

Nea Kokko

Paalulaatan mitoitus ja kustannusarvio

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennetekniikka

Insinööriytyö

30.3.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Nea Kokko Paalulaatan mitoitus ja kustannusarvio 69 sivua + 1 liitettä 30.03.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennetekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennesuunnittelu
Ohjaajat	Projektipäällikkö Eero Särkkä, Ramboll Oy DI Jouni Kalliomäki, Metropolia
<p>Tämä insinöörityö tehtiin Ramboll Finland Oy:n Sillat-yksikölle aikavälillä 10/2018-03/2019. Työn aiheena oli paalulaattojen suunnitteluprosessin kehittäminen automatisoidumpaan suuntaan, pääpaino oli paalulaattojen alkugeometrian määrittämisessä Excelissä.</p> <p>Työn kirjallisuusosassa perehdyttiin paalulaattojen suunnittelua ohjaaviin normeihin ja kansallisiin sovellusohjeisiin. Työn tutkimusosiossa keskityttiin paalulaatan paaluvälin ja reuna-aulokkeen mittojen valintaan sekä paalulaattojen raudoituksen määrityksessä tarvittavien momenttien laskemiseen ekvivalenttien kehien menetelmällä. Momenttien laskennassa hyödynnettiin erilaisten ulokepalkkien tukien ja kenttien momenttien kertoimia. Laskettuja momenteja verrattiin FEM-analyysillä saataviin momentteihin, tulosten osuvuus toisiinsa oli hyvä tai kohtuullinen kun tutkittiin eri kokoisia paaluvälejä. Laskentapohjaan sisältyi myös lävistystarkastelu sekä halkaisuvoimien tarkastelu.</p> <p>Työ rajattiin pelkästään tasapaksuihin, tasaisesti kuormitettuihin paalulaattoihin. Laskentapohjaan lisättiin myös paalulaatan materiaalien hinnan automaattinen laskenta paalulaatan mittojen, betonilaadun ja valitun raudoituksen perusteella. Pohjana työlle oli pilarilaatan raudoituksen laskentapohja, jonka tarkkuutta ja käyttöaluetta saatiin laajennettua.</p> <p>Alkuperäinen laskentapohja soveltui hyvin vain tasamittaisille, suurin piirtein neliön muotoisille paaluväleille, paranneltu laskentapohja soveltuu myös eri sivumittaisille suorakaiteen muotoisille paaluruuduille.</p>	
Avainsanat	paalulaatta, silta, tasapaksu laatta, ekvivalenttien kehien menetelmä

Author Title	Nea Kokko Design and Costing of Flat Slab
Number of Pages Date	69 pages + 1 appendices 30 March 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Professional Major	Structural Engineering
Instructors	Eero Särkkä, Project Manager, Ramboll Finland Jouni Kalliomäki, Master of Science, Metropolia
<p>This bachelor thesis was done for and in collaboration with Ramboll Finland PLC for its bridges unit during 10/2018-03/2019. The subject of the thesis was to develop a piled slab design process towards the more automated direction. The emphasis of the work was in designing the preliminary pile slab geometry in Excel.</p> <p>In the literature review, the norms and national level guidelines related to pile slab design were researched. In the research part of the thesis, the emphasis was on selecting suitable pile-to-pile distance and cantilever edge geometry as well as calculating the bending moments required in selecting the reinforcement quantity. The moments were calculated by the equivalent frame method. Different coefficients were utilized in calculating the moments at supports and fields. The calculated moments were compared to FEM-analysis moments, the results were good or moderate when various pile-to-pile distances were investigated. The calculation template included also punching and splitting strength examination.</p> <p>The research was limited solely to flat slabs with the distributed load. The calculation template was enriched with automatic calculation of the price of the pile slab based on the selected geometry, concrete grade and reinforcement. The starting point for this work was an existing calculation sheet for column-slab reinforcement, for which the accuracy and range of usage were improved.</p> <p>The original calculation template was suitable merely for slabs with equal or nearly-equal pile-to-pile spans with a square shape; the improved calculation template is also suitable for rectangular-shaped pile spacing.</p>	
Keywords	flat slab, bridge, pile slab, equivalent frame method

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Paalulaatat	3
2.1	Muita opinnäytetöitä paalulaattojen suunnitteluun liittyen	3
2.2	Paalulaattojen käyttökohteita	3
3	Suunnittelun lähtökohdat ja eri suunnittelualojen yhteistyö	7
4	Kuormat	9
4.1	Paalulaatan pysyvät kuormat	9
4.2	Muuttuvat liikennekuormat ajoneuvoliikenteen alueella	11
4.3	Muuttuvat liikennekuormat rautatieliikenteen alueella	14
4.4	Muuttuvat liikennekuormat raitiotieliikenteen alueella	15
4.5	Muuttuvat liikennekuormat kevyen liikenteen väylän alueella	15
4.6	Kuormien yhdistely	16
5	Paalujen rakenteellinen suunnittelu	17
5.1	Lähtökohdat	17
5.2	Paalulaatoissa käytettävät lyötävät teräsbetonipaalut	19
5.3	Paalulaatoissa käytettävät lyötävät ja porattavat teräspaalut	20
5.4	Paalujen keskiöetäisyys	22
5.5	Paalujen sallitut sijaintipoikkeamat	23
6	Laatan rakenteellinen suunnittelu	24
6.1	Mitoituksen lähtökohdat	24
6.2	Mitoitus taivutukselle murtorajatilassa	24
6.3	Halkeilun rajoittaminen käyttörajatilassa	25
6.4	Mitoitus lävistykselle	26
7	Paalulaattojen mitoitus laskentapohjassa: lähtötiedot	28
7.1	Perustiedot	28
7.2	Kuormat ja kuormitusyhdistelyt	28
7.3	Paalujen lukumäärä ja paaluvälit	29
8	Paalulaattojen mitoitus laskentapohjassa: taivutusmomentti	33

8.1	Ekvivalenttien kehien menetelmä	33
8.2	Esimerkki ekvivalenttien kehien menetelmän käytöstä	37
8.2.1	Taivutusmomentin laskenta	37
8.2.2	FEM-malli vastaavasta rakenteesta	38
8.2.3	Laskettujen ja mallinnettujen taivutusmomentin arvojen vertailu	42
8.3	Kahteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti murtorajatilassa	42
8.4	Kahteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti käyttörajatilassa	45
8.5	Kahteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti lyhyemmässä suunnassa	47
8.6	Yhteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti	49
9	Paalulaatan raudoituksen mitoitus	50
10	Paalulaattojen mitoitus laskentapohjassa: lävistyskestävyys	55
11	Paalulaattarakenteen kustannusarvio	57
11.1	Kustannusten muodostuminen	57
11.2	Kustannusvertailu esimerkkirakenteelle	61
12	Yhteenveto ja johtopäätökset	63
12.1	Tulokset	63
12.2	Yhteenveto	64
	Lähteet	68
	Liitteet	
	Liite 1. Ulokepalkkien kertoimet momenteille	

Lyhenteet

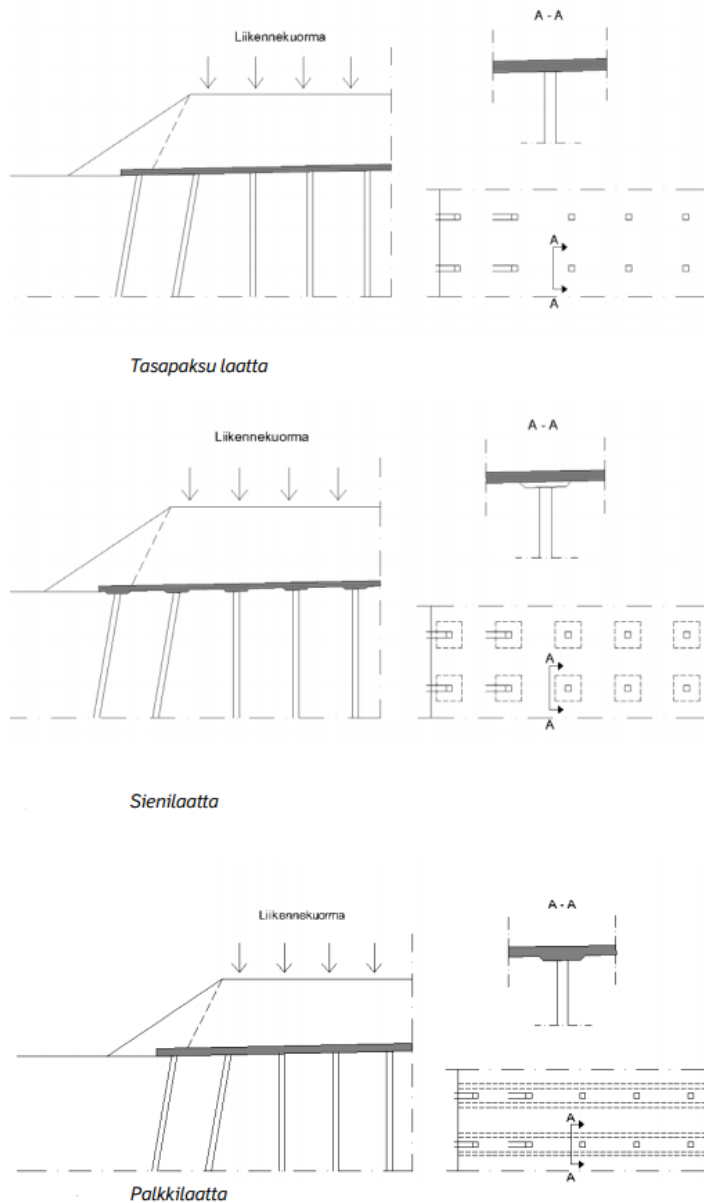
EFM	Ekvivalenttien kehien menetelmä (<i>Equivalent Frame Method</i>), jolla voi laskea pilarilaattarakenteen voimasuuret
FEM	<i>Finite Element Method</i> , elementtimenetelmä. Differentiaaliyhtälöiden ratkaisu numeerisella menetelmällä, yleensä tietokoneilla, voidaan käyttää esimerkiksi erilaisten rakenteiden voimasuureiden ratkaisemiseen.
KRT	Käyttörajatila
MRT	Murtorajatila
PDA	Dynaaminen koekuormitus eli PDA-mittaus on kuormituskoe, jossa paalua lyömällä aikaansaatu takaisin heijastuva iskuaalto mitataan muun muassa paalun geoteknisen kestävyuden, asennusaikaisten jännitysten ja ehjyyden selvittämiseksi. [Paalutusohje 2016 s. 16.]
XC2	Rasitusluokat kuvaavat millaisiin ympäristöolosuhteisiin (rasituksiin) betonirakenne joutuu käyttöikänsä aikana. XC2: Märkä, harvoin kuiva. Paalujen yleisin rasitusluokka

1 Johdanto

Tämä insinööri työ tehdään Ramboll Finland Oy:n Sillat-yksikölle. Ramboll Oy on kansainvälinen suunnittelu- ja konsultointialan yritys, jonka toimialoja ovat esimerkiksi infra- ja ympäristörakentaminen, liikennesuunnittelu sekä kiinteistöt ja rakentaminen. Suomessa Ramboll Oy:llä työskentelee noin 2300 asiantuntijaa. Tämän työn taustana on tarve paalulaattojen suunnitteluprosessin kehittämiseksi. Paalulaatat ovat yksi tapa vahvistaa heikosti kantavaa maaperää esimerkiksi infra- ja talonrakennuksessa. Rakennesuunnittelun näkökulmasta paalulaattoja voidaan pitää melko yksinkertaisina rakenteina. Rambollin Sillat-yksiköllä on usein suunnittelutoimeksiantoja paalulaattaperustoille, joten tilaajayrityksen pitkän aikavälin tavoitteena on tehdä paalulaattojen suunnittelusta mahdollisimman automatisoitua. Tässä työssä tavoite on opinnäytetyön laajuus huomioiden rajatumpi, tarkoituksena on kehittää tilaajayrityksen olemassaolevia Excel-laskentapohjia jotta paalulaatan alustava geometria ja rakenne voidaan valita helposti rakenteen toimivuus ja taloudellisuus huomioiden. Tilaajayrityksessä paalulaattojen mitoituksen apuna käytetään FEM-mallinnusta ja lisäksi voimasuureet ratkaistaan jollain toisella menetelmällä, jotta tulosten luotettavuus voidaan todeta. FEM-mallinnuksessa rakenteen voimasuureet saadaan ratkaistua helposti ja tarkasti, mutta sitä ennen paalulaatan rakenne pitäisi olla jo alustavasti valittu, koska FEM-mallinnuksessa rakenteen optimointi ei ole ainakaan toistaiseksi erityisen kätevää. Toisin kuin pilarilaatoille talonrakennuksessa, maanalaisen paalulaattojen rakenteelle ei kohdistu arkkitehtuuriin tai ulkonäköön liittyviä vaatimuksia joten suunnittelija voi ja myös joutuu melko vapaasti päättämään paalulaatan rakenteen.

Työssä syvennytään Rambollin käytössä oleviin paalulaattojen laskentapohjiin, ja pyritään parantamaan niiden käytettävyyttä ja soveltuvuutta paalulaattarakenteille. Tilaajayrityksen laskentapohjat soveltuvat sellaisenaan esimerkiksi vain paalulaatoille, joiden paaluruudun sivusuhte on 1:1 – 1:1,3, vaikka muunlaisiakin paalulaattoja suunnitellaan. Lisäksi laskentapohjat perustuvat esimerkiksi taivutusmomentin osalta niin sanottuun yksinkertaistettuun menetelmään, joten ne antavat jonkun verran liiankin varmallalla puolella olevia arvoja. Laskentapohjiin on tarkoitus myös lisätä paalulaatan materiaalien kustannusarvio uutena osiona tämän työn myötä. Insinööri työ tavoitteen saavuttamiseksi työn kirjallisuusosiossa perehdytään paalulaattojen suunnitteluun ja mitoitukseen liittyvään teoriaan keskittyen paalulaattojen kansallisen tason suunnitteluohjeeseen sekä paalulaatoissa käytettäviin paaluihin. Raudoittamattomat laatat, elementtirakenteiset

paalulaatat, paaluhatturakenteet, epäkeskiset pystykuormat, palkkilaatat sekä paalun kohdalta paksunnetut niin sanotut sienilaatat rajataan geometriamallista tässä työssä pois. Työssä keskitytään yksinkertaiseen tasapaksun laatan geometriamalliin, jossa esimerkiksi paalulaatan yläpuolinen pintakuorma ja täytepaksuus eivät muutu, kuva 1:



Kuva 1. Erilaisia paalulaattarakenteita, näkymät sivulta sekä leikkaus ja tasokuva. Suomessa yleisin paalulaattatyyppi on sienilaatta. Sienilaattojen suunnittelu ja rakentaminen on hieman vaativampaa, mutta laatan rakenne saadaan materiaalien käytön suhteen optimoitua paremmin. [1, s. 14.]

2 Paalulaatat

2.1 Muita opinnäytetöitä paalulaattojen suunnitteluun liittyen

Toriseva [2] on käynyt läpi diplomityössään *Pilarilaattojen suunnittelu eurokoodien mukaan* teräsbetonisten pilarilaattojen suunnittelua eurokoodijärjestelmän ja kansallisten liitteiden mukaan. Ekvivalenttien kehien menetelmää on käyty läpi teoriatasolla. Loppupäätelmissä kaivattiin ekvivalenttien kehien tapaista yksinkertaista laskentamenetelmää pilarilaattojen alustavaan suunnitteluun. Työssä kyseenalaistettiin myös sitä, miksi eurokoodissa ekvivalenttien kehien menetelmän käyttöä ei rajata tarkasti tietynlaisiin rakenteisiin, vaikka muissa tutkituissa lähteissä näin oli tehty.

Martinmäki [3] on tutkinut diplomityössään *Paalulaatan optimointi* kokonaiskustannuksiltaan optimaalisinta paalulaattarakennetta, joka soveltuu tuotantotilan tai varastorakennuksen lattiaksi kehittämällään Excel-laskentapohjalla. Tutkitut kuormat olivat selvästi pienempi kuin maanalaisilla, liikennekuorman rasittamilla paalulaatoilla.

2.2 Paalulaattojen käyttökohteita

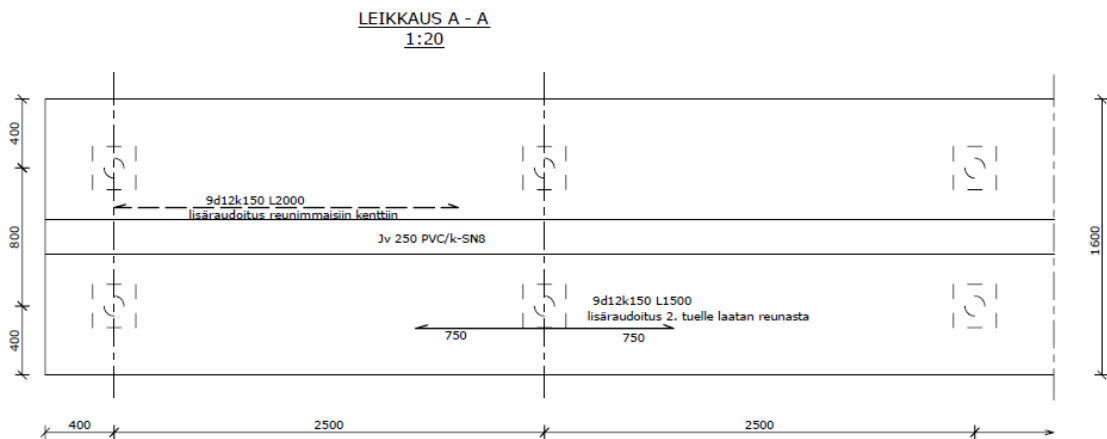
Paalulaattoja voi käyttää pohjanvahvistuksena, kun maaperä on huonosti kantavaa ja käytettävissä oleva leveys on pieni, esimerkiksi taajama-alueilla. Paalulaatta koostuu kantavaan maaperään, usein kallioon, asti ulottuvista betoni- tai teräspaaluista sekä niihin kiinteästi liittyvästä yhtenäisestä teräsbetonilaatasta, jonka päällä on pysyväna kuormana maanpenger. Paalulaatta on kalliimpi ja järeämpi menetelmä kuin esimerkiksi massan vaihto, mutta oikein sen voidaan katsoa olevan painumaton rakenne. Tyypillisiä kohteita, joihin paalulaatta soveltuu, ovat [1, s.12.]

- Syvät, pehmeät pehmeiköt, joissa massanvaihto ei tule kysymykseen viereisten rakennusten tai muiden massanvaihdon toteuttamisesta ympäristölle aiheutuvien vaikutusten takia.
- Korkeat, pehmeällä maaperällä sijaitsevat pehmeiköt, joiden stabiiliteettia ja tavoitepainumaa on vaikea muuten saavuttaa.
- Siltojen tulopenkereet ja keilat. Laatta mukautuu hyvin epäsäännölliseen paaluväliin ja korkeustason vaihtelevuuteen.
- Kohteet, missä tien tai radan läheisyydessä on haitalliselle tärinälle alttiita rakenteita.

Paalulaatat putkikaivannoissa

Paalulaattoja voidaan käyttää tukemaan putkia, esimerkiksi vesi- ja viemäriputkia. Putki voi toimia myös ulkopuolisia kuormituksia kestäväenä suojaputkena sen sisään sijoitettuille rakenteille, esimerkiksi kaapeleille. Putkia tukevan paalulaatan vähimmäisleveys määräytyy putkien vaatimaan tilantarpeen mukaan, yksittäiset putket on voitava korjata muiden putkien toimintaa häiritsemättä. Esimerkiksi vesihuoltoverkoston erilaisille putkiyhdistelmille on olemassa taulukoita putkien vaatiman kaivannon mitoille. [4, kpl 3.4.] Näitä taulukoituja arvoja voi hyödyntää myös paalulaatan leveyden määrittämiseen. Paalulaatan laattaosan paksuus määräytyy rakenteellisen mitoituksen perusteella, tyypillisesti lävistymiskestävyys määrää laatan paksuuden.

Putkia tukevat paalulaatat ovat usein kapeahkoja, vain muutaman metrin levyisiä. Paalut suunnitellaan vähintään kahteen riviin poikkisuunnassa, jotta paalulaatta ei liiku sivulle. Putkia tukevia paalulaattoja voivat rasittaa esimerkiksi ajoneuvo- tai raideliikenne, jotka täytyy mitoituksessa huomioida. Yleensä putket pyritään kuitenkin sijoittamaan teiden vierille tai kokonaan pois liikennöidyiltä alueilta. Paalujen etäisyyksien suhde toisiinsa pituus- ja leveyssuunnassa on tyypillisesti yli 2:1, eli laatta on yhteen suuntaan kantava. Esimerkki tyypillisestä yksinkertaisesta putkikaivantoon liittyvästä paalulaattakohteesta, kuva 2:



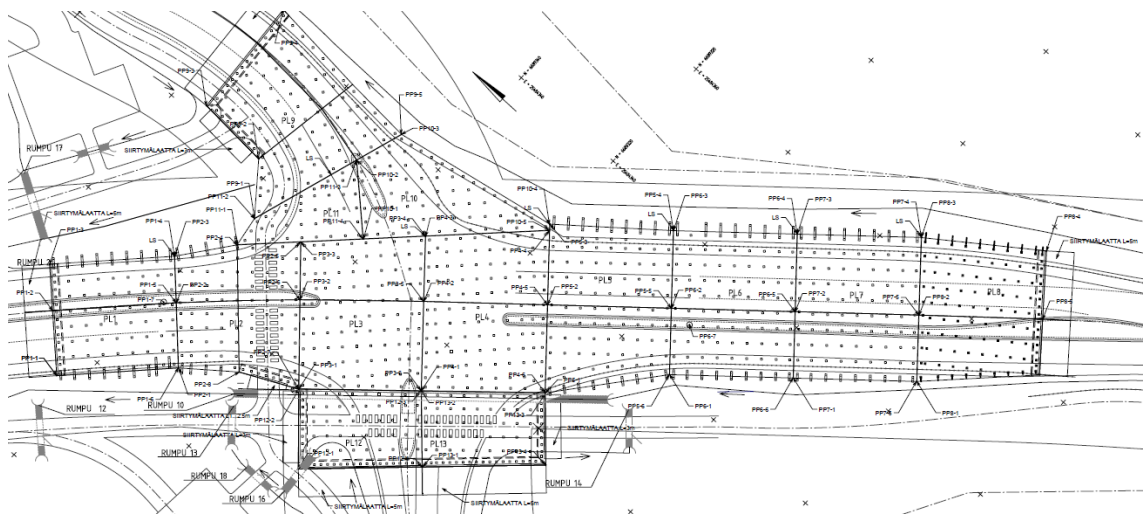
Kuva 2. Paalulaatta Espoossa Valtatie 1:n lähellä tukemassa jv-viettoviemäriä, yksityiskohta suunnitelmasta [5.]. Paalulaatan pituus on 66,3 m ja leveys 1,6 m. Laatan päällä on maata n. 2,5 m. Laatta ei sijaitse liikennealueella ja hyötykuormaksi on laskettu 5 kN/m², joten laatan paksuudeksi riittää 300 mm. Paalujako on 8000x2500 mm². Paalut ovat terästä, halkaisijaltaan 115 mm ja rakennepaksuudeltaan 6,3 mm.

Paalulaatan päälle on aina tehtävä vähintään 300 mm paksu suojakerros sorasta tai murskeesta ennen putkien asennusta, jonka päälle tulee kuormaa jakava kerros kalliomurskeesta. [1 s. 27.] Paalulaatoilla tuettavat putket haja-asutusalueilla eivät aina vaadi kaivantoa, jos maanomistajalle sopii maanpäällinen vähintään 1,4 m korkea pengerrys maantasaisen paalulaatan päälle. Kaupunkialueilla putkikaivannot ovat tilanpuutteen vuoksi käytännössä aina maanalaisissa kaivannoissa. [6, s.179.]

Paalulaatat tienpohjan ja ratarakenteiden vahvistuksessa

Tiealueilla paalulaattarakenteen liittyessä pohjanvahvistukseen on laatan päätyreuna yleensä suunniteltava kohtisuoraan ajoradan poikkisuunnassa. Korkeilla, yli 8 m penkereillä jotka liittyvät kovapohjaiseen pohjamaahan tai alle 3 m syvään tiivistettyyn massanvaihtoon, voidaan sallia myös vino päätyreuna. Ajoneuvoliikenteen alla oleviin paalulaattoihin kohdistuu huomattavasti suuremmat pystykuormat kuin liikennöimättömillä alueilla. Ajoneuvoista aiheutuu myös vaakasuuntaisia jarrukuormia, jotka voidaan ottaa vastaan pystypaalujen sivuvastuksen kautta, mikäli maan suljettu leikkauslujuus jarrukuorman suunnassa paalulaatan reunalla on vähintään 20 kPa, tai vähintään 15 kPa jos maassa on vähintään 1 m kuivakuorikerros. Muutoin jarrukuorma siirretään maaperään ajoradan keskialueen vinopaaluilla. [1 s. 41.]

Esimerkki risteysalueen paalulaatasta, kuva 3:



Kuva 3. Paalulaatta eritasoliittymästä risteysalueella, ote paalulaattojen yleispiirustuksesta Lahnuksessa. Yhteensä paaluja on satoja, teräsbetonipaaluja TB300 ja teräsputkipaaluja RD170/12,5. Tasapaksun teräsbetonilaatan paksuus on 500 mm. [7.]

Tiepaalulaatoissa käytetään yleensä teräsbetonipaaluja [1, s. 40.]. Esimerkki tienpohjan sienilaattarakenteesta rauditusvaiheessa kuvassa 4. Tiepaalulaatan kuivatus järjestetään ensisijaisesti kallistamalla laatta. Mikäli laatan kallistus ei ole mahdollista, laatta voidaan kuivattaa myös rei'ittämällä. Vaakasuora laatta voi olla teknisesti perusteltu ratkaisu erityisesti leveillä paalulaatoilla. [1, s. 30.] Käytössä on myös edelleen puupaaluin tuettuja tiepaalulaattoja, jotka on rakennettu ennen 1980-lukua. Säilyäkseen kestävinä puupaalut vaativat vakaammat pohjaolosuhteet kuin teräsbetonipaalut (esimerkiksi Kehä III:lla 350 metriä pitkä tieosuus uhkaa romahtaa puupaalujen lahottua) [8.].



Kuva 4. Länsikyläntien sillan (127) paalulaatta ja rauditus, niin sanottu sienilaatta [9.]. Tien leveydestä johtuen paalut ovat viidessä rivissä poikkisuunnassa.

