



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tuomo Aikioniemi

Ontelolaattojen aukotukset korjaushankkeissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

02.05.2019

Tekijä Otsikko	Tuomo Aikioniemi Ontelolaattojen aukotukset korjaushankkeissa
Sivumäärä Aika	53 sivua + 2 liitettä 02.05.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine	Rakennetekniikka
Ohjaajat	yliopettaja Hannu Hakkarainen, Metropolia AMK kehityspäällikkö Antti Haapasalmi, Vahanen
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää korjauskohteissa tapahtuvien ontelolaattojen aukotusten toimintaperiaatteita. Tilaajalla ei ole ollut käytössään selkeitä ohjeita ontelolaattojen aukotukseen korjaushankkeissa. Vaikka erilaisten betonisten vaakarakenteiden aukottamista on tutkittu aiemminkin, ei ontelolaattoja voida aukottaa kuten tavanomaisia massiivilaattoja.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda helppokäyttöinen suunnitteluohje sekä laskentapohja aukotettavien ontelolaattojen kantavuuden arvioimista varten. Opinnäytetyössä ei käsitelty Variax- tai Spiroll -ontelolaattojen aukottamista.</p> <p>Vaikka opinnäytetyössä perehdytään ontelolaattojen mitoitusperiaatteisiin, ei opinnäytetyön tarkoituksena ollut selvittää ontelolaattojen mitoitusta. Korjauskohteissa ontelolaattojen rakenne ja geometria on ennalta määrätty.</p> <p>Opinnäytetyötä varten haettiin tietoa kirjallisuudesta sekä rakennesuunnittelun ohjeista. Aikaisempia tutkimuksia käytettiin hyväksi aukkojen vaikutusta arvioitaessa. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi ehjien ja aukotettujen ontelolaattojen toimintaa. Ontelolaattojen aukottamista on tutkittu jonkin verran, enenevässä määrin viime vuosien aikana.</p> <p>Ontelolaattojen kantavuutta arvioidaan SFS-EN 1992 perustuvan laskennan mukaan. Laskennassa noudatetaan muitakin Eurokoodin osia.</p>	
Avainsanat	aukotus, betoni, korjausrakentaminen, ontelolaatta

Author Title	Tuomo Aikioniemi Hollow core slab openings in renovation projects
Number of Pages Date	53 pages + 2 appendices May 2 nd 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building engineer
Professional Major	Structural engineering
Instructors	Hannu Hakkarainen, senior teacher, Metropolia UAS Antti Haapasalmi, chief of development, Vahanen
<p>The purpose of this bachelor's thesis was to clarify the design principles behind the planning of openings in renovation projects. The client had no clear design guideline for designing new openings in renovation projects. Openings in existing concrete floors have been studied before but such studies have not focused on hollow core floors. New openings in hollow core slabs cannot be created as freely as in plain concrete slabs.</p> <p>The goal of this thesis was to create an easy-to-use design guideline and a calculation tool to aid the structural engineer's design process. Variax and Spiroll type hollow core slabs were left outside this thesis.</p> <p>Even though hollow core slab design is addressed in this thesis, the purpose was not to create a design tool for hollow core slab design. The hollow core profile is pre-set in renovation projects.</p> <p>Information regarding the assessment of openings was found in literature and structural design manuals. Previous studies were used to analyze the effect of openings on hollow core slabs.</p> <p>The capacity of hollow core slabs was evaluated using Eurocode 2, SFS-EN 1992, approved design methods. Other parts of Eurocode are used when needed.</p>	
Keywords	concrete, cutout, hollow core slab, renovation

