pilarirunkoiset rakennukset on usein toteutettu leukapalkeilla ja ontelolaatoilla, jotka esijännitettynä mahdollistavat suurten jännevälien käytön rakenteissa. Ontelolaatta on kevyt massiiviseen betonilaattaan verrattuna, joten se on ollut helppo ja edullinen vaihtoehto kohteen välipohjarakenteeksi. Ontelolaatat voivat kuitenkin siirtää kuormia vain yhteen suuntaan ja ne vaativat järeitä palkki- tai seinärakenteita.

Pilarilaattarunko säästää betonia ja on avara, sillä betonia ei kulu seinärakenteisiin eikä erillisiä palkkeja tarvita. Lisäksi rakenne voidaan suunnitella jatkuvana, jolloin se on myös hyvin jäykkä. Pilarit on kuitenkin asennettava jännittämättömässä rakenteessa tiheään, sillä umpilaatta on raskas ja jänneväliden pidetessä laatan paksuus kasvaa kohtuuttomasti. Massiivisen umpilaatan keskelle jää paljon toimimatonta betonia, joka lähinnä lisää rakenteen omapainoa, joka puolestaan kasvattaa laatan paksuutta. Ongelman ratkaisuksi on kehitetty pilarilaatan kevennysmenetelmiä, jotka korvaavat laatan keskellä olevan toimimattoman betonin ilmataskuilla. Pienemmän omapainon vuoksi laatta voidaan tehdä ohuemmaksi, jolloin tarvittavan betonin määrä voi vähentyä yhteensä jopa 50 %. Toisin kuin ontelolaatta kevennetty pilarilaatta mahdollistaa suuret jännevälit ja kantavuuden molempiin pilarilinjojen suuntiin ilman järeitä palkkirakenteita.

Uudenlaisia kevennettyjä pilarilaattoja on toteutettu ulkomailla jo 90-luvulta alkaen, mutta niitä on tutkittu hyvin vähän. Suomessa ei ole tähän mennessä toteutettu vielä yhtään uudenlaista kevennettyä pilarilaattaa, vaikka kustannuslaskennassa menetelmä on ollut täysin kilpailukykyinen muihin vaihtoehtoihin verrattuna. Kiinnostavuudesta huolimatta uutta menetelmää on vierastettu sen verran, että kohteeseen on valittu tuttu ja perinteinen menetelmä.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Työn päätavoitteena on esitellä uudenlaiset pilarilaatan kevennysmenetelmät sekä selvittää kevennetyn pilarilaatan potentiaali Suomen markkinoilla teknis-taloudellisen tarkastelun kautta. Lähtökohtana on löytää erilaisia käyttökohteita, joissa kevennetty pilarilaatta on kustannuksiltaan ja ominaisuuksiltaan muita menetelmiä kilpailukykyisempi.

Sivutavoitteena on tuottaa kevennetyn pilarilaatan suunnitteluohjeita eurokoodin mukaan. Mahdollisesti ohjeet liitetään rinnakkaisen diplomityön tuotoksena syntyvään pilarilaatan eurokoodinmukaiseen suunnitteluohjeeseen.

1.2 Tutkimuksen rajaukset

Tässä opinnäytetyössä keskitytään tarkemmin uudenlaisiin kevennettyihin pilarilaattoihin. Työ voidaan jakaa teoriaosuuteen ja laskennalliseen osuuteen. Kirjallisuusselvityksenä toteutettu teoriaosuus voidaan jakaa kolmeen osioon, joista ensimmäisessä käydään läpi kevennettyjä laattoja yleisesti, toisessa esitellään kaikki uudenlaiset pilarilaatan kevennysmenetelmät raudoitteineen ja kolmannessa kevennetyn pilarilaatan mitoitusperiaate Eurokoodin mukaan. Mitoitusperiaatteen käsittelyssä käytetään esimerkkinä Beeplate-laatan mitoitusta.

Laskentaosuus on jaettu kahteen osioon. Ensimmäisessä osiossa esitetään vaihtoehtoinen laskelma kevennettynä pilarilaattana kohteelle, johon on suunniteltu välipohjarakenteeksi ontelolaatta. Laatta mitoitettiin FEM-Design -ohjelmistoa apuna käyttäen. Toisessa laskentaosiossa esitetään saman välipohjarakenteen kustannusarvio kevennettynä pilarilaattana sekä vertailulaskelmat ontelolaatan kustannuksille. Kevennetyn pilarilaatan määrä- ja kustannuslaskenta tehtiin taulukkolaskentana yhdessä Rudukselta, Celsa Steel Serviceltä sekä Periltä pyydettyjen määrä- ja kustannustietojen avulla. Ontelolaatan kustannukset laskettiin sekä Rakennusosien kustannuksia että Haahtela mukaan.

2 YLEISTÄ

Laatat luokitellaan joko yhteen suuntaan kantaviksi tai ristiin kantaviksi sen mukaan millainen on laatan tuentatapa ja mikä on sivujen pituuksien suhde. Yhteen suuntaan kantavissa laatoissa on merkittävää taivutusta vain yhteen suuntaan, ja niissä on kaksi likimain samansuuntaista vapaata reunaa. Ristiin kantava laatta on tuettu joko kolmelta tai neljältä sivulta, ja siinä esiintyy taivutusta kahdessa toisiaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Laatta katsotaan puhtaasti ristiin kantavaksi, jos pidemmän sivun suhde lyhyempään on enintään 2. Jos suhde on tätä isompi, ajatellaan neliönmuotoisten ristikenttien väliin syntyvän yhteen suuntaan kantava osa. (BY 210 2005)

Laattoja valmistetaan paikallavaluna tai elementeistä monin eri tavoin. Paikalla valetut laatat voivat olla reunoilta tuettuja tai pilarilaattoja, ja ne voivat olla yksiaukkoisia tai jatkuvia. Reunoilta tuetut laatat tukeutuvat seinien tai palkkien varaan, mutta pilari-laatat tukeutuvat suoraan pilareihin. Elementtilaatat kantavat normaalisti vain yhteen suuntaan ja tukeutuvat päistään palkkiin tai seinään. Lisäksi laatat voivat olla myös umpirakenteisia massiivilaattoja, kevennettyjä laattoja tai liittorakenteita.

Tässä luvussa on esitelty teräsbetonirakenteiset kevennetyt laatat jaoteltuna kahteen ryhmään. Ensin käsitellään perinteisiä kevennettyjä laattoja yleisesti ja sitten uudenlaisia kevennettyjä pilarilaattoja.

2.1 Perinteiset kevennetyt laatat

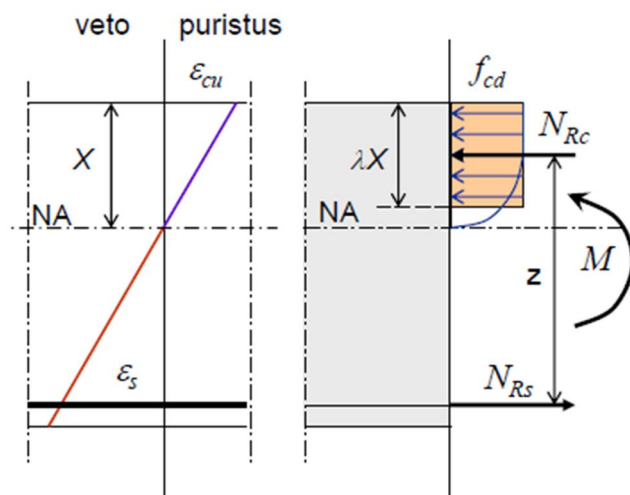
Kevennetyt laatat ovat rakenteita, joiden betonin poikkipinta-alaa on vähennetty umpilaataan verrattuna ilman, että rakenteen tehollinen korkeus pienenee. Kevennysrakenne voidaan tehdä esimerkiksi vanerista tehdyllä muotilla tai muovisella kupilla, joka asennetaan valumuottiin ennen valua. Kuppi tai muotti syrjäyttää osan laatan alapinnan betonista, jolloin rakenteen tehollinen korkeus säilyy, mutta laattarakenne kevenee vastavarpaksuiseen umpilaataan verrattuna.

Kevennetyt laatat voivat olla yhteen suuntaan tai ristiin kantavia, ja ne voidaan tehdä paikallavaluna tai elementeistä. Paikalla valetut laatat voidaan keventää vanerisilla tai muovisilla muoteilla tai kupeilla, jotka asennetaan laattamuotin päälle ennen valua. Kevennettyjen elementtilaattojen, kuten ontelolaattojen ja TT-laattojen, poikkileikkaukset ovat tarkkaan optimoituja. Vaikka nämä elementtilaatat voivat kantaa vain yhteen suuntaan, esijännittämisen ja optimoidun poikkileikkauksen vuoksi rakenteilla voidaan tehdä erittäin pitkiä jännevälejä.

2.1.1 Betonilaatan keventämisen perusteet

Betonirakenne kestää erittäin hyvin puristusta, mutta vain vähän vetoa. Tästä syystä taivutetun rakenteen betoniin on lisättävä vetoteräksiä ottamaan vastaan siinä vallitsevat vetovoimat. Yhteen suuntaan kantavissa laatoissa merkittävää taivutusta syntyy vain laatan jänteen suuntaan, jolloin laatta toimii periaatteessa samoin kuin taivutettu palkki. (BY 210 2005)

Matalan palkin ja yhteen suuntaan kantavan laatan muodonmuutosten voidaan olettaa tapahtuvan suoraviivaisesti Navierin taivutusteorian mukaisesti. Yksiaukkoisella rakenteella tasaisen kuormituksen aiheuttama momentti on suurin rakenteen kentän keskellä, jolloin rakenteen alapinnassa on vetoa ja yläpinnassa puristusta. Kuormituksen kasvaessa betonin vetolujuus ylittyy ja rakenteen betoni alkaa halkeilla laatan alapinnasta, jolloin rakenteen vetojännitykset siirtyvät kokonaan teräksille. Betonin halkeilun vuoksi myös tehokkaan puristuspinnan alareuna siirtyy ylemmäksi, kuten kuvasta 2.1 on nähtävissä. (Lindberg & Kerokoski 2010) Näin ollen halkeilleen betonirakenteen alapintaan jää betonia, johon ei aiheudu merkittävää vetoa tai puristusta taivutuksesta.



Kuva 2.1. Betonirakenteen venymä- ja jännitysjaakaumat taivutuksessa (Nykyri 2011a)

Palkin taivutusteoriaa voidaan soveltaa laatalle, sillä laattarakenteen eroaa palkista vain siten, että laattavaikutuksen vuoksi laattaan syntyy myös poikittaisia jännityksiä ja siten myös taivutusmomentteja. Poikittaisten taivutusmomenttien vuoksi kuormat jakautuvat jakorauoituksen myötä laajemmalle alueelle, ja laatan taipuma on siten pienempi kuin palkilla. (emt.) Ristiin kantavassa laatasta taivutusmomentit jakautuvat kahteen suuntaan, joten myös laatan yläpinnan betoni on puristettu ja alapinnan teräkset vedetty kahdessa toisinaan vastaan kohtisuorassa suunnassa. Laatan taivutus- ja vääntöjäykkyyden vuoksi ristiin kantavan laatan momentit ovat huomattavasti pienemmät kuin yhteen suuntaan kantavalla laatalle. Ristiin kantavan laatan rauditus lasketaan periaatteessa samoin kuin yhteen suuntaan kantavan laatan rauditus, mutta mitoitettaessa on vain huomattava, että tehollinen korkeus d on pienempi heikommassa suunnassa kuin vahvemmassa. (BY 202 1982)

Laatan keventäminen on perusteltua, sillä massiivisen laattarakenteen jännevälien kasvaessa laatan omapaino kasvaa nopeasti. Tämä johtuu siitä, että kasvanut jänneväli aiheuttaa rakenteeseen suuremman momentin. Jotta betonin puristuslujuuden mitoitusarvo f_{cd} ei ylitä, on poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivartta z kasvatettava. Tämä kasvattaa myös koko laatan rakennepaksuutta, jolloin laattarakenteen vedettyyn pintaan syntyy lisää toimimatonta betonia, mikä aiheuttaa rakenteelle ylimääräistä omapainoa ja kasvattaa momenttia entisestään.

Jotta laatta saadaan toimimaan tehokkaammin pidemmällä jänneväleillä, on rakenteen toimimatonta betonia vähennettävä ilman, että tehollinen korkeus pienenee. Rakennustekniikan käsikirjassa (1977, s. 448) sanotaan, että on taloudellisempaa käyttää kevennettyä laattaa, jos rakennetta mitoittaessa laatan paksuus kasvaa paksummaksi kuin 300 mm.

2.1.2 Kevennetyt laatat Suomessa

Paksujen umpilaattojen ongelman ratkaisuksi on kehitetty laattarakenteita, joilla toimimattoman betonin määrää voidaan vähentää. Perinteiset Suomessa käytetyt kevennetyt laatat ovat ontelolaatta, TT-laatta, HTT-laatta, ripalaatta sekä arinalaatta. Lisäksi on olemassa muitakin kevennettyjä laattatyyppejä, kuten poimulaatta ja U-laatta, mutta niiden käyttö ei ole Suomessa yleistynyt.

Ontelolaattoja on valmistettu paikallavaluna käyttämällä pahvisia tai peltisiä kevennysputkia, jotka ladottiin laattaan samansuuntaisesti ja hieman porrastetusti. Putkien väliin asennettiin hakoja siirtämään leikkausvoimia. Menetelmän avulla voitiin tehdä kevennettyjä pilarilaattoja jättämällä pilareiden väliin umpirakenteisia pilarikaistoja. (Rakennustekniikan käsikirja 1977, s. 450)

Nykyään paljon käytetty esivalmistettu ontelolaatta on yhteen suuntaan kantava, leikkausraudoittamaton ja tartuntajäntein jännitetty elementti, joka tehdään elementtitehtaalla liukuvaluna. Valun aikana rakenteen sisään tehdään koneellisesti onteloita, jotka sijaitsevat rakenteen sisällä rinnakkain likimain poikkileikkauksen keskellä. Koska ontelolaatat ovat tehdaslinjastolla tehtäviä elementtejä, voidaan ne tehdä suurilujuuksista betonista nopeastikovettuvalla sementillä ja siten hyvin lyhyellä muottikierrolla. Ontelolaattojen tyypilliset paksuudet ovat 150, 200, 265, 320, 370, 400 ja 500 mm, vakioleveys on 1200 mm ja jänneväleissä voidaan päästä enimmillään 20 metriin (elementtisuunnittelu.fi). Onteloiden, tartuntajänteiden ja lujan betonin vuoksi rakenne on hyvin kevyt ja sillä on hyvä kuormankantokyky. Kevyen elementtirakenteensa vuoksi ontelolaatta on myös nopea nostaa paikoilleen. (BY 210 2005)

Myös TT- ja HTT-laatat ovat yhteen suuntaan kantavia ja tartuntajäntein esijännitetyjä elementtejä, mutta ne koostuvat laattaosasta sekä sen alla olevista kahdesta rivasta. TT-laatan ripaleveys on palonkestoluokasta riippuen 120, 180 tai 240 mm. Elementin leveys on 2990 mm ja korkeudet ovat 300–1200 mm 100 mm välein. Suurin mahdollinen jänneväli on 25 metriä. HTT-laatta eroaa TT-laatasta siten, että sen korkeus kasvaa pituussuunnassa rakenteen keskelle muodostaen poikkisuuntaisen harjan. TT-laatasta on kehitetty myös tehokkaampia malleja, jotka ovat nimeltään STT-laatta ja TEK-laatta.

Laattojen poikkileikkauksia on optimoitu siten, että niiden kantokyvyn suhde massaansa on parempi kuin tavallisella TT-laatalla. (Elementtisuunnittelu.fi)

Ripalaatta muodostuu laatasta sekä sen alla olevista samansuuntaisista palkeista, ja se voidaan tehdä joko elementeistä tai paikallavaluna. Palkkien avulla laatan tehollinen korkeus kasvaa, mutta varsinaisen betonirakenteen paksuudet pysyvät pieninä. Purettavilla muoteilla tehdyt ripalaatat ovat yhteen suuntaan kantavia, mutta kevytbetoniharjoilla tehtävät ripalaatat voivat olla myös ristiin kantavia. (RIL125 1986, s. 336)

Arinalaatat puolestaan ovat aina ristiin kantavia rakenteita, joilla voidaan tehdä kevennettyjä pilarilaattoja. Arinalaattojen valmistus tapahtuu muovisia tai vanerisia kuppimuotteja apuna käyttäen, jolloin rakenteeseen alapintaan syntyy ristikkäisiä palkkeja, jotka näkyvät alhaaltapäin katsottaessa. Arinalaatoista voidaan käyttää myös nimityksiä kuppilaatta tai kupolilaatta. (emt.)

2.1.3 Perinteisten kevennettyjen laattojen rajoitteet

Rakenteellisesta tehokkuudestaan huolimatta perinteisillä menetelmilläkin on heikkouksensa. Ontelolaatat kantavat vain yhteen suuntaan, ne vaativat erillisiä seinä- tai palkkirakenteita, ja ne voidaan suunnitella Suomessa vain yksiaukkoisina. Niiden asentaminen vaatii monta työvaihetta, sillä paikalleen asentamisen jälkeen ontelolaatat on juotettava kiinni toisiinsa ja muihin rakenteisiin. Saumarakenteisina ne eivät myöskään tuo rakenteeseen samanlaista jäykkyyttä kuin paikalla valettu laatta. Ontelolaatat vaativat yleensä myös paljon paikallavalua sekä erillisen pintabetonilaatan, jotka hidastavat huomattavasti rakentamista. TT-laatta on lisäksi hyvin järeä ja suuren rakennekorkeuden vuoksi sitä käytetään vain korkeiden ja avarien teollisuus- ja hallirakennusten katoissa. Väli-pohjarakenteena sitä voidaan käyttää lähinnä kauppakeskuksissa ja paikoitusrakennuksissa. (Elementtisuunnittelu.fi)

Arina- ja ripalaatat ovat alareunasta avoimia ja tyypillisesti rakennekorkeudeltaan melko paksuja. Avoimen alareunan vuoksi niillä on umpilaattaa heikompi vääntöjäykkyys. Myös raudoittaminen ja muotittaminen on hankalaa, hidasta ja kallista, sillä laattojen toiminta perustuu palkkimaisiin rakenteisiin. Lisäksi ripalaatta on vain yhteen suuntaan kantava. (RIL125 1986, s. 336)

2.2 Uudenlaiset kevennetyt pilarilaatat

Viimeisen parinkymmenen vuoden aikana on ulkomailla kehitetty uudenlaisia kevennysrakenteita, jotka vastaavat ulkonäöltään ja ominaisuuksiltaan perinteistä umpinaista pilarilaattaa, mutta ne voivat olla omapainoltaan 40 % vastaavanpaksuista umpilaattaa kevyempiä. Laatat vastaavat periaatteeltaan perinteistä arinalaattaa, mutta toisin kuin arinalaatta, uudenlaisten kevennettyjen laattojen kevennysrakenteet valetaan laatan sisään. Näin ollen laatan alapinta jää tasaiseksi, ja se voidaan suunnitella ja raudoittaa massiivisen pilarilaatan periaatteiden mukaisesti.

Suomessa ei ole toteutettu vielä yhtään uudenlaista kevennettyä pilarilaattaa, mutta kahdella toisistaan selkeästi eroavalla menetelmällä on suunniteltu vaihtoehtoja välipoh-

jarakenteiksi. Nämä menetelmät ovat BubbleDeck ja Beeplate, ja niistä on tässä työssä laajemmat selvitykset. Muut tässä työssä esitellyt menetelmät ovat Airdeck, Cobiax, New Nautilus sekä U-Boot Beton.

2.2.1 Toimintaperiaate

Rakenteen toiminta perustuu menetelmästä (Airdeck[®]; Beeplate[®]; BubbleDeck[®]; Cobiax[®]; New Nautilus[®]; U-Boot Beton[®]) riippuen kennoihin, kuppeihin tai kupliin, jotka syrjäyttävät osan laatan betonista laatan kentässä. Kenno on Beeplate-laatan pyöreä, paljomainen, kierrätysmuovista valmistettu kevennysosa, joka ylösalaisin asennettuna muodostaa suuren ilmataskun massiivilaatan sisään. Kuplat sen sijaan ovat suuria, pallonmuotoisia, kierrätetystä muovista valmistettuja teräbetonilaatan kevennysrakenteita, jotka laatan sisään valettuina voivat keventää laatan painoa noin 35 %.

Laatta toimii periaatteessa samalla tavalla kuin umpinainen pilarilaatta, sillä rakenteen alapinta on kauttaaltaan raudoitettu ja betonoitu ja laatan sisäinen momenttivarsi on sama. Kevennysrakenteiden syrjäyttämän betonin vuoksi laatan omapaino kevenee 20–40 %, jolloin laatta taipuu omasta painosta vastaavanpaksuista umpilaatta vähemmän. Kevyemmän omapainon vuoksi rakenteen kuormankantokapasiteetti voi kasvaa 100 % saman paksuiseen umpilaattaan verrattuna. Vaihtoehtoisesti kevennetyllä rakenteella voidaan tehdä pidempiä jännevälejä kuin vastaavanpaksuisella umpilaatalla, tai kevennetty laatta voidaan tehdä samalla jännevälillä saman pintakuorman vaikuttaessa ohuemmaksi, jolloin laatan betonia voidaan vähentää jopa 50 %. Pienemmän omapainon johdosta myös raudoitteita tarvitaan vähemmän. Säästö teräsmäärässä voi olla 15 %.

Paikalla valettavat kevennetyt pilarilaatat valetaan kahdessa osassa. Ensimmäinen valukerta ulottuu vain kevennysrakenteiden alapintaan, ja sen tehtävänä on pitää kevennysrakenteet paikallaan, jotta ne eivät nouse toisen valukerran aikana betonin pinnalle nosteen vaikutuksesta. Tästä syystä betonin on jäähmetyttävä riittävästi ennen toista valukertaa, jolloin laatta valetaan täyteen rakennekorkeuteen. Pohjasta avoimet kennot tarttuvat valuun reunoistaan ja pysyvät siten paikallaan toisen valukerran ajan, mutta kuplat on sidottava alapinnan teräksiin erityisillä raudoitemoduuleilla. Myös kuorilaattarakenteiset kevennetyt pilarilaatat ovat kaksiosaisia, mutta kuorilaattaosa kevennysrakenteineen valetaan jo tehtaalla. Rakente raudoitetaan toimimaan yhtenäisenä työmaalla kuorilaattojen asentamisen yhteydessä ja valetaan lopuksi umpeen.

Mitoitus voidaan tehdä normaalin pilarilaatan mitoitusperiaatteilla käyttämällä laatan omapainolle pienempää arvoa. Suurimpia menetelmäkohtaisia eroja mitoituksen suhteen on lähinnä leikkauskestävyyden ja -raudoituksen laskemisessa. Menetelmästä riippumatta lävistymisleikkausvoimien vuoksi pilareiden ja muiden tukien lähelle jätetään keventämätön alue, johon tarvittaessa voidaan asentaa myös lävistymisraudoitus. Kevennetyn pilarilaatan mitoitusta on käsitelty tarkemmin luvussa 6.

2.2.2 Saavutettavat edut

Kevennetyllä pilarilaatalla saadaan pilarilaatan ja ontelolaatan edut yhdistettyä. Toisin kuin ontelolaatta, kevennetyt pilarilaatta on ristiin kantava rakenne, joka mahdollistaa siten pitkät jännevälit kahteen suuntaan ilman järeitä palkkirakenteita. Palkittomuus antaa betonilaatan alapintaan siistin ja avaran betonipinnan sekä vapauttaa talotekniikan suunnittelun, sillä vaakasuuntaisia läpivientejä ei tarvitse tehdä. Paikalla valettu kevennetyt pilarilaatta soveltuu myös hankaliin kohteisiin, kuten kellarituloihin, joihin elementtejä on hankala asentaa ja joissa rakenteelta vaaditaan suurta tiiveyttä. Menetelmät soveltuvat hyvin esimerkiksi julkisiin rakennuksiin, joissa on suuria aulatiloja ja joiden rakenteilta vaaditaan näyttävää tasaista betonipintaa. Myös pilarit voidaan sijoittaa vapaammin, toisin kuin elementtirakenteilla, ja menetelmällä voidaan toteuttaa pitkiä ulokkeita ja kaarevia muotoja. Tämä mahdollistaa monimuotoisten rakennusten suunnittelun. (BubbleDeck®)

Verrattuna normaaliin pilarilaattaan kevennetyt pilarilaatta säästää myös paljon betonia. Työmaalle kuljetettavan betonin määrä vähenee, sillä kevennysosat syrjäyttävät laatan turhaa betonia, jolloin kevyemmän omapainon vuoksi pilarit ja anturat voidaan tehdä pienemmiksi ja asettaa harvempaan. Myös seismiset ominaisuudet paranevat, sillä laatan värähtelevä massa on pienempi kuin vastaavalla paikalla valetulla umpilaatalla, mutta jäykkyys on sama. (emt.)

Keventämisellä on merkittävä vaikutus myös paikallavalurakennuksen hiilidioksidipäästöjen hillitsemisessä. Suomen sementtiteollisuuden aiheuttamat vuotuiset hiilidioksidipäästöt ovat noin miljoona tonnia, joka on vajaa 1,5 % koko Suomen vuotuisista päästöistä. Yhden sementtitonnin valmistus vapauttaa 700–800 kg hiilidioksidipäästöjä, jolloin yhden betonikuution tuottamat hiilidioksidipäästöt voivat olla lähes 300 kg. Jos umpilaatasta voidaan poistaa 35 % turhaa betonia, merkitsee se vastaavaa vähennystä myös rakenteen hiilidioksidipäästöissä. (Betoniteollisuus ry)

2.2.3 Ongelmat

Kevennetyillä rakenteilla on Suomessa kilpailijoita, joilla pystytään tekemään tehokkaasti suuria jännevälejä. Hankkeet ovat harvoin myöskään niin laajoja, että kevennetyt pilarilaatta olisi kustannustehokkaasti kannattava.

Toinen merkittävä syy on Suomen olosuhteet, jotka ovat erilaiset kuin etelämpänä. Suomen ilmasto vaihtelee suuresti vuodenaikojen mukaan, ja talvella rakennusten ulkoseiniltä vaaditaan suurta lämmöneristävyyttä, mikä suosii massiivisten ulkoseinäelementtien käyttöä. Suomi ei myöskään sijaitse maanjäristysvyöhykkeellä, mikä vaatisi rakenteilta hyviä seismisiä ominaisuuksia.

Kevennetyt pilarilaatat vaativat paljon asennustyötä, sillä useimmat niistä tehdään täysin työmaalla paikallavaluna. Kevennetyillä pilarilaatoilla saadaan merkittäviä kustannussäästöjä vain erikoiskohteissa, joissa on laajoja laattapinta-aloja sekä suuria jännevälejä molempiin laatan suuntiin. Myös talotekniikka asettaa omat haasteensa raken-

teiden suunnitteluun, sillä kevennysrakenteita ei voida asentaa esimerkiksi viemäröinnin kanssa samaan kohtaan laattaa.

Lisäksi kevennysrakenteiden saatavuus on hankalaa, sillä Suomessa ei ole kokemuksia uudenlaisten kevennettyjen pilarilaattojen rakentamisesta eikä täällä siksi myöskään valmisteta kevennysrakenteita. Jos hankkeeseen halutaan tehdä välipohjarakenteeksi kevennetty pilarilaatta, on tilaajan todennäköisesti otettava yhteyttä ulkomaalaiseen valmistajaan ja tilattava rakenteet ulkomailta. Syksyllä 2013 ainoastaan Beeplate-laamalla oli kontaktit kevennyskennojen toimittamiseksi Suomeen Celsa Steel Service Finlandin kautta.

3 BUBBLEDECK

BubbleDeck on betonilaatan kevennysjärjestelmä, jossa laattaa kevennetään betonin sisään valettavilla pallonmuotoisilla kuplilla. Kierrätetystä polyeteenistä tai polypropeenista valmistetut kuplat ovat ilmatäytteisiä, ja ne voivat syrjäyttää laatan betonia 35 %. Kuplat sidotaan tiiviiksi paketiksi ala- ja yläpinnan raudoiteverkoilla sekä niiden välisillä ansasmaisilla sideraudoitteilla, jotka toimivat myös laatan leikkausteräksinä. (BubbleDeck®)

Menetelmän on kehittänyt tanskalainen Jørgen Breuning 90-luvulla ja se on sertifioitu Tanskassa, Saksassa, Iso-Britanniassa sekä Hollannissa. BubbleDeck-laatta voidaan mitoittaa normaalin pilarilaatan periaatteiden ja standardien mukaisesti. (Lai 2010)

3.1 Rakenne

Välipohja voidaan tehdä BubbleDeck-laatalla kolmella eri tavalla: paikallavaluna, kuorilaattamaisista elementeistä tai valmiista umpinaisista elementeistä. Menetelmästä riippumatta rakenteen peruseriaate on aina sama eli laatta muodostuu kevennyskuplista, raudoitemoduulista, jonka sisällä kuplat ovat, sekä kahdessa osassa valettavasta betonilaatasta. (BubbleDeck®)

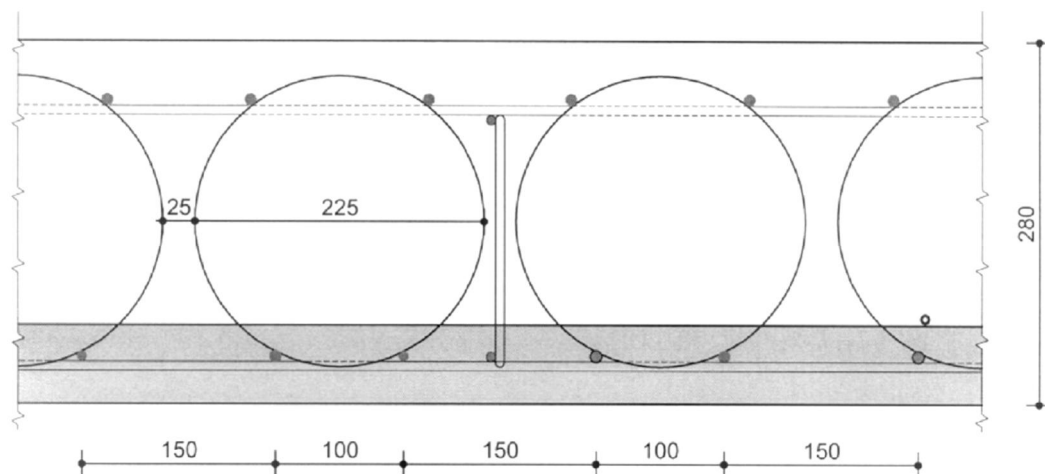
Kuplakokoja on yhteensä seitsemän, ja niiden avulla voidaan tehdä 230–600 mm paksuisia laattoja. Laatan paksuudesta riippuen kevennysvaikutus on noin 25–35 %. Kevennysprosentti on aina sitä parempi mitä suurempi kuplakoko valitaan pienimmällä mahdollisella peitepaksuudella. Kevyemmän rakenteen vuoksi laatta voidaan tehdä ohuemmaksi, jolloin 50 % pienemmällä betonimäärällä voidaan saavuttaa sama kuormankantokapasiteetti kuin umpilaatalla. (emt.)

Kuplat saadaan pysymään oikeilla paikoillaan laatussa raudoiteverkkojen avulla. Kuplat asetellaan tarkasti alapinnan raudoiteverkon tankojen sekä sideraudoitteiden väliin. Sulkemalla kuplat yläpinnan verkolla syntyy raudoitemoduuli, jota voidaan kutsua myös nimellä ”kupla-raudoitesandwich”. Raudoitemoduulin avulla voidaan valmistaa niin paikallavalulaattoja kuin elementtejä. (emt.)

Ylä- ja alapinnan raudoitteiden välisellä sideraudoitteella on kaksi merkitystä: se toimii laatan leikkausraudoituksena sekä sitoo ala- ja yläpinnan raudoitteet yhteen siten, että kuplat pysyvät tiiviisti paikoillaan. Sideraudoitteet toimivat myös nostolenkkeinä nostettaessa raudoitemoduulia tai kuorielementtiä. (emt.) Sideraudoitteiden suurin keskinäinen etäisyys saa olla enintään kaksi (2) kertaa laatan paksuus (CUR Recommendation 86 2001).

Kuvassa 3.1 on esitettyä tavallisen BubbleDeck-laatan poikkileikkaus. Kuvasta nähdään kuplan halkaisija 225 mm ja kuplien välinen pienin betonipaksuus 25 mm. Ko-

ko rakenteen pienin betonipaksuus saa olla 1/9 kuplan halkaisijasta, joten kuplakoon kasvaessa myös betonipeite kasvaa (emt.). Laatan alin osa, joka on esitetty harmaalla, valetaan ensimmäisellä valukerralla. Sen tehtävänä on sitoa kuplat raudoitemoduulin avulla laattaan, jotta toisen valukerran aiheuttama noste ei irrottaisi kuplia laatan alapinnasta. Laatan alin osa voidaan tehdä työmaalla paikallavaluna tai valamalla tehtaalla, jolloin se toimii kuorilaattana.



Kuva 3.1. Poikkileikkausesimerkki BubbleDeck-lattiasta (CUR-Recommendation 86 2001).

Kuvasta nähdään myös raudoitemoduulin rakenne eli ala- ja yläpinnan raudoite sekä niiden välinen sideraudoite. Siderakenne näyttää ansasmaiselta palkilta, joka hitsataan kiinni verkkoihin. Verkkojen terästen k-jako vaihtelee kuvan rakenteella vuorotellen 100 ja 150 mm välillä. Muilla rakenteilla mitat ovat erilaiset, sillä terästen väliset etäisyydet määräytyvät kuplien halkaisijan mukaan. Etäisyydet on valittu siten, että ne tukevat kuplalinjat oikeaan korkoon ja määräävät kuplalinjojen keskinäisen etäisyyden. Näin ollen kuplat pysyvät rakenteessa varmasti oikeassa asemassa niin pysty kuin vaakasuunnassa.

3.1.1 Paikallavalulaatta

BubbleDeck-rakenne voidaan tehdä paikallavaluna valamalla laatta kahdessa osassa. Toimittajan asennusoppaassa Site Erection & Installation Manual. Type A – Reinforcement Modules (2008) on tarkka selostus siitä, kuinka kevennetty paikallavalulaatta asennetaan. Laatta laudoitetaan ja tuetaan kuten normaalissa paikallavalussa, mutta rakenne raudoitetaan raudoitemoduulin ja lisäterästen avulla. Kevennysrakenteet toimitetaan raudoitemoduuleina rekka-auton lavalla työmaalle ja nostetaan alapinnan korkeupukkien päälle tarkasti oikeille paikoilleen. Nostaminen on tehtävä sideraudoitteista nostamalla yhteensä kahdeksalla nostokoukulla, jotka kiinnitetään viidennesosan pään moduulin päädystä.

Paikallavalulaatta raudoitetaan jatkuvaksi moduuleihin lisättävien irtoterästen avulla valmistajan tarjoaman raudoitus suunnitelman mukaisesti. Raudoitemoduulit on asennet-

tava oikein päin ja oikeassa järjestyksessä siten, että alapinnan irtoteräkset voidaan liu'uttaa kokonaan asennetun moduulin sisään ennen toisen moduulin lisäämistä edellisen viereen. Kun uusi moduuli on asennettu, voidaan se yhdistää edelliseen vetämällä irtotangot moduulien väliin. Samalla tavalla raudoitetaan myös palkkikaistat ja aukkojen reunojen lisäteräkset. Raudoitmoduuli on esitetty kuvassa 3.2 (emt.)



Kuva 3.2. Raudoitmoduulit pinottuina päällekkäin (Loftorka).

Raudoitmoduulien ja niiden alapinnan irtoterästen asentamisen jälkeen asennetaan laatan reunateräkset työntämällä lenkkejä kuplarivien väliin sekä pilarien kohdalle lävis-
tymisraudoitteet raudoitussuunnitelman mukaisesti. Seuraavaksi asennetaan yläpinnan tarvittavat lisäteräkset irtotangoilla tai tarkoitukseen tehdyillä verkkoraudoitteilla. Niitä asennettaessa on huolehdittava siitä, että tangot sijoittuvat lomittain raudoitmoduulin terästen kanssa ja että ne ovat kuplalinjojen välissä. Näin ollen betonipeite säilyy riittävä-
vänä ja yläpinnan vetoterästen voimat siirtyvät suoraan kuplien väliseen betoniin. Kun laatta on raudoitettu, asennetaan vielä reunamuotit. 18 mm vanerista tehtävät reuna-
muotit voidaan kiinnittää alareunasta pohjamuottiin ja yläreunasta yläpinnan raudoit-
verkkoon. Tämän jälkeen muotti- ja raudoitustyö on valmis, mutta ennen kuin laatta voidaan valaa, on BubbleDeck-järjestelmän nimeämän edustajan tehtävä laatalle raudoi-
tustarkastus. (emt.)

Ensimmäinen valukerros tehdään käyttämällä itsetiivistyvää betonia. Ensimmäisellä valukerralla valetaan 70–100 mm paksuinen betonikerros, ja kun betoni on kovettunut tarpeeksi, voidaan laatta betonoida loppuun normaalin betonointikäytännön mukaan. Valun aikana on vältettävä betonimassan kasaantumista valumuotille ja tiivistykseen on käytettävä tärytinsauvaa. Tärytyksessä on varottava osumasta raudoitteeseen, kupliin ja

muottiin, että betoni ei erotu ja karkea kiviaines painu laatan pohjalle. Lopuksi betonivalun yläpinta tasoitetaan tai hierretään oikeaan korkoon valmiiksi betonipinnaksi. (emt.)

Rakennesuunnittelun aikana varmistetaan minimiaika, joka täytyy odottaa ennen kuin muotit voidaan vaihtaa jälkituentaan. Viranomaisohjeiden mukaan muottien purkamislujuuden on aina oltava vähintään 60 % nimellislujuudesta (BY 201 2004, s. 349). Myös BubbleDeck suosittaa käytettäväksi samaa purkamislujuuden arvoa, ja ohjeen mukaan tämä lujuus saavutetaan betonin laadusta ja vallitsevista olosuhteista riippuen 3–5 vuorokaudessa. Jos laatan suunnittelu on tilattu kevennysjärjestelmän omilta suunnittelijoilta, betonin lujuus olisi mitattava ja tulokset lähetettävä suunnitteluryhmälle, josta kerrotaan voidaanko muotit purkaa. (Site Erection & Installation Manual. Type A – Reinforcement Modules 2008)

Paikallavalulaatta on kuorielementtiä parempi vaihtoehto hankalissa kohteissa sekä suurilla jänneväleillä, sillä se voidaan jälkijännittää. Laatta voidaan tehdä jännittämällä siten, että pilareiden väliseen laattaan jätetään lujia kaistoja, joihin punokset asennetaan. Laatta kevennetään muuten normaalisti kuplaelementeillä, mutta jännitettävät lujat kaistat jätetään keventämättä. Näin ollen lujat kaistat voidaan suunnitella ja raudoittaa kuten jännitettyssä umpilaatassa tai palkissa. (BubbleDeck®)

3.1.2 Kuorielementit ja umpinaiset elementit

Kuorielementit valmistetaan elementtitehtaalla ja toimitetaan lastattuina työmaalle. Valmistus aloitetaan raudoitemoduulista, jossa kuplat ladotaan alapinnan raudoiteverkon päälle sideraudoitteiden väliin. Rakenne suljetaan yläpinnan raudoiteverkolla ja verkko hitsataan kiinni siteisiin.. Muotin pohjalle asetetaan korokepalat ja muotti betonoidaan. Raudoitemoduuli, joka sisältää kaikki valmiin rakenteen alapinnan teräkset, nostetaan nosturilla betonoituun muottiin ja painetaan nosturilla valun sisään oikeaan korkoon. Näin ollen kuplat ja sideraudoitteet ovat betonin sisässä vain alareunastaan ja yläpinnan teräkset jäävät näkyviin. Kun betoni on kovettunut tarpeeksi, siirrerään elementti ulos varastoon odottamaan kuljetusta työmaalle. (emt.)