Paalulaattoja käytetään myös junaratojen pohjanvahvistukseen. Tyypillinen laatan paksuus rautatiepaalulaatoissa on 500 mm.

3 Suunnittelun lähtökohdat ja eri suunnittelualojen yhteistyö

Paalulaattojen suunnittelu perustuu eurokoodeihin ja niiden kansallisiin liitteisiin, tärkeimpinä:

- SFS-EN 1990 Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet
- SFS-EN 1991 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat
- SFS-EN 1992 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu: Betonisillat
- SFS-EN 1997 Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu

Kansallisella tasolla tärkeitä muita ohjeita ovat Liikenneviraston Eurokoodien soveltamisohjeet (NCCI-sarja) sekä *Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu* -ohje [1, s. 8.].

Ennen kuin paalulaatta valitaan suunnittelukohteeseen perustamistavaksi, on rakentamispaikalla tehty tarvittavat pohjatutkimukset ja perustamistavan valinta osana geoteknistä suunnittelua mukaan lukien perustusrakenteiden sekä muiden pohjarakennustöiden suunnittelu. Geoteknisessä suunnittelussa valitaan perustuksen mitat ja korkeusasema sekä suunnitellaan maapohjan kantavat kerrokset. [1 s.39.] Laatan lopullinen paksuus ja paalut valitaan rakenneteknisen mitoituksen perusteella.

Useimpien paalulaattojen suunnitteluun liittyy kaivantojen suunnittelu. Kaivantojen suunnittelijan kelpoisuusvaatimukset määräytyvät kaivannon vaativuusluokituksen perusteella, luvanvaraisten kaivantojen suunnittelu kuuluu geosuunnitteluun. [10, s.13-16.]

Paalulaatat talonrakennuksessa voidaan suunnitella eurokoodijärjestelmän perusteella vastaavasti kuin pilarilaatat [<http://www.valmisbetoni.fi/suunnittelu/betonilattiat/newpage>]. Pilarilaattojen suunnitteluprosessille löytyy lyhennetyt eurokoodin ja Suomen kansallisten liitteiden mukaiset ohjeet esimerkiksi RTT Betonitoimialan kautta [11.]. Paalulaattojen suunnittelu etenee periaatteessa samalla tavalla, lukuun ottamatta palomitoitusta, jota ei maan alla tarvita. Viranomaisnäkökulmasta paalulaatat ovat kuitenkin oikeastaan maanalaisia siltoja. Paalulaattoja ei kuitenkaan tarvitse suunnitella siltoina, mikäli pengerkorkeus (eli laatan yläpinnan ja maanpinnan välimatka) on vähintään 1,4 m [1, s. 8, 39.]. Rakennesuunnittelun vaativuus ja laajuus paalulaatoille on huomattavasti yksinkertaisempaa kuin silloille, joten käytännössä ja myös tässä työssä paalulaatan pengerkorkeus on siten oltava kauttaaltaan vähintään 1,4 m. Paalulaatan mitoitusmenettelyn vaiheet, taulukko 1:

Taulukko 1. Paalulaatan mitoitusmenettelyn vaiheet, muokattu pilarilaattojen mitoitusmenettelyn ohjeesta [11.].

Vaihe	Tehtävä	Lisäohjeita	
		Liikenneviraston ohje nro	Standardi
1	Määritetään suunniteltu käyttöikä	NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohje, luku 4	SFS-EN 1992-2: Betonisillat
2	Arvioidaan paalulaattaan kohdistuvat	NCCI 1 Eurokoodin soveltamisohje	SFS-EN 1991-2: Siltojen liikennekuormat
3	Määritetään kuormayhdistelmät	NCCI 1 Eurokoodin soveltamisohje	SFS-EN 1991-2: Siltojen liikennekuormat
4	Valitaan paalut alustavasti	LO 5/2014 Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden	RIL Paalutusohje 2016
5	Määritetään kuormituskaaviot	NCCI 1 Eurokoodin soveltamisohje	SFS-EN 1991-2: Siltojen liikennekuormat
6	Arvioidaan säilyvyysvaatimukset ja	NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohje, luku 4	SFS-EN 1992-2: Betonisillat
8	Vähimmäisbetonipeite	NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohje, luku 4	SFS-EN 1992-2: Betonisillat
9	Lasketaan määräävät momentit ja	LO 5/2014 Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden	SFS-EN 1992-1-1 kohta 5
10	Mitotetaan taivutusraudoitus	NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohje	SFS-EN 1992-1-1 kohta 6.1
11	Tarkistetaan lävistyskapasiteetti	NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohje, luku 6.4	RakMK B4 2005
12	Tarkistetaan halkeamaleveys	NCCI 2 Eurokoodin soveltamisohje, luku 7.3	SFS-EN 1992-2: Betonisillat

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi yllä olevan taulukon ohjeet pääpiirteissään läpi niiltä osin kuin ne eroavat rakennesuunnittelun pääaineopinnoissa läpikäydyistä, talonrakennussuunnitteluun keskittyneistä asioista. Lähtökohtaisesti kaikille paalulaattarakenteille pätee:

- Seuraamusluokka on aina vähintään CC2, hanke- ja olosuhdekohtaisesti seuraamusluokka voi olla vaativampikin [1 s. 27.].
- Käyttöikä on vähintään 100 vuotta, vastaavasti kuin silloilla pohjarakenteiden suunnittelussa. [12, s. 41.]
- Paalulaattarakennekohteiden geotekninen luokka on aina vähintään 2. Liikenneviraston ohjeissa on määritelty siltojen geotekniset luokat [12, kpl 2.1.].
- Rasitusluokka valitaan Liikenneviraston ohjeiden mukaan, eli käytetään siltojen rakenteiden rasitusluokkia. Nimellisen suojabetonipeitteen c_{nom} määrää yli 1,4 m pengerkorkeudella se, kuinka aggressiivinen maaperä on kyseessä. [13, taulukko 4.3.].
- Betonin lujuusluokka määritetään edellisen kohdan taulukon perusteella. [13]
- Paalutustyöluokka (PTL1, PTL2 tai PTL3) määräytyy kohteen seuraamusluokan ja geoteknisen luokan perusteella [14.]. Paalulaattojen paalutukset kuuluvat vähintään paalutustyöluokkaan PTL2. [1 s. 39.].

4 Kuormat

4.1 Paalulaatan pysyvät kuormat

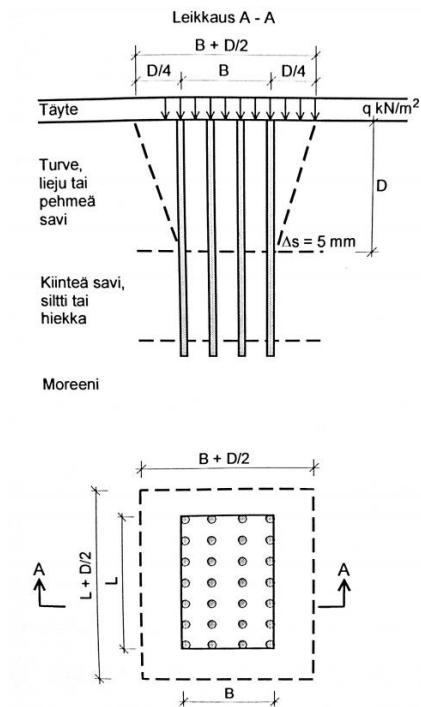
Jokaiseen paalulaattaan kohdistuu vähintään laatan ja penkereen oma paino, paalun omapainoa ei tarvitse huomioida. Laskennassa voi käyttää suurinta pengerkorkeutta tai keskimääräistä pengerkorkeutta, etenkin jos paalulaatasto on pitkä ja se mitoitetaan lyhyemmissä osissa. Penkereen keskimääräisenä tilavuuspainona käytetään eurokoodin SFS-EN 1991-1-1 liitteen A taulukoita.

Paalulaatan päällä olevan penkereen syntyy maan omasta painosta ja liikennekuormasta paalulaattaan vaakavoima (halkaisuvoima), joka lasketaan lepopaineen avulla. Tämä vaakavoima aiheuttaa laattaan sisäisen vetorasituksen $F_{H,k}$, joka on otettava vastaan laatan raudoituksella [1, s. 23]:

$$F_{H,k} = K_0 \cdot (\gamma_m \cdot H^2/2 + q_k \cdot H), \text{ jossa} \quad (1)$$

$F_{H,k}$	on vaakakuorman ominaisarvo
H	on penkereen korkeus paalulaatan ulkoreunassa
γ_m	penkereen keskimääräinen tilavuuspaino
K_0	lepopainekerroin (lasketaan ohjeen NCCI 7 mukaan)
q_k	liikennekuorma, tiellä voidaan käyttää arvoa 20 kN/m ² , kevyen liikenteen alueella 10 kN/m ² ja radalla 30 kPa jaettuna tukipenkereen leveydelle

Paalulaatan alla olevan täytteen aiheuttama maapohjan painuminen voi aiheuttaa pystypaaluissa negatiivista vaippahankausta. Negatiivinen vaippahankaus otetaan huomioon kuormana Eurokoodin SFS-EN 1997 kansallisen soveltamisohjeen *NCCI 7* mukaisesti, kuorman ominaisarvon laskenta voidaan tehdä *Paalutusohje 2016* perusteella (RIL 254-2016), ja se tulee merkitykselliseksi vain, jos paaluun ei kohdistu tarkasteltavassa kuormitusyhdistelmässä pystysuoria liikennekuormia. Negatiivisen vaippahankauksen kokonaislisäkuorman laskeminen paaluryhmälle, kuva 5:



Kuva 5. Negatiivisen vaippahankauksen laskennan merkinnät paaluryhmän geometrialle [15, s. 49.]

Negatiivisen vaippahankauksen lisäkuorman arvo yksittäiselle paalulle lasketaan alla olevilla kaavoilla, paaluryhmän mitoituksessa käytetään pienempää näin saaduista arvoista:

$$F_{neg,d} = \frac{B \cdot L \cdot q + 2(B+L) \cdot D \cdot c_u}{n} \cdot \gamma_g \quad (2)$$

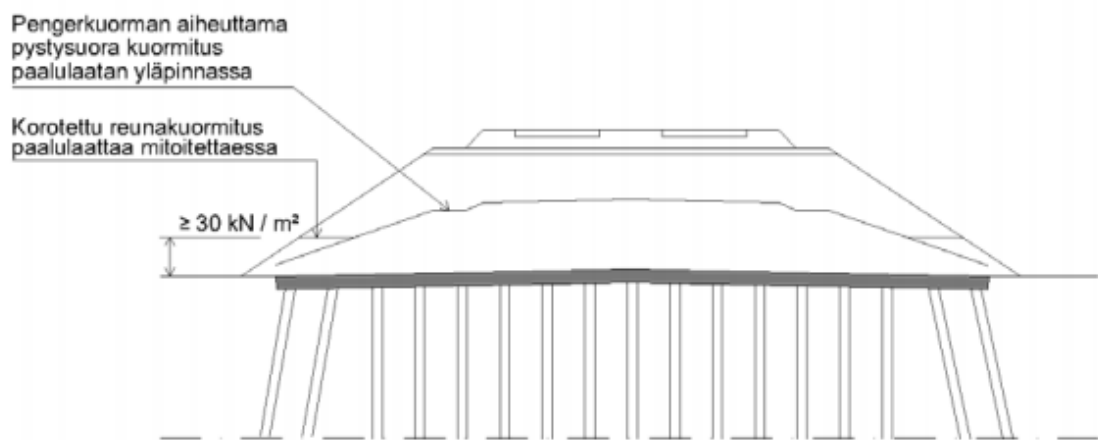
$$F_{neg,d} = \frac{\left(B + \frac{D}{2}\right) \cdot \left(L + \frac{D}{2}\right) \cdot q}{n} \cdot \gamma_g, \quad (3)$$

jossa

- c_u siipikairalla määritetty keskimääräinen leikkauslujuus syvyyteen D asti
- n paalujen lukumäärä
- q täytöstä aiheutuva pintakuorma paalujen ympärillä
- B paaluryhmän leveys
- L paaluryhmän pituus
- D syvyys, jossa maan painuma on 5 mm suurempi kuin paalujen
- γ_g pysyvän kuorman osavarmuusluku

Laatan alapuolisen maapohjan painuminen aiheuttaa lisäksi vinopaaluihin merkittävää taivutus- ja leikkausrasitusta, joita voidaan arvioida *Paalutusohje 2016*:ssa esitettyjen paalujen sivuvastusten ääriarvojen perusteella. [15 s. 24-25.]

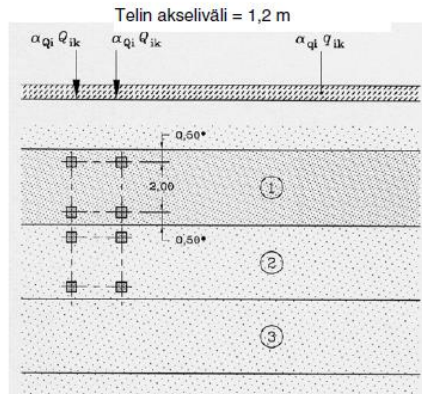
Paalulaattojen penkereen oman painon laskennassa voi vielä erottaa tapauksen, jossa paalulaatan vieressä tai yläpuolella on vino pengeri. (Esimerkiksi maantiet sekä tapaukset, joissa putket tuetaan ilman kaivantoa maantasaisille paalulaatoille.) Maanpinnan yläpuolisen penkereen aiheuttaman kuorman laskennassa koko penkereen painon voi olettaa kohdistuvan paaluille, kuormien arvioimiseen on annettu erikseen ohjeet, kuva 5:



Kuva 6. Penkereen painosta aiheutuvan pystykuorman jakautuminen paalulaatalle. Reuna-alueella kuorma korotetaan vähintään arvoon 30 kN/m² [1 s. 18.].

4.2 Muuttuvat liikennekuormat ajoneuvoliikenteen alueella

Siltojen mitoituksessa huomioidaan teiden pystysuuntaiset liikennekuormat kuormituskaavioilla LM1 - LM4, jotka on esitetty eurokoodien betonirakenteisten siltojen kansallisessa soveltamisohjeessa *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1* [16.]. Tiivistettynä kuormituskaaviot koostuvat erilaisista tasan jakautuneista kaistakuormista ja yhdestä tai kahdesta ajoneuvosta, jotka ovat selvästi painavampia kuin mikään todellinen ajoneuvo ja joiden sijainti kaistalla voi olla mikä vaan, kuva 7. Sillan yksittäisten rakenteiden kuormitukset saadaan, kun tutkitaan määräävimmit kuormitustapaukset kuormituskaavioihin ja muihin merkittäviin kuormiin (esim. oma paino, maanpaine, jarrutuskuormat) perustuen.

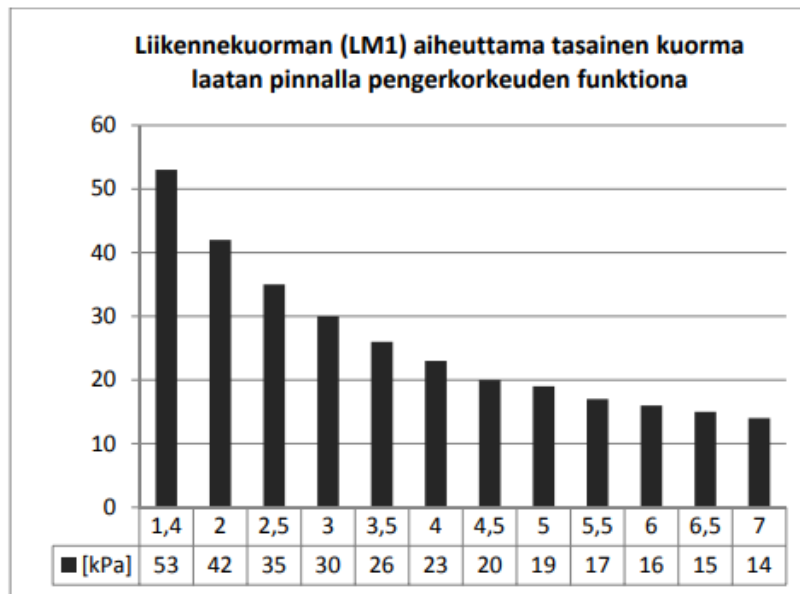


Taulukko B.1 Kuormakaavion LM1 kuormien ominaisarvot α -kertoimilla kerrottuna

Sijainti	Yleiset tied			
	Telikuorma		UDL	
	α_{qi}	$2 \times \alpha_{qi} \times Q_{ik}$ (kN)	α_{qi}	$\alpha_{qi} \times q_{ik}/q_{ik}$ (kN/m ²)
Kaista nro 1	1,0	2×300	1,0	9
Kaista nro 2	1,5	2×300	2,4	6
Kaista nro 3	0	-	1,2	3
Muut kaistat	-	-	1,2	3
Kaistojen ulkopuolinen alue (q_{ik})	-	-	1,2	3

Kuva 7. Kaavamainen esitys liikennekuorman kuormakaaviosta. Vasemman puolen kuva muokattu Suomen kansallisen liitteen mukaiseksi lähteestä [17, s. 32.] Kuvassa esitetään sillan hyödyllisen leveyden jakaminen ajosuunnassa kaistoihin, joita rasittaa tasan jakautunut kuorma (UDL) ja kahden ajoneuvon (akseliväli 2 m) telikuormat. Kaistojen numerointi ja ajoneuvojen sijoittelu perustuu määrävimmän vaikutuksen etsintään, yleensä mallinnusohjelmia käyttäen. Oikean puoleinen kuva on betonisiltojen kansallisesta suunnitteluohjeesta NCCI 1, jossa esitetään näiden ajoneuvojen telikuormat numeroarvoina [16 s.32.].

Kun pengerkorkeus on yli 1,4 m, paalulaattarakenteisiin saa käyttää pystysuuntaisena liikennekuormana kuormakaavioon LM1 perustuvaa yksinkertaistettua kuormaa, jossa liikennekuorma määräytyy pengerkorkeuden perusteella, kuva 8. [1, s. 18.] Teiden alapuolisten paalulaattojen lisäksi myös teiden vierillä sijaitseviin, esimerkiksi putkia tukeviin, paalulaattoihin kohdistuu suurella todennäköisyydellä ainakin joskus liikennekuormaa, joka pitää suunnitelmassa huomioida.



Kuva 8. Liikennekuorman LM1 aiheuttama tasainen pystykuorma pengerkorkeuden funktiona. [1, s. 18.]

Kuvan 8 käyttöohjeet ja rajoitukset ovat:

- Halkeamalaskentaa varten käyttörajatilan tavallinen arvo saadaan kertomalla kaaviosta saatu arvo luvulla 0,68.
- LM1:n pitkäaikaisarvona voidaan käyttää arvoa 0 kN/m².
- Kaavion väliarvot interpoloidaan.
- Kun käytetään kaavion arvoja, ei paalulaattaa tarvitse mitoittaa väsytykselle (mikäli käytetään tavanomaista raudoitusta).
- Kaaviosta saatavia liikennekuorman pystykuorman arvoja voidaan soveltaa myös muille maanalaisille rakenteille.

Liikennekuormien vaakakuormat määritetään paalulaattojen mitoituksessa Eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaisesti [16, s. 21.]. Ajoneuvon jarrutuksen ja kiihdytyksen aiheuttaman vaakasuora jarrukuorma Q_{jk} vaikuttaa pituussuuntaisesti ajoradan pinnan tasolla. Kuorman voi otaksua jakaantuvan tasaisesti koko ajoradan leveydelle. Jarrukuorman aiheuttama päällysrakenteen laskennallinen vaakasiirtymä saa olla enintään 20 mm. Jarrukuorman Q_{jk} arvo on [1 s. 12.]:

$$Q_{jk} = 360 + 2,7 \cdot L \text{ [kN.]}, \quad Q_{jk} \leq 500 \text{ kN}, \quad (4)$$

jossa L on liikuntasuomoin erotetun laatan osan pituus.

Paalulaattojen mitoituksessa on lisäksi otettava huomioon keskipakovoimasta ja sivusuuntaisesta syyäyksestä aiheutuvat voimat. Keskipakovoima sijoitetaan ohjeessa NCCI 1 esitetyllä tavalla. [1 s. 21.] Keskipakokuorma Q_{tk} ajoneuvoliikenteen alueella vaikuttaa valmiin ajoradan pinnan korkeudella ajoradan säteen suunnassa pistekuormana missä tahansa kannen poikkileikkauksessa, joka sijaitsee säteen r alueella. Voiman Q_{tk} ominaisarvo, jossa dynaamiset vaikutukset ovat mukana, saadaan ajoradan säteen r funktiona, taulukko 2:

Taulukko 2. Keskipakovoiman aiheuttama kuorma Q_{tk} [1, s. 13.].

Q_{tk} [kN]	r [m]
$0,2Q_v$	200
$40 \cdot Q_v / r$	200..1500
0	1500

r = ajoradan keskiviivan vaakasäde

Q_v = kuormakaavion LM1 telien pystysuuntaisten pistekuormien summa

Vinosta jarrutuksesta tai sivuluisusta aiheutuva poikittainen kuorma Q_{trk} on 25 % pituus-suuntaisesta jarru- tai kiihdytyskuormasta Q_{lk} . Kyseinen kuorma vaikuttaa samanaikaisesti kuorman Q_{lk} kanssa. Sivukuorman aiheuttama päällysrakenteen laskennallinen vaakasiirtymä saa olla enintään 20 mm. [1, s. 13.]

4.3 Muuttuvat liikennekuormat rautatieliikenteen alueella

Rautatieliikenteen siltoihin aiheuttamat pystykuormat arvioidaan kuormituskaaviolla LM71, joka on esitetty eurokoodien betonirakenteisten siltojen kansallisessa soveltamisohjeessa *Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1* [16, s. 21 kuva 10.]. Vastavasti kuin tieliikenteen aiheuttamat kuormat, myös rautatieliikenteen kuormat arvioidaan erilaisilla junaan kuvaavilla akseli- ja nauhakuormilla, jotka sijoitetaan raiteiden kohdille määräävän vaikutuksen selvittämiseksi. Kun paalulaatan pengerkorkeus junaradan alla on yli 1,4 m, voidaan myös raideliikenteen aiheuttama liikennekuorma määrittää yksinkertaistettuna pengerkorkeuden funktiona kuormakaavioon LM71 perustuen.

Rautatieliikenteen vaakakuormina tulee tarkastella keskipakokuorma sekä rautatieliikenteen vedosta ja jarrutuksesta aiheutuvat kuormat.

4.4 Muuttuvat liikennekuormat raitiotieliikenteen alueella

Raitiotieliikenteen aiheuttamien pystykuormien määrittämiseen Eurokoodit eivät anna suoraa ohjeistusta [17, luku 6.1 (3)]. Kuorman arvon voi laskea esimerkiksi Helsingin kaupungin maanallerakentamisohjeen avulla. [18.]. Ohjeen mukaan raitiotieliikenteen kuorma kadun alla oleville rakenteille lasketaan olettamalla raitieliikenteen kuorman vaikuttavan 1,5 metrin levyisellä alueella kunkin raiteen kohdalla 20 kN/m² suuruisena ja jakautuvan raiteen poikkisuuntaan kaltevuudessa 2:1 alaspäin mentäessä. Näin saadut eri raiteiden intensiteetit summataan tarkasteltavalla tasolla yhteen niin, että vierekkäisistä raiteista kahdelta kuorma otetaan huomioon täytenä ja muilta puolen suuruisena.

Raitovaunun vedosta ja jarrutuksesta kadun alle tulevia rakenteita rasittavana vaaka-kuormana käytetään 15 kN/raidemetri koko rakenteen raiteen suuntaiselle mitalle. Tämä kuorma syntyy jokaiselta raiteelta ja sille ei tarvitse käyttää suurempaa arvoa kuin 500 kN/raide. Raitiotieliikenteen kuormalla kuormitetaan vain katusuunnitelmassa raitiotieksi osoitettua tai raitiotieliikenteen käyttöön varattua osaa kadun poikkileikkauksesta. Raitiotien alle ulottuvat rakenteet mitoitetaan kuitenkin aina myös ajoneuvoliikenteen kuormille. Kuormat yhdistellään raitiotieliikenteen osalta eurokoodien soveltamisohjeen NCC1 liitteessä esitetyllä tavalla. [18 s. 4.]

4.5 Muuttuvat liikennekuormat kevyen liikenteen väylän alueella

Jos paalulaatta rakennetaan kevyen liikenteen alueen alle, jolle ajoneuvoliikenteen pääsy on estetty, käytetään muuttuvana liikennekuormana vähintään ohjeen *NCCI 1* mukaisia kuormia [16, luku B.5] ottaen huomioon ohjeen *NCCI 7* tarkennukset [12, luku 4.5.1].

Kevyen liikenteen sillan suunnittelussa otetaan huomioon kolme eriaikaisesti vaikuttavaa kuormakaaviota: tasaisesti jakautunut kuorma, pistekuorma ja huoltoajoneuvo. Paalulaatoille yli 1,4 m pengerkorkeudella kevyen liikenteen kuorma yksinkertaistuu tasan jakautuneeksi kuormaksi, joka asetetaan vaikuttamaan vaikutuspinnan pitkittäis- ja poikittaissuunnassa epäedullisilla osilla. Kuorma määritetään kaavalla:

$$q_{jk} = 2,0 + 120 / (L + 30); \quad 2,5 \leq q_{jk} \leq 5,0 \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (5)$$

jossa L on kuormituspituus.

4.6 Kuormien yhdistely

Paalulaatan laattaosan mitoituksessa kuormien yhdistely tehdään ohjeen NCCI 1 mukaan [16]. Tiepaalulaatoilla on riittävää tarkastella seuraavat yhdistelmät:

- Murtorajatila: MRT_1, MRT_3 ja MRT_11. (erityisen korkeilla paalulaatoilla tarkastellaan myös MRT_0)
- Tavallinen yhdistelmä, KRT_1b ja KRT_11b.
- Pitkäaikaisyhdistelmä, KRT_1c.

Liikennekuormien lisäksi muita muuttuvia kuormia ei huomioida. Rautatiepaalulaatoilla on riittävää tarkastella seuraavat yhdistelmät:

- Murtorajatila: MRT_1 ja MRT_9. (erityisen korkeilla paalulaatoilla tarkastellaan myös MRT_0)
- Tavallinen yhdistelmä, KRT_1b ja KRT_9b.
- Pitkäaikaisyhdistelmä, KRT_1c.