Sisällys

Käsitteet

1	Johdanto	1
1.1	Insinööriyön tausta	1
1.2	Tutkimusongelma	2
1.3	Insinööriyön rajaus ja tavoite	2
1.4	Insinööriyön toteutus	2
2	Kirjallisuuskatsaus	4
2.1	Ontelolaatan toiminta	4
2.2	Ontelolaatan aukottaminen	10
2.2.1	Aukkojen vaikutus	10
2.2.2	Olemassa oleva aukotuksen ohjeistus	14
2.3	Aukkosuunnittelun prosessi	19
2.4	Ontelolaattojen kapasiteetin määrittäminen	21
3	Ontelolaatan kapasiteetti ja aukon vaatima vahvistaminen	25
3.1	Mitoitusperusteet	26
3.2	Ontelolaatan kapasiteetilaskenta	28
3.2.1	Leikkauskapasiteetti	28
3.2.2	Taivutuskapasiteetti	31
3.3	Vahvistusmenetelmät	41
3.3.1	Palkkikannakointi	41
3.3.2	Ontelolaattakannakkeet	43
4	Aukotuksen toteutus	45
4.1	Case: K Supermarket Masi	45
4.2	Case Mekaanikonkatu 11	48
4.3	Esimerkkilaskelma	49
5	Yhteenveto	52
	Lähteet	54

Liitteet	Liite 1. Suunnitteluohje
	Liite 2. Esimerkkilaskelma

Käsitteitä

ASSAP	Associazione Produttori di Solai Alveloari Precompressi, on italialainen on-telolaattojen käyttöä edistävä yhdistys.
BY	Suomen Betoniyhdistys ry on teknillistieteellinen yhdistys, jonka tarkoituksena on edistää betonin oikeanlaista käyttöä. Julkaisee muun muassa teknisiä ohjeita ja betoninormeja.
CE	Conformité Européenne on osoitus, että tuote täyttää EU direktiivien vaatimukset
EC	Eurocode, Eurokoodi on kymmenosainen eurooppalainen ohjeistus rakennesuunnitteluun. Eurokoodin suomenkielistä painosta julkaisee SFS-Standardisointi.
EN	Eurooppalaiset standardit (saks. europäische Normen) ovat eurooppalaisen standardisointikomitean ylläpitämiä teknisiä standardeja. EN – standardit pitävät sisällään eurokoodi –standardit.
FEM	Finite Element Method on numeerinen tapa ratkaista matemaattisia ongelmia
HE	HE –palkki on I-poikkileikkauksinen teräs palkki. Lopun kirjainliite A ja B merkitsevät ylä- ja alalaippojen leveyden suhdetta korkeuteen.
KRT	Käyttörajatilatarkasteluissa rakenteen toimintaa, käyttäjien mukavuuteen ja rakennuskohteen ulkonäköön vaikuttavat rajatilat tarkastetaan.
MRT	Murtorajatilatarkasteluissa rakenteen varmuuteen ja käyttäjien turvallisuuteen liittyvät rajatilat tarkastetaan.
PCI	Precast/Prestressed Concrete Institute on yhdysvaltalainen betonielementtirakentamiseen erikoistunut tekninen instituutio ja taloudellinen yhdistys.

RIL	Suomen rakennusinsinöörien liitto julkaisee rakennusalaa koskevia ohjeita ja käsikirjoja.
SFS	Suomen standardisoimisliitto on suomalainen standardisoinnin keskusjärjestö. Järjestön päätehtäviä ovat standardien laadinta, julkaisu ja myynti.

Laskennassa käytettäviä merkintöjä

Latinalaisten aakkosten mukaiset:

A	Pinta-ala
b	Leveys yleisesti
b_w	Tyypillisesti uuman tai poikkileikkauksen leveys
E_c	Betonin kimmokerroin
E_s	Betoniteräksen kimmokerroin
$f_{ck/d}$	Betonin puristuslujuuden ominais-/mitoitussarvo
f_{cm}	Betonin lieriölujuuden keskiarvo
f_{ctm}	Betonin vetolujuuden keskiarvo
$f_{ctk0,05}$	Betonin vetolujuuden 0,05:n fraktiili
$f_{pk/d}$	Jänneteräksen ominais-/mitoitusvetolujuus
$f_{ctk/d}$	Betonin vetolujuuden ominais-/mitoitussarvo
$f_{p0,1k}$	Jänneteräksen jännityksen 0,1 –raja