Kuorielementin betonikuoren paksuus on normaalisti 60 mm, mutta se voidaan tehdä myös paksummaksi, jos palo- tai rasitusluokkavaatimukset niin vaativat. Elementin leveys voi olla 2,4 tai 3 metriä ja pituus 14 metriä. Laatat voivat olla suunnikkaita, mutta myös kohteen muotoihin räätälöityjä kuorilaattoja voidaan tehdä. (BubbleDeck®)

Umpinaiset elementit valmistetaan vastaavasti kuten kuorielementit, mutta elementit valetaan pohjalaatan valamisen jälkeen täyteen rakennepaksuuteen ennen työmaalle toimitusta. Rakenne asennetaan vastaavasti kuin ontelolaatta palkkien tai seinien varaan, ja se voi kantaa kuormia vain yhteen suuntaan. (Site Erection & Installation Manual. Type A – Reinforcement Modules 2008)

3.1.3 Kuorielementtien asentaminen

Elementit toimitetaan työmaalle lastattuna toistensa päälle ja nostetaan yksitellen oikeaan asemaan tukipalkkien varaan. Tukipalkit on asennettava 1,8 metrin tai enintään 2,4 metrin välein ja ne saa poistaa aikaisintaan 8–10 päivän kuluttua betonoinnista. (emt.)

Nostamiseen käytetään kahdeksaa koukkua, jotka kiinnitetään elementin ansa-raudoitteisiin. Asentaminen on tehtävä tarkasti asennussuunnitelman mukaisesti, jotta elementit tulevat oikeaan paikkaan ja sideraudoitteet on helppo asentaa kuplalinjojen väliin. Yläpinnan ja ansaiden teräksiä ei saa katkaista, sillä ne toimivat rakenteellisesti lopullisessa rakenteessa. (Site Erection & Installation Manual. Type B – Filigree Elements 2008)

Elementtien nostamisen jälkeen lisätään irtoteräksset, laatan reunateräksset sekä lävistymisteräksset pilareiden kohdalle. Alapinnan irtoteräksset asennetaan pohjalaatan päälle kuplalinjojen väliin ja niiden tehtävä on sitoa elementit toisiinsa muodostaen jatkuvan rakenteen. Yläpinnan lisäraudoitteet voidaan tehdä irtoteräksillä tai tarkoitukseen tehdyillä verkkoraudoitteilla vastaavasti kuten paikallavalulaatalla. Raudoitustyön ohessa asennetaan myös reunamuotit sekä elementtien väliset saumamuotit. Kun valmistavat työt on saatu tehtyä, voidaan laatta betonoida täyryttäen lopulliseen korkoon. Kuvasta 3.3 on nähtävissä kuinka betoni asettuu kuplien väliin kuorielementtien päälle. Lopuksi laatta voidaan hiertää, jolloin laatalle saadaan valmis tasainen betonipinta. (Bubble-Deck®)



Kuva 3.3. Kuorielementtilaatan valu (Nasvik 2011).

BubbleDeck tekee ja toimittaa elementtien sekä niiden välisten raudoitteiden asennuspiirustukset. Onnistuneen asennuksen kannalta on tärkeää, että kommunikointi pelaa toimittajan, suunnittelijan ja urakoitsijan välillä. Esimerkiksi betonia tilattaessa on muistettava ottaa huomioon kuplien betonin tilavuutta vähentävä vaikutus. Sen huomioimiseksi on olemassa arviotaululukko eri laattatyypeille ja laatan paksuuksille. (Site Erection & Installation Manual. Type B – Filigree Elements 2008)

3.2 Mahdolliset laatan jännevälit ja paksuudet

Valmistajan tarjoaman jännevälioppaan (Technical Paper 2006) mukaan jatkuvilla laatoilla olisi mahdollista päästä 21 metrin jänneväleihin. Laatat ovat normaalisti 230–450 mm paksuja, mutta myös 510 ja 600 mm laattoja voidaan toteuttaa. Laatan paksuudet ja jännevälit on esitetty taulukossa 3.1. Taulukossa on myös kuplien halkaisijat sekä neljämetrin kokoisten laattojen painot. Suurimmat jännevälit on laskettu käyttämällä 3+1 kN/m² hyötykuormaa, 1,5 kN/m² pintakuormaa sekä 6 kN/m viivakuormaa lisäkuormana. Peitepaksuus alapinnan teräksiin on 20 mm.

Taulukko 3.1. BubbleDeck-laatan jännevälit (Technical Paper 2006).

Malli	Laatan paksuus (mm)	Kuplien halkaisija (mm)	Jänneväli (jatkuva laatta) (m)	Ulokkeen suurin pituus (m)	Jänneväli (yksiaukokoinen) (m)	Valmiin laatan paino (kN/m ²)
BD200	230	180	5 – 8,3	≤ 2,8	5 – 6,5	4,34
BD280	280	225	7 – 10,1	≤ 3,3	6 – 7,8	5,17
BD340	340	270	9 – 12,5	≤ 4,0	7 – 9,5	6,25
BD390	390	315	11 – 14,4	≤ 4,7	9 – 10,9	6,93
BD450	450	360	13 – 16,4	≤ 5,4	10 – 12,5	7,94
BD510*	510	410	15 – 18,8	≤ 6,1	11 – 13,9	9,06
BD600*	600	500	16 – 21,0	≤ 7,2	12 – 15,0	10,22

* Uudet BubbleDeck-laatat

Sopiva jänneväli ja laatan paksuus voidaan alustavasti arvioida ennen varsinaista mitoitusta laatan jännevälin L ja poikkileikkauksen tehollisen korkeuden d suhteella. Valmistaja on huomioinut suhdeluvuissa pienemmän omapainon kertomalla Eurokoodin arvot noin 1,5-kertaisesti. Suhdeluvut ovat arvioita, ja niitä ei saa Suomessa käyttää taipumamitoitukseen, vaan taipuma on laskettava esimerkiksi käyttämällä Ranganin menetelmää (BY 210 2005). Suhdeluvut ovat

- $L/d \leq 30$ jatkumattomille laatoille
- $L/d \leq 41$ jatkuville laatoille ja
- $L/d \leq 13$ ulokkeille.

Ohjeessa on lisäksi laskettu jännevälejä erisuuruuksilla kuormilla ja laatan paksuuksilla. Niitä voidaan myös käyttää apuna laatan kokoa arvioitaessa.

Esimerkiksi parkkihalleissa tarvitaan 16 m:n jännevälejä, joten suositeltava jatkuvan pilarilaatan rakenne on BD450. Äärirakenne, jossa pilarijako on 15x16 m, voidaan valmistajan parkkihalliesimerkin (Parking) mukaan toteuttaa BD450-rakenteella, jossa alapinnassa raudoitukseksi riittäisi x- ja y-suuntiin T16-K150 ja pilarin kohdalla yläpinnassa 3-T25-K400. Laskennassa on käytetty pysyvän lisäkuorman arvona $1,5 \text{ kN/m}^2$ ja hyötykuorman arvona $2,5 \text{ kN/m}^2$.

Yli 15 metrin jännevälejä voidaan tehdä myös jälkijännittämällä. Jännevälin ja laatan tehollisen korkeuden suhdetta voidaan lisätä jännittämättömään laattaan verrattuna 15–30 %. Jännitettäväksi rakenteiksi soveltuvat laattatyypit välillä BD390 ja BD600. Lisäksi suuresti rasitetuilla laatoilla yläpinnan puristuspinta-alaa voidaan kasvattaa lisäämällä betonipeitettä. Esimerkiksi tyyppin BD600 paksuudeksi voidaan suunnitella 650mm. (emt.)

Yrityksen sivuilta (BubbleDeck UK Ltd.) on ladattavissa taulukkolaskentapohja, jolla asiakkaan suunnittelija voi arvioida jännittämättömiä laattoja Eurokoodin mukaan. Vaikka laskentapohja on tehty hyvin, ei sitä saa käyttää sellaisenaan lopullisessa mitoituksessa. Jännitettyjä laattoja suunniteltaessa on otettava yhteyttä valmistajan suunnittelijaan.

3.3 BubbleDeck-laatalle tehdyt kokeet

3.3.1 Taivutusjäykkyys ja taipuma

Eindhovenin teknillinen yliopisto ja Delftin teknillinen yliopisto Hollannissa ovat tehneet BubbleDeck-laatan momenttikestävyyskokeita. Kokeet on suoritettu laatan paksuuksilla 230 mm ja 455 mm, ja tuloksia on verrattu umpilaatan arvoihin lyhyt- ja pitkäaikaiskuormitustapauksilla. Kokeista ilmenee, että BubbleDeck-laatan taivutusjäykkyys on 87 % umpilaatan arvosta. Koska BubbleDeck-laatan betonin tilavuus on vain 66 % vastaavasta umpilaatasta, on sillä huomattavasti taivutusjäykkyydestä huolimatta umpilaattaa parempi kuormankantokapasiteetti. (BubbleDeck Tests and Reports Summary 2006)

Pienempi taivutusjäykkyys johtaa hieman suurempiin taipumiin umpilaattaan verrattuna, jos laattaan kohdistuu samanlainen kuormitus. Suurempi taipuma pystytään kuitenkin rajoittamaan lisäämällä pieni määrä ylimääräistä terästä. Toisaalta pienemmällä omapainolla on suuri merkitys erityisesti pitkän aikavälin tarkastelussa, sillä laattaan kohdistuva kuormitus on suhteellisesti pienempi verrattuna umpilaattaan. Kevennyksen vaikutuksesta taipuma jää siten vastaavanpaksuista umpilaattaan pienemmäksi. (BubbleDeck® Slab Properties 2006)

3.3.2 Leikkaus

Leikkauskestävyyttä on tutkittu laboratorionkokein ainakin kolmen eri yliopiston johtamana. Professori M.P. Nielsen Tanskan teknillisestä yliopistosta on tutkinut leikkauskestävyyttä ja todennut, että 188 mm paksuisen BubbleDeck-laatan leikkauskestävyys on 81 % umpilaatasta. Lisäksi lävistymiskestävyyden arvo oli 91 %. (BubbleDeck Test and Reports Summary 2006)

Professori Kleinmann Eindhovenin teknillisestä yliopistosta on tutkinut 340 mm laatan leikkautumista irtonaisella ja verkkoihin hitsatulla sideraudoitteella kahdella eri kuormitustavalla. Toisessa kuormitustavassa kuormapisteen etäisyyden tuelta suhde d-mittaan oli 2,15 ja toisessa vastaavasti 3. Tulokset paljastivat, että käytettäessä irtonaista sideraudoitetta leikkauskestävyys heikkeni merkittävästi. Tulokset on esitetty taulukossa 3.2. (emt.)

Taulukko 3.2. Leikkauskapasiteetti (BubbleDeck Tests and Reports Summary 2006).

Leikkauskapasiteetti (% umpilaatasta)	a/d = 2,15	a/d = 3,0
Umpilaatta	100	100
BubbleDeck, kiinteät sideraudoitteet	91	78 (81) ¹
BubbleDeck, irtonaiset sideraudoitteet	77	

¹ Korjaus koekappaleille, joilla on pidempi kovettumisaika

Lisäksi John Munk ja Thomas Moerk Horsenin teknillisestä koulusta ovat tutkineet 130 mm laattaa ilman sideraudoitetta ja saaneet leikkauskapasiteetiksi 76 % vastaavan umpilaatan kapasiteetista. Kokeessa käytetyn laatan kuormituspisteen a/d-suhde oli 2,3. (BubbleDeck Tests and Reports Summary 2006)

Saatujen tulosten perusteella on todettu, että kuplarakenteen leikkausvoimakapasiteetti on heikoimmillaan noin kolmanneksen pienempi verrattuna vastaavaan umpilaataan. Laskennassa leikkausvoimakkestävyyttä voidaan pienentää kertoimella 0,6. (BubbleDeck Slab Properties 2006, p. 15)

3.3.3 Lävistys

Martina Schnellenbach-Held ja Karsten Pfeffer Darmstadtin teknillisestä yliopistosta ovat käsitelleet tutkimuksessaan (2002) BubbleDeck-laatan lävistymistä tapauksessa, jossa kuplat ovat lähellä pilaria. Tutkimus tehtiin FEM-mallinnuksella sekä kuormituskokein, ja niiden pohjalta arvioitiin saksalaisen DIN 1045 -normin sopivuutta pilarin lävistymisleikkausmitoitukseen BubbleDeck-laatalle.

Kokeet tehtiin kolmelle 240 ja kolmelle 450 mm paksuiselle laatalle, jotka tukeutuvat lyhyelle 300 x 300 kokoiselle pilarille. Laatoissa käytetyn betonin suurin raekoko oli 16 mm ja lujuusluokat on B25 ja B35. Laattoja kuormitettiin kahdeksan pisteen kautta, jotka sijaittivat tasaisesti 1125 mm päässä pilarin keskeltä. Halkaistun koekappaleen halkeamista päätellen sortumistapa oli samanlainen kuin umpilaatalla. Halkeaman ja vaakasuoran välinen kulma oli 30 ja 40 asteen välillä, ja kuten odotettua sortumisen

johtanut kuorma oli pienempi kuin umpilaatalla. Tämän kuorman suuruus on kytköksissä kuplien määrään, jotka halkeamapinta leikkaa.

Mallinnuksessa käytettiin DIANA-nimistä ohjelmistoa, jolla tehtiin epälineaarinen laskenta kokeita vastaavasta tilanteesta. Kokeista ja laskennasta saatuja kuormitusmuodonmuutoskuvaajia verrattiin keskenään, ja todettiin, että laskennassa saadut tulokset vastasivat koetuloksia. Tämä vahvisti sen, että lävistymiskestävyyttä on alennettava, mikäli lävistysvyöhykkeellä sijaitsee kuplia. Suunnitellessa nämä kuplat voitaisiin huomioida vähentämällä betonin poikkipinta-alaa kuplien osalta lävistymisleikkausmitoituksessa. Jos kuplat eivät sijaitse lävistysvyöhykkeellä, voidaan niiden vaikutus jättää huomioimatta ja laatta voidaan mitoittaa lävistykselle normaalina umpilaattana. Tästä syystä kuplia ei sijoiteta alueille, joissa laatta voi lävistyä.

3.4 Suunnittelu

Valmistajan tarjoaman suunnitteluohjeen BubbleDeck Engineering Design & Properties Overview (2007) mukaan kuormituskokeet ja toteutuneet projektit ovat osoittaneet, että BubbleDeck-laatta voidaan mitoittaa samoilla periaatteilla kuin umpilaatta. Suunnittelussa on vain huomioitava seuraavat asiat verrattuna vastaavanpaksuiseen umpilaattaan:

- Omapaino on huomattavasti pienempi.
- Taivutusjäykkyys on noin 0,9-kertainen.
- Halkeamamomentti on 0,8-kertainen.
- Leikkauskestävyys on vain 0,67-kertainen, mutta laskennassa on käytettävä kerrointa 0,6.

Suunnittelija voi mitoittaa rakenteen itse esimerkiksi negatiivisten kuormien avulla ja pienentämällä lujuusarvoja BubbleDeck-järjestelmän suunnitteluoppaan mukaisesti. Tilaajan kannattaa kuitenkin ottaa yhteyttä BubbleDeck-suunnittelijaan jo heti projektin alkuvaiheessa, jotta pystytään arvioimaan järjestelmän sopivuus ja kannattavuus kyseiseen projektiin. BubbleDeck myös suosittelee, että lopullinen toteutussuunnittelu tilataisiin järjestelmän omalta suunnittelijalta. Tilattavaan suunnittelupakettiin on liitettävä jäädytetyt plaanit kuormitustietoineen sekä tarvittavat detaljit. Tilattu suunnittelu ja piirustukset vievät normaalisti noin 3–4 viikkoa sekä elementtien tuotanto ja asennuspiirustukset 6–8 viikkoa ennen kuin elementit voidaan toimittaa tilaajalle. Järjestelmän toimittajalta saatavissa menetelmäkohtaisissa oppaissa on kerrottu yksityiskohtaisemmin koko suunnittelu- ja asennusprosessin kulku. (Site Erection & Installation Manual. Type A – Reinforcement Modules 2008)

Laatta voidaan suunnitella FEM-laskentaohjelmistoilla eli elementtimenetelmään perustuvilla laskentaohjelmistoilla. Laskenta kannattaa ajaa kahteen kertaan, jotta kevennyksosat voidaan poistaa alueilta, joissa leikkausvoimakestävyys ylittyy. Ensimmäisen kierroksen laskenta tehdään keventämällä omapaino koko laatasta. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi pienentämällä betonin tilavuuspainoa, jos ohjelmisto sen sallii, tai jakamalla kuorma koko laatan alueelle. Vähennettävän omapainon suuruus voidaan las-

kea esimerkiksi hyödyntämällä valmistajan taulukoissa ilmoittamia kevennetyn betoni-laatan massoja. Laskennan tuloksena saatujen leikkausvoimien perusteella määritetään alueet, joilla kevennysrakenteet on jätettävä asentamatta. Laskenta ajetaan uudelleen, kun keventävät kuormat on poistettu tarvittavilta alueilta tai kun tilavuuspaino on muutettu normaaliksi ja keventävä kuorma on jaettu kevennettävälle alueelle.

Suunnittelu taivutukselle on helppoa, sillä BubbleDeck-laatan taivutuskestävyys vastaa umpilaatan taivutuskestävyyttä, joten laatta voidaan mitoittaa taivutukselle samalla periaatteella kuten umpilaatta. Jos laatta on suuresti rasiattu, laatan puristuspin-tala tulee osittain kuplien alueelle. Kokeet ovat kuitenkin osoittaneet, että alle 20 % tunkeutumisella on vähäpätöinen vaikutus laatan käyttäytymiseen taivutuksessa. (Lai 2010)

Leikkausvoimakapasiteetti kuplien alueella on noin kolmanneksen umpilaatan kapa-siteettia pienempi. BubbleDeck on ilmoittanut, että laskennassa leikkausvoimakestä-vyyden arvo voidaan pienentää umpilaatan arvosta kertoimella 0,6 kuplien alueella (BubbleDeck® Slab Properties 2006, p. 15). Kevennetyn laatan leikkausvoimakestävyyy-den arvo toimii raja-arvona määritettäessä alueita, joissa on käytettävä umpilaattaa. Laa-tan lävistymistä kevennetyllä alueella ei normaalisti tarvitse huomioida, sillä valmista-jan mukaan lävistyskestävyyden arvo on 90 % vastaavan umpilaatan arvosta (Bubble-Deck®).

Mitoitusta taipumalle ei voi tehdä suoraan jänneväli-paksuus -suhteen mukaan, sillä sen antamat arvot ovat hyvin likimääräisiä ja eivät sovellu monimuotoisille laatoille. Taipuman mitoitukseen käytetään epälineaarista halkeilleen poikkileikkauksen FEM-laskentaa. Taipuman huomioimiseksi sekanttimoduulin E_{cm} arvo kerrotaan luvulla 0,9 pienemmän taivutusjäykkyyden vuoksi. (BubbleDeck Engineering Design & Properties Overview 2007)

Myös halkeilumomenttia on pienennettävä, ja sen arvo on hieman alle 80 % saman paksuisen umpilaatan halkeilumomentista. Jos tarkempaa mallinnusta ei käytetä, voi-daan FEM-laskennassa pienennetyn sekanttimoduulin lisäksi betonin keskimääräinen vetojännitys f_{ctm} kertoa luvulla 0,8, jotta halkeilumomentti saadaan rajoitettua vastaa-maan todellisempaa tilannetta. Lisäksi virumalukua olisi muutettava; esimerkiksi toi-mistotaloa mitoittaessa arvo on tavallisesti välillä 1,8 ja 2. (emt.)

3.5 Järjestelmän edut

Suunnittelun kannalta rakenteen selkein etu on se, että saatavilla olevan aineiston perus-teella menetelmää on tutkittu kilpailijoihin verrattuna enemmän. Kokeista on saatu sel-ville rakenteen todellisia lujuusarvoja, joiden pohjalta on määritetty rakenteen mitoitta-miseen käytettäviä lujuusarvojen pienennyskertoimia. Näin ollen rakenteen kestävyys ja muodonmuutokset saadaan laskettua paremmin vastaamaan todellista tilannetta. Maail-malla toteutetut kohteet ovat myös osoittaneet, että rakenne toimii, mikäli se on toteutet-tu oikein.

Kuplien umpinaisen ja tiiviin rakenteen vuoksi betoni ei voi päästä niiden sisään va-lun aikana, toisin kuin alhaalta avonaisilla kevennysrakenteilla. Tiiveyden johdosta

myöskään betonin kosteus ei voi tunkeutua rakenteeseen, jolloin kuplat jäävät koko rakenteen elinkaaren ajaksi puhtaasti ilmatäytteisiksi. (BubbleDeck[®])

4 BEEPLATE

Beeplate on massiivisen betonilaatan kevennysjärjestelmä, joka soveltuu paikalla valettaville pilarilaatoille. Rakenteen kevennysvaikutus perustuu pyöreisiin muovikennoihin, jotka valetaan ylösalaisin hunajakennorakennetta muistuttavaan muodostelmaan laatan sisään. Kennot muodostavat laatan sisään ilmatäytteisiä taskuja, joiden rakennetta keventävä vaikutus voi enimmillään 35 %. Menetelmän on kehittänyt saksalainen yhtiö Häussler Ingenieure GmbH, joka on keksinyt myös Bamtec-mattoraudoitejärjestelmän. Mattoraudoite tarkoittaa betonirakenteen määrämittäisiä raudoitteita, jotka toimitetaan työmaalle matoksi rullattuina. (Beeplate®)

Laatta voidaan mitoittaa Eurokoodin mukaan samoin periaattein kuin umpinainen laatta käyttämällä kevennyskuormia kennojen alueilla. Suurimmat erot suunnittelun kannalta ovat kevennetyn rakenteen umpilaattaa heikompi leikkauskestävyys sekä pienempi jäykkyys. (Recommended Static Calculation according to EC2 2011; Häussler 2013)

4.1 Laattatyypit ja mahdolliset jännevälit

Beeplate-rakenteella voidaan tehdä 34–70 mm laattoja. Kennoja on neljää eri korkeutta, ja niillä voidaan tehdä kuutta eri laattatyyppiä lisäämällä HK38-kenno HK20- tai HK26-kennon päälle. Vaihtoehtoiset laattatyypit kennorakenteineen on esitetty taulukossa 4.1. Taulukossa on esitetty laatan vähimmäispaksuudet sekä kennojen korkeudet että halkaisijat. Lisäksi siitä nähdään onteloiden lukumäärä neliölle hunajakennomuodostelmassa ja onteloiden täysi tilavuus. (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Taulukko 4.1. Beeplate-laattatyypit (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Tyyppi	Koko	Kennon korkeus (cm)	Laatan paksuus (cm)	Kennon halkaisija (cm)	Onteloiden määrä (kpl/m ²)	Kennon tilavuus (m ³)
34+	HK20	20	≥34	70,0	1,80	0,050
40+	HK26	26	≥40	71,5	1,74	0,072
45+	HK31	31	≥45	66,0	2,00	0,074
52+	HK38	38	≥52	66,0	2,00	0,092
60+	HK20+HK38	46	≥62	70,0	1,80	0,120
66+	HK26+HK38	52	≥66	71,5	1,74	0,141

Ontelon syrjäyttämän betonin prosentuaalinen osuus laatan tilavuudesta kasvaa rakenteen paksuuden kasvaessa, sillä kennon ala- ja yläpuolisen laatan paksuus pysyy samana kennon korkeudesta riippumatta. Tämä tarkoittaa sitä, että optimaalisilla laatan paksuuksilla kevennysprosentti kasvaa 22,7:stä 35,1:een, kun laatan paksuus kasvaa 340 mm:stä 660 mm:iin. Valmistaja on laskenut ja taulukoinut suhteita eri laatan paksuuksille ja kennoille sekä arvoja kennojen syrjäyttämän betonin massoille. Niiden avulla voidaan tapauskohtaisesti määrittää mitoituksessa käytettävien laattaa keventävien kuormien suuruudet. (emt.)

Beeplate-laatan käyttäminen on kannattavaa, kun jännevälit ovat yli kahdeksan metriä ja jännevälit ovat samaa luokkaa molempiin suuntiin, jolloin laatta toimii mahdollisimman ristiin kantavana. Pisimmillään rakenteilla voidaan päästä noin 16 metrin jänneväleihin ilman jälkijännittämistä. (Ålander 2012)

4.2 Suositeltavat raudoitteet

4.2.1 Bamtec-mattorautoite

Beeplate-rakenne on kehitetty asennettavaksi yhdessä Bamtec-mattorautoitteen kanssa, vaikka rakenne on mahdollista raudoittaa myös esimerkiksi verkoilla. Kennorakenteen muoto suosii mattorautoitteen käyttöä erityisesti laatan yläpinnassa, sillä kennojen päällä on hankala liikkua raudoitteiden asennustyön aikana. Mattorautoite voidaan nostaa kennojen päälle ja rullata nopeasti auki. (Beeplate®)

Jaakko Jakobson on käsitellyt diplomityössään (2009) Bamtec-mattorautoitetta asuinrakennuksen välipohjarautoitteena ja todennut, että pistetalon yhden välipohjan läpimenoajassa voidaan säästää mattorautoitetta käyttämällä 1-2 työvuoroa verrattuna verkolla tai irtoteräksillä raudoittamiseen. Vaikka mattorautoite on kalliimpi valmistaa kuin muut raudoitteet, voi sillä raudoittaminen kokonaiskustannukset huomioiden olla monin kerroin halvempaa kerroksen läpimenoajasta kertyvien säästöjen vuoksi. Lamelitalossa säästöt eivät ole niin suuria kuin pistemäisessä tornitalossa, sillä raudoitus työ ei viivästyä muita rakennusvaiheita. Mattorautoitteen ongelmia ovat lähinnä mattorautoitteen törmääminen läpivienteihin ja tartuntateräksiin sekä mattojen varastointi työmaalla ja vaurioituminen siirtojen aikana.

Raudoitematto valmistetaan tehtaalla automaattisesti raudoituspiirustusten perusteella laatan muodot ja aukot huomioiden. Asennuskone hitsaa määrämittaiset harjateräkset peltivanteisiin optimoidulla k-jaolla ja rullaa maton rullalle toimitusta varten. Toimitettu matto asennetaan nostamalla rulla laattamuotille raudoitettavan alueen reunaan tarkasti oikeaan paikkaan ja rullataan auki tankovälikkeiden päälle. Päälimmäiset teräkset asennetaan rullaamalla seuraava matto auki laatan toiseen suuntaan. Yläpinnan teräkset asennetaan vastaavasti yläpinnan tukipukkien tai Beeplate-kennojen päälle.

4.2.2 Z-leikkausteräket

Leikkausteräksiksi kevennyskuppien reuna-alueilla suositellaan Z-mallisia \emptyset 12 mm harjateräksiä, jotka sitovat ylä- ja alapinnan raudoitteet toisiinsa. Haat asennetaan yksitellen pystysuuntaan kuppien väliin alueella jossa laatan uumien leikkausvoimakapasiteetti ylittyy. Terästen muoto on tarkkaan optimoitu, jotta ne voidaan koukata alapinnan tankoon ja lukita yläpinnan terästen päälle. Tarvittava teräsmäärä saadaan laskettua leikkausraudoittamattoman betonin leikkauskapasiteetin sekä leikkausraudoitetun laatan pienennetyin puristuskapasiteetin ylärajan mukaan. Tavallisesti leikkausteräksiä tulee kaksi tankoa jokaista kuppien välistä uumaa kohden. (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Lisäksi Z-leikkausteräksiä tarvitaan laatan vapaalla reunalla, sillä laatan alapintaan syntyy taivutuksessa vetovoimia. Muutoin rakenne voidaan raudoittaa normaalin pilarilaatan periaatteiden mukaisesti: laatan reunoille asennetaan reunalenkit sekä pilareiden kohdalle lävistymisleikkausraudoitus. (emt.)

4.3 Suunnittelu

Pilarilaatta suunnitellaan siten, että kennot kattavat mahdollisimman suuren pinta-alan laatasta. Pistetuetulla pilarilaatalla pilareiden ympärillä oleva laattaosa jätetään keventämättä niissä vaikuttavien suurten leikkaus- ja lävistymisleikkausvoimien vuoksi. Jotta umpinaisen betoniosan osuus koko laatan pinta-alasta voidaan tehdä mahdollisimman pieneksi, suositellaan valussa käytettäväksi lujuusluokan C35/45 betonia. Tavallisesti Beeplate-rakenteella voidaan keventää noin 70 % pilarilaatan pinta-alasta. (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Rakennetta on tutkittu (Hegger, Kerkeni & Bieger 2013) lineaarisella ja epälineaarisella 3D-FEM-laskennalla mallintamalla kennojen muotoisia onteloita laatan sisään. Laskennan perusteella on todettu, että Beeplate voidaan mitoittaa kuten umpilaatta Eurokoodin mukaan käyttämällä laatalle pienempää omapainoa alueilla, joissa kevennysrakenteet sijaitsevat. Ainoastaan laskennan antama kimmoinen taipuma on kerrottava 1,4-kertaisesti, jotta lähempänä todellista arvoa oleva taipuma voidaan määrittää. Vaihtoehtoisesti Beeplate-laatan pienempi jäykkyys voidaan huomioida pienentämällä moduulia E_{cm} 30 %. Suuren taipuman vuoksi Beeplate-laatan valumuotti on normaalisti esikoritettava. (Häussler 2013)

Kevennys voidaan huomioida laskennassa käyttämällä negatiivia kuormia kevennysrakenteiden alueella tai muuttamalla laatan tilavuuspainoa. Umpinaisen laatan alueilla laatan paino on huomioitava täytenä. Yleisimmissä käytännön sovelluksissa kennot eivät vaikuta laatan puristuspinnan poikkileikkaukseen, joten laskennan tulokset ovat hyväksyttäviä. (Recommended Static Calculation according to EC2 2011) Ainoastaan erityisen paksuilla laatoilla yläpinnan puristettu raudoitus tulee umpilaattaan verrattuna suuremmaksi. Tämän huomioonottaminen tosin on hyvin teoreettista, ja sitä kehitellään edelleen. (Häussler 2013) Jos rakenne on raskaasti kuormitettu, on suositeltavaa käyttää

kennotyypille määritettyä minimipaksuutta suurempaa betonilaattaa (Beeplate-Info 2008).

Rakenteen raudoitteet voidaan suunnitella samoin periaattein kuin umpinaisella pilari-laataalla, mutta kevennetyn laatanosan leikkausraudoitus on tarkistettava ja suunniteltava erikseen. Jos rakenne raudoitetaan kokonaan Bamtec-raudoitteella, on koko rakenteen raudoitus suunniteltava sen ehdoilla. Jotta matot voidaan rullata auki törmäämättä pilareiden tartuntoihin, pilarit on raudoitettava ja valettava vasta laatan raudoittamisen jälkeen. Toinen vaihtoehto on jatkaa pilareiden tartuntateräksin muhviilitoksin. (Ålander 2013)

Halkeamaleveyden vaatima raudoitus voidaan suunnitella kuten vastaavalla umpilaatalla, mutta halkeamien kannalta minimiteräsmääräksi kuitenkin suositellaan T12-K150-raudoitusta. Lisäksi halkeilun ja kutistuman rajoittamiseksi pitäisi käyttää hitaasti kovettuvaa sementtiä, jolla on pieni hydrataatiolämmöntuotto. (Beeplate-Info 2008)

Laatan leikkaus on tarkistettava kennojen välisissä uumissa. Jos leikkausvoima x -tai y -suunnassa ylittää leikkauskapasiteetin arvon kennojen alueella, on laatta muutettava siltä osin umpilaataksi tai siihen on mitoitettava leikkausteräksiä. Leikkausmitoitus on käsitelty yksityiskohtaisesti luvun 6 kohdassa 6.3. (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Lävistymisraudoitus suunnitellaan kuten umpilaatalla Eurokoodin kansallisen liitteen mukaan. Lävistymisraudoitus voidaan tehdä pilarin päälle ristiin asennettavilla tai vutetuilla irtotangoilla tai niin sanotulla UFO-lävistysvahvikkeella. Mitoitus on esitetty luvun 6 kohdassa 6.4. (Ålander 2012)

4.4 Asentaminen

Beeplate-laatta tehdään paikallavaluna valamalla laatta kahdessa osassa, jotta kennot eivät täyty betonilla valun aiheuttaman paineen vuoksi. Ensimmäinen valukerta ulotetaan vain 2 cm kennojen alareunan yläpuolelle, ja betonin annetaan kovettua riittävästi ennen toista valukertaa, mutta ei liikaa, jotta rakenteeseen ei synny työsaumaa. Toisella valukerralla rakenne valetaan umpeen valmiiksi betonipinnaksi. (Beeplate-Info 2008)

Asennus aloitetaan pystyttämällä valumuotti. Muotin päälle asetetaan kiskomaiset tukipukit, joiden päälle levitetään Bamtec-mattoraudoite kahteen suuntaan rullaamalla tai vaihtoehtoinen muu raudoite. Kun alapinnan raudoitteet on asennettu, voidaan kennot asentaa suoraan alapinnan terästen päälle. Kennot levitetään oikeaan muodostelmaan käsin asettelemalla ja kiinnitetään toisiinsa 10 cm pitkillä väliskeillä. Väliskeet asennetaan jokaiseen kennojen väliseen uumaan painamalla ne kennon reunassa oleviin kiinnitysreikiin. Jos rakenne koostuu kahdesta päällekkäin pinotusta kennosta, asennetaan väliskeet vain alempiin kennoihin. Vaihtoehtoinen tapa asentaa kennot on lisätä ylempien tankojen päälle $\varnothing 20$ mm korokeharjatankoja. Tällöin ensimmäinen betonointi voidaan jättää kennojen alareunaan ja kennon kapasiteettia ei siten kulu betonipeitteisiin. (emt.)

Kennot on mahdollista asentaa laattaan kahteen eri muodostelmaan, jotka ovat hunajakkenno- ja suorakulmam muodostelma. Hunajakennomuodostelma on kevennyksen kannalta tehokkaampi, sillä se syrjäyttää enemmän betonia kuin suorakulmam muodostelma. Lisäksi suorakulmam muodostelmaa käytettäessä mattoraudoitteen asentaminen hankaloituu, sillä kennojen väleihin on asennettava erillisiä tukipukkeja. Kuvasta 4.1 nähdään, kuinka Beeplate-kennot on asennettu hunajakkennoa muistuttavaan muodostelmaan. Lisäksi siitä nähdään kuinka kennot on sidottu alareunoistaan toisiinsa sekä kuinka yläpinnan Bamtec-mattoraudoite on asennettu kennojen päälle. (emt.)



Kuva 4.1. Beeplate-rakenne ja Bamtec-mattoraudoite (Beeplate®)

Kennojen asentamisen yhteydessä asennetaan laatan reunateräkset, lävistymisraudoitteet pilareiden kohdalle sekä muut mahdolliset lisäraudoitteet. Tämän jälkeen asennetaan yläpinnan raudoitteet suoraan kennojen kolmisakaroiden päälle, sillä kolmisakarot toimivat yläpinnan raudoitteen tukena. Jotta Bamtec-mattoraudoite voidaan asentaa, on sakaroiden osoittava samaan suuntaan kuin mihin laatan yläpinnan alempi mattoraudoite rullataan auki. Kennojen päälle nostettava mattorulla saa painaa enintään 100 kg/m, sekä sen kokonaispaino saa olla enintään 800 kg. Ennen valua asennetaan vielä Z-leikkausraudoitteet raudoitussuunnitelman vaatimille alueille. (emt.)

Laatta valetaan täryttämällä kahdessa osassa siten, että 2 cm kennojen alareunasta jää valun sisään. Betonin on noustava yhtä korkealle myös kennojen alla, jotta raudoitteet peittyvät kauttaaltaan valuun. Betonipinnan korkeus voidaan tarkistaa mittatikkumenetelmällä kennon pohjassa olevista rei'istä. Toinen valukerta on tehtävä saman päivän aikana, kun ensimmäinen valu on jähmettynyt sen verran, että se ei täytä kennoja valupaineen johdosta. Ensimmäinen betonivalu ei saa kuitenkaan päästä kovettumaan liikaa, jotta valujen väliin ei syntyisi työsaamaa. (emt.)

4.5 Järjestelmän edut

Beeplate-laatan muotti- ja raudoitustyö on helppoa ja nopeaa verrattuna ripalaattarakenteisiin tai palkki-laattarakenteisiin, sillä muottipinta on tasainen ja matoraudoite voidaan levittää ala- ja yläpintaan kauttaaltaan. Yläpinnan raudoitusta helpottaa erityisesti se, että kennot toimivat samalla ylemmän raudoitteen tukipukkeina. (Beeplate-Info 2008)

Toinen merkittävä etu on se, että kennoihin ei synny valun aikana nostetta niiden alhaalta avoimen muodon vuoksi, toisin kuin pallomaisilla kevennysrakenteilla. Valun aikana kennojen väliin asettuva betoni painaa samalla rakennetta alaspäin yhdessä yläpinnan terästen kanssa. Painava voima on suurempi kuin aiheutuva noste, joten kennot pysyvät kiinni alapinnan raudoitteessa ilman erillisiä siderakenteita. (emt.)

Menetelmällä on myös hyvät mahdollisuudet yleistyä Suomessa, sillä kennojen maahantuonti on suhteellisen helppoa. Ensinnäkään kennot eivät vie paljoa tilaa, sillä ne voidaan varastoida, kuljettaa ja nostaa laatalle sisäkkäin pakattuina. Toiseksi täällä on jo olemassa valmiit kontaktit valmistajaan, ja Suomen maahantuonnista vastaa tällä hetkellä Celsa Steel Service Finland, joka myös valmistaa Beeplate-rakenteen kanssa käytettäviä Bamtec-matoraudoitteita.

5 MUUT KEVENNYSMENETELMÄT

Markkinoilla on BubbleDeck ja Beeplate -järjestelmien lisäksi useita muita vaihtoehtoisia kevennysrakenteiden valmistajia ja tuotteita, joista tunnetuimmat on esitelty tässä luvussa. Esitellyistä menetelmistä AirDeck, New Nautilus ja U-Boot Beton ovat keskenään hyvin samantyyppisiä kennorakenteita, mutta niiden kulmikkaat muodot eroavat pyöreästä Beeplate kennosta. Cobiax on BubbleDeck-järjestelmää vastaava kuplarakenne, mutta sen käyttämä raudoitemoduuli on erilainen.

Myös polystyreeniä voidaan käyttää betonilaattojen kevennykseen. Yksi valmistaja on maltalainen Blokrete Ltd, joka valmistaa polystyreenillä kevennettyä Pedalleskuorilaattaa yhteen suuntaan kantaville laatoille. Koska tässä työssä keskitytään vain pilarilaattojen kevennysmenetelmiin, jätetään polystyreeni tässä käsittelemättä.

