



Paikallavaluholvien raudoituksen suunnittelu

Lauri Östring

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2023

Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma

ÖSTRING, LAURI:
Paikallavaluholvien raudoituksen suunnittelu

Opinnäytetyö 86 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Kesäkuu 2023

Tässä opinnäytetyössä laadittiin paikallavaluholvin raudoitussuunnittelusta prosessikaavio, joka on tarkoitettu ohjelmistokehityksen lähtöaineistoksi. Paikallavaluholvin raudoitussuunnittelu on haastava tehtävä, jossa täytyy suunnitella laatan raudoitusjärjestelmä rakennemitoituksen tulosten sekä suunnittelustandardin vaatimusten perusteella. Lisäksi on huomioitava järjestelmän taloudellisuus sekä raudoitustyön toteutus. Käytännössä raudoitussuunnittelu sisältää laatan todellisten raudoitusten valinnan sekä raudoituspiirustusten laadinnan. Laatan rakenneanalyysi tehdään nykyään usein FEM-laskentaohjelmistolla. Laskentatulosten hyödyntämiseen liittyvä tiedonsiirto ohjelmistosta toiseen on tällä hetkellä monesti käsityötä.

Työn tilaajana oli A-Insinöörit Suunnittelu Oy. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena sekä hyödyntämällä kuvitteellisia esimerkkitapauksia, jotka edustavat tyypillisiä paikallavaluholvien suunnittelukohteita. Laadittua aineistoa arvioitiin asiantuntijahaastatteluissa.

Prosessikaavio raudoitussuunnittelusta laadittiin siten, että se ei ole riippuvainen käytetyistä ohjelmistoista, vaan sisältää suunnitteluprosessin yleisellä tasolla. Lisäksi laadittiin esimerkkitapausten perusteella erillinen prosessikaavio, jossa selostetaan tiedonsiirtoa ohjelmistojen rajapinnoissa. Kirjallisuustutkimuksen tuloksena tähän raporttiin on kerätty suunnittelustandardeista paikallavaluholveihin liittyvät periaatteet, joihin prosessikaavion sisältö perustuu.

Opinnäytetyön tavoite saatiin täytettyä. Asiantuntijahaastatteluissa todettiin työssä laadittu aineisto sopivaksi lähtökohdaksi ohjelmistokehitykselle. Työn tulosten perusteella tehtiin ehdotus automatisoitujen työkalujen kehityksestä yrityksen kehitysryhmälle. Ehdotuksessa kehitystyö on jaettu siten, että ensimmäisenä toteutetaan automatisointi holvin vaakaraudoitusten valintaan ja raudoituspiirustusmerkintöjen luomiseen. Tämän jälkeen on harkittava työkalujen kehittämistä ohjelmoinnin kannalta haastavista osuuksista, joihin kuuluvat leikkaus- ja lävistysraudoitusten suunnittelu.

Työn päätuloksena saatuja prosessikaavioita ei julkaista, mutta tuloksina julkaistaan niiden sisältö ja rakenne pääosin. Lisäksi raportissa on kerrottu tutkimuksen aikana esille nousseet haasteet rakennemitoituksessa sekä siitä saatavien tulosten automatisoinnissa. Haasteet perustuvat esimerkkitapausten analysointiin, niitä on pohdittu erityisesti ohjelmistokehityksen näkökulmasta.

Asiasanat: teräsbetonirakenteet, paikallavaluholvi, raudoitussuunnittelu, prosessikaavio

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Master's degree Programme in Construction Engineering

ÖSTRING, LAURI:
Cast-in-place Reinforced Concrete Slab Reinforcement Design

Bachelor's thesis 86 pages, appendices 4 pages
June 2023

A flowchart of the reinforcement design process of cast-in-place concrete slabs was compiled in this thesis. The purpose of the flowchart is to benefit the development of automated design tools. Reinforcement design of cast-in-place slabs is a challenging task for structural engineers. The reinforcement must be designed according to the structural design and the design standard. Additionally, the economic aspects and reasonability in terms of construction must be considered. In practice, this consists of selecting the actual reinforcement and designing the reinforcement plans. The structural design of cast-in-place slabs is often carried out using FEM-analysis. Currently the utilization of the results involves transferring data across software mainly by hand.

The study was done for A-Insinöörit Suunnittelu Oy as a literature study and utilizing examples. These examples represent typical design cases of cast-in-place slabs. The compiled material was evaluated in expert interviews.

The flowchart contains the design process in a general form, instead of being dependent on design software. A separate flowchart was made about the process between the design software used in the examples. Principles of reinforcement design in cast-in-place slabs were compiled according to the literature study. The flowchart follows these principles.

The aim of this study was achieved. The compiled material was stated in the interviews as a suitable starting point for automated design tool development. A suggestion based on to the findings of this study was presented to the development team. In the suggestion the development was broken down into phases. The first phase contains the design of longitudinal reinforcement. The later phases are challenging to automate, containing shear and punching shear reinforcement design. Development of the later phases must be assessed after the implementation of the first phase.

The main result of this study are the compiled flowcharts, which are not published. The structure and principal content of these flowcharts are published in this report. Additionally, the challenges in structural design that emerged during the study have been documented in this report. The challenges are based on the examples and have been considered specifically from the viewpoint of automated design tool development.

Key words: reinforced concrete structures, cast-in-place slab, reinforcement design, flowchart

SISÄLLYS

LYHENTEET JA TERMIT	6
1 JOHDANTO	7
1.1 Tausta	7
1.2 Tavoite	8
1.3 Suoritus	8
1.4 Rajaukset	9
2 TEORIA	11
2.1 Rakennesuunnittelun tyypillinen prosessi mallinnettavassa kohteessa	11
2.1.1 Rakenteiden mitoitus	12
2.1.2 Rakenteiden mallinnus	13
2.1.3 Piirustusten laadinta	16
2.2 Paikallavaluholvin mitoitusteoria	16
2.2.1 Paikallavaluholvin toteutus	16
2.2.2 Mitoitusperusteet	19
2.2.3 Voimasuureiden laskenta	22
2.2.4 Taivutusmitoitus	26
2.2.5 Leikkausmitoitus	30
2.2.6 Lävistysmitoitus	32
2.2.7 Käyttörajan tarkastelut	35
2.3 Paikallavaluholvin raudoitus	39
2.3.1 Raudoituksen toteutustavat	40
2.3.2 Vähimmäisraudoitus ja jakoraudoitus	41
2.3.3 Raudoitustankojen väli	41
2.3.4 Kevennyskaistat	41
2.3.5 Kenttäraudoituksen ankkurointi tuelle	43
2.3.6 Tukirraudoitus	44
2.3.7 Vapaan reunan raudoitus	46
2.3.8 Reikien vaikutus	47
2.3.9 Raudoituksen taivutukset	47
2.3.10 Raudoituksen jatkokset	49
2.3.11 Tankoniput	52
2.4 Algoritmiavusteinen suunnittelu teräsbetonirakenteiden suunnittelussa	53
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	55
3.1 Kirjallisuustutkimus	55

3.2	Esimerkkitapaukset paikallavaluholveista	55
3.2.1	Laskentaoletukset ja käytetyt ohjelmistot	56
3.3	Raudoitussuunnittelun prosessikaavio	57
3.4	Tulosten raportointi ja jatkokehitys	57
3.5	Asiantuntijahaastattelut	57
4	TULOKSET	59
4.1	Kirjallisuustutkimuksen tulokset.....	59
4.2	Paikallavaluholvin raudoitussuunnittelun prosessi	60
4.2.1	Prosessikaavio raudoitussuunnittelusta.....	60
4.2.2	Prosessikaavio ohjelmistojen välisestä prosessista.....	66
4.3	Esimerkkitapausten tulokset.....	67
4.4	Rakennemitoituksen haasteet	67
5	POHDINTA	71
5.1	Tutkimuksen tavoitteiden toteutuminen	71
5.2	Pohdinta	72
5.2.1	Tutkimuksen rajaukset.....	75
5.3	Johtopäätökset.....	75
5.4	Ehdotukset jatkokehitykseen.....	76
	LÄHTEET	78
	LIITTEET.....	82

LYHENTEET JA TERMIT

FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
BIM	Building Information Model, tietomallinnus
YTV	Yleiset tietomallivaatimukset, julkaisusarja
CAD	Computer-aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
LVIST	Lämpö-, vesi-, ilmanvaihto-, sähkö- ja teletekniikka
DXF	Drawing Exchange Format, CAD-tiedostomuoto
DWG	AutoCAD Drawing Database, CAD-tiedostomuoto
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
XD	Betonirakenteen rasitusluokka, muun kuin meriveden aiheuttama korroosio
XF	Betonirakenteen rasitusluokka, jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä
XS	Betonirakenteen rasitusluokka, meriveden aiheuttama korroosio

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Rakennesuunnitteluprojektin sisältöön kuuluu paljon erilaisia tehtäviä, jotka vaativat suunnittelijoilta laaja-alaista osaamista. Työn tehokkuuden ja laadun varmistamiseksi työtehtävät usein jaetaan projektiryhmässä henkilöiden osaamisalueiden mukaan.

Valtaosassa rakennusprojekteja mallintaminen on ollut jo pitkään tärkeä osa kohteiden suunnittelua. Rakennesuunnittelun näkökulmasta kohteiden mallintaminen helpottaa yhteensovitusta ja parantaa suunnittelun laatua. Rakennesuunnittelijoiden osaamistaso mallintamisessa on korkealla, mutta mallintavien suunnitteluohjelmien käytössä on kuitenkin haasteita, erityisesti työskentelyn tehokkuudessa. Mallinnettavassa projektissa piirustusten laatiminen on edelleen olennainen osa rakennesuunnittelua.

Mallinnettavassa kohteessa rakennesuunnittelu koostuu mm. rakennejärjestelmän ja sen osien määrittelystä, rakennemallien luomisesta, kuormitusten määrittelystä, rakenneosien mitoituksesta voimasuureiden perusteella, rakenteiden mallinnuksesta ja rakennepiirustusten laadinnasta. Näitä tehtäviä suoritetaan projektin eri suunnitteluvaiheissa kyseisen vaiheen vaatimassa laajuudessa.

On tyypillistä, että teräsbetonisen rakenneosan raudoituksen tarkempi suunnittelu tehdään mallinnuksen yhteydessä. Tällöin usein myös suunnittelija vaihtuu työnjaon ja osaamisalueiden takia. Tällöin työtä jatkava suunnittelija saa lähtötiedokseen rakenneosan mitoituksen tulokset sekä rakenteen tiedot ja jatkaa niistä valmiiseen piirustukseen saakka. Tärkeää on, että suunnittelija tuntee raudoituksen suunnittelun vaatimukset ja ottaa ne huomioon lopullisessa piirustuksessa.

Hyvä esimerkki tällaisesta rakennesuunnittelun tehtävästä on paikallavaluholvin raudoituksen suunnittelu. Paikallavaluholveiksi kutsutaan teräsbetonisia paikalla valettuja tasapaksuja yhtenäisiä massiivilaattoja. Jatkossa tässä työssä laatala

ja paikallavaluholvilla tarkoitetaan jännittämätöntä harjateräsraudoitettua teräs-betonilaattaa. Paikallavaluholvin suunnittelun edetessä ollaan usein tilanteessa, jossa raudoitusmäärät on laskettu FEM-laskentaohjelmalla. Tästä jatketaan suunnittelemalla todellinen raudoitusjärjestelmä ja laatimalla raudoituspiirustukset. FEM-laskentaohjelmaan on tällaisessa tilanteessa jo tehty laskentamalli ja siitä löytyvät mitoituksen tulokset, mutta toistaiseksi tiedon siirto laskentaohjelmasta mallinnus- tai piirto-ohjelmaan on käsityötä.

1.2 Tavoite

Tutkimuksen tavoitteena on laatia paikallavaluholvien raudoitussuunnittelusta prosessikaavio. Prosessikaavio laaditaan siltä näkökannalta, että sitä voidaan hyödyntää ohjelmistokehityksen lähtöaineistona.

Tutkimuksen perusteella tehdään ehdotus suunnittelutyökalujen jatkokehityksestä yrityksen kehitysryhmälle. Tähän liittyen selvitetään tapoja siirtää tietoa automatisoidusti laskentaohjelmasta raudoitussuunnitteluun ja siitä eteenpäin piirustusten laatimiseen.

1.3 Suoritus

Tutkimuksessa perehdytään paikallavaluholvien raudoituksen suunnitteluun, mallinnukseen ja piirustusten laatimiseen. Tätä kokonaisuutta käsitellään erityisesti sellaisen tilanteen kannalta, jossa rakenteellinen mitoitus on jo tehty ja raudoitussuunnittelua jatketaan piirustuksen valmistumiseen saakka.

Tutkimuksessa tutustutaan aiheesta kirjoitettuun kirjallisuuteen. Kirjallisuustutkimuksen perusteella kerätään raudoitussuunnitteluun liittyvät periaatteet tähän raporttiin sekä hyödynnetään niistä saatua tietoa tutkimuksen muissa vaiheissa.

Tutkimuksessa laaditaan kuvitteellisia esimerkkitapauksia paikallavaluholveista, joille suoritetaan rakennemitoitus sekä raudoitussuunnittelu. Tämän perusteella analysoidaan raudoitussuunnittelun prosessia sekä mahdollisuuksia sen automatisointiin.

Kirjallisuustutkimuksessa kerätyn aineiston sekä esimerkkitapausten perusteella laaditaan prosessikaavio paikallavaluholvien raudoitusten suunnittelusta. Lisäksi laaditaan erillinen kaavio esimerkkitapauksissa käytettyjen ohjelmistojen välisestä prosessista.

1.4 Rajaukset

Teräsbetonirakenteen mitoitus teoriasta käsitellään vain paikallavaluholveihin ja niiden raudoitussuunnitteluun liittyvät periaatteet. Työn tarkoituksena ei ole tutkia mitoitus teorian perusteita tarkemmin, vaan esittää siinä huomioon otettavat ilmiöt. Esimerkkitapauksissa FEM-laskennan tulokset eivät ole tässä tutkimuksessa oleellisia ja laskennan oikeellisuuteen ei oteta tutkimuksessa tarkemmin kantaa.

Paikallavaluholvien raudoituksen suunnittelun prosessia tutkitaan sekä selvitetään sen sisältämää tietoa automatisoinnin mahdollisuuksien selvittämiseksi. Uudenlaisia menetelmiä tutkitaan vain esimerkinomaisesti, työn tarkoituksena ei ole laatia valmiita työkaluja vaan tukea tulevaa kehitystyötä. Prosessia tutkitaan sellaisen kohteen periaatteella, jossa mitoituslaskenta on tehty FEM-analyysillä.

Raudoitussuunnittelun prosessikaavio sekä kaavio esimerkkitapausten ohjelmistojen välisestä prosessista laaditaan siten, että ne sisältävät suunnitteluprosessin yleisellä tasolla. Prosessikaavioihin ei sisällytetä ohjelmoinnin vaatimia tietoja, kuten tietosisältömäärittelyitä.

Algoritmiavusteisiin suunnittelumenetelmiin liittyviin julkaisuihin tutustutaan vain siltä kannalta, mikä on tämänhetkinen tilanne asiaan liittyvässä tutkimuksessa. Tutkimuksessa käydään läpi yksittäisiä opinnäytetöitä aiheesta, mutta laajaa kirjallisuustutkimusta ei tehdä.

Tutkimuksessa käsitellään paikallavaletuista teräsbetoniholveista vain tasapak-suja umpilaattoja, sen ollessa talorakenteissa yleisin laattatyypä. Erilaiset ripa-

ja arinalaatat rajataan pois tutkimuksesta niiden suunnittelun ollessa merkittävästi poikkeavaa tasapaksujen laattojen suunnittelusta.

Työssä ei käsitellä jännitetyjä rakenteita. Jännitettyjen rakenteiden mitoitus poikkeaa merkittävästi perinteisesti raudoitettujen rakenteiden suunnittelusta ja on tutkimuksen laajuuden ulkopuolella. Valmisosina rakennettuja laattarakenteita ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

Tankonippujen käyttö laatoissa on harvinaista, joten niitä ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

2 TEORIA

Kuten aiemmin jo mainittiin, rakennesuunnitteluprojektin sisältöön kuuluu paljon erilaisia tehtäviä, jotka vaativat laaja-alaista osaamista. Projektia varten kerätään projektiryhmä, jonka kesken työtehtävät jaetaan henkilöiden osaamisalueiden mukaan, jotta työskentely olisi tehokasta ja korkealaatuista. Ryhmän koko ja henkilöstö yleensä vaihtelevat jonkin verran projektin aikana riippuen työn laajuudesta, työvaiheesta, henkilöstömuutoksista tai muista syistä. Rakennuksen osien suunnittelun siirtyessä työtehtävästä toiseen on tärkeää, että tekijät tuntevat suunnittelun periaatteet ja vaatimukset omaa tehtäväänsä varten.

2.1 Rakennesuunnittelun tyypillinen prosessi mallinnettavassa kohteessa

Rakennesuunnittelun prosessin lähtökohtana ovat lähtötiedot, jotka saadaan mm. tilaajalta, arkkitehdiltä sekä muilta suunnittelualoilta. Näiden perusteella rakennesuunnittelun tehtävänä on suunnitella toimiva, kestävä, terveellinen sekä turvallinen rakennus. Prosessin lopputuloksena ovat rakennepiirustukset sekä nykyisin myös rakennemalli kuuluu usein osaksi rakennesuunnittelun loppuaineistoa. (Nykyri 2020, 12).

Taulukossa 1 on esitetty pilarilaatan rakennesuunnittelun kulku. Siinä esitettyjä suunnittelun vaiheita voidaan soveltaa pääpiirteittäin koko rakennesuunnitteluprojektin prosessin vaiheiksi.

Taulukko 1. Pilarilaatan suunnittelun kulku (RT 82-10814, 10).

LÄHTÖTIEDOT	SUUNNITTELUN VAIHE	TULOSTUS
Arkkitehdin 1:200 pohjapiirustukset (tilajärjestelyt) LVIST -nousukuiluluonnos Perustamisolosuhteet	Rungon alustava suunnittelu	Ehdotus pilariruuduksi Ehdotus kantavista ja osastoivista seinistä Liikuntasaumamat
Arkkitehdin alustavat leikkaukset	Rakennevaihtoehtojen suunnittelu	Alustavia rakenneyksityis kohtapiirustuksia
Yleiset työmaatekniikan vaatimukset	Rungon päägeometrian määrittely	Rakenneluonnos 1:100 Rakennetyypit
Urakkamuoto Urakkarajat	Rakentamisen valmistelu	Urakka-asiakirjat
Työmaatekniikan vaatimukset, määräykset, ohjeet	Toteutussuunnittelu	Rakennustekniset työpiirustukset

Taulukossa 1 esitettyjen suunnitteluvaiheiden aikana tehdään luvussa 2.1.1 esitettyjä rakenteiden mitoitusliittymiä tehtäviä. Lisäksi mallinnettavassa kohteessa tehdään rakenteiden mallinnusta sekä laaditaan rakennepiirustuksia kunkin vaiheen vaatimassa laajuudessa, kuten luvuissa 2.1.2 ja 2.1.3 on kerrottu.

2.1.1 Rakenteiden mitoitus

Rakenteiden mitoitus perustuu Eurokoodi-järjestelmään, jotka ovat eurooppalaisia kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia standardeja. Eurokoodeissa määritellään, miten rakenteita suunnitellaan lähtien periaatteista ja kuormien määrittelystä aina yksityiskohtiin saakka. Eurokoodeja täydennetään kansallisilla liitteillä sekä kansallisesti laadituilla ohjeilla. (Eurocodes n.d.). Eurokoodeissa määritellään miten erilaisten rakenneseosien murtorajatilojen kestävyys ja käyttörajatilojen tarkastelut lasketaan.

Rakenneseosan rakenneseosanalyysia varten Eurokoodeissa annetaan vain periaatesäännöt ja yksityiskohtainen soveltaminen esitetään muissa tietolähteissä kuten oppikirjoissa (Betoniteollisuus n.d. c, 1). Rakenneseosanalyysimenetelmä jää näin suunnittelijan päätettäväksi. Rakenneseosanalyysistä saadaan rakenneseosien voi-

masuureet, joiden perusteella mitoitus voidaan tehdä. Päteviä analyysimenetelmiä rakenneosalle on usein monia, joista suunnittelijan on valittava parhaiten soveltuva sekä työmäärällisesti järkevä vaihtoehto. Rakenneanalyysimenetelmiin kuuluu käsinlaskettavia sekä ohjelmistoilla laskettavaksi tarkoitettuja menetelmiä.

Paikallavaluholville soveltuvia analyysimenetelmiä sekä eurokoodien mukaista mitoitusta käsitellään tässä työssä myöhemmin.

Rakenteiden mitoitusta varten rakennesuunnittelija:

- valitsee rakennuksen runkojärjestelmän,
- määrittelee runkojärjestelmän rakenneosat,
- muodostaa rakennemallit rakenneosille,
- määrittelee ja laskee kuormitukset,
- laskee rakenneosien voimasuureet ja
- näiden perusteella mitoittaa rakenneosat (Nykyri 2020, 15.).

Näitä tehtäviä suoritetaan taulukossa 1 esitettyjen suunnitteluvaiheiden aikana kunkin vaiheen vaatimassa laajuudessa. Rakenteiden mitoitus siis etenee rakennesuunnitteluprosessin mukana suuremmasta kokonaisuudesta pienempään, lopulta päätyen rakenneosien sekä yksityiskohtien mitoitukseen. Rakennemallia on saatettu alkaa jo laatimaan esimerkiksi rungon päägeometrian määrittelyssä, jolloin rakenteiden mitoitusta tehdään mallinnuksen kanssa limittäin.

2.1.2 Rakenteiden mallinnus

Tietomallintavassa rakennesuunnittelussa rakennuksesta laaditaan mallinnusohjelmaan virtuaalinen malli, joka tavanomaisesti sisältää rakennuksen kantavan rungon sekä sekundäärisiä rakenneosia sovituissa laajuudessa. Eri suunnittelu-alojen, kuten arkkitehdin ja talotekniikan tietomallit yhdistetään yhdistelmämalliksi, joka sisältää kaikki rakennukseen kuuluvat osat ja vastaa rakennuksesta laadittuja piirustuksia. Tietomalleja ja yhdistelmämallia voidaan hyödyntää rakennuksen suunnittelussa ja rakentamisessa sekä loppukäyttäjän toimesta tietolähteenä esimerkiksi huoltotoimenpiteitä varten (Yleiset tietomallivaatimukset 2012,

5.). Rakennesuunnitteluun kuuluvaa tietomallintamista kutsutaan tässä työssä lyhennetyksi mallintamiseksi.

Tietomallin sisällöstä ja tarkkuustasosta on laadittu COBIM-hankkeessa Yleiset tietomallivaatimukset 2012 (YTV) julkaisusarja, joka koostuu yleisestä osasta sekä eri suunnittelualoja koskevista osista. Mallin sisältö- ja tarkkuusvaatimukset on jaoteltu hankkeen eri vaiheiden mukaan hankkeen käynnistyksestä vastaanottoon saakka. Ohjeiden mukaan malli tarkentuu siirryttäessä vaiheesta seuraavaan. Vähimmäisvaatimukset on aina täytettävä ja lisäksi YTV sisältää listauksia, joista tilaaja voi valita haluamansa sisällöt yleisten vaatimusten lisäksi. Näitä yhteisiä ohjeita käyttämällä tietomallinnettavan kohteen suunnittelusopimuksessa voidaan mallivaatimukset esittää sitovasti ja yhdenmukaisesti. (Yleiset tietomallivaatimukset 2012, 5). YTV:ssä esitetyt suunnitteluvaiheet vastaavat taulukossa 1 esitettyjä rakennesuunnitteluprosessin vaihteita.

Trimble Solutions Corporationin omistama Tekla Structures on rakennesuunnittelun toimialalla käytössä oleva mallinnusohjelma. Tekla on erityisesti kantavien rakenteiden mallintamiseen ja piirustustuotantoon kehitetty BIM-ohjelmisto. Teklassa on mahdollista tehdä sekä mallinnus, että rakennepiirustukset. (Trimble Solutions. n.d. a).

Teklan mallinnuksen peruseriaate on, että malliin luodaan ensin rakenneosia, jotka detaljoidaan ja varustellaan tarpeen mukaan. Osista voidaan tämän jälkeen laatia esimerkiksi mitta- ja raudituspiirustukset tai esivalmistetuista osista valmistuspiirustukset. Malliosien luomiseen käytettävät perustyökalut ovat sidottuja tietomallintamiseen, sillä erilaisille rakenneosille on omat luontityökalunsa. Perustukset, palkit, pilarit ja laatat luodaan kaikki omilla työkaluillaan, jolloin mallin osille saadaan tietosisältö oikein tietomallintamisen näkökannalta. (Trimble Solutions. n.d. b).