$f_{yk/d}$	Betoniteräksen myötölujuuden ominais-/mitoitussarvo
M_{Ed}	Ulkoisen taivutusmomentin mitoitussarvo
M_{Rd}	Momenttikestävyyden mitoitussarvo
I_i	Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti akselin i suhteen
P	Jännevoima
S_i	Staattinen momentti akselin i suhteen
T_{Ed}	Vääntömomentin aiheuttama leikkausvoima
V_{Ed}	Ulkoisen leikkausvoiman mitoitussarvo
V_{Rd}	Leikkauskestävyyden mitoitussarvo
W_i	Taivutusvastus akselin i suhteen

Kreikkalaisten aakkosten mukaiset:

α	Käytetään erilaisten kertoimien yhteydessä alaviitteellisenä
γ_c	Betonin materiaaliosavarmuusluku
γ_s	Betoniteräksen materiaaliosavarmuusluku
δ	Rakenteen taipuma
ε	Muodonmuutos yleisesti
ε_{cp}	Betonin puristuma

ϵ_{cPe}	Jännevoiman aiheuttama betonin puristuma
ϵ_{cPu}	Betonin näennäinen venymä
ϵ_{cu}	Betonin murtopuristuma
ϵ_{sm}	Keskimääräinen raudoituksen venymä
σ	Jännitys yleisesti
σ_c	Puristusjännitys
σ_{cp}	Esijännityksen aiheuttama puristusjännitys
ω	Mekaaninen raudoitussuhde

1 Johdanto

1.1 Insinööriyön tausta

Insinööriyön tilaaja on Vahanen Suunnittelupalvelut Oy. Tilaaja on osa Vahanen International –konsernia, joka toimii monipuolisesti rakennus- ja kiinteistöalan asiantuntija-tehtävissä. Vahanen Suunnittelupalvelut on erikoistunut tarjoamaan rakenne- ja paloteknisten palveluiden lisäksi korjausrakentamisen arkkitehtisuunnittelua. Tämä insinööriyö tehdään korjausrakennesuunnittelutoimialan tarpeisiin.

Tilajalla oli tarve suunnitteluohjeelle ontelolaattoihin tehtäville aukotuksille korjaushankkeissa. Tilajalla ei ole käytössä tai tiedossa yhtä yksiselitteistä tapaa suunnitella ja toteuttaa isokokoisia aukotuksia.

Ontelolaatta on Suomessa yleisimmin käytetty elementtilaattatyyppi ja niitä käytetään niin asuin-, liike- kuin teollisuuskohteissakin. Ontelolaattojen käyttö ala-, väli- ja yläpohjarakenteissa yleistyi 1960 ja -70 –lukujen taitteessa. Suosion syynä ovat asennuksen nopeus, suuret jännemitat ja verrattain edulliset hinnat. Yleisyytensä takia tarve yhtenäiselle korjausrakennesuunnitteluohjeelle tulee korostumaan etenkin tulevaisuudessa.

Tarve uusien aukkojen luomiselle voi tulla esimerkiksi taloteknisten järjestelmien muuttumisesta johtuvan tekniikkaläpivientien määrän tai mittojen kasvamisesta. Rakennuksen käyttötarkoituksen muuttuessa tekniikkaa voi myös tulla alueille, jossa sitä ei aiemmin ole ollut.

Aukotusten tekemistä ja vahvistamista on aikaisemmin tutkittu esimerkiksi niin ikään Vahaselle tehdyssä opinnäytetyössä (Pajuja, HAMK, 2014). Aiemmissa opinnäytetöissä ei kuitenkaan ole käsitelty ontelolaattoihin tehtäviä, vahvistusta tarvitsevien aukkojen suunnittelua. Ontelolaattojen vahvistamista on tutkittu esimerkiksi insinööritoimisto Optiplanille valmistuneessa diplomityössä (Arike, Aalto Yliopisto, 2017) ja Wise Groupille (nykyisin SitoWise) valmistuneessa insinööriyössä (Vedenoja, Metropolia AMK, 2017). Näissä tutkimuksissa ei ole perehdytty erityisesti ontelolaattoihin tehtävien aukkojen vaatimaa lisävahvistamista tai tähän aiheeseen perehtyminen on ollut vähäistä.