5.1 AirDeck

AirDeck on belgialainen kevennysjärjestelmä, jolla voidaan tehdä kahteen suuntaan kantavia pilarilaattoja esivalmistetuilla kuorielementeillä. Menetelmän erikoisuus on se, että kulmikkaat kuppirakenteet asennetaan paikalleen koneellisesti. Ohjelmoitu robotti painaa ja täyryttää kupit valuun tarkasti oikealle paikalleen piirustusten mukaan vakiojalla (AirDeck®). Tämä mahdollistaa sen, että laatikot ovat juuri oikeassa korossa ja vaaka-asemassa, kuten kuvasta 5.1 nähdään. (Airdeck Building Concepts nv)



Kuva 5.1. AirDeck-välipohja ennen raudoitteiden lisäämistä ja pintavalua (AirDeck®)

Kuvan rakenteeseen on lisäksi jätetty varaus vinoa putkijuoksua varten, ja siitä puuttuvat vielä mahdolliset lämmityspotket ja yläpinnan raudoitteet. Laatan yläpinta raudoitetaan tavallisesti verkoilla, mutta voidaan raudoittaa myös millä tahansa muulla standardiraudoitteella.

5.1.1 Kupit ja kuorielementit

Kuppeja on saatavilla neljää eri kokoa, ja niillä voidaan valmistaa 280–450 mm paksuja laattoja. Lisäksi Belgian ja Australian markkinoilla on saatavilla ohuempaa tyyppin A220 laattaa (Clare 2013). Kupit valmistetaan kierrätetystä polypropeenista, ja ne ovat muodoltaan tornimaisia ja kulmikkaista. Taulukossa 5.1 on esiteltynä eri AirDeck-laattatyypit jänneväleineen. Jännevälit on ilmoitettu yksiaukkoiselle pilarilaatalle tavanomaisilla kuormilla normaalissa kuormitustilanteessa. Hyperstaattisella rakenteella päästään 12 m:n jänneväleihin. Tätä pidempiä jännevälejä voidaan tehdä vain jälkijännittämällä, jolla voidaan päästä 20 m:n jänneväleihin. Taulukossa on myös esitetty työmaalla tehtävän paikallavalun vaatimat neliökohtaiset betonikuutiomäärät sekä suurimmat mahdolliset halkaisijat kupprien väliin valettaville taloteknisille asennuksille. (AirDeck Building Concepts nv)

Taulukko 5.1. AirDeck-laattatyypit (AirDeck Building Concepts nv).

Tyyppi	Laatan paksuus (mm)	Kupin korkeus (mm)	Jänneväli (m)	Paikallavalu- betoni työmaalla (m ³ /m ²)	Talotekniikan suurin sallittu halkaisija (mm)
A280	280	180	7,5	0,159	150
A340	340	240	9	0,195	210
A390	390	290	10,5	0,226	250
A450	450	350	11,5	0,264	300

Kupit asennetaan kuorielementin betonivaluun koneellisesti. Jokainen elementti on yksilöity ja asennusrobotti osaa sijoittaa kupit tarkasti niihin osiin laattaa, joissa kuppeja suunnitelmien mukaan vaaditaan. Kuorielementin standardileveys on 3 metriä, ja se sisältää betonikuoren ja kupprien lisäksi alapinnan raudoiteverkon sekä sideraudoitteet, jotka sitovat valmiin laatan liittorakenteeksi. Kuoriosan paksuus on 60 tai 70 mm riippuen vaadittavasta palonkestoajasta, jotka ovat 90 minuuttia ohuemmalle ja 120 paksuimmalle. Käytettäessä laatan sisään asennettavaa lämmityspotkistoa kuorilaatta voidaan valmistaa myös 90 mm paksuisena. (emt.)

Esivalmistetut kuorielementit asennetaan tarkasti asennussuunnitelman mukaisesti. Elementit kuljetetaan rekan lavalla työmaalle toistensa päälle ladottuina ja asennetaan sideraudoitteista nostamalla 1,8 metrin välein asetettujen työnaikaisten tukien päälle. Elementtien asennuksen jälkeen rakenne raudoitetaan yhtenäiseksi lisäterästen avulla sekä talotekniikka asennetaan kupprien väliin. Lopuksi asennetaan vielä yläpinnan raudoitteet, minkä jälkeen laatta on valmis betonoitavaksi. Laatta valetaan lopulliseen kor-

koon yhdellä valukerralla, ja pinta tasataan ja käsitellään suunnitelmien mukaisesti. (emt.)

5.1.2 Suunnittelu

Airdeck-järjestelmän suunnitteluasiantuntijan (Thibaut 2013) mukaan laatta voidaan tehdä EC2:n mukaan FEM-laskennalla pienentämällä laatan Youngin moduulia, omapainoa ja leikkauskestävyyttä umpilaattaan verrattuna. Teoriassa laatasta olisi muutettava neliömomenttia Youngin moduulin sijasta, mutta laskettaessa massiivilaattaa FEM-ohjelmalla ei neliömomenttia voida pienentää eivätkä ohjelmistot sitä yleensä edes salli. Tästä syystä betonin taivutusjäykkyyttä pienennetään 0,9-kertaiseksi.

Leikkauskestävyys pienennetään kupprien alueella 0,8-kertaiseksi. Yleisesti tämä tarkoittaa sitä, että tuella laatan reunimmaisat kupit jätetään pois sekä pilareiden lähellä suhteilla 0, 50 ja 100 % leikkausvoiman mukaan. 50 % suhde tarkoittaa sitä, että joka toinen kuppi poistetaan, kunnes leikkausvoima vaatii laatan tekemistä täysin umpinaisena pilareiden ympärillä.

Halkeilu huomioidaan normaalisti EC2:n mukaan. Koska kupprien alapuolinen laatta on 60 mm paksu, sen voidaan ajatella halkeilevan samalla tavalla kuin umpilaatan. Viiruminen huomioidaan kertoimella 0,7.

5.1.3 Menetelmän edut ja ominaisuudet

Kevennysrakenteilla voidaan saavuttaa 30 % materiaalisäästö betonissa ja raudoitteissa umpilaattaan verrattuna, ja rakenne voidaan mitoittaa minkä tahansa standardin mukaan. Kennot muodostavat työmaalla turvallisen kävelyalustan, sillä kuorilaattaan valettuina ne kestävät 180 kg:n kuorman ja kennojen pohjat ovat tasaisia ja kuvioituja. Myös yläpinnan raudoitteiden asentaminen onnistuu helposti tukipukkeina toimivien kennojen päälle. Kennojen asennusväli voidaan suunnitella harvemmaksi tukien lähellä ja jättää kokonaan pois pilareiden lävistysvyöhykkeellä. Lisäksi talotekniikan, kuten viemäriputkien, asennus onnistuu laatan sisään, sillä kennot voidaan suunnitella harvemmaksi taloteknisten asennusten ehdoilla. (AirDeck[®])

Muiden taloteknisten asennusten lisäksi AirDeck-laatassa voidaan käyttää ”Concrete core activation” -järjestelmää. Sen avulla rakenne saadaan luovuttamaan tai keräämään lämpöä siihen asennetun vesiputkiston avulla. Valmistaja lupaa esitteessään (Concrete core activation and Airdeck floors), että järjestelmän avulla huoneen lämpötila saadaan pysymään tasaisempana eri vuorokaudenaikoina, sillä betonirakenne sitoo lämpöä ja luovuttaa sitä tasaisesti koko laattapinta-alalta. Lämmitykseen ja jäähtymykseen voidaan käyttää esimerkiksi maalämpöä. Menetelmää on käytetty muun muassa kohteessa Hollandisch Huys, jossa lämmityskulut vuodessa ovat alle 1 €/m² (Clare 2013).

5.2 Cobiax

Cobiax on kuplarakenteeseen perustuva pilarilaatan kevennysjärjestelmä, jonka pääkonttori sijaitsee Sveitsissä. Menetelmän erot BubbleDeck-menetelmään ovat erilainen raudoitemoduuli sekä litteät versiot kuplista matalammille laatoille. Cobiax-järjestelmän pääpaino on paikallavalussa, mutta myös kuorielementtejä valmistetaan. Kuplat asennetaan laattaan putkimaisissa raudoitekehikoissa, joita voidaan liikutella käsivoimin ja pätkiä sopivan mittaisiksi. Raudoitemoduuli muodostuu kahdesta alapinnan ja yhdestä yläpinnan tangosta sekä pareittain olevista siteistä. Siteet yhdistävät ala- ja yläpinnan raudoitteet siten, että kuplat lukittuvat niiden väliin. Kuplien sitomisen lisäksi raudoitemoduulit myös parantavat kevennetyn rakenteen leikkaus- ja lävistyskestävyyttä sekä toimivat riittävinä siteinä liitovaikutuksen aikaansaamiseksi kuorielementtirakenteella. (Cobiax®)

Kevennysosista on olemassa kahta eri mallia. Pyöreitä kevennysosia on viittä kokoa, ja niillä voidaan tehdä 400–600 mm:n paksuisia laattoja. Niiden lisäksi on olemassa soikeita kevennysosia, joita on yhteensä seitsemän eri kokoa ja joilla voidaan tehdä 200–350 mm:n paksuisia laattoja. Kaikkien kevennysosien eri korkeudet ovat 100–450 mm. (Engineering Manual 2010)

Menetelmällä voidaan keventää laattaa enimmillään 35 % verrattuna umpilaattaan, jolla on sama kuormankantokapasiteetti. Betonisäästön lisäksi myös raudoitteissa säästetään keskimäärin 15 % umpilaattaan verrattuna. Rakenteen suunnittelu voidaan tehdä kuten umpilaatalla Eurokoodin mukaan käyttämällä negatiivisia kuormia omapainon keventämiseksi. Lisäksi laatta voidaan jälkijännittää jäykkien kaistojen avulla, jolloin päästään jopa 20 m:n jänneväleihin. (Mota 2010; Ptacek 2007)

5.2.1 Suunnittelu

Jotta Cobiax-rakenteen käyttö olisi tehokasta, olisi suunniteltavan kohteen lattiapinta-ala oltava vähintään 10 000 m² ja jännevälien vähintään 8 metriä (Sommer 2013). Laatan rakenne voidaan suunnitella käyttämällä mitä tahansa laattojen FEM-laskentaohjelmaa. Suunnittelussa on vain otettava huomioon kolme asiaa, jotka ovat pienempi omapaino, heikompi jäykkyys sekä heikompi leikkauskestävyys. Tässä osiossa on pääpiirteittäin selitetty Cobiax-laatan suunnittelu Engineering Manual -oppaan (2010) mukaisesti.

Kevennysrakenteet voidaan ottaa huomioon laskennassa negatiivisena kuormana. Valmistajan tuotetaulukosta valitaan käytettävä kevennysrakenne arvioidun laatan paksuuden mukaan ja katsotaan sitä vastaava kevennyskuorma laskentaa varten. Koska koko laatan pinta-alasta on normaalisti kevennetty vain 70–80 %, pienennetään kevennyskuorman arvo kertomalla se luvulla 0,7. Lisäksi jäykkyyden arvoa pienennetään kertomalla se arvolla 0,91 ohjelmiston sallimalla tavalla. Jos laatan taipuma kasvaa laskennassa liian suureksi, kasvatetaan laatan paksuutta, valitaan suurempi kevennysrakenne ja laskenta suoritetaan uudestaan toistamalla samat vaiheet.

Leikkausvoimamitoitus tehdään laskemalla ensin suurin sallittu leikkausvoima umpilaatalle ja pienentämällä sitten arvoa tuotetaulukossa olevien rakennetyyppi-kohtaisten kertoimien mukaan. Pienennettyä leikkausvoiman arvoa verrataan sitten laskennassa saatuun leikkausvoimajakaumaan, ja rakenne muutetaan umpilaataksi alueilta, joilla leikkausvoima ylittää käsin lasketun leikkausvoiman arvon. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi visualisoimalla värikarttaan alueet, joilla raja-arvo ylittyy, jollain ohjelmiston sallimalla tavalla. Jos laskenta halutaan tehdä tarkemmin ja pilareille halutaan määrittää todelliset normaalivoimat, keventävät kuormat voidaan konkreettisesti poistaa laskennasta alueita, joilla niitä ei sallita. Alueet saadaan viemällä raja-arvokäyrä CAD-ohjelmaan ja tuomalla ne uudestaan laskentaohjelman taustalle. Raja-arvokäyrän alueille määritetään kevennettyä ja umpilaattaa vastaavat kuormat uudestaan, minkä jälkeen laskenta ajetaan uudestaan ja laatan raudoitteet voidaan suunnitella. Jos saadut raudoitteet tulevat niin paksuiksi, että peitepaksuudet eivät täyty, on laskenta tehtävä uudelleen suuremmalla laatan paksuudella.

Cobias käyttää mitoitukseen AxisVM-nimistä ohjelmistoa, jossa on Cobias-moduuli kevennysrakenteiden suunnittelua varten. Ohjelmisto laskee oikean kokoiset kuplarakenteet laatan paksuuden mukaan ja keventää laattaa kuplatyyppin mukaan niiltä alueilta, joilta käyttäjä haluaa. Lisäksi ohjelma osaa määrittää kertoimet, joilla rakenteen taivutusjäykkyyttä ja leikkausvoimakestävyyttä pienennetään umpilaatan arvosta. Vaihtoehtoisesti käyttäjä voi antaa ne itse. Ensimmäisen laskennan tuloksena saadaan alueet, joilla leikkausvoimakestävyydet ylittyvät. Nämä alueet muutetaan massiivilaataksi, minkä jälkeen laskenta ajetaan uudestaan ja saadaan lopulliset laskentatulokset. (Engineering Manual 2010; Walker 2011) AxisVM-ohjelmiston lisäksi Eurokoodin mukainen Cobias-laskentamoduuli on saatavilla ainakin Scia Engineer 2012 -ohjelmistoon. Moduuli osaa muun muassa itse vähentää taivutusjäykkyyttä kuplakoon mukaan sekä poistaa kevennysrakenteet alueelta, jossa leikkauksen kapasiteetti ylittyy. (Voided slabs)

Kun laatta on saatu mitoitetua, voidaan kuplien asennuspiirustukset tehdä käyttämällä pohjana laatan laudoituspiirustusta. Kuplat piirretään tarkasti laudoituspiirustuksen päälle ja mitoitetaan reunoista paikalleen. Myös moduuleiden katkaisupituudet merkitään kuvaan. Vaikka laatan ja sen aukkojen reuna-alueilla ei vaikuttaisi leikkausvoimia, olisi niiltä jätettävä vähintään yksi kuplarivi pois. Tämä helpottaa työskentelyä ja laatan reunaterästen asennusta. Piirustuksiin merkitään lisäksi mahdolliset varaukset talotekniikalle, ja kuplamerkinnot poistetaan niiltä alueilta, joissa kuplat osuvat asennuksiin. (Engineering Manual 2010)

5.2.2 Paikallavalulaatan asennus

Koska kuplat sijaitsevat putkimaisten ja pätkittävien raudoitemoduuleiden sisällä, voidaan kuplat suunnitella ja asentaa laattaan vapaammin. Näin ollen esimerkiksi yksittäisiä kuplia tai kuplarivejä voidaan jättää pois taloteknisten asennusten tieltä, kuten kuvasta 5.2 nähdään. Kuplamoduulit ovat kevyitä käsitellä, ja työmiehet voivat yksin siirrellä niitä nostamalla yläpinnan raudoitetangosta. (Engineering Manual 2010)



Kuva 5.2. Cobiax-moduulit yhdessä talotekniikan kanssa (Engineering Manual 2010)

Suunnittelu- ja asennusoppaan (Engineering Manual 2010) mukaan paikallavalulaa-
tan tekeminen aloitetaan lisäämällä alapinnan raudoitteet laattamuotin tukipukkien pääl-
le. Kuplamoduulit asennetaan raudoitteiden päälle tarkasti asennuspiirustusten mukaan
siten, että niiden tangot asettuvat kohtisuoraan alapinnan terästen ylempien tankojen
päälle. Moduulit on sidottava surrilangalla kiinni alapinnan teräksiin. Kun kuplat ovat
paikallaan, asennetaan laatan reunateräkset sekä yläpinnan teräkset. Raudoitemoduulien
teräkset toimivat yläpinnan raudoitteiden korokepukkeina.

Kun laatta on raudoitettu ja asennukset tehty, voidaan laatta valaa. Valu tehdään
kahdessa osassa, jotta noste ei irrota moduuleita raudoitteineen muotin pinnasta. Toinen
valukerta voidaan aloittaa 2–3 tunnin kuluttua ensimmäisen valun jälkeen.

5.3 New Nautilus ja U-Boot Beton

Italiassa on kaksi samankaltaista kilpailevaa pilarilaatan kevennystuotetta, jotka ovat
New Nautilus ja U-Boot Beton. Menetelmät perustuvat kulmikkaisiin, polypropeenista
valmistettuihin kevennysrakenteisiin, joilla voidaan enimmillään pienentää laatan oma-
painoa 40 % ja saavuttaa 20 m jännevälejä. Kevennysrakenteista tekee erikoisen se, että
ne voidaan asentaa kahdella eri tavalla. Kupit voidaan asentaa matalammilla laatoilla
ylösalaisin alareunasta avoimina kuten Beeplate-rakenne tai umpinaisina asentamalla
kaksi kuppia vastakkain. New Nautilus -tuotetta valmistaa italialainen Geoplast-yritys ja
U-Boot Beton -tuotetta italialainen Daliform Group srl. Jälkimmäinen niistä valmistaa
myös U-Bahn Beton -nimistä tuotetta, jolla voidaan tehdä yhteen suuntaan kantavia
laattoja pitkien kennorakenteiden avulla. Tässä keskitytään kuitenkin vain ristiin kanta-

vien pilarilaattojen kevennysrakenteisiin, joten U-Bahn Beton jätetään käsittelemättä. (Geoplast S.p.A.; Daliform Group srl)

Tuotteet ovat periaatteeltaan ja ulkonäöltään hyvin samanlaisia, mutta joitakin eroja on. Suurin ero tuotteiden välillä on välikkeiden kiinnitystapa. New Nautilus käyttää välikkeitä, jotka kiinnitetään kupin reunassa olevaan reikään neppaamalla. Jos kaksi kuppia on liitetty vastakkain, jää välike siten rakenteen keskelle. U-Boot Beton -rakenteella välikkeet painetaan alaspäin olevan kupin pohjaan, jolloin välikkeet jäävät rakenteen yläpintaan. Muita näkyviä eroja on lähinnä kupprien kuvioinnissa sekä siinä, että U-Boot Beton -rakenteella on laajempi tuotevalikoima: yksittäisten kupprien pohjaan voidaan asentaa sulkukansia sekä kuppeja voidaan silloittaa yhteen käyttämällä erityisiä siltarakenteita. (emt.)

Menetelmillä on muutamia etuja verrattuna muihin kevennysmenetelmiin. Molempien valmistajien kupit voidaan asentaa minkä tahansa raudoitteen kanssa ja ne eivät välttämättä vaadi umpinaisen pilarilaatan raudoitteista poikkeavia raudoitteita. Kupit voidaan myös varastoida ja kuljettaa pinottuina sisäkkäin toisin kuin kuplarakenteet. Lisäksi kupit luovat tukevan ja tasaisen työskentelyalustan, kun ne on liitetty yhteen. U-Boot Beton -menetelmän erityinen etu on se, että sen yläpinta voidaan raudoittaa myös irtotangoilla miten päin tahansa kuppeihin nähden, sillä siteet ovat samassa tasossa kupprien yläpinnan kanssa. (emt.)

Vaikka valmistajat lupaavat nopeaa asennusta, voidaan menetelmien suurimpana haittapuolena mainita asennustyön vaatima työmäärä, sillä jokainen kevennyskuppi on sidottava aina viereisiin kuppeihin. Työmäärä lisääntyy vielä, jos kupit liitetään vastakkain ja jokaisen kevennysosan pohjaan kiinnitetään neljä korocejalkaa.

5.3.1 Rakenteet

New Nautilus -menetelmällä kevennyskuppeja on kolmea eri kokoa, ja yksittäisten kupprien korkeudet ovat 160, 200 ja 240 mm ja vaakamitat 520 x 520 mm. Yhdistämällä kuppikokoja vastakkain kasvaa kevennysosien korkeudet mittoihin 320, 360, 400 ja 440 mm. Kupit sidotaan toisiinsa säädettävillä välikkeillä, joiden pituus voidaan valita välillä 120–200 mm lyhentämällä välikettä. Kupit voidaan myös irrottaa laatan raudoitteista asentamalla kupprien pohjaan korocejalkoja. Korocejalkojen korkeudet ovat 50–100 mm 10 mm:n välein. (Geoplast S.p.A)

U-Boot Beton käyttää kuutta erikorkuista kuppia, joita yhdistelemällä voidaan tehdä 22 eri rakennekorkeutta. Yksittäisten kupprien korkeudet ovat 100–280 mm ja yhdistelmällä päästään siten 560 mm korkeuteen. U-Boot Beton -menetelmällä tosin on totutettu myös paksumpia laattoja, joissa kolme kuppia on pinottu päällekkäin. Alinta kennoa ei voida sitoa ylempiin mekaanisesti vaan laatta on valettava kolmessa osassa. Vaakamitat ovat 520 x 520 mm eli samat kuin kilpailijalla. (Daliform Group srl)

U-Boot Beton -menetelmän käyttämät korocejalat ovat vastaavat kuin mitä New Nautilus käyttää, mutta välikkeet ovat erilaisia. U-Boot Beton -menetelmän välikkeet ovat hammastettuja ja säädettäviä, ja niiden kiinnittäminen on näppärää, sillä ne voidaan painaa suoraan kevennysosien yläpintaan. Ne eivät myöskään ole tiellä, jos kupprien

väliin asennetaan sidepalkkimaisia leikkausraudoitteita. Tyypillinen uuman leveys on 140 mm. (emt.)

5.3.2 Suunnittelu

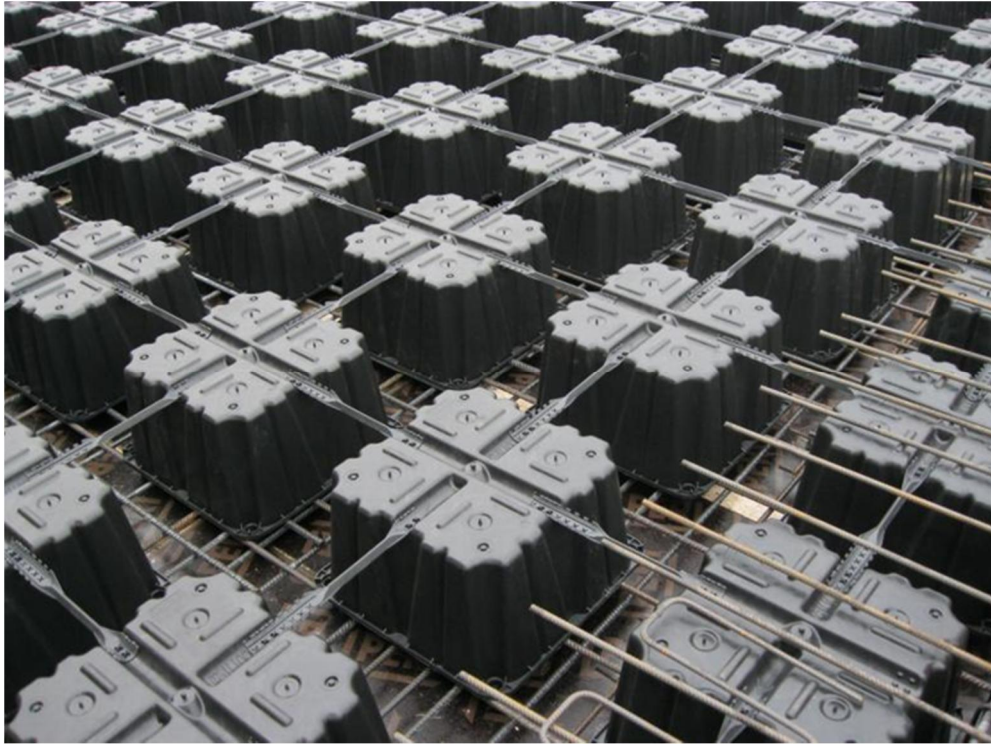
Laatat voidaan suunnitella FEM-laskennalla käyttämällä negatiivisia kuormia ja pienentämällä rakenteen jäykkyyttä ja leikkauskestävyyttä. Daliform Group srl lupaa, että rakenteen jäykkyys pienenee enimmillään 15 % umpilaattaan verrattuna. Pienin sallittu betonin lujuusluokka on C25/30, notkeusluokka S5 ja rakeisuuden on oltava sellainen, että betoni ei pääse erottumaan. Kevennysrakenteiden väliin voidaan suunnitella tarvittaessa vastaavanlaisia leikkausteräksiä kuin mitä AirDeck tai Beeplate käyttää. Kupprien ja niiden yhdistelmien tilavuudet sekä säästettävät betonimäärät (m^3/m^2) eri välikkeiden pituuksilla on taulukoitu ja ne ovat saatavilla yritysten sivuilta suunnittelua varten. (Geoplast S.p.A.; Daliform Group srl)

U-Boot Beton -järjestelmän edustajan (Il Grande 2013) mukaan laatta voidaan mallintaa monella tavalla. Yksi menetelmä on käsitellä laatan osaa I-poikkileikkauksena, jolloin laatan neliömomentti I pienenee. Laatan ”virtuaalinen korkeus” voidaan siten ratkaista umpinaisen poikkileikkauksen neliömomentin kaavasta. Vaihtoehtoisesti betonin massaa voidaan pienentää tilavuuden mukaan tai käyttämällä pienennyskerrointa. Kun laatta mitoitetaan FEM-laskentana, voidaan laatta mallintaa käyttämällä virtuaalista laatan paksuutta tai pienennettyä neliömomenttia. Laatta mitoitetaan leikkaukselle kennon välissä olevassa täydessä suorakaidepoikkileikkauksessa, kuten Beeplate-laatatalla.

New Nautilus -järjestelmän sivuilla (Geoplast S.p.A.) on myös lomake, jolla voi pyytää tarjouksen haluamastaan laatasta. Lomakkeeseen syötetään vain omat tiedot, kevennetyn laatan paksuus ja pinta-ala sekä liitetään mahdolliset piirustukset ja kuvaukset laatasta ja kohteesta.

5.3.3 Asennus

Asennusperiaate on samankaltainen Beeplate-laatan kanssa eli kennot asennetaan alapinnan raudoitteen päälle ja liitetään toisiinsa välikkein. Kuvassa 5.3 on esitetty alhaalta avoin U-Boot Beton -single-rakenne, mistä on hyvin nähtävissä kupprien säädettävät välikkeet sekä kupprien sijoittuminen alapinnan raudoitteiden päälle.



Kuva 5.3. Alhaalta avoin U-Boot Beton -rakenne (Daliform Group srl)

Kevennysosat voidaan asentaa, kun muottityö on tehty ja alapinnan raudoitteet asennettu. Kun kupit on asennettu, lisätään laatan reunateräksiset, lävistymisteräksiset ja muut mahdolliset raudoitteet. Valu voidaan aloittaa, kun kaikki raudoitteet on asennettu mukaan lukien yläpinnan verkko. Laatta valetaan kahdessa osassa, jotta kevennysrakenteet eivät kohoa nosteen vaikutuksesta. Ensimmäisen valun tulee peittää korkejalat sekä kupin uloimmat reunat. Kun valu on jähmettynyt riittävästi, voidaan rakenne valaa umpeen ja tasoittaa valmiiksi betonipinnaksi. (Geoplast S.p.A.; Daliform Group srl)

6 BEEPLATE-LAATAN MITOITUS

Tässä luvussa on esitetty kevennetyn pilarilaatan mitoitus käyttämällä esimerkkinä Beeplate-laatan mitoitusta. Mitoitusohjeet on esitetty Eurokoodien mukaiselle mitoitukselle, ja niissä keskitytään epälineaariseen FEM-laskentaan.

Beeplate -laatan mitoitus ei sovellu suoraan käytettäväksi muille uudentlaisille kevennysmenetelmille, mutta sitä voidaan soveltaa tietyin rajoittein. Muiden menetelmien mitoituksessa huomioitavia asioita on esitetty eri menetelmiä käsittelevissä luvuissa suunnittelua koskevissa osioissa.

6.1 Voimasuureiden laskenta

Pilarilaatan mitoitusvoimasuureiden laskentaan on kehitetty menetelmiä, joita voidaan hyödyntää myös kevennetyn pilarilaatan mitoitukseen. Eurokoodinmukaisille murto- ja käyttörajatilatarkasteluille soveltuvat laskentamenetelmät ovat kimmoteoria sekä numeeriset menetelmät, jotka perustuvat elementtimenetelmään. (Nykyri 2011b; SFS-EN 1992-1-1 2005)

Vaikka voimasuureet voidaan laskea käsilaskentamenetelmillä, suositeltu voimasuureiden laskentamenetelmä on kuitenkin epälineaariseen analyysiin perustuva FEM-laskenta (Hegger et al. 2013). Tämä johtuu siitä, että taipumatarkastelu ja mahdollinen halkeilu- ja virumatarkastelu on mahdollista toteuttaa nopeasti kohtuullisella tarkkuudella. Lisäksi kevennetyn laatan umpinaiset alueet on helpompi suunnitella ja optimoida tarkan leikkausvoimakartan avulla. Näin ollen laatan kevennetyn osan pinta-ala saadaan mahdollisimman isoksi.

6.1.1 Rakenneluokka ja betonin lujuus

Valmistaja on käyttänyt ohjeessaan (Recommended Static Calculation according to EC2 2011) betonin osavarmuudelle arvoa 1,5 ja teräksen osavarmuudelle 1,15, jotka ovat rakenneluokan 2 osavarmuuslukuja. Vaikka Eurokoodin Suomen kansalliset liitteet mahdollistavat myös rakenneluokan 1 käytön, käytetään tässä ohjeessa valmistajan käyttämää rakenneluokkaa 2.

Kennojen välisiin uumiin kohdistuvien suurten leikkausvoimien johdosta Beeplate-laatalle suositellaan käytettäväksi betonia, jonka lujuus on välillä C35/45 ja C45/55. Betonin lujuusluokan olisi kuitenkin oltava vähintään C30/37. (Hegger 2013)

Suuremman betonin lujuusluokan johdosta umpilaatan osuus pienenee ja laattaa voidaan keventää prosentuaalisesti suuremmalta laatan pinta-alalta. Tässä luvussa esitetty laskentatapa ei kuitenkaan sovellu lujuusluokan C50/60 ylittävälle betonille.

6.1.2 Laatan paksuuden valinta

Laatan paksuus voidaan valita taipumarajan mukaan. Eurokoodi 2:n (SFS-EN 1992-1-1 2005) kohdassa 7.4.2 (2) on esitetty jännemitan ja korkeuden suhteen rajat, joita käyttämällä taipuma voidaan olettaa pysyvän EC2:n kohtien 7.4.1 (4) ja (5) vaatimissa rajoissa, ja niiden pitäisi soveltua kaikille rakenteille. Toisaalta BY 210:n (2005) mukaan kaavat soveltuvat hyvin vain yhteen suuntaan kantaville rakenteille, joille kaavat antavat l/d-suhteeksi noin 30 betonin lujuusluokan ollessa C35/45.

Ristiin kantavalla laatalle suhdeluvun pitäisi olla suurempi, mutta toisaalta laatan keventäminen lisää taipumaa. Valmistaja ei kuitenkaan ole antanut laatan l/d-suhteelle mitään arvoja. Tämän työn luvussa seitsemän esitetyn laskennan tulosten perusteella voidaan todeta, että pilarilaatan l/d-suhteelle arvoa 30 voidaan pitää hyvänä arviona. Lopullinen laatan paksuus selviää vain kokeilemalla, sillä taipuman suuruuteen vaikuttaa monta tekijää.

6.1.3 Kuormat, kuormakaaviot ja kuormayhdistelmät

Kevennettyjen pilarilaattojen kuormayhdistelmät tehdään yhdessä standardin SFS-EN 1990 kanssa käyttämällä kansallisen liitteen NA SFS-EN 1990 kuormayhdistelmiä. Kuormat on esitetty standardeissa EN 1991-1-1...6 sekä niiden kansallisissa liitteissä NA SFS-EN 1991-1-1...5.

Kevennyskuorma otetaan laskennassa huomioon pysyvänä kuormana, joten sille käytetään samoja varmuuskertoimia kuin betonilaatalle. Kuorma sijoittuu tasaisesti niille alueille, joilla kevennysrakenteet ovat symmetrisesti, ja sen suunta on ylöspäin. Kuorman suuruus voidaan katsoa valmistajan antamista taulukoista, laskea käsin kevennysrakenteiden syrjäyttämän betonin tilavuudesta tai kertomalla laatan paino annetulla kevennysprosentilla. Beeplate-laatalle keventävien kuormien suuruudet on laskettu ja taulukoitu jokaiselle kennotyypille erikseen.

Ohjelmistosta riippuen kevennyskuorma voidaan asettaa monella tavalla. Yksi tapa on jakaa kuorma ensimmäisellä laskentakerralla tasaisesti koko laatan alueelle ja poistaa se sitten alueilta, joilla leikkausvoimat ylittävät kevennetyn rakenteen leikkauskestävyyden ylärajan. Käytettäessä keventäviä kuormia on oltava tarkkana, että kuormien varmuuskertoimet tulevat oikein kuormayhdistelmiä tehtäessä. Toinen mahdollisuus on pienentää kevennysprosentin verran laatan tilavuuspainoa, mutta silloin laatan tukivoimia ei voida määrittää tarkasti, ellei umpinaisen laatan osan painoa palauteta normaaliksi esimerkiksi lisäkuormien avulla.

Liikkuvat hyötykuormat sijoitetaan vaikuttamaan pilarilaatalle kolmella tavalla: tasaisesti koko laatan alueelle, shakkimuodostelmiin sekä kahden vierekkäisen kentän yhdistelmiin. Liikkumattomat kuormat, kuten kevyiden väliseinien kuormat, voidaan jakaa laatalle tasaiseksi kuormaksi.

Rakenne mitoitetaan taivutukselle, leikkaukselle ja lävistykselle murtorajatilan kuormayhdistelmän yleistä muotoa. Taipuma lasketaan tavallisella yhdistelmällä ja halkeamaleveys pitkäaikaisyhdistelmällä. Halkeamaleveys voidaan laskea käytännön syistä myös tavallisella yhdistelmällä, mutta se hieman ylittää rakenteen halkeamaleveydelle.

6.2 Taivutus

Kevennetty laatta voidaan mitoitaa taivutukselle kuten umpilaatta, ja mitoitus voidaan tehdä millä tahansa laatoille soveltuvalla FEM-ohjelmalla. Ohjelmistot osaavat tavallisesti laskea myös tarvittavat vetoteräksät ylä- ja alapintaan voimasuureiden perusteella.

Raudoitteet voidaan laskea myös käsin taivutusmomenttien mukaan seuraavasti laskemalla ensin suhteellinen momentti μ kaavalla 6.1

$$\mu = \frac{m_{Ed}}{f_{cd} \cdot d^2} \quad (6.1)$$

missä

m_{Ed} on momentin arvo jaettuna metrille

$f_{cd} = \frac{f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_c}$ on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo

f_{ck} on betonin puristuslujuuden ominaisarvo

$\alpha_{cc} = 0,85$ on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät

$\gamma_c = 1,5$ on betonin osavarmuusluku

d on poikkileikkauksen tehollinen korkeus

Kerroin α_{cc} valitaan EC2:n Suomen kansallisen liitteen (NA SFS-EN 1992-1-1 2007) mukaan. Sijoittamalla μ kaavaan 6.2 saadaan puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu} \quad (6.2)$$

Sisäinen momenttivarsi saadaan siten laskettua kaavalla 6.3.

$$z = d \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \quad (6.3)$$

Sijoittamalla z kaavaan 6.4 saadaan laskettua tarvittava vetoraudoituksen pinta-ala A_s .

$$A_s = \frac{m_{Ed}}{z \cdot f_{yd}} \quad (6.4)$$

Raudoituksen ankkurointi voidaan tehdä EC2:n kohtien 8.4.3 ja 8.4.4 mukaan. Ankkurointipituuden mitoitusarvo saadaan kertomalla ankkurointipituuden perusarvo EC2:n taulukon 8.2 kertoimilla ja vertaamalla sitä ankkurointipituuden vähimmäisarvoon.

6.3 Leikkaus

Leikkausmitoitus lasketaan käsin mitoitusohjelmista saatujen murtorajatilan leikkausvoimajakaumien perusteella. Suunnitteluohjeessa Recommended Static Calculation according to EC2 (2011) sekä mitoitusta koskevassa tutkimusraportissa (Hegger et al. 2013) on annettu suosituksia, kuinka leikkausmitoitus voidaan tehdä EC2:n (SFS-EN 1992-1-1 2005) mukaan vastaavasti kuin umpilaatalla käyttämällä pienempää poikkileikkauspinta-alaa betonille. Mitoituksessa leikkaukselle ajatellaan, että ainoastaan kenojen välinen betoni uuman kapeimmassa kohdassa välittää leikkausvoimia.

Leikkausraudoitetun kevennetyn laatan leikkauskestävyydelle on tarkastettava seuraavat kolme raja-arvoa:

- $V_{Rd,c}$, joka on leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyys.
- $V_{Rd,s}$, joka on leikkausraudoituksen myötäämiseen perustuva leikkauskestävyyden mitoitusarvo.
- $V_{Rd,max}$, joka on leikkauskestävyyden yläraja, joka perustuu betonin puristusmurtoon.

Laatta suunnitellaan leikkausraudoittamattomana kevennetyn laatan alueilla, joilla leikkausraudoittamattoman rakenteen leikkauskestävyyden raja-arvo $V_{Rd,c}$ ei ylity. Raja-arvon ylittävillä alueilla lisätään erillinen leikkausraudoitus, joka yksin siirtää alueen leikkausvoimat. Leikkausraudoituksen leikkauskestävyyden mitoitusarvo $V_{Rd,s}$ ei saa ylittää leikkauskestävyyden ylärajaa $V_{Rd,max}$. Jos jommankumman arvo näistä ylittyy, on laatta tehtävä siltä osin umpinaisena.

6.3.1 Beeplate-laatan leikkauskestävyyden yläraja

Leikkausmitoitus aloitetaan laskemalla leikkauskestävyyden yläraja $V_{Rd,max}$. EC2 kohdan 9.3.2 mukaan $v_{Rd,max}$. Koska Beeplate leikkausraudoitetaan erillisillä Z-teräksillä, on sen leikkauskestävyyden ylärajaa pienennettävä.

Pystysuorilla haoilla leikkausraudoitetun rakenteen leikkauskestävyyden yläraja $V_{Rd,max}$ lasketaan yleisesti EC2 kohdan 6.2.3 mukaan kaavalla 6.5.

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{(\cot \theta + \tan \theta)} \quad (6.5)$$

missä

$$\alpha_{cw} = 1,0$$

on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon poikkileikkauksen puristusjännitystilän vaikutus. Kerroin α_{cw} voidaan esittää kansallisessa liitteessä

$$b_w$$

on tarkasteltavan laatanosan leveys

$z = 0,9 \cdot d$	on poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarsi
d	on poikkileikkauksen tehollinen korkeus
$v_1 = v = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$	on leikkausvoiman vaikutuksesta halkeilleen betonin lujuuden pienennyskerroin. Pienennyskerroimen v_1 suositusarvo on v , tai se voidaan esittää kansallisessa liitteessä
f_{cd}	on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
θ	on betonin puristussauvojen ja leikkausvoimaa vastaan kohtisuorassa olevan rakenneosan akselin välinen kulma

Kertoimet α_{cw} ja v_1 voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Kulman θ arvo on oltava välillä 21,8–45 astetta.