Teklan ominaisuuksiin kuuluu piirustusten tuottaminen mallin perusteella. Työkentely Teklassa mallintamisen ja piirustustuotannon välillä jakautuu ”mallipuolelle” ja ”kuvapuolelle”. ”Mallipuolella” tehdään kaikki mallinnus ja ominaisuuksien määrittely mallin osille. ”Kuvapuolella” laaditaan mallissa olevista osista piirustuk-

sia. Tämän jaon takia mallinnuksen työjärjestys etenee niin, että ensin mallinnetaan rakenteita ja sen jälkeen niistä laaditaan piirustukset. (Trimble Solutions. n.d. c).

Perustyökalujen lisäksi Teklassa on suuri määrä mallinnustyötä helpottavia sisäisiä sovelluksia, kuten komponentteja ja plugin-lisäosia. Näillä voidaan mallinnustyötä nopeuttaa luomalla monia toisistaan riippuvia osia yhdellä työkalulla sekä parhaassa tapauksessa automatisoida mallinnusta hyvinkin pitkälle. Käyttäjät ja yritysten kehitysryhmät pystyvät luomaan omia sovelluksiaan, joko komponentteina Teklan sisäisessä ympäristössä tai plugin-lisäosia Teklan Open API-ohjelmointirajapinnassa. Näiden välille voidaan tehdä yksinkertaistettu rajausta siten, että peruskäyttäjä pystyy luomaan omia komponentteja Teklan sisäisillä toimintoilla omaan tarpeeseen. Plugin-lisäosien kehittäminen vaatii koodaustaitoa ja ne luodaan Teklan ulkopuolella, mutta niiden toiminnot voivat olla kehittyneempiä Teklan ympäristössä luotuihin verrattuna. (Trimble Solutions. n.d. e, Trimble Solutions n.d. f).

Rakenteiden mallinnusta sekä mallinnusohjelman käyttöä ohjaa ohjelmiston toiminnallisuuden lisäksi myös yrityksen sisäiset mallinnusohjeet. Ne yhdessä yrityksessä luodun Tekla-ympäristön kanssa toimivat pohjana, jonka perusteella toimintoja voidaan automatisoida. Esimerkiksi tämä tarkoittaa sitä, että kaikki tietynlaiset osat on mallinnettu samalla tavalla, jolloin ne voidaan sääntöpohjaisesti esittää piirustuksissa tietyllä merkintätavalla ilman, että jokaista osaa täytyisi ”kuvapuolella” erikseen valita. Kun periaatteet ovat kunnossa, on Teklan tarjoamilla kehitystyökaluilla automaatio mahdollista viedä hyvinkin pitkälle (Trimble Solutions. f).

Mallinnuksen sisältöä ohjaa suunnittelusopimuksessa sovittu laajuus, jossa yleensä viitataan YTV ohjeistukseen, kuten yllä on selostettu. Tämän lisäksi suunnittelutyössä tehdyt rajaukset sekä suunnittelijoiden tottumukset määrittelevät millä laajuudella rakenteita mallinnetaan. Esimerkiksi jos paikallavalurakenteiden raudoituspiirustuksia laaditaan suoraan mallista, täytyy raudoitteita lisätä malliin, vaikka sopimuksen mukaisessa laajuudessa sitä ei olisi vaadittu.

Kuten aiemmin jo todettiin, rakenneosien mitoitus ja detaljisuunnittelua tehdään usein mallinnuksen kanssa samanaikaisesti. Monissa tapauksissa suunnittelua vaativia kohtia myös paljastuu mallinnuksen yhteydessä. Jos mitoitus ja mallinnusta tekevät eri henkilöt, niin sujuvaan työskentelyyn vaaditaan tiivistä yhteistyötä projektin henkilöiden välillä.

2.1.3 Piirustusten laadinta

Rakennepiirustusten laadintaan on nykyisin muutamia vaihtoehtoja. Piirustukset voidaan mallinnettavassa kohteessa esimerkiksi laatia suoraan mallinnusohjelmassa tai laatia 2D-piirto-ohjelmilla, kuten Autodeskin AutoCAD-ohjelmalla (Autodesk n.d. a). Näitä kahta voidaan myös yhdistellä luomalla mallinnusohjelmaan referenssipiirustus, jota täydennetään 2D-piirto-ohjelmassa detaljien ja merkintöjen osalta. Mallinnusohjelmasta suoraan luodut piirustukset ovat täysin yhdenmukaisia rakennemallin kanssa (Trimble Solutions. n.d. c).

Rakennepiirustuksia varten on alalla yleisesti sovitut esitystapaohjeet, joita niiden laadinnassa täytyy noudattaa. Piirustusmerkintöjen oikeellisuus on osa rakennusprojektin tiedonvälitystä, jonka on oltava selkeää, sillä projektin osapuolet vaihtelevat projektista toiseen (RIL 229-1-2020, 11).

Piirustustuotannon aikana saatetaan vielä löytää suunnittelua vaativia kohtia. Tavoitteena kuitenkin on, että mallinnettavassa kohteessa piirustustuotanto olisi mahdollisimman systemaattinen työvaihe, joka voidaan pitkälti automatisoida. Tähän vaikuttaa merkittävästi se, että mallinnustyö on tehty oikein ja kauttaaltaan noudattaen samoja periaatteita. Kehitystyössä on jo pitkään pyritty edistämään mallipohjaista piirustustuotantoa, sillä siinä automatisoinnin mahdollisuudet ovat paremmat kuin 2D-piirto-ohjelmissa.

2.2 Paikallavaluholvin mitoitusteoria

2.2.1 Paikallavaluholvin toteutus

Laatat ovat rakennuksen vaakarakenteita, jotka siirtävät sille kohdistuvat kuormat ja oman painon sitä tukeville rakenteille. Tukevat rakenteet voivat olla seiniä,

palkkeja ja pilareita. Laatat usein myös toimivat samalla myös rakennusta jäykistävänä levykenttänä, joka siirtää vaakakuormia jäykistäville pystyrakenteille. (Nykyri 2016, 7.)

Laattarakenteen toteuttamiseen on eri tapoja, joko valmisosarakenteina tai paikallavalettuna rakenteena. Valmisosarakenteita ovat esimerkiksi ontelolaatat, kuorilaatat ja TT-laatat, jotka ovat myös jännitetyjä rakenteita (Elementtisuunnittelu.fi n.d.).

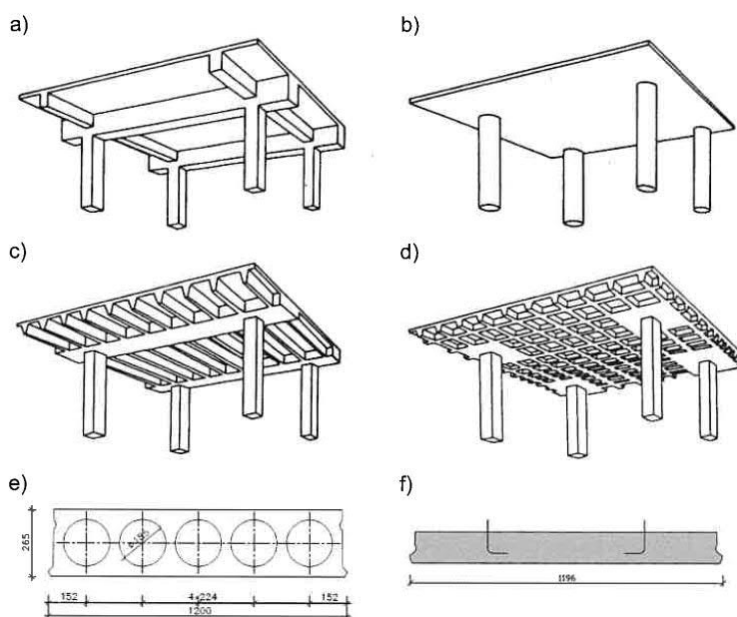
Paikallavalettuna laatta voidaan tehdä:

- massiivilaattana
- ripalaattana tai
- arinalaattana (Nykyri 2016, 7).

Erilaisia laattoja on esitetty kuvassa 1.

Ripa- ja arinalaatat ovat alapinnastaan muotoiltuja laattoja. Laattaan tehdään palkkikaistoja, joihin rauditus keskitetään ja laattaosuuksien paksuutta voidaan keventää palkkien väleissä. Näin rakenteen omapaino saadaan kevyemmäksi verrattuna paikallavaluholviin.

Paikallavalettu laatta on mahdollista toteuttaa jännittämättömällä raudoituksella tai jännitettynä rakenteena.



Kuva 1. Erilaisia laattatyyppejä (Nykyri 2016, 8).

Paikallavalurakenteilla on toteutustavan ansiosta hyviä ominaisuuksia, jotka koskevat myös paikallavaluholveja. Paikallavalurakenteet ovat muodoltaan vapaita sekä niihin voidaan usein tehdä tarvittaessa yksinkertaisia muutoksia. Niiden muotoa rajoittaa ainoastaan muottitekniikka. Lisäksi paikallavalurakenteilla on hyvät ääneneristysominaisuudet massiivisuuden sekä tiiviiden rakenteiden ja työsaumojen ansiosta. Liitokset ovat myös luonnostaan kestäviä ja niistä saadaan tarvittaessa vesitiiviitä. Palokestävyysvaatimukset saadaan paikallavalurakenteilla usein täytettyä valitsemalla riittävä rakennepaksuus ja raudoitteen suojaabetonipaksuus. (RT 82-10814, 2.)

Paikallavaluholvin paksuuteen talorakenteissa vaikuttavat ääneneristysvaatimukset, palonkestovaatimukset, murtorajatilan kuormitukset, käyttörajatilan vaatimukset sekä LVIST-tekniikan vaatimukset. Jos LVIST-tekniikkaa asennetaan holvin sisään, täytyy putkien kallistukset huomioida laatan paksuuden valinnassa. Laatan paksuuden valinnassa joudutaan usein ääneneristys- tai muiden käytännön vaatimusten takia valitsemaan paksumpi laatta kuin mitä rakenteellinen mitoitus murto- tai käyttörajatilassa vaatisi. (RT 82-10814, 2.)

2.2.2 Mitoitusperusteet

Kuten aiemmin todettiin, rakenteiden mitoitus Suomessa tehdään noudattaen Eurokoodi-järjestelmää. Taulukossa 2 on esitetty laatan rakennemitoituksen kulku sekä viittaukset Eurokoodin osiin, joita eri vaiheissa tarvitaan. Taulukon lähteenä ovat Betoniteollisuuden julkaisemat Eurokoodi-mitoitusohjeet, joissa on esitetty tiivistetysti Eurokoodien mukainen rakennemitoitus.

Taulukko 2. Laatan mitoitusmenettely (Betoniteollisuus n.d. c, 2; Betoniteollisuus n.d. d, 2).

Vaihe	Tehtävä	Standardi
1	Määritellään suunniteltu käyttöikä	SFS-EN 1990 taulukko 2.1 ja kansallinen liite
2	Määritetään laattaan kohdistuvat kuormat	SFS-EN 1991 (10 osaa) ja kansalliset liitteet
3	Määritetään kuormayhdistelmät	SFS-EN 1990 ja kansallinen liite
4	Määritetään kuormituskaaviot	SFS-EN 1992-1-1 ja kansallinen liite
5	Arvioidaan säilyvyysvaatimukset ja määritetään betonin lujuusluokka	SFS-EN 1992-1-1 ja kansallinen liite
6	Tarkistetaan betonipeitevaatimukset palonkestoaajan perusteella	SFS-EN 1992-1-2: kohta 5
7	Lasketaan vähimmäisbetonipeite säilyvyys-, tartunta- ja palonkestovaatimusten kannalta	SFS-EN 1992-1-1 kohta 4.4.1
8	Tarkastellaan rakenne kriittisten momenttien ja leikkausvoimien löytämiseksi	SFS-EN 1992-1-1 kohta 5
9	Mitoitetaan taivutusraudoitus	SFS-EN 1992-1-1 kohta 6.1
10	Tarkistetaan taipuma	SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.4
11	Tarkistetaan leikkauskestävyys, tarvittaessa mitoitetaan leikkausraudoitus. Tarkistetaan lävistyskapasiteetti tarvittaessa	SFS-EN 1992-1-1 kohta 6.2 SFS-EN 1992-1-1 kohta 6.4
12	Tarkistetaan tankojako tai halkeamaleveys	SFS-EN 1992-1-1 kohta 7.3
13	Pilarilaatassa tarkistetaan kestävyys pilarista laattaan siirtyvän momentin osalta	SFS-EN 1992-1-1 kohta I.1.2 (5)

Taulukko 2 on laadittu sillä oletuksella, että laatan geometria sekä paksuus ovat jo tiedossa. Laatan paksuus on usein luonnosvaiheessa jo valittu, mutta se täytyy

mitoituksessa tarkastaa, että sillä saadaan täytettyä kaikki vaatimukset. Asuinrakennuksissa laatan paksuuden määrää useimmiten huoneistojen väliset ääneristysvaatimukset tai laatan taipuma käyttörajatilassa (Nykyri 2016, 11).

Raudoitusten betonipeitteen paksuus määräytyy useimmiten säilyvyys- tai palonkestovaatimusten mukaan (Nykyri 2016, 11). Laatan käyttöolosuhteiden perusteella määritellään säilyvyysvaatimukset, jotka antavat vaatimukset betonipeitteen syvyydelle sekä betonin lujuusluokalle. Palonkestovaatimusten perusteella saadaan taulukkomitoituksella vähimmäisvaatimus laatan paksuudelle sekä betonipeitteen syvyydelle. Näistä määräävä betonipeitepaksuus valitaan käytettäväksi. Betonipeitepaksuudella on merkitystä jatkomitoituksen kannalta, sillä se vaikuttaa rakenteen teholliseen korkeuteen, kuten myöhemmin todetaan.

Taulukon 2 mukaan laatan rakennemitoitus aloitetaan määrittelemällä laatalle tulevat kuormitukset. Eurokoodin SFS-EN 1991 osissa 1–1 ... 1–7, on annettu arvot tavanomaisten rakennusten kuormille sekä laskentaohjeet luonnonkuormien arvojen laskentaan. Näitä kuormituksia voidaan projektikohtaisesti soveltaa, esimerkiksi korottaa tilaajan toiveesta muuntojoustavuuden parantamiseksi. Kuormituksia voidaan lisäksi määritellä todellisten kuormien perusteella, kuten esimerkiksi teollisuuskohteissa laitekuormat usein saadaan laitetoimittajalta lähtötietona.

Kuormien määrittelyssä Eurokoodien mukaan voidaan käyttää seuraavaa menettelyä:

1. Määritetään mitoitustilanne
2. Määritetään kaikki mitoitustilanteessa vaikuttavat kuormat
3. Määritetään osavarmuusluvut kaikille mahdollisille kuormitusyhdistelmille
4. Määritetään kuormitustapaukset eri kuormitusyhdistelmille siten, että saadaan rakenteen kannalta kaikkein kriittisin tilanne (Betoniteollisuus n.d. a, 3).

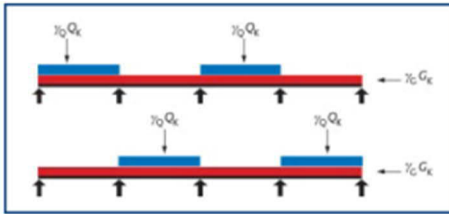
Eurokoodien termi ”kuormayhdistelmä” tarkoittaa erilaisten kuormitusten yhdistämistä osavarmuuskertoimilla, josta saadaan kuorman mitoitusarvo. Mitoitusarvo on se arvo, jolla rakenteen mitoitus suoritetaan kussakin rajatilatarkastelussa.

Kuormitusyhdistelyt tehdään siis kaikille eri rajatiloille, kuten murto-, käyttö- ja onnettomuusrajatilalle erikseen. Yhdistelmät luodaan valitsemalla yksi muuttuva kuorma määrääväksi ja muut muuttuvat kuormat samanaikaisesti vaikuttaviksi kuormiksi. Määräävä kuorma huomioidaan varmuuskertoimiseen kokonaisuudessaan ja muut kerrotaan yhdistelyarvon kertoimilla ψ_0 , ψ_1 tai ψ_2 , jotka ovat arvoltaan alle 1. Toisin sanoen kuormitusyhdistelmillä voidaan erilaiset kuormitukset yhdistää yhdeksi arvoksi niin, että kaikkia muuttuvia kuormia ei tarvitse huomioida täydellä arvolla. Periaatteessa tarkastellaan kaikki mahdolliset kuormayhdistelmät, mutta käytännössä suunnittelija voi harkinnan mukaan jättää tarkastelematta ne yhdistelyt, jotka eivät muodostu määrääviksi. Kuormitusyhdistelmät, yhdistelykertoimet ym. on esitetty yksityiskohtaisesti Eurokoodissa SFS-EN 1990 sekä sen kansallisessa liitteessä. Esimerkinomaisesti taulukossa 3 on esitetty Suomessa käytettävät kuormayhdistelmät, joita käytetään rakenneosien kestävyuden tarkasteluissa.

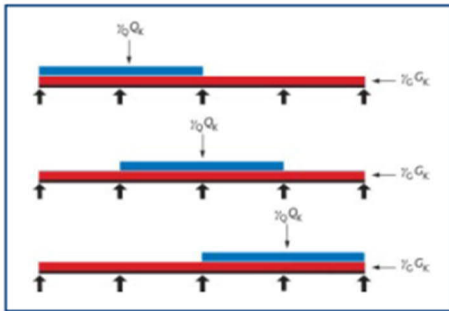
Taulukko 3. Kuormien mitoitusarvot (rakenneosien kestävyys ja geotekninen kestävyys) normaalisti vallitsevissa ja tilapäisissä mitoitus-tilanteissa (Ympäristöministeriö 2016, 20).

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitus-tilanteet	Pysyvät kuormat		Määräävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)
	Epäedulliset	Edulliset		
(Yht. 6.10a)	$1,35 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$		
(Yht. 6.10b)	$1,15 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(*)Taulukon A.1.1 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia.				

Kuormitustapauksella tarkoitetaan muuttuvien kuormien järjestämistä niin, että tarkasteltavalle rakenneosalle syntyy kaikkein epäedullisin vaikutus. Tätä voidaan kutsua myös kuormituskaavioksi. Eurokoodin SFS-EN 1992-1-1 mukaan rakennuksille voidaan soveltaa seuraavia kuormituskaavioita sekä murto- että käyttörajatilassa: joka toinen kenttä kuormitettu tai vierekkäiset kentät kuormitettu (Betoniteollisuus n.d. b. 2). Tästä on esitetty esimerkit kuvissa 2 ja 3.



Kuva 2. Kuormitustapaus, jossa joka toinen kenttä kuormitettu (Betoniteollisuus n.d. b. 2).



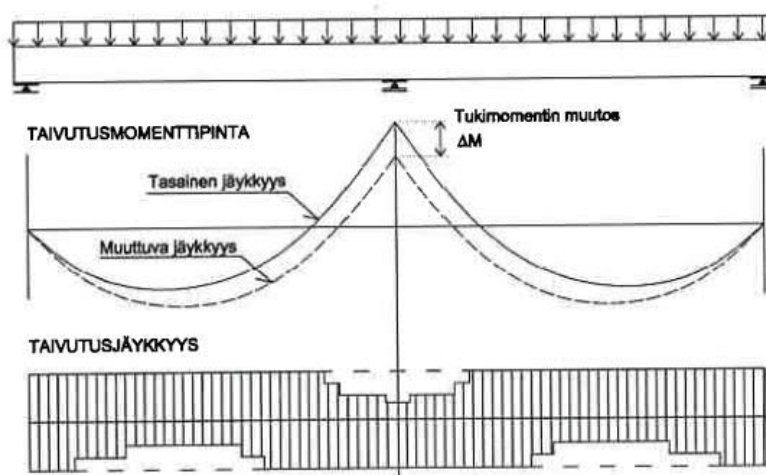
Kuva 3. Kuormitustapaus, jossa viereiset kentät kuormitettu (Betoniteollisuus n.d. b. 2).

Kuormitustapausten määrittely on tärkeä työvaihe jatkuville rakenteille sillä suurimmat kenttämomentit ja tukivoimat saadaan eri tapauksissa. Laatat usein suunnitellaan jatkuviksi rakenteiksi, joten kuormitustapaukset täytyy mitoituksessa ottaa huomioon. Pääsääntönä voidaan ajatella, että kenttämomenttien maksimiarvot saadaan joka toisen kentän ollessa kuormitettuna ja tukimomenttien maksimiarvot saadaan vierekkäisten kenttien ollessa kuormitettuna. Kahteen suuntaan kantavan laatan kuormitustapausten määrittelyssä käytetään usein ”shakkilautakuviota”, jossa kuormitetaan ristikkäisiä kenttiä vuorotellen.

2.2.3 Voimasuureiden laskenta

Kuten aiemmin tässä työssä todettiin, rakenneosan voimasuureet saadaan rakenneanalyysistä, jonka suorittamiseen on useita erilaisia menetelmiä. Suunnittelijan on valittava analyysimenetelmä, joka on soveltuva, luotettava sekä työmäärältään järkevä kunkin rakenneosan mitoitukseen. Rakenneosan geometrian ja tuennan, eli rakennemallin muuttuessa monimutkaisemmaksi muuttuu rakenneanalyysi myös haastavammaksi.

Rakenneanalyysimenetelmiä on lineaariseen kimmoteoriaan tai plastisuusteoriaan perustuvia menetelmiä sekä epälineaarisia menetelmiä. Lineaariseen kimmoteoriaan perustuvia analyysejä voidaan käyttää paikallavaluholvien tarkasteluun murto- ja käyttörajatilassa. Niissä oletetaan poikkileikkauksien olevan halkeilemattomia, jännitys-muodonmuutosyhteyden olevan lineaarinen materiaalleille sekä kimmokertoimelle käytetään keskimääräistä arvoa. Murtorajatilassa voidaan käyttää pienennettyä taivutusjäykkyyttä, joka vastaa halkeillutta poikkileikkausta. Näin voidaan ottaa huomioon lämpötilan muutoksista johtuvat muodonmuutokset sekä painuman, kutistumisen ja viruman vaikutukset. Lisäksi lineaarisen kimmoteorian mukaisessa analyysissä voidaan rajallisesti huomioida myös momenttien uudelleen jakautuminen. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 60). Momenttien uudelleen jakautumista usein hyödynnetään jatkuville rakenteille niin, että tukimomenteja pienennetään ja kenttämomenteja kasvatetaan vastaavasti, kuten kuvassa 4 on havainnollistettu (Nykyri 2020, 88).



Kuva 4. Kolmitukisen jatkuvan palkin taivutusmomenttipinta tasaisen ja muuttuvan jäykkyyden mukaan (Nykyri 2020, 88).

Plastisuusteoriaan perustuvia analyysejä voidaan käyttää vain murtorajatilojen tarkasteluihin. Jotta plastisuusteoriaa voidaan käyttää, täytyy rakenteen sitkeyden olla riittävä. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 61). Määrävien poikkileikkausten sitkeyden sekä kiertymiskyvyn tarkistamiseen annetaan säännöt Eurokoodissa SFS-EN 1992-1-1. Plastisuusteoriaan perustuvat analyysimenetelmät käyttävät joko alarajalauseetta, eli staattista lausetta, tai ylärajalauseetta, eli kinemaattista lausetta. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 61).

Epälineaarisia analyysimenetelmiä voidaan käyttää murto- ja käyttörajatilan tarkasteluihin. Käyttö edellyttää, että tasapaino- ja yhteensopivuusehdot toteutuvat sekä materiaalimallin täytyy olla soveltuva epälineaarinen malli. Materiaalimallin täytyy esittää jäykkyyttä realistisella tavalla, mutta ottaa huomioon vaurioitumiseen liittyvät epävarmuudet. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 61).

Rakeneanalyysia varten rakenneosasta on laadittava rakennemalli. Yhteen suuntaan kantavan laatan rakennemalli on yksinkertainen ja toimii samalla tavalla kuin palkki, eli laatan jänteet kantavat tuelta toiselle vain yhdessä suunnassa. Epätasaisesta kuormasta, kuten pistekuormista aiheutuu yhteen suuntaan kantavaan laattaan taivutusmomenttia myös laatan poikkisuunnassa. Näitä rasituksia ei kuitenkaan yleensä tarkastella erikseen, vaan kestävyys niitä vastaan varmistetaan laatan vähimmäisraudoitussääntöjen avulla. (Nykyri 2016, 13).

Staattisesti määrätyt laatat voidaan ratkaista statiikan kaavoilla tasapainoehtojen mukaisesti (Nykyri 2020, 88). Staattisesti määräämättömissä rakenteissa rakenteen taivutusjäykkyys vaikuttaa voimasuureisiin. Betonirakenteiden poikkileikkauksen jäykkyys muuttuu murtorajatilassa halkeilun takia. Kimmoteorian mukainen voimasuurejakauma murtorajatilassa kuitenkin toteutuu myös staattisesti määräämättömissä rakenteissa, mikäli rakenne mitoitetaan ja raudoitetaan kyseisen voimajakauaman mukaan. Lineaarisen kimmoteorian mukaisen voimasuurejakauman käyttö rakenteen mitoittamisessa on luontevaa, sillä oletettu toimintamalli toteutuu rakenteissa ilman muodonmuutoskyvyn aiheuttamia rajoituksia sekä sen laskentaan on olemassa paljon erilaisia ohjelmistoja sekä taulukkoja. (Nykyri 2020, 88). Toisin sanoen yhteen suuntaan kantava laatta staattisesti määräämättömänä rakenteena voidaan laskentaohjelmien avulla mitoittaa vastaavasti kuin staattisesti määrätty rakenne.