Tieliikenteeltä suljetulla kevyen liikenteen alueella tarkastellaan yhdistelmät

- Murtorajatila: MRT_1
- Tavallinen yhdistelmä, KRT_1b
- Pitkäaikaisyhdistelmä, KRT_1c

Paalulaatan paalujen mitoituksessa huomioidaan penger- ja liikennekuorman pystykuormien lisäksi paaluun kohdistuva negatiivinen vaippahankaus. Paalukuorman mitoitusarvo F_d määritetään ohjeen NCCI 7 mitoitustavan DA2 mukaan (yhtälöt 6.10a ja 6.10b) huomioiden kuormien osavarmuusluvut (12, Taulukko A.3a(FI)):

$$F_d = 1,35 \cdot (G_k + F_{neg,k}) \quad [6.10a] \quad (6)$$

$$F_d = 1,15 \cdot G_k + (1,3 \text{ tie}/1,45 \text{ rata}) \cdot Q_k \quad [6.10b] \quad (7)$$

G_k pysyvien kuormien ominaisarvo (yhdelle paalulle),

Q_k pystysuorien liikennekuormien ominaisarvo (yhdelle paalulle)

$F_{neg,k}$ negatiivisen vaippahankauskuorman ominaisarvo

5 Paalujen rakenteellinen suunnittelu

5.1 Lähtökohdat

Paalutettavalta alueelta ja paalutuksen vaikutusalueelta tarvitaan maaperätutkimuksiin perustuen esimerkiksi [1, s. 27 ja 14, s. 16]:

- penkereen korkeus ja leveys sekä pengerluiskien kaltevuudet
- maanpinnan korkeusasema
- maaperän lujuus ja painumaominaisuudet (esimerkiksi maan suljetun leikkaukslujuuden ominaisarvo)
- pohjatutkimustulosten perusteella arvioidut paalujen vaadittavat pituudet
- kohteessa käytettävä lyötävän paalun kärkityyppi
- arvio negatiivisen vaippahankauksen esiintymisestä ja negatiivisen vaippahankauksen mitoitusarvon määrittäminen eri paaludimensioille ja tarvittaessa kohteen eri alueille.

Paalujen suunnittelussa ja toteutuksessa noudatetaan soveltamisohjetta *Paalutusohje 2016*, jota sovelletaan yksittäisien paalujen ja paaluryhmien Eurokoodijärjestelmän mukaiseen suunnitteluun ja asennukseen. [15, s.15.] Paalulaattoja koskevat poikkeavat ja täydentävät ohjeet annetaan InfraRYL:issä ja Liikenneviraston ohjeissa. [1.]

Paalut suunnitellaan yleensä tasaväliseen ruudukkoon, toki yksittäisen paalun sijainti voidaan kohdentaa eri tavalla, jos näin voidaan välttää esimerkiksi vino kalliopinta paalun kärjen kohdalla. Paalulaatoissa käytetään yleensä tukipaaluja, eli paalut ulottuvat kantavaan maakerrokseen asti. Laattarakenteeseen kohdistuvat pystykuormat siirretään pystypaaluille ja vaakakuormat vinopaaluille. Vinopaaluilla tarkoitetaan paaluja, jotka on asennettu pystytasoon nähden kalteviksi. [15, s. 20-21 ja 1, s. 40.] Suunnittelulla pyritään välttämään vetopaalujen esiintyminen kaikenlaisissa siltarakenteissa, mukaan lukien paalulaatat. Syynä tähän on, että vedetyn paalun ylä- ja alapään luotettava ankkurointi on vaikeaa.

Paalujen puristuskestävyys määräytyy joko paalun rakenteellisen tai geoteknisen kestävyden perusteella, pienemmän arvon ollessa rajoittava. Rakenteellinen kestävyys määräytyy paalun materiaalin ja geometrian perusteella, murtotapana on paalupoikkileikkauksen kapasiteetin ylittyminen tai paalun nurjahdus [19, s. 12]. Paalun nurjahduskestävyys ei ole suoraan sama kuin vastaavan pilarin rakenteellinen nurjahduskestävyys,

koska ympäröivä maa tukee paalua [1, s. 66]. Geotekninen kantavuus tarkoittaa paalun suurinta lyömällä osoitettavissa olevaa murtorajatilan puristuskestävyyttä [19 s. 12]. Paalujen rakenteellisen ja geoteknisen puristuskestävyyden arvoja voi arvioida erilaisilla laskukaavoilla tai menetelmillä, myös paalujen valmistajilla on näille valmiiksi taulukoituja arvoja erilaisissa olosuhteissa. Todellinen puristuskestävyys riippuu kuitenkin maaperästä sekä paalun kärjen kiinnittymisen vakaudesta, joten paalun toteutunut puristuskestävyys pitää aina määrittää paalutuksen yhteydessä työkohteessa.

Vinopaalujen suunnittelussa maantielaatoilla keskipakovoiman ja jarruvoiman voidaan olettaa siirtyvän kokonaisuudessaan maaperään pystypaalujen sivuvastuksen kautta, kun maapohja on kivennäismaalajia ja sen leikkauslujuus on vähintään 20 kPa, tai kun maan leikkauslujuus on vähintään 15 kPa ja maassa on vähintään 1,0 m paksuinen kiviakuorikerros. [1.] (Penkereen rakenteeseen ja lujuteen annetaan vinopaaluihin liittyen vielä muutamia lisätarkenteita luvussa 3.3). Muussa tapauksessa jarrukuorma voidaan siirtää maaperään ajoradan keskialueelle sijoitettavia vinopaaluja käyttäen. Keskipakovoima voidaan siirtää maaperään tien luiskaan sijoitettavia vinopaaluja käyttäen. Samalla luiskaan sijoitettavat paalut varmistavat rakenteen vakauden poikkisuunnassa. Vinopaalurivien minimimäärä on kaksi. Tällöin paalujen kaltevuus lasketaan:

$$m = n / K_0, \text{ jossa} \quad (8)$$

m on vinopaalun kaltevuus (esim. $m=6 \Rightarrow$ paalun kaltevuus = 6:1)

n on luiskakaltevuusluku (esim. $n=3 \Rightarrow$ luiskakaltevuus= 1:3)

K_0 on lepopainekerroin

Lepopainekerroin lasketaan käyttäen suunnitelman mukaisen tausta- tai ympärystytön leikkauskestävyysskulman ja tilavuuspainon ominaisarvoja, jotka vastaavat maarakenteelle asetettuja tiiveysvaatimuksia. Täytön leikkauskestävyysskulmalle käytetään kuitenkin korkeintaan arvoa 32° ja maan tilavuuspainolle vähintään arvoa 21 kN/m^3 . Lepopaineen oletetaan vaikuttavan vaakasuuntaan. Välittömästi yleisen alueen alapuolella oletetaan lisäksi vaikuttavan em. ohjeen mukaisen ns. tiivistyslisan, joka lasketaan julkaisun 'RIL 263-2014, Kaivanto-ohje', mukaan. [18.]

Ratapaalulaaioilla vaakasuuntaiset ulkoiset kuormat (maanpaineesta) sekä keskipakovoimat ja jarruvoimat siirretään kantavaan pohjaan vinopaaluilla tai hankekohtaisesti mainituilla erityistoimilla [1 s. 41].

5.2 Paalulaatoissa käytettävät lyötävät teräsbetonipaalut

Lyötävistä teräsbetonipaaluista tavallisin koko paalulaatoissa on 300 x 300 mm² [1, s. 40]. Teräsbetonipaalujen tyypillisiä käyttökohteita ovat liikenne- ja väylärakenteet. Teräsbetonipaalun etuja ovat esimerkiksi hyvä korroosionkestävyys sekä suuri nurjahduskestävyys ja kantavuus. Teräsbetonipaalut ovat edullisempia kuin vastaavan kantavuuden teräsputkipaalut, hinta on noin puolet pienempi [20].

Paalulaattoakohteissa lyötävien teräsbetonipaalujen puristuskestävyys arvioidaan rakennesuunnittelun yhteydessä [19 s. 13]. Rakenteellinen nurjahduskestävyys tulee tarkistaa paalulaatoissa tyypillisille teräsbetonipaaluille (sivumitta > 250 mm), jos maan leikkauslujuus on alle 10 kPa. Jos maan leikkauslujuus on alle 5 kPa, sen paalua tukevaa vaikutusta ei saa laskelmissa huomioida. [1, s. 66.]) Lyöntipaalun geoteknistä kestävyyttä rajoittaa paalulle asennuksessa sallittava suurin lyöntijännitys, joka vuorostaan riippuu lyönnin arvioidusta epäkeskeisyydestä. Siten paalutustyöluokasta riippuen samalla paalulla on erilaiset taulukoidut kestävyysarvot (paalulaatoille paalutustyöluokka on aina vähintään PTL 2). [19, s. 12.]

Paalulaattarakenteiden suunnitteluohjeen mukaisesti lyötävien paalujen geoteknisen puristuskestävyyden toteutunut arvo tulee mitata toteutusvaiheessa dynaamisilla koekuormituksilla NCCI 7 ohjeen mukaan [12, s. 55]:

Paalulaattojen ja muiden taitorakenteiden paaluista tulee koekuormittaa dynaamisesti kullakin liikuntasauvojen rajaamalla paalulaatan tai muun taitorakenteen osalla vähintään 5 % paaluista, kuitenkin vähintään 5 paalua. Koekuormitettavat paalut on valittava niin, että ne edustavat kattavasti koko paalukenttää.

Dynaamisen koekuormituksen suunnitelma ja tavoitearvot on osa rakennesuunnittelua.

Paalun geotekninen puristuskestävyys voidaan suunnitella enintään mitoitusarvoon, joka saadaan jakamalla paalutustyöluokan perusteella määräytyvä $R_{C,max}$ -arvo korrelaatiokerroimilla (ξ_5 ja ξ_6) ja paalun osavarmuusluvulla $\gamma = 1,2$. (Korrelaatiokertoimet liittyvät mitattujen kestävyyksien keskiarvoon ja minimiarvoon). Korrelaatiokertoimet määräytyvät muun muassa koekuormitettavien paalujen lukumäärän perustella ja niiden määrittämisestä on kerrottu tarkemmin *Paalutusohje 2016*:ssa [15, luku 4.5.2.4]. Käytettävien korrelaatiokertoimien arvo pienenee, kun koekuormitusten lukumäärä kasvaa. Siispä mitattuja puristuskestävyyksiä voidaan pienentää vähemmän, kun mittauksia on enemmän, ja paalujen todellinen kestävyys tunnetaan luotettavammin. Paalujen toteutunut

geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo määräytyy lopulta dynaamisten koekuorimitustulosten keskiarvon tai minimiarvon perusteella ja sen tulee aina olla vähintään yhtä suuri kuin suunnitteluvaiheessa määritetty geoteknisen puristuskestävyyden mitoitusarvo. [19 s. 16.]

Teräsbetonipaalujen valmistajilla on valmiiksi taulukoituja arvoja puristuskestävyyden maksimiarvolle, taulukko 3. Puristuskestävyys määräytyy paalutyypin ja paalutusluokan perusteella. (Taulukossa korrelaatiokertoimena käytetty arvoa $\xi = 1,47$.) Paalun rakenteellinen kestävyys, ($R_{d, \text{str}}$), on määritetty menetelmällä, jossa huomioidaan maan suljetun leikkauslujuuden keskiarvo c_u sekä käyttörajatilan pitkä- ja lyhytaikaisten kuormien suhde. Geometrinen alkutaipuma on eri jatkamattomille ja jatketuille paaluille, joten rakenteellinen puristuskestävyys riippuu myös paalun mahdollisista jatkoksista [19 s.13]:

Taulukko 3. Esimerkki betonipaalun puristuskapasiteetin taulukoiduista arvoista paalukoolle 250x250 mm². Puristuskapasiteettien mitoitusarvot: paalun rakenteellisen kestävyys ($R_{d, \text{str}}$) ja geoteknisen kantavuus ($R_{d, \text{geo}}$). Paalun puristuskestävyydeksi valitaan pienempi näistä arvoista. (P = pitkäaikaiskuormien osuus; L = lyhytaikaisten kuormien osuus, c maan suljettu leikkauslujuus), [https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/09/RT-Betonipaalu-Tuotelehti-PO-2016.pdf s.13.]

Paalutyyppi	$R_{d, \text{str}}$ [kN]								$R_{d, \text{geo}}$ [kN]		
		P [%]	L [%]	c_u [kN/m ²]					PTL1	PTL2	PTL3 ^{*)}
				3	5	7	10	12			
RTB-250-16	Jatkettu paalu	100	0	375	508	613	739	805	624	698	791
		50	50	473	636	760	899	(947)			
		0	100	548	721	838	(947)	(1000)			
	Jatkamaton paalu	100	0	532	692	808	(927)				
		50	50	669	867	990	(1077)				
		0	100	764	933	1017	(1103)				

5.3 Paalulaatoissa käytettävät lyötävät ja porattavat teräspaalut

Teräspaalujen ohjeellinen halkaisija paalulaatoissa on 140-270 mm. Näiden teräspaalujen seinämäpaksuus on valittavissa välillä 8-12,5 mm, ja vakioteräsvahvuudet ovat S440 ja S550. [14 s. 6 ja s.14.] Lyötävien teräspaalujen (RR-teräspaalujen) etuja ovat [14]:

- Paaluihin on saatavilla erilaisia maa- ja kalliokärkiä, myös kohdekohtaisesti mitoitettavia. Pohjarakennesuunnittelija valitsee kärkikappaleen tyyppin olosuhteiden mukaan.

- Maan siirtymät ja asentamisesta aiheutuva värinä saadaan minimoitua.
- Suuren kantavuuden ja laajan mittavalikoiman ansiosta paalujen lukumäärä voidaan optimoida tehokkaasti.
- Paaluelementin pituus voidaan valita kohdekohtaisesti asennuspaikan ja -kaluston vaatimusten mukaisesti.
- Asennettavissa kevyillä peruskoneilla (<20 t) noin paalukokoon RR170 saakka.

Myös porattavia teräspalkkipaaluja (RD-teräspaalut) käytetään paalulaatoissa. Porapaalujen ominaisuuksia [14]:

- Soveltuvat vaikeasti läpäistävään maahan (kivet, lohkareet, vanhat perustusrakenteet).
- Paalut tunkeutuvat varmasti kallioon, esimerkiksi puristus- tai vetorasitetut kallioon tukeutuvaksi suunnitellut paalut tai vinot kalliopinnat.
- Perustuksen jäykän kiinnittämisen stabiliteetti voidaan varmistaa, kun kalliopinta on lähellä maanpintaa.
- Maan siirtymät ja asentamisesta aiheutuva värinä saadaan minimoitua.
- Paalutus voidaan suorittaa matalissa ja ahtaissa tiloissa, kun paalut jatketaan lyhyistä elementeistä.
- Paalutukselle on asetettu korkeat tarkkuus- ja laatuvaatimukset.
- Asennettavissa kevyillä peruskoneilla (<20 t) noin paalukokoon RD320 saakka.

Ehjän kallioon tukeutuessaan RD-paalujen kestävyysmitoitussarvo on tyypillisesti selkeästi vastaavan kokoista RR-paalua suurempi (noin 1,2–2,0-kertainen). Rakenteita on mahdollista optimoida käyttämällä kohteessa useampaa (tyypillisesti kahta tai kolmea) paalukokoa. [14 s. 12.] Lähellä maanpintaa olevissa paalulaatoissa on käytettävä porapaaluja, lyöntipaalun pienin hyväksytty maassa oleva pituus on 1,5 m [1, s. 43].

Lyötävien teräspaalujen rakenteellinen puristuskestävyys määritetään vastaavasti kuin teräsbetonipaaluille, toki käyttäen teräkselle soveltuvia laskentakaavoja. Teräs-materiaalina on alttiina korroosiolle, korroosio heikentää paalun kestävyyttä. Suojaamattoman teräspaalun keskimääräiseksi korroosioksi 100 vuodessa otaksutaan vähintään 1,2 mm paalun ulkopinnasta. Korroosion tilastollinen suuruus riippuu maaperän ominaisuuksista, erilaisille korroosio-olosuhteille on taulukkoarvoja (esimerkiksi *Paalutusohje 2016*:ssa tai valmistajan suunnitteluohjeissa), epäselvissä tapauksissa on syytä yliarvioida korroosion vaikutus tai käyttää korroosionsuojausmenetelmiä. [14 s. 19.] Teräspaalujen rakenteellisen ja geoteknisen puristuskestävyyden mitoitussarvoja erilaisissa olosuhteissa on jonkin verran valmiiksi taulukoituna, mutta variaatioiden suuren määrän vuoksi ei kaikille

tapauksille ja paalulaaduille. Yksittäisen paalun kantavuuden mitoitusarvot lienee helppointa määrittää SSAB:n RRPileCalc-laskentaohjelmalla. Ohjelma huomioi esimerkiksi maaperän suljetut leikkauslujuudet, alkutaipuman, paalutustyöluokan ja paalun ominaisuudet, ja arvioi PDA-mittauksen koesarjat ja tavoitearvot. Toinen vaihtoehto on eurokoodin mukaisten laskentakaavojen käyttö.

Paalulaatoissa lyötävän teräspaalun toteutunut geotekninen kestävyys osoitetaan dynaamisella koekuormituksella osalle paaluista, vastaavasti kuin teräsbetonipaaluilla, sekä loppuille paaluille loppulyöntien perusteella. Porattavan teräspaalun geotekninen kestävyys arvioidaan laskennallisesti pohjatutkimuksiin perustuen. [1.] Porapaaluilla tai kalliokärjellä varustetuilla lyöntipaaluilla geotekninen kestävyys ei käytännössä koskaan rajoita paalun kestävyttä kun tukeudutaan ehjään kiinteään kallioon. Porapaalujen kalliokontakti varmistetaan poraamalla paalu vähintään 3d, kuitenkin vähintään 0,5 m ehjään kallioon. Suuremmilla, yli 300 mm halkaisijan porapaaluilla turvallinen upotussyvyys kallioon suunnitellaan tapauskohtaisesti. Jos vierekkäisten paalujen kärkien tasot poikkeavat merkittävästi, ulotetaan lyhyemmät paalut syvemmälle. [15, s. 71.]

5.4 Paalujen keskiöetäisyys

Paalujen väliset etäisyydet valitaan siten, etteivät vierekkäiset paalut vaikuta vähentävästi toistensa kantavuuteen eivätkä asennettaessa vahingoita toisiaan. Keskiöetäisyyksien ohjeelliset vähimmäisarvot yhdensuuntaisille paalulaatoissa tyypillisesti käytettäville pieniläpimittaisille paaluille, taulukko 4, (d on paalun halkaisija tai sivumitta):

Taulukko 4. Paalujen keskiöetäisyyksien vähimmäisarvot tukipaaluille. Taulukko muokattu lähteestä [15, s. 179.]

Paalun pituus [m.]	Tukipaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen
10	$2,7d$	$3d$
10-25	Väliarvot interpoloidaan	
25	$3,5d$	$4d$

Mikäli paalu joudutaan vaurioitumisen seurauksena tai jostain muusta syystä korvaamaan, suositellaan korvaava paalu asennettavaksi minimissään $2d$ keskiöetäisyydelle korvattavasta paalusta. Tukipaaluille keskiöetäisyyden vähimmäisarvo on 0,8 m.

Suunniteltaessa paaluryhmä alaspäin hajaantuvaksi, voidaan paalujen yläpäät sijoittaa näitä arvoja pienemmin keskinäisin etäisyyksin. Risteävien tukipaalujen keskinäiset minimietäisyydet riippuvat maakerrosten rakenteesta sekä paalujen risteyskohdan syvyydestä. Hienorakeisissa maakerroksissa vapaaväli voi olla pienempi, jos asennuksessa paalu voidaan suunnata niin, ettei se osu ympäröiviin paaluihin. Karkearakenteisissa maakerroksissa suuntaaminen on vaikeampaa, joten vapaan välin on syytä olla näitä ohjearvoja huomattavastikin suurempi. Paalujen risteämiskohta pyritään sijoittamaan lähelle maanpintaa, jolloin paalujen keskinäiset etäisyydet voivat olla pienet. [15, s. 179-180.]

5.5 Paalujen sallitut sijaintipoikkeamat

Paalut pyritään asentamaan tarkalleen suunnitelmissa esitettyyn paikkaan ja asentoon. Asennuksen yhteydessä syntyvät poikkeamat paalujen sijainnissa ja kaltevuuksissa otetaan huomioon paaluperustusta suunniteltaessa. Paalutyypin valinnalla on merkitystä odotettavissa oleviin sijainti- ja kaltevuuspoikkeamiin. Paalutuksen jälkeen tehdyn paalujen asemien mittauksen perusteella määritellään todellisten poikkeamien arvot ja tarkastetaan, että ne pysyvät suunnitelman sallimissa rajoissa. Jos suunnitelman mukaiset sallitut sijainti-, kaltevuus ja suuntaustoleranssit ylitetään, tulee rakenne mitoittaa uudelleen ja ryhtyä tarvittaessa tarpeellisiin toimenpiteisiin.

Teräspaaluille ja lyötäville teräsbetonipaaluille on määritelty ohjeelliset enimmäisarvot yksittäisten paalujen ja koko paaluryhmän sallituille sijaintipoikkeamille [15, luvut 4.4.2 ja 4.4.3]. Esimerkiksi yksittäisen paalun suurin sallittu sijaintipoikkeama sekä teräspaaluille että lyötäville teräsbetonipaaluille on 0,10 m. Paalulaatoille pätee lisäksi vaatimus, että paalujen keskinäisen välin suurin sallittu poikkeama on 150 mm [1, s. 44].

Porattavilla teräsbetonipaaluilla päästään yleensä helposti parempaan tarkkuuteen, joten niille on suositeltavaa käyttää ohjeellisia arvoja tiukempia rakentamistoleransseja suunnitelmissa. Tiukempien toleranssien saavuttaminen edellyttää sekä paalun paikalleen mittaukselle että asennustyön suoritukselle erityistä huolellisuutta. [15, s. 181-184.]

6 Laatan rakenteellinen suunnittelu

6.1 Mitoituksen lähtökohdat

Paalulaatan laattaosan mitoituksessa tarkastettavia asioita murtorajatilassa ovat taivutuskestävyys ja lävistyskestävyys. Leikkauskestävyys ei betonilaatoilla yleensä tule mitoitettavaksi. Käyttörajatilassa tarkastetaan halkeamaleveydet sekä tavalliselle että pitkäaikaisyhdistelmälle. [1 s. 38.]

Paalulaatan betonirakenteiden rasitusluokat, lujuusluokat sekä betonipeitteen nimellisarvot määritetään ohjeen NCCI 2 mukaan perustuen rakenneosaan ja rasitusluokkaryhmään [13, taulukko 4.3]. Kun pengerkorkeus on vähintään 1,4 m, ei betonilla ole pakkasenkstävyyslukuvaatimusta. Rakenneosa valitaan paalulaattaan kohdistuvien rasitusten mukaan (Ro30 suolaamaton tie, Ro31 suolattava tie, Ro32 suolattava tie, vaakasuora paalulaatta), ja suolauksen määrä vaikuttaa vielä valittavaan rasitusluokkaryhmään. [1, s. 39.] Esimerkiksi tierakenteiden rakenneosan Ro30, paalulaatta suolaamaton tie, vähimmäisvaatimukset betonille, taulukko 5:

Taulukko 5. Esimerkki ohjeen NCCI 2 betonirakenteiden vähimmäisvaatimuksista. Betonipeitteen nimellisarvot tarkoittavat: muottia vasten valettu tai laatan yläpinta/maata vasten valettu pinta ja suluissa (halkeamalaskennassa käytettävä betonipeitteen vähimmäisarvo) [13, s. 30.]

Rakenneosa	Rakenneosan tunnus	Rasitusluokkaryhmä	Rasitusluokat	Vaatimukset				Suunnittelukäyttöikä
				Lujuusluokka	P-lukuvaatimus	Betonipeitteen nimellisarvo [mm] (vähimmäisarvo)	Raudoitustyyppi (1)	
Paaluhatut, paalulaatat ja niihin liittyvät siirtymälaatat yleensä (4)	Ro30	R4	XC2	C25/30 (7)	-	50/100 (25) (3)	tr	100
						50/100 (35) (3)	jr	

6.2 Mitoitus taivutukselle murtorajatilassa

Laatan tehollisen korkeuden d laskennassa voidaan käyttää suoraan laatan todellista paksuutta, josta on vähennetty betonipeitteen nimellisarvo ja etäisyys raudoituksen

keskikohtaan. Betonipeitteen nimellisarvo sisältää ympäristörasitusten vaatiman betoni-
peitteen ja sallitun mittapoikkeaman.

Laatta mitoitetaan taivutukselle Eurokoodimenettely ja niihin liittyvien Liikenneviraston
kansallisten soveltamisohjeiden NCCI 1, NCCI 2 ja NCCI 7 mukaisesti sekä pituus- että
poikkisuuntaan [1, s.53.]. Paalulaatan teräsbetonirakenteen voidaan otaksua olevan sit-
keä, kun taivutusraudoitus myötää ennen kuin puristetun reunan betoni saavuttaa mur-
topuristuman arvon (ϵ_{cu2} 3,5 ‰) tai poikkileikkauksen painopisteessä oleva betoni saa-
vuttaa arvon (ϵ_{c2} 2,0 ‰). Paalulaatan kaikki pinnat raudoitetaan. [13 s.53 ja s. 9.]

Pääraudoituksen vähimmäishalkaisija on 12 mm, kun paalulaatta on puristettu tavalli-
sella kuormitusyhdistelmällä. Tavallisella kuormitusyhdistelyllä puristetuissa pinnoissa
pääraudoituksen enimmäisjakoväli on 300 mm, kuitenkin enintään rakenneosan pak-
suus. [13 s. 86.] Jakoraudoitus on vähintään 20 % pääraudoituksesta. Jakoraudoituksen
ja muun pintaraudoituksen vähimmäishalkaisija on 12 mm ja enimmäisjakoväli 300 mm.
Murtorajatilassa vaadittavasta kenttäraudoituksesta viedään tuille vähintään 50 %. [13 s.
90.]

6.3 Halkeilun rajoittaminen käyttörajatilassa

Lasketaan taivutusmomentit käyttörajatilan tavanomaiselle ja pitkäaikaiselle kuormitus-
yhdistelmille. Halkeamaleveyden w_{max} suositusarvot eroavat standardista SFS-EN 1992-
1-1. Halkeilun rajoittamisen osalta paalulaatat suunnitellaan siten, että ne täyttävät käyt-
töraajatilassa taulukon 6 arvot:

Taulukko 6. Laskennallisen halkeamaleveysrajan w_{max} suositusarvot silloille mukaan lukien paalulaatat 100 vuoden käyttöiälle ja niihin liittyvät yhdistelysäännöt NCCI 2 [13 s. 67.].