Koska Beeplate-laatan leikkausraudoituksena käytetään erillisiä Z-teräksiä ja koska laatan leikkaus ajatellaan välittyvän vain uumien kautta, sen leikkausraudoitetun laatan suurin leikkauskapasiteetti kennojen alueella lasketaan kaavalla 6.6.

$$v_{Rd,max} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{(\cot \theta + \tan \theta) \cdot \gamma_c \cdot (d_H + b_w)} \quad (6.6)$$

missä

d_H	on kennon halkaisija [mm]
$b_w = 100 \text{ mm}$	on uuman kapeimman kohdan leveys [mm]
θ	on betonin puristussauvojen ja leikkausvoimaa vastaan kohtisuorassa olevan rakenneosan akselin välinen kulma

Leikkauskapasiteetin raja-arvon tunnus merkitään pienellä, jotta voidaan tunnistaa sen olevan jaettu metrin levyiselle kaistalle kevennettyä laattaa. Koska betonin puristuskapasiteetti on saatava mahdollisimman suureksi, valitaan kulman θ arvoksi 45°. Sijoittamalla edellä mainitut lukuarvot kaavaan 6.7 kaava 6.6 voidaan myös antaa muodossa

$$v_{Rd,max} = \frac{100 \text{ mm} \cdot z \cdot 0,6 \cdot \left(1 - f_{ck}/250\right) \cdot f_{ck} \cdot 0,85}{9 \cdot (d_H + 100 \text{ mm})} \quad (6.7)$$

Beeplate on taulukoinut suurimpien leikkauskapasiteettien arvoja ohjeeseensa (2011) käyttämällä kertoimelle α_{cc} arvoa 1. Jotta arvot vastaisivat Suomen kansallista liitettä, niitä on pienennettävä kertoimella 0,85. Jos kevennetyn laatan suurimman leikkauskapasiteetin arvo ylittyy, on laatta tehtävä siltä osin umpinaisena.

6.3.2 Mitoitus leikkaukselle leikkausraudoittamattomana

Massiivilaatan alueet, joilla leikkausraudoitusta ei tarvita voidaan suunnitella leikkausraudoittamattomina. Kaavalla 6.8 lasketaan Beeplate-laatan leikkausraudoittamattoman rakenneosan leikkauskestävyyden mitoitusarvo, jonka vähimmäisarvo tarkistetaan lisäksi kaavalla 6.9.

$$v_{Rd,c} = \frac{[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3}] \cdot b_w \cdot d}{d_H + b_w} \quad (6.8)$$

$$v_{Rd,c} = \frac{(v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d}{d_H + b_w} \quad (6.9)$$

missä

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

missä d on millimetreinä

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 0,02$$

$$A_{sl} = a_{sl} \cdot (d_H + b_w)$$

on tarkasteltavassa poikkileikkauksessa momentin itseisarvon pienenemissuuntaan vähintään mitan ($l_{db} + d$) verran ulottuvan vetoraudoituksen pinta-ala

f_{ck}

on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

$$k_1 = 0,15$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 \cdot f_{cd}$$

on normaalivoimasta painopisteakselille aiheutuva betonin puristusjännitys

N_{Ed}

on kuormituksesta aiheutuva poikkileikkauksen normaalivoima

A_c

on betonin poikkileikkausala

Jos laatta on jännittämätön ja siinä ei vaikuta normaalivoimaa, voidaan kaavan termi $k_1 + \sigma_{cp}$ jättää pois.

6.3.3 Leikkausraudoitteiden mitoitus

Alueiden, joilla leikkausraudoittamattoman betonin leikkauskestävyyden mitoitusarvo $V_{Rd,c}$ ylittyy, leikkausvoima on välitettävä pystysuuntaisilla, Z-mallisilla leikkausteräksillä. Kun rakennesosassa on vertikaalinen leikkausraudoitus, leikkauskestävyys V_{Rd} on pienempi arvoista $V_{Rd,max}$ ja $V_{Rd,s}$. $V_{Rd,s}$ on leikkausraudoituksen myötäämiseen perustuva leikkauskestävyyden mitoitusarvo, ja se lasketaan kaavalla 6.10.

$$v_{Rd,s} = \frac{a_{sw} \cdot f_{yk} \cdot z \cdot \cot \theta}{\gamma_s \cdot (d_H + b_w)} \quad (6.10)$$

missä

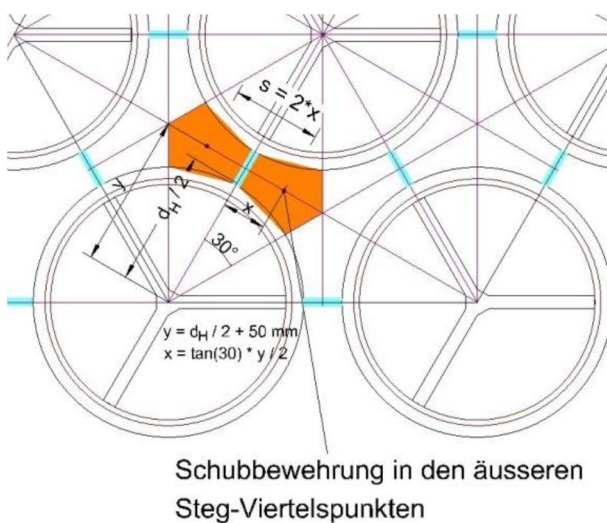
$a_{sw} = A_{sw}/s$	on uuman leikkausraudoituksen pinta-ala jaettuna leikkausterästen keskinäisellä etäisyydellä [mm^2/m]
A_{sw}	on uuman leikkausraudoituksen pinta-ala
s	on vaakasuuntainen leikkaushakojen välinen etäisyys
f_{yk}	on betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo
z	on poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarsi
θ	on betonin puristussauvojen ja leikkausvoimaa vastaan koh-tisuorassa olevan rakenneosan akselin välinen kulma
γ_s	on betoniteräksen osavarmuusluku
d_H	on kennon halkaisija
b_w	on uuman leveys

Leikkausterästen keskinäinen etäisyys uumassa on esitetty kuvassa 6.1, ja se laske-taan kaavalla 6.11.

$$s = 2 \cdot \left(\tan(30^\circ) \cdot \frac{d_H}{2} + 50 \right) \quad (6.11)$$

missä

d_H on kennon halkaisija millimetreinä



Kuva 6.1. Uuman neljännespisteet (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Leikkausteräksiksi valitaan tyypillisesti esimerkiksi yksi Ø12 Z-teräs jokaiseen uu-man neljännespisteeseen kevennetyn laatan alueella, jossa leikkausraudoittamattoman kevennetyn laatan leikkaukaskapasiteetti ylittyy. Leikkausvoima ei kuitenkaan saa ylittää leikkausraudoitetun laatan leikkaukaskapasiteetin ylärajaa $v_{Rd,max}$. Jos raja ylittyy, on laatta tehtävä siltä osin umpinaisena.

6.4 Lävistys

Beeplate-laatta mitoitetaan lävistykselle pilarin kohdalla murtorajatilassa samalla tavalla kuin umpilaatta. Eurokoodin Suomen kansallisessa liitteessä on sanottu, että lävistysmitoitus tehdään Suomen rakentamismääräyskokoelman B4 ”Betonirakenteet, ohjeet” kohdan 2.2.2.7 mukaan. Laskennassa käytetään kuitenkin poikkeuksellisesti Eurokoodin mukaisia kuormia ja osavarmuuslukuja.

Laatan betonin lävistyskapasiteetti lasketaan kaavasta 6.12.

$$V_{Rd,c} = k \cdot \beta \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u \cdot d \cdot f_{ctd} \quad (6.12)$$

missä

$k = 1,6 - d \geq 1,0$ on tehollisen korkeuden vaikutuskerroin, jossa d on metreinä, kun $\rho_c \geq 2400 \text{ kg/m}^3$

$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5 \cdot e}{\sqrt{A_u}}}$ kuorman epäkeskisyyden huomioon ottava kerroin

A_u piirin u rajaama pinta-ala

$\rho = \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y}$ on suhteellinen teräspinta-ala, jossa otetaan huomioon kohtisuorissa suunnissa x ja y etäisyydellä $0,5d$ tuen reunasta ankkuroitu raudoitus

u on tuen reunasta etäisyydellä $0,5d$ olevan leikkauksen rajaama piiri

Jos lävistysvoima V_{Ed} ylittää lävistyskapasiteetin arvon, on pilarin kohdalle lisättävä leikkausraudoitus. Betonin lävistyskapasiteetista voidaan ottaa neljännes huomioon lävistymisraudoitusta laskettaessa kaavan 6.13 mukaisesti.

$$V_{Rd} = 0,25 \cdot V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \leq 2 \cdot V_{Rd,c} \quad (6.13)$$

Leikkausraudoituksen kapasiteetti $V_{Rd,s}$ lasketaan kaavasta 6.14.

$$V_{Rd,s} = A_{sv} \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha \quad (6.14)$$

missä

A_{sv} on lävistymisraudoituksen poikkipinta-ala

$f_{yd} \leq 300 \text{ MPa}$ on betonin puristuslujuuden rajoitettu mitoitusarvo

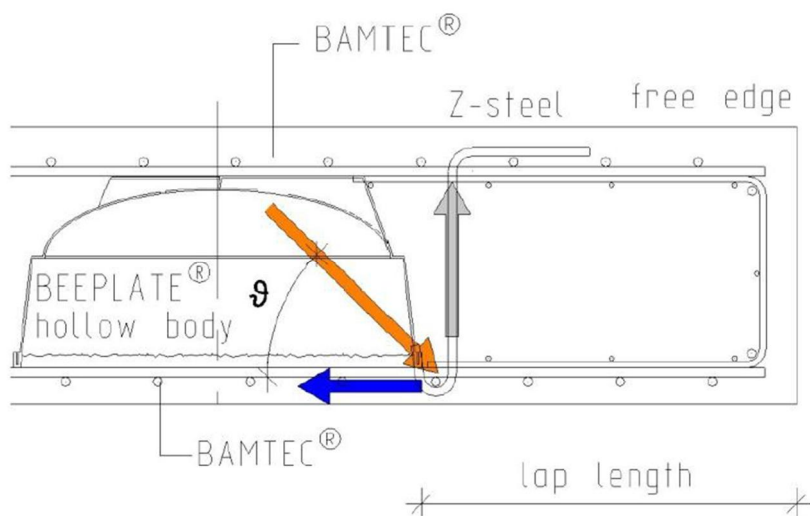
α on raudoituksen ja laatan tason välinen kulma, jonka on oltava vähintään 30°

Muita vaihtoehtoisia keinoja lävistymisen estämiseksi ovat pilarin koon kasvattaminen, betonisien tekeminen, vahvistuslaatta, betonin lujuusluokan kasvattaminen tai UFO-lävistysvahvikkeen käyttö. UFO:n avulla voidaan kasvattaa pilarin kokoa mitoituksessa lävistykselle ja se soveltuu käytettäväksi yhdessä Bamtec-mattoraudoitteen kanssa. Suurempi tukipinta-ala kasvattaa leikkauspinnan piiriä, jolloin laatta voi kestää

läpileikkautumisen ilman taivutettuja lävistymisleikkausraudoitteita. UFO-raudoitteella kasvatettua tuenleveyttä ei kuitenkaan saa huomioida mitoituksessa taivutukselle. (Ålander 2013)

6.5 Laatan reunan teräkset

Laatan vapaalle reunalle vaaditaan tavallisten reunaterästen lisäksi Z-teräksiä ottamaan vastaan taivutuksen aiheuttamat laatan alapintaan kohdistuvat vetovoimat, kuten kuvassa 6.2 on esitetty. Teräkset asennetaan jokaisen kennon ulkoreunan kohdalle, ja niiden mitoituksesta on annettu esimerkki valmistajan oppaassa Recommended Static Calculation according to EC2 (2011). Oppaassa esiteltyjä laskelmia on tulkittu ja muokattu kaavoiksi.



Kuva 6.2. Laatan reunan Z-teräs (Recommended Static Calculation according to EC2 2011)

Laatan uuman leikkausraudoituksen väittämä leikkausvoima lasketaan kaavalla 6.15.

$$V_{Ra,s} = \frac{a_{sw} \cdot f_{yk} \cdot z}{\gamma_s} \quad (6.15)$$

missä

a_{sw} on uuman leikkausraudoituksen pinta-ala jaettuna leikkausterästen keskinäisellä etäisyydellä [mm^2/m]

f_{yk} on betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo

z on poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarssi

γ_s on betoniteräksen osavarmuusluku

Puristava voima uumassa ajatellaan siirtyvän reunimmaisesta kennolinjan keskeltä yläpinnasta kennoston reunaan alapintaan. Voiman kulma vaakatasoon nähden saadaan laskettua kaavalla 6.16.

$$\vartheta = \tan^{-1} \frac{z}{(d_h + b_w)/2} \quad (6.16)$$

missä

z on poikkileikkauksen sisäisten voimien momenttivarsi

d_h on kennon halkaisija

b_w on uuman leveys

Puristavan voiman vaakasuora komponentti betonissa saadaan kaavalla 6.17.

$$H = \frac{V_{Steg}}{\tan \vartheta} \quad (6.17)$$

missä

$$V_{Steg} = V_{Rd,s}$$

Näin ollen ylösvedettävä voima Z saadaan laskettua kaavalla 6.18.

$$Z = H \cdot \sin 30^\circ \quad (6.18)$$

Tarvittavan vetorausituksen poikkipinta-ala saadaan kaavasta 6.19.

$$A_{s,erf} = \frac{Z}{f_{yk}/\gamma_s} \quad (6.19)$$

6.6 Taipuman rajoittaminen

Laatan taipuma on rajoitettu EC2:ssa arvoon $L/250$ ja se voidaan tarkistaa FEM-laskennasta käyttörajatilakuormilla saadun kimmoisen taipuman f_{el} suurimman arvon avulla. FEM-mallinnuksella on todettu (Hegger 2013), että Beeplate-laatan taivutusjäykkyys on 30 % vastaavanpaksuisen umpilaatan arvoa pienempi. Tästä syystä saadun kimmoisen taipuman arvoa on kasvatettava kaavan 6.20 mukaisesti. Beeplate-laatan todellinen taipuma f on siten

$$f = f_{el} \cdot \gamma_{el} = f_{el} \cdot 1,4 \quad (6.20)$$

missä

f_{el} on kimmoisen taipuma

γ_{el} on kimmoisen taipuman osavarmuuskerroin Beeplate-laatalle

Vaihtoehtoisesti voidaan laskea pienennetyn kimmomodulin E arvo kaavan 6.21 mukaan.

$$E = E_{cm} \cdot 1/1,4 \quad (6.21)$$

missä

E_{cm} on sekanttimoduuli

EC2:n sekä sen kansallisen liitteen (NA SFS-EN 1992-1-1 2007) mukaan taipumaa ei tarvitse tarkastella, jos kaavoissa esitetyt hoikkuusrajat jännemitan ja korkeuden suhteen toteutuvat. Toisaalta BY 210:ssä (2005) sanotaan, että Eurokoodissa esitetyt kaavat eivät päde pilarilaatalle, sillä tukien raudoitusta ei oteta huomioon. BY 210:n mukaan pilarilaatoille pitäisi käyttää Eurokoodin hoikkuusrajan sijaan esimerkiksi Ranganin menetelmää.

Taipuman laskenta käsin on kuitenkin työlästä, sillä taipumaan vaikuttaa muun muassa betonin kutistuminen ja viruminen. Tästä syystä taipuman laskenta kannattaa tehdä FEM-laskentana käyttämällä betonille pienennettyä sekanttimoduulia tai kertomalla kimmainen taipuma osavarmuuskertoimella. Osassa ohjelmistoista laatalle on annettava virumaluku, jotta taipuma voidaan laskea. Virumaluku voidaan määrittää tarkasti EC2:n liitteen B.1 mukaan tai sille voidaan alustavassa laskennassa antaa hyvä arvio, kuten 2,0. Kuormayhdistelmänä taipuman laskennassa käytetään tavallista kuormayhdistelmää.

Koska taipuma tulee kevennetyllä pilarilaatalla yleensä mitoittavaksi tekijäksi umpilaattaa heikomman taivutusjäykkyuden vuoksi, voidaan laatalle tehdä esikorotus. Esikorotus voidaan asettaa suunnilleen samaksi kuin mitä laatta taipuu omasta painosta. EC2 kohdassa 7.4.1 on lisäksi sanottu, että muotin avulla muodostettu esikorotus saa olla yleensä enintään $L/250$.

6.7 Halkeilun rajoittaminen

Laatan halkeamaleveydet rajoitetaan käyttörajatilassa rasitusluokkien mukaan. Bubble-Deck-menetelmän raportin (BubbleDeck Engineering Design & Properties Overview 2007) mukaan kevennetyn laatan halkeamat tulevat umpilaattaa suuremmiksi, ellei betonin keskimääräistä vetolujuutta f_{cm} pienennetä laskennassa jollain kertoimella. Beep-late-laatan betonin vetolujuudelle valmistaja ei ole antanut mitään pienennyskerrointa. Mikäli halkeilua tarkastellaan numeerisin menetelmin, olisi siihen käytettävä epälineaarista FEM-laskentaa pienennettyä betonin vetolujuuden arvoa käyttäen.

Valmistajan teettämässä tutkimusraportissa (Hegger 2013) kuitenkin esitetään, että kevennetyn laatan halkeilu voitaisiin rajoittaa vastaavasti kuin umpilaatalla EC2:n kohdan 7.3 mukaisesti. Ainoastaan kevennetyllä alueella laatan alapinnan halkeilutarkastelussa betonipoikkileikkauksen vedetyn osan pinta-alana juuri ennen halkeaman muodostumista olisi käytettävä vain kennoston alapuolisen laatanosan pinta-alaa. Vähimmäisraudoitusala voidaan siten laskea jännittämättömälle laatalle kaavalla 6.22 EC2:n kohdan 7.3.2 mukaan.

$$A_{s,min} \cdot \sigma_s = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct} \quad (6.22)$$

missä

$A_{s,min}$ on raudoituksen vähimmäisala vetoalueella

σ_s	on raudoituksen sallitun suurimman jännityksen itseisarvo välittömästi halkeaman muodostumisen jälkeen
k_c	on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon jännitysten jakauma poikkileikkauksessa välittömästi ennen halkeilua ja sisäisen momenttivarren muutos. Vetovoiman vaikuttaessa arvo $k_c = 1,0$
k	on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon erisuuruisten toisensa tasapainossa pitävien jännitysten suuruus
$f_{ct,eff}$	on betonin vetolujuuden keskiarvo ajankohtana, jolloin halkeamien voidaan aikaisintaan odottaa muodostuvan. $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ tai sitä pienempi $f_{ctm}(t)$, jos halkeilun syntyminen on odotettavissa ennen 28 vuorokauden ikää
A_{ct}	on betonipoikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala juuri ennen ensimmäisen halkeaman muodostumista

Halkeamaleveys voidaan laskea EC2:n kohdan 7.3.4 kaavalla 6.23.

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (6.23)$$

missä

$s_{r,max}$	on suurin halkeamaväli
ε_{sm}	on keskimääräinen raudoituksessa vaikuttava venymä kyseisen kuormayhdistelmän vallitessa, mukaan luettuna pakkosiirtymien ja pakko-muodonmuutosten vaikutus ja ottamalla huomioon betonin vetojäykistysvaikutukset. Vain betonin nollavenymätilan ylittävä lisävenymä samalla korkeustasolla otetaan huomioon
ε_{cm}	on keskimääräinen betonin venymä halkeamien välillä

$s_{r,max}$ lasketaan kaavasta 6.24.

$$s_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \phi / \rho_{p,eff} \quad (6.24)$$

missä

$k_3 = 3,4$	
k_1	on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon tankojen tartuntaominaisuudet $k_1 = 0,8$ tangoille, joilla on hyvä tartunta
c	on vetoraudoituksen betonipeite
k_2	on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon venymäjakauma $k_2 = 0,5$ pelkälle taivutukselle
$k_4 = 0,425$	

Suurimman halkeamaleveyden $s_{r,max}$ laskentaan on myös lisäehto, joka lasketaan kaavalla 6.25. EC2:ssa sivun 125 alalaidassa on kuitenkin lisämaininta, että EC2:n kaavaa 7.14 eli tämän luvun kaavaa 6.25 ei pitäisi käyttää koskaan. Asiasta on neuvoteltu

paljon ja työn aikana käydyin keskustelun (Ålander 2013; Lumme 2013) tuloksena sovitettiin, että kaavaa 6.25 ei tarvitse ottaa huomioon Beeplate-laattaa mitoitettaessa.

$$s_{r,max} = 1,3 \cdot (h - x), \text{ kun } kk > 5 \cdot (c + \emptyset/2) \quad (6.25)$$

missä

kk on tankojen jakoväli

h on poikkileikkauksen kokonaiskorkeus

x on neutraaliakselin etäisyys puristetusta reunassa

$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ voidaan laskea siten tartunta- tai ankkurijänteettömällä rakenteella kaavasta 6.26 käyttämällä vain kaavan 6.24 mukaista halkeamavälin $s_{r,max}$ arvoa

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (6.26)$$

missä

σ_s on vetoraudoituksessa vaikuttava jännitys, kun poikkileikkauksen oletetaan halkeilleen. Tartuntajännerakenneosilla σ_s voidaan korvata jänneterästen samalla korkeustasolla syntyvällä jännityksen muutoksella $\Delta\sigma_p$ betonin nollavenymätilaan verrattuna

α_e on suhde E_s/E_{cm}

$\rho_{p,eff} = A_s/A_{c,eff}$

$A_{c,eff}$ on betoniteräksiä tai jänneteräksiä ympäröivän, vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala

k_t on kerroin joka riippuu kuorman vaikutusajasta

$k_t = 0,6$ lyhytaikaiskuormitukselle

$k_t = 0,4$ pitkäaikaiskuormitukselle

Vetojännityksen alaisen betonialueen pinta-ala määritetään Beeplate-laatalle kennojen alapuolisessa laatanosassa, ja sen korkeus ei voi olla suurempi kuin kennojen alapuolisessa laatanosan paksuus. Lisäksi on tarkistettava, että vetojännityksen alaisen betonialueen pinta-alan korkeus $h_{c,ef}$ ei ylitä mitään arvoista $2,5(h - d)$, $(h - x)/3$ ja $h/2$.

Halkeamaleveyden raja-arvot w_{max} on esitetty rasitusluokkien mukaan Suomen kansallisen liitteen NA SFS-EN 1992-1-1 taulukossa 7.1N. Tartuntajänteettömällä teräsbetonirakenteilla halkeamamitoituksen kuormat voidaan laskea pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä. Myös tavallista kuormayhdistelmää voidaan käyttää käytännön syistä, mutta se hieman ylittää rakenteen halkeamaleveydelle.

6.8 Palonkesto

Valmistajan ohjeen (Fire protection proof according to DIN 4102 2011) mukaan rakenteiden palomitoitus voidaan tehdä vastaavasti kuin pilarilaatalla käyttämällä muunnettua rakennepaksuutta. Muunnettu rakennepaksuus tarkoittaa laskennallista laattarakenteen paksuutta, joka ottaa huomioon muutokset poikkileikkauksessa. Saksan normien mukaan alapinnan laatan paksuuden olisi oltava vähintään 100 mm, mutta 80 mm paksuus sallitaan, jos laatta on umpinainen negatiivisten momenttien alueella. Alapinnan terästen betonipeitteestä ja terästen halkaisijasta riippuen Beeplate säätelee alapinnan terästen päälle valettavan betonipeitteen paksuutta välillä 20–40 mm, jotta vaadittu 80 mm laatan paksuus täyttyy. Ohjeen mukaan pienin keskiötäisyys laatan reunaan alapinnassa on 25 mm ja yläpinnassa 15 mm.

DIN 4102:ssa on myös vaatimukset muunnetulle laatan paksuudelle eri paloluokissa. F90-paloluokassa muunnetun laatan paksuuden olisi oltava vähintään 150 mm. Kaikille laattatyypeille on lisäksi asetettu 200 mm raja. Jos kevennetty laatta tehdään umpinaisena tukien lähellä, kyseinen 200 mm raja ei ole kuitenkaan voimassa. Beeplate on laskenut oppaaseen eri laatan paksuuksille ja kennoille muunnetut laatan paksuudet, jotka on esitetty taulukossa 6.1. Taulukosta nähdään, että kaikki laattatyypit täyttävät sekä 150 mm että 200 mm vaatimukset paloluokassa F90.

Taulukko 6.1. Beeplate-laattojen muunnetut laatan paksuudet

Kennotyyppi	Laatan pak-	Poikkileikk.	Kenno-osan	Muunnettu
	suus	leveys b	poikkileikkaus	paksuus
	h [m]	b[m]	A_{kenno} [m ²]	A_{netto}/b [mm]
HK20	0,34	0,8	0,104	210
HK26	0,4	0,815	0,144	223
HK31	0,45	0,76	0,157	243
HK38	0,52	0,76	0,193	266
HK20+HK38	0,6	0,8	0,25	287
HK26+HK38	0,66	0,815	0,295	298

Taulukossa 6.1 esitettyjen arvojen h , b ja A_{kenno} avulla on laskettu muunnetut paksuudet kaavalla

$$A_{netto}/b = \frac{b * h - A_{kenno}}{b} \quad (6.27)$$

Eurokoodin (SFS-EN 1992-1-2 2005) vaatimukset vastaavassa REI 90 -standardipalossa ovat laatan paksuudelle 200 mm ja keskiötäisyydelle 25 mm. Näin ollen taulukon 6.1 muunnetun paksuuden arvot täyttäisivät myös Eurokoodin vaatimukset. Vastaavaa muunnetun paksuuden laskentaa palomitoituksessa ei ole esitetty eikä myöskään rakenteen alapuolisen laatanosan minimipaksuutta. Näin ollen voidaan olet-

taa, että DIN 4102:n mukainen laskentaa voidaan soveltaa puuttuvin osin Eurokoodin mukaisessa palomitoituksessa.

Muille kevennysrakenteille tehtyjen palokokeiden pohjalta on myös todettu, että muoviset kevennysosat eivät pala vaan sulavat laatan onteloiden sisään. Kevennetty rakenne ei myöskään hajoa kuumenevan ilman aiheuttaman paineen johdosta. (Bubble-Deck Tests and Reports Summary 2006)

7 ESIMERKKILAATAN MITOITUS

Jotta rakenteen käytännön toiminnasta saataisiin jotain tietoa, suunniteltiin ontelolaattavälipohjalle vertailurakenne paikalla valettavana Beeplate-laattana. Esimerkkikohteeksi valittiin samaan aikaan suunnitteilla ollut Vallila-toimistorakennus, jonka maanpäällisen osan runko oli suunniteltu tehtäväksi elementtirakenteisena. Rakenne koostuu kantavista seinäelementeistä, 265 ja 400 mm ontelolaatoista, WQ-palkeista sekä liittopilareista. Rakennuksessa on kahdeksan maanpäällistä kerrosta sekä kolme kellarikerrosta. Kerrokset K3:sta 2:een on suunniteltu tehtäväksi paikallavaluna käyttämällä jälkijännitettyjä tasoja ja palkkeja. Kerroksissa 1, K1 ja K2 sijaitsee parkkitiloja, jotka asettivat rajoitteita muun muassa pilareiden sijoittamiselle. OP Vallilan 3. kerroksen ontelolaattavälipohjan tasokuva on esitetty liitteessä 1.

Vaihtoehtoinen rakenne Beeplate-laattana suunniteltiin käyttämällä StruSoft FEM-Design 10.0 -ohjelmaa. Laskennan tuloksena saatiin suunniteltua vertailukelpoinen paikallavalurakenne ontelolaatalle, vaikka rakennuksen pilareiden sijoittelu ei ollut optimaalinen pilarilaatalle. Alempien kerrosten pysäköintitilojen parkkiruutujaon vuoksi pilarit oli sijoitettava lähelle ulkoseinää. Tästä johtuen kolmiaukkoisen laatan reunakenttien jännevälit ovat pidemmät keskikenttään verrattuna ja laatta taipuu niissä epäedullisesti. Beeplate-laatan kennot on esitetty liitteessä 2 ja laskennan tulokset liitteissä 3 ja 4.

7.1 Lähtötiedot laatan suunnittelulle

Rakennuksen rakenteiden luokitus on toimistorakennuksen suunnittelulähtökohtien mukaan kerrosten 2–8 ontelolaattavälipohjille seuraava:

- Paloluokka on P1.
- Seuraamusluokka on CC3 kantavalle rungolle.
- Luotettavuusluokka on RC3 kantavalle rungolle.
- Kantavat betonirakenteet kuuluvat luokkaan RL2.
- Rasitusluokka on XC1.

Luotettavuusluokasta RC3 johtuen kuormakertoimelle K_{FI} on käytettävä arvoa 1,1. Rasitusluokka XC1 vaatii betonipeitteen nimellisarvoiksi 20 mm, joka sisältää mittapoikkeaman.

Ontelolaattasuunnitelmassa rakennukseen on ajateltu kantavia ulkoseiniä, mutta pilarilaatalla ulkoseinät voidaan tehdä kevytrakenteisina, jolloin kaksi porraskuilua jäykistää rakenteen. Lisäksi rakennus liittyy yhdestä nurkasta toiseen rakennukseen, jolloin osa toista pitkää sivua on tehtävä kantavaksi. Laatan taipumaraja on $L/250$ reunakentis-

sä ja keskikentässä $L/500$, sillä keskikenttään tulee muurattavia väliseiniä. Osittain tästä syystä keskikentän jänneväli on pienempi kuin reunakentissä. Toinen syy keskikentän kapealle pilarijaolle on pilareiden sijoittuminen parkkiruutuihin nähden kellarikerrosten parkkitiloissa.

Toimistotilalle on määritelty laatan omapainon lisäksi seuraavat kuormat:

- Ripustus $g_1 = 0,5 \text{ kN/m}^2$
- Hyötykuorma $q_1 = 2,5/5 \text{ kN/m}^2$
- Kevyet väliseinät $q_2 = 0,8 \text{ kN/m}^2$

Hyötykuorman suuruus on suurimmaksi osaksi $2,5 \text{ kN/m}^2$. Lähellä porraskuilua, jossa tapahtuu lastauksesta johtuvaa kasautumista, hyötykuorma on 5 kN/m^2 .

Ontelolaattavaihtoehdossa rakenneluokka on 2, mutta paikallavalurakenteet voidaan EC2:n liitteen A mukaan tehdä myös rakenneluokassa 1 esimerkiksi tehokkaammalla laadunvalvonnalla ja mittapoikkeaman pienentämisellä. Näin ollen kevennetty pilarilaatta mitoitettiin rakenneluokassa 1 käyttämällä betonin osavarmuuslukua $\gamma_{C,red1}$ ja teräksen osavarmuuslukua $\gamma_{S,red1}$.

7.2 Laatan mitoitustajärjestelyt

Laatan geometria tuotiin FEM-Design-ohjelman taustalle AutoCAD-kuvana ja muokattiin vastaavaksi pilarilaataksi. Laatan lujuusluokaksi valittiin C35/45 ja paksuudeksi 430 mm. Betonin virumaluvuksi laskettiin 2,33 EC2:n liitteen B.1 mukaan ja kokonaiskutistumaksi 0,402 promillea EC2:n liitteen B.2 mukaan. Virumaluvun ja kokonaiskutistuman laskenta on esitetty liitteessä 3.

Pilarit mallinnettiin laskentaan pyöreinä, momenttia välittämättöminä ja halkaisijaltaan 450 mm kokoisina pilareina eli likimain samankokoisina kuin ontelolaattavälipohjassa. Koska pilarilaatta oletettavasti vaatii halkaisijaltaan vähintään samankokoiset pilarit, voitiin olettaa, että rakenne kestää lävistysvoimat todellisten pilareiden koosta riippumatta.

Kuormat lisättiin Eurokoodin mukaisilla (RIL 201-1-2011) kuormitustapauksilla sekä kuormayhdistelmillä murto- ja käyttörajatilassa. Kuormien osavarmuusluvut kerrottiin murtorajatilayhdistelmiin kuormakertoimella K_{FI} . Kuormitustapauksiksi käytettiin laatan omapainoa ja sen yhdistelmiä hyötykuorman kanssa. Hyötykuormat jaettiin tasaiseksi kuormaksi, shakkiruuduiksi sekä minkä tahansa kahden vierekkäisen kentän yhdistelmäksi. Lisäksi hyötykuormille käytettiin murtorajatilassa pinta-alavähennyserrointa, joka pienentää kuorman suuruutta enintään 0,7-kertaiseksi suurissa laattakentissä.

Käyttörajatilamitoitusta varten laskenta ajettiin uudelleen uuteen tiedostoon ilman hyötykuorman pinta-alavähennyksiä. Käyttörajatilassa käytettiin tavallista kuormayhdistelmää muuten vastaavilla kuormitustapauksilla kuin murtorajatilassa, mutta kahden vierekkäisen kaistan yhdistelmät muutettiin koko kentän mittaiseksi. Tällöin kuormitustapaukset vähenivät ja halkeamaleveyksien iterointiainoa saatiin kohtuullisemmaksi.

Sopiva kennokoko 430 mm:n laatalle on HK31, jonka laattaa keventävä kuorma $3,38 \text{ kN/m}^2$ katsottiin valmistajan suunnitteluoppaasta Recommended Static Calculation according to EC2 (2011). Keventävä kuorma jaettiin aluksi tasaisesti koko laattaan vaikuttamaan ylöspäin, ja sille käytettiin samoja osavarmuuslukuja kuin laatan omapainolle. Muut kuormat lisättiin jokaiseen kenttään erikseen yhdistämällä kevyiden väliseinien kuorma täytenä pienempään hyötykuormaan, jolloin hyötykuormien perusarvot olivat $3,3 \text{ kN/m}^2$ ja $5,8 \text{ kN/m}^2$.

Laskenta ajettiin ensin täydellä kevennyskuormalla, jotta optimaalinen leikkausvoimakuvio saatiin laskettua. Leikkausvoimakuvion avulla määritettiin umpilaatan alueet, joilta kevennyskuorma oli rajattava pois. Leikkausvoiman raja-arvot laskettiin käsin, ja niiden laskenta on esitetty liitteessä 3. Raudoittamattoman kevennetyn laatan leikkauskestävyydeksi saatiin $41,0 \text{ kN/m}$ ja leikkausraudoitetun $87,0 \text{ kN/m}$. Keventävä kuorma poistettiin alueilta, joilla raja-arvo $87,0 \text{ kN/m}$ ylittyi, sekä laatan reuna-alueilta noin metrin kaistaleelta. Tämän jälkeen laskenta ajettiin uudestaan ja raudoitteet suunniteltiin ala- ja yläpintaan saatujen värikarttojen avulla.

Halkeilu ja taipumat tarkistettiin laskemalla laatta uudelleen raudoitteiden lisäämisen jälkeen uudessa tiedostossa ilman hyötykuorman pinta-alavähennyksiä. Koska kuormitustapauksia oli yksinkertaistuksista huolimatta runsaasti, ja laskenta siten hidastui, vähennettiin iterointikerrat viiteen sekä kuormituksenlisäysaskeleet 25 %:iin. Laskennan tulosten mukaan raudoitusta lisättiin sen verran, että halkeilu saatiin pysymään hallinnassa. Samat teräkset lisättiin lopuksi myös murtorajatilan laskelmaan.

7.3 Laskennan tulokset

Liitteessä 4 esitetyistä laskentatuloksista nähdään, että laatan alapinnan suurin momentti reunakentässä on noin 250 kNm . Laatan keskikentässä momentit jäävät hyvin pieniksi, ja suurin momentin arvo on 60 kNm . Alapintaan vaadittava teräsmäärä x-suunnassa on suurimmillaan $1486 \text{ mm}^2/\text{m}$ reunakentässä ja keskikentässä $646 \text{ mm}^2/\text{m}$, joten raudoitteeksi reunakenttään tulisi pääsääntöisesti T16-K175 ja keskikenttään T12-K175. Y-suuntaan tulisi T12-K175 pienin lisäteräksin muutamaan kenttään.

Yläpinnan suurimmat momentit pilarin kohdalla ovat 472 kNm x-suuntaan ja 335 kNm y-suuntaan ilman laatan sisänurkkien momenttipiikkejä. Koko yläpintaan laitettiin asennusteknisistä syistä perusraudoitukseksi T10-K200 sekä alueille, joihin syntyy pientä vetoa, vastaavan suuruinen lisäterästys, jotta minimiteräsmäärä täyttyi. Lisäksi pilareiden kohdalle yläpintaan laitettiin yhden tai kahden teräsmäärän yhdistelmiä x- ja y-suuntiin.

Laatta taipuu omasta painosta enimmillään 42 mm laatan reunassa sekä kentässä 36 mm . Kuormayhdistelmien vaikutuksesta suurin taipuma laatan reunassa on $50,5 \text{ mm}$, joka on käytännössä yhtä suuri kuin taipumaraja 50 mm . Myös kentässä taipumat ovat lähellä taipumarajaa, mutta esikorotusta ei taipumarajan mukaan kuitenkaan vaadita. Keskikentän taipumat ovat hyvin pieniä. Taipuman arvo jää suurimmillaankin vain reiluun 10 mm :iin, joten taipumaraja $L/500$ ei ylity. Laatan reunan 50 mm taipumat seinä-

linjoilla voisivat tulla ongelmaksi seinäelementtejä asennettaessa, joten niiden esikoro-
tusta tai lisäraudoitusta olisi mietittävä erikseen. Mikäli taipumat todetaan liian suuriksi,
sopiva esikoroitus voisi olla 30–40 mm.

FEM-laskenta antaa suurimmaksi halkeamaleveydeksi yläpintaan 0,30 mm ilman
pienennettyä betonin vetolujuuden f_{cm} arvoa. Myös alapintaan tulee FEM-laskentana
suurimmaksi halkeamanleveydeksi 0,30 mm. Vaikka alapinta halkeilee paljon, hal-
keamaleveydet kuitenkin pysyvät alle 0,30 mm:ssä. Teräksinä suurimpien halkeamien
alueella on T16-K175 ja paikallisesti kentässä lisäterästys T10-K300.

Vertailuna tehty laatan alapinnan halkeamaleveyden käsilaskenta tuottaa arvoksi
pienemmän arvon 0,22 mm, jos laskennassa käytetään vain kaavan 6.24 mukaista hal-
keamaväliä. Käsilaskenta ottaa huomioon myös kennojen vaikutuksen vedetyn laatan
tehollisen poikkileikkauksen laskennassa, mutta sen vaikutus teholliseen korkeuteen on
hyvin pieni, kuten liitteen 3 laskennasta nähdään.

Käsilaskennan tulokset halkeamaleveydelle eivät ole kuitenkaan kovin luotettavia,
varsinkaan yli 150 mm teräsjaolla. Jos halkeamavälin laskennassa otettaisiin huomioon
myös kaavan 6.25 mukainen ehto, tulisi halkeamaleveydeksi 0,46 mm eli halkeamale-
veys yli kaksinkertaistuisi. Otettaessa huomioon molemmat kaavat ehdon mukaan hal-
keamaleveyden laskenta ei käyttäydy yhtenäisesti ja laskenta ei siten voi vastata todel-
lista tilannetta. EC2:ssa (SFS-EN 1992-1-1 2005) on siksi mainittu, että kaavaa 6.25 ei
tulisi käyttää halkeamaleveyden laskennassa. Koska todellinen halkeamaleveys on luul-
tavasti hieman ehdon 6.24 mukaan laskettua arvoa suurempi, voidaan FEM-laskennan
antaman halkeamaleveyden 0,30 mm siten olettaa olevan lähellä oikeaa arvoa.