Ristiin kantava laatta on kahteen toisiaan kohtisuorassa olevaan suuntaan taivutusrasitettu laatta. Tällainen tilanne syntyy suorakaidelaatan ollessa tuettuna kolmelta tai neljältä sivulta. Monimuotoiset laatat ovat lähes aina laattakenttiin jaettuna ristiin kantavia. Laatan voimasuureiden laskeminen on haastava tehtävä, sillä voimien jakautumiseen eri suuntiin vaikuttavat laatan geometria ja tuennat, raudoitus sekä halkeilutila. Yksinkertaistettuna laattaa voidaan ajatella ristikkäi-

sinä palkkeina, joiden taipuma on kaikissa kohdissa sama. Jos palkkien taivutusjäykkyys on sama, vaaditaan lyhyemmän palkin taivuttamiseen suurempi taivutusmomentti, jolloin lyhyemmälle palkille jakautuu enemmän kuormaa kuin pidemmälle. Tällainen tarkastelu on kuitenkin hyvin likimääräinen. Laatan eri suuntien ollessa raudoitettu toisistaan poiketen tarkastelu muuttuu sillä raudoituksen määrä vaikuttaa palkkikaistan taivutusjäykkyyteen. Raudoitusta lisäämällä taivutusjäykkyys kasvaa ja sitä myötä kuormasta jakautuu enemmän raudoituksen suuntaan. (Nykyri 2016, 13–15).

Käytännössä ristiin kantavien laattojen tarkastelut tehdään joko käsinlaskentamenetelmillä tai FEM-analyysiin perustuvilla laskentaohjelmistoilla. Ristiin kantaville laatoille soveltuvia käsin laskettavia rakenneanalyysimenetelmiä ovat:

- Ekvivalenttien kehien menetelmä
- Massiivilaattamenetelmä
- Kaistamenetelmä
- Myötöviivamenetelmä (Nykyri 2016, 15).

Näistä menetelmistä Suomessa eniten käytetty on massiivilaattamenetelmä, eli MBP-menetelmä, joka on Ruotsissa kehitetty taulukkoarvoihin perustuva menetelmä (Nykyri 2016, 15).

Kaistamenetelmässä laatta jaetaan ristikkäisiin, yhteen suuntaan kantaviin palkkikaistoihin, joille jaetaan sopivassa suhteessa laatalle tuleva kuorma (Nykyri 2016, 23).

Myötöviivamenetelmässä määritetään laatan rajakuorma piirtämällä sille sopiva myötökuvio. Myötökuvion perusteella voidaan laskea sisäinen työ, joka laatan myötäämiseen vaaditaan ja energiatasapainon periaatteella siitä saadaan vastaava ulkoinen voima, eli laatan myötökuorma. Energiatasapaino tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, että ulkoisen kuorman tekemä työ asetetaan yhtä suureksi kuin sisäinen muodonmuutostyö myötöviivoissa. (Nykyri 2016, 32–35).

Ekvivalenttien kehien menetelmä soveltuu pilarilaattojen tarkasteluun. Siinä pilarilaattarakenne jaetaan pitkittäis- ja poikittaissuuntaisiksi kehiksi. Kehille tehdään lineaarisen kimmoteorian mukainen kehärakenteen analyysi murtorajatilassa.

(SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 212). Lisätietoa ekvivalenttien kehien menetelmästä löytyy Eurokoodin 1992-1-1 liitteestä I.

FEM eli elementtimenetelmä on rakenteiden analysointiin käytettävä menetelmä, jossa rakenne jaetaan pienempiin äärellisiin osiin, joita kutsutaan elementeiksi. Näin voidaan monimutkaisia kappaleita analysoida käyttäen geometrialtaan paljon yksinkertaisempia elementtejä. Elementit muodostavat yhdessä elementtiverkon, joka kattaa koko kappaleen. Verkko on kuitenkin vain likimääräinen kuvaus kappaleesta, joten verkon oikeanlaiseen muodostamiseen täytyy kiinnittää huomiota. Elementtimenetelmän laskennassa elementit siirtävät toisilleen voimia yhteisten solmujen kautta. Tästä lopulta saadaan FEM-ohjelmiston tuloksina kappaleen siirtymät ja rasitukset eri kohdissa, usein graafisesti esitettynä. (Lähteenmäki. n. d. 2-9). Laatoille voidaan FEM-menetelmällä tehdä epälineaarisia analyysejä, jotka ottavat huomioon halkeilun, viruman, kutistuman ja raudoituksen vaikutuksen. Tällaisilla analyyseillä on mahdollista tutkia laattojen käyttörajatilan käyttäytymistä tarkimmin. (Nykyri 2016, 15).

Kutistuminen on betonille luonnollinen ominaisuus, jota ei voida kokonaan poistaa, mutta voidaan vähentää merkittävästi oikeanlaisella betonivalun jälkihoidolla sekä betonirakenteen suunnittelulla. Kutistuma voi aiheuttaa rakenteiden halkeilua. (Finnsementti Oy. n.d.). Kutistumisesta aiheutuvat vaikutukset, kuten muodonmuutos otetaan yleensä huomioon vain käyttörajatilatarkasteluissa (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 24).

2.2.4 Taivutusmitoitus

Teräsbetonisen laatan taivutusmitoitus vastaa teräsbetonipalkin taivutusmitoitusta. Laatasta usein ajatellaan mitoitettavan 1 metrin levyinen kaista, jonka voidaan mitoittaa palkkina. Mitoitus tehdään rakenneanalyysistä saaduille maksimimomenteille. Yhteen suuntaan kantavassa laatassa palkkimitoitus tehdään laatan pääsuunnassa ja ristiin kantavissa laatoissa palkkimitoitus tehdään molemmissa suunnissa. Yhteen suuntaan kantavan laatan poikkisuuntainen raudoitus sekä monimuotoisen laatan raudoitukset vähemmän rasitetuissa kohdissa määritetään momenttijakauman ja likimääräisten rakenteellisten ohjeiden perusteella. (Nykyri 2016, 48).

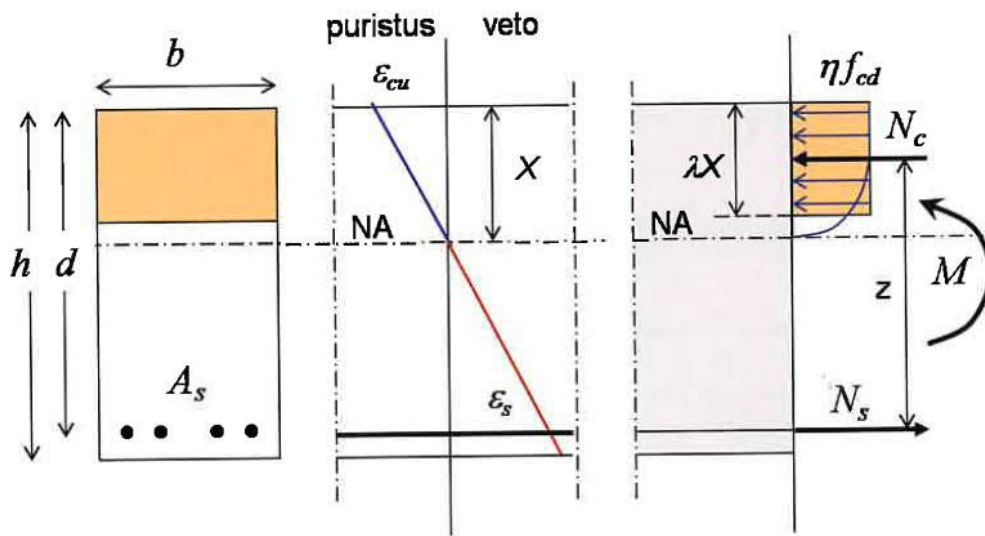
Palkin taivutusmitoituksessa Eurokoodin mukaan tehdään perusoletukset:

- palkki noudattaa Euler-Bernoullin palkkiteoriaa,
- palkki toteuttaa tasapainoehdot,
- betonin vetojännityksiä ei oteta huomioon,
- puristusrasitetun betonin jännitys-venymä riippuvuus noudattaa Eurokoodin 1992-1-1 luvussa 3.1.7 esitettyä mallia,
- puristusvyöhykkeen jännitys jakauma korvataan suorakaiteen muotoisella jakaumalla,
- poikkileikkaus murtuu, kun betonin reunapuristuma saavuttaa arvon ε_{cu} tai poikkileikkauksen pintakeskiön puristuma arvon ε_c ja
- raudoitus myötää eli jännitys on myötöjännityksen mitoitusarvon suuruinen $\sigma = f_{yd}$ (Nykyri 2020, 93).

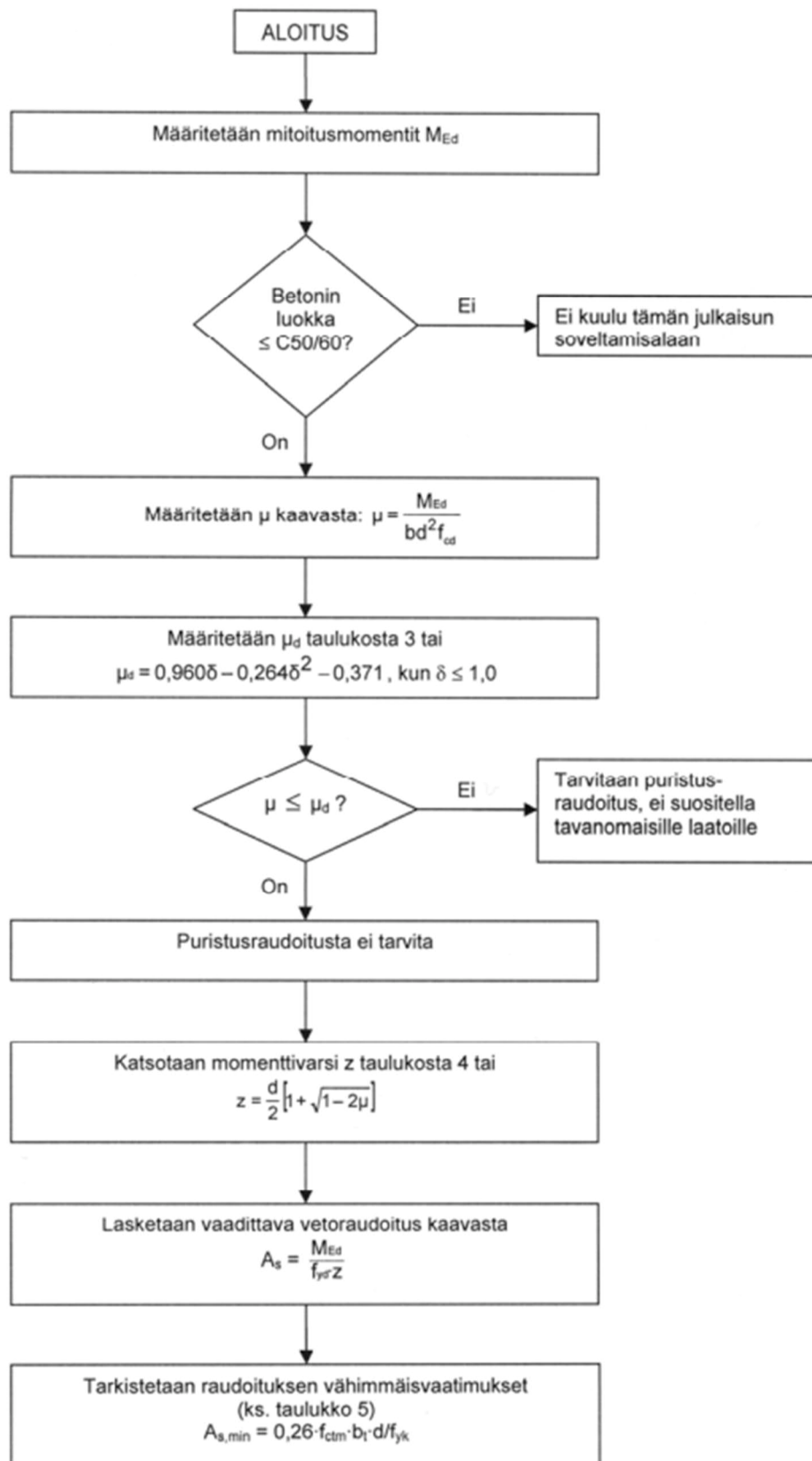
Taivutettaessa teräsbetonipalkkia betonin puristusvyöhyke on puristettuna ja raudoitus on vedettynä. Kun halutaan, että vedetty raudoitus myötää perusoletuksen mukaisesti täytyy raudoitusmäärää rajoittaa. Palkkia kutsutaan tasapainoraidoitetuksi silloin, kun siinä on suurin raudoitusmäärä, jolla myötääminen tapahtuu. (Nykyri 2020, 94). Tämä on käytännössä raudoitusmäärän yläraja ja todellisissa tapauksissa raudoitusmäärät ovat yleensä huomattavasti tätä rajaa pienempiä. Tasapainoraidoitusta pienemmällä raudoitusmäärällä palkki käyttäytyy murtuessaan sitkeästi, joka on rakenteelle toivottu ominaisuus. Yliraidoitettuna palkki murtuu puristuspinnastaan äkillisesti ennen kuin raudoitus alkaisi myödössä venymään. Enimmäisraudoitusehdolla tarkistetaan, ettei rakenne ole yliraidoitettu.

Vähimmäisraudoitusehdolla tarkistetaan, että raudoitusmäärä riittää sitkeään murtotapaan ja kyseinen ehto täytyy täyttää. Poikkeuksellisissa tapauksissa, joissa laatan paksuus on merkittävästi paksumpi kuin kuormitus vaatii, saattaa vähimmäisraudoituksen laskenta-arvo olla kohtuuttoman suuri. Tällaisessa tapauksessa voidaan harkinnan mukaan käyttää vähimmäisraudoitusmääränä 1,2-kertaista murtorajatilan raudoitusta, jos haurasmurtuman riski on pieni (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 156). Poikkileikkaukseen on myös mahdollista lisätä puristusraudoitus, mutta se on palkkirakenteissa harvinainen ja laatoissa sitä ei käytännössä käytetä, joten puristusraudoitusta ei käsitellä tässä työssä tarkemmin.

Kuvassa 5 on esitetty suorakaidepoikkileikkauksen venymät ja jännitykset, oikealla on piirretty yksinkertaistettu puristusjakauma puristetussa betonissa.



Kuva 5. Suorakaidepoikkileikkauksen venymät ja jännitykset (Nykyri 2020, 96).



Kuva 6. Taivutusraudoituksen määrittäminen (Suomen kansallisen liitteen mukaisilla arvoilla) (Betoniteollisuus n.d. c, 3).

Laatan taivutusraudoituksen määrittämisen prosessikaavio on esitetty kuvassa 6, jossa M_{Ed} on mitoitusmomentti, μ on suhteellinen momentti, b on poikkileikkauksen leveys, d on poikkileikkauksen tehollinen korkeus, f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo, μ_d on suhteellisen momentin arvo hyödynnettäessä uudelleen jakautumista, δ on uudelleen jakautumisen suhde, f_{ctm} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo ja f_{yk} on betoniteräksen ominaislujuus. Tunnetun poikkileikkauksen kapasiteetin laskenta noudattaa samaa periaatetta muuttamalla laskentajärjestystä niin, että raudoitus on ennalta tiedossa. Tarkempaa tietoa palkin sekä laatan taivutusmitoituksesta voi hakea esimerkiksi teoksen BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osista 1 ja 2.

2.2.5 Leikkausmitoitus

Laatalle leikkausmitoitus tehdään viivamaisten tukien kohdalla. Yleensä riittää, että tarkastelu tehdään raskaimmin kuormitetun tuen kohdalla, kuten esimerkiksi jatkuvan laatan keskituella.

Laatan leikkausmitoitus vastaa palkin leikkausmitoitusta, joka voidaan tehdä ilman leikkausraudoitusta tai leikkausraudoitettuna. Paikallavaluholvit yleensä suunnitellaan ilman leikkausraudoitusta, mutta leikkausraudoittaminen varsinkin paksuille holville on teknisesti mahdollista. Esimerkiksi väestönsuojien kattolaa-toissa saattaa suurten kuormitusten takia olla tarpeen käyttää leikkausraudoitusta.

Leikkausraudoittamattoman suorakaidepoikkileikkauksen mitoituskaavat ovat seuraavat (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 84):

$$v_{Rd,c0} = \frac{0,18}{\gamma} b_w d k (100 \rho_L \frac{f_{ck}}{MPa})^{1/3} MPa$$

$$v_{Rd,cmin} = 0,035 b_w d k^{3/2} \sqrt{\frac{f_{ck}}{MPa}} MPa$$

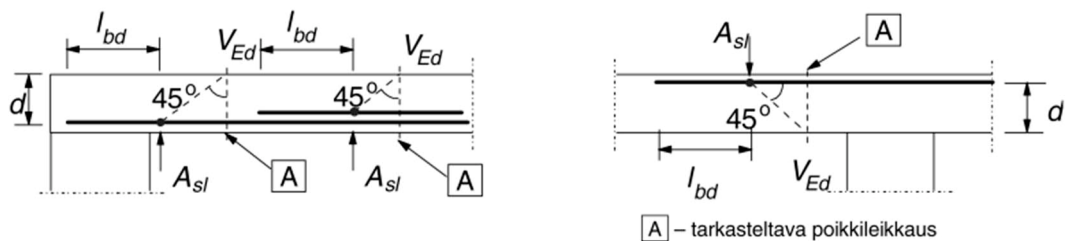
$$k = 1 + \sqrt{\frac{200mm}{d}} \leq 2,0$$

$$\rho_L = \frac{A_{sL}}{d} \leq 0,02$$

$$v_{Rd,c} = \max \left\{ v_{Rd,c0}, v_{Rd,cmin} \right\}$$

Kaavoissa lasketaan leikkauskestävyyden perusarvo $v_{Rd,c0}$ ja leikkauskestävyyden vähimmäisarvo $v_{Rd,cmin}$, joista suurempi on rakenteen leikkauskestävyyden arvo. Leikkauskestävyyden perusarvo riippuu poikkileikkausmitoista b_w ja d , betonin lujuudesta f_{ck} sekä vetorausoituksesta A_{sL} . Vetorausoitukseen huomioidaan se määrä, joka ankkuroituu täysin etäisyydelle d tarkasteltavasta poikkileikkauksesta. Tarkasteltava poikkileikkaus on esitetty kuvassa 7. Jos ankkurointipituus L_{bd} on pienempi kuin täyden myötövoiman ankkurointipituus L_{b0} , pienennetään vetorausoituksen määrää ankkurointipituuksien suhteessa. (Nykyri 2016, 58–59).

$$A_{sL} = A_{sL0} \frac{L_{bd}}{L_{b0}}$$

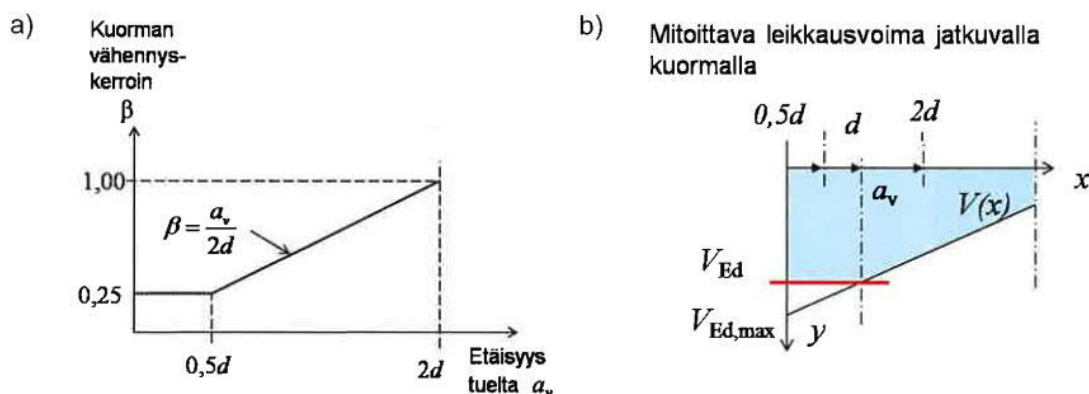


Kuva 7. Vetorausoituksen määrittävä tarkastelukohta (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 85).

Jos laatan leikkauskapasiteetti ei riitä leikkausraudoittamattomana, niin pyritään laatan leikkauskapasiteettia ensisijaisesti nostamaan lisäämällä pääraudoitusta ja parantamalla sen ankkurointia. Pääraudoituksen avulla leikkauskapasiteetin voi korottaa enimmillään 1,5–2 kertaiseksi vähimmäisarvoon verrattuna. (Nykyri 2016, 59). Joissain tilanteissa leikkausraudoitusta kuitenkin tarvitaan ja sen laskenta on vastaava kuin leikkausraudoitetun palkin mitoitus. Leikkausraudoituksen mitoitusta ei tässä työssä käsitellä tarkemmin, lisätietoa siitä voi hakea esimerkiksi BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 1.

Leikkausvoiman maksimi-arvot syntyvät yleensä tuelle, mutta tuen lähellä rakenteen yläpintaan vaikuttavat voimat eivät aiheuta leikkausrasitusta vinon halkeaman muodostamaan kriittiseen leikkaukseen, sillä niiden voidaan katsoa siirtyvän suoraan tuelle betonin puristuspaarten avulla. Tästä syystä mitoittavasta leikkausvoimasta voidaan vähentää tuen lähellä vaikuttavat kuormat. Vähennys

voidaan tehdä, kun rakenne on alapinnastaan tuettu, mutta ei puristusmurtokestävyyden tarkastelussa. Pistekuormille vähennys tehdään kertomalla kuormat kertoimella β ja jatkuvalle kuormalle mitoittava leikkausvoima saadaan leikkausvoimajakaumasta etäisyydeltä d tuelta. Kuvassa 8 on esitetty kuorman vähennysperiaate pistekuormille vähennyskertoimella sekä jatkuvalle kuormalle leikkausvoimajakaumasta. Laatat ovat useimmiten jatkuvasti kuormitettuja, jolloin vähennys voidaan tehdä leikkausvoimajakauman perusteella. (Nykyri 2020, 153).



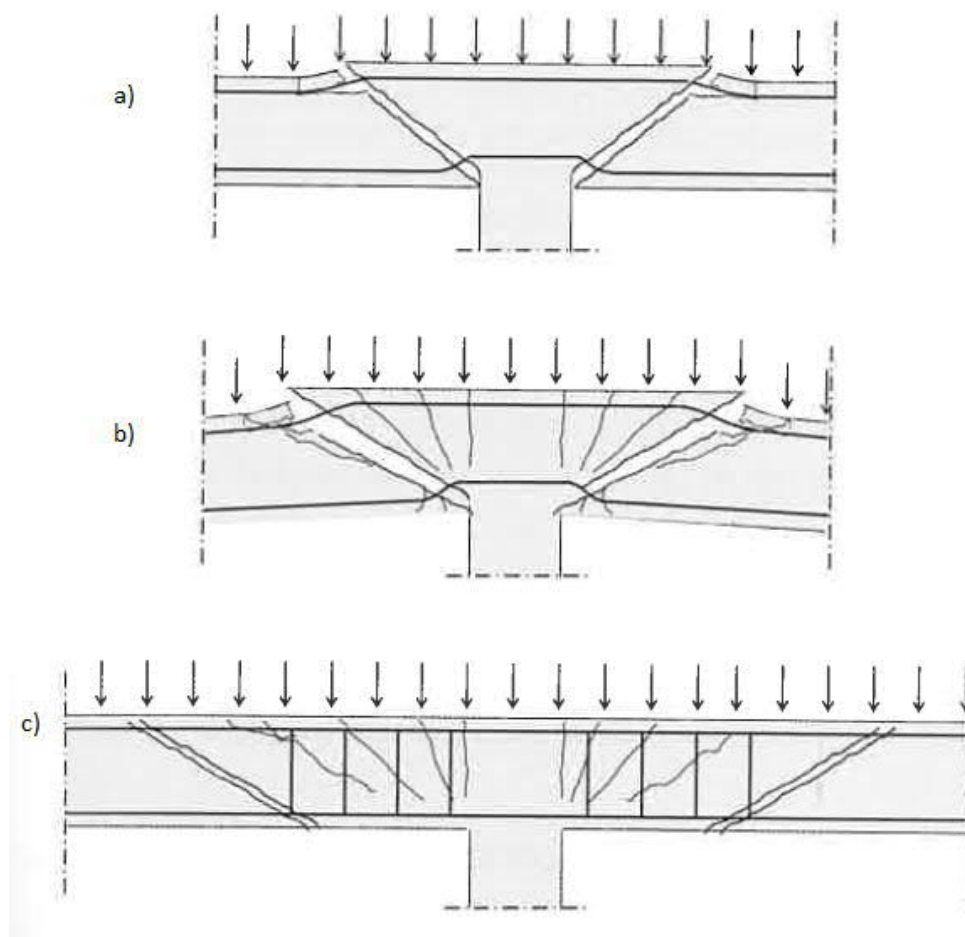
Kuva 8. Kuorman vähennys tuen läheisyydessä (Nykyri 2020, 153).