Rasitusluokka a	SARAKE 1 Raudoitettut ja tartunnattomilla janteilla jännitetyt rakenneosat		SARAKE 2 Tartunnallisilla janteilla ^b jännitetyt rakenneosat	
	Tavallinen kuormitusyhdistely	Pitkäaikainen kuormitusyhdistely	Tavallinen kuormitusyhdistely	Pitkäaikainen kuormitusyhdistely
X0, XC1	-	0,3 ^c	-	0,2
XD1 ^d , XC2, XC3, XC4, XS1 ^d	0,2	0,15	0,07	Vetojännityksetön tila
XD2, XD3, XS2, XS3 ^d	0,15	0,1	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila

a Rasitusluokat rakenneosittain ovat määritetty kohdassa 4.2
b Tähän luokkaan kuuluvat suojaputkeen injektoiduilla janteilla varustetut rakenteet.
c Rasitusluokissa X0 ja XC1 halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen ja tämä raja on asetettu hyväksyttävän ulkonäön takaamiseksi.
d Kloridirasitukset eivät aseta vaatimuksia rakenteen halkeilun suhteen, mikäli kloridirasitetut pinnat on suojattu kohdan 4.3 mukaisesti.

HUOM. Taulukon halkeamaleveysrajan saa korottaa luvulla $C/C_{min,dur} \leq 1,4$

Paalulaatan halkeamaleveysrajat ovat kuvan 8 perusteella laskettuna tavallisella yhdistelmällä 0,28 mm ja pitkäaikaisyhdistelmällä 0,21 mm (kun rasitusluokka on paalulaatoille tyypillinen XC2 ja huomioidaan suojabetonointiin liittyvät etäisyydet c ja $C_{min,dur}$).

6.4 Mitoitus lävistykselle

Lävistystarkastelu perustuu murtorajatilan suurimpaan kuormaan. Tässä työssä oletetaan paalulaatoille tyypillisesti, että paalulaatta on leikkausraudoittamaton. Laatan tehollisena paksuutena d käytetään paalun pään yläpuolella olevaa laatan osaa, paalun upotussyvyyden on oltava vähintään 50 mm [1, s. 36]. Lävistävä voima on paalun kuorma, josta vähennetään lävistyskartion alueelle kohdistuva kuorma. Lävistyskartion alaksi lasketaan paalun ala, johon lisätään mitta d kaikkiin reunoihin. [1, s. 38.] Lävistysmitoitusta ei tehdä suoraan Eurokoodien kaavojen mukaan, vaan betonisiltojen kansallisen NCCI 2 ohjeen mukaan perustuen ohjeeseen RakMK B4 2005. [1 s. 38.]

Leikkausraudoittamattoman laatan lävistyskestävyys on:

$$V_c = k\beta(1 + 50\rho)udf_{cd} \quad (9)$$

missä

$$k = 1,6 - d \geq 1,0$$

$$\rho = \sqrt{\rho_x \rho_y} \leq 0,008$$

$$\beta = \frac{0,4}{1 + \frac{1,5e}{\sqrt{A_u}}}$$

d on laatan tehollinen paksuus

e on lävistysvoiman epäkeskisyys leikkautuvan alueen painopisteestä

A_u on tuen reunasta etäisyydellä $0,5d$ olevan leikkauksen rajoittama pinta-ala

u on pienempi seuraavista:

- Tuen reunasta etäisyydellä $0,5d$ oleva piiri.
- Piiri, jossa edellisen kohdan piiri vapaan reunan puolella on korvattu reunoille piirretyillä normaaleilla.

7 Paalulaattojen mitoitus laskentapohjassa: lähtötiedot

7.1 Perustiedot

Työn tutkimusosassa perehdyttiin tilaajayrityksen paalulaattojen mitoituksen laskentapohjaan ja parannettiin sen toiminnallisuutta. Excelliin koottiin kattava perustietolista paalulaatan geometriaan liittyen, esimerkiksi paalulaatan pituus ja leveys sekä paalurivien lukumäärä molemmissa suunnissa. Perustietoihin lisättiin esimerkiksi alavetovalikko ”rakenneosa” ja ”rasitusluokkaryhmä”, joiden perusteella automatisoitiin betonin lujuuden valinta sekä taivutusmitoituksen ja halkeamaleveyslaskennan suojabetonietäisyyksien määrittäminen raudoituksen mitoitusta varten. Perustietoihin sisällytettiin myös paalun tiedot (muun muassa pituus, halkaisija, muoto, materiaali, kantavuus), samoin kuin kaikki muutkin seuraavissa mitoitusvaiheissa tarvittavat tiedot.

Päätettiin kerätä perustietoihin myös sellaisia tietoja, joita ei tarvita paalulaatan mitoituksessa suoraan, mutta jotka kuitenkin pitää esittää paalulaatan rakennelaskemissa (esimerkiksi seuraamusluokka tai paalulaatan kuivatustapa). Tässä ajatuksena oli varautuminen paalulaattojen suunnitteluprosessin kehittämiseen jatkossa (esimerkiksi parametrisen suunnittelun avulla), jolloin ihannelähtöisessä suunnitteluprosessin ja siihen liittyvien dokumenttien tuottamisen voisi automatisoida osittain tai kokonaan käyttäjän syöttämien lähtötietojen perusteella.

7.2 Kuormat ja kuormitusyhdistelyt

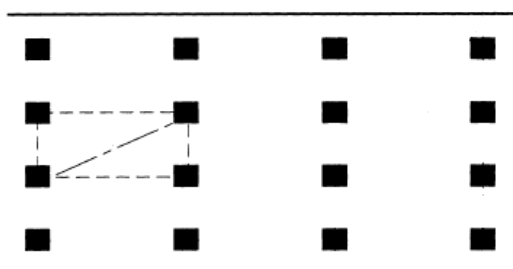
Kuormien ja kuormitusyhdistelmien laskenta automatisoitiin laskentapohjaan, esimerkiksi pysyvä kuorma laskettiin laatan paksuuden ja maakerroksen syvyyden perusteella. Laskentapohjaan tehtiin logiikka pystysuuntaisten muuttuvien kuormien ja tarvittavien kuormitusyhdistelmien automaattiseen määrittämiseen luvun 3.6 mukaan. Käyttäjän tehtäväksi jää valita laatan tulevan käyttökohteen mukainen rasitus (kevyt liikenne, tieliikenne, raitiotieliikenne, rautatieliikenne), joiden perusteella Excelliin määritettiin säännöt kuormien määritymiseen, esimerkiksi liikennekuorman LM1 interpoloinnille tehtiin automaattinen logiikka Excelliin valitun täyterroksen syvyyden perusteella.

Raitiovaunu kuorma määritettiin myös automaattisesti valittujen raiteiden lukumäärän perusteella, kuten luvussa 4.4 esitettiin.

7.3 Paalujen lukumäärä ja paaluvälit

Paaluruudun koon määrittäminen ei sisältynyt alun perin laskentapohjaan. Paaluruudulla tarkoitetaan tässä kuormitusaluetta, joka kohdistuu yhdelle paalulaatan keskiosan paalulle. Paaluruudun pinta-ala vastaa tasaisin välein sijoitetuilla paaluilla neljän lähimmän paalun rajaaman ruudun kokoa, kuva 9:

Kuva 9. Neljän lähimmän paalun rajaama alue eli paaluruutu.



Raudoitus toimii parhaiten, jos paaluruudun sivujen suhde on 1:1. Tällä perusteella paaluruudun alustavan koon voisi laskea yksinkertaisesti valitun paalun kapasiteetin (kN) ja paalulaatan paalukuorman (kN/m², NCCI 7, mitoituslata DA2 yhtälöt 6.10 a ja 6.10b [12]) perusteella. Käytännössä näin ei voi kuitenkaan tehdä, koska paalulaatan kokonaispituus ja leveys tulevat pohjarakennesuunnittelusta annettuina, minkä lisäksi paalulaatan suunnitellaan aina reunaulokkeet. Paalurivien lukumäärä molemmissa suunnissa sovitetiin siis näihin reunaehtoihin.

Paalulaatat suunnitellaan ulokkeellisiksi, jotta reunimmaisen kentän momenttia saadaan pienennettyä. Paalulaatat pyritään suunnittelemaan siten, että pysyvä kuorma jakautuu tasaisesti eri paaluille, mukaan lukien reunapaalut. Vaikka paalulaatan ja paalun liitoskohta käsitellään laskennallisesti nivelenä, ei liitos todellisuudessa ole puhdas nivel, koska paalu on upotettu laattaan. Paalulaatta on aina raskaasti maan kuormittama, joten laatan taipuminen on syytä minimoida ulokkeilla, ettei laatta taivuta vuorostaan paaluja. Ulokelaatassa myös laatan lävistyskapasiteetti on parempi verrattuna tilanteeseen, jossa paalu olisi laatan reunassa.

Optimaalinen ulokkeen pituus voisi olla esimerkiksi sellainen, että ulokkeen aiheuttama tukimomentti reunimmaisella tuella ja reunimmaisen paaluruudun kenttämomentti ovat yhtä suuret. Toisaalta optimaalinen ulokkeen pituus voisi olla sellainen, jolla kaikki tuki-

ja kenttämomentit tulevat keskenään yhtä suuriksi, jolloin raudoitus on yksinkertaista [21, s. 110]. Paalulaatat ovat aina niin pitkiä, että pidemmässä suunnassa paaluvälejä voi olettaa olevan viisi tai enemmän, jolloin rakennemallina voitiin käyttää 5-aukkoista ulokkeellista palkkia. Tällaiselle palkille ei löytynyt suoraan palkkitaulukoita, joten tutkittiin ulokkeen vaikutusta momentteihin PupaX5-staatiikkaohjelmalla. Palkin jänteiden pituudeksi valittiin 1 m, kuormitusleveudeksi 1 m ja kuormaksi 1 kN/m². Ulokkeen pituutta vaihdeltiin 0,3-0,41 m välillä. Poimittiin tuki- ja kenttämomenttien arvot taulukkoon, taulukko 7:

Taulukko 7. Ulokkeen pituuden vaikutus tuki- ja kenttämomentteihin symmetrisellä, tasan kuormitetulla 5-aukkoisella ulokepalkilla. Vaikka paalurivejä on paalulaatan pidemmässä suunnassa yleensä enemmän kuin viisi, kuvaa 5-aukkoisen palkki riittävän tarkasti laatan voimasuureita, kaksi reunimmaista tukea ja kenttää kuvaavat paalulaatan reunimmaisista osia, ja kolmas tuki ja kenttä paalulaatan kaikkia sisäosan tukia ja kenttiä. Optimaalinen ulokkeen pituus 0,325, jolla 1. tuen ja 1. kentän momentit tulevat samaksi korostettu harmaalla, samoin kuin ulokkeen pituus 0,41, jolla kaikki kenttämomentit ja kaikki tukimomentit tulevat keskenään saman suuruisiksi.

Uloke/jm	Tuki 1	Kenttä 1	Tuki 2	Kenttä 2	Tuki 3	Kenttä 3
0,3	-0,045	0,056	-0,094	0,037	-0,082	0,043
0,31	-0,048	0,054	-0,093	0,038	-0,082	0,043
0,32	-0,051	0,054	-0,092	0,038	-0,082	0,043
0,325	-0,053	0,053	-0,092	0,038	-0,082	0,043
0,33	-0,054	0,052	-0,091	0,038	-0,082	0,043
0,34	-0,058	0,051	-0,09	0,039	-0,082	0,043
0,35	-0,061	0,05	-0,089	0,039	-0,082	0,043
0,36	-0,065	0,048	-0,089	0,039	-0,083	0,042
0,37	-0,068	0,047	-0,088	0,4	-0,083	0,42
0,38	-0,072	0,046	-0,087	0,04	-0,083	0,042
0,39	-0,076	0,044	-0,086	0,041	-0,083	0,042
0,4	-0,08	0,043	-0,085	0,041	-0,083	0,042
0,41	-0,084	0,041	-0,084	0,041	-0,084	0,041

Taulukon 6 perusteella voitiin päätellä, että pidemmässä suunnassa optimaalinen ulokkeen pituus voisi olla esimerkiksi 0,325 x jännemitta. Paalulaatan pituus ja leveys ovat yleensä jo pohjarakennesuunnittelussa määrätty, joten käytännössä ulokkeen pituus vaihtelee ja sille on järkevää valita arvoksi noin 0,3-0,4 x jännemitta. Tehtiin vastaavat taulukot paalulaatan lyhyempää suuntaa varten lisäksi 1-aukkoiselle, 2-aukkoiselle, 3-aukkoiselle ja 4-aukkoiselle ulokkeelliselle palkille (liite 1), koska lyhyemmässä suunnassa paalurivejä voi olla myös vähemmän kuin viisi, ja optimaalinen ulokkeen pituus vaihtelee jonkin verran verrattuna 5-aukkoiseen palkkiin.

Laskentapohjaan tehtiin automaattinen laskenta laatan paaluvälille ja optimaaliselle ulokkeen pituudelle lyhyemmässä suunnassa (työmaaolosuhteisiin sopivasti lähimpään 5 cm pyöristettynä) paalun kapasiteetin ja geometriatietojen perusteella. Samoin laskentapohjaan määritettiin matemaattisesti sopiva paaluväli paalulaatan pidempään suuntaan huomioiden optimaalinen ulokkeen pituus DA2-mitoitusmenettelyllä. Lisäksi tutkittiin paaluruudun sivumittojen täysin automaattista laskentaa excelissä (jakojäännöksen antavan mod-funktion avulla), siis ilman että käyttäjän olisi pitänyt valita paaluruutujen lukumäärää pidemmällä sivulla, mutta tähän ei löytynyt kaikissa tilanteissa toimivaa tapaa. Pienikin pyöristys paaluruudun sivumitassa kertautuu paalulaatan pidemmässä suunnassa, kun paaluruutuja on esimerkiksi parikymmentä, jolloin vaikutus ulokkeen pituuteen vaihteli hallitsemattomasti kun paaluruudun koon määritystä yritettiin automatisoida.

Laskentapohjan lopulliseksi toiminnallisuudeksi määritettiin siis automatisoitu alustava paaluruudun ja ulokkeen pituuden laskenta, samalla kun näytettiin ulokkeen pituuden suhde jännemittaan sekä paalun käyttöaste, kuva 10. Käyttäjä voi halutessaan antaa paaluruudun mitat käsin, ja paaluruudulle löytää helposti paalun ulkomittoihin sopivat mitat arvoja muutamaaan kertaan muuttamalla. Suunnitelmissa paalun käyttöaste voisi olla esimerkiksi 80 %, jolloin laatan mitoitus on yleensä riittävä, vaikka paalutuksessa paaluja ei pystyttäisi esimerkiksi kivien vuoksi asentamaan täsmällisesti suunnitelmissa esitettyihin sijainteihin.

Paalun DA2-mitoitusmenettelyyn liittyvä, yhtälössä 6.10a vaaditun negatiivinen vaippahankauksen arvon automaattinen määrittäminen osoittautui hankalaksi, koska sen arvo on mahdollista määrittää tavalla, joka riippuu koko paalulaatan paalujen lukumäärästä, joka ei siis ole tiedossa vielä siinä kohdassa kun paaluvälejä mitoitetetaan. Päätettiin, että negatiivisen vaippahankauksen arvo yhdelle paalulle syötetään Exceliin vain suunnittelijan arvioimana arvona. Laskentapohjaan sisällytettiin uusi välilehti negatiivisen vaippahankauksen arvon laskentaan (*Paalutusohje-2016*:n mukainen menettely, johon liittyvät kaavat on esitelty luvussa 3.1). Paalulaatan laskennasta saatuja tietoja (pituus, leveys, paalujen lukumäärä) käytettiin suoraan negatiivisen vaippahankauksen arvon laskennassa. Lopputuloksena arvioitua negatiivisen vaippahankauksen arvoa tulee muuttaa käsin paalulaatan laskentapohjassa, kunnes se on sama kuin *Paalutusohje-2016* mukaan laskettu negatiivisen vaippahankauksen arvo.

Paaluruudun sivumittojen määrittäminen laskentapohjassa, kuva 10:

Kuormitusyhdistelmät, paaluruudun määrittäminen					
	DA2: 6.10a		Tieliikenne DA2: 6.10b		
Paalun kapasiteetti -> paaluvälit					
Maan oma paino [kN/m ²]	1,35	81	1,15	69	
Laatan oma paino [kN/m ²]	1,35	10,125	1,15	8,625	
Kevyen liikenteen hyötykuorma [kN/m ²]	0	0	1,5	0	
Pystysuora liikennekuorma LM 1 (kPa = kN/m ²)	0	0	1,35	40,5	
		0		0	
Kuorma yhteensä [kN/m²]		91,125		118,125	
Kuorma yhteensä pitkällä sivulla (kN/m) (=Kuorma yhteensä x laatan leveys B)		249,3842		323,2759	
Neg. Vaippahankaus [kN/paalu]	1,35	13,5	0	0	
Paalun kapasiteetti		698		698	
Paalun kapasiteetti - osav.kerros*vaippahankaus		684,5			
Paalun kapasiteetti (vaippahankaus huomioitu)		684,5		698	
	y [m]	2,737		2,737	Reunimmainen tukimomentti ja reunimmainen kenttä
	e [m]	0,895		0,895	
	y [m]	2,733333		2,733333	paaluruudun pituus lyhyemmällä sivulla, ulokkeen pituus
	e _y [m]	0,9		0,9	Ulokkeen pituus lyhyemmässä suunnassa, arvo pyöristetty
		32,9 %		32,9 %	ulokkeen pituuden suhde jänneväliin valituilla arvoilla
	y käsin	2,7		2,75	voi antaa y:lle käsin toisen arvon
	e _y [m]	0,95		0,875	ulokkeen pituus, jos "y käsin" annettu
		35,2 %		31,8 %	ulokkeen pituuden suhde jänneväliin valituilla käsi arvoilla
	x teor [m]	2,782		2,149	Kuorma yhteensä lyhyellä sivulla yhdelle paalulle = kuorma
	x käsin	2,5		1,9	voi antaa x:lle käsin toisen arvon
	lkm jänteet	11		15	lkm jänteet/pitkä sivu
	e _x [m]	1,25		0,75	
	%	44,9 %		34,9 %	
	KA paalu	91,1 %		87,9 %	

Kuva 10. Paaluruudun sivumittojen määrittäminen laskentapohjassa. DA2-menettelyn mukaiset kuormat ja kertoimet tulevat laskentapohjaan automaattisesti lähtötietojen perusteella. Yhtälö 6.10a pätee kaikille kuormitustilanteille, mutta yhtälön 6.10b kuormat ja kertoimet muuttuvat laskentapohjaan dynaamisesti lähtötiedoissa valitun kuormitustavan perusteella (kevyt liikenne, tieliikenne, raitiotieliikenne, rautatieliikenne). Käytännössä kevyen liikenteen alueella DA 6.10a on tyypillisesti määräävä ja tieliikenteen alueella useimmiten 6.10b on määräävä. Käyttäjä voi muuttaa keltaisella merkittyjä rivejä.

Vinopaalujen mitoitus ei sisällytetty laskentapohjaan. Vinopaalujen osalta lienee helpointa mitoittaa ensin rakenne paalujen ja laatan osalta kokonaan pystykuormien osalta. Jos maan vakavuus ei täytä luvussa 4.1 läpikäytyjä kriteereitä, pitää vaakavoimien suuruus laskea ja mitoittaa vinopaalut. Kun tiedetään paalurivien lukumäärä laatan molemmissa suunnissa, voi jarruvoiman jakaa ajoradan keskialueen vinopaaluille ja keskipakovoiman tien luiskaan sijoitettaville vinopaaluille. Vinopaalujen kaltevuuden voi laskea luvun 4.1 yhtälön (5) perusteella.

8 Paalulaattojen mitoitus laskentapohjassa: taivutusmomentti

8.1 Ekvivalenttien kehien menetelmä

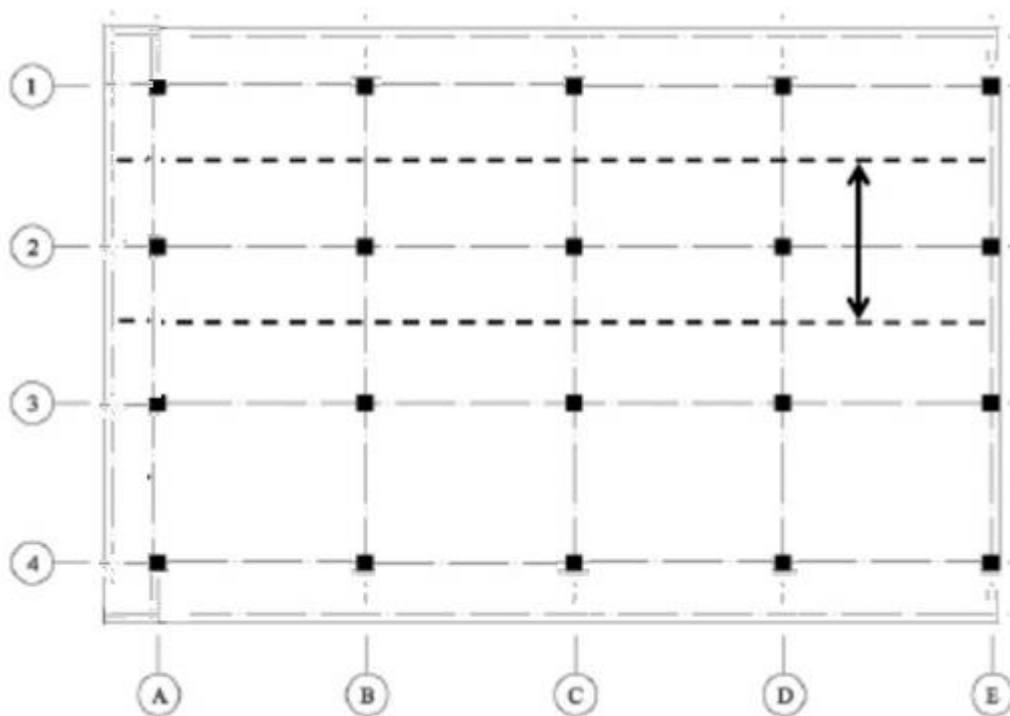
Raudoituksen mitoitusta varten piti määrittää paalulaatan taivutusmomentti murto- ja käyttörajatilassa. Pilarilaatoille voimasuureiden määrittämiseen suositellaan eurokoodin opastavassa ohjeessa FEM-analyysin lisäksi myötöviiviateoriaa, kaistamenetelmää tai ekvivalenttien kehien menetelmää [22, liite I]. FEM-analyysi tehdään tietokoneilla, muiden menetelmien käytön avuksi on kirjallisuudessa esitetty niihin liittyviä kaavoja ja taulukkoarvoja eri tuentatapauksille. Jotta taivutusmomentin voisi määrittää FEM-analyysillä, pitäisi paalulaatalla olla jo valittuna joku rakenne, mitä ei tässä vaiheessa kuitenkaan ollut vielä tehty. Toisaalta muista eurokoodin listaamista mitoitusmenetelmistä ei löytynyt kirjallisuudesta suoraan mitään sopivaa taulukkomenetelmää ulokkeellisen pilarilaatan voimasuureiden määrittämiseen.

Tilajayrityksen paalulaatan mitoituksen Excel-laskentapohja sisälsi jo taivutusmomentin laskennan, mutta momentit eivät määrittäneet siinä automaattisesti täysin oikein, laskentapohja ei huomionnut esimerkiksi ulokkeen vaikutusta momentteihin. Siten momentit olivat turhankin varmalla puolella alustavassa rakenteen ja raudoituksen valinnassa ennen perusteellisempaa FEM-analyysiä. Tutkittiin, onko mahdollista määrittää ulokkeellisen paalulaatan taivutusmomentti tarkemmin Excelissä, jotta laatan rakenne ja rauditus voitaisiin valita optimaalisemmin.

Eri käsinlaskumenetelmistä ekvivalenttien kehien menetelmä EFM (*Equivalent Frame Method*) vaikutti lupaavimmalta. Eri kirjallisuuslähteiden perusteella menetelmän pitäisi soveltua monenlaisten rakenteiden analysointiin, eikä esimerkiksi paaluruudun sivusuhtetta tai paaluruutujen lukumäärää ole rajoitettu [23, luku 3.7]. Eurokoodissa SFS-EN 1992-1-1 annetaan jonkin verran tarkennuksia ekvivalenttien kehien menetelmän käyttöön pilarilaatoille. Ilmiöihin keskittyvä eurokoodi ei sisällä tässäkään aihepiirissä tarkkoja ohjeita mitoitusmenetelmän käytön osalta. Englanninkielisissä kirjallisuudessa EFM-menetelmään liittyen löytyy paljon esimerkkejä, joissa viitataan pääasiassa pohjoisamerikkalaiseen ACI 318-suunnitteluohjeeseen, italialaiseen suunnitteluohjeeseen IS456 tai British Standardiin BS 8110, jota käytettiin Britanniassa vuoteen 2010 kunnes se korvattiin Eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 standardilla. Näissä kaikissa standardeissa esitetään omanlaisensa yksinkertaistettu taulukkomenetelmä pilarilaatan

voimasuureiden määritykseen. Yksinkertaistettuihin menetelmiin liittyy kuitenkin rajoitteita, joiden vuoksi ne eivät sovellu paalulaatoille. Esimerkiksi hyötykuorma on rajoitettu arvoon joka liikennekuormalla LM1 aina ylittyisi, ulokkeen vaikutuksen huomioimiseen ei ole tapaa ja paalurivejä on laatan molemmilla sivuilla oltava vähintään neljä. Varsinaisessa ekvivalenttien kehien menetelmässä näitä rajoitteita ei pitäisi olla. British Standard BS 8110 ja siihen liittyvät oppikirjat esimerkiksi [24, s. 89] sisältävät yksityiskohtaisempia ohjeita laattojen voimasuureiden laskentaan ekvivalenttien kehien menetelmällä. Ohjeet ovat lähtökohdiltaan ristiriidattomia eurokoodin suositusten kanssa, koska eurokoodien betonilaattoja koskevat suunnitteluohjeet perustuvat pitkälti BS 8110:aan [25].