1.2 Tutkimusongelma

Tähän asti ontelolaattojen aukotuksia on suunniteltu suunnittelijasta riippuen monin eri tavoin. Koska yhtä yleispätevää ohjetta ei ole olemassa, on suunnitteluun tarvittavia tietoja ja suunnitteluperusteita kerätty useista lähteistä ja usein eri tavoin.

Ontelolaattoihin tehtävien aukkojen suunnittelu korjauskohteessa eroaa uudiskohteista monin tavoin. Uudiskohteissa suuremmat aukot voidaan usein tehdä jo ontelolaatan valmistusvaiheessa, jolloin aukkojen reunoja voidaan tukea helposti esimerkiksi laattakanakkeilla. Aukkojen sijainnit ja mitat on suunniteltu ja huomioitu koko rakennuksen rakenteellisessa mallissa sekä ontelolaattojen ja -laatastojen mitoituksessa. Korjausrakentamisessa uusien aukkojen tekeminen rakenteisiin voi pahimmillaan muuttaa koko rakennuksen rakennemallia. Huolellisella suunnittelulla varmistutaan paitsi rakenteiden kantavuuden säilymisestä ja tarkoituksenmukaisesta toiminnasta, myös hankkeen taloudellisesta kannattavuudesta.

1.3 Insinööriyön rajaus ja tavoite

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on luoda tilaajalle mahdollisimman monikäyttöiset suunnitteluohjeet ja mitoitusväkalut korjausrakennesuunnittelijan tarpeisiin, ontelolaattoihin tehtävien aukotusten suunnitteluun. Työn lopputulos sisältää suunnitteluohjeen ja laskentapohjan ontelolaatan kapasiteetin tarkastamiseen.

Suunnitteluohjeesta ilmenee selkeästi aukkosuunnittelun eri vaiheet toteutuskelpoiseen lopputulokseen pääsemiseksi.

Laskentapohjassa selvitetään ontelolaatan kapasiteetti murto- ja käyttörajatilassa. Laskentapohja toteutetaan MathCAD 15 –sovelluksessa.

1.4 Insinööriyön toteutus

Kirjallisuuskatsauksen tarkoituksena on selvittää olemassa olevia käytäntöjä aukkosuunnitteluun. Lähteinä käytetään yleisesti hyväksytyjä toimijoita kuten eri maiden paikallisia

toimijoita ja heidän valvomiaan ja soveltamiaan standardeja. Aukkosuunnittelun perusteena käytetään myös ontelolaatoilla tehtyjä kokeita ja tutkimuksia. Tutkimuksiin perehtymällä on tarkoitus selvittää aukkojen todellista vaikutusta ontelolaatan toimintaan.

Mitoitusta varten selvitetään riittäväällä laajuudella ontelolaatan toimintaa ja ontelolaatan kuormituskapasiteetin laskentaa. Mitoitettavat ontelolaatat ovat liukuvalutekniikalla valmistettuja. Mitoitus suoritetaan Suomessa käytettävien standardien mukaisesti murto- ja käyttörajatilan vaatimassa laajuudessa. Työ tehdään korjausrakennesuunnittelun asettamia erityispiirteitä silmällä pitäen.

Opinnäytetyössä ei anneta ohjeita ontelolaattoihin tehtävien pienten reikien vahvistamiseen tai suunnitteluun. Pienten reikien tekemistä on käsitelty useiden muiden opinnäytetöiden lisäksi myös elementtivalmistajien ja Betoniteollisuus ry:n omassa ohjeistuksessa. Olemassa olevia ohjeita kuitenkin hyödynnetään opinnäytetyössä. Opinnäytetyössä ei tutkita uudiskohteissa työmaalla tehtäviä aukotuksia.