2.2.6 Lävistysmitoitus

Lävistysmurto on laaatassa pistemäisen kuorman tai tuen ympäristössä tapahtuva paikallinen murtuminen, jossa laatta murtuu kartiomaisesti ja menettää kantavuu- tensa. Lävistysmurtuma on tyypillinen murtotapa pilarilaatoilla pilarin pään sekä laaatassa pistekuorman ympärillä. Lävistysmurtomekanismiin ja lävistyskapasi- teettiin vaikuttavat mm. laatan paksuuden ja jännemitan suhde, pistekuorman vaikutusalan ja laatan paksuuden suhde, laatan taivutusraudoitusmäärä ja leik- kausraudoitus. (Nykyri 2016, 64).

Kuvassa 9 on esitetty erilaisia lävistysmurtomekanismeja pilarilaatalle. Vaihto- ehto a) on äkillisesti tapahtuva murtuminen, jossa leikkausrasituksen aiheuttama päävetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, mikä johtaa murtokartion muodos- tumiseen. Vaihtoehdossa b) on piirrettynä tapaus, jossa taivutusraudoitus osal- listuu lävistysmurtokartion muodostumiseen. Yläpinnan raudoitus nostaa leik- kauskestävyyttä rajoittamalla halkeamien avautumista, mutta ollessa lähellä pin- taa herkästi repeytyy irti laatasta, jolloin edullinen vaikutus jää pieneksi. Jatkuva

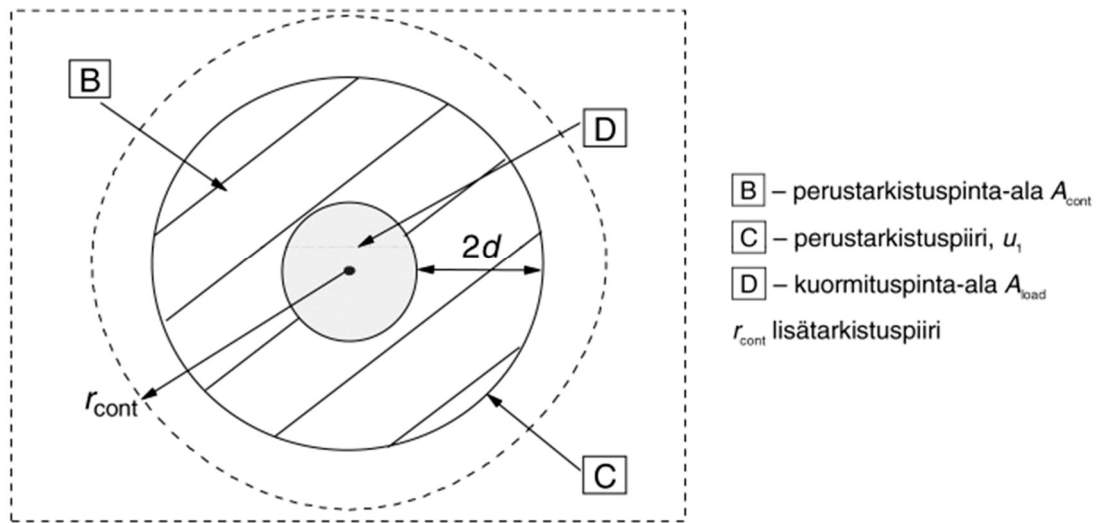
alapinnan raudoitus estää laatan romahtamisen lävistysmurron jälkeen. Vaihtoehdossa c) on esitetty lävistysraudoitettu tapaus, jossa lävistysraudoitus siirtää murtokartiota kauemmas pilarista. (Nykyri 2016, 64–65). Lävistysraudoittamisen perusidea onkin tehdä sellainen paikallinen raudoitus, jolla lävistyvää piiriä kasvatetaan niin laajalle, että sen ulkopuolella laatta kestää lävistymisen ilman lävistysraudoitusta.



Kuva 9. Lävistysmurtomekanismeja (Nykyri 2020, 65).

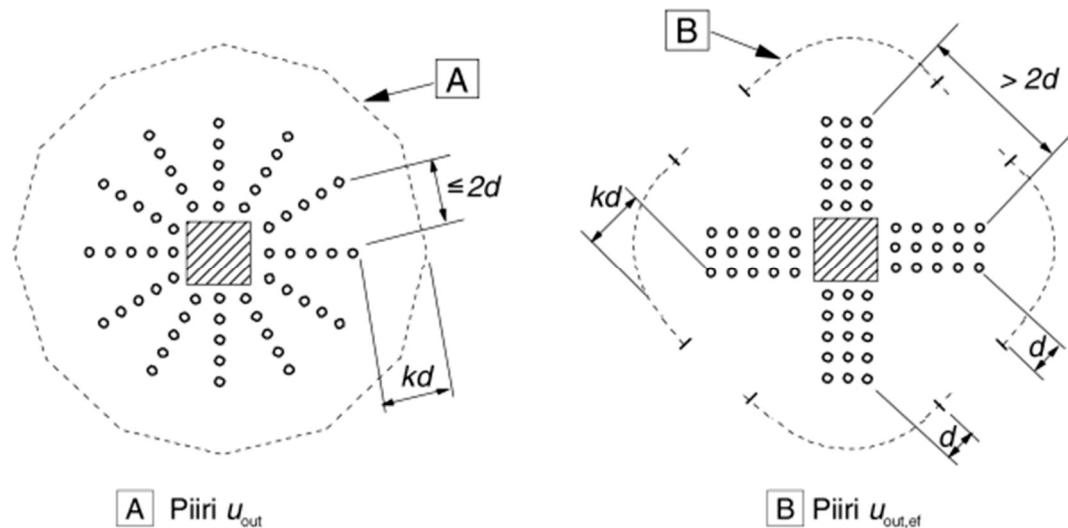
Lävistysmitoitus tehdään Eurokoodin 1992-1-1 mukaan ottamalla huomioon Suomen kansallisen liitteen ohjeet (Ympäristöministeriö 2019, 19). Suomessa kansallinen liite, joka sisältää asetukset ja ohjeet Eurokoodin mukaiseen lävistysmitoitukseen tuli käyttöön vuoden 2017 alussa. Tätä ennen lävistysmitoitus tehtiin kansallisen liitteen mukaan Eurokoodeja edeltäneen Suomen rakennusmääräyskokoelman mukaisilla laskentakaavoilla (Ympäristöministeriö 2007, 7).

Lävistysmitoitus tehdään tarkistuspiirien perusteella, joita ovat perustarkastuspiiri ja lisätarkastuspiiri. Kuvassa 10 on esitetty pyöreän pilarin tarkastuspiirit.



Kuva 10. Pyöreän pilari tarkastuspiirit ylhäältä katsottuna (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 96).

Perustarkastuspiirin avulla tarkastetaan, onko lävistysraudoittamattoman laatan kestävyys riittävä piirille laskettua leikkausjännitystä vastaan. Tasapaksulla laattalla perustarkastuspiirin etäisyys kuormitetusta pinnasta on $2d$. Jos kapasiteetti ilman lävistysraudoitusta ei ole riittävä, täytyy laattaan mitoittaa lävistymistä estävä raudoitus. Lisätarkastuspiiri määritetään, jotta voidaan selvittää, miten kauas lävistysraudoitus täytyy ulottaa kuormituksesta. Kuvassa 11 on esitetty muutamia vaihtoehtoja, miten lävistysraudoitus voidaan sijoittaa keskipilarin ympärille.



Kuva 11. Esimerkkejä keskipilarin lävistysraudoituksen sijoitteluun (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 105).

Lävistyskapasiteetin laskentakaava ilman lävistysraudoitusta on periaatteessa sama kuin leikkausraudoittamattoman laatan leikkauskestävyys, joten siinä otetaan huomioon taivutusraudoituksen vaikutus (Nykyri 2016, 71). Lävistymistä estävä raudoitus lasketaan Eurokoodin 1992-1-1 kaavoilla ja sijoitetaan sääntöjen mukaan. Raudoitus on mahdollista tehdä harjateräksistä, mutta siihen löytyy myös erilaisia valmistuotteita esimerkiksi Peikon tuotevalikoimasta (Peikko Group. n.d.). Lisätietoa lävistysmitoituksesta voi hakea Eurokoodista 1992-1-1 sekä sen kansallisesta liitteestä.

2.2.7 Käyttörajan tarkastelut

Käyttörajan tarkasteluissa periaatteena on tutkia rakenteen käyttäytymistä sellaisissa kuormituksissa, joita sille voidaan sen käyttöä aikana olettaa toteutuvan ja niiden vaikutusta rakenteen pitkäaikaiseen säilyvyyteen sekä käytettävyyteen. Betonirakenteella tähän liittyy oleellisesti rakenteen halkeilu sekä taipuma.

Laatalle suoritetaan vastaavat käyttörajan tarkastelut kuin palkkirakenteille, joita ovat:

- betonin puristusjännityksen rajoittaminen
- raudoituksen vetojännityksen rajoittaminen
- halkeamaleveyden rajoittaminen

- taipuman rajoittaminen (Nykyri 2020, 205).

Käyttörajan tarkastelut edellyttävät jännitysten laskemista käyttörajan kuormilla. Laatoille tämä voidaan tehdä menetelmillä, jotka eivät edellytä plastisoitumista, kuten aiemmin esitetyillä kaistamenetelmällä tai massivilaattamenetelmällä. Nykyisin on suositeltua tehdä tarkempi käyttörajan määrittäminen FEM-ohjelmalla silloin kun Eurokoodeissa esitelty likimääräismenettely ei ole riittävän tarkka.

Betonirakenteen toimintaan käyttörajan vaikutus merkittävästi, miten se on halkeillut. Poikkileikkaus voi olla halkeamaton tai haljennut ja haljenneessa rakenteessa halkeilutila määrittelee halkeamien määrän tai tiheyden (Nykyri 2020, 209). Halkeilu vaikuttaa myös jännityksiin ja tämän takia halkeamattoman ja halkeilleen poikkileikkauksen jännitykset lasketaan eri kaavoilla. Halkeilematon rakenne käsitellään lineaarisen kimmoteorian mukaan ja sen raudoitus voidaan ottaa huomioon poikkileikkaussuureissa eri tarkkuustasoilla (Nykyri 2020, 205). Haljenneessa tilassa rakennetta tarkastellaan haljenneen poikkileikkauksen kohdalla, josta saadaan sitä vastaavat jännitykset ja muodonmuutokset (Nykyri 2020, 207). Lisätietoa halkeilemattoman ja halkeilleen tilan poikkileikkaussuureiden sekä jännitysten laskennasta voi hakea esimerkiksi BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 1.

Jännitysten rajoittaminen.

Betonin puristusjännityksen ja raudoituksen vetojännityksen rajoittamiseksi Eurokoodissa asetetaan niille raja-arvot suhteessa materiaalin kestävyysasteeseen. Arvot on esitetty taulukossa 4, jossa on otettu huomioon Suomen kansallinen liite.

Taulukko 4. Jännitysten rajoittamisen raja-arvot. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 117; Ympäristöministeriö 2019, 20.)

Suure	Kuormitusyhdistelmä/kuorma		
	Ominaiskuormat	Pitkäaikaiset kuormat	Pakkomuodonmuutokset
Betonin puristusjännitys	$0,6f_{ck}$	$0,45f_{ck}$	–
Raudoituksen vetojännitys	$0,6f_{yk}$	–	$0,8f_{yk}$

Taulukosta 4 nähdään, että raja-arvoja on annettu usealle eri käyttörajatilan kuormitusyhdistelmälle, jotka lasketaan keskenään erilaisilla yhdistelykertoimilla Eurokoodin ohjeiden mukaan. Jännitysrajoitilojen laskennassa käytetään poikkileikkaukselle halkeilemattoman tilan laskukaavoja (Nykyri 2020, 207).

Betonin puristusjännityksen rajoittaminen ominaiskuormilla tehdään kuorman suuntaisen halkeilun rajoittamiseksi. Rajoitus koskee betonirakenteita, jotka kuuluvat meriveden aiheuttaman korroosion, muun kuin meriveden aiheuttaman korroosion tai jäädytys-sulatusrasituksen aiheuttamiin rasitusluokkiin XD, XF tai XS. Betonin puristusjännityksen rajoittaminen pitkäaikaiskuormien yhdistelmällä on tarkoitettu viruman rajoittamiseen. Virumamuodonmuutos on lineaarista, jos betonin jännitys on enintään raja-arvon suuruinen. Jos raja-arvo ylitetään viruma kasvaa voimakkaasti ja tällöin se pitää ottaa laskelmissa huomioon. Raudoituksen vetojännityksen rajoittaminen tehdään, jotta raudoituksen epälineaarisen venymän aiheuttama liiallinen taipuma ja halkeilu vältetään. (Nykyri 2020, 210).

Halkeilun rajoittaminen.

Betonirakenne halkeaa, kun vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden, joka voi johtua ulkoisista kuormista tai sisäisistä pakkovoimista. Betonirakenteen halkeamaleveyttä rajoitetaan säilyvyyden ja ulkonäön takia. Halkeilu nopeuttaa betonin karbonatisoitumista ja kloridien tunkeutumista rakenteeseen. (Nykyri 2020, 210–211).

Eurokoodin 1992-1-1 mukaan rakennusten raudoitetuissa laatoissa ei tarvita erillisiä halkeamaleveyden rajoittamistoimia silloin, kun laattaan vaikuttaa taivutus ilman merkittävää vetävää normaalivoimaa, laatan kokonaispaksuus on enintään 200 mm sekä laatan raudoitus täyttää Eurokoodin 1992-1-1 kohdan 9.3 ehdot (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 121). Silloin kun halkeilun rajoittamista vaaditaan, tehdään laatalle tarvittavat laskentatarkastelut, jotka noudattavat teräsbetoni-palkkien laskentaperiaatteita.

Halkeilun rajoittamisen laskentaprosessi etenee pääpiirteittäin seuraavasti:

1. Murtorajatilamitoituksen perusteella tunnetaan rakenteen kuormitus, tuenta, mitat sekä raudoitus.
2. Tarkastetaan, tapahtuuko halkeilua kriittisinä ajankohtina vertaamalla määräävässä poikkileikkauksessa ominaiskuormien yhdistelmän mukaista taivutusmomenttia halkeilumomenttiin. Jos taivutusmomentti ei ylitä halkeilumomenttia tarkastelu voidaan päättää, sillä halkeilua ei tapahdu.
3. Jos rakenne halkeaa, määritetään halkeamaleveyden raja-arvo Eurokoodin ja kansallisen liitteen mukaan sekä lasketaan määräävän poikkileikkauksen taivutusmomentin arvo pitkäaikaisella kuormayhdistelmällä.
4. Taivutusmomentista lasketaan haljenneen tilan mukainen raudoituksen jännitys.
5. Lasketaan halkeilun rajoittamiseen vaadittava vähimmäisraudoitusala ja tarkistetaan valitun raudoituksen täyttävän ehdon. Raudoitusta täytyy tarpeen mukaan lisätä, jotta ehto toteutuu.
6. Halkeamaleveystarkastelu tehdään joko taulukkomitoituksena tai suoraan laskettuna.
 - a. Taulukkomitoituksessa tarkastetaan raudoituksen jännityksen ja halkeamaleveyden maksimiaron avulla suurin hyväksyttävä tankopaksuus tai tankojako. Halkeamaleveyden voidaan katsoa pysyvän hyväksyttävissä rajoissa, jos toinen ehdoista toteutuu.
 - b. Suorassa laskennassa lasketaan todellinen halkeamaleveys betonin ja raudoituksen venymäeron sekä halkeamavälin avulla ja verrataan sitä raja-arvoon. (Nykyri 2020, 217–219).

Jos halkeamaleveyden laskennassa ei päästä vaatimuksia täyttävään lopputulokseen voidaan raudoitusta muuttaa, jotta vaatimukset täyttyvät. Selkein tapa on

lisätä rauditusmäärää, jolloin raudituksen vetojännitys pienenee. Lisää tietoa halkeilun rajoittamisen laskennasta voi etsiä esimerkiksi BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 1.

Taipuman rajoittaminen.

Taipumaa rajoitetaan, jotta siitä ei synny haittaa rakenteen tai siihen liittyvien osien toimintaan tai ulkonäköön. Taipuma on usein laatoille määräävä rajatila (Nykyri 2016, 88). Eurokoodissa 1992-1-1 on esitetty likimääräismenettely, josta saadaan rajatilaehdon täyttävän tehollisen korkeuden vähimmäisarvo. Likimääräismenettely on sama palkki- ja laattarakenteille ja sillä katsotaan taipuman olevan korkeintaan jännemitta $L/250$, joka on suositeltu taipumaraja useimmille rakenteille pitkäaikaisilla kuormilla. Eurokoodissa 1992-1-1 on myös esitetty tarkka laskentamenetelmä taipuman tarkistukseen (Betoniteollisuus. n.d. e, 2). Laatan taipuman tarkan arvon laskenta on haastavaa varsinkin monimutkaisille laatoille, joten nykypäivänä sen selvittäminen on käytännöllisintä FEM-laskentaohjelmistoilla (Nykyri 2016, 89). Lisätietoja menetelmistä voi hakea esimerkiksi BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 1 ja Betoniteollisuuden Eurokoodi-mitoitusohjeiden osasta 8.

2.3 Paikallavaluholvin rauditus

Teräsbetonisen laatan mitoituksessa on laskettu vaaditut rauditusmäärät maksimirasitusten kohdalla. Jotta mitoituksesta saatu tieto saadaan esitettyä toteutuskelpoisessa raudituspiirustuksessa, se vaatii oman suunnitteluvaiheensa. Tässä suunnitteluvaiheessa täytyy myös ottaa huomioon seikkoja, joita ei mitoituslaskennassa käsitellä. Raudituksen suunnitteluvaiheen tarkoitus on laatia kohteeseen sopiva kokonaistaloudellinen rauditusratkaisu, joka täyttää kaikki mitoituksesta ja muista seikoista tulevat ehdot sekä laatuvaatimukset. Raudituksen suunnittelussa huomioitavista asioista osa on Eurokoodeissa esitettyjä sääntöjä ja osa on yleisiä käytäntöjä, jotka on todettu toimiviksi.

2.3.1 Raudoituksen toteutustavat

Laatan raudoituksen toteuttamiseen on erilaisia tapoja. Laatta voidaan raudoittaa irtotangoilla, verkkoraudoiteilla, kaistaraudoiteilla tai näiden yhdistelmällä. Parhaiten soveltuva tapa riippuu mm. laatan geometrian monimutkaisuudesta, raudoitusmääristä ja aukotuksesta.

Irtotangoilla raudoittaminen on teknisesti kaikkiin laattoihin soveltuva. Siinä rauditus tehdään tanko kerrallaan sopivan pituisiksi katkaistuista tangoista, jolloin raudoitusmäärät saadaan optimoitua tarkasti sekä raudoituksen muoto saadaan vastaamaan täysin betoniosan geometriaa. Huonona puolena on suuri asennustyön määrä, joka nostaa kustannuksia. Irtotankorauditus on kuitenkin järkevin vaihtoehto laatoissa, joissa on suuria reikiä, monimutkainen muoto tai suuri raudoitusmäärä (Nykyri 2016, 79).

Verkkoraudoituksessa käytetään vakio kokoisia tehdasvalmistettuja teräsverkkoja. Verkko koostuu kohtisuoraan toisiinsa hitsatuista tangoista, joiden tankoväli on vakio. Näin verkkoraudoituksella saadaan sopivassa tilanteessa yhden pinnan pää- ja jakosuunnan rauditus suoraan yhdellä verkolla, mutta raudoitusta ei pystytä optimoimaan kovin tehokkaasti. Verkkorautojen suurin tankokoko on 12 mm. Lisäksi verkkorautojen sitkeysluokka on A, joten niitä ei saa käyttää plastisuusteorian mukaisessa mitoituksessa ilman kiertymiskyvyn tarkastusta. Näiden seikkojen takia verkkorauditus soveltuu parhaiten säännöllisen muotoisiin laattoihin, joiden raudoitusmäärä on kohtuullinen. (Nykyri 2016, 79).

Kaistaraudoite koostuu yhden suunnan pääteräksistä, jotka on sidottu sidetangoilla n. 0,6–1,2 m välein. Kaistan leveys on noin 1 metri. Kaistaraudoite toimii yhden suunnan raudoituksena ja valmistetaan tarpeen mukaan, joten rautamäärän optimointi on melko hyvin tehtävissä. Kahden suunnan rauditus toteutetaan erillisillä kaistaraudoiteilla. Kaistaraudoiteissa on käytettävissä kuumavalssatut yli 14 mm tankokoot. (Nykyri 2016, 79–80). Kaistaraudoitteiden lisäksi nykyisin on saatavilla myös mattoraudoiteita, joissa on valmiina jopa koko laattakentän toisen suunnan rauditus tehdasvalmistetussa mattorullassa. Asennuksessa rulla asemoidaan laatan toiseen reunaan ja rullataan auki rauditusvälikkeiden päälle. (Celsa Steel Service. n.d.).

2.3.2 Vähimmäisraudoitus ja jakoraudoitus

Eurokoodin mukainen vähimmäisraudoitus vaaditaan laattaan pintoihin niille alueille, joihin muodostuu vetojännitystä. Myös halkeilun rajoittamisen mukainen vähimmäisraudoitusmäärä täytyy ottaa tarpeen mukaan huomioon. Ristiin kantavissa laatoissa vähimmäisraudoitusehto täytyy täyttää molemmissa suunnissa. Laattoja koskee myös aiemmin selostettu raudoituksen enimmäisraja.

Yhteen suuntaan kantavissa laatoissa pääsuuntaan nähden poikkisuuntaan asennetaan Eurokoodin mukaan ns. jakoraudoitus, jonka määrä on vähintään 20 % pääraudoituksesta (Nykyri 2016,81). Jakoraudoituksella hallitaan laatan poikkisuuntaisia taivutusrasituksia, jotka aiheutuvat esimerkiksi pistekuormituksesta. Tukialueilla ei tarvita jakoraudoitusta, jos siinä suunnassa ei esiinny taivutusmomenttia. (Nykyri 2016, 81).

2.3.3 Raudoitustankojen väli

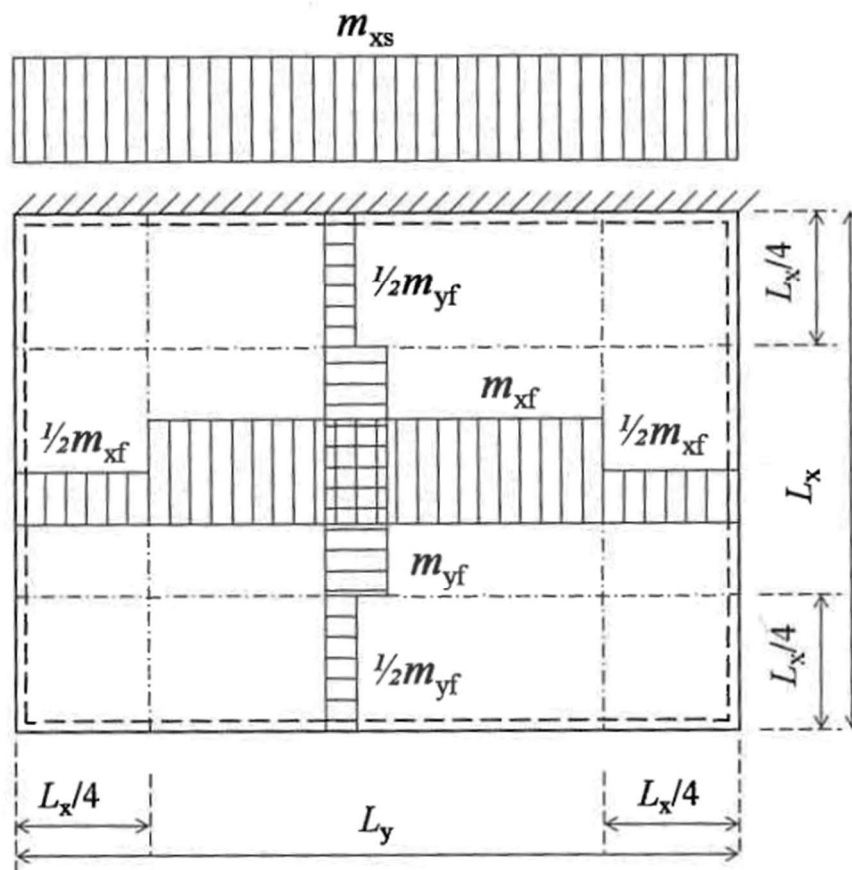
Raudoitustankojen väli ei saa ylittää Eurokoodissa annettuja raja-arvoja. Rajat annetaan erikseen pääraudoitukselle ja jakoraudoitukselle yleisesti sekä maksimimomenttien ja pistekuormien alueella. Suomen kansallisen liitteen mukaiset tankovälin enimmäisarvot laatoille, joissa h on laatan kokonaispaksuus ovat:

- Tankovälin enimmäisarvo on
 - pääraudoituksessa $3 \cdot h \leq 400$ mm
 - jakoraudoituksessa $4 \cdot h \leq 600$ mm
- Pistekuormien tai maksimimomentin alueilla säännöt ovat
 - pääraudoituksessa $2 \cdot h \leq 250$ mm
 - jakoraudoituksessa $3 \cdot h \leq 400$ mm (Ympäristöministeriö 2019, 25).