EC2:n mukaan XC1-luokan teräsbetonirakenteella halkeamaleveydellä ei ole vaiku-
tusta säilyvyyteen, mutta rajaksi on asetettu ulkonäkösyistä 0,4 mm. Vallilan toimisto-
rakennuksen laatan halkeilurajaksi on haluttu asettaa 0,30 mm, jonka FEM-laskentana
saadut halkeamaleveydet täyttävät. Jos halkeamaleveyksiä halutaan tästä huolimatta
pienentää, voidaan alapinnan T10-lisäterästystä jakaa leveämmälle alueelle ja pilareiden
kohdalle yläpintaan laittaa pari lisäterästä. Vaihtoehtoisesti T16-K175-raudoitus voi-
daan muuttaa T12-K100:ksi.

Pilarilaatan lävistyminen tutkittiin jokaisen pilarin kohdalla erikseen liitteessä 3 esi-
tetyt käsilaskentapohjan avulla, sillä FEM-Design 10.0 -ohjelma laskee lävistymisen
Eurokoodin mukaan. Jos momentti jätetään huomioimatta, yksikään pilari ei vaadi lävis-
tymisteräksiä ja suurin käyttöaste on pahimmassa tapauksessa noin 85 %. Lävistymistä
tutkittiin myös lisäämällä pilarin päähän 200 kNm momentti, joka vaati sen sijaan 2 tai
3 16 mm lävistymisterästä useimpien pilareiden kohdalle. Käytetty momentti on kuiten-
kin erittäin suuri ja laskentamallissa pilarit oletettiin nivelellisiksi, joten lävistymisteräk-
set voitiin jättää pois.

8 MÄÄRÄ- JA KUSTANNUSLASKENTA

Beeplate-laatalle laskettiin kustannusarvio FEM-laskennasta saatujen tulosten perusteella. Mitoitetusta laatasta laskettiin taulukkolaskentana laattaan kuluva betoni, kennojen ja välikkeiden kappalemäärät sekä teräsmäärät eriteltyinä. Beeplate-laatan kustannukset oli laskettava materiaaliakohtaisesti tämän päivän tarjoushinnoin, sillä vastaavalle laatalle ei tunneta valmiita neliöhintoja. Näin ollen hintoihin olisi suhtauduttava kriittisesti. Käytetystä kustannuslaskentatavasta huolimatta tarjoushinnat antavat varmasti hyvän arvion sille mitä laatta voisi todellisuudessa kustantaa. Beeplate-laatan määrä ja kustannuslaskenta on esitetty liitteessä 5.

Jotta lasketuille kevennetyn pilarilaatan kustannuksille saatiin vertailupohjaa, myös ontelolaattavaihtoehdolle laskettiin kustannukset kirjojen Rakennusosien kustannuksia 2011 (Palolahti et al. 2011) sekä Talonrakennuksen kustannustieto 2009 (Haahtela & Kiiras 2009) mukaan. Määrät ja laadut kustannuslaskentaa varten katsottiin alkuperäisestä ontelolaattasuunnitelmasta. Koska Rakennusosien kustannuksia -kirja soveltuu paremmin suuriin rivitaloihin tai vastaaviin asuinrakennuksiin ja koska siitä siten puuttuvat esimerkiksi kustannukset 400 mm ontelolaatalle, on sillä lasketuille kustannuksille määritetty arviot myös Haahtelan mukaan. Haahtela huomioi paremmin suurten toimituskohteiden kustannukset, mutta toisaalta sillä lasketut kustannukset määräytyvät likimääräisempien rakennusosakohtaisten neliöhintojen mukaan. Molemmat laskentatavat on esitetty rinnakkain liitteessä 6.

Kustannuslaskenta rajattiin koskemaan ainoastaan välipohjan vaakarakenteita, sillä pilareiden oletettiin olevan samankokoisia. Näin ollen seiniä, pilareita ja anturoita ei ole huomioitu kustannuksissa. Todellisuudessa pystyrakenteilla sekä anturoilla voi olla suurikin vaikutus rakennuksen kokonaiskustannuksiin, etenkin umpilaattaan verrattuna. Laskentaan ei myöskään otettu mukaan pintarakenteita, sillä niiden voidaan olettaa olevan samoja molemmissa vaihtoehdoissa.

Kaikki kustannuslaskennassa käytetyt hinnat ovat ilman arvonlisäveroa. Kustannusvertailu ei sisällä myöskään urakoitsijan yhteiskuluja 8 % eikä katetta 7 %. Rakenteesta tilaajalle aiheutuvat todelliset kustannukset saadaan, kun kokonaishinta kerrotaan 1,15:llä.

8.1 Beeplate-laatan määrälaskenta

8.1.1 Kevennysosien ja leikkausterästen kappalemäärälaskenta

Määrälaskentaa varten piirrettiin aluksi laatan dwg-tasokuvaan kevennyskennot välikkeineen likimain oikeille paikoilleen. Tasokuva kevennyskennojen sijoittumisesta laat-

taan on esitetty liitteessä 2. Kuvaan piirrettiin aluksi yksi halkaisijaltaan 660 mm kokoinen ympyrä kuvaamaan HK31-kennoa. Tämän jälkeen ympyrän kyljen kuudennespisteisiin piirrettiin säteittäin 100 mm viivat kuvaamaan kennoja sitovia välikkeitä. Välikeviivat ja ympyrät piirrettiin eri tasoille, jotta niiden määrät voitiin myöhemmin erotella tyypeittäin. Ympyräobjektia sekä kolmea vierekkäistä välikeviivaa monistamalla laatta saatiin täytettyä kennoilla nopeasti.

Seuraavaksi AutoCAD-ohjelmaan tuotiin FEM-laskennalla saadut leikkausvoimakuvaajat kuvina taustalle, jolloin kennot välikkeineen voitiin poistaa alueilta, joilla laatta on tehtävä umpinaisena. Kun kennot oli saatu oikeisiin paikkoihin, määritettiin leikkausraudoitusta vaativat alueet. Leikkausraudoituksen sijainti havainnollistettiin muuttamalla paksumman viivatyyppin tasolle ne välikkeet, joiden molemmille puolille Z-leikkausraudoitteet on asennettava.

Koska eri objektit oli sijoitettu omille tasoilleen, kennojen, välikkeiden ja leikkausterästen kappalemäärät saatiin määritettyä helposti sammuttamalla turhat tasot ja maalamalla halutut objektit. Leikkausteräksiä laskettaessa paksummalla viivatyyppillä piirrettyjen välikkeiden kappalemäärä oli vain kerrottava kahdella, koska leikkausteräksiä tulee kaksi kappaletta jokaiseen kennojen väliseen uumaan. Lisäksi laskettiin laatan vapaille reunoille tarvittavat Z-teräkset mittaamalla arvio laatan vapaan reunan pituudelle ja kertomalla se lasketulla Z-terästen k-jaolla.

Kuten liitteestä nähdään, yhteen laattaan kului 2 442 kennoa ja 6 837 välikettä. Z-teräksiä laattaan tarvittaisiin 2 472 kappaletta, joista 130 kappaletta olisi vapaan reunan teräksiä.

8.1.2 Betonin kuutiomäärälaskenta

Laatan pinta-ala saatiin FEM-laskennan tulosraportista, mutta se voidaan määrittää myös täyttämällä AutoCAD-kuvan laatta jollain rasterilla ja katsomalla ominaisuuksista sen pinta-ala. Saatu pinta-ala kerrottiin laatan paksuudella, jolloin saatiin laatan tilavuus. Jotta todellinen betonimäärä voitiin määrittää, oli siitä vähennettävä kevennyskennojen syrjäyttämä betonimäärä.

Kennon tilavuus katsottiin valmistajan taulukoista ja siitä vähennettiin kennon alapuolisen 2 cm betonitäytön tilavuus. Kennoston syrjäyttämän betonin todellinen tilavuus saatiin vähentämällä laatan tilavuudesta yhden kennon syrjäyttämä betonin tilavuus kerrottuna kennojen kappalemäärällä, jolloin teoreettiseksi betonimääräksi tuli siten 576 m³. Kun betonille arvioitiin 1 % hukka, laattaan tarvittavaksi betonimääräksi tuli 582 m³.

8.1.3 Terästen kilomäärälaskenta

Ala- ja yläpinnan suorien terästen kilomäärä 41 465 kg ilman jatkos- ja tartuntapituuksia saatiin tarkasti suoraan FEM-mallista. Tämän lisäksi todelliseen teräsmäärään oli laskettava arvio jatkos- ja tartuntapituuksiin, Z-leikkausteräksiin sekä reunahakoihin kuluvalle kilomäärälle.

Halkaisijaltaan 12 mm Z-terästen pituus 430 mm laatassa on 755 mm, joten Z-terästen yhteispaino saatiin laskettua kertomalla yhden teräksen paino Z-terästen lukumäärällä. Z-terästen yhteispainoksi tuli täten lähes 1700 kg. Jatkospituuksiin arvioitiin kuluvan 5 % pääteräsmäärästä eli noin 2000 kg. Lisäksi yläpinnan terästen tartuntapituuksiin pilareiden kohdalla laskettiin kuluvan noin 2500 kg. Reunahakakorien tartuntapituudeksi arvioitiin 600 mm ja hakojen jakona käytettiin alapinnan terästen jakoa. Näin ollen niiden kokonaispainoksi tuli noin 2200 kg.

Koko laattaan kuuluva teoreettinen teräsmäärä olisi yhteensä noin 49 000 kg, jolloin teräsmäärä neliölle olisi kohtuullinen $28,5 \text{ kg/m}^2$. Jos teräksen materiaalihukaksi Bامتec-mattoraudoitetta käytettäessä oletetaan 2 %, olisi todellinen teräsmäärä silloin noin 50 000 kg eli $29,1 \text{ kg/m}^2$.

8.2 Beeplate-laatan kustannuslaskenta

8.2.1 Betonin kustannukset

Betonin hinnoille saatiin tarjouslaskelma Marko Mäntyseltä Rudus Oy:stä, ja se oli jaettu erikseen betonille, kuljetukselle sekä pumppaukselle. Betonin C35/45 #16 s2 hinta pääkaupunkiseudulla vastaavankokoisessa kohteessa olisi $80,87 \text{ €/m}^3$, kuljetus 7 m^3 sekoitussäiliöautoilla $89,97 \text{ €/kuorma}$ eli $12,85 \text{ €/m}^3$ ja pumppaus betonipumpulla $38/42\text{m}$ $21,54 \text{ €/m}^3$. Kerrottuna hinnat betonimäärällä kustannusten summaksi ilman betonointityötä tulisi noin 67 000 €

Betonointityön kustannukset laskettiin määrittämällä ensin työmäärä Ratu 0403 -kortin (2012) mukaan. Työmäärän menekkinä käytettiin $0,20 \text{ tth/m}^3$ T3-aikana. Suoritemääräkertoimeksi määritettiin 1, jolloin kokonaismenekiksi saatiin 116 tth T3-aikana ja 134 tth T4-aikana. Betonointityön hinta määritettiin TES:n mukaan yhdelle ammattimiehelle ja yhdelle apumiehelle lisäämällä kustannuksiin 73 % sosiaalikulut, jolloin hinnaksi tuli $32,36 \text{ €/tth}$ ja betonointityökustannuksiksi yhteensä noin 4 300 € Kun betonointityökustannukset lisättiin betonin muihin kustannuksiin, saatiin betonin kokonaiskustannuksiksi asennettuna noin 71 000 €

Betonoinnin kustannusten laskennassa ei ole tarkemmin huomioitu betonointityön jakautumista useammalle työpäivälle. Työmenekkilaskennan mukaan karkea työsaavutus on $104 \text{ m}^3/\text{tv}$, joten yhden laatan betonointi kestäisi siten kuusi päivää. Tämä tarkoittaisi myös sitä, että laattaan olisi tehtävä ainakin viisi työsaumaa. Lisäksi Beeplate-laatta on valettava kahdessa osassa niin, että molemmat valukerrokset on tehtävä saman päivän aikana. Tämän aiheuttamaa hidastetta työsaavutuksessa on hankala arvioida, mutta mahdollisesti se voi tuoda valuaikaan yhden työvuoron lisää. Toisaalta betonoinnissa voidaan käyttää myös useampaa pumppuautoa sekä useampaa betonointityöntekijää, jolloin betonointityön kokonaisaika lyhenee.

8.2.2 Kevennyskennojen kustannukset

Kevennysosien hinnat saatiin Beeplate-järjestelmän edustajalta Franz Häusslerilta hänen kanssa käydyn sähköpostikeskustelun (2013) perusteella. Sekä HK26 että HK31 kenno maksavat kappaleelta 7,40 € ja 10 cm välikkeet 0,15 €/kpl. Kuljetuskustannukset Helsinkiin tammikuun 2013 hinnan mukaan ovat 2 900 € per rekka. Yhteen rekkaan mahtuu 4200 kennoa, joten viiden kerroksen kennot mahtuisivat kolmeen rekkaan. Näin ollen kennojen kokonaiskustannuksiksi yhteen laattaan ilman asennusta tulisi lähes 21 000 €

Häusslerin mukaan (2013) yksi harjaantunut asentaja kykenee asentamaan 60 kennoa tunnissa. Työmenekkiin arvioitiin kuitenkin realistisempi arvio 45 kennoa tunnissa, minkä mukaan kennojen asennukseen koko laattaan kuluisi 54 tth. Tämä tarkoittaisi sitä, että kaksi työntekijää asentaa kennoja kolmen ja puolen työpäivän ajan. Asennuksen hintana käytettiin samaa kuin betonoinnilla, jolloin asennus maksaisi noin 1700 € Kennojen kokonaiskustannuksiksi asennettuina saatiin siten noin 22 600 €, joka on hieman suurempi kustannus suhteessa kennojen syrjäyttämän betonin kustannuksiin. Todellisuudessa kennot tekevät rakenteen umpilaattaa edullisemmaksi, sillä kevennetty pilarilaatta on ohuempi ja terästä tarvitaan vähemmän. Lisäksi pilarit voidaan tehdä hoikemmiksi ja anturat pienemmiksi.

8.2.3 Teräsmäärän kustannukset

Vaikka teräsmäärät laskettiin tarkasti eriteltyinä, käytettiin terästen kustannuksille kiinteää kokonaishintaa, joka sisälsi myös asennuksen sekä oheistarvikkeet kuten raudoitusvälikkeet. Hinta saatiin Casper Ålanderilta, jonka mukaan vastaavanlaisessa kohteessa terästen hinta asennettuna on 1,05 €/kg. Tällöin teoreettisen teräsmäärän kustannuksiksi asennettuna tulisi alle 53 000 €

Materiaalihukalle käytettiin teräksen kilohintaa 0,58 €/kg, joka saatiin Vammalan Betoni Oy:ltä. Näin ollen todellisen teräsmäärän kustannuksiksi saatiin reilu 53 000 € Ålander antoi myös hinnaksi rahdille työmaalle 0,015 €/kg, joten raudoituksen kokonaiskustannuksiksi asennettuna tulisi noin 54 000 €

8.2.4 Muottien kustannukset

Muottien hinta saatiin kysymällä PERI Suomi Ltd Oy:n tuotelinjapäälliköltä Ilari Roihuvuolta. Hänen mukaansa vastaavanlaisessa kohteessa neliöhinta on peruslaatalle 0,10–0,12 €/m²/vrk ja pöytämuottien kanssa noin 0,12–0,15 €/m²/vrk. Vuokrahinta sisältää muun materiaalin, mutta ei muottilevyä. Muottilevynä käytetään 3-kerroslevyä, jonka myyntihinta on 14–15 €

Kustannuslaskentaa varten arvioitiin, että muotit olisivat laatassa 14 vrk kerrallaan ennen kuin niitä siirrettäisiin eteenpäin. Muottikaluston vuokrahinnaksi valittiin 0,13 €/m²/vrk, jolloin muottikaluston vuokra koko laatassa olisi yhteensä noin 3700 € Muottilevylle laskettiin muottipinta-alaan lisäksi 10 % hukka, ja sen 15 €/m² kustannus jaet-

tiin kymmenellä arvellen, että sama levy voidaan käyttää kohteessa kymmenen kertaa. Muottilevyn kustannukseksi koko laatassa tulisi siten 3000 €

Pöytämuottityön kustannukset laskettiin käyttämällä Rakennustöiden menekit 2010 -kirjaa (Palomäki et al. 2009), jossa suoritelmäärät on annettu T3-aikoina seuraavasti: pystytys 0,02 tth/muotti-m² sekä purku ja puhdistus 0,19 tth/muotti-m². Kun suoritelmääräkerroin on 1 ja TL3-kerroin 1,15, saadaan laatan muottityön T4-kokonaismenekiksi 676 tth. Jos asennustyölle käytetään hintaa 32,36 €/tth, asennustyön kustannukset koko laatassa olisivat siten noin 22 000 €. Yhteensä laatan muottikustannuksiksi tulisi alle 29 000 €

8.2.5 Muut kustannukset

Muottiöljyn sekä jälkihoitoaineen hinnat saatiin Heikki Hyväriseltä Semtu Oy:stä. Muottiöljyn hinta oli 3,19 €/l ja jälkihoitoaine 3,83 €/l. Muottiöljyn menekiksi koko laatan muotteihin lasketettiin 20 litraa, joten muottiöljy maksaisi yhteensä vain 64 €. Jälkihoitoainetta koko laatan yläpintaan kuluisi 246 litraa, minkä kokonaishinta olisi 943 €. Muottiöljyn ja jälkihoitoaineen asennukset oletettiin sisältyvän muotti- ja betonointitöihin, joten kokonaiskustannuksiksi niille saatiin yhteensä vain noin 1000 €

Myös raudoitusvälikkeille arvioitiin hinta Pertti Lesoselta Neliraudoitus Oy:stä saatujen hintojen perusteella. Raudoitusvälikkeiden hinta olisi 0,39 €/jm ja rahti työmaalle 190 €. Jos raudoitusvälikkeet jaettaisiin noin metrin välein, tulisi niiden hinnaksi alle 1000 €. Kustannus jätettiin lopulta laskennasta pois, sillä saatu terästen kiinteä kokonaishinta asennettuna sisälsi myös raudoitusvälikkeet.

8.3 Ontelolaatan määrä- ja kustannuslaskenta

8.3.1 Määrälaskenta

Ontelolaattaväli­pohjan laatan pinta-ala on 1643 m², joka on hieman pilarilaattavaihtoehtoa pienempi raskarakenteisten julkisivuelementtien vuoksi. Lisäksi ontelolaattaväli­pohjaan on suunniteltu kahta eri rakennepaksuutta. Pidempiin reunakenttiin on valittu 400 mm ontelolaattaa ja keskikenttiin 265 mm ontelolaatta. Molemmissa vaihtoehdoissa ontelolaattojen yläpinta on samassa tasossa, joten laattaan on ajateltu kauttaaltaan valettavaksi 80 mm pintabetonilaatta. Näin ollen rakenteen kokonaispaksuudet ovat ontelolaattojen alueilla 480 mm ja 345 mm ilman pintarakenteita ja palkkien laippoja. OL400:n kokonaispinta-ala on 1148 m² ja OL265:n 310 m². OL265:n saumabetoni ja teräkset saatiin Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirjasta (Palolahti et al. 2011). OL400:n saumabetoni laskettiin kertomalla OL265:n betonimäärä ontelolaattojen asennusohjeen mukaisella suhteella. Teräsmäärä oletettiin samaksi, vaikka saumoihin tulisi paksummalla laatalta enemmän terästä.

Ontelolaatat tukeutuvat rakennuksen sisäosissa WQ-palkkeihin sekä ulkoreunoilla kantaviin seinäelementteihin. WQ-palkkeja on kolme eri tyyppiä, ja niiden yhteispaino on 23 000 kg ja yhteispituus noin 102 jm. Koska WQ-palkkien laipat sijaitsevat palkki-

en alareunassa ja ontelolaattojen alapinnoissa on tasoero, on 265 mm ontelolaattojen ja WQ-palkkien laippojen välissä käytettävä erillisiä korotusosia. Niiden vaikutus kustannuksiin oletettiin pieneksi, joten niitä ei otettu laskennassa huomioon. WQ-palkkien sisään valettavan betonin määrä arvioitiin palkin leveyden ja korkeuden mukaan.

Rakenteen hankalasta muodosta johtuen välipohjassa on myös paljon paikallavalmu. Paikalla valettavista osista ei ollut laskentahetkellä raudoituskuvia, joten niiden raudoitusmenekkiä ei voitu tarkasti määrittää. Paikallavalun pinta-alaksi laskettiin noin 144 m² vähentämällä laatan kokonaispinta-alasta muiden osien yhteenlaskettu pinta-ala.

8.3.2 Kustannusten laskenta

Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirjassa (Palolahti et al. 2011) kaikki määrät ja kustannukset lasketaan rakennusosakohtaisesti neliölle. Esimerkkilaskelmissa rakennetyyppi on jaettu rakennusosiin, joille jokaiselle on laskettu materiaalimenekki sekä kustannukset. Summaamalla rakennusosien kustannukset yhteen on saatu rakennetyypin materiaalien kokonaiskustannukset. Työmenekille on määritetty tuntimäärät, joiden perusteella on laskettu työkustannukset. Yhteiskustannukset on saatu laskemalla materiaalikustannukset ja työkustannukset yhteen.

Diplomityössä noudatettiin samaa mallia, mutta pintalaatta eriytettiin omaksi osakseen. Tähän päädyttiin, sillä välipohjassa on kahta eri rakennetyyppiä ja Haahtela (2009) ei ota pintalaattaa ontelolaattojen kustannuksissa huomioon. Laskentaan lisättiin sarake materiaalien hinnoille selkeyttämään kustannusten laskentaa sekä sarake, johon kustannukset muutettiin tämän päivän hintaindeksin mukaiseksi. Materiaalien kustannukset ovat pääsääntöisesti Talo 2000 mukaisia, mutta WQ-palkeille sekä palosuoja-maalille hinnat kysyttiin Juhani Syrjältä Ramboll Finlandista, sillä kirjassa ei niitä ollut. WQ-palkin hinta on tämän päivän hinnaston mukaan 1,80 €/kg ja palosuojamaalin 25 €/m². Niiden hinnat muutettiin laskentaan ensin vastaamaan vuoden 2009 hintoja Haahtela-hintaindeksien avulla, jotta ne olivat vertailukelpoisia Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirjan kanssa. Haahtela-hintaindeksit alueella 1 olivat

- 81 tammikuussa 2009
- 79 tammikuussa 2011 ja
- 83 tammikuussa 2013.

Myös WQ-palkin asennuksen työmenekki oli arvioitava itse laskemalla yhden palkin asennukseen kuluva työmenekki juoksumetriä kohden. Työmenekin määrittämisessä oletettiin, että kaksi työmiestä kykenee asentamaan kolme palkkia tunnissa. Palosuojamaalauksen työmenekiksi oletettiin sama kuin seinän maalauksessa.

Koska Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirja antaa materiaalimenekit sekä työmenekit ja niiden kustannukset vain pienille ontelolaatoille ja paikallavalu-laatoille, käytettiin samoja menekkejä ja hintoja myös paksummille välipohjarakenteille. Kirjan hinta ontelolaatalle OL265 vuonna 2011 oli 42 €/m², mutta ontelolaatalle OL400 kirjassa ei ollut hintaa. Tästä johtuen 400 mm ontelolaatalle päädyttiin käyttämään OL320:n hin-

taa, joka on 47 €/m². Hinta on järkevä, sillä OL400:n hinta olisi edullisempi suuressa kohteessa tarjoushinnan vuoksi.

Ontelolaattojen ohella vastaavasti myös betonin kustannukset tulevat pienemmiksi suuressa valukohteessa. Toisaalta elementtirakennuksessa paikallavalubetonin määrä jää paljon pienemmäksi, joten Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirjan antama hinta toimitettuna 155,70 €/m³ voi olla lähellä betonin oikeaa hintaa. Lisäksi paikallavalubetonin kustannusten merkitys kokonaiskustannuksiin on huomattavasti pienempi kuin paikallavalukohteessa.

Samaan kustannuslaskentataulukkoon lisättiin sarakkeet Haahtelan mukaisille vertailuhinnoille. Ensimmäiseen sarakkeeseen katsottiin yksikköhinta jokaiselle nimikkeistön mukaiselle rakennusosalle ja toiseen laskettiin rakennusosien kustannukset koko välipohjassa. Viimeiseen sarakkeeseen muutettiin kustannukset vastaamaan tämän päivän mukaisia kustannuksia Haahtela-hintaindeksillä.

Haahtela antaa ontelolaattavälipohjalle hinnan asennettuna ilman pintabetonilaattaa, mutta kirjassa ei myöskään ole erillistä pintabetonilaatan hinnastoa. Näin olleen pintabetonilaatta oli jätettävä pois kustannusvertailusta, mikä tarkoittaa sitä, että välipohjilaatan kokonaiskustannukset eivät ole vertailukelpoisia keskenään. Samoin oli tehtävä palosuojamaalille, mutta sen kustannus kokonaiskustannuksiin nähden on hyvin pieni. Haahtelan mukaisia kustannuksia voi kuitenkin käyttää apuna verrattaessa rakennusosien kustannuksia keskenään.

8.3.3 Ontelolaattavälipohjan kokonaiskustannukset

Ontelolaatan OL400 materiaalikustannus ilman pintabetonilaattaa olisi 52,70 €/m² ja OL265:n 45,76 €/m². Työkustannukset 4,85 €/m² oletettiin laskennassa samoiksi molemmilla laatoilla. Kertomalla kustannukset rakennusosien pinta-aloilla ja indeksillä vuoteen 2013 saatiin OL400:n kokonaiskustannuksiksi koko laattaan noin 68 000 € ja OL265:n 16 000 €. Pintabetonilaatan materiaalikustannus on 14,83 €/m² ja työkustannus 11,29 €/m². Koko laatan pintabetonilaatan kustannuksiksi tulisi siten 44 000 €

WQ-palkin materiaalikustannus olisi 422,97 €/jm ja työkustannus 5,67 €/jm. WQ-palkin kustannus asennettuna koko välipohjaan olisi siten 44 600 € vuoden 2013 hintatason mukaan. Pienten paikallavaluosien materiaalikustannukset olisivat 71,48 €/m² ja työkustannukset 27,16 €/m². Paikallavaluosien kokonaiskustannukseksi tulisi noin 15 000 €. WQ-palkin alalaipan palosuojamaalaus maksaisi kokonaisuudessaan noin 2 100 €

Kun kustannukset laskettiin yhteen, saatiin ontelolaattavälipohjan kokonaiskustannukseksi 189 000 € vuoden 2013 hintatason mukaan. Näin ollen koko välipohjan kustannus olisi 115 €/m².

8.4 Kustannusten keskinäinen vertailu

Kun Beeplate-laatan kustannukset laskettiin yhteen, kokonaiskustannuksiksi saatiin 178 000 €. Kustannus vaikuttaisi siis olevan hieman pienempi kuin ontelolaatalla. Kun

Beeplate-laatan kustannus jaettiin neliölle, saatiin kustannukseksi 103 €/m², joka on noin 10 % ontelolaattavälipohjan kustannuksia pienempi. Koska Beeplate- ja ontelolaattavälipohjien kustannukset laskettiin eri tavoilla ja niissä käytettiin eri hinnastoja, ei Beeplate-laatan paremmuutta voitu selkeästi osoittaa. Lisäksi välipohjavaihtoehtojen rakennemallit ovat erilaiset, sillä ontelolaattavälipohja tukeutuu ulkoseiniltä kantaviin seinäelementteihin. Näin ollen kustannusvertailussa olisi otettava huomioon myös pystyrakenteiden kustannukset. Toisaalta tämä tukee kevennetyn pilarilaatan kilpailukykyä entisestään, sillä ontelolaattavaihtoehto vaatii järeämmät julkisivurakenteet sekä teräskonsoleilla varustetut liittopilarit, joiden kustannukset olisivat oletettavasti pilarilaatan pystyrakenteita suuremmat.

Koska ontelolaattavälipohjan kustannusten laskennassa käytettiin paremmin pieniin rakennuskohteisiin soveltuvaa Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirjaa (Palolahti et al. 2011), katsottiin kustannuksille vertailuarvot Haahtelan Talonrakennuksen kustannustieto -kirjasta (Haahtela & Kiiras 2009). Kun kustannuksia verrataan keskenään, huomataan, että Haahtelan kustannukset ovat keskimäärin hieman Rakennusosien kustannuksia 2011 -kirjan mukaisia kustannuksia suurempia. Jos oletetaan pintabetonilaatan kustannukset yhtä suuriksi myös Haahtelan mukaisessa laskennassa, tulisi koko välipohjan kustannukseksi yli 203 000 €, joka on noin 14 000 € enemmän kuin Rakennusosien kustannuksia 2009 -kirjan mukaan laskettu kustannus. Näin ollen voidaan olettaa, että Rakennusosien kustannuksia 2011 mukaan tehty kustannuslaskenta on vertailukelpoinen Beeplate-laatan kustannuslaskennan kanssa.

Beeplate-laatalle ei pystytty katsomaan Haahtelan mukaisia kustannusarvioita, sillä Haahtelassa ei ole vastaavan kokoisten massiivilaattojen kustannuksia. Lisäksi Beeplate-laatta on erilainen muihin pilarilaattoihin verrattuna ja vastaavien kevennysrakenteisten pilarilaattojen hintoja ei ole aiemmin laskettu Suomessa. Tästä syystä Beeplate-laatan määrälaskenta pyrittiin tekemään mahdollisimman tarkasti ja materiaalien hinnoille pyydettiin erikseen tarjoukset, jotta kustannukset olisivat realistisia ja siten vertailukelpoisia ontelolaattavälipohjan laskelmien kanssa.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tuloksena voidaan todeta, että uudenlainen kevennetty pilarilaatta on täysin kilpailukykyinen vaihtoehto elementtirakenteiselle ontelolaattavälipohjalle, kun laatta suunnitellaan pilarilaatan ehdoilla. Tässä työssä esitellyssä vertailulaskelmassa Beep-plate on ontelolaattavaihtoehtoa noin 10 % edullisempi. Tavanomaisessa suorakaiteenmuotoisessa rakennuskohteessa kustannukset olisivat arviolta likimain samat, joten ontelolaatta on helposti houkuttelevampi vaihtoehto sen tunnettavuuden vuoksi. Näin ollen kevennetty pilarilaatta vaikuttaisi soveltuvan paremmin ainakin suuriin paikallavalukoh-teisiin, kuten monimuotoisiin toimisto- ja liikerakennuksiin.

Kevennetyllä pilarilaatalla on ontelolaattaan verrattuna lukuisia etuja. Näitä ovat muun muassa laatan vapaa muoto, pilareiden vapaa sijoittelu, pitkät ulokkeet ja jänneväliit kahteen suuntaan sekä palkittomuus. Elementtirakenteinen välipohja vaatii monta työvaihetta, ja sen rakentaminen voi olla jopa paikallavalua hitaampaa. Lisäksi kevennetty pilarilaatta ei vaadi erillistä pintabetonilaattaa, joka ontelolaatalla lähinnä lisää sen pysyviä kuormia ja rakennepaksuutta.

Valmistajien oppaiden sekä työssä tehtyjen laskelmien perusteella voidaan todeta, että kevennetty pilarilaatta on tehokkaimmillaan paikallavalukohteissa, joissa laatat ovat moniaukkoisia ja jänneväliit keskimäärin yhtä pitkiä molempiin suuntiin. Sopiva kevennetyn pilarilaatan jänneväli on arviolta 12–16 metriä. Pienemmillä jänneväleillä kevennyksestä saatava hyöty jää liian pieneksi, ja pidemmillä jänneväleillä on kevennysrakenteiden lisäksi käytettävä jännepunoksia pilarikaistoilla. Toisaalta kevennysrakenteiden ja jännepunosten yhdistelmällä on mahdollista tehdä 20 metrin jännevälejä, jos rakenteelta niin vaaditaan.

Kevennetyn pilarilaatan mitoitus voidaan tehdä umpinaisen pilarilaatan mitoitusperiaatteiden mukaisesti ottamalla kevennysrakenteiden vaikutus huomion leikkaus- ja taipumamitoituksessa. Kevennysrakenteiden vaikutus laattaa mitoittaessa kannattaa huomioida käyttämällä ylöspäin vaikuttavaa tasaista kuormaa, jonka suuruus vastaa kevennysrakenteiden syrjäyttämän betonin massaa. Laatan leikkauskestävyys heikkenee kevennysrakenteiden alueella merkittävästi, joten laatta vaatii lähes poikkeuksetta leikkausraudoitusta. Kevennysrakenteet heikentävät myös rakenteen taivutusjäykkyyttä, mutta kokonaistaipuma ei kuitenkaan kasva ja voi jopa pienentyä huomattavasti umpilaattaan verrattuna rakenteen pienemmän omapainon vuoksi. Lävistymismitoitus voidaan tehdä kuten umpilaatalla, sillä pilarin kohdalla laatta tehdään umpinaisena.

Jotta Beeplate-laatan soveltuvuudesta ja kustannuksista saataisiin todellista kokemusta, olisi menetelmällä rakennettava ainakin yksi pilottikohde. Esimerkkikohde toisi onnitueksaan paljon näkyvyyttä menetelmälle, jolloin myös tilaajat ja arkkitehdit kiin-

nostuisivat kevennetyn pilarilaatan mahdollisuuksista. Jos menetelmä todettaisiin yhden tai useamman pilottikohteen perusteella kannattavaksi, olisi kevennetylle pilarilaatalle suositeltavaa jatkossa tehdä lisätutkimuksia ennen menetelmän yleistymistä.

Kokeina suositeltaisiin tekemään ainakin kuormituskokeita, joista selviäisi laatan käyttäytyminen taivutuksessa. Erityisesti Beeplate-laatan todellista taipumaa ja halkeamaleveyksiä olisi verrattava vastaavanpaksuiseen umpilaattaan. Taipumalle määrätty kerroin 1,4 on varmalla puolella ja perustuu vain FEM-mallinnuksesta saatuihin taipumiin. Todellinen taipuma on paljon pienempi. Myös leikkausraudoittamattoman laatan leikkautumista olisi syytä tutkia enemmän. Leikkautumisessa tarkastellaan vain kennojen välistä uumaa kapeimmassa kohdassa, jolloin leikkausmitoituksessa on oletettavasti hyvin paljon ylimääräistä varmuutta.

Laatalle olisi mahdollisesti tehtävä myös polttokokeita, joiden avulla voitaisiin varmistaa laatan toimivuus palotilanteessa. Kokeiden perusteella voitaisiin varmistaa voidaanko kevennetyn pilarilaatan Eurokoodin mukaisessa palomitoituksessa käyttää DIN 4102 -mukaista muunnettua rakennepaksuutta vai olisiko kennojen tai kuplien alapuolista laatanosaa käsiteltävä erillisenä laattana. Tämän työn perusteella Beeplate-laatan palomitoitus voitaisiin tehdä DIN 4102 mukaisesti.

LÄHTEET

Airdeck Building Concepts nv [WWW]. [Viitattu: 9.1.2013]. Saatavissa: <http://www.airdeckbuildingconcepts.com/index-en.html>

Airdeck[®] [WWW]. [Viitattu 9.1.2013]. Saatavissa: www.airdeck.be

Beeplate[®] [WWW]. [Viitattu 21.2.2013]. Saatavissa: www.beeplate.com

Beeplate-Info. 2008. Beeplate[®] Honeycomb Floor International. Status 22.09.2008. [Julkaisematon suunnitteluohje]. 31 p.

BubbleDeck Engineering Design & Properties Overview. 2007. BubbleDeck[®] UK Ltd. In: BubbleDeck Voided Flat Slab Solutions – Technical Manual & Documents, June 2008, Version 5 [verkkodokumentteja]. BubbleDeck[®] UK Ltd. pp. 17–21 [viitattu 23.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/download.html>

BubbleDeck[®] Slab Properties. 2006. BubbleDeck[®] UK Ltd. In: BubbleDeck Voided Flat Slab Solutions – Technical Manual & Documents, June 2008, Version 5 [verkkodokumentteja]. BubbleDeck[®] UK Ltd. pp. 13–16 [viitattu 23.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/download.html>

BubbleDeck Tests and Reports Summary. 2006. BubbleDeck[®] UK Ltd. June 2006, Issue 1. In: BubbleDeck Voided Flat Slab Solutions – Technical Manual & Documents, June 2008, Version 5 [verkkodokumentteja]. BubbleDeck[®] UK Ltd. pp. 3–12 [viitattu 23.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/download.html>

BubbleDeck[®] [WWW]. [Viitattu: 14.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck.com/>

BubbleDeck UK Ltd. [WWW]. [Viitattu 14.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/index.html>

BY 201. 2004. Betonitekniikan oppikirja. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys ry. Viides, uudistettu painos. 570 s.

BY 202. 1986. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja, osa 2. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys ry. 2. painos. 226 s.

BY 210. 2005. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki, Suomen Betoniyhdistys ry. 711 s.

Clare, Richard. 2013. International Business Development Manager, Airdeck Building Concepts nv. Sähköpostikeskustelu 16.1.2013 – 18.1.2013

Cobix[®] [WWW]. [Viitattu 9.1.2013]. Saatavissa: <http://www.cobix.com/en/>

Concrete core activation and Airdeck[®] floors. Airdeck[®] [verkkodokumentti]. 6 p. [Viitattu 14.2.2013]. Saatavissa: www.airdeck.be

CUR-Recomendation 86: Bubbledeck floors[®]. 2001. [Verkkodokumentti]. CUR, Gouda, The Netherlands. 12 p. [viitattu 21.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/index.html>

Daliform Group srl [WWW]. [viitattu 15.1.2013]. Saatavissa: <http://www.daliform.com/prodotti/scheda.php?prodotto=25>

Elementtisuunnittelu.fi [WWW]. Betoniteollisuus ry. [Viitattu 6.2.2013]. Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/fi>

Engineering Manual. 2010. Cobix Technologies AG. Julkaisematon lähde. 29 p.

Fire protection proof according to DIN 4102. 2011. BEEPLATE[®] Honeycomb Floor International. 19.9.2011. [Julkaisematon suunnitteluohje]. 6 p.

Geoplast S.p.A. [WWW]. [viitattu 9.1.2013]. Saatavissa: <http://www.geoplast.it/eng/casseforme/nuovo-nautilus/>

Haahtela, Y. & Kiiras, J. 2009. Talonrakennuksen kustannustieto. Haahtela-kehitys Oy, Helsinki. 388 s.

Hegger, J., Kerkeni, N. & Bieker, T. 2013. Gutachterliche Stellungnahme zum Tragverhalten und zur Bemessung von Beeplate Deckensystemen. H + P Ingenieure GmbH & Co. KG, Aachen. Auftraggeber: Häussler Innovation. [Julkaisematon tutkimusraportti]. 56 Seiten.

Häussler, Franz. 2013. Dipl.-Ing., Gesellschafter, Häussler Innovation GmbH. Sähköpostikeskustelu 10.1.2013 – 13.5.2013.

Il Grande, Marco. 2013. Insinööri, Daliform Group srl. Sähköpostikeskustelu 10.4.2013.