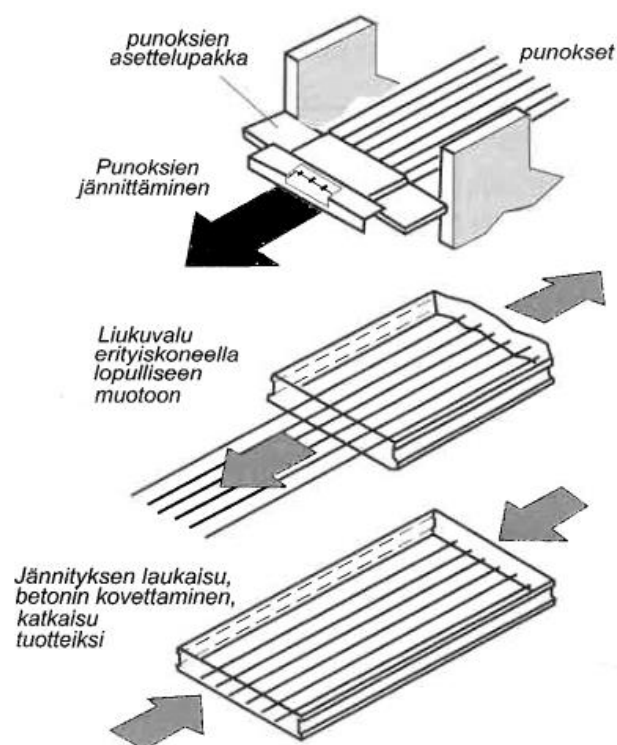
Opinnäytetyön ulkopuolelle rajataan muut kuin EN 1168:n mukaiset, esimerkiksi Variax- ja Spiroll –ontelolaatat. Opinnäytetyössä ei käsitellä ontelolaatan vahvistamista esimerkiksi laataston vahvuutta kasvattamalla tai lisäraudoittamalla, pois lukien aukkojen vaatimat paikalliset vahvistamiset.

Opinnäytetyön lopputuloksen saavuttamiseksi tutkitaan ontelolaattojen toimintaa ja käyttäytymistä erilaisissa aukotustilanteissa. Tietoa hankitaan koti- ja ulkomaisista ohjeista, tutkimuksista sekä haastatteluilla. Kerätyn tiedon avulla luodaan toteutuskelpoiset ratkaisut aukkojen vahvistukseen. Työn lopputuloksen käyttökelpoisuutta arvioi kokenut rakennesuunnittelija.

2 Kirjallisuuskatsaus

2.1 Ontelolaatan toiminta

Ontelolaatat ovat yleistyneet 1970 –luvulta alkaen ja kuuluvat nykyään yleisimmin käytettyihin elementteihin Suomessa. Ontelolaatat ovat erittäin yleinen osa ala- väli- ja yläpohjarakenteita. Laatat ovat pääosin alapinnastaan tartuntajänteillä jännitetyjä leikkausraudoittamattomia massatuotteita. [25, s. 685]



Kuva 1. Ontelolaatan valmistamisperiaate [25, s. 686]

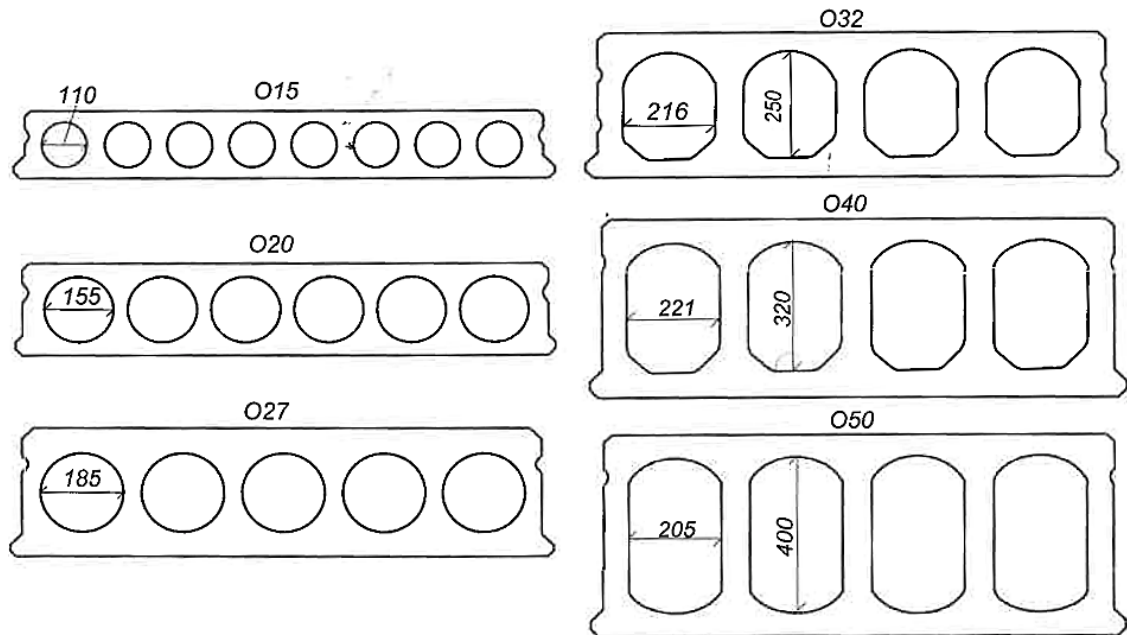
Ontelolaatat valmistetaan elementtitehtailta joko pursotus- tai liukuvalutekniikalla, Suomessa laatat valmistetaan pääosin liukuvaluna. Laatat valetaan pitkille valualustoille erityisillä liukuvalukoneilla. Ennen valun aloitusta jänneteräkset asetetaan valualustalle,