2.3.4 Kevennyskaistat

Paikallavaluholvin kenttäraudoitus mitoitetaan laatan maksimimomentille, joka on useimmiten jänteen keskellä. Jos vastaava raudoitus jatkettaisiin koko laatan alalle, tapahtuisi tukien lähellä ylimitoitusta, sillä kenttämomentti pienenee tukea lähestyttäessä. Tästä syystä on suositeltavaa keventää raudoitusta tuen lähellä.

Tarkasteltavan jänteen suunnassa osa raudoituksesta voidaan katkaista ennen tukea, josta on tarkempi selostus myöhemmin tässä työssä. Reuna-alueella tuen suuntaista raudoitusmäärää voidaan pienentää koko jänteen matkalla, eli reunoille muodostetaan ns. kevennyskaistat. Kevennyskaistan leveys on $1/4$ lyhyemmästä sivumitasta. Tuen suuntaisella kevennyskaistalla voidaan raudoitusta vähentää puoleen maksimimomentin vaatimasta raudoituksesta. Tukiraudoitusta ei saa keventää, vaan se asennetaan täytenä koko tuen leveydelle. (Nykyri 2016, 81.). Kevennyskaistojen periaate on esitetty kuvassa 12. Eurokoodissa ei ole ohjeistusta kevennyskaistojen käytöstä.



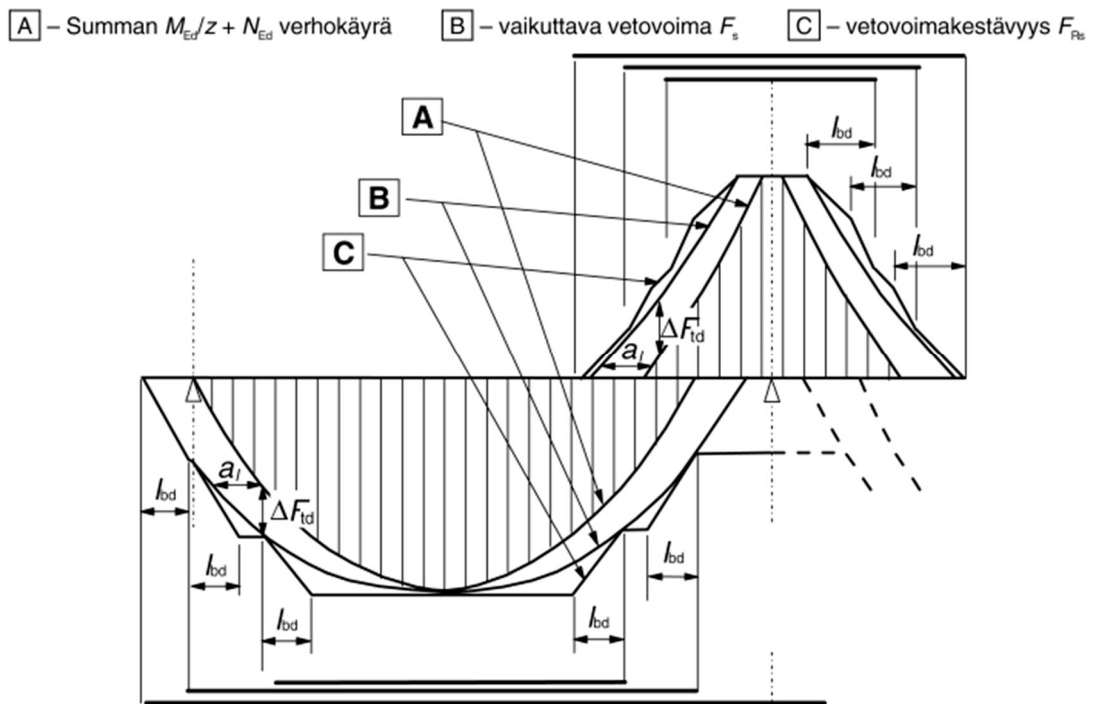
Kuva 12. Kenttäraudoituksen kevennyskaistat (Nykyri 2016, 82).

Kevennyskaistojen muodostaminen liittyy ensisijaisesti käsinlasketun laatan raudoitussuunniteluun, jossa mitoitus on tehty maksimimomentille ja raudoituksen kevennys tehdään yleisesti käytössä olevien periaatteiden mukaisesti. FEM-laskennalla tehdystä mitoituksesta saadaan tarvittaessa tarkat jännitykset ja niistä laskettua tarkka raudoitusvaatimus missä tahansa laatan kohdassa. Käytännössä FEM-analyysistä saatua raudoitusta täytyy yksinkertaistaa toteutukseen

kelpaavaksi, johon yllä selostettu kevennyskaistojen periaate voi toimia hyvänä lähtökohtana.

2.3.5 Kenttäraudoituksen ankkurointi tuelle

Osa kenttäraudoituksesta voidaan kenttämomentin pienenemisen takia katkaista ennen tukea. Tarkasteltavan jänteen suunnassa laatan kenttäraudoituksen katkaisupituudet voidaan määrittellä samalla periaatteella kuin palkin pääterästen katkaisupituudet. Katkaistukohtien määrittämisen periaatteena Eurokoodin mukaan on, että rakenneosan jokainen poikkileikkaus raudoitetaan riittävästi kestämään taivutuksesta ja leikkausvoimasta aiheutuvat vetovoimat, mukaan lukien vinojen halkeamien aiheuttama vetovoiman lisäys (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 151). Kuvassa 13 on esitetty taivutusraudoituksen katkaisukohtien määrittämisen periaate. Siinä momentin ja normaalivoiman verhokäyrään on lisätty lisävetovoiman vaikutus. Lisävetovoima voidaan ottaa huomioon mitan α_L avulla, joka on vakio koko rakenteen matkalla tai laskemalla lisävetovoima ΔF_{td} arvo rakenteen eri kohdissa. Näistä saatu voimapinta pitää peittää kaikissa kohdissa raudoituksen voimapinnalla, jotta yllä mainittu ehto täyttyy.



Kuva 13. Pääraudoituksen katkaisukohtien määrittelyn periaate (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 152).

Eurokoodin sääntöjen mukaan vapaasti tuetussa laatassa vähintään puolet laskennallisesta kenttäraudoituksesta täytyy tuoda ja ankkuroida vapaalle, eli vähäisesti kiinnitetyille reunatuelle. Raudoituksen ankkuroitava vetovoima F_{Ed} lasketaan kaavalla:

$$F_{Ed} = v_{Ed} \frac{d}{z} \approx 1,1 v_{Ed}$$

missä v_{Ed} on leikkausvoima tuella, d on poikkileikkauksen tehollinen korkeus ja z on rakenteen sisäinen momenttivarsi (Nykyri 2016, 82).

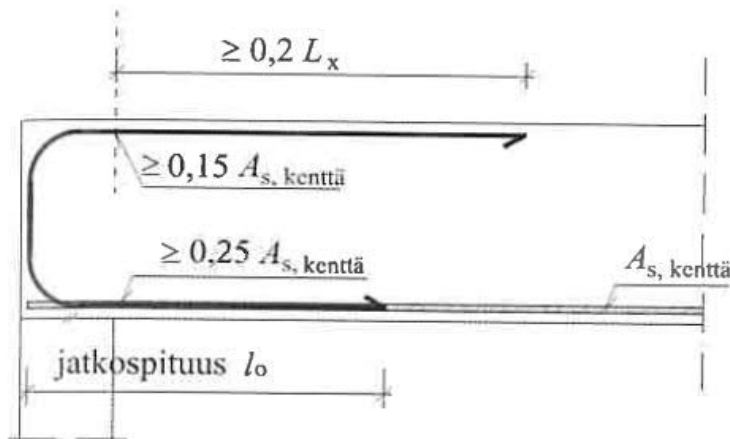
Ankkurointipituus määritetään vetovoiman perusteella Eurokoodin sääntöjen mukaan. Lisätietoa ankkurointimitoituksesta voi hakea esimerkiksi BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 1.

Jatkuvalla tuella, eli jatkuvan rakenteen keskituella täytyy palkkien sääntöjä soveltaen tuoda vähintään 25 % kenttäraudoituksesta. Jatkuvalla tuella tuotavan raudoituksen ankkurointipituus pitää olla vähintään 10 kertaa raudoituksen halkaisija ja tarkempaa ankkurointipituuden tarkastelua ei yleensä tarvita (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 153).

Yleensä käytännön ratkaisuna kenttäraudoituksesta tuodaan vapaalle tuelle kaikki tangot ankkurointivaatimuksen täyttämiseksi. Jatkuvalla tuella tuodaan joko kaikki tangot tai puolet tangoista, jolloin puolet katkaistaan kentässä momenttipinnan mukaan. (Nykyri 2016, 83).

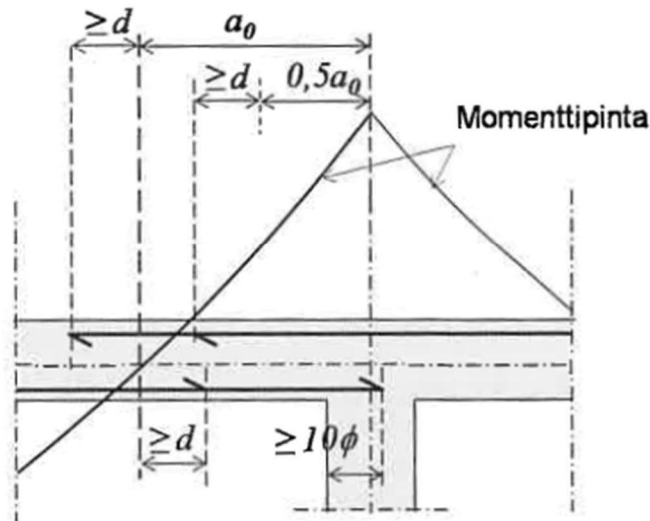
2.3.6 Tukirauditus

Vapaaksi suunniteltu reunatuki pitää mitoittaa kiinnitysmomentille, joka on suuruudeltaan 15 % kentän maksimimomentista. Tämä rauditus ulotetaan jännemittan 0,2-kertaiselle pituudelle ja sen tankovälin täytyy noudattaa tankovälin yleistä enimmäisarvoa $3 \cdot h$ tai 400 mm. Kuvassa 14 on esitetty vapaan tuen tukirauditus sekä kenttäraudoituksen tuominen tuelle.



Kuva 14. Vapaan tuen raudoitus (Nykyri 2016, 83).

Jatkuvalle tai kiinnitetylle tuelle tarvitaan momenttipinnan mukainen taivutusraudoitus. Laattarakenteissa tämä yleensä tarkoittaa jatkuvan laatan keskituella muodostuvaa momenttia, joka vaatii yläpinnan raudoituksen. Tämä raudoitus voidaan katkaista momenttipinnan mukaan vastaavasti kuin alapinnan taivutusraudoitus. Raudoituksen katkaisukohtat käsinlaskennassa voidaan määrittää selvittämällä likimääräisesti momentin nollakohdat ja levittämällä siitä saatavaa voimapintaa mitalla d . Likimääräisestä laskennasta voi etsiä lisätietoa BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 2. FEM-analyysistä saadaan tarvittaessa tarkat jännitykset ja raudoituskäärät, vastaavasti kuin alapinnan taivutusraudoituksessa. Kuvassa 15 on esitetty jatkuvan tuen tankojen katkaisukohtien periaate.

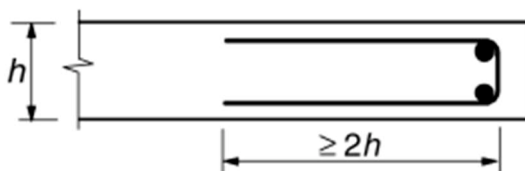


Kuva 15. Raudoituksen katkaisukohdat tuella (Nykyri 2016, 85).

Jos välitukien kohdalle syntyy osittainen kiinnitys, mitä ei oteta huomioon rakenneanalyysissä, täytyy tuelle lisätä rauditus, joka kestää 25 % kentän maksimimomentista. Tämän raudituksen ulottaminen tehdään vastaavasti kuin vapaan reunatuen tukiraudoituksessa. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 157). Lisäksi jatkuvien ja kiinnitettyjen tukien raudoitusten täytyy täyttää vähimmäisraudoitusvaatimus.

2.3.7 Vapaan reunan rauditus

Laatan vapaalle eli tukemattomalle reunalle vaaditaan Eurokoodin mukaan pitkä- ja poikittaisraudoitus (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 157). Tämä rauditus järjestetään useimmiten kuvan 16 mukaisesti.



Kuva 16. Laatan vapaan reunan rauditus (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 157).

2.3.8 Reikien vaikutus

Reiän vaikutus laatan toimintaan ja raudoitukseen riippuu reiän koosta ja sijainnista. Pieniä reikiä, jotka eivät sijaitse lähellä pistekuormia tai pistemäisiä tukia, ei tarvitse huomioida laatan mitoituksessa. Pienet reiät huomioidaan raudoituksen suunnittelussa siirtämällä reiän katkaisemat raudat reiän pieliin ja ulottamalla ne vähintään ankkurointipituuden verran reiän reunan yli. Reikää pidetään pienenä, jos sen suurempi sivumitta on korkeintaan $1/5$ laatan lyhyemmästä sivumittasta. (Nykyri 2016, 86).

Suuret reiät tai sijainniltaan rakenteellisesti merkittävässä kohdissa olevat reiät täytyy ottaa huomioon laatan mitoituksessa. FEM-analyysissä reiät on helppo ottaa huomioon lisäämällä ne laskentamalliin todellisten mittojen mukaan.

2.3.9 Raudoituksen taivutukset

Raudoitusta voidaan joutua taivuttamaan osan geometrian takia tai taivutuksella voidaan parantaa raudoituksen ankkurointia. Laatoissa taivuttaminen ankkuroinnin parantamiseksi on harvinaisempaa kuin palkkirakenteissa laatan pienen korkeuden takia. Raudan taivutussädettä rajoitetaan Eurokoodissa kahdesta syystä:

- raudoitustangon vaurioituminen taivutustyössä sekä
- betonin vaurioituminen kuormituksessa tangon taivutuskohdan sisäpuolella (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 130).

Taivutustelan vähimmäishalkaisijat teräksen vaurioitumisen kannalta Suomen kansallisen liitteen mukaan on esitetty taulukossa 5.

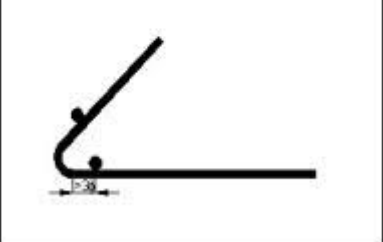
Taulukko 5. Pienimmät sallitut taivutustelan halkaisijat teräksen vaurioitumisen välttämiseksi (Ympäristöministeriö 2019, 23).

a) Tangot ja langat

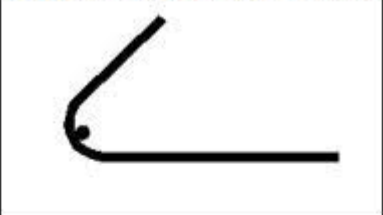
Tangon halkaisija	Taivutustelan vähimmäishalkaisija taivutuksille, koukuille ja lenkeille (ks. kuvaa 8.1)
$\phi \leq 16 \text{ mm}$	$4,5\phi$
$\phi > 16 \text{ mm}$	9ϕ

Huomautus. Taivutustelan vähimmäishalkaisijana voidaan käyttää vaihtoehtoisesti arvoja, jotka ovat vähintään 2 kertaa kyseisen teräsluokan taivutuskokeessa käytettävän tuunan halkaisija.

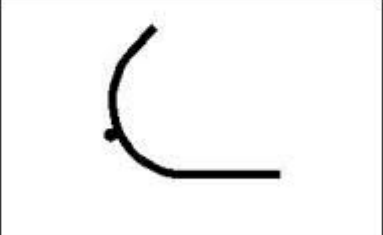
b1) Hitsatut raudoitteet ja verkot, jotka taivutetaan hitsauksen jälkeen ja taivutuskohta on hitsauslämmön vaikutusalueen ulkopuolella

	<p>Kun taivutuskohta on hitsauslämmön vaikutusalueen ulkopuolella (HAZ) taivutustelan halkaisija on kohdan a) mukainen.</p> <p>Hitsauslämmön vaikutusalueen (HAZ) pituutena voidaan käyttää 3ϕ liitoksen keskeltä.</p>
---	--

b2) Hitsatut raudoitteet ja verkot, jotka taivutetaan hitsauksen jälkeen ja taivutuskohta on hitsauslämmön vaikutusalueella sekä hitsi taivutuksen sisäpuolella

	<p>$\phi_{\text{min,mito}} = 2,0$ kertaa kohdassa a) annetut arvot.</p> <p>$\phi_{\text{min,mito}} = 1,5$ kertaa kohdassa a) annetut arvot asennushitsattavilla teräksillä (SFS 1202 tai CEN/TR 15481).</p>
--	---

b3) Hitsatut raudoitteet ja verkot, jotka taivutetaan hitsauksen jälkeen ja taivutuskohta on hitsauslämmön vaikutusalueella sekä hitsi taivutuksen ulkopuolella

	<p>$\phi_{\text{min,mito}} = 5,0$ kertaa kohdassa a) annetut arvot.</p> <p>$\phi_{\text{min,mito}} = 3,0$ kertaa kohdassa a) annetut arvot asennushitsattavilla teräksillä (SFS 1202 tai CEN/TR 15481).</p>
---	---

c) Hitsatut voimaliitokset

Taivuttaminen vaatii aina erityisiä turvatoimenpiteitä ja laadunvalvontalaadunvalvontamenettelyjä.
--

Eurokoodin mukaan betonin vaurioitumisen kannalta taivutustelan halkaisijaa ei tarvitse tarkistaa, vaan voidaan käyttää suoraan teräksen määräämää arvoa selaisissa tapauksissa, joissa:

- tangon ankkurointiin riittää mitta 5ϕ taivutuskohtan takana tai

- tanko, jonka taivutuksen sisäpuolella on poikittaistanko, ei sijoiteta reunalle. Poikittaistangon halkaisija on vähintään yhtä suuri kuin tangon halkaisija. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 131).

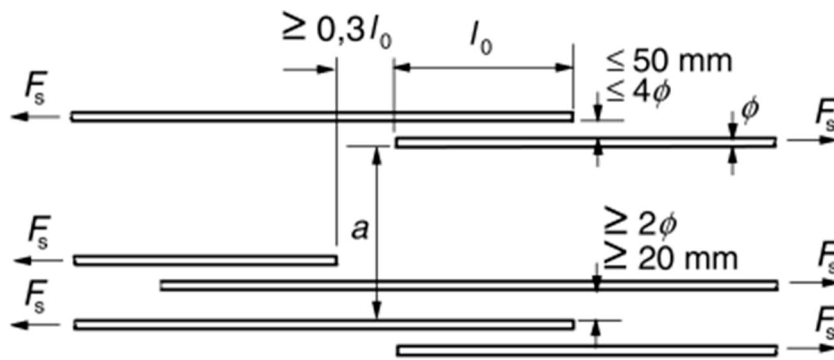
Muussa tapauksessa taivutustelan minimimittaa kasvatetaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$\phi_{m,min} = \frac{F_{bt}}{f_{cd}} \left(\frac{1}{a_b} + \frac{1}{2\phi} \right)$$

missä F_{bt} on taivutuskohdan alkuun kohdistuva voima, a_b on puolet tankojen välisestä keskiötäisyydestä tai reunimmiselle tangolle betonipeite lisättynä mitalla $\phi/2$ ja f_{cd} on betonin lujuus (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 131).

2.3.10 Raudoituksen jatkokset

Raudoituksessa olevaa voimaa voidaan siirtää tangolta toiselle Eurokoodin mukaan tankoja limittämällä, hitsaamalla tai mekaanisilla välineillä (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 137). Näistä helpoin on tankojen limittäminen, siinä jatkettavat tangot asetetaan päistään limityspituuden verran limittäin mahdollisimman lähelle toisiaan. Raudoitustangossa oleva voima siirtyy toiselle harjasten ja betonin puristuksen välityksellä. Luotettavan jatkoksen sekä betonin lohkeilun ja halkeilun estämiseksi Eurokoodissa annetaan sääntöjä limijatkosten sijoittamiseen. Limijatkoksia ei saa sijoittaa rakenteessa suurten momenttien tai voimien alueelle sekä ne tulisi porrastaa siten, että ne eivät tule samaan poikkileikkaukseen. Kuvassa 17 on esitetty limijatkoksen sisäiset etäisyysrajat sekä vierekkäisten limijatkosten etäisyysrajat toisistaan.



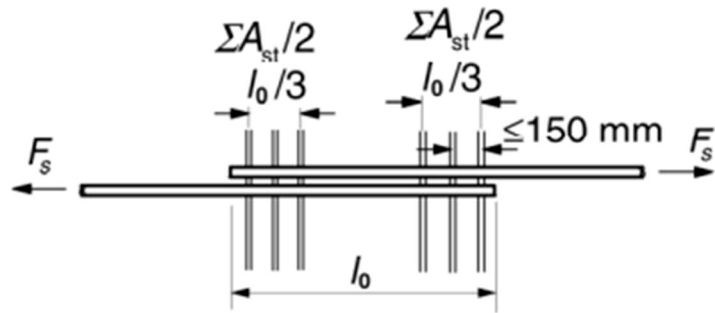
Kuva 17. Limijatkosten etäisyyssäännöt (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 138).

Limityspituuteen l_0 vaikuttavat jatkettavassa tangossa vaikuttava voima, tartuntaolosuhteen ja jatkettavien tankojen määrä samassa poikkileikkauksessa. Limityspituuden laskenta noudattaa pitkälti samaa periaatetta kuin ankkurointipituuden laskenta. Limityspituuden laskennassa otetaan huomioon kertoimella samassa poikkileikkauksessa jatkettavien tankojen määrän. Käytännön suunnittelussa on työlästä selvittää kaikkien tankojen limityksen sijoittumista suhteessa toisiinsa. Suositeltavaa on olettaa joko kaikkien jatkosten tulevan samaan poikkileikkaukseen tai, että 50 % raudoituksista jatketaan samassa poikkileikkauksessa. Kaikkien jatkosten tullessa samaan poikkileikkaukseen on Suomen kansallisessa liitteessä annettu ohje käyttää kertoimelle α_6 arvoa 2,0, joka vastaa Eurokoodissa annettua arvoa 1,5. Tarkempaa tietoa limityspituuden laskennasta voi hakea BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 osasta 1 sekä Eurokoodin osasta 1992-1-1.

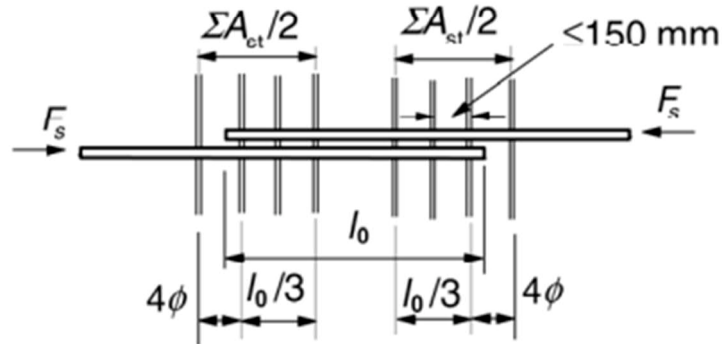
Limitysalueelle saatetaan tarvita poikittaisraudoitus hallitsemaan jatkettavien tankojen suuntaista halkeilua. Eurokoodin mukaan poikittaisraudoitus tarvitaan, jos molemmat seuraavista ehdoista täyttyvät:

- jatkettavien tankojen halkaisija on yli 20 mm ja
- jatkettavien tankojen prosenttiosuus koko raudoituksesta on yli 25 % (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 139).

Toisin sanoen, jos edes toinen yllä olevista ehdoista ei täyty, ei poikittaisraudoitusta tarvita. Poikittaisraudoituksen periaate on esitetty kuvassa 18 ja selostettu tarkemmin Eurokoodin osan 1992-1-1 luvussa 8.7.4.



a) vetotangot



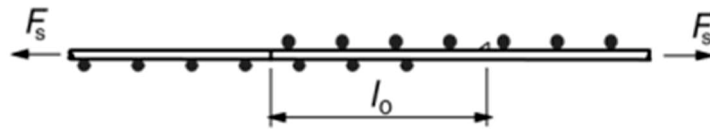
b) puristustangot

Kuva 18. Limijatkosten poikkisraudoitus (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 140).