Jakobson, J. 2009. Bamtec-mattorautoite asuinrakennuksen välipohjaraudoitteena. Diplomityö. Espoo. Teknillinen korkeakoulu. Insinööritieteiden ja arkkitehtuurin tiedekunta. Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos. Talonrakennustekniikka. 39 s.

Lai, T. 2010. Structural Behavior of BubbleDeck® Slabs And Their Application to Lightweight Bridge Decks [verkkodokumentti]. Massachusetts Institute of Technology, June 2010. 41 p. [Viitattu 22.1.2013]. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1721.1/60774>

Lindberg, R. & Kerokoski, O. 2010. Teräsbetonirakenteet. Tampereen teknillinen yliopisto, versio 15.11.2010. Luentomoniste. 294 s.

Loftorka [WWW]. [Viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: www.loftorka.is

Lumme, Pentti. 2013. Kehitysjohdaja, Rudus Oy. Ramboll Finland, Espoo. Palaveri 18.6.2013.

Mota, M. 2010. Voided slabs – then and now [verkkoartikkeli]. Concrete Industry Board Bulletin, summer 2010. [viitattu 9.1.2013]. Saatavissa: <http://www.cobias.com/en/downloads.html>

NA SFS-EN 1990. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990 Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki, Ympäristöministeriö. 7 s.

NA SFS-EN 1992-1-1. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki, Ympäristöministeriö. 15 s.

Nasvik, J. 2011. On the Bubble [verkkoartikkeli]. Concrete construction, December 5, 2011. Kuva Seth Pfeil. [Viitattu 13.2.2013]. Saatavissa: www.concreteconstruction.net

Nykyri, P. 2011a. Betonirakenteiden suunnittelu, Mitoitusperiaatteet, Taivutusmitoitus. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Luentomoniste. 20 s. [viitattu 5.2.2012]. Saatavissa: http://www.tekniikka.oamk.fi/~pekkany/opiskelijat/Betrak1/BET1_Luento-2-Taivutus_HA.pdf

Nykyri, P. 2011b. Laattarakenteet. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Luentomoniste. 25 s. [viitattu 14.2.2012]. Saatavissa: <http://www.tekniikka.oamk.fi/~pekkany/opiskelijat/Betrak2/Betrak-luento-laatat-HA-180111.pdf>

Palolahti, T., Kivimäki, C., Mäki, T. & Palomäki, J. 2011. Rakennusosien kustannuksia 2011. Rakennustieto Oy, Helsinki. 243 s.

Palomäki, J., Mäki, T. & Koskenvesa, A. 2009. Ratu KI-6017. Rakennustöiden menekit 2010. Helsinki, Rakennustieto Oy. © Talonrakennusteollisuus ry ja Rakennustietosäätiö RTS. 149 s.

Parking – general grids – BubbleDeck solutions. BubbleDeck®. 7 p. [viitattu 11.2.2013]. Julkaisematon lähde.

Ptacek, D. 2007. Semi-precast solution [verkkoartikkeli]. Concrete, June 2007. pp. 33-34 [viitattu 18.2.2013]. Saatavissa: <http://www.cobiax.com/en/downloads.html>

Rakennustekniikan käsikirja. 6, Talonrakennustekniikka 2. 1977. Toimitussihteeri Pontus Palmqvist. Kustannusosakeyhtiö Tammi, Helsinki. ss. 419–1059.

Ratu 0403. 2012. Talo-ratu-ohjekortti. Menetelmät ja menekit. Betonointi. Rakennustieto Oy. © Talonrakennusteollisuus ry ja Rakennustietosäätiö RTS. Laadinta: Mittaviiva Oy, Lauri Koistinen, Cristian Kivimäki. 18 s.

Recommended Static Calculation according to EC2. 2011. BEEPLATE® Honeycomb Floor International. 10.8.2011. [Julkaisematon suunnitteluohje]. 29 p.

RIL125 Teräsbetonirakenteet. 1986. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 438 s.

RIL 201-1-2011. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Eurokoodit EN 1990, EN 1991-1-1, EN 1991-1-3, EN 1991-1-4. 2011. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 190 s.

SFS-EN 1992-1-1. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 217 s.

SFS-EN 1992-1-2. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteiden palomitoitus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 90 s.

Site Erection & Installation Manual. Type A – Reinforcement Modules. 2008. [Verkko-dokumentti]. Edition 1, Revision C. BubbleDeck® UK Ltd. 11 p. [viitattu 21.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/index.html>

Site Erection & Installation Manual. Type B – Filigree Elements. 2008. [Verkkodokumentti]. Eq4. BubbleDeck® UK Ltd. 12 p. [viitattu 1.2.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/index.html>

Sommer, Stefan. 2013. Marketing Manager, Cobiax Technologies AG. Sähköpostikeskustelu 15.1.2013 – 4.2.2013.

Technical Paper. BubbleDeck® Span Guide. 2006. [Verkkodokumentti]. Revision 6.3 January 2009. BubbleDeck® UK Ltd. 10 p. [viitattu 24.1.2013]. Saatavissa: <http://www.bubbledeck-uk.com/download.html>

Thibaut, Pieter. 2013. Advice engineer, Airdeck Building Concepts nv. Sähköpostikeskustelu 11.3.2013 – 14.3.2013.

Voided slabs. In: Reference Guide [verkko-ohje]. Version 2012. Nemetschek Scia. [Viitattu 20.02.2013]. Saatavissa: <http://help.nemetschek-scia.com/ESA.htm#DOCLinkedTopics/Concrete/VoidedSlabs/VoidedSlabs.htm>

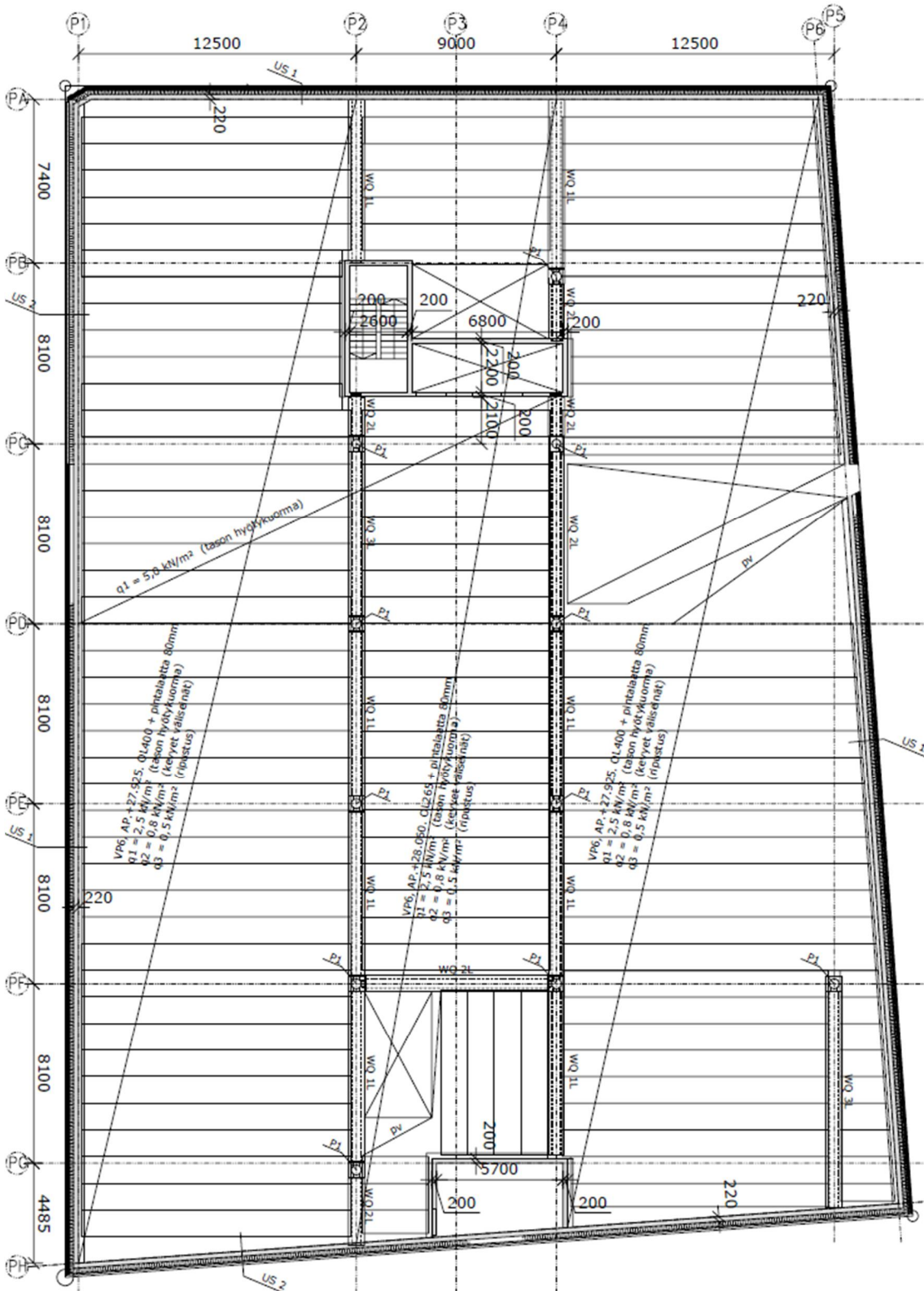
Walker, P. 2011. Tutorial AxisVM Cobiax [käyttöohje]. IngWare GmbH. 24 p. [viitattu 18.2.2013]. Saatavissa: http://www.ingware.ch/files/tutorial_cobiax.pdf

Ålander, Casper. 2012. Kehityspäällikkö, Celsa Steel Service Oy. Celsa Steel Service Oy, Espoo. Palaveri 20.12.2012.

Ålander, Casper. 2013. Kehityspäällikkö, Celsa Steel Service Oy. Ramboll Finland, Espoo. Palaveri 18.1.2013 sekä sähköpostikeskustelu 15.4.2013 – 18.6.2013.

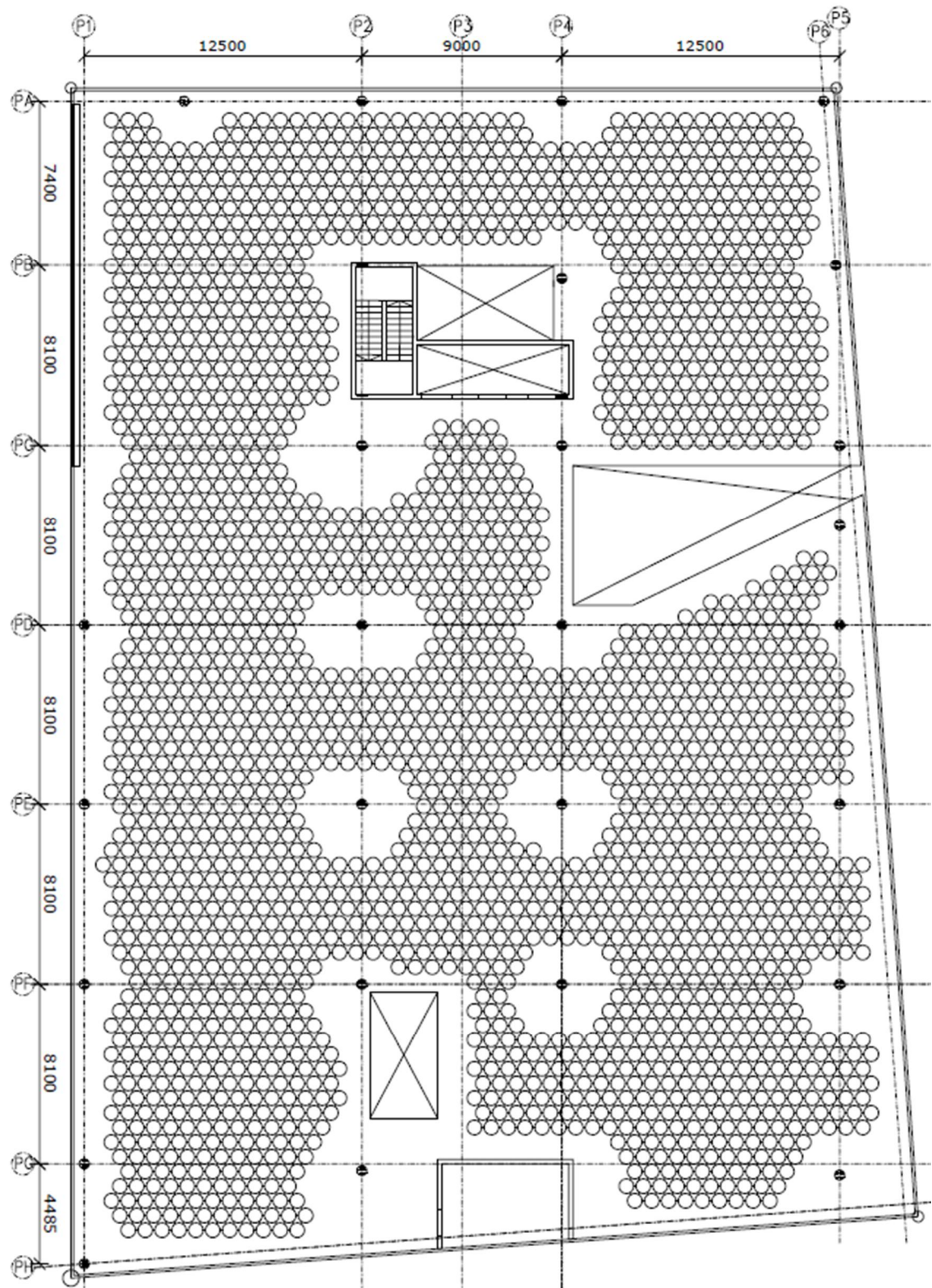
LIITE 1: ESIMERKKIKOHTIEN TASOKUVA

OP Vallilan 3. kerroksen ontelolaattavälipohjan tasokuva, ei mittakaavassa.



LIITE 2: BEEPLATE-LAATAN TASOKUVA

Kennojen sijoittuminen laattaan, ei mittakaavassa.



LIITE 3: MATHCAD-LASKENTAPOHJA

Laskentapohjaa käytettiin FEM-laskennan rinnalla laskentaan ja tarkistamiseen. FEM-laskentaa varten laskentapohjalla määritettiin alueet, joilla laatta on tehtävä leikkausraudoittamattomana, leikkausraudoitettuna ja umpinaisena, sekä viruma- ja kutistumaluvut.

Lisäksi pohjan avulla tarkistettiin laatan lävistyminen jokaisen pilarin kohdalla erikseen, sillä FEM-Design 10.0 -ohjelma laskee laatan lävistymisen Eurokoodin mukaan. Laskentapohjalla vertailtiin myös saatuja teräsmääriä ja halkeamaleveyksiä laatan alapinnassa.

Lähtötiedot

Betoni

Betonin lujuus saa olla enintään C50/60

$$f_{ck} := 35 \text{ MPa} \quad \text{C35/45}$$

$$f_{ctm} := 3.2 \text{ MPa}$$

$$f_{ctk.0.05} := 2.2 \text{ MPa}$$

$$\alpha_{cc} := 0.85$$

$$\alpha_{ct} := 1.0$$

$$\gamma_c := 1.35 \quad \text{RL1}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck} \cdot \alpha_{cc}}{\gamma_c} = 22.037 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ctd} := \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk.0.05}}{\gamma_c} = 1.63 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 43 \cdot \text{MPa}$$

$$E_{cm} := 34 \text{ GPa} \quad \text{umpilaatan sekanttimoduuli}$$

Teräs

$$\phi_{ap.x} := 16 \text{ mm} \quad \text{laatan alapinnan terästen suurimmat halkaisijat}$$

$$\phi_{ap.y} := 12 \text{ mm}$$

$$\phi_{yp.x} := 16 \text{ mm} \quad \text{laatan yläpinnan terästen suurimmat halkaisijat}$$

$$\phi_{yp.y} := 16 \text{ mm}$$

$$A_{sl.x} := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi_{ap.x}^2 = 201.062 \cdot \text{mm}^2$$

$$A_{sl.y} := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi_{ap.y}^2 = 113.097 \cdot \text{mm}^2$$

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa}$$

$$f_{ywk} := 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s := 1.1 \quad \text{RL1}$$

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 454.545 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{ywd} := \frac{f_{ywk}}{\gamma_s} = 454.545 \text{ MPa}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

Kuormat

$$m_{Ed,x} := 150 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad \text{momentti tarkasteltavassa pisteessä, alemmat ap-teräkset}$$

$$m_{Ed,y} := 100 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad \text{momentti tarkasteltavassa pisteessä, ylemmät ap-teräkset}$$

$$V_{Ed} := 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad \text{leikkausvoimien raja-arvot lasketaan kohdassa "Leikkaus"}$$

$$N_{Ed} := 0 \text{ kN} \quad \text{ei laatansuuntaista normaalivoimaa}$$

$$g_{k1} := 0.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{lisäkuorma}$$

$$q_k := 3.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{hyötykuorma}$$

Laatan mitat

$L_x := 12.5 \text{ m}$	Laatan jännevälit	kennon korkeus	laatta	halkaisija	kevennys
		HK20	34+	70	1,93
$L_y := 8.1 \text{ m}$		HK26	40+	71,5	2,80
		HK31	45+	66	3,38
$h_{hk} := 310 \text{ mm}$	Kennon korkeus	HK38	52+	66	4,28
		HK46	60+	70	5,09
$d_H := 660 \text{ mm}$	Kennon halkaisija	HK52	66+	71,5	5,80
$b_w := 100 \text{ mm}$	Kennojen välisen uuman leveys				
$c_{ap} := 20 \text{ mm}$	Alapinnan terästen peitepaksuus				
$c_{yp} := 20 \text{ mm}$	Yläpinnan terästen peitepaksuus pilarin kohdalla				

Uumien välinen keskeltä keskelle -mitta

$$e_{web} := d_H + b_w = 760 \text{ mm}$$

Laatan paksuus

$$h := 430 \text{ mm}$$

Taivutus

Laatan tehollinen korkeus alempiin teräksiin (suuremman momentin suunta)

$$d_x := h - c_{ap} - 0.5 \cdot \phi_{ap,x} = 0.402 \text{ m}$$

Laatan tehollinen korkeus ylempiin teräksiin

$$d_y := h - c_{ap} - \phi_{ap,x} - 0.5 \cdot \phi_{ap,y} = 0.388 \text{ m}$$

Suhteellinen momentti

$$\mu_x := \frac{m_{Ed,x}}{f_{cd} \cdot d_x^2} = 0.042 \qquad \mu_y := \frac{m_{Ed,y}}{f_{cd} \cdot d_y^2} = 0.03$$

$$\mu_b := 0.358 \quad \text{Yliraidoitettun rakenteen raja}$$

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta_x := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_x} = 0.043 \qquad \beta_y := 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu_y} = 0.031$$

Mekaaninen raudoitussuhde

$$\omega_x := \beta_x \qquad \omega_y := \beta_y$$

Sisäinen momenttivarsi

$$z_x := d_x \cdot \left(1 - \frac{\beta_x}{2}\right) = 393.348 \cdot \text{mm} \qquad z_y := d_y \cdot \left(1 - \frac{\beta_y}{2}\right) = 382.061 \cdot \text{mm}$$

Raudoituksen pinta-ala

$$A_{s,x1} := \frac{m_{Ed,x}}{z_x \cdot f_{yd}} = 838.952 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \qquad A_{s,y1} := \frac{m_{Ed,y}}{z_y \cdot f_{yd}} = 575.824 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{s,\min,x} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d_x, 0.0013 \cdot d_x\right) = 668.928 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{vähimmäisraudoitus umpilaatalla}$$

$$A_{s,\min,y} := \max\left(0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot d_y, 0.0013 \cdot d_y\right) = 645.632 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad \text{vähimmäisraudoitus umpilaatalla}$$

$$A_{s,x} := \max(A_{s,x1}, A_{s,\min,x}) = 838.952 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{s,y} := \max(A_{s,y1}, A_{s,\min,y}) = 645.632 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Eurokoodin lievennys paksuille laatoille?
kohta 9.3.1.1 (1)

Tankovälit alapinnan teräksillä

$$k_x := \frac{A_{s1,x}}{A_{s,x}} = 239.658 \cdot \text{mm} \qquad k_y := \frac{A_{s1,y}}{A_{s,y}} = 175.173 \cdot \text{mm}$$

Leikkaus

laskentapohja pienemmällä d-mitalla (varmalla puolella)

Rakenteen sisäinen momenttivarsi (Beeplate-ohje)

$$z_{hd} := 0.9 \cdot d_y = 349.2 \text{ mm}$$

Suurin leikkauskestävyys

Eurokoodin kohdan 9.3.2 mukaan laatoissa, joissa käytetään ylöstaivutettuja tai erillisiä leikkausraudoitteita, on leikkauskestävyyden ylärajaa pienennettävä kertoimen $|V_{Rd}| \leq (1/3) \cdot V_{Rd,max}$ mukaisesti

$$\alpha_{cw} := 1.0$$

$$\nu := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250 \text{ MPa}} \right) = 0.516$$

$$\nu_1 := \nu$$

$$\theta := 45 \text{ deg} \quad \text{betonin puristussauvojen ja leikkausvoimaa kohtisuorassa olevan rakenneseosan akselin välinen kulma. Kulman on oltava välillä 21,8...45 astetta.}$$

Beeplate laatan suurin leikkauskestävyys kennojen alueella

$$V_{Rd,max} := \frac{1}{3} \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z_{hd} \cdot \nu_1 \cdot f_{cd}}{(\cot(\theta) + \tan(\theta)) \cdot e_{web}} = 87.079 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Leikkausraudoittamattoman kevennetyn laatan kapasiteetti

$$C_{Rd,c} := \frac{0.18}{\gamma_c}$$

$$k := \min \left(1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_x}}, 2.0 \right) = 1.705$$

$$\phi_{s1} := 12 \text{ mm} \quad \text{alapinnan terästen halkaisija leikkausraudoittamattomalla laatanosalla suurimman leikkausvoiman kohdalla. terästen on jatkuttava mitan } l_{bd} + d \text{ yli tarkasteltavan poikkileikkauksen}$$

$$k_{s1} := 175 \text{ mm} \quad \text{alapinnan terästen k-jako leikkausraudoittamattomalla laatanosalla tarkasteltavassa poikkileikkauksessa}$$

$$a_{s1} := \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi \cdot \phi_{s1}^2}{k_{s1}} = 646.27 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{s1,v} := a_{s1} \cdot e_{web} = 491.166 \cdot \text{mm}^2$$

$$\rho_1 := \min \left(0.02, \frac{A_{s1,v}}{b_w \cdot d_y} \right) = 0.013$$

$$k_1 := 0.15$$

$$N_{Ed} = 0 \cdot \text{kN} \quad \text{laattassa ei ole normaalivoimaa}$$

$$A_c := h \cdot e_{web} = 0.327 \text{m}^2$$

$$\sigma_{cp} := \min\left(\frac{N_{Ed}}{A_c}, 0.2 \cdot f_{cd}\right) = 0 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

$$v_{min} := 0.035 \cdot k^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{MPa} = 0.461 \cdot \text{MPa}$$

Leikkauskestävyys on suurempi seuraavista

$$v_{Rd.c.1} := \frac{\left[C_{Rd.c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d_y}{e_{web}} = 41.076 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$v_{Rd.c.2} := \frac{(v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d_y}{e_{web}} = 23.542 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Joten

$$v_{Rd.c} := \max(v_{Rd.c.1}, v_{Rd.c.2}) = 41.076 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Alueet, jotka vaativat leikkausraudoitusta

Leikkausvoiman ylittäessä arvon $v_{Rd.c}$ on laattaaan listäävä leikkausraudoitus, joka välittää koko leikkausvoiman

$$\theta = 45 \cdot \text{deg} \quad \text{puristuspuunnan kulma}$$

Raudoitteet/uuma

$$\phi_{sw} := 12 \text{mm} \quad \text{Z-teräksen halkaisija}$$

$$A_{sw} := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi_{sw}^2 = 113.097 \cdot \text{mm}^2 \quad \text{Z-teräksen poikkipinta-ala}$$

Terästen välinen etäisyys, kun jokaiseen kennovaliin sijoitetaan kaksi leikkausterästä etäisyyden s päähän toisistaan

$$s := 2 \cdot \left(\tan(30 \text{deg}) \cdot \frac{\frac{d_H}{2} + 50 \text{mm}}{2} \right) = 0.219 \text{m}$$

Pystysuuntaisten leikkausteräksten leikkauskapasiteetti (jaettuna metrin pituudelle uumaa ja metrin leveydelle laattaa)

$$v_{Rd,s} := \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot z_{hd} \cdot \cot(\theta)}{s \cdot e_{web}} = 107.663 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Laattaa ei saa leikkausraudoittaa alueella jolla leikkausvoima ylittää leikkauskapasiteetin yläraja-arvon

$$v_{Rd,max} = 87.079 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Näin ollen laatta tehdään umpinaisena kun leikkausvoima yrittää rajan

$$v_{Rd} := \min(v_{Rd,s}, v_{Rd,max}) = 87.079 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Raudoittamattoman umpilaatan leikkauskestävyys

Leikkauskestävyys on suurempi seuraavista

$$v_{Rd,c,umpi.1} := \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} \cdot \text{MPa} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot d_x = 323.444 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$v_{Rd,c,umpi.2} := (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot d_x = 185.373 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Joten

$$v_{Rd,c,umpi} := \max(v_{Rd,c,umpi.1}, v_{Rd,c,umpi.2}) = 323.444 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Yhteenvedo leikkausmitoituksesta

Tarkista alapinnan terästen halkaisija ja jako sekä käytettävät Z-teräkset!

Kevennetty laatta voidaan tehdä leikkausraudoittamattomana rajaan

$$v_{Rd,c} = 41.076 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

asti ja leikkausraudoitettuna rajaan

$$v_{Rd} = 87.079 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

asti. Tämän rajan ylittävältä osalta laatta on tehtävä raudoittamattomana umpilaattana. Umpilaatta kestää raudoittamattomana rajaan

$$v_{Rd,c,umpi} = 323.444 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

asti.

Lävistys

Laatan lävistyskapasiteetti ilman hattuteräksiä

laskentapohja pienemmällä d-mitalla (varmalla puolella)

Syötä pilarin mitat, voimasuureet, yp:n teräsmäärät ja mahdollinen reunapilarin piiri

Pilarin sivumitat

$$b_p := 450\text{mm} \quad \text{pyöreälle pilarille anna } b_p\text{:n arvo}$$

$$h_p := 450\text{mm}$$

Pilarin yläpäässä oleva normaalivoima ja momentti

$$N_{d,p} := 848\text{kN}$$

$$M_{d,p,x} := 0\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{d,p,y} := 0\text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{d,p} := \sqrt{M_{d,p,x}^2 + M_{d,p,y}^2} = 0\text{kN}\cdot\text{m}$$

0,5*d:n päässä tuen reunasta olevassa poikkileikkauksessa ankkuroidun raudoituksen pinta-ala

$$\phi_{x,tuki} := 16\text{mm} \quad \phi_{y,tuki} := 16\text{mm}$$

$$k_{x,tuki} := 100\text{mm} \quad k_{y,tuki} := 125\text{mm}$$

$$A_{s,x,tuki} := \frac{\pi \cdot \phi_{x,tuki}^2}{4 \cdot k_{x,tuki}} = 2.011 \times 10^3 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \quad A_{s,y,tuki} := \frac{\pi \cdot \phi_{y,tuki}^2}{4 \cdot k_{y,tuki}} = 1.608 \times 10^3 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Teholliset korkeudet

$$d_{x,tuki} := h - c_{yp} - 0.5 \cdot \phi_{x,tuki} = 0.402\text{m}$$

$$d_{y,tuki} := h - c_{yp} - \phi_{x,tuki} - 0.5 \cdot \phi_{y,tuki} = 0.386\text{m}$$

Tehollisen korkeuden vaikutuskerroin (varmalla puolella)

$$k := \max\left(1.6 - \frac{d_{y,tuki}}{1\text{m}}, 1.0\right) = 1.214$$

Suhteellinen raudoituspinta-ala

$$\rho_x := \frac{A_{s,x,tuki}}{d_{x,tuki}} = 5.002 \times 10^{-3} \quad \rho_y := \frac{A_{s,y,tuki}}{d_{y,tuki}} = 4.167 \times 10^{-3}$$

$$\rho_1 := \sqrt{\rho_x \cdot \rho_y} = 4.565 \times 10^{-3}$$

$$\rho := \min(\rho_1, 0.008) = 4.565 \times 10^{-3}$$

Leikkauksen rajaama piiri $0.5 \cdot d$:n päässä tuen reunasta

Suorakulmiopoikkileikkaus

$$u_{sk1} := 2 \cdot h_p + 2 \cdot b_p + 2 \cdot d_{x.tuki} + 2 \cdot d_{y.tuki} = 3.376 \text{ m}$$

$$u_{sk2} := 0 \text{ m} \quad \text{Syötä piirin arvo, jos kyseessä on reunapilari}$$

$$u_{sk3} := \begin{cases} u_{sk1} & \text{if } u_{sk2} = 0 \text{ m} \\ u_{sk2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad u_{sk} := \min(u_{sk1}, u_{sk3}) = 3.376 \text{ m}$$

Ympyräpoikkileikkaus

$$u_{ymp1} := \pi \cdot (d_{y.tuki} + b_p) = 2.626 \text{ m}$$

$$u_{ymp2} := 0 \text{ m} \quad \text{Syötä piirin arvo, jos kyseessä on reunapilari}$$

$$u_{ymp3} := \begin{cases} u_{ymp1} & \text{if } u_{ymp2} = 0 \text{ m} \\ u_{ymp2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad u_{ymp} := \min(u_{ymp1}, u_{ymp3}) = 2.626 \text{ m}$$

Leikkauspinta-ala

Suorakulmiopoikkileikkaus

$$A_{u.sk} := (h_p + d_{x.tuki}) \cdot (b_p + d_{y.tuki}) = 0.712 \cdot \text{m}^2$$

Ympyräpoikkileikkaus

$$A_{u.ymp} := \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (d_{y.tuki} + b_p)^2 = 0.549 \text{ m}^2$$

Kuorman epäkeskisyyden

$$e := \frac{M_{d,p}}{N_{d,p}} = 0 \cdot \text{mm}$$

Kuorman epäkeskisyyden huomioon ottava kerroin

Suorakulmiopoikkileikkaus

$$\beta_{sk} := \frac{0.40}{1.5 \cdot e} = 0.4$$

$$1 + \frac{0.40}{\sqrt{A_{u.sk}}}$$

Suorakulmiopoikkileikkaus

$$\beta_{ymp} := \frac{0.40}{1.5 \cdot e} = 0.4$$

$$1 + \frac{0.40}{\sqrt{A_{u.ymp}}}$$

Laatan betonin lävistyskapasiteetti suorakaidepoikkileikkaukselle

$$V_{Rd.c.sk} := k \cdot \beta_{sk} \cdot (1 + 50 \cdot \rho) \cdot u_{sk} \cdot d_{y.tuki} \cdot f_{ctd} = 1.267 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$V_{Rd.red.sk} := N_{d,p} - \left[1.15 \cdot \left(g_{k1} + 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot h \right) + 1.5 \cdot q_k \right] \cdot A_{u.sk} = 835.259 \cdot \text{kN}$$

$$KA_{V.Rd.c.sk} := \frac{V_{Rd.red.sk}}{V_{Rd.c.sk}} = 65.944\%$$

Laatan betonin lävistyskapasiteetti ympyräpoikkileikkaukselle

$$V_{Rd.c.ymp} := k \cdot \beta_{ymp} \cdot (1 + 50 \cdot \rho) u_{ymp} \cdot d_{y.tuki} \cdot f_{ctd} = 985.378 \text{ kN}$$

$$V_{Rd.red.ymp} := N_{d.p} - \left[1.15 \cdot \left(g_{k1} + 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot h \right) + 1.5 \cdot q_k \right] \cdot A_{u.ymp} = 838.181 \text{ kN}$$

$$KA_{V.Rd.c.ymp} := \frac{V_{Rd.red.ymp}}{V_{Rd.c.ymp}} = 85.062\%$$

Lävistysraudoituksen mitoitus

Jos $V_{Rd.red} > V_{Rd.c}$ on lisättävä lävistysraudoitus seuraavasti

Lävistysraudat

$$f_{yd.lävistys} := \min(f_{yd}, 300 \text{ MPa}) = 300 \text{ MPa} \quad \text{ei saa käyttää suurempaa arvoa kuin 300 MPa}$$

$$n_{hattu} := 2 \quad \text{kpl hattuteräksiä molempiin suuntiin (n+n)}$$

$$\phi_{hattu} := 16 \text{ mm}$$

$$\alpha_{hattu} := 45 \text{ deg} \quad \text{hattuterästen kulma, oltava suurempi kuin 30 astetta}$$

Hattuterästen poikkipinta-ala yhteensä

$$A_{hattu} := 4 \cdot n_{hattu} \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot \phi_{hattu}^2 = 1.608 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Leikkausrautojen kapasiteetti

$$V_{Rd.s} := A_{hattu} \cdot f_{yd} \cdot \sin(\alpha_{hattu}) = 516.99 \text{ kN}$$

Leikkauskestävyys yhteensä

Suorakaidepoikkileikkaus

$$V_{Rd.sk} := \min(0.25 \cdot V_{Rd.c.sk} + V_{Rd.s}, 2 \cdot V_{Rd.c.sk}) = 833.647 \text{ kN}$$

Ympyräpoikkileikkaus

$$V_{Rd.ymp} := \min(0.25 \cdot V_{Rd.c.ymp} + V_{Rd.s}, 2 \cdot V_{Rd.c.ymp}) = 763.335 \text{ kN}$$

Lävistysraudoitetun laatan käyttöaste

Suorakaidepoikkileikkaus

$$KA_{V.Rd.s.sk} := \frac{V_{Rd.red.sk}}{V_{Rd.sk}} = 100.193\%$$

Ympyräpoikkileikkaus

$$KA_{V.Rd.s.ymp} := \frac{V_{Rd.red.ymp}}{V_{Rd.ymp}} = 109.805\%$$

Laatan vapaan reunan kennojen viereiset vetoteräkset

Leikkausterästen välittämä voima kennojen uumassa

$$V_{Rd.s.uuma} := v_{Rd.s} \cdot e_{web} = 81.824 \text{ kN}$$

Kulma, jossa puristusvoima tulee laatan alapintaan

$$v := \text{atan}\left(\frac{z_x}{\frac{e_{web}}{2}}\right) = 45.989 \text{ deg}$$

Puristavan voiman vaakasuora komponentti H betonissa

$$V_{steg} := V_{Rd.s.uuma}$$

$$H := \frac{V_{steg}}{\tan(v)} = 79.047 \text{ kN}$$

Ylösvedettävä voima Z metrille laattaa

$$Z := H \cdot \frac{\sin(30\text{deg})}{e_{web}} = 52.005 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Tarvittava vetoraudoituksen poikkipinta-ala

$$A_{s.erf} := \frac{Z}{f_{yd}} = 114.411 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

12 mm Z-terästen k-jako laatan reunassa

$$\frac{\pi \cdot \frac{(12\text{mm})^2}{4}}{A_{s.erf}} = 0.989 \text{ m}$$

Kutistuma

Kuivumiskutistuma

EC2 liite B.2

$t := 73000$	vrk	tarkasteltava ajanhetki (73000 on 200 vuotta)
$t_s := 7$	vrk	aika jälkihoidon päättymisestä
$t_0 := 14$	vrk	kuormituksen alkamisajankohta
$\alpha_{ds1} := 4$		Sementtilaadusta riippuvia kertoimia
$\alpha_{ds2} := 0.12$		
$\alpha := 0$		sementin tyypistä riippuva kerroin, ks. EC2 kaava B.9
$f_{cm0} := 10\text{MPa}$		
$RH := 50\%$		ilman suhteellinen kosteus
$RH_0 := 100\%$		

$$\beta_{RH} := 1.55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1.356$$

Kuivumiskutistuman perusarvo

$$\varepsilon_{cd,0} := 0.85 \cdot \left[(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot e^{\left(-\alpha_{ds2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)} \right] \cdot 10^{-6} \cdot \beta_{RH} = 4.542 \times 10^{-4}$$

Muunnettu paksuus

$$u := 2000\text{mm}$$

$$h_0 := 2 \cdot \frac{A_c}{u} = 0.327\text{m}$$

Kerroin

$$\beta_{ds} := \frac{(t - t_s)}{(t - t_s) + 0.04 \cdot \sqrt{\left(\frac{h_0}{1\text{mm}} \right)^3}} = 0.997 \quad \text{EC2 kaava 3.10}$$

Kerroin, joka riippuu muunnetusta paksuudesta

$$k_h := 0.75 \quad \text{EC2 taulukko 3.3}$$

Kuivumiskutistuman kehittyminen ajan funktiona

$$\epsilon_{cd} := \beta_{ds} \cdot k_h \cdot \epsilon_{cd,0} = 3.395 \times 10^{-4}$$

Sisäinen kutistuma

$$\epsilon_{ca,inf} := 2.5 \cdot \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} - 10 \right) \cdot 10^{-6} = 6.25 \times 10^{-5}$$

$$\beta_{as} := 1 - e^{(-0.2 \cdot t^{0.5})} = 1$$

Sisäinen kutistuma

$$\epsilon_{ca} := \beta_{as} \cdot \epsilon_{ca,inf} = 6.25 \times 10^{-5}$$

Kokonaiskutistuma ajanhetkellä t

$$\epsilon_{cs} := \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} = 4.02 \times 10^{-4}$$

Viruma

EC2 liite B.1

Betonin lujuuden huomioon otettavat kertoimet

$$\alpha_1 := \left(\frac{35 \text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.7} = 0.866$$

$$\alpha_2 := \left(\frac{35 \text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.2} = 0.96$$

$$\alpha_3 := \left(\frac{35 \text{MPa}}{f_{cm}} \right)^{0.5} = 0.902$$

Kerroin, joka huomioi suhteellisen kosteuden vaikutuksen

$$\varphi_{RH} := \begin{cases} \left(1 + \frac{1 - RH}{3 \sqrt{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \cdot \alpha_1 \right) \cdot \alpha_2 & \text{if } f_{cm} > 35 \text{MPa} \\ 1 + \frac{1 - RH}{3 \sqrt{\frac{h_0}{\text{mm}}}} \cdot \alpha_1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \varphi_{RH} = 1.563$$

Betonin lujuuden vaikutus

$$\beta_{f_{cm}} := \frac{16.8}{\sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}}} = 2.562$$

Kerroin, joka riippuus suht. kosteudesta ja poikkileik. muunn. paksuudesta

$$\beta_H := \begin{cases} \min \left[\left[1.5 \cdot 1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot \frac{h_0}{\text{mm}} + 250, 1500 \right] & \text{if } f_{cm} < 35 \text{MPa} \\ \min \left[\left[1.5 \cdot 1 + (0.012 \cdot RH)^{18} \right] \cdot \frac{h_0}{\text{mm}} + 250 \cdot \alpha_3, 1500 \cdot \alpha_3 \right] & \text{otherwise} \end{cases} \quad \beta_H = 715.748$$

Lämpötilakorjaus

$$T_{\Delta t_1} := 15 \quad \text{lämpötila aikavälillä } \Delta t_1$$

$$\Delta t_1 := t_0 \quad \text{aika vuorokausina, jonka betoni on lämpötilassa T}$$