joka öljytään muottiöljyllä. Teräksiset jännepunokset jännitetään punossuunnitelman mukaisesti, jonka jälkeen laatta valetaan. Valussa käytetty maakostea erikoismassa on niin jäykkää, ettei erillistä muottia tarvita. Jänneteräkset laukaistaan betonin saavutettua riittävän lujuuden. Jännevoiman laukaisulujuus vastaa noin 66 prosenttia betonin lopullisesta lujuudesta. Lopuksi laatat katkaistaan haluttuihin mittoihin sahaamalla [25, s. 685.]



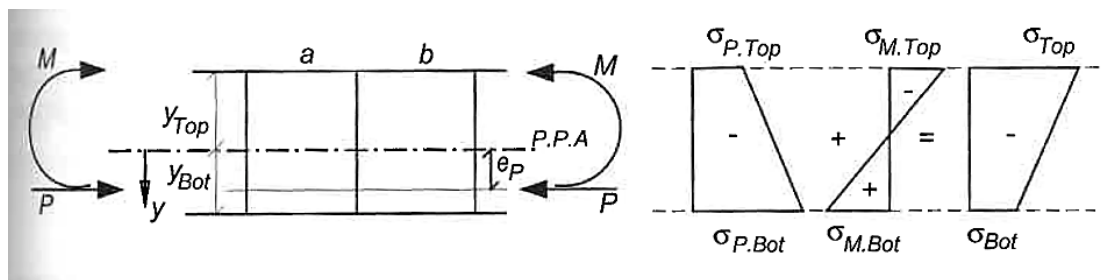
Kuva 2. Ontelolaattojen valmistuksessa käytetty suomalaisen Elematicin valmistama P7-1200s -liukuvalukone. [Elematic Oyj, www.elematic.com, kuva haettu 20.02.2019]

Tehdasvalmisteiset ontelolaatat ovat laadultaan tasaisia ja valmistusmateriaalit sekä -olosuhteet ovat erittäin tarkasti kontrolloituja. Kehittyneiden valmistusmenetelmien ansiosta, ontelolaatat pystytään valmistamaan tarkasti suunnitelmassa esitettyjen mittojen mukaan. Elementtitehtaiden laatua valvotaan paitsi sisäisesti, myös ulkopuolisen tahon toimesta.



Kuva 3. Ontelolaattojen perusvalikoima, mitoissa voi olla valmistajakohtaisia eroja. [25, s. 686]

Laatat valmistetaan 1200 millimetrin vakioleveydellä, mutta myös kavennettuja laattoja on saatavilla. Vakioidut laattapaksuudet ovat 150, 200, 265, 320, 370, 400 ja 500 millimetriä. Onteloiden määrä ja muoto vaihtelevat ontelolaatan korkeuden mukaan. [21, s. 52]



Kuva 4. Jännittämisen periaate. M kuvaa rakennetta taivuttavaa momenttia, P kuvaa jännityksen aiheuttamaa rakenteen alapinnan puristusta. [25, s. 587]