Raudoitusverkkojen pääraudoitussuunnan limittämiseen on annettu Eurokoodissa ohjeet seuraavan jaon mukaisesti:

- limittyvät verkot suunnitellaan kuten suorien tankojen jatkokset, mukaan lukien samassa poikkileikkauksessa limitettävien tankojen prosenttiosuudet,
- päällekkäisille verkoille annetaan lisämääräyksiä limitysalueen sijoitteluun ja sallittavaan prosenttiosuuteen.

Kuvassa 19 on esitetty verkkojen limittyvä ja päällekkäinen jatkos. Päällekkäisten verkkojen tarkat säännöt löytyvät Eurokoodin osan 1992-1-1 luvusta 8.7.5.1.



a) limittyvät verkot (pituussuuntainen poikkileikkaus)



b) päälekkäiset verkot (pituussuuntainen poikkileikkaus)

Kuva 19. Hitsattujen verkkojen limijatkostyytit (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 140).

Rauditusverkkojen jakoraudoitus voidaan Eurokoodin mukaan kokonaan jatkaa samassa poikkileikkauksessa käyttämällä limityspituutena taulukon 6 mukaisia arvoja.

Taulukko 6. Hitsattujen verkkojen jakoraudoituksen limityspituudet (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC, 140).

Jakolankojen halkaisija (mm)	Limityspituus
$\phi \leq 6$	≥ 150 mm; vähintään 1 verkon silmäväli limityspituudella
$6 < \phi \leq 8,5$	≥ 250 mm; vähintään 2 verkon silmäväliä
$8,5 < \phi \leq 12$	≥ 350 mm; vähintään 2 verkon silmäväliä

2.3.11 Tankoniput

Eurokoodi mahdollistaa useampien tankojen niputtamisen yhteen, jolloin samaan poikkileikkaukseen on mahdollista asentaa suurempi rauditusmäärä. Tankonippu korvataan mitoituksessa nimellisellä tangolla, jolla on sama poikkileikkausala ja painopiste kuin nipulla. Tankonippujen ankkurointiin sekä limitykseen annetaan Eurokoodissa myös ohjeet. Tarkat ohjeet tankonippujen suunnitteluun löytyvät Eurokoodin osasta 1992-1-1 luvusta 8.9.

2.4 Algoritmiavusteinen suunnittelu teräsbetonirakenteiden suunnittelussa

Tutkimuksen aiheeseen läheisesti liittyviä opinnäytetöitä ovat esimerkiksi Ala-Hakunin YAMK-lopputyö ”Työkalu paalulaattojen algoritmiavusteiseen suunnitteluun” vuodelta 2022, Partin AMK-lopputyö ”Paikallavaletun väestönsuojan algoritmiavusteinen suunnittelu” vuodelta 2021 ja Kähkösen DI-työ ”Kulmatukimuurin algoritmiavusteinen suunnittelu” vuodelta 2021. Näistä kaikissa tavoitteena on ollut kehittää algoritmiavusteinen menetelmä tiettyyn suunnittelutehtävään. Tavoitteet ovat pääosin onnistuneet ja toimeksi antaneen yrityksen käyttöön on saatu suunnittelua tehostava työkalu. Partin (2021) ja Ala-Hakunin (2022) töissä työkalu laatii laskentamallin, kuormitukset sekä suorittaa rakennemitoituksen annettujen lähtötietojen perusteella. Kähkösen (2021) työssä on käytetty tämän lisäksi myös optimointialgoritmia, joka optimoi rakenteen geometriaa annettujen lähtötietojen perusteella.

Yllä mainituista töistä Partin (2021) ja Ala-Hakunin (2022) työkalun toimintaan ei kuulu rakenteiden mallinnus tai suunnittelutehtävät siitä eteenpäin. Kähkösen (2021) työkalun toiminta päättyy rakenteiden mallinnukseen, eikä sisällä raudoitusten mallinnusta. Kaikista kolmesta työtä on rajattu raudoitusten suunnittelu sekä rakennepiirustusten laadinta pois.

Afzal et al. (2020) ovat julkaisussaan ”Reinforced concrete structural design optimization: A critical review” käyneet lävitse yli 300 teräsbetonirakenteiden parametrissa suunnittelua ja erityisesti rakenteiden optimointia käsittelevää julkaisua vuosilta 1974–2018 (Afzal et al. 2020, 3). Kohteena olleissa julkaisuissa on käytetty monenlaisia optimointimenetelmiä erilaisten teräsbetonirakenteiden suunnitteluprosesseissa (Afzal et al. 2020, 10–13).

Eleftheriadis et al. (2018) julkaisussa ”Automated specification of steel reinforcement to support the optimization of RC floors” on tutkittu paikallavalettujen teräsbetonilaattojen raudoituksen automaattista määrittelymenetelmää, jonka avulla raudoitusten optimointi on myös mahdollista. Tutkimuksen tuloksena on saatu suunnitteluprosessi, joka määrittelee FEM-laskentatulosten perusteella laatan raudoitukset erilaisilla optimointitasoilla. Tutkimus perustuu BIM-ympäristössä

tehtävään suunnitteluun, eikä siinä oteta tarkemmin kantaa raudoituspiirustusten laadintaan. (Eleftheriadis et al. 2018, 366–367). Lävistysraudoitusten suunnittelu oli tutkimuksesta rajattu pois (Eleftheriadis et al. 2018, 367).

Mangal & Cheng (2018) julkaisussa “Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm” on tutkittu teräsbetonikehien parametrilista optimointimenetelmää, joka toimii BIM-ympäristössä. Tuloksena on saatu suunnitteluprosessi, joka pystyy BIM-tietomallin perusteella mitoittamaan ja optimoimaan teräsbetonisen kehäkenteen rakenneosat ja niiden raudoitukset. Menetelmässä raudoitukset saadaan BIM-tietomalliin automaattisesti mallinnettua. Julkaisussa raudoitettu BIM-tietomalli esitetään vaihtoehtona perinteisten raudoituspiirustusten laadinnalle. (Mangal & Cheng 2018, 40, 41, 51, 56)

Kokonaistaloudellisen ratkaisun tärkeys on esillä aiheeseen liittyvissä tutkimuksissa. Mangal & Cheng (2018, 47) sekä Eleftheriadis et al. (2018, 369) ovat ottaneet asian huomioon omissa menetelmissään. Laatan raudoituksen kannalta Eleftheriadis et al. (2018, 370) esittämässä menetelmässä on useita eri optimointitasoja, joista voidaan valita tapaukseen parhaiten soveltuva. Eleftheriadis et al. (2018, 375) pohtivat myös työmaatoteutuksen kehittymisen mahdollisuuksia siltä kannalta, että laatan raudoitusta voitaisiin esivalmistetuilla tai automaattisilla työtavoilla optimoida pitemmälle, kuin perinteisillä työmenetelmillä.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi työn sisältöä sekä toteutustapoja. Työn tavoitteiden saavuttamiseksi työssä on tutkittu rauditussuunnittelun prosessia ja sen tietosisältöä sekä mahdollisuuksia rauditussuunnittelun työvaiheiden automatisointiin.

3.1 Kirjallisuustutkimus

Tutkimuksessa on käyty läpi aiheeseen liittyvää kirjallisuutta. Tärkeimpinä lähteinä olivat Eurokoodijärjestelmän suunnittelustandardit sekä niiden sisältöä täydentävät oppikirjat. Kirjallisuustutkimuksen tuloksena tähän raporttiin on kerätty paikallavalulaatan raudituksen suunnittelussa huomioitavat asiat. Kirjallisuustutkimuksessa keskityttiin raudituksen suunnitteluun liittyviin ohjeisiin, sen ollessa tutkimuksen pääosassa.

Tutkimuksessa on tutustuttu muutamiin tämän tutkimuksen aiheeseen läheisesti liittyviin opinnäytetöihin sekä julkaisuihin.

3.2 Esimerkkitapaukset paikallavaluholveista

Tutkimuksessa laadittiin kuvitteellisia paikallavaluholvin esimerkkitapauksia ja suoritettiin niille rauditusten suunnittelu. Esimerkkien avulla analysoitiin rauditussuunnittelun prosessia sekä sen sisältämää tietoa. Esimerkkien sekä kirjallisuustutkimuksen perusteella laadittiin rauditussuunnittelun prosessikaavio. Samalla arvioitiin myös tapoja, miten rauditussuunnittelun prosessia voidaan automatisoida. Esimerkkien yhteydessä käytiin läpi mitoitus- ja suunnitteluohjeet sekä toteutettiin suunnittelu niiden mukaisesti. Tuotiin esille esiin nousseet huomiot suunnittelun haasteista sekä puutteista ohjeistuksessa.

Esimerkkitapaukset esittävät kahta yleisesti esiintyvää paikallavalulaatan käyttökohdetta talonrakentamisessa. Esimerkit on laadittu sopiviksi, jotta tarpeelliset ilmiöt saadaan muodostumaan laskentatuloksissa kriittisiksi, mutta laatan pakkaus, jännevälit ja kuormitukset on valittu vastaamaan suuruusluokaltaan todellisia rakenteita. Esimerkki numero 1 vastaa tavanomaista talorakentamisen välipohjaholvia ja esimerkki numero 2 vastaa väestönsuojan kattolaattaa.

3.2.1 Laskentaoletukset ja käytetyt ohjelmistot

Esimerkkitapaukset on tehty perustuen sellaiseen rakennesuunnitteluprojektiin, joka mallinnetaan ja rakenneosien mitoituksessa käytetään FEM-analyysiä. Esimerkkien mitoituksessa tehtiin yleisesti hyväksi todetut laskentaoletukset ja valittiin niiden perusteella saadut mitoitus tulokset raudoitussuunnittelun lähtötiedoiksi.

Esimerkkitapausten rakennemitoitus tehtiin Dlubal RFEM versio 5.28.03 FEM-laskentaohjelmalla (Dlubal Software. n.d. a) sekä siihen kuuluvilla RF-CONCRETE Surfaces (Dlubal Software. n.d. b) ja RF-Punch PRO-mitoitusmoduuleilla (Dlubal Software. n.d. c). Esimerkkien DWG-tiedostot laadittiin AutoCad LT 2022-ohjelmalla (Autodesk. n.d. b).

Esimerkkien laskenta-asetukset RF-CONCRETE Surfaces-moduulissa olivat seuraavat:

- Murtorajatilan ja lineaarisen käyttörajatilan laskennassa on määritelty minimiraudoitus ja annettu ohjelman lisätä vaadittu lisäteräsmäärä. Vaakaraudoitusta ei ollut sallittu lisätä leikkauskapasiteetin takia. Linearisessa käyttörajatilan mitoituksessa mukana olivat halkeilun ja jännitysten tarkastelut.
- Epälineaariseen käyttörajatilan laskennassa ohjelmaan on määritelty käytettävät raudoitukset alueittain, jolloin tulokset vastaavat suunniteltua raudoitusta. Mitoituksessa on huomioitu viruman vaikutus ja tarkastelu on tehty taipumalle, halkeilulle sekä jännityksille. Kutistuman vaikutus on jätetty huomioimatta.

RFEM-ohjelmassa olevasta laskentamallista tulostettiin export-komennolla vaadittavat tasonäkymät DXF-tiedostoina raudoitussuunnittelun lähtötiedoiksi. DXF-tiedostojen tietosisältöä tutkittiin erityisesti ohjelmointilogiikan kannalta. Tässä tutkimuksessa DXF-lähtötiedot siirrettiin AutoCad-ohjelmaan, jossa niiden perus-

teella suoritettiin raudoitussuunnittelu sekä piirrettiin raudoituspiirustukset. Esimerkkitapauksissa tehtyä suunnittelua hyödynnettiin raudoitusprosessin analysoinnissa.

3.3 Raudoitussuunnittelun prosessikaavio

Työssä laadittiin prosessikaavio paikallavaluholvin raudoitussuunnittelusta perustuen kirjallisuustutkimukseen sekä esimerkkitapauksiin. Prosessikaaviossa on esitetty suunnittelun vaiheet, tarvittavat suunnitteluvalinnat sekä valintojen vaikutukset toisiinsa. Prosessikaavio laadittiin siten, että se on riippumaton käytetyistä ohjelmistoista ja kuvaa raudoitussuunnittelun prosessia yleisellä tasolla.

Esimerkkitapausten perusteella laadittiin erillinen kaavio niissä käytettyjen ohjelmistojen välisestä prosessista. Tähän kaavioon selostettiin esimerkeissä tehtyjä työvaiheita sekä ohjelmistojen välisiä rajapintoja.

3.4 Tulosten raportointi ja jatkokehitys

Tutkimuksessa laadittu aineisto esiteltiin sekä luovutettiin yrityksen kehitysryhmän käyttöön, jotta sitä voidaan käyttää tulevaan kehitystyöhön. Esittelyssä kerrottiin tutkimuksen tuloksista sekä annettiin ehdotuksia työkalujen jatkokehitykseen pohjautuen prosessikaavioon sekä esimerkkitapauksiin.

3.5 Asiantuntijahaastattelut

Tutkimuksen edistymistä ja tavoitteiden toteutumista arvioitiin asiantuntijahaastatteluissa. Haastatteluita järjestettiin työn toteuttamisen aikana ryhmähaastatteluina sekä aineiston valmistuttua yksilöhaastatteluna.

Ryhmähaastattelut toteuttiin Microsoft Teams-etäkokouksina. Niitä järjestettiin työn suorittamisen aikana 3 kpl 24.2.2023, 5.4.2023 ja 28.4.2023. Haastatteluissa oli paikalla kehitysryhmä, johon kuuluivat toimeksi antaneesta yrityksestä kehityspäällikkö Jari Hietala, Computational Structural Engineer Jukka Mäenpää, ohjelmistokehityksen teknologiavastaava Matias Hirvikoski, algoritmiavusteisen suunnittelun teknologiavastaava Petteri Karjalainen ja Senior BIM Developer

Jussi Junkkarinen. Ryhmähaastatteluissa käytiin läpi työn edistymistä sekä laadittua ainestoa sekä saatiin näihin ryhmältä kommentteja.

Yksilöhaastattelu pidettiin tutkimuksen ja aineiston valmistuttua 9.5.2023. Haastattelu toteutettiin Microsoft Teams-kokouksena. Haastateltavana oli Petteri Karjalainen (DI), joka toimii toimeksi antavan yrityksen algoritmiavusteisen suunnittelun teknologiavastaavana. Haastattelun aluksi käytiin tutkimus ja aineisto läpi, jonka jälkeen pyydettiin siihen kommentteja. Asiantuntijahaastattelussa arvioitiin erityisesti aineiston soveltuvuutta ohjelmistokehitykseen.

4 TULOKSET

Tässä luvussa käydään läpi työn tuloksia. Kuten aiemmassa luvussa todettiin työn tuloksena saatuna aineistona ovat raporttiin kirjatut suunnitteluohjeet ja niiden perusteella laaditut prosessikaaviot sekä muu aineisto.

Yrityksen kehitysryhmälle laadittiin ehdotus automatisoitujen työkalujen jatkokehityksestä sekä luovutettiin tässä tutkimuksessa laaditut aineistot. 9.5.2023 pidetyn asiantuntijahaastattelun perusteella tutkimuksessa laadittu aineisto tukee tulevaa kehitystyötä hyvin ja on sisällöltään kehitystyön näkökulmasta kattava.

4.1 Kirjallisuustutkimuksen tulokset

Kirjallisuustutkimuksessa käytiin läpi paikallavaluholvin raudoitussuunnitteluun liittyviä teoksia, joista merkittävimmät ovat Eurokoodien standardit betonirakenteiden suunnittelusta sekä sitä täydentävät kotimaiset oppikirjat ja ohjeet. Näissä teoksissa laatan rakennemitoitus on hyvin dokumentoitu, joten niiden perusteella raudoitusten suunnittelu on selkeää, kunhan kaikki laattoja koskevat vaatimukset huomioidaan standardista.

Kirjallisuustutkimuksen tuloksena on kerätty tämän raportin 2. lukuun paikallavaluholvin rakenne- ja raudoitussuunnittelun periaatteet. Suunnitteluun liittyvät ilmiöt ja periaatteet on selostettu pääosin ja sekä viitattu teoksiin, joista voi etsiä lisätietoja.

Kirjallisuustutkimuksessa löydettiin kotimaisia sekä ulkomailla tehtyjä julkaisuja teräsbetonirakenteiden algoritmiavusteisesta suunnittelusta. Julkaisuja on listattuna kappaleessa 2.3 ja niiden tuloksia suhteessa tähän tutkimukseen on pohdittu luvussa 5.

Vertaillen Mangal & Cheng (2018) julkaisun tuloksia tämän tutkimuksen tuloksiin löydettiin vastaavuuksia sekä eroja siinä miten teräsbetonisten rakennosien raudoitusten suunnittelua on käsitelty. Eroavaisuutena Mangal & Cheng (2018) esittämä prosessi alkaa arkkitehdin tietomallin hyödyntämisestä lähtötietona ja päättyy raudoitettuun BIM-tietomalliin teräsbetonisesta kehärakenteesta. Tässä

tutkimuksessa esitetty prosessi alkaa paikallavaluholvin rakennemitoituksen tuloksista päättyen piirustukseen laatan raudoituksesta. Mangal & Cheng (2018) kyseenalaistivat julkaisussaan perinteisten raudoituspiirustusten tarpeen, kun tässä työssä ne on oletettu kuuluvan laatan raudoitussuunnitteluun.

Mangal & Cheng (2018) tutkimus koski teräsbetonisen kehärakenteen pilareita ja palkkeja, jotka mitoitettiin rakenneosalle tulevien rasiusten ääriarvojen perusteella. Näiden rakenteiden raudoitus on usein vakiotyyppinen, koostuen pitkittäis- ja leikkausraudoituksesta. Erona tähän laattojen raudoitusta ei yleensä voida järkevästi suunnitella vain ääriarvojen perusteella, vaan raudoitusjärjestelmä on suunniteltava tutkimalla eri kohtien paikallisia rasitusarvoja. Lisäksi laatoilla raudoitusjärjestelmä ei ole yhtä säännönmukainen, vaan sen toteutukseen on laajemmin vaihtoehtoja. Vastaavasti kuin tämän tutkimuksen tuloksissa, myös Mangal & Cheng (2108) ovat julkaisussaan esittäneet sekä optimointiprosessin yleisellä tasolla ilman ohjelmistoriippuvuutta, että käytännön esimerkkitapauksen, jossa on selostettu siinä käytetyt ohjelmistot.

4.2 Paikallavaluholvin raudoitussuunnittelun prosessi

Paikallavaluholvin raudoitussuunnittelun prosessista laadittiin tavoitteiden mukaisesti prosessikaavio, joka sisältää raudoitussuunnittelun prosessin ilman riippuvaisuutta käytetystä ohjelmistosta tai mitoitusmenetelmästä. Lisäksi laadittiin toinen kaavio esimerkkitapauksissa käytetystä ohjelmistojen välisestä prosessista.

4.2.1 Prosessikaavio raudoitussuunnittelusta

Prosessikaavio on laadittu vuokaavion muotoon sisältäen raudoitussuunnittelun vaiheet, tarvittavat valinnat sekä valintojen huomioitavat vaikutukset. Kuten aiemmin on todettu, raudoitussuunnittelun prosessikaavio on laadittu siten, että se ei ole riippuvainen suunnittelussa käytetystä mitoitusmenetelmästä tai ohjelmistosta. Näin kaaviota voidaan käyttää suunnittelussa yleisenä ohjeena, vaikka sen ensisijainen tavoite on kuvata raudoitussuunnittelun prosessia ohjelmistokehityksen näkökulmasta. Prosessikaavion eri kohtiin on kirjattu tavanomaisesta laatasta esimerkkiraidoitusjärjestelmä, joka toimii selventävänä suunnitteluohjeena.

Prosessikaavio paikallavalulaatan raudoitussuunnittelusta on esitetty liitteessä 1.

Prosessikaavio on jaettu seuraaviin pääosiin:

- vaakaraudoitus, kenttäraudoitus
- vaakaraudoitus, tukirauδοitus
- leikkausraudoitus
- lävistysraudoitus
- U-lenkit
- rengasteräokset ja
- reikien pielirauδοitus,

jotka vastaavat kappaleissa 2.2.3, 2.2.4 ja 2.2.5 esitettyjä rakennemitoituksen tarkasteluja. Käyttörajatilan tarkastelut, jotka on esitetty kappaleessa 2.2.6 sisältyvät näihin pääosiin, sillä rakennemitoituksen tuloksissa ne on otettu huomioon.

Kaaviossa huomioitu luvussa 2.3 esitetyt paikallavaluholvin raudoitukseen liittyvät ohjeet ja vaatimukset seuraavasti:

- 2.3.1 Raudoituksen toteutustavat: raudoitustyyppin valinta on vaakaraudoituksissa ensimmäisenä valittava.
- 2.3.2 Vähimmäisraudoitus ja jakorauδοitus: vähimmäisraudoituksen täytyminen on huomioitu jo rakennemitoituksen tuloksissa, mutta perusraudoituksen valinnassa on ohjeistettu valitsemaan sen kattava perusraudoitus. Jakorauδοitus yhteen suuntaan kantavan laatan tapauksessa on ohjeistettu ottaa huomioon.
- 2.3.3 Raudoitustankojen väli: minimi- ja maksimiarvo on otettava huomioon raudoituksia valittaessa.
- 2.3.4 Kevennyskaistat: kevennyskaistat ei kuulu kaavion sisältöön, sillä raudoitusmäärät valitaan rakennemitoituksen tulosten perusteella.
- 2.3.5 Kenttäraudoituksen ankkurointi tuelle: raudoitusten pituuksia valittaessa on otettava huomioon ankkuroituminen tuelle tai ankkurointipituuden lisääminen momenttipinnan ulkopuolelle.
- 2.3.6 Tukirauδοitus: vapaiden ja osittain kiinnitettyjen tukien vaatimusten mukainen raudoitus on kaaviossa omana kohtana tukirauδοitusten valinnassa.

- 2.3.7 Vapaan reunan raudoitus: vapaan reunan raudoitus on otettava huomioon U-lenkkien ja rengasterästen valinnassa.
- 2.3.8 Reikien vaikutus: reikien vaikutus on käsitelty kohdassa reikien pie-liraudoitus
- 2.3.9 Raudoituksen taivutukset: Raudoituksen taivutukset eivät kuulu kaa-vion sisältöön, sillä ne eivät ole valittavissa, vaan määräytyvät valittujen tankokokojen perusteella.
- 2.3.10 Raudoituksen jatkokset: Raudoituksen jatkokset eivät kuulu kaa-vion sisältöön, sillä jatkosten toteuttaminen on usein ohjeistettu yleismai-ninnalla raudoituspiirustuksessa.
- 2.3.11 Tankoniput: tankoniput on rajattu tutkimuksen laajuudesta pois. Ne ovat laatoissa harvinaisia.

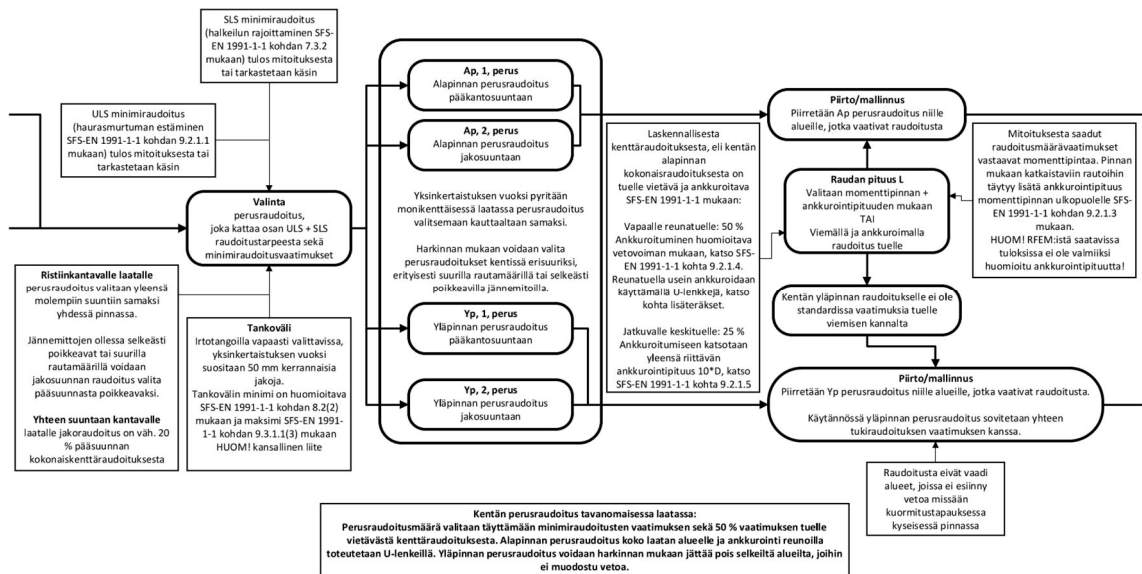
Prosessikaavion periaatteena on, että jokaiselle laataston kentälle, tuelle ja vaa-timusalueelle on valittava jokainen raudoitusta määrittelevä arvo. Suunniteltavan kohteen ollessa suuri, kuten asuinkerrostalon välipohjalaatta, ohjelmoidussa suunnitteluprosessissa näitä arvoja syntyy merkittävä määrä. Käytännössä rau-doituksia täytyy valita mahdollisimman paljon samoiksi laataston eri kohdissa, sillä projektin kokonaistalouden kannalta ei ole järkevää optimoida raudoitusta liikaa, vaan suosia selkeitä ratkaisuja. Ohjelmoinnissa tämä täytyy ottaa huomi-oon logiikkana, joka osaa valita eri kohtien välille toisiaan vastaavia arvoja. Seu-raavaksi käydään läpi prosessikaavion sisältö pääpiirteittäin.