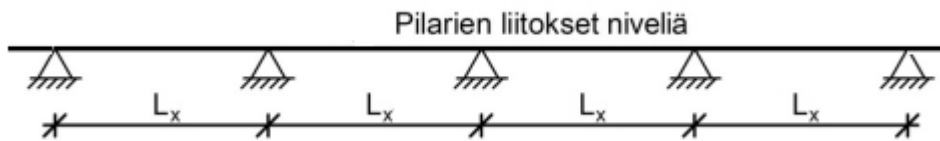
Ekvivalenttien kehien menetelmässä pilarilaatta jaetaan erikseen pituus- ja poikkisuunnassa yhden paalurivin muodostamiin kehiin. Rakennemallissa laatta katkaistaan tarkasteltavan paalurivin sekä sen viereisten paalurivien keskikohdasta, kuva 11:



Kuva 11. Esimerkki EFM-menetelmästä. Pilarilaattaa tarkastellaan erikseen pituus- ja poikkisuunnassa yhden paalurivin muodostamana kehänä. Tasaisesti kuormitetulla paalulaa-talla riittää tarkastella kehää laatan keskiosassa, koska kuormitus täällä on suurempi kuin reuna-alueella.

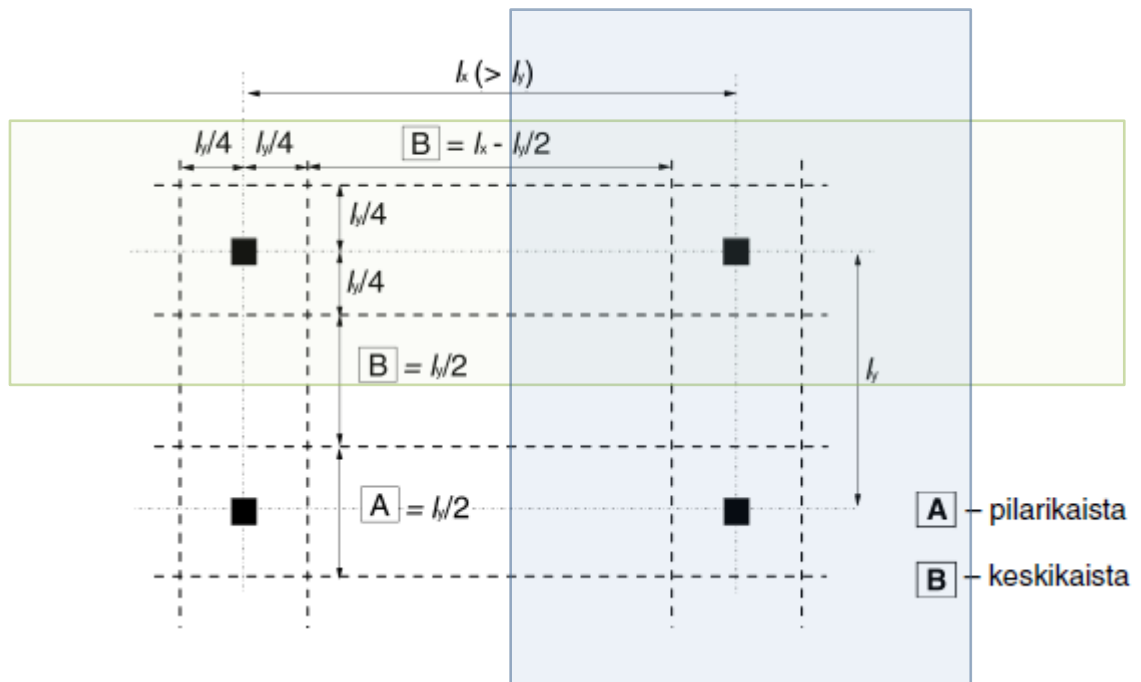
Laattaosan ja pilarin jäykkyys, sekä laattaosaan mahdollisesti liittyvien sieni- tai palkiosien jäykkyys huomioidaan voimasuureiden jakautumisessa. Tasapaksulla

tasarivisellä paalulaatalla rakennemalli yksinkertaistuu vapaasti tuetuksi 2-5-aukkoiseksi ulokepalkiksi, kuva 12:



Kuva 12. Paalulaatan rakennemallina voidaan käyttää ulokepalkkia, kun tarkastellaan paalulaatan pituus- tai poikkisuunnassa ekvivalenttien kehien menetelmällä.

Pilarin jäykkyyttä ei tässä työssä paalulaatoilla huomioida, koska paalu ja laatta ovat toisissaan kiinni nivelellisesti. Kehätarkastelun tuki- ja kenttämomentit lasketaan ensin vastaavasti kuin palkeille, ja jaetaan ne sitten niin sanotuille pilari- ja keskikaistoille, kuva 13:



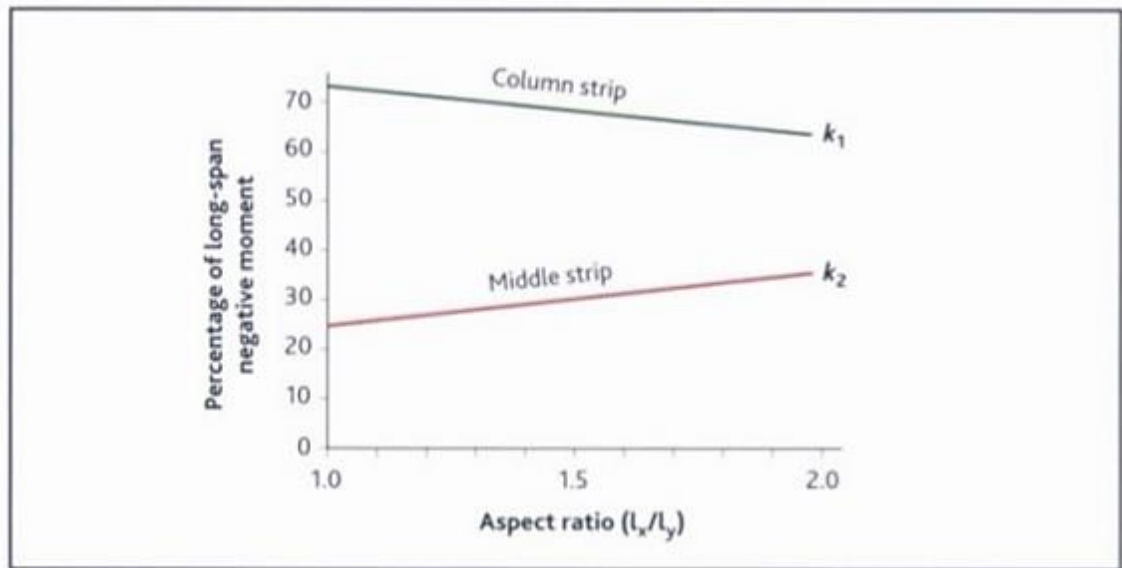
Kuva 13. Laattakentän jako pilari- ja keskikaistoihin. Laskentapohjassa x-suunta vastaa paalulaatan pidempää mitta (L), ja y-suunta laatan leveyttä (B). Kun paalulaatasta otetaan yhden paalurivin ekvivalentti kehä pituussuunnassa, pilarikaistan leveys A on $l_y/2$ ($= 2 \cdot l_y / 4$), eli puolet paaluruudun lyhyemmästä mitasta. (Katkkelma pituussuuntaisesta kehästä lisätty kuvaan vihreällä taustalla). Yhden paalurivin ekvivalentilla kehällä leveyssuunnassa pilarikaistan leveys A on täsmälleen sama. (Katkkelma leveyssuuntaisesta kehästä lisätty kuvaan sinisellä taustalla). Keskikaistan leveys B molemmissa suunnissa on paalujen etäisyys kohtisuorassa suunnassa, josta on vähennetty pilari-kaistan leveys. Kuva muokattu EN-1992-1-1 liitteen I kuvasta I.1 [22.].

Kimoteorian mukaisessa analyysissä negatiiviset momentit keskittyvät pilarien välisille tukilinjoille, joten ulokepalkille laskettuja momentteja painotetaan eri prosentiosuuksilla eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 taulukon I.1 mukaan, kun (tuen tai kentän) momentti jaetaan tarkasteltavassa suunnassa pilari- ja keskikaistalle. Painotuksen jälkeen saatu momentti jaetaan vielä kaistan leveydellä (pilari- tai keskikaista) tarkasteltavassa suunnassa. Lopputuloksena saadaan raudoitukselle mitoittava momentti yksikössä kNm/m. Kyseisessä eurokoodin taulukossa I.1 momenttien jaolle sallitaan erilaisia painotuksia (esim. tuella negatiivinen momentti voidaan jakaa pilarikaistalle osuudella 60...80 % ja keskikaistalle osuudella 40...20 %, siten että momenttien summa on aina 100 %). Vertailun vuoksi BS 8110 -standardissa momenttien jakamiselle on annettu yksiselitteiset lukuarvot, taulukko 8:

Taulukko 8. Tuen ja kentän taivutusmomenttien jakaminen eri kaistoille BS 8110:n mukaan (vapaasti suomennettu). [23 s. 50.]

Mitoittava momentti	Momentin jakosuhte pilari- ja keskikaistoille, ilmaistuna prosentteina mitoittavasta negatiivisesta tai positiivisesta kokonaismomentista	
	Pilarikaista %	Keskikaista %
Negatiivinen	75	25
Positiivinen	55	45

Laskentapohjassa tuntui sopivimmalta käyttää julkaisun [26, s24.] mukaisia jakosuhteita. Tässä ohjeessa positiiviset kenttämomentit jaetaan samoin kuin BS 8110 -standardissa, negatiivisten tukimomenttien jakaminen pilarikaistalle ja keskikaistalle riippuu paaluruudun sivusuhteesta, kuva 14:



Kuva 14. Negatiivisen tukimomentin jakaminen pilarikaistalle/keskikaistalle paaluruudun sivusuhteiden perusteella. Kuva lähteestä [26, s. 24.].

8.2 Esimerkki ekvivalenttien kehien menetelmän käytöstä

8.2.1 Taivustusmomentin laskenta

Testattiin ekvivalenttien kehien menetelmää kuvitteelliselle tiepaalulaatalle, jonka paaluruudun sivumittojen suhde oli 1:1. Tarkasteltiin yhtä keskikehää pituussuunnassa. Laskentapohjassa paaluruudut valittiin tarkoituksellisesti siten että ulokkeen pituudet olivat millilleen tasapainotetut (0,41 x jännemitta) pidemmässä suunnassa, ja tasainen kuorma (oma paino, maan paino ja liikennekuorma) olivat paalulaatalle tyypilliset. (Oma paino koostui 0,3 m paksusta betonilaatasta, maan syvyydeksi valittiin 3 m jolloin liikennekuorma LM1 oli 30 kN/m²). Yksittäisen paaluruudun sivut olivat 2,35x2,35 m². Paaluruutujen lukumäärä pidemmällä sivulla oli 12 kappaletta ja lyhyemmässä suunnassa 4 kappaletta. Momentit tuilla ja kentässä laskettiin suoraviivaisesti taulukon 6 kertoimien avulla, vastaavasti kuin niin sanotuilla statiikan oppikirjojen palkkitaulukoilla tehtäisiin esimerkiksi 5-aukkoiselle palkille kaavalla:

$$M = k \cdot p_d \cdot l^2, \quad (10)$$

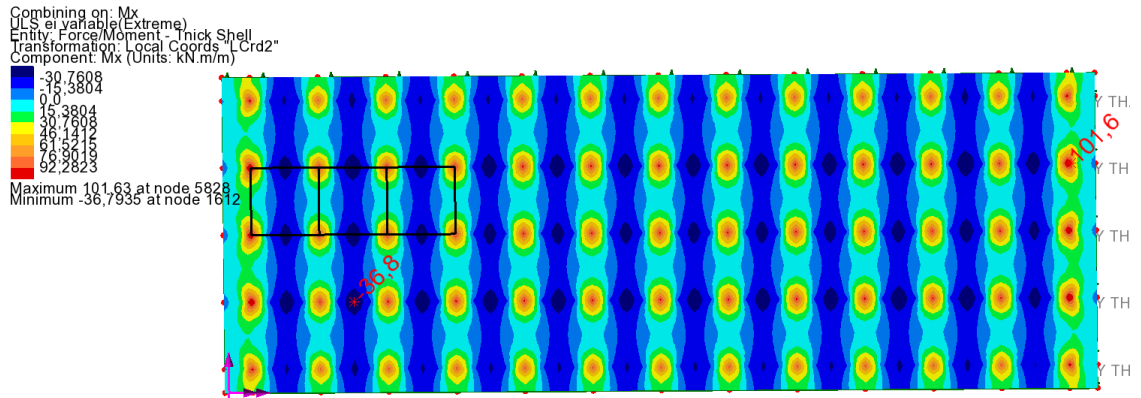
jossa k on kerroin taulukosta 6, p_d on tasainen kuorma pituussuunnassa (kN/m) kun on huomioitu kuormitusalueen leveys ja l on paaluruudun sivun pituus tutkittavassa

suunnassa. Kertoimen k määrittämistä varten laskentapohjassa laskettiin ulokkeen pituuden suhde paaluruudun pituuteen tarkasteltavassa suunnassa, jonka jälkeen vastaava kerroin k haettiin taulukon 6 arvoista Excelin index- ja match-funktioiden avulla. Näin saadut momentit (kNm) jaettiin kentässä keski- ja pilarikaistalle suhteessa 45/55 sekä tuella suhteessa 25/75 (kuvan 15 mukaisesti). Momentit jaettiin vielä kyseessä olevan kaistan leveydellä. (Pidemmässä suunnassa pilarikaistan samoin kuin sitä reunustavien kenttäkaistojen yhteenlaskettu leveys on $l_y/2$ sekä tuella että kentässä, kuten edellä kuvassa 14.)

Kirjallisuuslähteiden perusteella murtorajatilatarkastelussa EFM-menetelmässä pitää **momentteja tasapainottaa** (negatiivisia tukimomentteja pienennetään ja kenttämomenteja kasvatetaan), kun rakenne on kahteen suuntaan kantava (paaluruudun sivumittojen suhde $< 2:1$). Kertoimien arvo tasapainotukselle vaihtelee hieman eri lähteissä, BS 8110:ssa suositellaan käyttämään arvoa 20 %. Eurokoodi SFS-EN 1992-1-1 antaa laatan momenttien uudelleenjakautumiselle laskukaavan [22, kaava 5.10a.], jossa luokan A raudoitukselle uudelleen jakautuneen momentin suhde kimmoteorian mukaiseen momenttiin pitää olla vähintään 0,8. Toisaalta kansallisessa ohjeessa NCCI 2 suurin sallittu poikkeama kimmoteorian mukaisista taivutusmomenteista on 15 % murtorajatilassa, käyttörajatilassa momentin siirto ei ole sallittu [13, s. 36.]. Momentteja ei kuitenkaan uudelleenjaeta, kun tuen tai kentän vieressä on uloke [23.]. Yksinkertaisuuden vuoksi päätettiin laskettuja momentteja pienentää kaikilla tuilla paitsi reunatuella 15 %. Vastaavasti päätettiin kasvattaa kaikkia kenttämomenteja 15 % lukuun ottamatta reunimmaista kenttää, jolla kenttämomenttia päätettiin kasvattaa 5 %, jotta koko rakenteen taivutusmomentin verhoikäyrä laskisi suurin piirtein tasapainoisesti alaspäin.

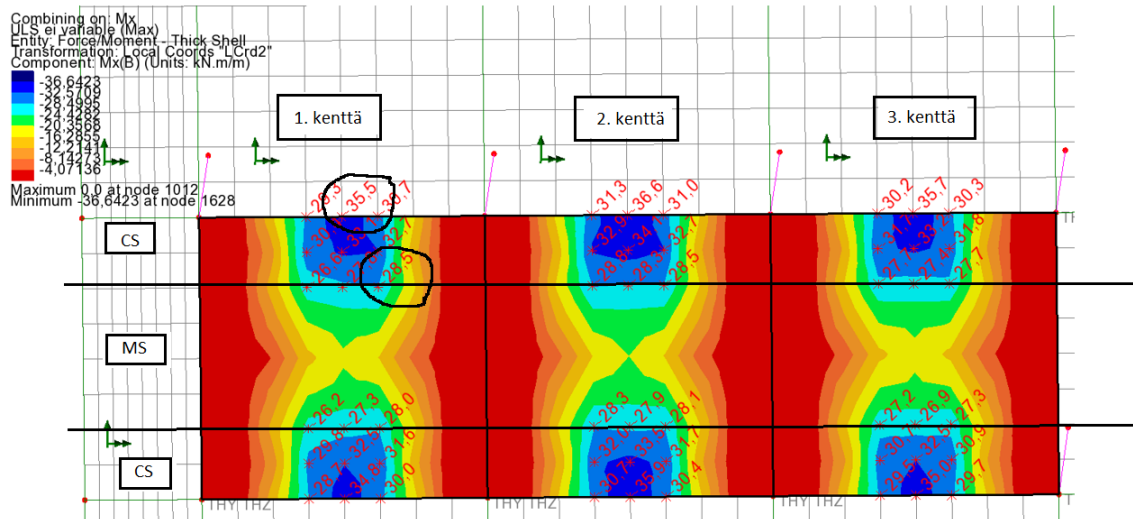
8.2.2 FEM-malli vastaavasta rakenteesta

Mallinnettiin sama rakenne FEM:illä. Mallinnukseen käytettiin silloille soveltuvaa Lusas 15.2 -ohjelmistoa, kuva 15:



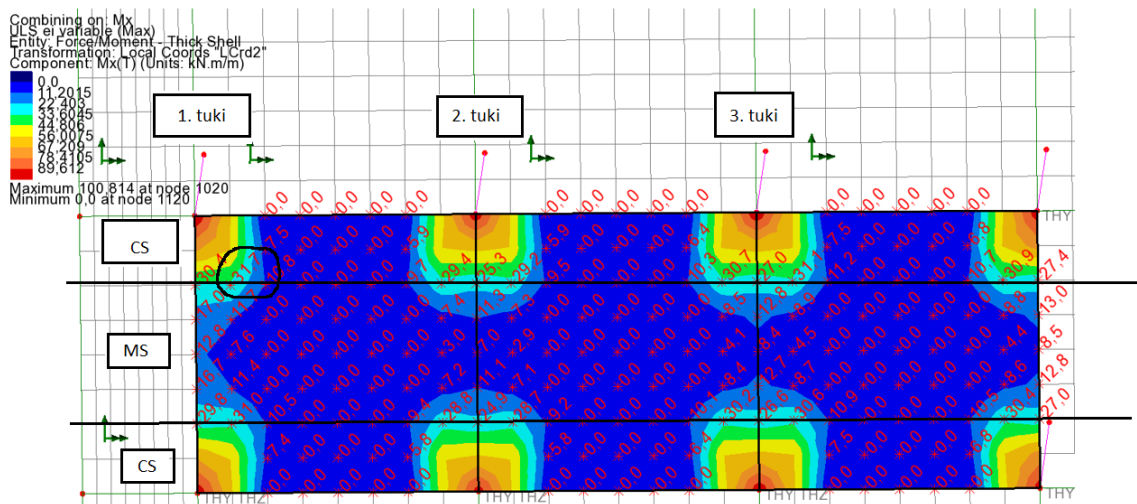
Kuva 15. FEM-malli tutkitusta rakenteesta. Kuvassa punaiset ympyrät kuvaavat negatiivisia momenteja paalujen kohdalla, ja siniset positiivisia momenteja laatan taipuessa alaspäin paaluruutujen kohdalla (ohjelmiston etumerkkien esitystapa on eri kuin Suomessa yleensä käytetty). Ulokkeen pituus pidemmässä suunnassa on $0,41 \times$ jännemitta. Paaluiksi valittiin neliön muotoinen betonipaalu, sivumitta 250 mm, upotussyvyys 50 mm betonilaattaan. Laatan betoni oli C30/37. Kuten 5-aukkoisen ulokepalkin kertoimien perusteella oli oletettukin, vaakasuunnassa tarkasteltuna kaikkien paalujen kohdalla momentit ovat samat ja kaikkien kenttien momentit ovat samat. 5-aukkoisen ulokepalkin käyttäminen rakennemallina paalulaatalle on kuvan perusteella sopivaa. Tulokset poimittiin kolmesta kuvassa korostetusta paaluruudusta.

Kolmen ensimmäisen tuen ja kentän pilari- ja kaistamomentit poimittiin yllä olevan kuvan korostetuista paaluruuduista. Momenttien lukeminen FEM-mallista vaatii tulkintaa. Elementtityyppi laatassa oli "thick shell", ja tutkitavan paaluruudun elementtiverkko ("mesh") jaettiin molemmissa suunnissa kahdeksaan osaan, jotta kaistajaon mukaiset ($l_x/4$) alueet oli helppo nähdä analysistä. Taivutusmomentti kentässä määritettiin laatan alapinnasta (Lusas-ohjelman merkinnöillä alapinta "B"), keskikaistan ja pilarikaistan taivutusmomentiksi poimittiin eurokoodin mukaisen kaistajaon sisälle jäävät maksimiarvot kuva 16:



Kuva 16. Kolmen ensimmäisen kentän taivutusmomentit (kNm/m) FEM-analysistä. Keskikaistan (MS) momentiksi poimittiin suurin arvo paaluruudun vastaavalta kaistalta, kuvassa ympyröity esimerkkinä 1. kentän arvo 28,5 kNm/m. Kenttien 2. ja 3. arvot poimittiin vastaavasti. Pilarikaistan momentiksi (CS) poimittiin vastaavasti jokaisen paaluruudun suurin arvo, kuvassa ympyröity esimerkkinä 1. kentän arvo 35,5 kNm/m.

Tuen taivutusmomentti määritettiin laatan yläpinnasta (Lusas-ohjelmiston merkinnöillä yläpinta ”T”). Tuen keskikaistan momentiksi poimittiin maksimiarvo eurokoodin mukaisen kaistajaon sisältä (etäisyydeltä $l_x/4$ tuelta), kuva 17:



Kuva 17. Kolmen ensimmäisen tuen taivutusmomentit (kNm/m) FEM-analysistä keskikaistalla (MS). Kuvassa ympyröity esimerkkinä 1. tuen arvo 31,7 kNm/m. Tukien 2. ja 3. arvot poimittiin vastaavasti.

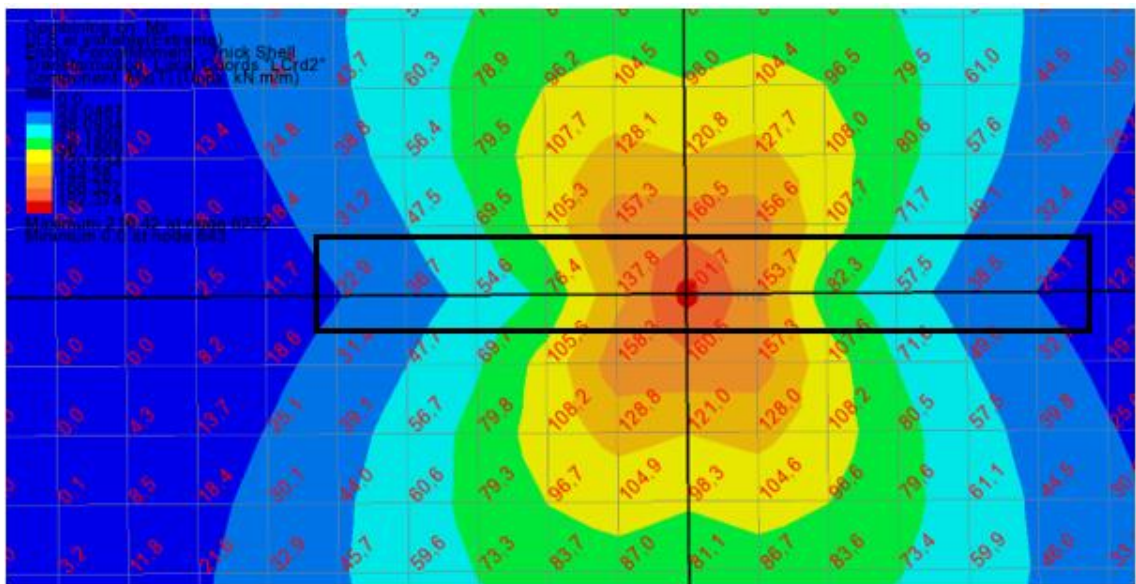
Tuella pilarikaistan (CS) momentti vaihtelee jyrkästi, saavuttaen elementtiverkon solmu- kohdassa paalun kohdalla käytännössä äärettömän suuren arvon jos verkkoa

tihennetään tarpeeksi. Vaikka paalu on mallinnettu betonipilarina, on se FEM-rakenteena kuitenkin sauvaelementti, mistä johtuen momentti nousee epärealistisen paljon sauva- ja laattaelementin solmupisteessä. Ilmiöstä johtuen Eurokoodin kansallisen tulokintaohjeen NCCI 2 mukaan tasapaksulla paalulaatalla laattarakenteen FEM-analyyseistä määritetty **pilarikaistan tukimomentti tasataan** keskimääräiselle leveydelle b , joka on murtorajatilassa:

$$b_{uls} = D + 2d, \quad (11)$$

jossa D on tuen sivumitta/halkaisija ja d on tehollinen korkeus pituussuunnassa tuella [13, s. 51.].

Analysoitavassa paalulaatassa teholliseksi korkeudeksi arvioitiin yläpinnan raudoitukselle 192 mm (kun huomioitiin laatan paksuus 300 mm, yläpinnan nimellinen suojabetonietäisyys $c_{nom} = 50$ mm, paalun upotussyvyys 50 mm ja puolet arvioidun pitkittäissuuntaisen raudoituksen poikkileikkauksesta 16 mm), joten keskimääräiseksi leveydeksi b_{uls} saatiin tällä perusteella 640 mm. NCCI 2 antaa tarkempia ehtoja esimerkiksi elementtiverkon tiheyteen liittyen. NCCI 2:n reunaehdot huomioiden tutkittavan tuen lähellä elementtiverkko jaettiin noin 64 mm ruutukokoon. Keskimääräisen taivutusmomentin määrittämiseksi laskettiin yläpinnan momenteille keskiarvo paalujen keskilinjalla leveydellä b_{uls} tutkittavassa suunnassa, kuva 18:



Kuva 18. Momentin tasauksessa käytetty näkymä 2. tuen lähellä, paalun kohdalla momenttipinnan väri on punainen. Paalun solmupisteen kohdalla momentin arvo on huomattavan

korkea. Mesh-ruudukko on NCCI 2:n mukainen, noin 64 mm leveä. Laskettiin Pilarikaistan (CS) taivutusmomenteista keskiarvo (kNm/m) paalua ympäröivästä b_{uls} -sivumittaisesta alueesta.