Lämpötilakorjattu ikä kuormitusajanhetkellä. Ajanhetkiä eri lämpötiloissa voi lisätä summaamalla kaavaan

$$t_{0,T} := e^{-\left[\frac{4000}{(273+T_{\Delta t_1})} - 13.65 \right]} \cdot \Delta t_1 = 11.025$$

Sementin tyypin vaikutus betonin virumalukuun

$$t_{0,s} := \max \left[t_{0,T} \left(\frac{9}{2 + t_{0,T}} + 1 \right)^{\alpha}, 0.5 \right] = 11.025$$

Betonin kuormittumisen alkamisajan vaikutus nimelliseen virumalukuun

$$\beta_{t_0} := \frac{1}{0.1 + t_{0,s}^{0.20}} = 0.583$$

Betonin nimellinen virumaluku

$$\varphi_0 := \varphi_{RH} \cdot \beta_{f_{cm}} \cdot \beta_{t_0} = 2.333$$

Kerroin joka kuvaa virumisen kehittymistä ajan myötä kuormittumisen jälkeen

$$\beta_c := \left[\frac{(t - t_{0,s})}{(\beta_H + t - t_{0,s})} \right]^{0.3} = 0.997$$

Virumaluku

$$\varphi := \beta_c \cdot \varphi_0 = 2.326$$

Halkeilu

Teräsbetonirakenteet-luentomonisteen mukaan (Lindberg & Kerokoski 2010)

$$kk := 175\text{mm}$$

Syötä teräsjako

$$\alpha_A := 0.7$$

Hyötykuormien pienennyskerroin

Kevennyskuormat eri laatanpaksuuksilla

$$q_{k,hk} := \begin{cases} \left(-1.93 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) & \text{if } h_{hk} = 200\text{mm} \\ \left(-1.93 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) & \text{if } h_{hk} = 260\text{mm} \\ \left(-3.38 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) & \text{if } h_{hk} = 310\text{mm} \\ \left(-4.28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) & \text{if } h_{hk} = 380\text{mm} \\ \left(-5.09 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) & \text{if } h_{hk} = 460\text{mm} \\ \left(-5.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) & \text{if } h_{hk} = 520\text{mm} \end{cases}$$

Pysyvä kuorma

$$g_k := 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \cdot h + g_{k1} + q_{k,hk} = 7.87 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kuorma käyttörajatilassa

$$p_{k,1} := (g_k + \alpha_A \cdot q_k) \cdot 1\text{m} = 10.18 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pitkän ajan taivutusmomentti

$$M_{k,1} := \frac{p_{k,1} \cdot L_x^2}{11} = 144.602 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Teräsmäärä

$$A_{s,ap} := \frac{\pi \cdot \phi_{ap,x}^2}{4} \cdot \frac{1\text{m}}{kk} = 1.149 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Kimmomoduulien suhde

$$\alpha_e := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.882$$

Geometrinen rauditusuhde

$$\rho_{ap} := \frac{A_{s,ap}}{d_y \cdot 1m} = 2.961 \times 10^{-3}$$

$$\alpha_e \cdot \rho_{ap} = 0.017$$

Betonin puristuman ja terästen venymän syhde ϵ_c/ϵ_s

$$\epsilon_{c,s} := \rho_{ap} + \sqrt{\rho_{ap} \cdot \alpha_e \cdot (2 + \rho_{ap} \cdot \alpha_e)} = 0.19$$

Merkitään: $\epsilon_s := 0.1\%$

Näin ollen: $\epsilon_c := \epsilon_s \cdot \epsilon_{c,s} = 0.019 \cdot \%$

Neutraaliakselin sijainti

$$x_1 := \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_s} \cdot d_x = 64.304 \cdot \text{mm}$$

Sisäinen momenttivarsi käyttörajatilassa

$$z := d_x - \frac{x_1}{3} = 0.381 \text{ m}$$

Teräsjännitys

$$\sigma_{s,ap,1} := \frac{M_{k,1}}{z \cdot A_{s,ap}} = 330.715 \cdot \text{MPa}$$

Jos teräsjännitys $\sigma_{s,ap,1}$ on suurempi kuin

$$\sigma_{s,raja} := 0.6 \cdot f_{yk} = 300 \cdot \text{MPa}$$

on tehtävä halkeama- ja painumatarkastelu tai lisättävä teräsmäärää

Vähimmäisraudoitusala laatan alapinnassa

$$\psi_{2,i} := 0.3$$

Pitkäaikainen käyttörajatilan kuormitusyhdistelmä pinta-alavähennys huomioiden

$$p_k := (g_k + \psi_{2,i} \cdot \alpha_A \cdot q_k) \cdot 1m = 8.563 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Pitkän ajan mitoitusmomentti

$$M_k := \frac{P_k \cdot L_x^2}{11} = 121.634 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Teräsännitys

$$\sigma_{s,ap} := \frac{M_k}{z \cdot A_{s,ap}} = 278.184 \text{ MPa}$$

$$k_c := 1 \quad \text{Vetovoiman vaikuttaessa arvo on 1}$$

$$k := \begin{cases} 1 & \text{if } h \leq 300 \text{ mm} \\ \left[0.65 + \frac{[500 \text{ mm} - (h - 300 \text{ mm})]}{500 \text{ mm}} \right] \cdot 0.35 & \text{if } 300 \text{ mm} < h < 800 \text{ mm} \\ 0.65 & \text{otherwise} \end{cases} \quad k = 0.909$$

$$f_{ct,eff} := f_{ctm} \quad \text{"Halkeamaleveyksien ja vetojäykistysvaikutuksen laskentaan käytetään arvoa } f_{ctm} \text{" -EC2 7.1 (2) (Voimassa, jos halkeilu muodostuu vasta 28 päivän ikäiseen betoniin)}$$

$$h_{ct} := c_{ap} + 20 \text{ mm} + \phi_{ap,x} + \phi_{ap,y} = 0.068 \text{ m}$$

Betonipoikkileikkauksen vedetyn osan pinta-ala ennen ensimmäisen hakeaman muodostumista

$$A_{ct} := h_{ct} = 0.068 \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{m}}$$

Vähimmäisraudoitusala halkeilulle alapinnassa

$$A_{s,min} := \frac{k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{ct}}{\sigma_{s,ap}} = 711.034 \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

Halkeamaleveys laatan alapinnassa

$$k_1 := 0.8 \quad k_2 := 0.5$$

$$k_3 := 3.4 \quad k_4 := 0.425$$

Halkeilleen poikkileikkauksen neutraaliakselin sijainti voitaisiin laskea iteroimalla, mutta käytetään tässä yksinkertaistettua kaavaa Rakentajain Kalenterista 1990

$$x := \alpha_e \cdot \rho_{ap} \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\alpha_e \cdot \rho_{ap}}} - 1 \right) \cdot d_x = 0.068 \text{ m}$$

Tarkistetaan neutraaliakselin sijainti käyttämällä seuraavia suorakaidepoikkileikkauksen kaavoja. Kun S_c on likimain yhtä suuri kuin S_s , on neutraaliakseli oikein. Mikäli arvot eroavat huomattavasti toisistaan, on neutraaliakselin sijainti etsittävä iteroimalla.

$$S_c := 1\text{m} \cdot \frac{x^2}{2} = 2.336 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

$$S_s := \alpha_e \cdot A_{s.ap} \cdot (d_x - x) = 2.255 \times 10^6 \cdot \text{mm}^3$$

Betoniteräksiä ympäröivän , vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen korkeus

$$h_{c,eff1} := \min \left[2.5 \cdot (h - d_x), \frac{(h - x)}{3}, \frac{h}{2} \right] = 0.07\text{m} \quad \text{Eurokoodin mukaiset vaatimukset}$$

$$h_{c,eff2} := c_{ap} + 20\text{mm} + \phi_{ap,x} + \phi_{ap,y} = 0.068\text{m} \quad \text{Beeplate-laatan vaatimus}$$

$$h_{c,eff} := \min(h_{c,eff1}, h_{c,eff2}) = 0.068\text{m}$$

Betoniteräksiä ympäröivän , vetojännityksen alaisen betonialueen tehollinen pinta-ala

$$A_{c,eff} := h_{c,eff} \cdot 1\text{m} = 0.068 \cdot \text{m}^2$$

$$\rho_{p,eff} := \frac{A_{s.ap}}{A_{c,eff}} = 0.017$$

Suurin halkeamaväli

$$s_{r,max} := \begin{cases} \left(k_3 \cdot c_{ap} + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi_{ap,x}}{\rho_{p,eff}} \right) & \text{if } k_k \leq 5 \cdot \left(c_{ap} + \frac{\phi_{ap,x}}{2} \right) \\ [(h - x) \cdot 1.3] & \text{otherwise} \end{cases} \quad s_{r,max} = 0.47\text{m}$$

$$k_t := 0.4 \quad \begin{array}{l} \text{lyhytaikaiskuormille 0,6} \\ \text{pitkäaikaiskuormille 0,4} \end{array}$$

$$\epsilon_{nm} = \epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$$

$$\epsilon_{nm} := \max \left[0.6 \cdot \frac{\sigma_{s.ap}}{E_s}, \frac{\sigma_{s.ap} - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \right] = 9.745 \times 10^{-4}$$

Halkeamaleveys

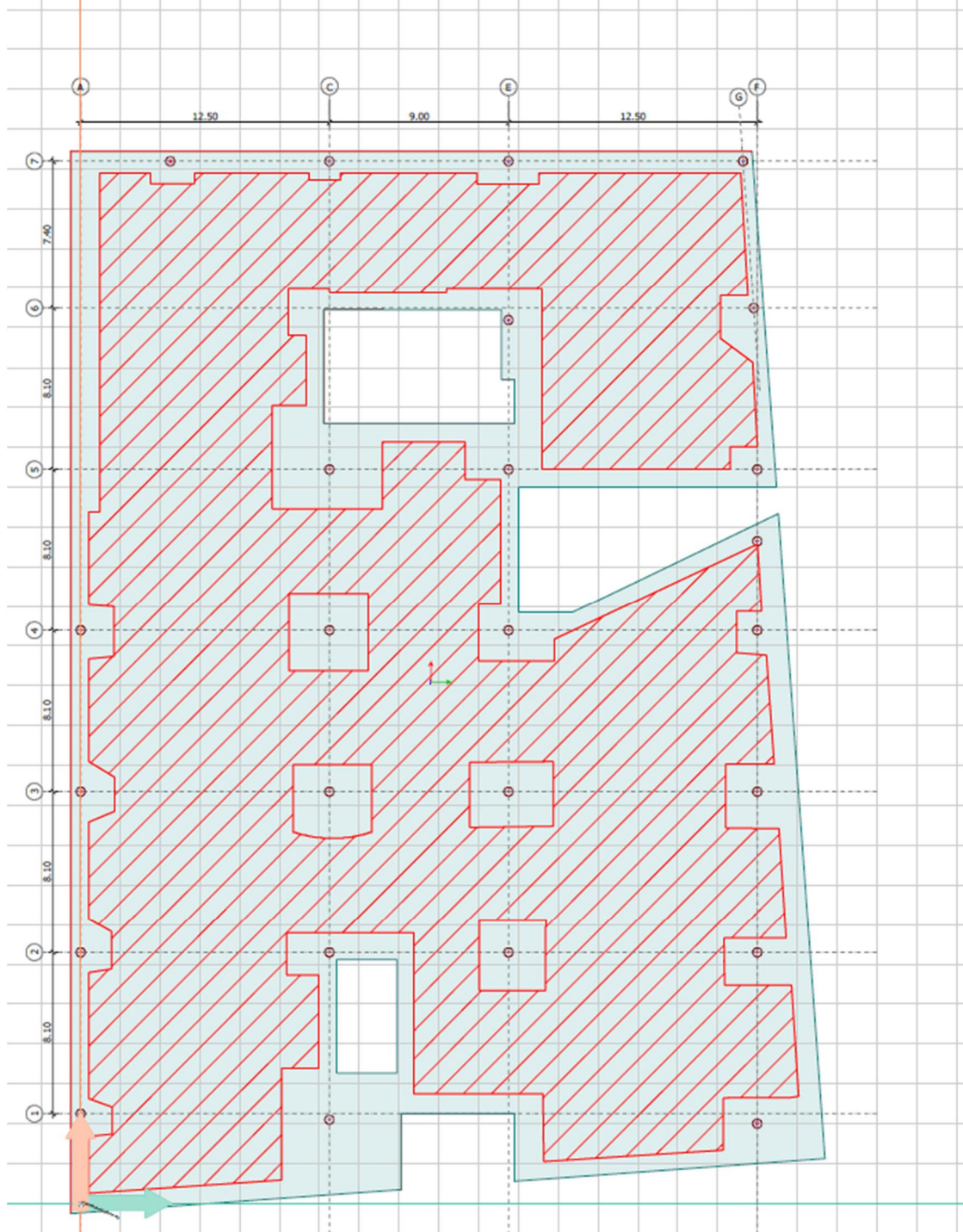
$$w_k := s_{r,max} \cdot \epsilon_{nm} = 0.458 \cdot \text{mm}$$

LIITE 4: FEM-DESIGN-LASKENTATULOKSET

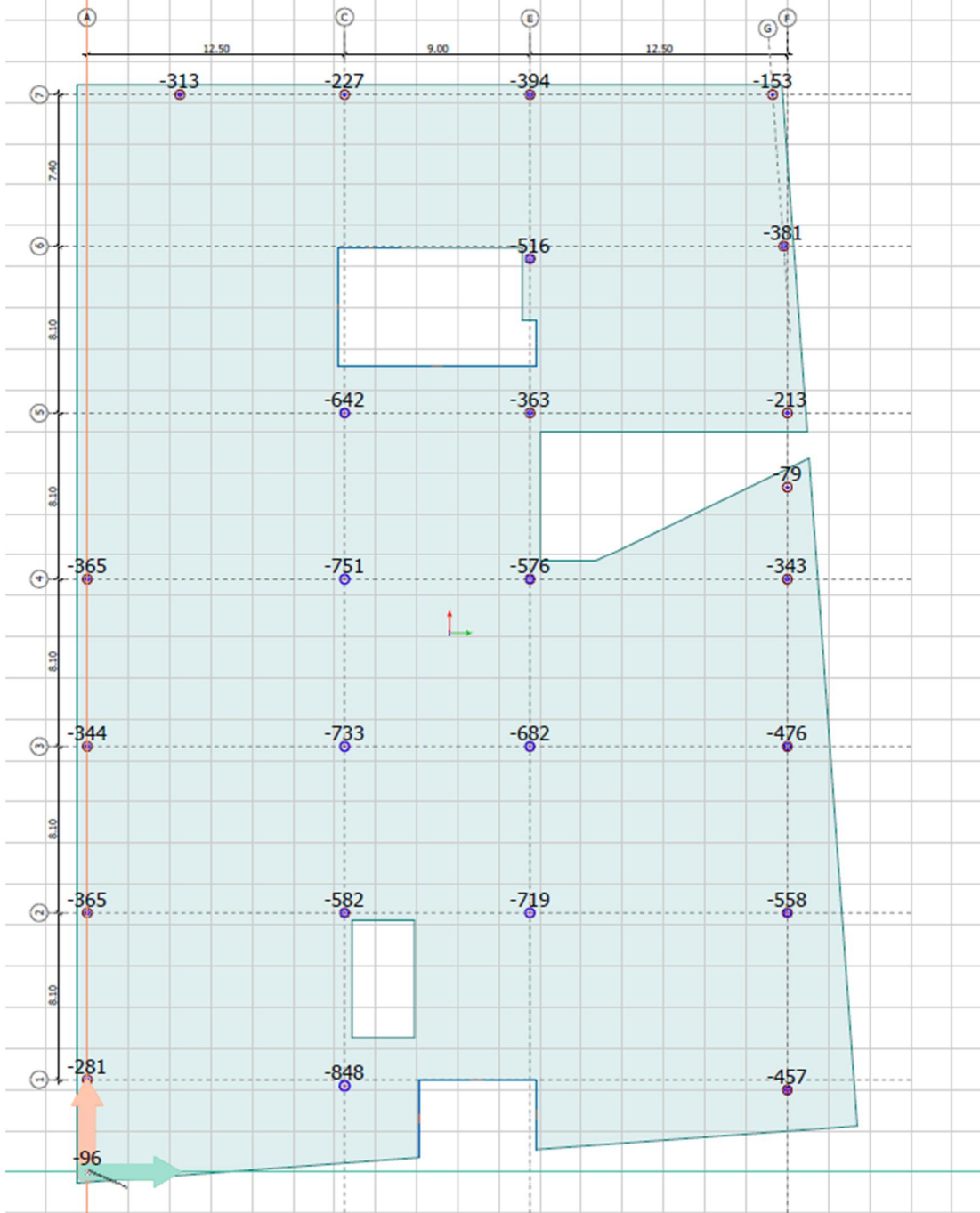
Liite sisältää seuraavat tulokset:

- Kevennyskuorman sijainti laatussa
- Pilareiden tukireaktiot
- Leikkausvoima x-suuntaan
- Leikkausvoima y-suuntaan
- Taivutusmomentti alapinnassa x-suuntaan
- Taivutusmomentti alapinnassa y-suuntaan
- Taivutusmomentti yläpinnassa x-suuntaan
- Taivutusmomentti yläpinnassa y-suuntaan
- Vaadittu teräsmäärä alapinnassa x-suuntaan
- Vaadittu teräsmäärä alapinnassa y-suuntaan
- Vaadittu teräsmäärä yläpinnassa x-suuntaan
- Vaadittu teräsmäärä yläpinnassa y-suuntaan
- Raudoitus alapinnassa x-suuntaan
- Raudoitus alapinnassa y-suuntaan
- Raudoitus yläpinnassa x-suuntaan
- Raudoitus yläpinnassa y-suuntaan
- Taipuma laatan omapainosta
- Laatan kokonaistaipuma
- Halkeilu laatan alapinnassa
- Halkeilu laatan yläpinnassa

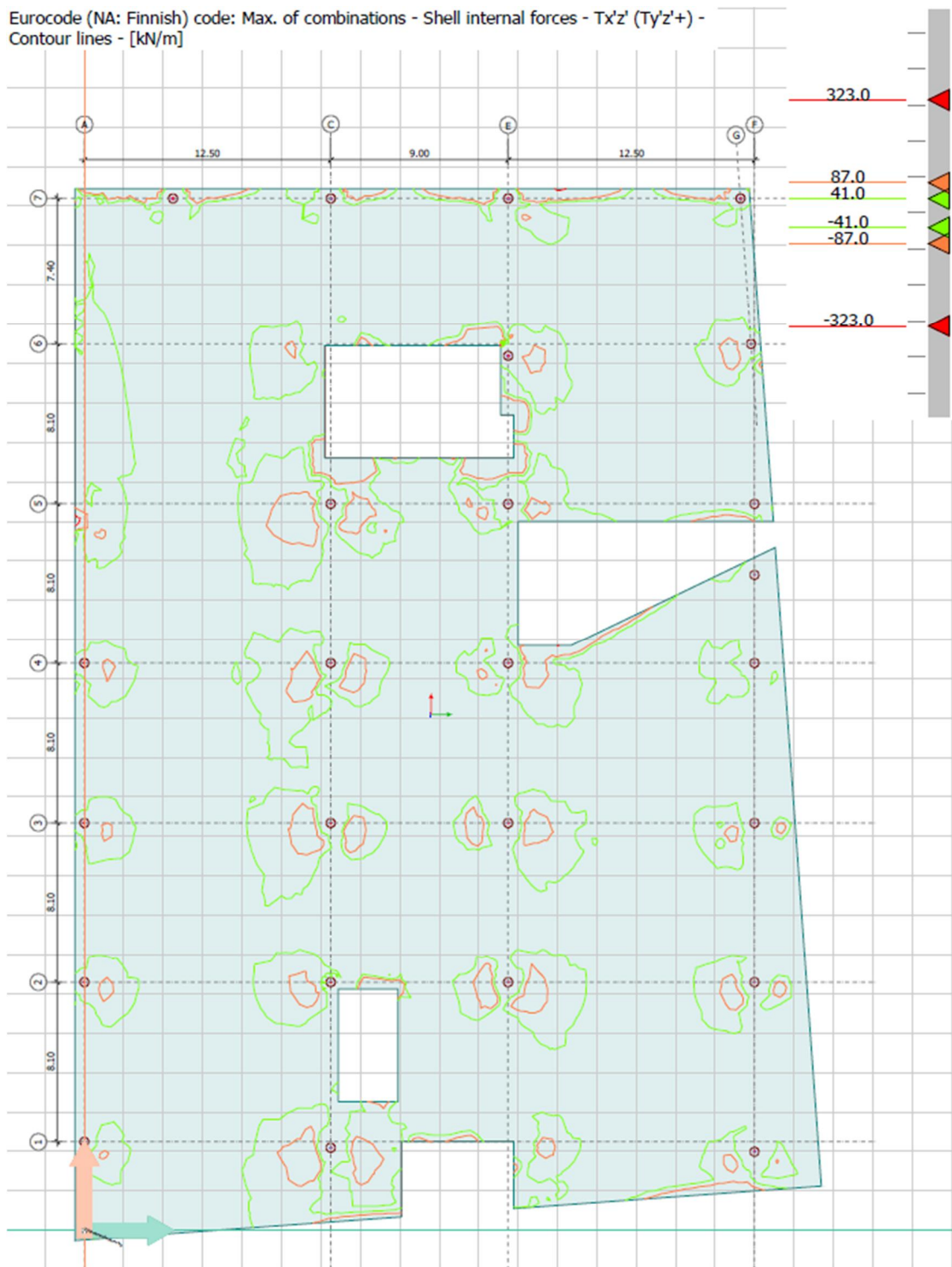
Eurocode (NA: Finnish)



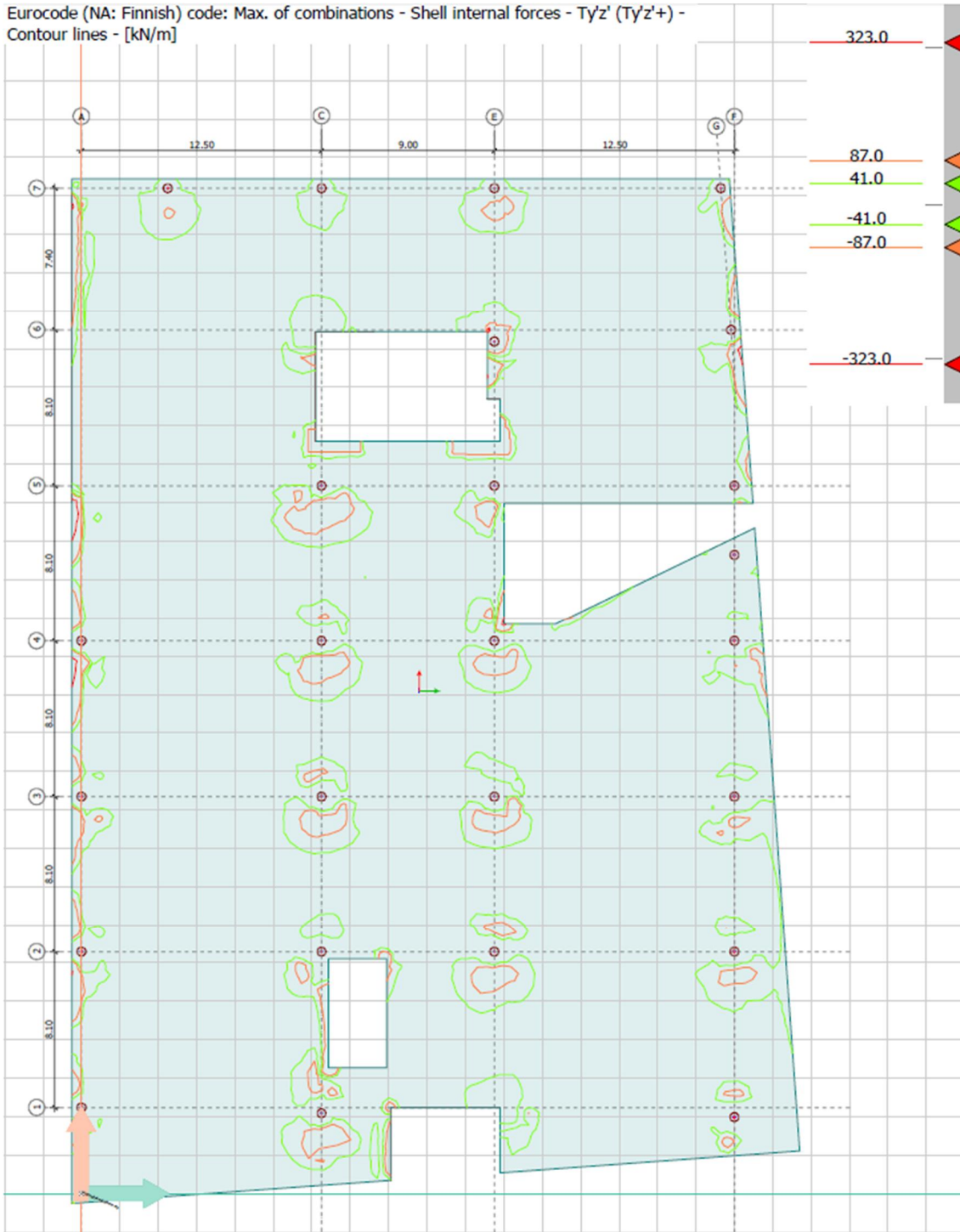
Eurocode (NA: Finnish) code: Max. of combinations - Reactions - Fz'+ - [kN, kNm, kN/m, kNm/m, kN/m2]



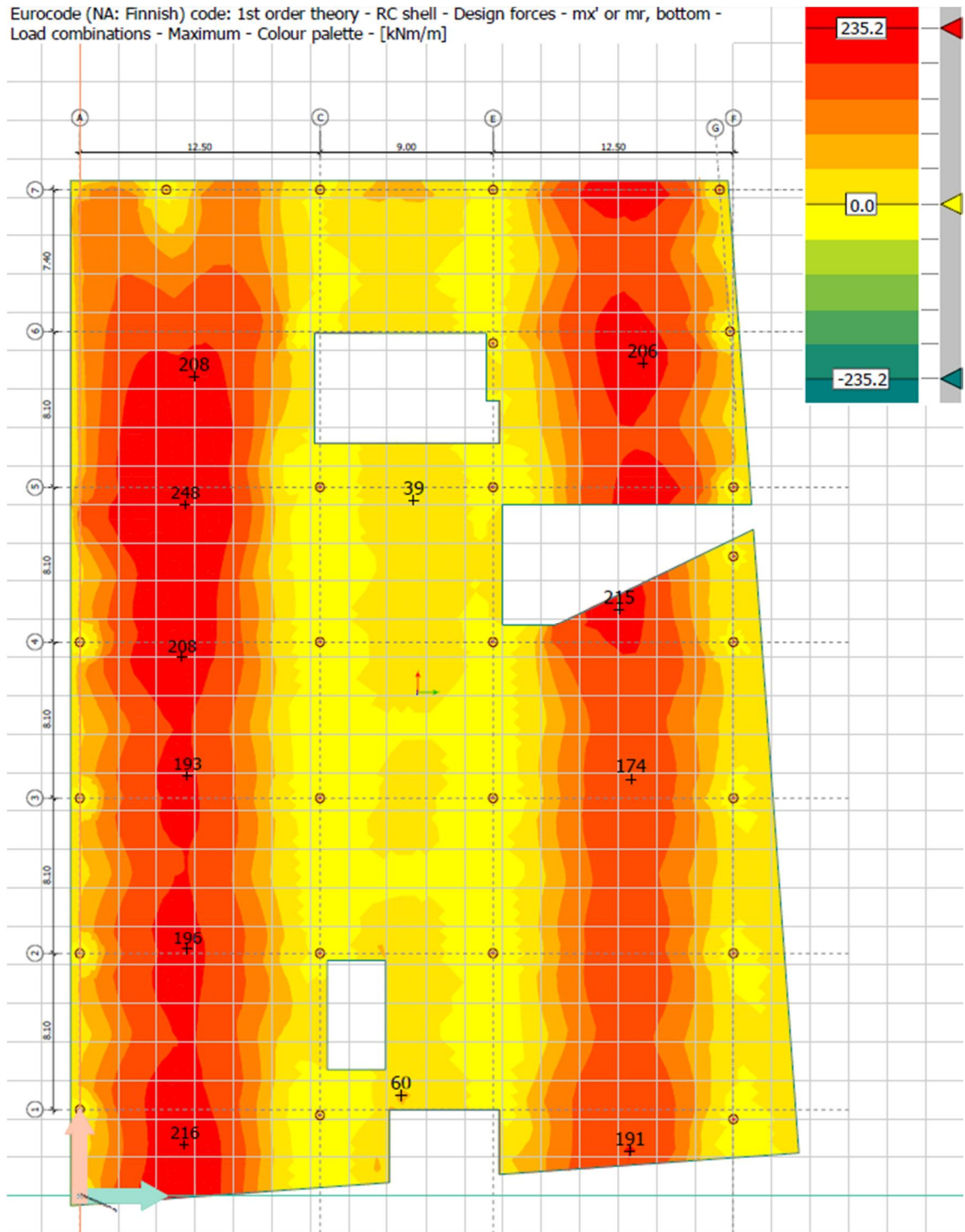
Eurocode (NA: Finnish) code: Max. of combinations - Shell internal forces - $T_x'z'$ ($T_y'z'$ +) -
Contour lines - [kN/m]



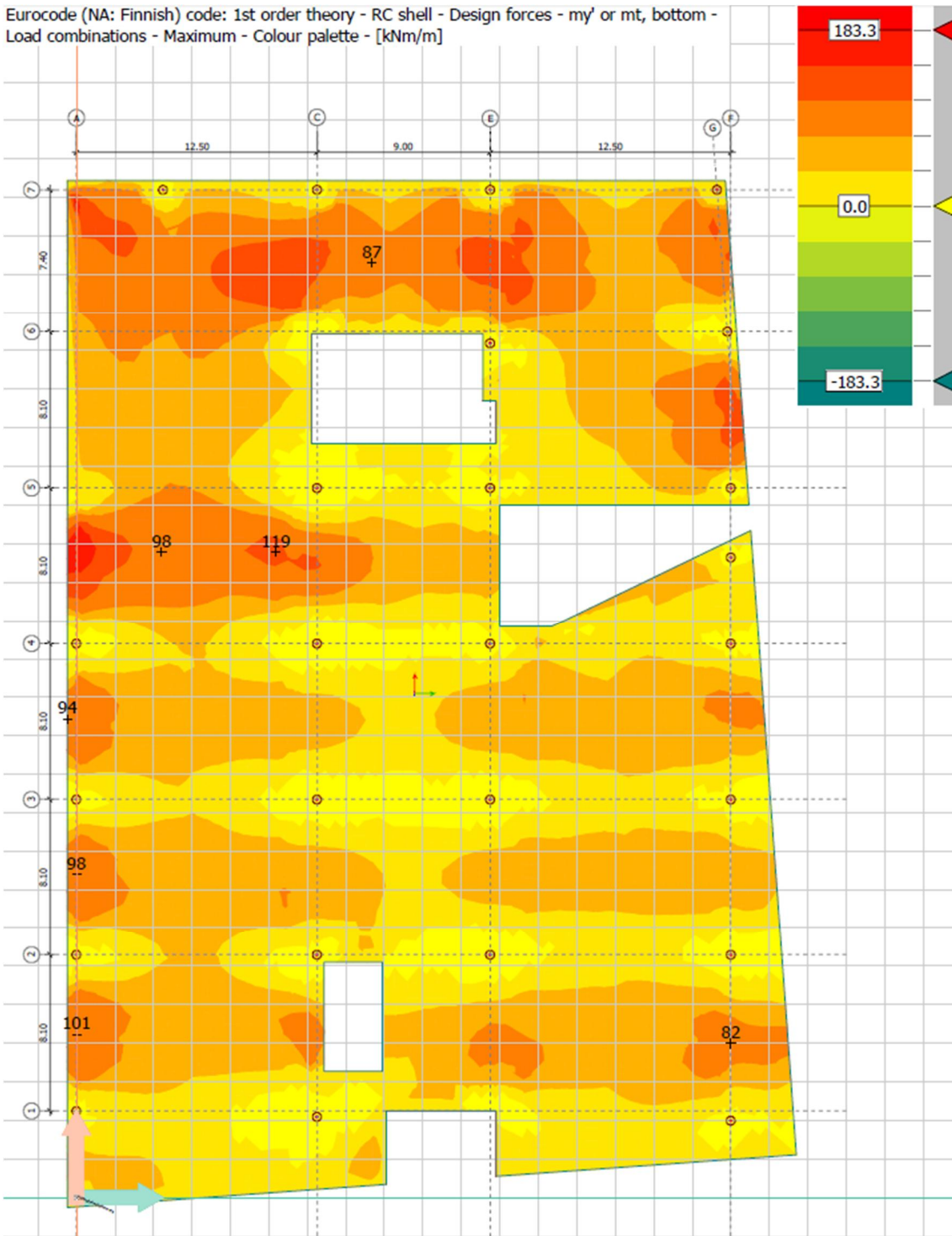
Eurocode (NA: Finnish) code: Max. of combinations - Shell internal forces - $Ty'z'$ ($Ty'z'+$) -
Contour lines - [kN/m]



Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Design forces - m_x' or m_r , bottom - Load combinations - Maximum - Colour palette - [kNm/m]



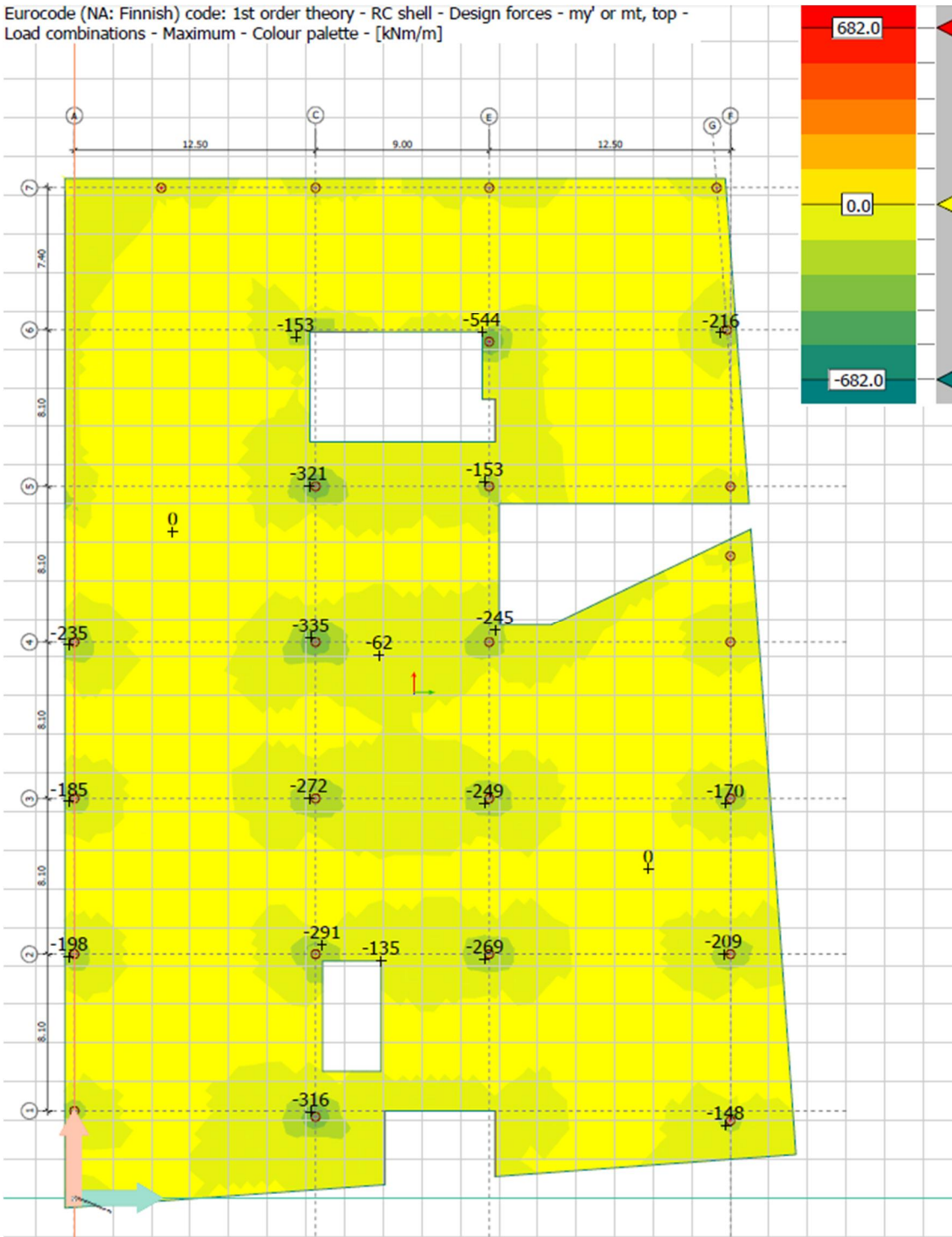
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Design forces - m_y' or m_t , bottom - Load combinations - Maximum - Colour palette - [kNm/m]



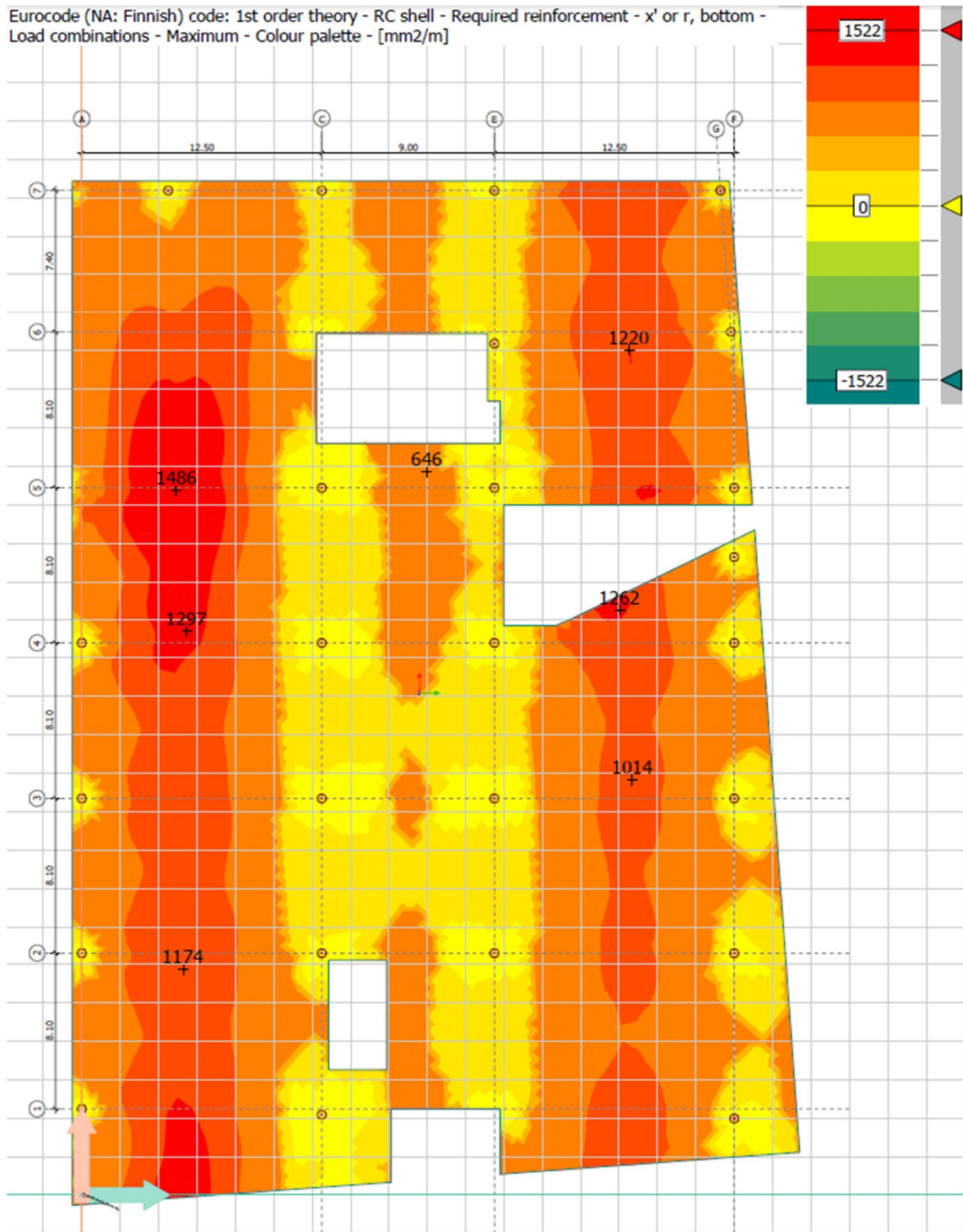
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Design forces - m_x' or m_r , top - Load combinations - Maximum - Colour palette - [kNm/m]