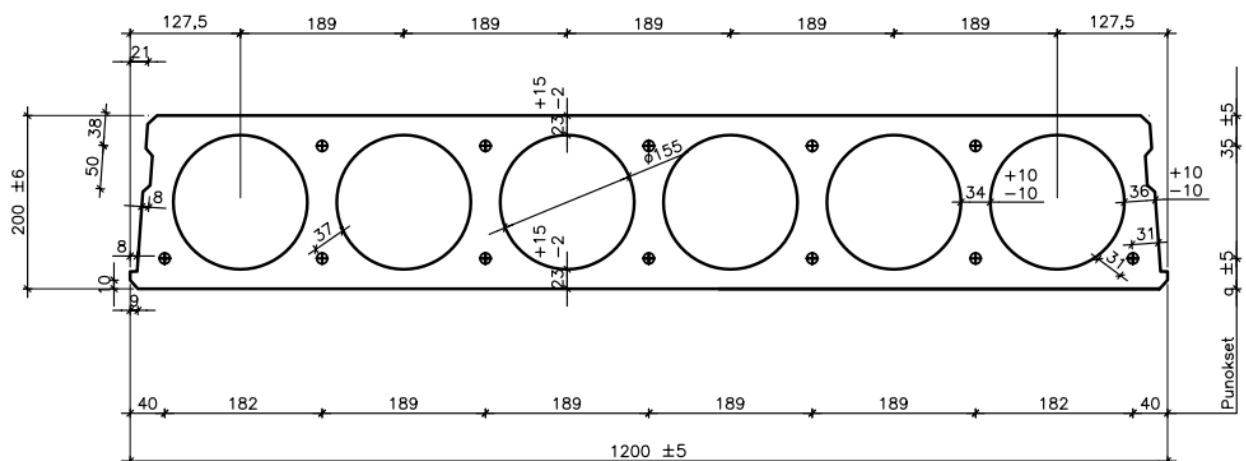
Suomessa valmistetut ontelolaatat ovat esijännitetyjä valmisosat tuotteita. Esijännityksen tarkoituksena on aiheuttaa rakenteeseen sellainen puristusjännitystilä, että kuormat eivät riitä aiheuttamaan rakenteeseen vetojännitystilää tai kuormista aiheutunut vetojännitystilä on pieni. Betonin vetojännityksiä rajoittamalla betonirakenteen halkeilua voidaan rajoittaa. [25, s. 587]

Kuormien laattarakenteeseen aiheuttamat taivutusjännitykset vastaanotetaan punosteräksillä. Punosterästen vastaanottama jännitys taas siirtyy betonin puristusjännitykseksi. Terästen veto ei kuitenkaan siirry betonin puristukseksi täydellä voimalla koko punosteräksen matkalla. Matkaa, jolla vetojännitykset siirtyvät täysin puristusjännityksiksi kutsutaan siirtymäpituudeksi [25, s. 601.]

Jännitettyjen betonirakenteiden jännevoima voi siirtyä jänneeräkseltä betonille kolmella eri tavalla – tartunnalla, ankkureilla tai tartunnattomana. Ontelolaatat ovat esijännitettyjä rakenteita, joten jännevoima siirtyy tartuntajännitysten avulla. Jälkijännitetyissä rakenteissa tarvitaan erilliset ankkurit jännevoiman siirtämistä varten. Tartunnattomissa jänneissä kitkan vaikutus on eliminoitu ja jännevoima ei siirry lainkaan tartuntajännitysten avulla [25, s. 601.]

Punosterästä tarvitaan, koska betonin vetolujuus on hyvin heikko verrattuna sen puristuslujuuteen. Esimerkiksi lujuusluokan C50 betonin sylinteripuristuslujuuden ominaisarvo, f_{ck} , on 50 MPa, kun vastaavan betonin keskimääräisen vetolujuuden ominaisarvo f_{ctm} on vain 4,1 MPa [12, s. 30].

Standardissa EN 1168 on asetettu minimipunosmäärät, jotka ovat 4 kappaletta 1200 millimetrin leveyttä kohden, 600...1199 millimetrin laatalle 3 kappaletta ja tätä pienemmille 2 kappaletta [10, s. 11.]