8.2.3 Laskettujen ja mallinnettujen taivutusmomentin arvojen vertailu

Excelissä EFM-menetelmällä laskettuja tuloksia verrattiin FEM-mallista tulkittuihin tuloksiin, joita pidettiin tässä tapauksessa ”tarkkoina” arvoina. Tulokset täsmäsivät yllättävän hyvin toisiinsa, taulukko 9:

Taulukko 9. Ekvivalenttien kehien menetelmällä lasketut momentit (kNm/m) kolmelle reunimmaiselle paaluruudulle. Valitun rakenteen mitat olivat: pituus $L =$, leveys $B =$, tasainen kuorma yhteensä $p_{dA} =$, paaluruudun koko 2,35 m x 2,35 m, ulokkeiden pituudet 0,41 x jännemitta. Taulukossa esitetään laskettu kokonaismomentti kentässä tai tuella, ja tämän momentin osuus keskikaistalla ja pilarikaistalla jaon jälkeen. Toisessa ja kolmannessa paaluruudussa negatiivisia momentteja on pienennetty 15 % ja positiivisia momentteja on korotettu 15 % kaistajaon yhteydessä.

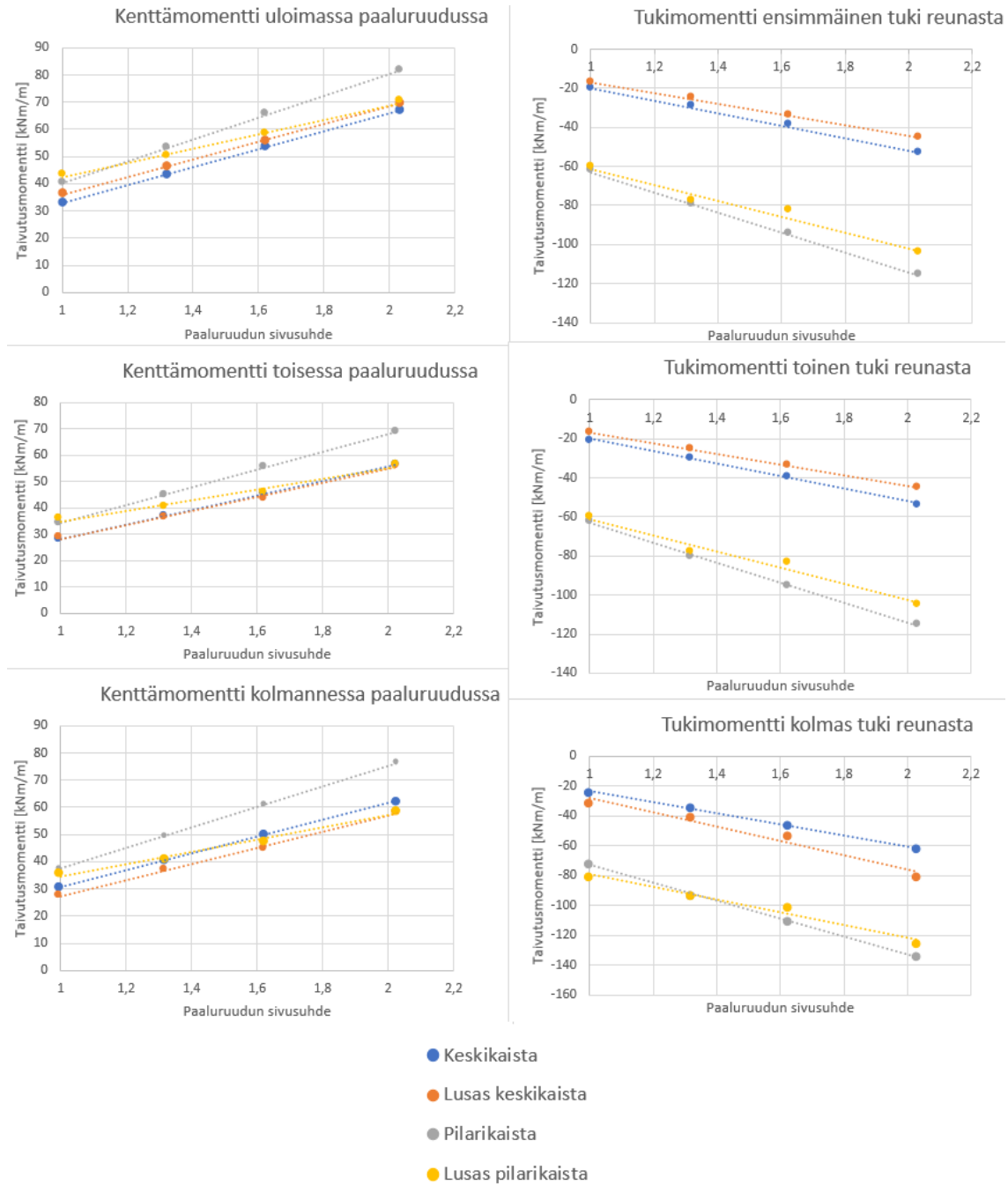
MRT							
Pidempi suunta							
Positiiviset momentit [kNm/m] (kenttämomentti)				Negatiiviset momentit [kNm/m] (tukimomentti)			
	Keskikaista		Pilarikaista		Keskikaista		Pilarikaista
1. paaluruutu	56,55	25,45	31,10	1. tuki reunasta	-115,86	-28,96	-86,89
2. paaluruutu	56,55	29,26	35,77	2. tuki reunasta	-115,86	-24,62	-73,86
3. paaluruutu	56,55	29,26	35,77	3. tuki reunasta	-115,86	-24,62	-73,86
Lusas tulokset vastaavista kohdista							
1. paaluruutu		28,5	35,5	1. tuki reunasta		-31,7	-84,2
2. paaluruutu		28,8	36,6	2. tuki reunasta		-29,2	-80,6
3. paaluruutu		27,7	35,7	3. tuki reunasta		-31,1	-82,7

Selvä asia on, että tuloksiin tulisi erilaiset arvot, jos kaistojen jakosuhteet valittaisiin toisin Eurokoodin sallimissa rajoissa. Ekvivalenttien kehien menetelmä vaikutti kuitenkin periaatteellisesti toimivalta, kun momentit laskettiin edellä kuvatulla tavalla.

8.3 Kahteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti murtorajatilassa

Tutkittiin ekvivalenttien kehien menetelmää järjestelmällisemmin eri kokoisille paaluruuduille murtorajatilassa. Kuormitus ja paalut pidettiin samana kuin edellä, sivusuhdetta vaihdettiin arvoilla 2,35 x 2,35 m², 2,7 x 2,05 m², 3 x 1,85 m² ja 3,35 x 1,65 m², paaluruutujen lukumäärä pidemmällä sivulla oli kaikissa tapauksissa 12 kappaletta ja lyhyemmässä suunnassa 4 kappaletta. Pidemmässä suunnassa jännemitan suhde paaluruudun jänteeseen oli kaikissa tapauksissa noin 0,35. Laskettiin laskentapohjalla murtorajatilan momentit pilari- ja keskikaistalle kolmella ensimmäisellä tuella ja kentällä paalulaatan ulkoreunasta päin. Kentän momentit jaettiin keski- ja pilarikaistoille kuten edellä.

Verrattiin tuloksia vastaaviin FEM-analyysistä tulkittuihin ”tarkkoihin” arvoihin. Kentässä mesh-verkko jaettiin lyhyemmän paaluruudun sivun kohdalla edelleen 8 osaan. Pidemmän paaluruudun kohdalla mesh-verkon jako valittiin niin, että mesh-verkon muoto pysyi suurin piirtein neliönä (esimerkiksi $2,7 \times 2,05 \text{ m}^2$ verkko jaettiin pidemmällä paaluruudun sivulla 11 osaan). Poimittiin FEM-tuloksista taivutusmomentin arvot kentän pilari- ja keskikaistoille sekä tuen keskikaistalle vastaavasti kuin edellä. Tuen pilarikaistan taivutusmomentin määritettiin keskimääräiselle leveydelle b_{uls} vastaavasti kuin edellä (yhden mesh-ruudun kooksi elementtiverkossa valittiin noin 64 mm). Laskettujen ja FEM-analyysistä tulkittujen arvojen vertailu kuvassa 19:



Kuva 19. Murtorajatilan momentit (kNm/m) kentissä ja tuilla ekvivalenttien kehien mukaisiin kais-toihin jaettuna. Samoissa kuvissa lasketut arvot ("Keskikaista" ja "Pilarikaista") sekä FEM-analyysillä saadut vastaavat arvot ("Lusas keskikaista" ja "Lusas pilarikaista").

Tulosten perusteella laskentapohjalla lasketut sopivat kohtuullisen hyvin yhteen FEM-analyysistä saatuihin arvoihin. Suurin ero kuvaajissa on pilarikaistan momenteissa kentässä, toisaalta kentän momenteja on tasattu korotuksella 15 % ja kentän pilarikaistan painotus suhteessa keskikaistaan on 55/45, joten arvo on ymmärrettävästi suurehko.

8.4 Kahteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti käyttörajatilassa

Vertailun vuoksi sama järjestelmällinen vertailu toistettiin käyttörajatilassa samoille rakenteille ja paaluruutujen sivusuhteille paalulaatan pidemmässä suunnassa. Momenttien laskennassa ja FEM-analyysin tulosten tulkinnassa erona murtorajatilaan oli ohjeen NCCI 2 perusteella [13, s. 36 ja s. 51]:

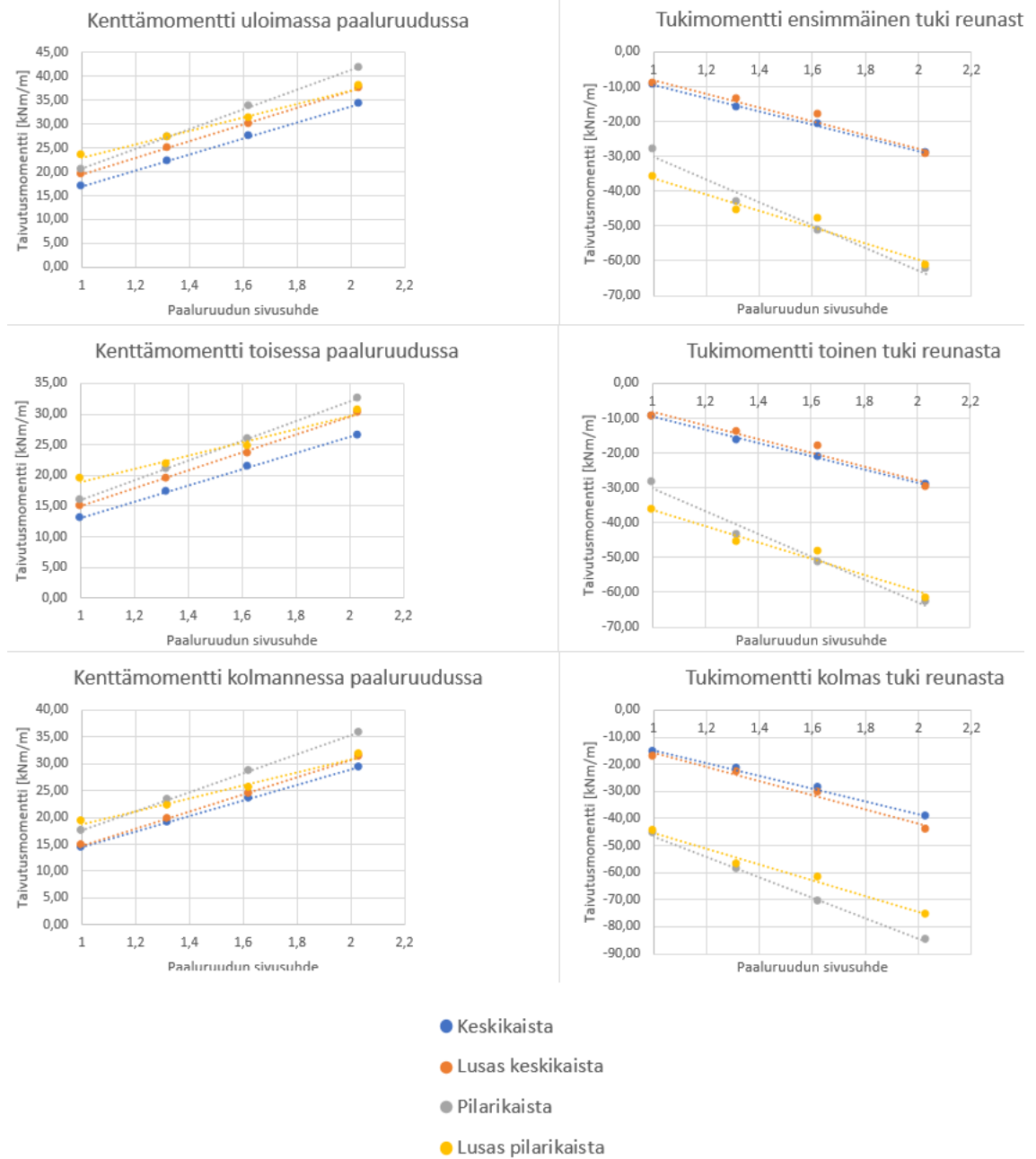
- Tukimomenteja ei uudelleenjaettu. Laskentapohjassa ei siis pienennetty tai kasvatettu ekvivalenttien kehien menetelmällä laskettuja momenteja mitenkään käyttörajatilassa.
- Paaluruudun sivusuhteen ollessa alle 1,5:1 FEM-analyysin tukimomentin arvo pilarikaistalla otaksuttiin keskimääräiseksi leveydelle b_{sls} NCCI 2 ohjeen mukaan:

$$b_{sls} = D + d \cdot 1,6,$$

joka tutkittavalla rakenteella on $b_{sls} = 250\text{mm} + 192\text{ mm} \cdot 1,6 = 557\text{ mm}$.

Tällöin elementtiverkko (mesh) jaettiin NCCI2:n mukaisesti noin $d/3$ -kokoisiin ruutuihin, ja tukimomentin arvo laskettiin keskiarvona tämän kokoisen alueen solmujen arvoista vastaavasti kuin MRT-tarkastelussa edellä.

Tarkasteltavia käyttörajatiloja on paalulaatoille kolme erilaista. Tutkittiin näistä momenteiltaan pienintä, eli pitkäaikaistarkastelua KRT_1c. Sen kuormien arvot poikkeavat eniten murtorajatilan kuormista, joten samalla nähtiin, onko kuorman pienemisellä vaikutusta ekvivalenttien kehien menetelmän antamiin arvoihin. Kuvaajat kuvassa 20:



Kuva 20. Käyttörajan pitkäaikaistarkastelun 1c momentit (kNm/m) kentissä ja tuilla ekvivalenttien kehien mukaisiin kaistoihin jaettuna. Samoissa kuvissa lasketut arvot ("Keskikaista" ja "Pilarikaista") sekä FEM-analyysillä saadut vastaavat arvot ("Lusas keskikaista" ja "Lusas pilarikaista")

Kuvaajien perusteella käyttörajan momentit sopivat oikein hyvin yhteen FEM-analyysistä tulkituihin arvoihin. Kenttämomenteissa voi näyttää olevan enemmän eroja, mutta suhteellinen ero jää enimmilläänkin noin 10-12 %:iin. Jakosuhteena kenttämomenteille

käytettiin samaa kuin murtorajatilassa (keskikaista:pilarikaista = 0,45:0,55). Eurokoodin rajoissa jakosuhdetta saa muuttaa melko laajasti. Kokeiltiin myös jakosuhteen muuttamista arvoon 50:50. Tällöin kentän keskikaistan laskettu momentti tuli kaikissa kentissä suuremmaksi kuin FEM-analyysistä saatu arvo, mutta erot eivät olleet kovin suuria joten päätettiin säilyttää alkuperäinen jakosuhte.

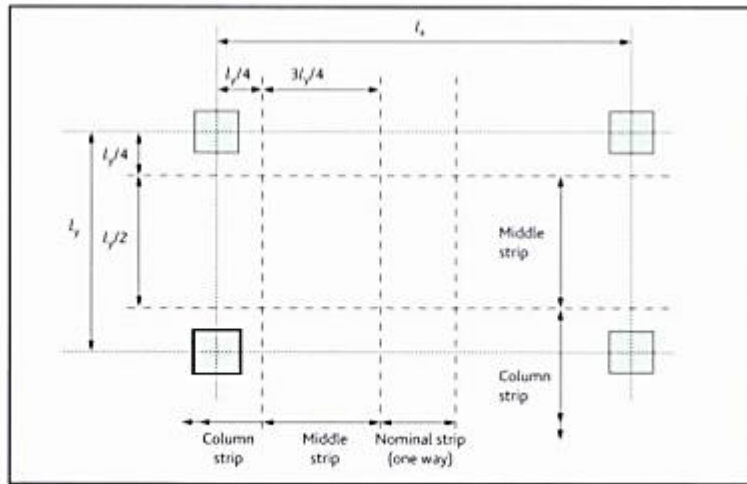
8.5 Kahteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti lyhyemmässä suunnassa

Momentti paalulaatan lyhyemmässä suunnassa laskettiin vastaavasti kuin edellä ekvivalenttina kehänä. Ainoa suurempi ero oli keskikaistan leveys, joka lyhyemmässä suunnassa tarkasteltuna on kuvan 12 mukaisesti $l_x \cdot l_y / 2$. Lyhyemmän suunnan tarkasteluissa murtorajatilassa tukimomenteja on sallittua tasata vastaavasti kuin pidemmässä suunnassa (15 %), jos sivusuhte oli alle 1:2. Momenttien jakosuhteeksi kentässä valittiin 50/50 (keskikaista/pilarikaista) ja tuella 25/75 (keskikaista/pilarikaista) [26]. Kun sivusuhte oli 1:1, lasketut tulokset ja mallinnetut tulokset sopivat hyvin yhteen kentässä. Lasketut momentit tuilla erosivat jonkin verran mallinuksella määritetyistä arvoista, mutta erot eivät olleet kovin suuria.

Sivusuhteen poiketessa arvosta 1:1 tulokset olivat valitettavan huonoja paalulaatan lyhyemmässä suunnassa. Esimerkiksi sivusuhteella 1,6:1 (paaluruudun koko 3 x 1,85 m²) lasketut ja FEM-analyysin avulla määritetyt momentit poikkesivat täysin toisistaan sekä tuen että kentän keskikaistoilla.

EFM-menetelmä perustuu paitsi siihen, että paaluruudun sivusuhteet ovat 1:1, myös pilari- ja keskikaistojen oletetaan olevan keskenään yhtä leveät. Lyhyemmässä suunnassa pilari- ja keskikaistat ovat aina eri levyiset, jos paaluruudun sivusuhte on eri kuin 1:1. Oppikirjoissa on esitetty lyhyesti, että pilarikaistan momentteja pitää kasvattaa lineaarisesti todellisen pilarikaistan ja laskennallisen pilarikaistan sivumittojen suhteessa [24, liite 46.]. Vastaavasti pilarikaistan momentteja tulee pienentää siten, että paaluruudun positiivisten ja negatiivisten momenttien yhteenlaskettu summa pysyy samana kuin alun perin. Ohje tulkittiin siten, että todellinen pilarikaista on sama puolet lyhyemmästä sivumitasta kuten edellä ($l_y/2$) ja laskennallinen pilarikaista on sama, joka tasasivuisella paaluruudulla lyhyemmässä suunnassa olisi (eli $l_x/2$). Tällä menettelyllä keskikaista momentit saatiin sopiviksi, mutta pilarikaistan momentit menivät nolnaan, joten tulokset eivät olleet edelleenkaan käyttökelpoiset.

Lyhyemmässä suunnassa lasketut ja FEM-analyysin perusteella määritetyt momentit saatiin kentässä sopiviksi, kun keskikaistan leveydeksi huomioitiin lähteen [26, s23-24 kuva 15] mukaisesti vain pituus $3l_y/4$, kuva 21:



Kuva 21. Eurokoodin 1992-1 liitteen I.1 kuvaa vastaava kattavampi esitys, jota voidaan käyttää EFM-menetelmässä kun paaluruudun sivusuhte on eri kuin 1:1, myös kun sivusuhte on yli 2:1. Kuvan mukaisesti lyhyemmän suunnan tarkastelussa on mahdollista huomioida keskikaistan leveytenä enimmillään mitta $3l_y/4$. Jos keskikaista on tätä leveämpi ("nominal strip"), laatta on tällä alueella yhteen suuntaan kantava pidemmässä suunnassa, jolloin keskikaistan tehollisena leveytenä lyhyemmässä suunnassa voi käyttää pienempää arvoa [26, s24 kuva 15.].

Tukimomentin tasaaminen oli myös epäselvä, kun tuki- ja pilarikaistojen leveydet olivat erilaisia. Yksinkertaisuuden vuoksi päätettiin tasata vain mitoituksessa määrääviä pilari-kaistojen momentteja. Yhteenvetona lyhyemmässä suunnassa pilarikaistan momentit saatiin järkeväksi, mutta tulosten saamiseen liittyi epävarmuutta. Esimerkkinä lasketut ja FEM-analyysillä saadut tulokset, taulukko 10:

Taulukko 10. Murtorajatilan lyhyemmän suunnan momentit (kNm/m) kentissä ja tuella EFM-menetelmän kaistoihin jaettuna. Ylempänä on lasketut arvot ja alempana vastaavat

FEM:illä saadut arvot ("Lusas tulokset vastaavista kohdista"). Ainoastaan pilari-kaistojen momenteja on tasattu, ja niiden momentit ovat suuruusluokaltaan oikein.

MRT Lyhyempi suunta							
		Kenttämomenti [kNm/m]				Tukimomenti [kNm/m]	
	(kNm)	Keskikaista	Pilarikaista		(kNm)	Keskikaista	Pilarikaista
1. paaluruutu	(66,7)	24,0	37,8	1. tuki reunasta	(-68)	-12,2	-55,1
2. paaluruutu	(50)	18,0	31,1	2. tuki reunasta	(-118)	-21,3	-81,3
3. paaluruutu	(50)	18,0	31,1	3. tuki reunasta	(-101,3)	-18,3	-69,8
Lusas tulokset vastaavista kohdista							
1. paaluruutu		28,1	35,2	1. tuki reunasta		-21,7	-61,8
2. paaluruutu		21,7	29,3	2. tuki reunasta		-32,8	-69,9
3. paaluruutu		21,7	29,3	3. tuki reunasta		-35,6	-71,5

8.6 Yhteen suuntaan kantavan laatan taivutusmomentti

Kun paaluruudun sivusuhte on yli 2:1, laattaa pidetään yhteen suuntaan kantavana. Tällöin riittää tarkastella yhtä pituusuntaista kehää. Momentit kentässä ja tuella laskettiin EFM-menetelmällä kuten edellä paaluruudukolle, jonka sivut olivat 4,7 x 1,175 m². Kentässä momenttien jakosuhteena käytettiin 50:50 ja tuella Eurokoodin sallimissa rajoissa äärisuhdetta 40:60 (keskikaista/pilarikaista). Lasketut tulokset ja FEM-mallista saadut tulokset sopivat oikein hyvin yhteen kentässä, samoin kuin tuella keskikaistalla. Lasketut pilarikaistan momentit ovat selvästi liian suuret mutta varmallalla puolella, taulukko 11:

Taulukko 11. EFM-menetelmällä lasketut momentit kaistojen leveyttä kohti paaluruudulle 1,175 m x 4,7 m. Alempana vastaavat momentit FEM-mallista (Lusas).

MRT					
Positiiviset momentit [kNm/m]			Negatiiviset momentit [kNm/m]		
	Keskikaista	Pilarikaista		Keskikaista	Pilarikaista
1. paaluruutu	146,20	146,20	1. tuki reunasta	-116,96	-175,44
2. paaluruutu	104,82	104,82	2. tuki reunasta	-203,02	-304,54
3. paaluruutu	118,62	118,62	3. tuki reunasta	-180,96	-271,44
Lusas tulokset vastaavista kohdista					
1. paaluruutu	135,2	135,5	1. tuki reunasta	-128,3	-155,5
2. paaluruutu	106,5	106,6	2. tuki reunasta	-199,2	-212,9
3. paaluruutu	108,4	108,6	3. tuki reunasta	-183,5	-197,8

9 Paalulaatan raudoituksen mitoitus

Paalulaatalle laskettuja momentteja hyödynnettiin paalulaatan raudoituksen mitoituksessa. Muokattiin tilaajayrityksen käytössä olevaa pilarilaattojen laskentapohjaa siten, että tarvittavat MRT- ja KRT-momentit määrääville kaistoille muodostuivat automaattisesti valittujen lähtötietojen ja kuormituksen perusteella sekä pidemmässä suunnassa että lyhyemmässä suunnassa. Laskentapohjaan tehtiin omat välilehdet pituussuunnan yläpinnan raudoitukselle ja pituussuunnan alapinnan raudoitukselle. Vastaavat välilehdet tehtiin lyhyemmän suunnan raudoitukselle, ja näihin tuotiin momentit, mikäli laatta on kahteen suuntaan kantava (sivusuhte alle 2:1). Yhteen suuntaan kantavilla laatoilla (sivusuhte yli 2:1) raudoitus määräytyy pidemmän suunnan raudoituksen perusteella, joten tällöin momentteja ei tuoda lyhyemmän suunnan taivutusmitoituksen välilehdille.

Paalulaatan päällä olevan penkereen maanpaineesta paalulaattaan aiheutuvaa halkaisuvoimaa (käsitelty luvussa 3.1) ei ollut huomioitu käytetyssä laskentapohjassa. Teräsiin vetoa aiheuttava halkaisuvoima pitää huomioida raudoituksessa [1, s. 23]. Halkaisuvoimien käsittelystä ei löytynyt hyvää esimerkkiä. Jotta halkaisuvoimat pystyttiin huomiomaan edes karkeasti, korotettiin teräsjännityksiä (σ_s) paalulaatan poikkisuunnassa halkaisuvoimien verran KRT-tarkasteluissa. Halkaisuvoiman suuruus (kN/m) laskettiin kaavan (1) avulla. (Lepopainekertoimen K_0 arvona käytettiin soratäytölle tyypillistä arvoa 0,384 ja liikennekuorman arvo q_k määritettiin paalulaatan lopullisen käyttötarkoituksen perusteella, joten esimerkiksi 3 m pengersyvyydellä liikennekuorman alueella halkaisuvoima on 60 kN/m). Laskettu vaakavoiman arvo 1m matkalla (kN) jaettiin kahtia, puolet siitä kohdistettiin laatan yläpinnan raudoitukselle ja puolet alapinnan raudoitukselle huomioiden tutkittavan kuormitusyhdistelmän oman painon ja muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin halkaisuvoiman laskennassa. Lopulta vaakavoima jaettiin poikkisuunnan terästen pinta-alalla, ja lisättiin laskentapohjassa taivutusmomentista aiheutuneeseen teräsjännityksen arvoon.