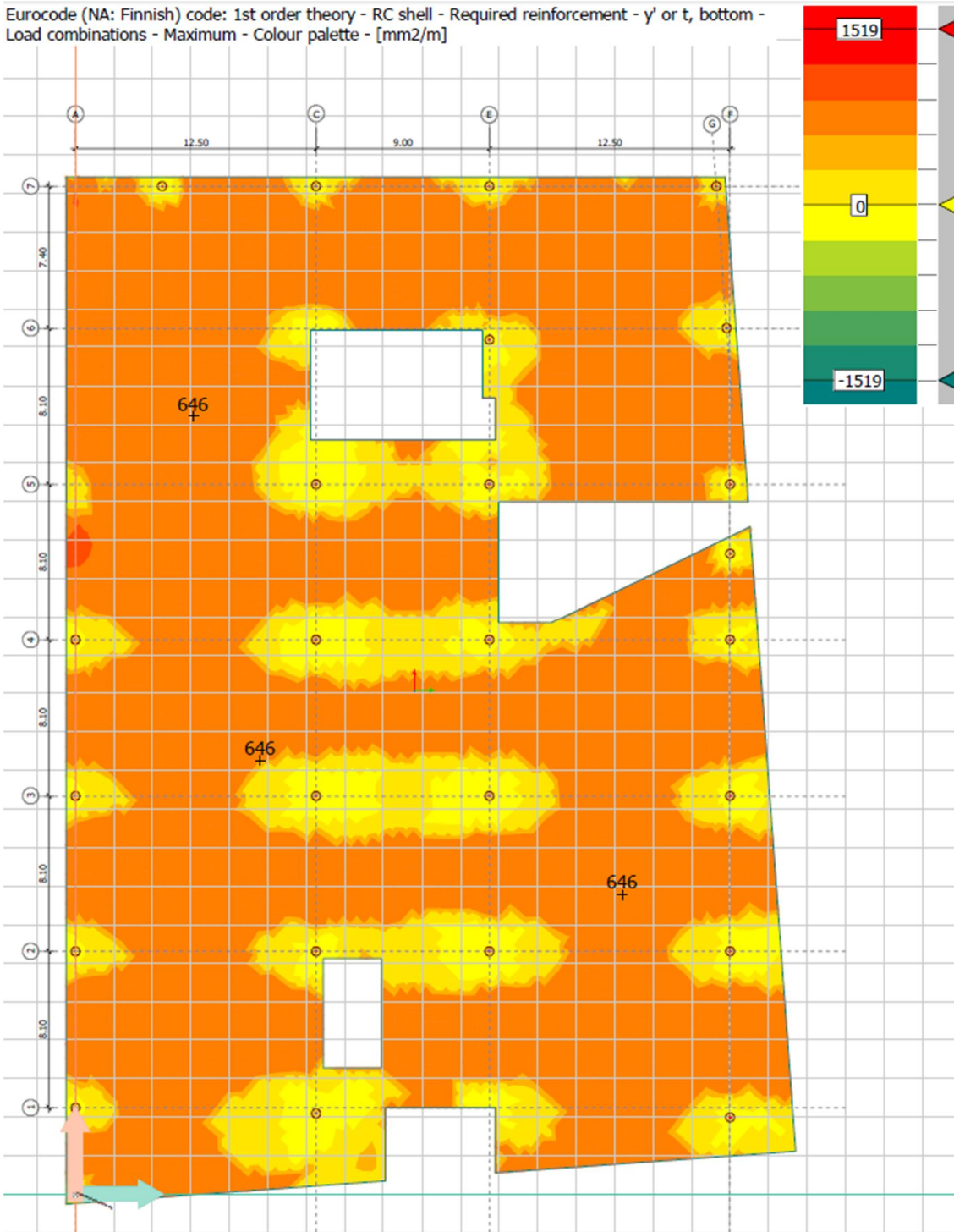
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Design forces - m_y' or m_t , top - Load combinations - Maximum - Colour palette - [kNm/m]

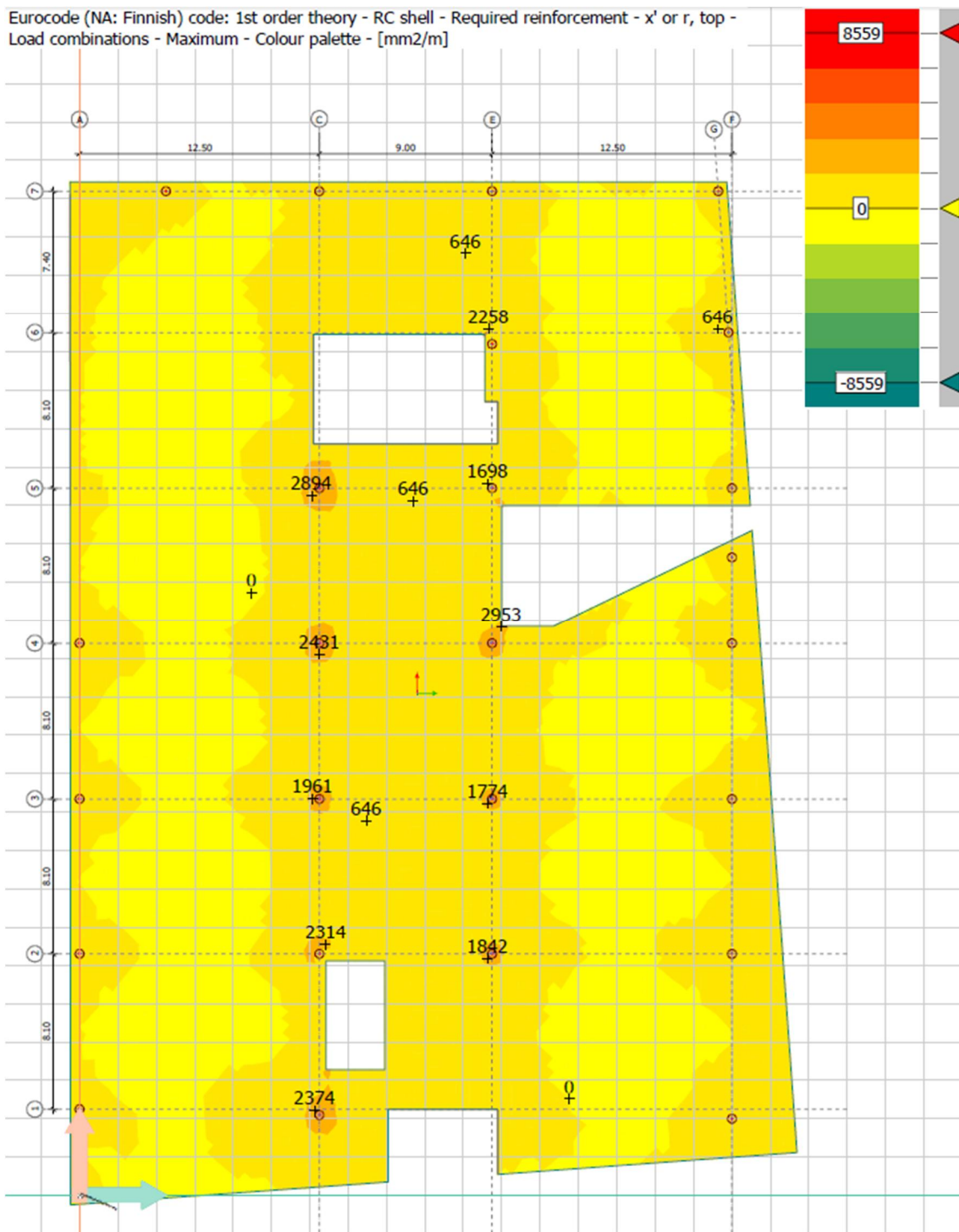


Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Required reinforcement - x' or r , bottom - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]

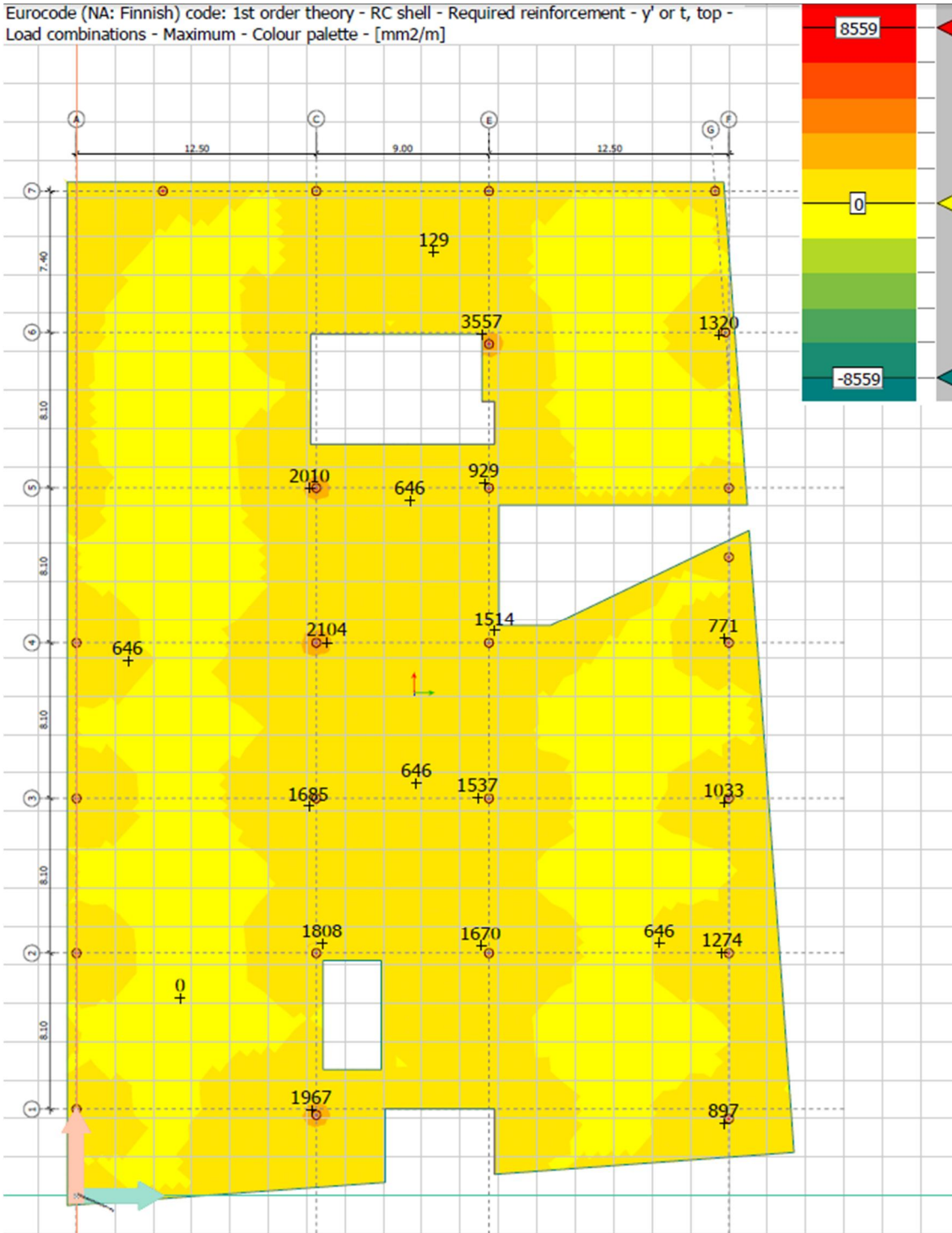


Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Required reinforcement - y' or t , bottom - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]

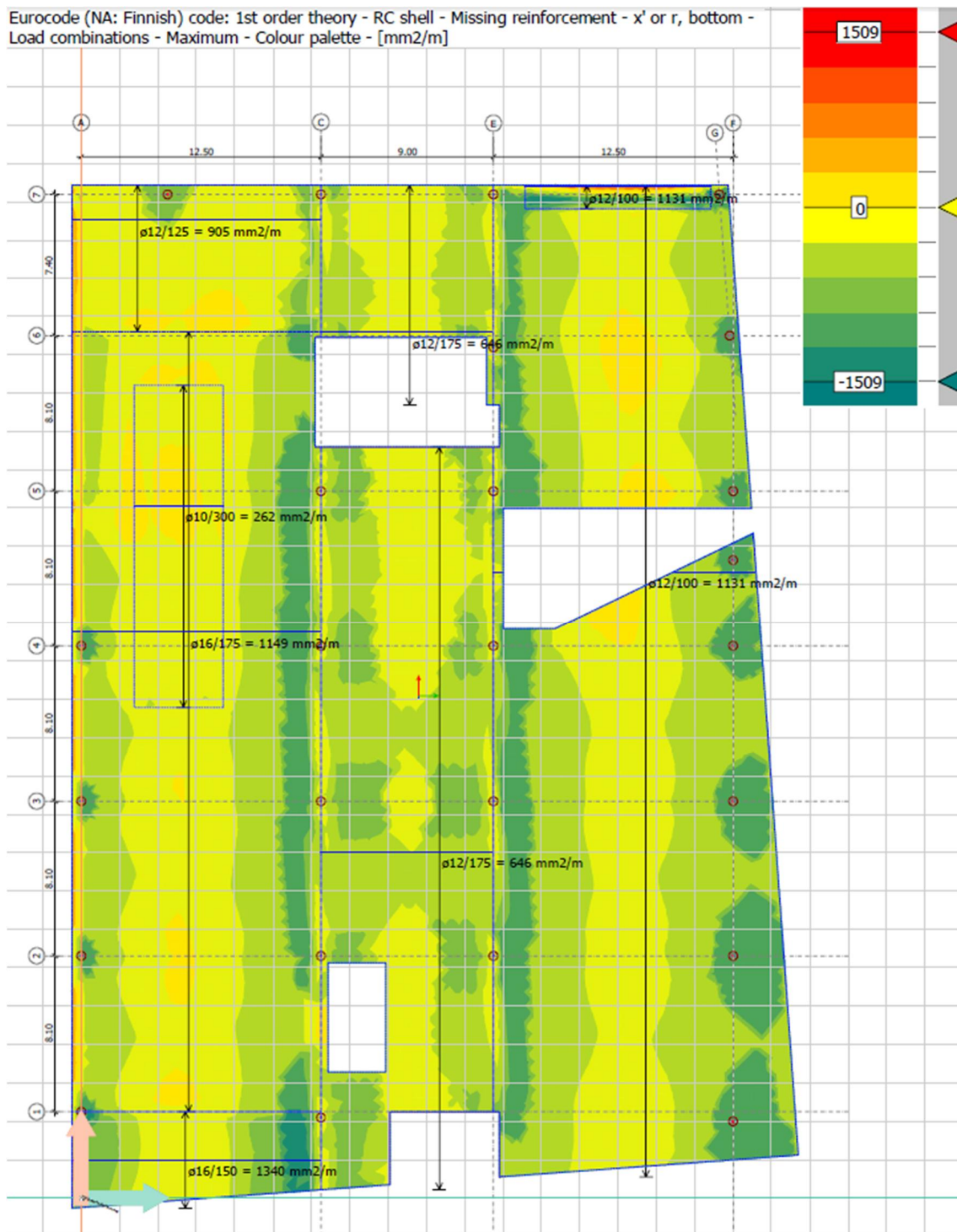




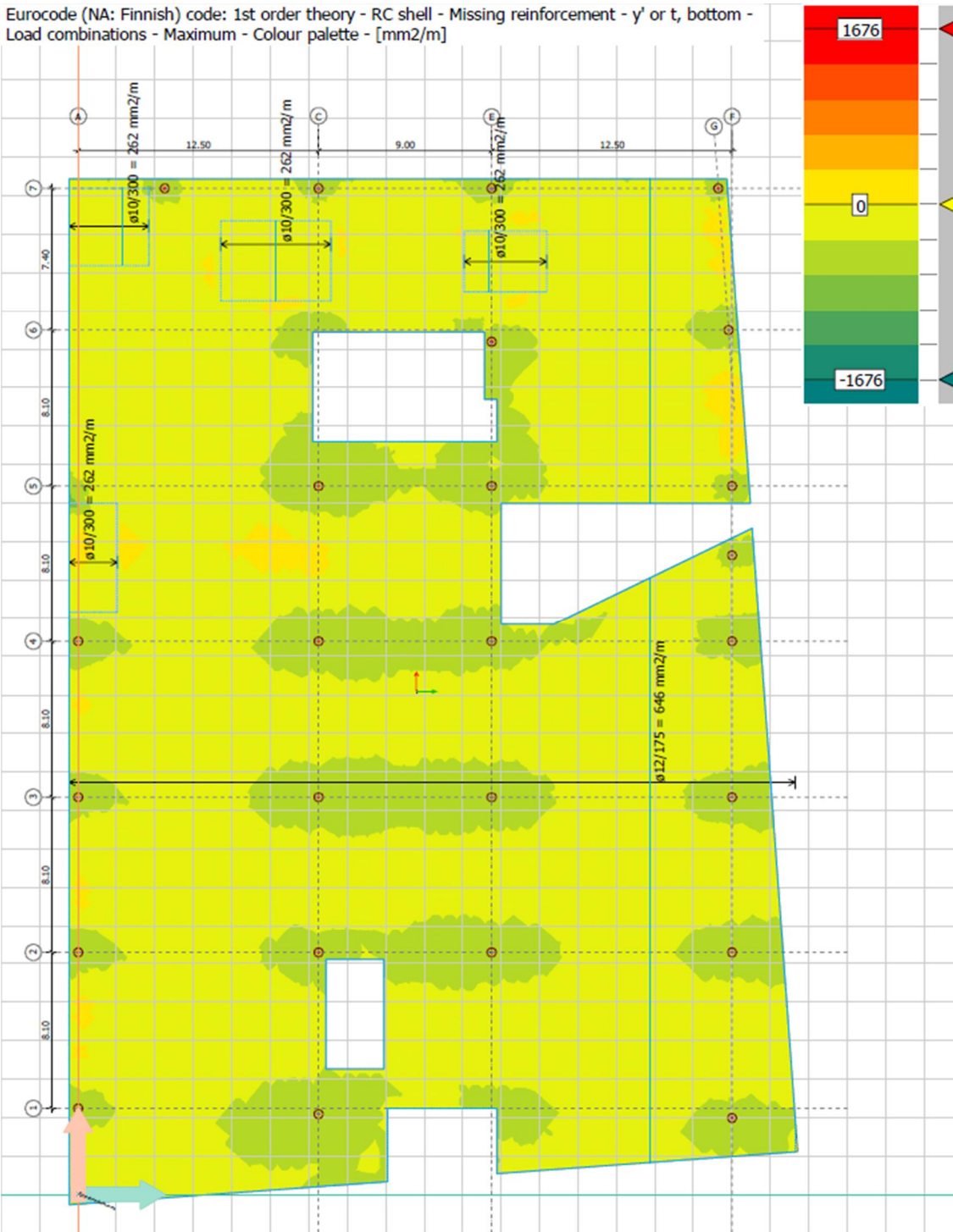
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Required reinforcement - y' or t, top - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]



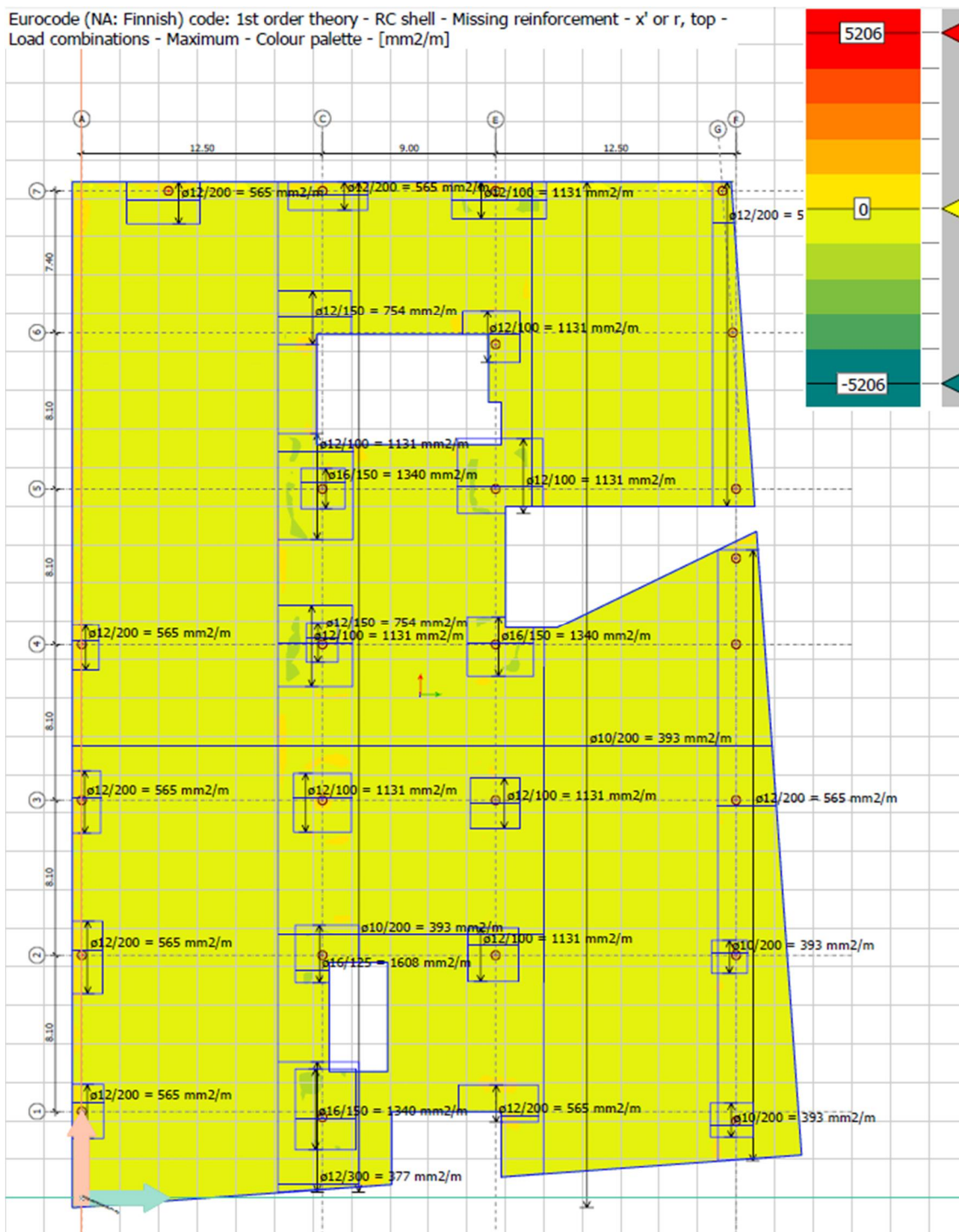
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Missing reinforcement - x' or r, bottom - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]



Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Missing reinforcement - y' or t, bottom - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]



Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Missing reinforcement - x' or r, top - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]



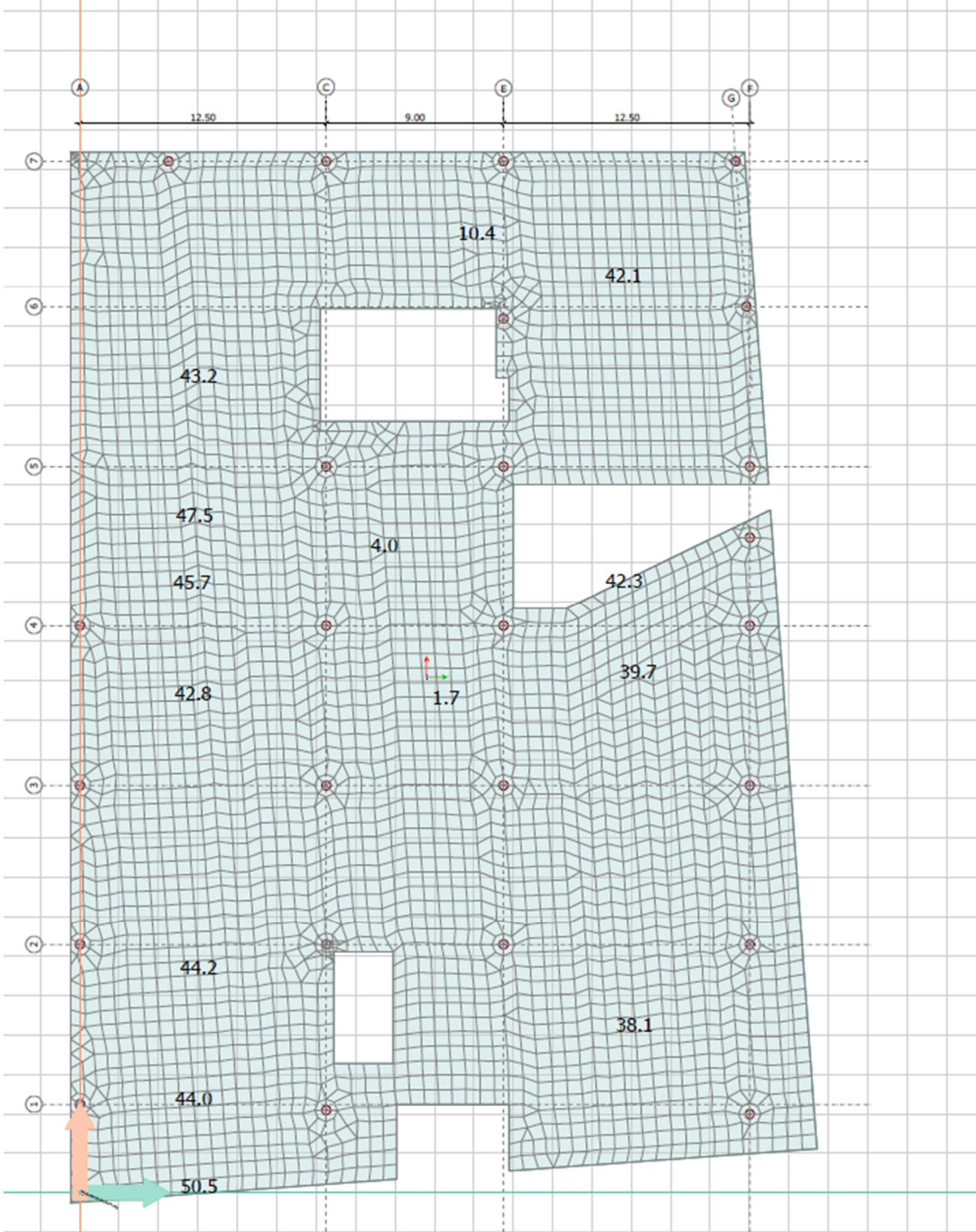
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Missing reinforcement - y' or t, top - Load combinations - Maximum - Colour palette - [mm²/m]



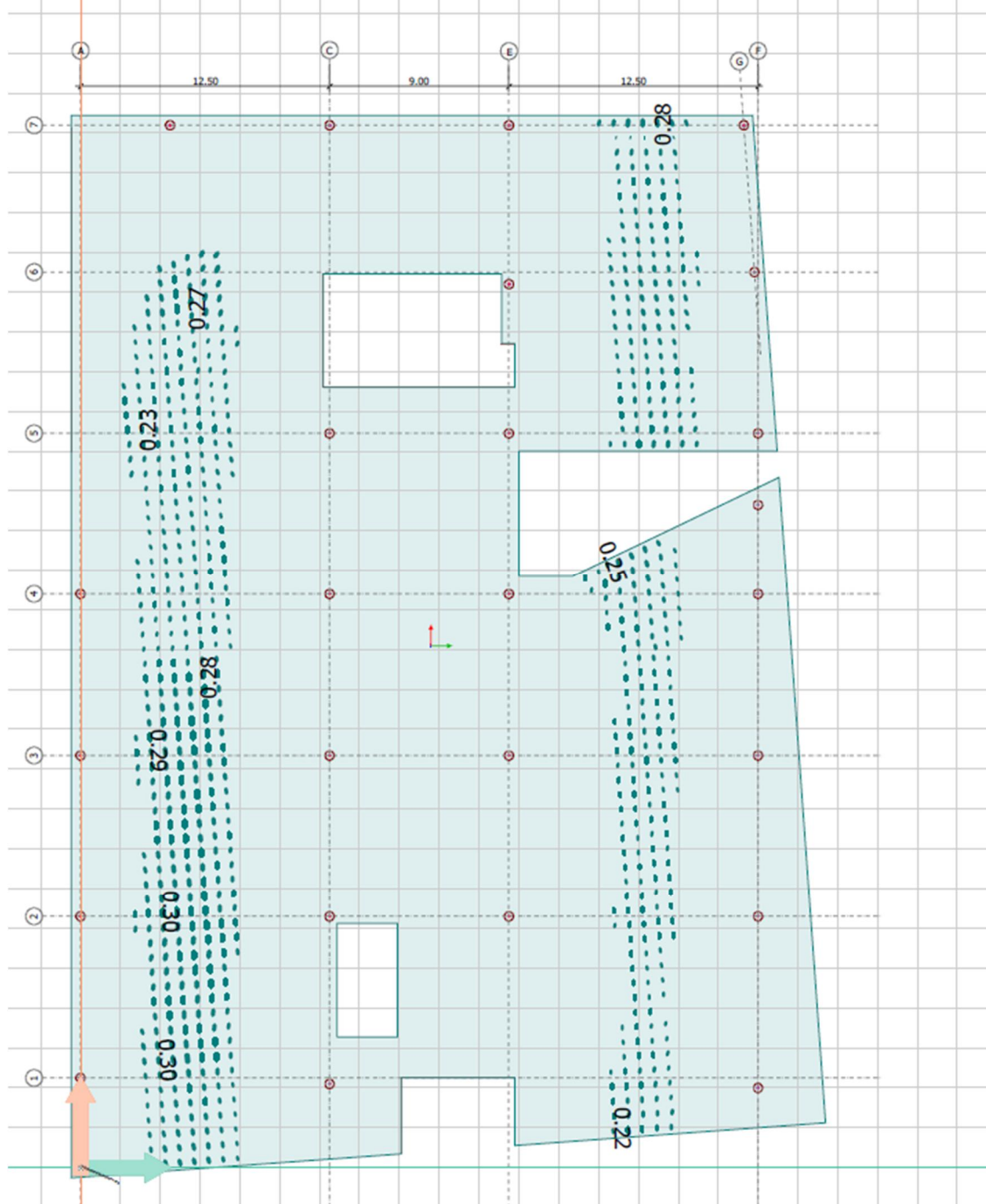
Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - SLS omapaino - Displacements - Colour palette - [mm]



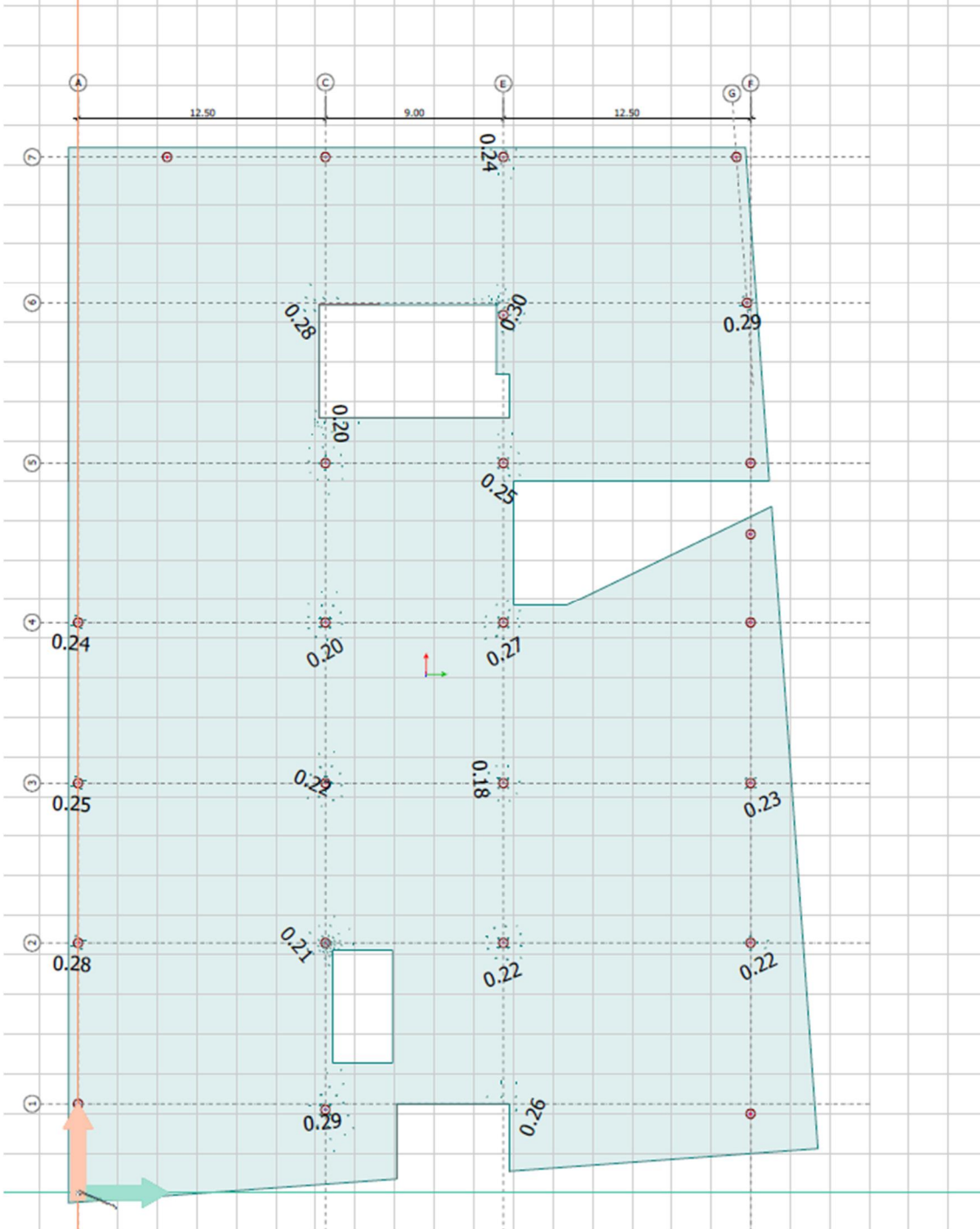
Eurocode (NA: Finnish) code: Max. of combinations - Displacements - ez - - Graph - [mm]



Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Crack width - bottom - Load combinations - Maximum - [mm]



Eurocode (NA: Finnish) code: 1st order theory - RC shell - Crack width - top - Load combinations - Maximum - [mm]



LIITE 5: BEEPLATE-LAATAN KUSTANNUSLASKENTA

Kustannuslaskennassa käytetyt hinnat eivät sisällä arvonlisäveroa, urakoitsijan yleiskuluja (8 %) eivätkä katetta (7 %).

Pääkaupunkiseutulisiä työkustannuksissa on huomioitu kertoimella 1,45.

Pintarakenteita ja pystyrakenteita ei ole huomioitu laskennassa.

Kohde: OP Vallila, Päjanteentie 12, Helsinki

	Määrä	Yks.		
Laatan pinta-ala A	1724	m2		
Laatan paksuus h	0,43	m2	11	0,314
Laatan tilavuus A*h	741	m3		
Yhden kennon ilman tilavuus	0,0676	m3		
Kennojen lukumäärä	2442	kpl		
Kennojen tilavuus yht	165	m3		

Nimike	Määrätiedot		Ainekustannus		Työkustannus		Yht.	Yht.
	Määrä	Yks.	C/yks	C yht.	C/yks	C yht.	C	C/m2
Betoni C35/45, S2, #16	576	m3						
Materiaalihukka 1 %	6	m3						
Betoni yhteensä	582	m3	80,87	47073				
Betonin kuljetus 7 m3 säiliöissä	582	m3			12,85	7481		
Betonin pumppaus 38/42m	582	m3			21,54	12538		
Betonointityö T4	134	tth			32,36	4332		
							71425	41,4
Kennot HK31	2442	kpl	7,40	18071				
Rahtikulut rekkoina Helsinkiin*	0,6	kpl	2900	1740				
Klipsut D10	6837	kpl	0,15	1026				
Asennus (45 kennoa/h/tt)	54	tth			32,36	1756		
							22592	13,1
Pääraudoitus, ei tartuntapit.	41465	kg						
Yp:n terästen tartuntapituudet	2469	kg						
Reunahakakorit	2185	kg						
Limitykset +5%	2073	kg						
Z-leikkausraudoitteet Ø12	2342	kpl						
	1568	kg						
Vapaan reunan Z-teräkset Ø12	130	kpl						
	91	kg						
Z-teräkset yhteensä	2472	kpl						
	1659	kg						
Lävistysteräkset T16	0	kpl						
	0	kg						
Teor. teräsmäärä asennettuna	49235	kg	1,05	52730				
Materiaalihukka 2 %	985	kg	0,58	571				
Todellinen teräsmäärä	50219	kg		53301				
Terästen rahti työmaalle	50219	kg			0,015	753		
							54055	31,4
Muottilevy, sis. hukka 10 %	2022	m2	1,50	3033				
Muottikalusto 14 vrk	2022	m2	1,82	3680				
Pöytämuottityö T4	676	tth			32,36	21887		
							28599	16,6
Muottiöljy Sem Form Basic	20	l	3,19	64				
Jälkihoitoaine Pieri Curing 99	246	l	3,83	943				
							1007	0,6
Kaikki kustannukset yhteensä							177679	103,1

* Yksi rekka pystyy kuljettamaan 4200 kennoa.

LIITE 6: ONTELOLAATTAVÄLIPOHJAN KUSTANNUSLASKENTA

Kustannuslaskennassa käytetyt hinnat eivät sisällä arvonlisäveroa, urakoitsijan yleiskuluja (8 %) eivätkä katetta (7 %).

Pääkaupunkiseutulisiä työkustannuksissa on huomioitu kertoimella 1,45.

Pintarakenteita ja pystyrakenteita ei ole huomioitu laskennassa.

	määrä	yks	C/yks	C/yks	tth/yks	C/yks	C/yks	/laatta	C/laatta	C/laatta	C/yks	C/laatta	C/laatta
Yhteensä									<u>184500</u>	<u>189055</u>		<u>151508</u>	<u>159179</u>
Kustannus €/m2									112,29	115,07		92,21	96,88