Lähtötiedot

Prosessikaavion eteneminen alkaa lähtötiedoista, joita ovat rakennesuunnitte-lusta sekä rakenneanalyysistä saatavat rakenteen geometriatiedot ja mitoitustu-lokset. Vaakaraudoituksen määrittämiseen tarvitaan murto- ja käyttörajatilojen yhteisvaatimus tasokuvina, joissa on eroteltu eri suuntien ja eri pintojen raudoi-tusvaatimukset poikkipinta-alamäärinä. Leikkausraudoituksen määrittämiseen tarvitaan leikkausraudoitusmäärän vaatimus tasokuvana. Lävistysraudoituksen määrittämiseen tarvitaan lävistymisen kannalta kriittisten kohtien mitoitustulokset tasokuvana. Leikkaus- ja lävistysraudoituksen mitoitustulosten tulkitseminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin vaakaraudoituksella. Tästä kerrotaan tarkemmin ky-seisissä kohdissa.

Vaakaraudoituksen määrittäminen

Prosessikaaviossa ensimmäisenä määritetään laatan vaakaraudoitukset, joka alkaa raudoitustyyppin valinnasta, eli käytetäänkö irtotankoja, verkkorautoja tai jotain muuta valmisraudoitetyppiä. Tämän jälkeen tehdään raudoitusvalinnat, joiden perusteella piirretään vaakaraudoitukset pohjakuvaan huomioiden niiden pitiudessa ankkurointivaatimukset tai viemällä raudoitus tuelle. Vaakaraudoitteista ensin määritetään perusraudoitus, joka tehdään molempiin pintoihin ja molempiin raudoitussuuntiin. Valinnassa on ohjeistettu kattamaan minimiraudoitusvaatimukset sekä pääosa raudoitusvaatimuksesta. Perusraudoituksen jälkeen määritetään kenttien lisäraudoitukset. Ne valitaan kattamaan loput kenttien raudoitusvaatimuksesta. Kuvassa 20 on esitetty osa prosessikaaviosta, joka koskee perusvaakaraudoituksen määrittämistä. Prosessikaavion muut osat noudattavat samaa periaatetta.



Kuva 20. Perusvaakaraudoituksen määrittäminen, osa raudoitussuunnittelun prosessikaaviosta.

Kenttien perus- ja lisäraudoitusten määrittelyn jälkeen kaaviossa siirrytään valitsemaan tukialueiden raudoitus. Laatan perusraudoitus on jo aiemmassa kohdassa valittu, joka toimii myös tukien kohdalla perusraudoituksena. Tarvittaessa voidaan perusraudoitusta kasvattaa tai valita tuelle erilainen perusraudoitus tukialueiden vaatimuksen perusteella. Perusraudoituksen ollessa tiedossa valitaan

seuraavaksi lisäraudoitus kattamaan loput raudoitusvaatimuksesta tukien kohdalla.

Tukien raudoituksesta täytyy seuraavaksi vielä tarkastaa ja tarpeen mukaan määritellä vapaiden reunatukien raudoitus sekä osittain kiinnitettyjen tukien raudoitus, joiden vaatimukset on annettu Eurokoodeissa. Vapaiden reunatukien raudoituksessa on tarkastettava, onko laatussa sellaisia vapaita reunatukia, joissa yläpinnan raudoitusvaatimus ei täyty ja lisättävä raudoitus tarpeen mukaan.

Osittain kiinnitettyjen tukien raudoituksessa on vastaavasti tarkastettava, onko laatussa sellaisia osittain kiinnitettyjä tukia, joissa yläpinnan raudoitusvaatimus ei täyty ja lisättävä raudoitus tarpeen mukaan. Tätä varten tarvitaan rakennemitoituksesta tiedot, mitkä tuet ovat osittain kiinnitettyjä, mutta eivät ole otettuna huomioon rakenneanalyysissä. Jos osittaiset kiinnitykset on otettu huomioon jo FEM-analyysissä, näkyvät niiden raudoitusvaatimukset mitoitus tuloksissa ja tätä tarkastelua ei silloin tarvita. Tarvittavan raudoituksen valinta ja piirtäminen pohjakuvaan tehdään vastaavasti kuin muilla lisäraudoilla.

Leikkausraudoituksen määrittäminen

Leikkausraudoituksen valinnan lähtötietona ovat vaaditut leikkausraudoitusmäärät laatan eri kohdissa. Leikkausraudoituksen tulosten tulkinta ei ole kuitenkaan yhtä suoraviivaista kuin vaakaraudoituksissa. Prosessikaavion ensimmäinen vaihe leikkausraudoituksen määrittelyssä on mitoitus tarkastelu, jossa käydään läpi leikkausraudoitusta vaativat alueet ja valitaan tarpeelliset toimenpiteet niistä jokaiseen.

Laatan leikkauksen kapasiteettia on mahdollista kasvattaa lisäämällä vaakateräsmäärää. Jos tämä valitaan toimenpiteeksi jollain alueella, on tämä otettava huomioon aiemmin määritellyssä vaakaraudoituksessa.

Erillinen leikkausraudoitus on laatussa mahdollinen, vaikka tavanomaisessa laatussa epätavallinen raudoitus. Järeissä laatoissa se on joskus välttämätön, kuten väestönsuojalaattaa esittävässä esimerkissä se vaadittiin riittävän leikkauksen kapasa-

siteetin saavuttamiseen lähellä viivatukia. Prosessikaaviossa erillinen leikkausraudoitus valitaan ohjeiden mukaan ja piirretään sitä vaativalle alueelle pohjakuvaan.

Lävistysraudoitus

Kuten leikkausraudoituksen, on lävistymisraudoituksen tulosten tulkinta monimutkaisempaa kuin vaakaraudoitusten. Raudoitussuunnittelun lähtötiedoksi tarvitaan rakennemitoituksessa tunnistetut lävistymiselle kriittiset kohdat ja niissä kussakin tarvittavat toimenpiteet. Myös lävistymiskapasiteettia on mahdollista kasvattaa vaakaraudoitusta lisäämällä, joten mahdolliset vaikutukset on otettava huomioon vaakaraudoitusmäärissä. Erillistä lävistymisraudoitusta käytettäessä on tulosten antaminen tasokuvassa hankalaa, joten raudoitussuunnittelua varten niistä tarvitaan tarkat tiedot rakennemitoituksesta. Lävistymiskapasiteetin kasvattamiseen on myös valmistuotteita, joita käytettäessä tiedot tarvitaan tarkasti eriteltynä rakennemitoituksesta valmistajan ohjeiden mukaan.

Lisäraudoitusten määrittäminen

Viimeisenä vaiheena prosessikaaviossa on lisäraudoitusten määrittäminen, joka sisältää reunoille tulevien U-lenkkien ja rengasterästen sekä reikien pieliraudoitusten määrittämisen. U-lenkkien valinnassa on ohjeistettu ottamaan huomioon Eurokoodin vaatimus vapaiden reunojen raudoituksesta sekä U-lenkkien käytöstä pääterästen ankkurointiin tai muihin tarkoituksiin. Rengasterästen valinnassa viitataan vaurionsietokyvyn mitoitukseen sekä Eurokoodin vaatimukseen vapaiden reunojen raudoituksesta. Valitut U-lenkit ja rengasteräket piirretään pohjakuvaan kullekin laatan reunalle.

Reikien pieliraudoituksen määrittelyssä ensimmäisenä vaiheena on mitoitustarkastelu, jossa täytyy luokitella reiät pieniin tai muutoin sellaisiin, joita ei tarvitse rakenneanalyysissä huomioida sekä rakenteellisesti merkittäviin reikiin, jotka rakenneanalyysissä on oltava mukana. Rakenneanalyysissä olevien reikien raudoitusvaatimukset näkyvät tuloksissa, joten niitä ei tarvitse tässä vaiheessa enää tarkastella. Pienistä tai muuten merkityksettömistä rei'istä ohjeistetaan laatimaan

yleisohje raudoituspiirustuksen yhteyteen. Näitä raudoituksia ei yleensä tavanomaisissa raudoituspiirustuksissa piirretä pohjakuvaan.

4.2.2 Prosessikaavio ohjelmistojen välisestä prosessista

Tutkimuksessa laadittiin raudoitussuunnittelua kuvaavan prosessikaavion lisäksi ohjelmistojen välistä toimintaa kuvaava prosessikaavio. Siinä esitellään tutkimuksen esimerkkitapauksissa käytetty työjärjestys tarkemmin, sisältäen käytetyt ohjelmistot sekä niiden välisen tiedonsiirron rajapinnat. Lisäksi kaavioon on kirjattu ehdotuksia työkalujen automatisointiin. Ohjelmistojen välinen prosessikaavio on tarkoitettu jatkokehitykseen käytännön ohjeeksi siitä, millaista automatiikkaa tiedonsiirto ohjelmien välillä vaatii sekä millaisia automatisoituja työkaluja raudoitussuunnittelun tueksi kannattaa kehittää.

Ohjelmistojen välinen prosessikaavio perustuu esimerkkitapauksiin ja niissä tehtyyn raudoitusten suunnitteluun ja sen sisältö noudattaa myös raudoitussuunnittelun prosessikaavion periaatteita. Siinä on selvitetty, miten raudoitussuunnittelun prosessikaaviossa esitetty prosessi voidaan toteuttaa esimerkkitapauksissa käytetyillä ohjelmistoilla.

Lähtötietojen vakiointia tutkittiin esimerkkitapausten perusteella ja ehdotus niiden muodosta on annettu ohjelmistojen välisessä prosessikaaviossa. Vaaka- ja leikkausraudoitusten suunnittelun lähtötiedoiksi vaadittavat tasokuvat voidaan RFEM-ohjelmasta tulostaa DXF-tiedostoiksi export-komennolla, kuten aiemmin on kerrottu. Vaakaraudoitusten tuloksina saatavista DXF-tiedostoista pystytään algoritmien avulla poimimaan tarvittavat lukuarvot sekä pinta-alatiedot, jotka vaaditaan automatisoitujen työkalujen kehittämiseen. Tämä todettiin yhteistyössä kehitysryhmän kanssa asiantuntijahaastatteluiden perusteella.

Prosessikaaviossa on lisäksi esitetty ehdotus käyttörajatilan epälineaarisen mitoituksen etenemisestä esimerkkitapausten tulosten perusteella. Tästä on kerrottu tarkemmin esimerkkien tuloksissa kohdassa 4.4.

Prosessikaavio ohjelmistojen välisestä prosessista on esitetty liitteessä 2.

4.3 Esimerkkitapausten tulokset

Kuten aiemmin on jo mainittu, esimerkkitapausten tuloksia hyödynnettiin raudoitussuunnittelun prosessin tutkimiseen sekä yleisellä tasolla, että hyödynnettävien ohjelmistojen kannalta. Esimerkkitapausten raudoitussuunnittelun raudoituspiirustukset on esitetty liitteissä 3 ja 4. Piirustuksissa raudoitusmerkinnät on laadittu sillä periaatteella, että niitä voidaan hyödyntää raudoituspiirustusten laadinnassa.

Eri esimerkeissä tulivat kriittisiksi erilaiset murtotavat, jolloin raudoitussuunnittelussa huomioon otettavat asiat saatiin kattavasti tarkasteltua. Merkittävin ero laattojen mitoituksessa oli lävistys- ja leikkausraudoituksissa. Esimerkissä 1 välipohjaholvin tapauksessa ei tarvittu erillistä lävistys- tai leikkausraudoitusta, vaan riittävä kapasiteetti saavutettiin vaakaraudoitusta lisäämällä. Esimerkissä 2 väestönsuojaholvin tapauksessa vaadittiin sekä lävistysraudoitus pilarituen kohdalle, että erillistä leikkausraudoitusta raskaimmin rasitettujen viivatukien lähelle.

Esimerkissä numero 1 suoritettiin myös epälineaarinen käyttörajatilamitoitus RFEM-ohjelman RF-CONCRETE Surfaces-moduulissa. Tämän perusteella on ohjelmistojen väliseen prosessikaavioon tehty ehdotus epälineaarisen mitoituksen etenemisestä. Epälineaarinen mitoitus on suositeltu tekemään niin, että ensin suoritetaan RF-CONCRETE Surfaces-moduulissa murtorajatila- ja lineaarinen käyttörajatilamitoitus. Tämän mukaisilla tuloksilla valitaan raudoitukset laatalle kuten raudoitussuunnittelun prosessikaaviossa on esitetty ja nämä raudoitukset syötetään takaisin moduuliin. Näin voidaan tehdä käyttörajatilan epälineaarinen mitoitus, jonka tulosten perusteella voidaan joko todeta raudoitus riittäväksi tai tarpeen mukaan muokata sitä.

4.4 Rakennemitoituksen haasteet

Esimerkkitapausten yhteydessä löydettiin haasteita rakennemitoituksesta ja raudoitussuunnittelusta, erityisesti kun asiaa tarkasteltiin ohjelmistokehityksen näkökulmasta. Jotta automatisointi on mahdollista, täytyy prosessin ja sen sisältämän tiedon noudattaa aina samoja periaatteita. Merkittävimmät haasteet löydettiin tulosten esitystavasta sekä epälineaarisen käyttörajatilamitoituksen laskentaoleuksista ja soveltamisesta erilaisiin tapauksiin.

Epälineaarinen käyttörajatilamitoitus

RFEM-ohjelman RF-CONCRETE Surfaces-moduulissa voidaan tehdä käyttörajatilassa epälineaarisia analyysejä, joissa pystytään ottamaan huomioon halkeilun, viruman, kutistuman ja raudoituksen vaikutukset. Näillä analyyseillä on mahdollista tutkia laattojen käyttäytymistä hyvinkin tarkasti. Esimerkkitapausten tulosten perusteella tämä käytännössä vaatii käytettävien raudoitusten määrittämisen ohjelmaan, jotta tuloksia voidaan järkevästi tulkita. Tämä asettaa haasteen, sillä raudoitukset täytyvät ennen analyysia olla suunniteltuna sekä niiden syöttäminen ohjelmaan käsin on työläs vaihe. Tutkimuksen perusteella RFEM-ohjelmassa ei toistaiseksi ole suoraa toimintoa, jolla voitaisiin syöttää raudoituksia ohjelmaan taulukkomuotoisesti. Kopioiminen leikepöydän kautta on mahdollista, mutta edelleen vaatii käyttäjältä tietojen muokkaamista ja siirtämistä käsin.

Toisena haasteena havaittiin kutistuman huomioiminen erityisesti viivatukien aiheuttaman vaakasidonnan kannalta. Esimerkeissä käytettiin RFEM-ohjelmassa olevaa viiva- ja pistetukien määrittämistä, joka ottaa huomioon tukevan seinän tai pilarin jäykkyyden tukireaktioissa jousivakioina. Seinillä määritettyjen jousitukien vaakatuki on niin järeä, että kutistuman ollessa huomioituna aiheutuu laattaan epätodellisia jännityksiä. Todellista rakennetta vastaavan oletuksen tekeminen vaakatuennasta on haastavaa, eikä siihen ole selkeää ohjeistusta laadittuna.

Epälineaarisen käyttörajatilamitoituksen suorittaminen vaatii aikaa raudoitusten syöttämisen sekä laskentaoletusten takia, mutta myös laskenta-aika on merkittävän pitkä. Haasteena on ohjeistuksen puuttuminen siitä, milloin epälineaarinen käyttörajatilamitoitus on tarpeellista suorittaa ja milloin voidaan olettaa lineaarisen mitoituksen olevan riittävän tarkka.

Leikkaus- ja lävistysmitoituksen tulokset

Kuten aiemmin jo todettiin, leikkaus- ja lävistysraudoitusten tulosten esittäminen ja tulkitseminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin vaakaraudoituksilla. Myös rajanveto rakennemitoituksen ja raudoitussuunnittelun välillä on haastavampaa tehdä, varsinkin lävistysraudoituksen suunnittelussa.

Tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että kehitystyön kannalta suurin haaste leikkausraudoitusten suunnittelussa on tulosten tulkitseminen. RFEM-ohjelman RF-CONCRETE Surfaces-moduuli suorittaa leikkausraudoituksen mitoituksen ja tulokset pystytään export-toiminnolla tulostamaan käytettävään muotoon, mutta ennen kuin tulosten perusteella voidaan leikkausraudoitus suunnitella, vaaditaan erillistä mitoitus tarkastelua. Leikkausraudoitusta vaativat kohdat täytyy rakenne-mitoituksessa käydä läpi ja niistä täytyy todeta, onko leikkausraudoitusalue hyväksyttävissä ilman leikkausraudoitusta vai miten riittävä leikkauskapasiteetti alueella saavutetaan. Lisäksi paikalliset leikkausraudoitustarpeet esimerkiksi piste-tukien kohdalla kuuluvat lävistystarkasteluun, joten niissä ei voida suoraan leikkausraudoitustulosten perusteella edetä raudoitus suunnitteluun. Tällaisen tarkastelun esittäminen ohjelmoinnin kannalta selkeään muotoon on haastavaa, vaikka periaatteet leikkausraudoituksen suunnitteluun ovatkin yksinkertaiset.

Lävistysraudoituksen suunnittelussa suurimpana haasteena ohjelmoinnin kannalta on tulosten esittäminen mielekkäässä muodossa. Lävistyskapasiteetin tarkastus etenee niin, että ensin täytyy tunnistaa kohdat, joissa mitoitus tarkastelu on syytä suorittaa. Tämän perusteella tehdään lävistysmitoitus, josta saadaan toimenpiteet, joilla riittävä kapasiteetti saavutetaan. Esimerkkitapausten tulosten perusteella voidaan todeta, että RFEM RF-Punch PRO-mitoitusmoduulista export-toiminnolla saatavat tulokset eivät ole yksinään riittäviä lävistysraudoituksen suunnittelun lähtötiedoiksi, vaikka mitoitusmoduuli osaa tunnistaa tarkasteltavat kohdat ja suorittaa niille lävistysmitoituksen. Tarvittava vaakaraudoitus määrä näkyy tuloksissa oikein, mutta erillisen lävistysraudoituksen tiedot tulosteessa eivät ole riittävät. Mitoitusmoduulista löytyy tarkat tulokset, mutta ne täytyy käsin siirtää tasokuvaan raudoitus suunnittelun lähtötiedoksi.

Haasteena lävistysmitoituksessa on myös se, että RFEM RF-Punch PRO-mitoitusmoduulista käytössä oleva versio ei sisällä oikeita laskentakertoimien oletusarvoja Suomen kansallisesta liitteestä, vaikka Suomen kansallinen on valittavissa käyttöön. Kansallisen liitteen mukaiset kertoimet pystytään syöttämään mitoitusmoduuliin luomalla siihen oma kansallinen liite. Tämä täytyy suunnittelijan osata

ottaa huomioon mitoitusta tehdessään. Lisäksi Eurokoodin mukaisesta lävistysmitoituksesta ei toistaiseksi ole helppokäyttöisiä laskentataulukkoja saatavilla, joilla tuloksia voitaisiin tarkastaa.

Lävistysraudoituksen toteutukseen on useita erilaisia tapoja, joista käytettävä on valittava jo rakennemitoituksessa ja tulokset esitettävä sen mukaisesti. Käytännössä nämä seikat johtavat siihen, että tarvittava lävistysraudoitus on suunniteltava mitoituksen yhteydessä loppuun asti. Tästä syystä tarkat lähtötiedot rakennemitoituksesta lävistysraudoituksen suunnittelua varten ovat erityisen tärkeitä, kun ollaan raudoitussuunnitteluvaiheessa.

Jännityshuippujen tasoittaminen

FEM-analyysistä saatavien tulosten oikeellisuuteen vaikuttaa myös laskentamalliin syntyvien jännityshuippujen tasoittaminen, joita on usein syytä tasoittaa. Paikallavalulaahtojen tapauksessa tämä tarkoittaa usein nurkkien ja pistemäisten tukien kohdalle syntyviä jännityspiikkejä. Jos raudoitus suunniteltaisiin kauttaaltaan jännityspiikin huippuarvon perusteella, saataisiin huomattavasti ylimitoitettuja tuloksia.

RFEM-ohjelmassa on toiminto, jolla tietyltä alueelta jännitysten arvot pystytään tasoittamaan. Tämä vaikuttaa laskennan tuloksiin ja on näin mukana raudoitusten suunnitteluprosessissa. Haasteena tässä on selkeän ohjeistuksen puuttuminen siitä millä periaatteilla jännitysten tasoittaminen tulisi tehdä. Lisäksi tämä on rakennemitoituksessa otettava huomioon jo laskentamallia laadittaessa, ettei koko prosessia jouduta suorittamaan uudelleen raudoitussuunnitteluvaiheessa.

5 POHDINTA

Tässä luvussa käydään läpi pohdinta sekä tutkimuksen tulosten perusteella tehdyt johtopäätökset. Käsitellään, ovatko tutkimuksen luvussa 1.2 esitetyt tavoitteet täyttyneet ja esitetään tälle päätelmälle perustelut.

5.1 Tutkimuksen tavoitteiden toteutuminen

Tutkimuksen tavoitteet saatiin täytettyä. Paikallavaluholvin raudoitussuunnittelusta laadittiin prosessikaavio. Lisäksi laadittiin erillinen kaavio ohjelmistojen välisestä prosessista, joka sisältää automatisoitujen työkalujen jatkokehityksen kannalta tärkeää tietoa.

Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin paikallavalulaattojen raudoitussuunnitteluun liittyvät seikat. Lähteinä käytettiin Eurokoodi-järjestelmää sekä sitä täydentäviä oppikirjoja ja ohjeita. Eurokoodit ovat Suomessa tällä hetkellä voimassa oleva kantavien rakenteiden suunnittelustandardi ja niiden sisältö määrää suunnittelussa huomioon otettavat ilmiöt ja periaatteet. Kirjallisuustutkimuksessa päälähteenä käytetyt BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirjan osat 1 ja 2 ovat tarkoitettu betonirakenteiden suunnittelun opetukseen sekä suunnittelijoiden käyttöön. Tämän tarkoituksen mukaisesti ne sisältävät kattavasti Eurokoodien sisällön tästä aiheesta. Oppikirjan osan 2 kappaleessa 6 on koostettu teräsbetoni-laattoihin liittyvät ohjeet, jotka tämän raportin kappaleissa 2.2 ja 2.3 on käyty vastaavassa järjestyksessä läpi. Lisäksi muut tutkimuksessa käytetyt lähteet eivät sisällä tästä poikkeavia kohtia. Tällä perusteella voidaan todeta kirjallisuustutkimuksen tuloksena saadun aineiston olevan kattava listaus paikallavaluholvien rakennesuunnittelussa huomioon otettavista asioista.

Prosessikaavion sisältö perustuu kirjallisuustutkimuksen tuloksiin. Verrattaessa prosessikaavion sisältöä näihin tuloksiin nähdään, että se on kattava sisältäen niissä esitetyt vaatimukset sekä tarkistukset.

Kaavion sisältöä ohjelmistokehityksen kannalta on arvioitu asiantuntijahaastattelussa, jonka perusteella se tukee hyvin tulevaa kehitystyötä. Prosessikaavion sisältö voidaan näin todeta olevan kattava myös ohjelmistokehityksen kannalta.

Tästä huolimatta vasta kehitystyön aikana ja erityisesti sovellettaessa todelliseen kohteeseen nähdään, onko kaaviossa puutteita.

5.2 Pohdinta

Tutkimuksessa laadittiin tavoitteiden mukainen aineisto, joka on ohjelmistokehitysryhmälle lähtötietona paikallavaluholvien raudoitussuunnittelun automatisoitujen työkalujen kehittämiseen. Aineistoa ja siitä tehtyjä johtopäätöksiä voidaan käyttää myös kehitystyön suunnittelussa.

Prosessikaavio perustuu suunnittelustandardeissa esitettyyn teoriaan ja sen lähtökohtana ovat rakennemitoituksen tulokset. Sisältö on rajattu perinteisesti raudoitettuihin tasapaksuihin laattoihin. Kunhan suunnittelu tapahtuu tämän rajauksen mukaisesti, ei prosessikaavio estä käyttämästä erilaisia tapoja ja laskentaoletuksia rakennemitoitukseen. Käytännössä kaavio on kuitenkin tarkoitettu FEM-analyysillä tehdyn rakennemitoituksen jatkoksi, sillä lähtötiedot saadaan siitä toivotussa muodossa. Lisäksi kaavion laajuus ja rakenne on laadittu ensisijaisesti tällaisten lähtötietojen perusteella. Prosessikaavio voidaankin tietyssä mielessä nähdä myös FEM-analyysistä saatavien tulosten tulkintaohjeeksi.