Muilta osin laskentapohjaa ei tarvinnut juuri muuttaa, koska sitä oli jo korjattu betonisilloille sopivien ohjeiden mukaiseksi. Laskentapohjassa käyttäjä tarkistaa käsin olosuhteista riippuvan suojabetonipeitteen ja valitsee MRT- ja KRT-momentteihin sopivan raudoituksen. Esimerkiksi käyttöasteet sai laskentapohjasta automaattisesti eri kuormitusyhdistelmille. Silloilla ja paalulaatoilla tyypillisesti käyttörajatilatarkastelut ovat murtorajatilatarkastelua määräävämpiä.

Raudoituksen mitoitukseen käytettiin edellisissä luvuissa lasketuista momenteista pääasiassa pilarikaistojen momentteja, koska niissä kertoimet oli valittu niin että laskettu arvo on suurempi tai yhtä suuri kuin FEM-analyysillä saatu arvo. Pilarikaistojen perusteella laskettua raudoitusmäärää käytettiin siis myös keskikaistalle. Yhteen suuntaan kantaville laatoille käytettiin tuella keskikaistan momentteja, koska sen osalta laskettu momentti sopi paremmin FEM-analyysin tuloksiin. Optimaalisessa rakenteessa raudoituksen voisi toki määrittää erikseen pilarikaistoihin ja keskikaistoihin, jolloin pilarikaistat toimisivat laatan sisäisinä palkkeina, joissa raudoitus on tiheämpää kuin keskikaistoilla. Käytännössä pilarikaistalle vaadittu raudoitus ei aina edes mahdu pilarikaistan alueelle tankopaksuudet ja raudoitustankojen minimietäisyydet huomioiden. Lisäksi monet suuremmat kunnallisen tason tilaajat haluavat, että paalulaattojen raudoitus on mahdollisimman yksinkertainen, jotta raudoituksen työmaatoteutus ja tarkastaminen sujuisivat ongelmitta.

Raudoituksen mitoituksessa huomioitiin ulokepalkin määräävimmit voimasuureet staattikaohjelmasta saatujen kertoimien perusteella (liitteen 1 taulukoitujen arvojen perusteella). Pidemmässä suunnassa laatan yläpinnan raudoitus laskettiin 5-aukkoisen ulokepalkin kolmannen tuen perusteella. Toisella tuella reunasta päin momentti on vielä tätäkin suurempi, joten tähän kohtaan tarvittiin lisäraudoitus. Laatan alapinnan pituussuuntainen raudoitus laskettiin vastaavasti kolmannen kentän mukaan, ja ensimmäiseen kenttään laskettiin lisäraudoitus. Esimerkki laatan alapinnan raudoituksen laskennasta, kuva 22:

TAIVUTUSMITOITUS	ctrue=	100	C30/37	fc=	30	= _x	2,2	x	ok	0,7	
	omin_dur=	35	φ=	1,45	fcm=	38	= _y	1,95	ey	0,625	
HALKEAMATARKASTELU	o=	43	fyd=	435	fctm=	2,90	l/4	0,4875	siivuzuhde	1,1282	
POSITIIVISET MOMENTIT	EstEom=	6,08	Es=	200000	fod=	16,45	Pilarikaistan leveys, molemmat suunnat	l/4 + l/4	kantavuus	2-suunt	kantava
	EstEoom=	14,92			Eom	32837	Keskikaistan pituus, pidempi suunta (x)	l _x - l _y /2	Uloke/m	0,31818	
LYHYTAKAISUORMAT					Eoom	13403	Keskikaistan leveys, lyhyempi suunta (y)	l/2			
Tavallinen yhdistelmä	Lisäraudoitus				Eoom	2,45	Ulokkeen pituuden suhde x-suunta				
	Reunakenttä	Keskikenttä					Uloin kenttä ja 3. kenttä eli sisäkenttä määräävät				
MITOITAVA MOM	b	1,000									
	h	0,350									
	d	0,230									
	H	0,000									
	b	0,000									
	AS	755									
	bAs	1,000				755					
	kpl	6,7				565					
	K	150									
TER HAL	x	12									
	ix	0,042									
	Ihalt	0,000									
	sc=	-5,630									
	ss=	156,332									
	rp,eff	0,0073									
	Sr,maxf	444,325									
	kt=	0,800									
	k2=	0,500									
	kt=	0,600									
	wk=	0,209									
	wk sall	0,280									
KRT PITKAAIKAISUORMAT											
MITOITAVA MOM	b	0,020									
	ix	0,062									
	Ihalt	0,000									
	sc=	-3,053									
	ss=	124,867									
	kt=	0,400									
	wk=	0,166									
	wk sall	0,210									
MURTOTILA	b	1,000									
	d	0,230									
	Ha	0,000									
	ba	0,000									
	Vedetty As=	755									
	Mu =	0,068									
	vs	0,020									
	VENYMA PRDM > 2,3	10,000									
	Md=	0,038									
	Md/Mu=	0,56									

Kuva 22. Alapinnan raudoitus pidemmässä suunnassa laskentapohjassa. Raudoitus määräytyy keskikentän (3. kenttä) momentin mukaan, mahdollinen lisäraudoitus tulee reunimmaisen kentän momentin (1. kenttä) mukaan. Laskentapohjaan tämän työn myötä muokatut arvot merkitty vihreällä (tarvitavat MRT- ja KRT-momentit sekä tehollinen korkeus d), arvot määräytyvät automaattisesti valittujen lähtötietojen perusteella. Oranssilla merkityt arvot käyttäjän tulee tarkistaa ja tarvittaessa muuttaa (suojabetonipeitteet ja raudoitusmäärä mm² sekä teräshalkaisija).

Lyhyemmässä suunnassa paalulaattaan ei järjestetty lisäraudoituksia yksittäisille kentille tai tuille. Laskentapohjassa huomioitiin valittu ulokkeen pituus ja paaluvälien lukumäärä lyhyemmässä suunnassa. Raudoitus laskettiin suoraviivaisesti yläpintaan suurimman pilarikaistan tukimomentin perusteella, ja alapintaan suurimman kenttämomentin perusteella, riippumatta siitä monennellako kentällä tai tuella suurimmat arvot vallitsivat.

Yhteen suuntaan kantavan laatan raudoitus laskettiin kuten pidemmän suunnan raudoitus. Lyhyemmän suunnan momenteja ei huomioitu, vaan lyhyemmän suunnan raudoitukseksi valitaan Eurokoodimenettelyn mukaisesti 20 % pidemmän suunnan raudoituksesta tai minimiraudoitus (käsitelty luvussa 6.2).

Tavanomaisia suoraa raudoitustankoja käytettäessä olisi edullista järjestää raudoitus siten, että tehollinen korkeus d on pidemmässä suunnassa mahdollisimman suuri, koska taivutusmomentti on pidemmässä suunnassa suurempi. Toisaalta tällöin yläpinnan puristetussa ja taivutetussa kentässä on vaarana pääsuunnan raudoituksen nurjahdus,

minkä varalta on parempi sijoittaa lyhyemmän suunnan raudoitus ulommaksi. Tangot lyhyemmässä suunnassa ovat siis alapinnassa alimpana ja yläpinnassa ylimpänä. Tangot pitkittäissuunnassa ovat sisempänä laatussa suoraan näissä kiinni.

MRT-mitoituksessa tehollinen korkeus d määritettiin laskentapohjaan laatan paksuuden ja nimellisen suojabetonietäisyyden c_{nom} avulla. Nimellinen suojabetonipeite sisältää jo itsessään sallitun mittapoikkeaman Δc_{dev} , joka on 10 mm muottia vasten oleville pinnoille ja yläpinnoille sekä 25 mm maata vasten valettaville pinnoille. Nimellisen suojabetonietäisyyden arvo määritettiin automaattisesti valitun rasitusluokan ja ohjeen NCCI 2 mukaan [13, taulukko 4.3.]. Esimerkiksi rasitusluokassa Ro31 suolattavan tien alla oleville paalulaatoille c_{nom} on yläpinnassa ja muottia vasten olevissa pinnoissa 50 mm sekä maata vasten 100 mm, tai 60 mm, mikäli valu tehdään muovia tai suojakangasta vasten tasaiselle maalle.

Laatan raudoituksen tehollinen korkeus d alapinnan raudoitukselle lyhyimmässä suunnassa laskettiin siis:

$$d = h - c_{nom} - 0,5 \cdot 1,1 \cdot \varnothing_{\text{raudoitus, pidempi suunta}} \quad (12)$$

Pidemmässä suunnassa alapinnan raudoituksen d laskettiin vastaavasti, mutta huomiointiin lyhyemmän suunnan raudoitus:

$$d = h - c_{nom} - 1,1 \cdot \varnothing_{\text{raudoitus, pidempi suunta}} - 0,5 \cdot 1,1 \cdot \varnothing_{\text{raudoitus, lyhyempi suunta}} \quad (13)$$

Yläpinnan raudoitusten teholliset korkeudet laskettiin muuten samoin, mutta kokonaiskorkeudesta h vähennettiin lisäksi paalun upotussyvyys (50 mm).

KRT-mitoituksessa laskennallisen halkeamaleveysrajan w_{max} arvon määrittäminen tehtiin ohjeen NCCI 2 mukaan perustuen halkeamaleveyslaskennassa käytettävään suojabetonipeitteeseen c . Nimellisen suojabetonipeitteen sijaan suojabetonipeitteen arvona c käytetään arvoa:

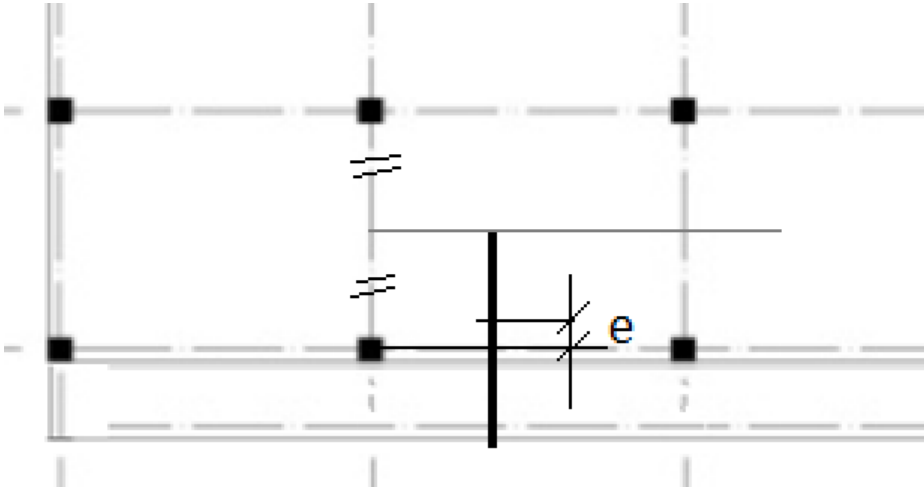
$$c = \min (c_{nom}, 1,4 \cdot c_{min,dur}, 50 \text{ mm}), \quad (14)$$

jossa paalulaatoille on edellä mainitussa taulukoissa annettu halkeamaleveyslaskelmissa käytettävä $c_{min,dur}$ rasitusluokkaan perustuen. Mikäli c on pienempi kuin $c_{min,dur}$,

halkeamaleveyttä saa korottaa kappaleen 5.3 mukaisesti kertoimella $c/c_{\min,dur}$ arvoon 1,4 asti.

10 Paalulaattojen mitoitus laskentapohjassa: lävistyskestävyys

Leikkausvoiman määrittämiseen Rambollilla oli valmis laskentapohja, johon tuotiin paalulaatalle valitut geometriatiedot ja kuormat vastaaviin kohtiin luvun 5.4 kaavojen mukaan. Laskentapohjaa kehitettiin lävistyskestävyyden osalta lisäämällä siihen sekä pituus- että leveysuuntaisen reunimmaisesta paalurivin lävistyskestävyyden automaattinen tarkastelu huomioiden lävistyksen epäkeskisyyden e leikkautuva alueen painopisteestä, kuva 23:



Kuva 23. Leikkautuvan alueen painopiste laskettiin reuna-alkkeen ja kahden reunimmaisesta paalurivin keskipisteen rajaaman alueen keskelle. Epäkeskisyyden e laskettiin painopisteen kohtisuorana etäisyytenä reunimmaisesta paalurivin kohdalle.

Ote lävistystarkastelusta laskentapohjassa keskipaalulle ja pidemmän suunnan reuna-apaalulle, kuva 24:

Esimerkkilaatta		Betoni C30/37-2	30	kerroin	1,5		
LAATAN LÄVISTYS			fcd= 17				
neliötuki			fctd= 1,35169				
Paaluväli lx	2,55				Uloke ex 0,975		
ly	2,3				Uloke ey 0,9		
Laatan paksuus	0,4						
MRT kuorma	128						
Tuki	KESKITUKI				REUNATUKI x		
V=	750,7	tukireaktio yht/kN			V= 662,4	tukireaktio yht/kN	
e=	0,000				e= 0,150	lävistysvoiman epäkeskisyyss	
Rakenteen mitat					Rakenteen mitat		
d=	0,35	h - 0,05			d= 0,35	h - 0,05	
Tuen halk.x	0,3				Tuen halk.x	0,3	
y	0,3				y	0,3	
Teräsmäärät (mm ² /m)					Teräsmäärät (mm ² /m)		
x,ylä	1340	oletuksena raudoitus 12k150			x,ylä	1340	
x,ala					x,ala	0	
y,ylä	1131	oletuksena minimiraudoitus 12k150			y,ylä	1131	
y,ala					y,ala	0	
Terästä prom	3,5				Terästä prom	3,5	
Reunaetäisyydet tuen keskeltä					Reunaetäisyydet tuen keskeltä		
x,min=	10	keskituki ei lähellä reunaa			x,min= 0,975	=e _x	
y,min=	10				y,min= 10		
u=	2,600				u= 2,600		
Au=	0,423				Au= 0,423		
Vähennykset pysyvistä kuormista					Vähennykset pysyvistä kuormista		
(-)V=	128,0	tuen reunasta et. d jäävän alueen kuorma/kN			(-)Vg1= 128,0		
Vco=	0,723	leikkausraudoittamattoman laatan lävistyske			Vco= 0,537	leikkausraudoittamattoman la	
Vd=	0,623	Lävistävä voima			Vd= 0,534	Lävistävä voima	
Vd-Vco=	-0,100				Vd-Vco= -0,003		
2,00*Vco=	1,446				2,00*Vco= 1,074		
As,vaad=	0				As,vaad= 0		
Teräskoko=	12				Teräskoko= 12		
Leik. kpl	0				Leik. kpl	0	
As =	0				As = 0		
Paalukuorma Td	750,720	MM			Paalukuorma Td	662,400	MM

Kuva 24. Esimerkki laatan lävistystarkastelusta. Laskentapohjaan lisättiin sekä pidemmässä että lyhyemmässä reunassa lävistystarkastelu huomioiden lävistyksen epäkeskisyyden e leikkautuvan alueen painopisteestä. Tähänkin laskentapohjaan tuotiin kaikki tarvittavat arvot automaattisesti. Ainoastaan teräsmäärä paalun kohdalla jätettiin sellaiseksi, mikä käyttäjän täytyy lisätä tarkasteluun.

11 Paalulaattarakenteen kustannusarvio

11.1 Kustannusten muodostuminen

Tässä työssä kehitettiin paalulaattojen mitoituksen laskentapohja lisäämällä siihen uutena osio, jossa laskettiin automaattisesti paalulaatan rakentamisen kustannusarvio materiaalien osalta valitulle paalulaattarakenteelle. Materiaalien hinta-arviot saatiin Liikenneviraston *Sillan kustannusarviot* -julkaisusta (vuodelta 2009), joka perustuu toteutuneiden siltahankkeiden kustannuksiin [27]. Kustannusten nousu julkaisuajankohdasta huomioitiin kustannusindeksillä (joka esimerkiksi vuonna 2019 on 160 %). Liikenneviraston julkaisussa hinnat ovat määritellyt yksityiskohtaisella tasolla, esimerkiksi betonin hinta riippuu sillan rakennusosasta (paalulaatat kuuluvat alusrakenteisiin) ja betonin lujuudesta. Hinnat laskentapohjaan määritettiin samalla tarkkuustasolla. Betonipaalujen yksikkökustannus riippuu betonipaalun halkaisijasta. Hinta-arvio laskettiin paalujen lukumäärän, keskimääräisen paalun pituuden ja paalun halkaisijan perusteella. Teräspaaluille hinta on niin tapauskohtainen, että sille ei löytynyt halkaisijaan perustuvaa valmista kustannusarviota, vaan käyttäjän täytyy valita hinta käsin. Muottien kustannukset laskettiin automaattisesti laatan geometrian perusteella.

Raudoituksen yksikkökustannus perustuu raudoitusteräksen painoon. Raudoituksen kilometriä laskettiin kappaleessa 3.4 laatan eri kohdissa vallitsevien taivutusmomenttien ja niiden perusteella valittujen raudoitusmäärien perusteella. Kahteen suuntaan kantaville laatoille (sivusuhte alle 2:1) laskettiin yksittäisten tankojen pituus laatan eri osissa huomioiden tarvittavat jatkospituudet jp . Jos yksittäisen tangon pituus l oli yli 12 m (tavallinen raudoitustangon enimmäispituus) laatan pidemmässä suunnassa, tangon pituuteen lisättiin vielä termi: $\text{INT}\left(\frac{l}{12m-jp}\right) \cdot jp$, jolla huomioitiin tankojen limityksien vaatima mitta jatkoskohdissa. Sopiva jatkospituus jp määritettiin tangon halkaisijan, betonin lujuuden ja tartuntaolosuhteiden perusteella ohjeen NCCI 2 mukaan [13, liite 2.]. (Yläpinnan tartuntaolosuhteet ovat huonot, alapinnan hyvät, paalulaattojen toteutusluokka on 2). Excelin INT-funktion avulla huomioitiin jatkospituuteen vain kokonaisluvut jatkospituuksista, eli rakenteen todelliset jatkoskohdat. Tankojen pituudet kerrottiin vielä tankojaon tiheydellä (tankojaon k käänteisluku) ja rakenteen leveydellä. Raudoituksen vaatimat kokonaispituuden avulla laskettiin raudoituksen kilometriä perustuen tangon halkaisijaan ja harjateräsvalmistajien taulukoituihin juoksumetriä painoihin (kg/m -arvoihin)

[28]. Lyhyemmässä suunnassa terästen kilomäärät laskettiin vastaavalla tavalla kahteen suuntaan kantaville laatoille.

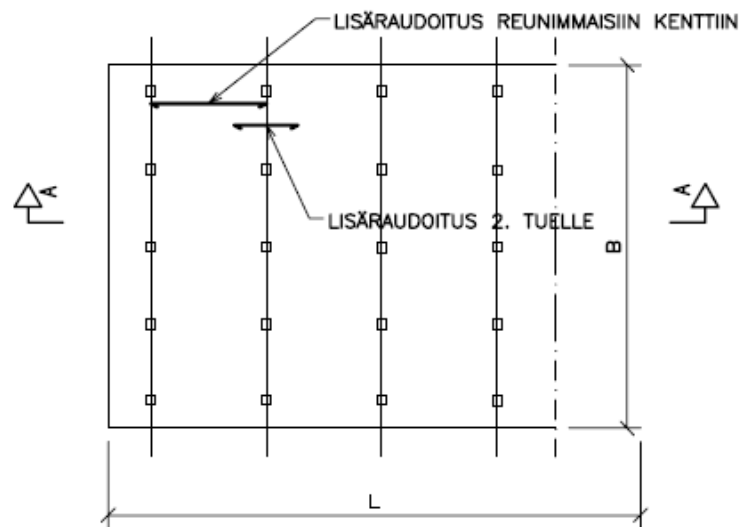
Kolmannen tuen perusteella laskettu laatan yläpinnan raudoitus ulotettiin koko laatan pituudelle. Toisella tuella lasketun lisäraudoituksen ankkurointipituutta ei laskettu tarkemmin, lisäraudoitus päätettiin laskennallisesti ulottaa puolen paaluruudun mittaisena tuen molemmille puolille. Koko laatan alapinnan pituussuuntainen raudoitus laskettiin vastaavasti kolmannen kentän mukaan. Alapinnan ensimmäiseen kenttään tarvittavan lisäraudoituksen pituutena käytettiin yhden paaluruudun pituutta, johon lisättiin ankkurointipituus molempien tukien yli [13, liite 2.]. Lisäraudoituksen oletettiin olevan puolet tiheämpi kuin muun samansuuntaisen raudoituksen, jotta raudoituksen kilomäärä pysyttiin laskemaan ja työmaatoteutus on järkevä. (Esimerkiksi pituussuuntainen raudoitus 12k200, lisäraudoitus 12k100). Lisäraudoituksia ei huomioitu raudoituksen kilomäärän laskennassa, mikäli sille laskentapohjassa valittu halkaisija ja k-väli olivat samat kuin koko laatan mittainen raudoitus vastaavassa kohdassa.

Lyhyemmässä suunnassa raudoitumäärän laskenta tehtiin suoraan määräävimpien kenttien ja tukien perusteella, jotka olivat toiseksi uloin tuki ja reunimmaisina kenttä riippumatta aukkomäärästä. Koska lyhyemmän suunnan lasketut momentit erosivat jonkun verran FEM-analyysin momenteista, ei lyhyemmässä suunnassa lähdetty erottomaan koko laatan mittaista raudoitusta ja lisäraudoituksia.

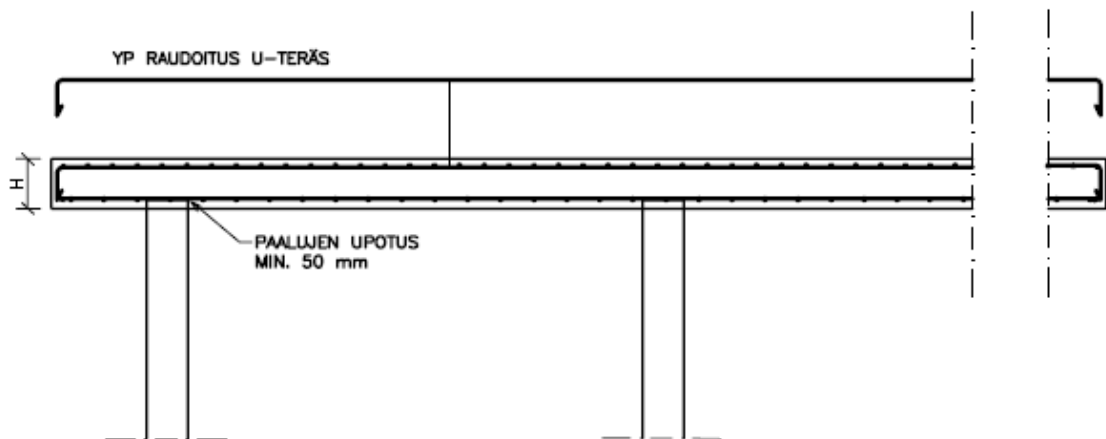
Yhteen suuntaan kantaville laatoille (sivusuhte $2:1$) raudoitumäärä laskettiin pituussuunnassa samoin kuin kahteen suuntaan kantaville laatoille, mutta laskettuja keskikais-tan momentteja hyödyntäen. Lyhyemmässä suunnassa raudoituksen arvona käytettiin 20 % pidemmän suunnan raudoituksesta, eli laskennallisesti jakoväli k korotettiin viisinkertaiseksi ja tangon paksuus pidettiin samana kuin pidemmässä suunnassa, kuitenkin kappaleen 5.2 minimiraudoitusvaatimukset huomioiden.

Laatan raudoituksessa molemmissa suunnissa raudoitus järjestetään koko poikkileikkauksen ympäri. Periaatteellisesti tämä huomioitiin ulottamalla yläpinnan poikittaisen suunnan raudoitus u-lenkkinä paalulaatan sivujen ja yläpinnan mitalle suojabetonietäisyydet huomioiden, jotta saatiin raudoituksen kilomäärille jonkinlainen arvio. Pidemmässä suunnassa yläpinnan poikittaisraudoitus järjestettiin vastaavasti u-lenkeiksi. Periaatteellinen kuva raudoitujärjestelyistä, kuva 25:

TASOKUVA



LEIKKAUS A-A



Kuva 25. Periaatteellinen kuva laskentapohjassa käytetyistä raudoituksista. Yläpinnan pituus- ja poikkisuuntaiset teräkset laskettiin u-lenkeinä, alapinnan teräkset suorina tankoina.

Laskentapohjassa taulukoidut kustannukset muodostuvat automaattisesti valittujen raudoitusten ja paalun sekä laatan geometrian perusteella. Raudoitukset valittiin EFM-menetelmällä laskettujen taivutusmomenttien sekä lävistyskestävyyden perusteella. Laatan paksuus määräytyi käytännössä lävistyskestävyyden perusteella. Raudoitustankojen pituuksissa pyrittiin huomioimaan sekä vaaditut limijatkospituudet että vaaditut lisäraudoitukset, kun laatta raudoitetaan kauttaaltaan ympäri, kuva 26:

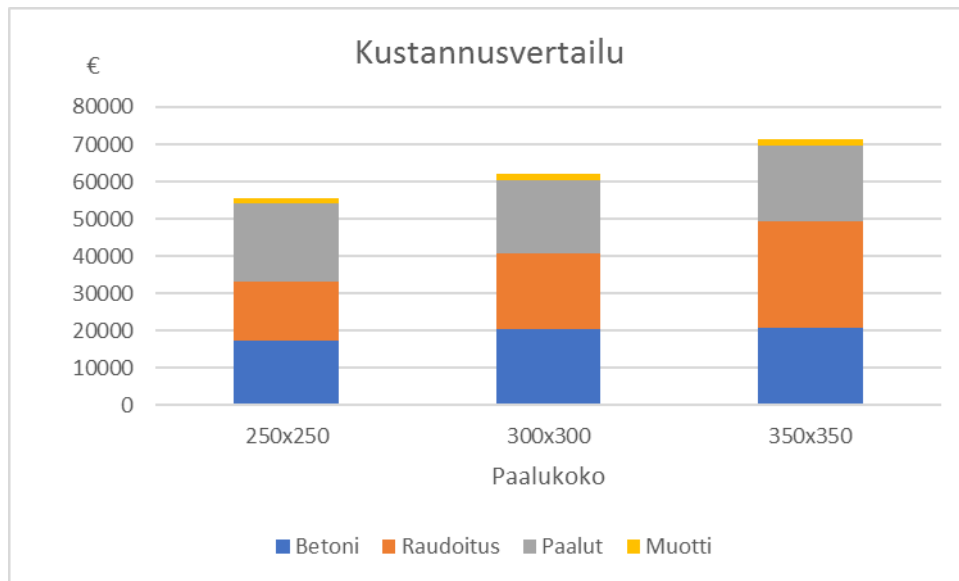
11.2 Kustannusvertailu esimerkkirakenteelle

Käytiin esimerkinomaisesti läpi kustannusvertailu kolmelle eri betonipaalukoolle kuvitteelliselle tiepaalulaatalle, jolle lähtötietoihin valittiin:

- Pituus 30 m
- Leveys 11 m
- Syvyys 3 m
- Paalujen pituus noin 6 m

Yhden laatan kustannusvertailun muodostamiseen meni parikymmentä minuuttia. Ensin mitoitettiin paaluväli ja ulokkeen pituus, sen jälkeen valittiin raudoitus pidemmässä suunnassa ja sama raudoitus tuotiin lävistyskestävyyteen. Kaikilla kolmella paalukoolla lävistyskestävyys muodostui rajoittavaksi tekijäksi, koska laatan paksuus haluttiin pitää kohtuullisena (kasvatettiin enintään arvoon 45 cm), joten paaluväliä jouduttiin pienentämään kunnes lävistyskestävyys tuli riittäväksi. Tämän jälkeen valittiin loput raudoitukset, kustannusvertailu muodostui automaattisesti. Mitään Excelin optimointityökaluja ei hyödynnetty, koska raudoitus haluttiin pitää tyypillisenä (esimerkiksi raudoitusvälit 75 mm, 100 mm tai 150 mm) eikä laskennallisesti optimaalisina.

Rakenteen valitseminen käsin onnistui helposti. Yhteenvetona kolmella eri paalukoolla saatiin seuraavanlaiset kustannukset esimerkkirakenteelle, kuva 27:



Kuva 27. Esimerkkipaalulaatan kustannusrakenne laskentapohjalla laskettuna. Valitut laatan paksuudet rakenteessa olivat pienimmästä paalukoosta suurimpaan: 0,35 m, 0,4 m ja 0,42 m. Laatan paksuus valittiin lävistyskestävyyden perusteella, lujuus oli C30/37.

Tässä rakenteessa pienimmällä paalukoolla saavutettiin noin 6 % ja 23 % edullisemmat materiaalikustannukset kuin kahdella isommalla paalukoolla, joten pienimmälle paalukoolle mitoitettu rakenne voisi olla hyvä lähtökohta jatkosuunnittelulle.

Sattumalta valitussa rakenteessa sekä betonin, paalujen että raudoituksen osuus kokonaiskustannuksista oli noin kolmasosa. Tilanne tietenkin muuttuisi, jos paalujen pituus olisi selvästi suurempi tai pienempi. Yhteenvetona todettiin, että näillä kaikilla rakenteilla on selvä merkitys kokonaiskustannuksiin, joten ei ole kannattavaa yrittää optimoida esimerkiksi ainoastaan paalujen kustannuksia raudoitusta lisäämällä.

12 Yhteenveto ja johtopäätökset

12.1 Tulokset

Työn tuloksena kehitettiin tilaajayrityksen paalulaattojen mitoituksen olemassa olevaa laskentapohjaa työn tavoitteen mukaisesti. Laskentapohjaa parannettiin esimerkiksi laajentamalla lähtötietojen keruuta. Laskentapohjaan lisättiin myös automatiikkaa, jolloin esimerkiksi suojabetonietäisyydet määrittyivät automaattisesti raudoituksen mitoitukseen valitun rakenneosan tunnuksen perusteella. Täysin uusina osina laskentapohjaan lisättiin esimerkiksi sopivien paaluvälien arviointi, kuormitusyhdistelmien automaattinen laskenta eri tavoin kuormitetuille paalulaatoille sekä paalulaatan reunaosien lävistyskestävyyden mitoitus. Laatan keskiosan lävistystarkastelun osalta pystyttiin hyödyntämään alkuperäistä laskentapohjaa sellaisenaan.

Raudoituksen mitoituksen kannalta oleellinen taivutusmomenttien laskenta muutettiin työn myötä uudella tavalla määräytyväksi. Alun perin laskentapohjassa käytettiin taivutusmomentin määrittämisen pilarilaatoille soveltuvaa yksinkertaistettua menetelmää paalulaatan taivutusmomenttien laskentaan. Tämän työn myötä mitoittavat taivutusmomentit määritettiin laskentapohjaan niin sanotulla ekvivalenttien kehien menetelmällä. Ekvivalenttien kehien menetelmää päätettiin käyttää, koska se on yksi Eurokoodin suosittama menetelmä paalulaattojen taivutusmomentin määrittämiseen. Menetelmän käytöstä etsittiin lisää tietoa, ja menetelmän soveltuvuutta tavanomaiselle tiepaalulaatalle testattiin useilla eri paaluruudun sivusuhteilla. Työn tutkimusosassa verrattiin ekvivalenttien kehien menetelmällä laskettuja taivutusmomentin arvoja erilaisille paaluruudun sivusuhteille, ja verrattiin tuloksia vastaavanlaiseen paalulaattarakenteeseen rakenteeseen FEM-analyysiohjelmassa (Lusas 15.2 -ohjelmisto). Tutkimuksen perusteella ekvivalenttien kehien menetelmä vaikutti soveltuvan kohtuullisen hyvin paalulaattojen mitoitukseen.

Opinnäytetyöntekijän omaa ajattelua ekvivalenttien kehien menetelmän käytön suhteen oli taulukoida ulokkeen pituuden/jännemitan suhteen vaihtelun vaikutus tukien ja kentän taivutusmomenteihin paalulaatan aukkomäärän perusteella. Taulukointi tehtiin PupaX5 -statiikkaohjelman avulla. Tämän työn myötä laskentapohjaan tuotiin mitoittavien kenttien ja tukien taivutusmomentit, huomioiden paalulaatan aukkojen lukumäärä

pidemmällä ja lyhyemmällä sivulla samoin kuin ulokkeen pituus. Laatan tehollinen mitta d laskettiin myös. Näiden avulla saatiin raudoitus paalulaatan ylä- ja alapintaan määritettyä.

Uutena osiona laskentapohjaan lisättiin paalulaatan materiaalikustannusten arviointi. Kustannukset pyrittiin arvioimaan todenmukaisesti, esimerkiksi raudoitusten suojabetonietäisyydet ja jatkospituudet huomioitiin. Testattiin laskentapohjaa kuvitteellisen tiepaalulaatan kustannusten arvioinnin osalta kolmella eri paalukoolla, ja laskentapohjalla saatiin järkevä tulos. Kustannuksiin vaikuttivat merkittävästi sekä betonin, paalujen että raudoituksen kustannukset, joten nämä kaikki on syytä huomioida kun selvitetään taloudellisinta rakennetta paalulaatalle. Työn lopputuloksena saatua versiota laskentapohjasta voi käyttää paalulaatan alustavan geometrian määrittämiseen ja kustannusten arviointiin. Geometriaan sopivan rakenteen voisi valita esimerkiksi muutamalla eri paalukoolla ja valita näistä lopulliseen suunnitteluun kokonaiskustannuksiltaan edullisimman vaihtoehdon.

12.2 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä perehdyttiin tasapaksujen, tasaisesti kuormitettujen paalulaattojen mitoittamiseen ja kustannusten arviointiin. Teoriaosiossa käytiin läpi paalulaattojen kuormat sekä laatan ja paalujen mitoitus, joita ohjaa kansallisen tason erinäiset sovellusohjeet Eurokoodeihin pohjautuen. Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet: laskentapohjan toiminnallisuutta pystyttiin parantamaan ja laskentapohja toimii nyt myös muunlaisille paaluruudun sivusuhteille kuin 1:1 – 1,3:1.

Paalulaattojen taivutusmomenttiin liittyvien voimasuureiden laskennassa päätettiin hyödyntää Eurokoodin sallimaa niin sanottua ekvivalenttien kehien menetelmää. Menetelmän pitäisi soveltua kaikenlaisten pilarilaattojen mitoittamiseen, ilman että laatan kuormitusta tai paaluruutujen lukumäärää on rajoitettu. Menetelmään tutustuminen ja sen testaaminen veivät käytännössä suuren osan työhön käytetystä ajasta. Menetelmällä oli mahdollista huomioida paalulaatan ulokkeen vaikutus taivutusmomenttiin. Menetelmä oli loppujen lopuksi aika yksinkertainen, paljon aikaa meni kuitenkin menetelmään perehtymiseen ja sopivien laskuesimerkkien löytämiseen.

Ekvivalenttien kehien menetelmällä laskettujen tulosten osuvuus FEM-analyysin tuloksiin sekä murto- että käyttörajatilassa eri paaluruudun sivusuhteille oli yllättävän hyvä, etenkin paalulaatan pidemmässä suunnassa sekä yhteen suuntaan että kahteen suuntaan kantaville paalulaatoille. Paalulaatan lyhyemmässä suunnassa tulosten osuvuus ei ollut kovin hyvä kahteen suuntaan kantaville laatoille, kun paaluruudun sivusuhte oli lyhyemmässä suunnassa selvästi pienempi kuin pidemmässä suunnassa. Tämä johtuu luultavasti siitä, että käytetty statiikkaohjelman kehämalli lyhyemmässä suunnassa ei vastannut tutkittua rakennetta tukien osalta. Tutkitussa rakenteessa tuki on pistemäinen, statiikkaohjelmassa kehän levyinen. Tähänkin olisi varmasti löydettävissä jollain tavalla ratkaisu, ekvivalenttien kehien menetelmä vaikutti kuitenkin luotettavalta yksinkertaisuutensa takia. Toisaalta ekvivalenttien kehien menetelmä on kokeellinen menetelmä, jonka momentit saa Eurokoodin mukaan jakaa melko vapaasti eri kaistoille. Siten voi olla, että tulokset olivat vain näennäisesti hyviä, ja voi olla että osuvuus eri tavalla kuormitetuille ja mitallistetuille laatoille olisikin huonompi kuin tässä työssä. Olisi ollut hyvä tehdä paljon enemmän laskettujen ja mallinnettujen tulosten vertailua, mutta siihen ei aika riittänyt.

Paalulaatan raudoitusta olisi mahdollista optimoida laatan toiminnan ja kustannusten kannalta enemmän pilari- ja keskikaistan osalta, myös ekvivalenttien kehien menetelmällä eri kaistojen momenteille saatiin kohtuullisen hyvät arvot. Tulevaisuudessa voi olla, että rakenteiden hiilijalanjälkeä halutaan pienentää, jolloin rakenteiden tarkempi optimointi materiaalien käytän osalta tulee tärkeämmäksi. Tässä työssä mitoittavaksi taivutusmomentiksi valittiin määräävimät kaistat (yleensä pilarikaista), koska käytännössä tilaajat haluavat että paalulaatan toteutus on mahdollisimman yksinkertainen.

Työssä ei huomioitu erilaisia epätasaisia kuormituksia (niin sanottuja shakkilautakuormituksia) taivutusmomenttien laskennassa. Momenttien laskentaan käytettyä menetelmää olisi yksinkertaista laajentaa epätasaisiin kuormituksiin. Todellisuudessa kuitenkin tasainen maan paino on paalulaatan suurin kuorma. Lisäksi maan pinnalla vaikuttavat muuttuvat kuormat, esimerkiksi LM1, ovat luonteeltaan tasanjakautunutta, minkä lisäksi ne leviävät pinnasta kartiomaisesti paalulaattaan jolloin epätasaisia kuormituksia ei todellisuudessa usein esiinny.

Käytetty FEM-ohjelmisto ei ollut entuudesta tuttu opinnäytetyön tekijälle, joten ohjelman käytön opettelu vei myös aikaa. FEM-analyysistä saatujen tulosten tulkinta ei ollut aivan yksinkertaista, kansalliset suunnitteluohjeet sisältävät joitakin ohjeita liittyen momentin tasaukseen. Lisäksi paalun kohdalla tukimomentti nousee hyvin jyrkästi, joten FEM-

analyysin tuloksen numeroarvo riippuu pitkälti siitä, miten tiheä elementtiverkko paalun kohdalla on, ja mistä kohdasta ja millä perustella tulos luetaan. Kansallisen ohjeistuksen mukainen elementtiverkon tiheyden käyttäminen aiheutti FEM-analyysiin kohtuullista hitautta, minkä vuoksi elementtiverkkoa tihennettiin ainoastaan tutkittavalla alueella.

Paalulaatat ei ollut tekijälle entuudestaan tuttu aihe, joten lähestyminen laskentapohjan toiminnallisuuteen oli hyvin teoreettinen. Paalulaatta, joka on säännösmielessä pieni silta, oli erinomainen tutustumiskohde siltojen suunnittelussa oleellisiin ohjeisiin ja normeihin työelämän jatkoa ajatellen. Toki paalulaatoissa tulee usein muitakin ilmiöitä esille, kuten esimerkiksi pidempien paalujen taipuminen maaperässä, jos paalut ovat kovin erimittaisia. Tällaisten rakenteiden käsittelyyn ekvivalenttien kehien menetelmä ei ole varmastikaan sopivin tapa, vaikka eurokoodin mukaan vaakakuormatkin olisi mahdollista huomioida sitä käyttämällä. Laskentapohjaa olisi helppo kehittää jatkossa esimerkiksi siten, että siihen sisällytettäisiin palkki- ja sienilaattojen paksunnososien mitoitus. Paksunnetuille paalulaatoille taivutusmomentti laskettaisiin vastaavasti kuin tasapaksun laatan pilarikaistan momentti, joka sitten vain jaettaisiin laatta- ja paksunnososille niiden jäykkyyksien suhteessa eurokoodin ohjeiden mukaan.

Tilajayrityksessä pyritään siirtymään yhä enemmän niin sanottuun parametriseen suunnitteluun. Parametrisella suunnittelulla tarkoitetaan tässä geometriamallin ja muiden tärkeiden tietojen koostamista erilaisiksi parametreiksi (esimerkiksi pituus, leveys, betonin lujuus, kuormat), jotka voidaan syöttää eteenpäin esimerkiksi FEM-laskentaan tai vaikka Teklaan rakennesuunnitelmien piirtämistä varten. Rakennemallin kotina pysyy kuitenkin koko ajan parametrinen suunnitelma, ja mahdolliset muutokset rakennemalliin tehdään vain siihen, jolloin tietosisällön hallinta on helpompaa. Ihannetapauksessa tulevaisuudessa paalulaattasuunnitelmat, etenkin yksinkertaisemmille paalulaatoille, voitaisiin tehdä ja optimoida kokonaan parametriseen suunnittelun avulla. Kaikissa paalulaatoissa pitää kuitenkin aluksi selvittää pystykuormien vaikutukset rakenteeseen ja valita paalukoot ja -välit. Tämmöiseen selvitykseen laskentapohja on yksinkertaisille paalulaatoille nopeampi väline kuin parametrinen suunnittelu, joka ei ainakaan toistaiseksi taida olla niin nopeaa ja monipuolista että sen avulla voisi optimoida teknis-taloudellisesti järkevimmän rakenteen ”itsestään”. Lisäksi esimerkiksi raudoituksen ja kustannusten laskennan tuominen osaksi parametrista suunnittelua tuntuu aika raskaalta. Jatkokehityksenä parametrista suunnittelua paalulaatoille voisi rakentaa ensi vaiheessa niin, että paalulaatan kaikki tiedot kerätään lomakkeella (esimerkiksi laskentapohja), sisältäen geometriatietojen lisäksi myös paalut ja kuormitukset. (Kuormitustapauksina pitäisi huomioida

sekä kaikki laatan vaatimat kuormitusyhdistelyt, että kaikki paalun vaatimat kuormitusyhdistelyt, koska nämä ovat keskenään erilaisia esimerkiksi osavarmuuslukujen osalta). Näiden tietojen avulla parametrinen suunnittelu voisi tuottaa FEM-analyysin ja poimia sieltä oleelliset tulokset esimerkiksi takaisin laskentapohjaan tulosten automaattista vertailua varten. Jos FEM-analyysin tulos on hyvä, seuraavan vaiheena voisi olla raudituspiirustusten tuottaminen esimerkiksi Teklalla parametrisen suunnitelman pohjalta. Ihanteellista olisi, jos myös rakennelaskemaselostukseen voisi poimia parametrisen suunnittelun avulla oleelliset lähtötiedot sekä mitoituksen laskentatulokset ja FEM-mallin tulokset, jolloin selostuksen lopullinen kirjoittaminen suunnittelijan toimesta nopeutuisi ja virheet tietosisältöjen välillä suunnitelman eri osissa vähenisivät.

Lähteet

- 1 Liikenneviraston ohjeita 5/2014 *Paalulaattojen ja paaluhatturakenteiden suunnittelu* .
- 2 Toriseva, Tuomas, *Pilarilaattojen suunnittelu Eurokoodien mukaan*, diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2014.
- 3 Martinmäki, Tomi, 2016. *Paalulaatan optimointi*, diplomityö, Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- 4 RIL 156 *Maarakennus*, 1995.
- 5 Kuva Ramboll, projektiaineisto.
- 6 BY211 *Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja - osa 2*, BY-Koulutus Oy, 2015. s. 179
- 7 Kuva Ramboll, suunnittelija Augustin Ceilier, 4.8.2017.
- 8 Jokinen, Juho, *Pitkä tieosuus uhkaa romahtaa Kehä III:lla*, s. A22, Helsingin Sanomat, 6.12.2018.
- 9 Liikenneviraston jakama kuva Flickr yhteisöpalvelusivuston kautta. <<https://www.flickr.com/photos/liikennevirasto/7005290227/in/photostream/>>. Luettu 24.11.2018.
- 10 RIL 263-2014 *Kaivanto-ohje*, 2014.
- 11 Eurokoodi help desk Suomen verkkoaineisto, betonirakenteisiin liittyvä sähköinen materiaali: *Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan: Pilarilaatat* (26.1.2010). <http://www.eurocodes.fi/1992/paasivu1992/sahkoinen1992/Leaflet_7_Pilarilaatat.pdf>. Luettu 15.10.2018.
- 12 Liikenneviraston ohjeita 13/2017: *Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu* – NCCI 7.
- 13 Liikenneviraston ohjeita 31/2017: *Eurokoodin soveltamisohje Betonirakenteiden suunnittelu* – NCCI 2.
- 14 SSAB:n kotisivut: Ladattavat tiedostot, RR®- ja RD®-paalut – Suunnittelu- ja asennusohjeet, <<https://www.ssab.fi/tuotteet/terasluokat/infrastruktuuri/infrastructure-downloads>>. Luettu 30.10.2018
- 15 RIL 254-2016, *Paalutusohje 2016*.

- 16 Liikenneviraston ohjeita 24/2017: *Eurokoodin soveltamisohje Siltojen kuormat ja suunnitteluperusteet – NCCI 1.*
- 17 SFS-EN 1991-2, *Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. OSA 2: Siltojen liikennekuormat.*
- 18 Helsingin kaupungin verkkosivut: Rakentaminen, ohjeet: *Yleisten alueiden alle tehtävien rakenteiden suunnitteluohjeet (Liikenne- ja katusuunnittelun ohje)* <<https://www.hel.fi/hel2/hkr/julkaisut/ohjeet/maanallerakentamisohje.pdf>>. Luettu 27.12.2018.
- 19 Betoniteollisuus ry:n verkkosivut, ladattavat ohjeet: *RT-Betonipaalut Tuotelehti PO-2016 mukaiseen paalutukseen.* <<https://betoni.com/wp-content/uploads/2018/09/RT-Betonipaalut-Tuotelehti-PO-2016.pdf>>. Luettu 13.11.2018.
- 20 Betoniteollisuus ry:n verkkosivut, julkaisut: Laitakari, Antti, *Teräsbetonipaalujen ja RR-paalujen hintavertailu,* <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/Paaluseminaari-2011-kustannusvertailu-2.pdf>. Luettu 15.1.2019.
- 21 Hoffman, E., Gustafson, D., *Structural Design Guide to ACI Building Code*, 1998.
- 22 SFS-EN 1992-1-1, *Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, OSA 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.*
- 23 BS 8110-1: 1997 Structural use of concrete — Part 1: Code of practice for design and construction, 1997.
- 24 C.E. Reynolds, J.C. Steedman, *Examples of the Design of Reinforced Concrete Buildings to BS8110*, 4th edition, 2017.
- 25 Moss, R., Brooker, O., *How to Design Concrete Structures using Eurocode 2, A cement and concrete industry publication*, The Concrete Centre 2006, <www.concretecenter.com>. Luettu 13.1.2019.
- 26 *Guide to the Design and Construction of Reinforced Concrete Flat Slabs, Technical Report No. 64*, The Concrete Society 2007.
- 27 Liikenneviraston verkkosivut, julkaisut. <https://julkaisut.liikennevirasto.fi/sillat/julkaisut/kustannusarvio_2008_b.pdf>. Luettu 29.12.2018.
- 28 Betoniterästäkkuri Ferro Trade Oü:n verkkosivut. <<https://ferro.fi/htpainot/>>. Luettu 14.2.2019.

Ulokepalkkien optimaalinen ulokkeen pituus

Alla rakennemallit 2-, 3-, 4- ja 5-aukkoisille peilisymmetrisille tasaisesti kuormitetuille ulokepalkeille. Ulokkeen pituus on manuaalisesti optimoitu sellaiseksi, että reunimmaisen tuen tukimomentti ja reunimmaisen kentän kenttämomentti ovat yhtä suuret. Jännemitana on pidetty vakiona 1000 mm, kuormitus kaikissa palkeissa on vakio, samoin kuin palkin materiaali ja kuormitusleveys. Rakennemalli on tehty PupaX5 v.1.22-ohjelmalla.

5-aukkoinen palkki

Uloke/jm	Tuki 1	Kenttä 1	Tuki 2	Kenttä 2	Tuki 3	Kenttä 3
0,3	-0,045	0,056	-0,094	0,037	-0,082	0,043
0,31	-0,048	0,054	-0,093	0,038	-0,082	0,043
0,32	-0,051	0,054	-0,092	0,038	-0,082	0,043
0,325	-0,053	0,053	-0,092	0,038	-0,082	0,043
0,33	-0,054	0,052	-0,091	0,038	-0,082	0,043
0,34	-0,058	0,051	-0,09	0,039	-0,082	0,043
0,35	-0,061	0,05	-0,089	0,039	-0,082	0,043
0,36	-0,065	0,048	-0,089	0,039	-0,083	0,042
0,37	-0,068	0,047	-0,088	0,4	-0,083	0,42
0,38	-0,072	0,046	-0,087	0,04	-0,083	0,042
0,39	-0,076	0,044	-0,086	0,041	-0,083	0,042
0,4	-0,08	0,043	-0,085	0,041	-0,083	0,042
0,41	-0,084	0,041	-0,084	0,041	-0,084	0,041

4-aukkoinen palkki

Uloke/jm	Tuki 1	Kenttä 1	Tuki 2	Kenttä 2	Tuki 3	Kenttä 3
0,3	-0,045	0,056	-0,095	0,039	-0,078	0,039
0,31	-0,048	0,054	-0,094	0,039	-0,079	0,039
0,32	-0,051	0,053	-0,093	0,039	-0,079	0,039
0,324	-0,052	0,052	-0,093	0,039	-0,079	0,039
0,33	-0,054	0,052	-0,092	0,039	-0,079	0,039
0,34	-0,058	0,051	-0,091	0,039	-0,08	0,04
0,35	-0,061	0,049	-0,09	0,04	-0,08	0,04
0,36	-0,065	0,048	-0,089	0,04	-0,081	0,04
0,37	-0,068	0,047	-0,088	0,04	-0,081	0,04
0,38	-0,072	0,045	-0,087	0,041	-0,082	0,041
0,39	-0,076	0,044	-0,086	0,041	-0,083	0,041
0,4	-0,08	0,043	-0,085	0,041	-0,083	0,041
0,41	-0,084	0,041	-0,084	0,041	-0,084	0,041

3-aukkoinen palkki

Uloke/jm	Tuki 1	Kenttä 1	Tuki 2	Kenttä 2	Tuki 3	Kenttä 3
0,3	-0,045	0,057	-0,091	0,034	-0,091	0,057
0,31	-0,048	0,056	-0,091	0,034	-0,091	0,056
0,325	-0,053	0,053	-0,09	0,035	-0,09	0,053
0,32	-0,051	0,054	-0,09	0,035	-0,09	0,054
0,33	-0,054	0,053	-0,089	0,036	-0,089	0,053
0,34	-0,058	0,052	-0,089	0,036	-0,089	0,052
0,35	-0,061	0,05	-0,088	0,037	-0,088	0,05
0,36	-0,065	0,049	-0,087	0,038	-0,087	0,049
0,37	-0,068	0,047	-0,087	0,038	-0,087	0,047
0,38	-0,072	0,046	-0,086	0,039	-0,086	0,046
0,39	-0,076	0,044	-0,085	0,04	-0,085	0,044
0,4	-0,08	0,043	-0,084	0,041	-0,084	0,043
0,41	-0,084	0,041	-0,084	0,041	-0,084	0,041

2-aukkoinen palkki

Uloke/jm	Tuki 1	Kenttä 1	Tuki 2	Kenttä 2	Tuki 3	Kenttä 3
0,3	-0,045	0,052	-0,103	0,052	-0,045	--
0,31	-0,048	0,051	-0,101	0,051	-0,048	--
0,317	-0,05	0,05	-0,1	0,05	-0,05	--
0,32	-0,051	0,05	-0,1	0,05	-0,051	--
0,33	-0,054	0,049	-0,098	0,049	-0,054	--
0,34	-0,058	0,048	-0,097	0,048	-0,058	--
0,35	-0,061	0,047	-0,095	0,047	-0,061	--
0,36	-0,065	0,046	-0,093	0,046	-0,065	--
0,37	-0,068	0,045	-0,091	0,045	-0,068	--
0,38	-0,072	0,044	-0,089	0,044	-0,072	--
0,39	-0,076	0,043	-0,087	0,043	-0,076	--
0,4	-0,08	0,042	-0,085	0,042	-0,08	--
0,41	-0,084	0,041	-0,083	0,041	-0,084	--

1-aukkoinen palkki

Uloke/jm	Tuki 1	Kenttä 1	Tuki 2	Kenttä 2	Tuki 3	Kenttä 3
0,3	-0,045	0,08	-0,045	--	--	--
0,31	-0,048	0,077	-0,048	--	--	--
0,32	-0,051	0,074	-0,051	--	--	--
0,33	-0,054	0,071	-0,054	--	--	--
0,34	-0,058	0,067	-0,058	--	--	--
0,35	-0,061	0,064	-0,061	--	--	--
0,352	-0,062	0,063	-0,062	--	--	--
0,36	-0,065	0,06	-0,065	--	--	--
0,37	-0,068	0,057	-0,068	--	--	--
0,38	-0,072	0,053	-0,072	--	--	--
0,39	-0,076	0,049	-0,076	--	--	--
0,4	-0,08	0,045	-0,08	--	--	--
0,41	-0,084	0,041	-0,084	--	--	--