Tutkimuksen aikana todettiin, että RFEM-ohjelmasta saatavista DXF-tiedostoista pystytään algoritmiavusteisesti poimimaan ohjelmoinnissa tarvittavia tietoja. Kehitystyön kannalta tämä on välttämätön lähtökohta, että tietosisältöä pystytään automatisoidusti lukemaan rajapintojen välillä. Tämä luo pohjan kehitystyön jatkamiselle. Tiedonsiirto todettiin toimivan vaakaraudoitusten lähtötiedoissa ja tähän perustuu jatkokehitysehdotuksessa ensimmäisenä kehitettävät osuudet. Haastavampien lähtötietojen tiedonsiirtoa ei tutkimuksessa testattu, joten niiden ohjelmoinnin toteutettavuudesta ei toistaiseksi ole tietoa. Tästä syystä ne on ehdotuksessa jätetty myöhemmäksi kehitystyöksi, jota täytyy erikseen harkita.

2. luvussa on käyty läpi paikallavaluholvin mitoitusperiaatteet, eurokoodin vaatimukset, raudoitusjärjestelmän taloudellisuus sekä piirustusten vaatimukset. Näiden perusteella lopputuloksena saatavan raudoituspiirustuksen täytyy

- olla rakenteiden kapasiteettien kannalta riittävä sekä murtoraja- että käyttörajatilassa,

- täyttää myös rakennemitoituksesta riippumattomat rakenteelliset vaatimukset,
- olla taloudellinen ja
- toteutuksen kannalta tehokas
- sekä täyttää raudoituspiirustukselle asetetut laatuvaatimukset.

Raudoitussuunnittelun prosessi etenee vaiheittain, joissa tehtävillä valinnoilla on usein vaikutus myös joko tuleviin tai jo suoritettuihin vaiheisiin. Prosessin ohjelmoinnissa täytyy ottaa nämä vaikutukset huomioon. Esimerkiksi leikkaus- tai lävistyskapasiteetin vaatimat vaakaraudoitukset on otettava huomioon vaakaraudoituksen kokonaismäärissä.

Paikallavaluholvien raudoitussuunnittelun tekee osaltaan haastavaksi se, että geometrialtaan ja kuormitukseltaan erilaisilla laattarakenteilla kriittisiksi muodostuvat erilaiset murtotavat. Ohjelmoinnin täytyy kattaa kaikki vaatimukset, jotta työkalu soveltuu erilaisiin tapauksiin, tai selkeästi ilmoittaa mitkä ovat työkalun rajoitteet. Myös käyttäjän osaaminen on tärkeässä roolissa saatujen tulosten arvioinnissa.

Suunnitteluprosessista saatavien pohjakuvien hyödyntämiseen raudoituspiirustusten laadinnassa on useita vaihtoehtoisia tapoja. Yhtenä on käyttää pohjakuvan raudoitusmerkintöjä suoraan DWG-referenssinä, joka voidaan tuoda raudoituspiirustuksen päälle. Tästä syystä pohjakuvan merkinnät on syytä olla jo valmiiksi laadittu rakennepiirustusten piirustussääntöjä noudattaen. Näin perinteisellä sisällöllä laadittu raudoituspiirustus on lähes valmis. Toinen vaihtoehto on käyttää DWG-referenssiä Teklan ”mallipuolella” apupiirustuksena, jonka avulla voidaan käsin mallintaa raudoitteet rakennemalliin.

Jatkokehityksen kannalta mielenkiintoisin vaihtoehto ohjelmoidun prosessin hyödyntämiseen raudoituspiirustuksen laadinnassa on käyttää pohjakuvan sisältämää tietoa raudoitteiden mallinnuksen automatisointiin. Tämä on alustavan selvityksen perusteella tietoteknisesti toteutettavissa. Tällä menetelmällä saataisiin ainakin pääosa raudoitusmassasta luotua rakennemalliin, jota voitaisiin tarvitta-

vilta osin käsin muokata sopivaksi. Tällainen työkalu voisi olla merkittävä apu sellaisissa projekteissa, joissa vaaditaan raudoitusten mallinnusta, mutta soveltaminen käytännössä vaatii lisää tutkimusta.

Epälineaarisen käyttörajatilatarkastelun suorittaminen olisi nopeampaa, jos pystyttäisiin raudoituspohjasta suoraan siirtämään piirretyt raudoitukset RFEM-ohjelman RF-CONCRETE Surfaces-moduuliin. Tämä on tutkimuksen perusteella jo osittain mahdollista, jos suunnitteluprosessissa syntyvät raudoitustiedot muotoillaan sopivaan muotoon ja kopioidaan käsin mitoitusmoduuliin.

Ohjelmoidussa suunnitteluprosessissa on tärkeää, että kaikissa manuaalisissa työvaiheissa huomioidaan työkalujen toiminta. Työssä käsitellyssä prosessissa tärkeää on, että rakennemitoitusta tekevä tietää mihin tarkoitukseen ja millä tavalla laskennasta saatavia tuloksia tullaan käyttämään jatkosuunnittelussa. Esimerkiksi jännityshuippujen tasaamisessa täytyy ottaa huomioon miten automaattiset toiminnot lukevat tuloksia. Jos tulokset on laadittu väärillä periaatteilla, täytyy vähintään laskenta suorittaa uudelleen korjausten jälkeen. Tähän vaikuttaa myös se, että yhdenmukaisia ohjeita FEM-mitoitukseen ei ole saatavilla ja mitoitusoletukset, mallin laadinta sekä tulosten tulkitseminen ovat paljon suunnittelijan tottumuksista riippuvaista.

Algoritmiavusteiset menetelmät ovat saamassa jalansijaa käytännön rakennesuunnittelutehtävissä. Partin (2021), Ala-Hakunin (2022) ja Kähkösen (2021) sekä Mangal & Cheng (2018) ja Eleftheriadis et al. (2018) tutkimuksissa työkalu on kehitetty luomaan lähtötietojen perusteella laskentamalli ja mitoittamaan rakenteet. Osassa näistä työkaluista on myös rakenteiden optimointi huomioitu. Tämän työn tavoitteena on edistää sellaisen työkalun kehittämistä, joka tukee mitoituksesta saatavan tiedon jatkojalostamista raudoituspiirustukseksi asti. Kuten yllä on pohdittu, tällaisen työkalun toiminta on riippuvainen mitoituksesta saatavan tiedon yhdenmukaisuudesta. Yhdenmukaisiin mitoitus tuloksiin on helpompi päästä, jos myös mitoitus suoritetaan algoritmien avulla, joten algoritmiavusteinen menetelmä paikallavaluluaattojen mitoitukseen olisi erittäin hyvä lähtökohta työssä ehdotetulle työkalulle.

5.2.1 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimukseen tehdyt rajaukset olivat tarkoituksenmukaisia työn laajuuden kannalta.

Jännitetyt ja esivalmistetut rakenteet ovat mitoitukseltaan ja toteutustavaltaan selvästi erilaisia rakenteita, joihin tutkimuksen tuloksia ei voida soveltaa.

Rajaus tasapaksuihin holveihin on tutkimuksen laajuuteen nähden perusteltu. Laatan, jossa on palkkikaistoja, mitoitus poikkeaa merkittävästi tasapaksusta laatasta sekä palkkikaistojen raudoitus noudattaa erilaisia periaatteita, kuin laatan raudoitus. Tulosten soveltaminen paksuudeltaan vaihteleviin laattoihin on kuitenkin mahdollista. Esimerkiksi jos kyseessä on paikallisesti ohennettu laatta, jossa on kauttaaltaan laatalle tyypillinen raudoitus, noudattaa se vastaavaa raudoitussuunnittelun prosessia. Huomioon täytyy tällaisessa tapauksessa ottaa se, miten raudat limitetään tai jatketaan laatan korkeuden muutoskohdassa.

Työn laajuuden kannalta oleellinen rajaus oli myös tutkia automatisoituja menetelmiä vain esimerkinomaisesti, eikä alkaa kehittää niitä työkaluiksi tämän työn puitteissa. Ohjelmistokehitys tämän kaltaisessa sovellutuksessa on haastava ja työläs tehtävä ja tämän takia työssä keskityttiin laatimaan tulevalle ohjelmistokehitykselle laadukasta lähtöaineistoa.

5.3 Johtopäätökset

Tutkimuksen perusteella selkein ja helpoiten automatisoitavissa oleva osuus raudoitussuunnittelusta on vaakaraudoituksen suunnittelu FEM-mitoitustulosten perusteella. Tähän on tietotekniset mahdollisuudet olemassa ja mitoituksen periaatteet ovat selkeät ohjelmoinnin kannalta.

Haastavampaa on leikkaus- ja lävistysraudoituksen suunnittelun ohjelmointi, sillä suunnitteluprosessi ei ole yhtä suoraviivainen kuin vaakaraudoituksilla. FEM-mitoituksesta ei saada suoraan sellaisia tulosteita, joiden perusteella voitaisiin nämä raudoitukset määritellä. Lisäksi leikkaus- ja lävistysraudoitusten suunnittelussa rajanveto rakennemitoituksen ja raudoitussuunnittelun välillä ei ole selkeä,

kuten 4. luvussa on selostettu. Kattavaan paikallavalulaatan raudoitus suunnittelun automaatioon ne on kuitenkin otettava mukaan.

Raudoitusten suunnitteluprosessista saatava pohjapiirustus on syytä olla sellainen, jota voidaan suoraan hyödyntää lopullisten raudoituspiirustusten laatimisessa. Myös prosessista saatavan tiedon hyödyntäminen suoraan mallinnusautomaation lähtötietona on mielenkiintoinen kehityssuunta.

5.4 Ehdotukset jatkokehitykseen

Paikallavaluholvien raudoitus suunnittelun automatisoitujen työkalujen kehittäminen kannattaa aloittaa vaakaraudoitusten määrittelemisestä. FEM-ohjelmasta saatavien export-tulosteiden perusteella määräytyvät kenttä- ja tukiraudoitukset ovat prosessin kannalta selkeimmät toteuttaa ja ovat tavanomaisessa laadussa merkittävimmät raudoitukset. Tästä saatavan tulosteen käyttö suoraan raudoituspiirustuksen merkintöinä tai mallinnusautomaatiossa on syytä ottaa heti huomioon. Tämän jälkeen voidaan harkinnan mukaan siirtyä ohjelmoimaan haastavampi leikkaus- ja lävistysraudoitus suunnittelu.

Raudoitus suunnittelun automatisoitu työkalu soveltuisi erittäin hyvin algoritmiaivusteisesta mitoitustyökalusta saadun tiedon jatkojalostamiseen. Olisi syytä tutkia mahdollisuuksia luoda paikallavalulaattojen rakennemitoitukseen automaattinen mitoitustyökalu, josta saataisiin mitoitustulokset tässä työssä ehdotetun työkalun lähtötiedoksi.

Työkalun käytössä pitäisi huomioida käyttäjän mahdollisuus muokata tehtyjä valintoja. Työkalun käyttöliittymän voisi järjestellä niin, että automaatio tekee ehdotukset käytettävistä raudoituksista vaatimusten perusteella, jotka käyttäjä voi halutessaan muuttaa. Näin käyttäjä voi vaikuttaa muodostuvaan raudoitusjärjestelmään, eikä se ole pelkästään ohjelmoinnin varassa. Näin voidaan oletettavasti päästä useammin laadukkaaseen lopputulokseen sekä käyttäjällä olisi parempi käsitys työkalun toiminnasta.

Käytännön suunnittelutyössä olisi merkittävästi hyötyä työkalusta, joka pystyy

- mitoitustulosten perusteella määrittämään vaakaraudoitusmäärät,

- huomioimaan niiden tankopituudet ja vaikutusalueet,
- yhdistelemään laataston erilaiset raudoitteet toisiaan vastaaviksi järjestelmän selkeyden kannalta ja
- piirtämään valitusta raudoituksesta tasokuvan, jota voidaan käyttää suoraan raudoituspiirustuksessa.

Tällaisilla ominaisuuksilla varustetun työkalun avulla mitoitustulosten tulkinta olisi helpompaa, raudoitusten määrittely selkeämpää ja piirustuksen laadinta olisi nopeampaa. Tämä tehostaisi ja parantaisi laatua paikallavaluholvien raudoitus suunnittelussa.

LÄHTEET

Afzal, M & Liu, Y & Cheng, J & Gan, V. 2018. Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. Journal of Cleaner Production 260 (2020): 120623, 1-22. Viitattu 8.5.2023. Vaatii käyttöoikeuden.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623>

Ala-Hakuni, M. 2022. Työkalu paalulaattojen algoritmiavusteiseen suunnitteluun. Rakentamisen ylempi tutkinto-ohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2022112223502>

Autodesk. n.d. a. AutoCAD-ohjelmisto. Verkkosivu. Viitattu. 16.5.2023.

<https://www.autodesk.fi/products/autocad/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Autodesk. n.d. b. AutoCAD LT-ohjelmisto. Verkkosivu. Viitattu. 17.5.2023.

<https://www.autodesk.fi/products/autocad-lt/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Betoniteollisuus. n.d. a. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan Osa 1: Eurokoodimitoituksen perusteet. Versio 3.3.2009. Viitattu 23.1.2023.

https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_1_Eurokoodimitoituksen_perusteet.pdf

Betoniteollisuus. n.d. b. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan Osa 2: Betonirakenteiden suunnitteluperusteet. Versio 3.3.2009. Viitattu 23.1.2023.

https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_2_Betonirakenteiden_suunnitteluperusteet.pdf

Betoniteollisuus. n.d. c. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan Osa 3: Laatat. Versio 17.1.2019. Viitattu 17.1.2023.

https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_3_Laatat.pdf

Betoniteollisuus. n.d. d. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan Osa 7: Pilarilaatat. Versio 26.1.2010. Viitattu 23.1.2023.

https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_7_Pilarilaatat.pdf

Betoniteollisuus. n.d. e. Betonirakenteiden suunnittelu eurokoodien mukaan Osa 8: Taipuma. Versio 18.2.2011. Viitattu 6.2.2023.

https://www.eurocodes.fi/wp-content/uploads/1992/sahkoinen1992/Leaflet_8_Taipuma.pdf

BuildingSMART Finland. 2012. Yleiset tietomallivaatimukset 2012, Osa 1. Yleinen osuus. Pdf-dokumentti. Viitattu 10.1.2023.

https://drive.buildingsmart.fi/s/7FPE7tGocYZw8BY/download/ytv2012_osa_1_yleinen_osuus.pdf

Celsa Steel Service. n.d. Bamtec-mattorautoite. Verkkosivu. Viitattu 7.2.2023

<https://celsa-steelservice.fi/tuotteet/bamtec/>

Dlubal Software. n.d. a. RFEM 5 – FEA Structural Analysis Software. Verkkosivu. Viitattu. 17.5.2023. <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-5/what-is-rfem>

Dlubal Software. n.d. b. RF-CONCRETE Add-on Module for RFEM. Verkkosivu. Viitattu. 17.5.2023. <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-and-rstab-add-on-modules/reinforced-concrete-structures/rf-concrete>

Dlubal Software. n.d. c. RF-PUNCH Pro Add-on Module for RFEM. Verkkosivu. Viitattu. 17.5.2023. <https://www.dlubal.com/en/products/rfem-and-rstab-add-on-modules/reinforced-concrete-structures/rf-punch-pro>

Eleftheriadis, S & Duffour, P & Stephenson, B & Mumovic, D. 2018. Automated specification of steel reinforcement to support the optimization of RC floors. Automation in Construction 96 (2018) 366-377. Viitattu 8.5.2023. Vaatii käyttöi-keuden. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.005>

Elementtisuunnittelu.fi n.d. Laattarakenteet. Verkkosivu. Viitattu 2.5.2023 <https://www.elementtisuunnittelu.fi/runkorakenteet/laatat>

Eurocodes. n.d. Eurokoodit – Tarkoitus. Verkkosivu. Viitattu 9.1.2023. <https://www.eurocodes.fi/eurokoodit-tarkoitus/>

Finnsementti Oy. n.d. Betonin kutistuminen. Verkkosivu. Viitattu 24.5.2023. <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-betonista/tietoa-betonista-tietoa-betonista-suunnittelijalle/betonin-kutistuminen/>

Karjalainen, P. Diplomi-Insinööri. 2023. Asiantuntijahaastattelu 9.5.2023. Teams-kokous.

Kähkönen, M. 2021. Kulmatukimuurin algoritmiavusteinen suunnittelu. Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma. Tampereen yliopisto. Diplomityö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202112239523>

Lähteenmäki, M. n.d. Elementtimenetelmän perusteet. Luentomoniste. Viitattu 24.1.2023. https://mlahteen.fi/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf

Mangal, M & Cheng J. 2018. Automated optimization of steel reinforcement in RC building frames using building information modeling and hybrid genetic algorithm. Automation in Construction 90 (2018) 39-57. Viitattu 8.5.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.013>

Nykyri, P. 2020. BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 – Osa 1. 4. Painos. Helsinki: BY – Koulutus Oy

Nykyri, P. 2016. BY 211 Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja 2013 – Osa 2. 2. Painos. Helsinki: BY – Koulutus Oy

Partti, E. 2021. Paikallavaletun väestönsuojan algoritmiavusteinen suunnittelu. Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Talonrakennustekniikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-202105036730>

Peikko Group. n.d. Lävistyksenestojärjestelmät. Verkkosivu. Viitattu 23.5.2023. <https://www.peikko.fi/tuotteet/raudoitusjarjestelmat/lavistyksenestojarjestelmat/>

RT 82-10814. 2004. Paikallavaletut betonirunkorakenteet. RT-ohjekortti. Rakennustieto Oy

RIL 229-1-2020. Rakennesuunnittelun asiakirjaohje, Tekstiosa. Hansaprint Oy, 2020. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden Suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. PDF-tiedosto. Vaatii käyttöoikeudet. Viitattu 24.1.2023. Suomen Standardoimisliitto SFS. <https://sales.sfs.fi/fi/index/online-palvelu.html.stx>

Trimble Solutions. n.d. a. Tekla Structures – BIM-rakennesuunnitteluohjelmisto. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-structures>

Trimble Solutions. n.d. b. Toteutuskelpoinen mallintaminen. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.tekla.com/fi/ratkaisut/toteutuskelpoinen-mallintaminen>

Trimble Solutions. n.d. c. Rakentamisen dokumentaatio. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.tekla.com/fi/ratkaisut/rakentamisen-dokumentaatio>

Trimble Solutions. n.d. d. Rakentamisen dokumentaatio. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://www.tekla.com/fi/ratkaisut/rakentamisen-dokumentaatio>

Trimble Solutions. n.d. e. Custom Components. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. https://support.tekla.com/doc/tekla-structures/2023/det_what_is_custom_component

Trimble Solutions. n.d. f. Where to use Tekla Structures Open API?. Verkkosivu. Viitattu 16.5.2023. <https://developer.tekla.com/tekla-structures/documentation/where-use-tekla-structures-open-api>

Ympäristöministeriö. 2007. Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa. Liite 7. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. PDF-dokumentti. Viitattu 24.5.2023. <https://ym.fi/documents/1410903/155128351/eurokoodiasetus+15102007.pdf/64ffc2e2-e9d4-6ed6-67ec-30f3d3c4205e/eurokoodiasetus+15102007.pdf?t=1680089094393>

Ympäristöministeriö. 2016. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet. PDF-dokumentti. Viitattu 23.1.2023. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/lopullinen-suunnitteluperusteet-2016-C352472F_E7C4_4653_BF44_1AB47FB50CB0-137127.pdf/00fb719c-365d-d570-618e-cad1004fbc5b/lopullinen-suunnitteluperusteet-2016-C352472F_E7C4_4653_BF44_1AB47FB50CB0-137127.pdf?t=1603260660111

Ympäristöministeriö. 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Betonirakenteet. PDF-dokumentti. Viitattu 6.2.2023. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Betonirakenteet_16122019-281486B7_FA18_4532_82C4_767392EE368F-153760.pdf/f18c7388-5543-aa9b-8c6e-1e0bd5be57e7/Betonirakenteet_16122019-281486B7_FA18_4532_82C4_767392EE368F-153760.pdf?t=1603260655971

LIITTEET

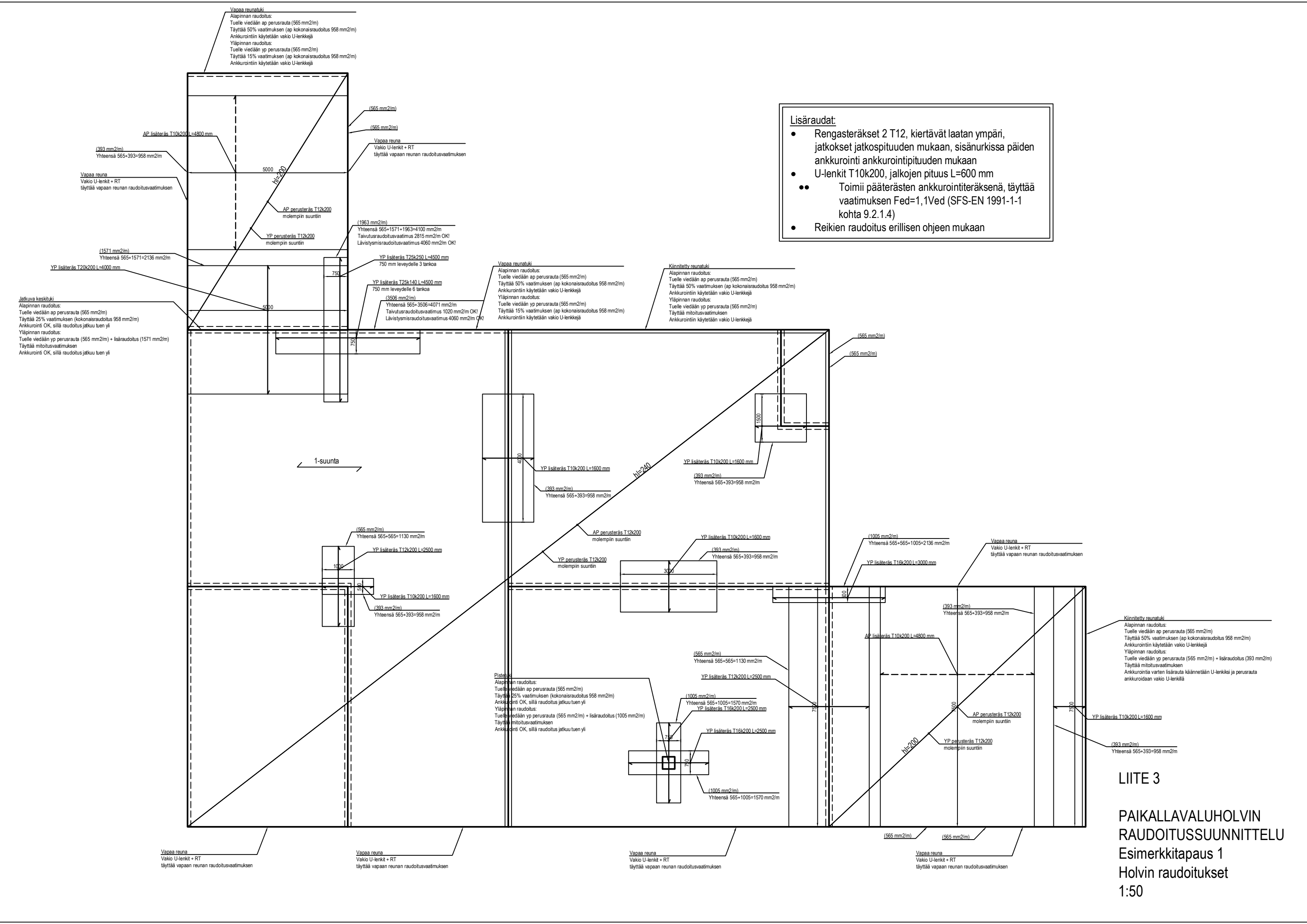
Luottamukselliset liitteet 1 ja 2 on poistettu julkisesta raportista.

Liite 1. Paikallavalulaatan raudoitussuunnittelun prosessikaavio

Liite 2. Paikallavalulaatan raudoitussuunnittelun prosessikaavio, RFEM-CAD prosessi

Liite 3. Esimerkkitapaus 1. Raudoituspiirustus

Liite 4. Esimerkkitapaus 2. Raudoituspiirustus



- Lisäraudat:**
- Rengasteräket 2 T12, kiertävät laatan ympäri, jatkokset jatkospituuden mukaan, sisänurkissa päiden ankkurointi ankkurointipituuden mukaan
 - U-lenkit T10k200, jalkojen pituus L=600 mm
 - Toimii pääterästen ankkurointiteräksenä, täyttää vaatimuksen Fed=1,1Ved (SFS-EN 1991-1-1 kohta 9.2.1.4)
 - Reikien raudotus erillisen ohjeen mukaan

LIITE 3
PAIKALLAVALUHOIVIN
RAUDOITUSSUUNNITTELU
Esimerkitapaus 1
Holvin raudoitukset
1:50