Kuva 5. Esimerkki 200 millimetrisen ontelolaatan poikkileikkauksesta. [Ansion sementtivalimo Oy, Ontelolaattojen suunnitteluohje 2012, s. 10]

Valmistustekniikasta johtuen punosteräkset sijoitetaan usein vain laatan alapintaan, vaikka yläpinnan punostaminen on myös mahdollista. Laatan yläpintaa punostetaan esimerkiksi, kun laatta toimii ulokkeena tai jos laatan muodosta johtuen se joudutaan nostamaan muualta kuin päistään [5, s. 16.]

Juuri jänneterästen korkean jännevoiman, pienen omapainon ja laatan sisäisen momentivarren suuruuden ansiosta ontelolaatoilla saavutetaan suuria jännemittoja pienillä ontelolaattapaksuuksilla.

Tyypillisesti massiivisiin betonilaattoihin asennetaan jakoteräksiä pääterästen suhteen poikittain. Massiivirakenteissa jakoterästen tehtävänä on jakaa viiva- ja pistekuormia suuremmalle alueelle. Ontelolaatoissa tällaisia jakoteräksiä ei voida käyttää ja paikallisia kuormakeskittymiä jaetaan sauma- ja pintavalujen avulla. Punosterästen ollessa ontelolaattojen ainoa rakenteellinen lisävahvistuskeino, tulee niiden katkaisemista ehdottomasti välttää [11, s. 260...261.]

Saumavalujen kyky siirtää pistekuormia perustuu adheesion, sidosvoimien ja kitkan vaikutukseen ontelolaattojen saumoissa. Ontelolaattojen saumat kuitenkin toimivat nivelinä ja niiden toiminnan tehokkuus perustuu saumavalussa käytetyn betonin laatuun. Voimien jakautumiseen vaikuttaa myös ontelolaattojen jäykkyys. Jäykemmät laatat siirtävät kuormia tehokkaammin [11, s. 260...261.]

Leikkauskuormituskestävyys ei tyypillisesti ole ontelolaatoille kriittinen tekijä ja 95 prosenttia ontelolaattojen murtumisista johtuu riittämättömästä taivutuskapasiteetista [11, s. 255.]

Poikkeuksen aiheuttavat kuitenkin tilanteet, jossa ontelolaatalle kohdistuu korkeita piste- tai viivakuormia, etenkin vapaiden reunojen läheisyydessä. Myös lyhyet, 3...6 metrin pituiset, ja matalat, 150...400 millimetrin paksuiset, laatat ovat leikkauskuormien kannalta kriittisiä. Ontelolaatan leikkauslujuus laskee myös taipuisalla tuella. Esimerkiksi palkki voi toimia taipuisana tukena [11, s. 275.]

Toisaalta myös ylliraudoitettut jännitetyt rakenteet ovat leikkausmurrolle alttiita. Kun jänneterästen vastaanottama vetojännitys ei saavuta terästen myötörajaa, on taivutuskuormitettu poikkileikkaus herkkä pienellekin leikkausvoimalle [25, s. 650.]

Ontelolaatan leikkauslujuus voidaan määritellä sekä halkeilleelle, että halkeilemattomalle betonille. Halkeilleella betonilla tarkoitetaan tässä yhteydessä taivutuksesta johtuvaa halkeilua. Halkeilemattoman betonin leikkauslujuus on suurempi kuin halkeilleen. Tyypillisesti suurimmat leikkauskuorman arvot sijoittuvat alueille, joissa taivutusmomentin suuruudet ovat pieniä. Tästä syystä leikkauslujuuden määrittämisessä voidaan yleensä käyttää halkeilemattoman betonin leikkauslujuutta [11, s. 275.]

Ontelolaatan leikkaukskapasiteettia voidaan kasvattaa kasvattamalla laatan korkeutta, tai kasvattamalla betonin määrää leikkauskuormitetulla alueella. Yleensä leikkauksrasituksia vastaan betonirakenteisiin suunnitellaan leikkauksraudoitusta, mutta valmistusteknisistä syistä tämä ei ole ontelolaatoissa mahdollista. Tästä syystä leikkauksjännitysten vastaanottaminen jää lähes täysin ontelolaatan betonin vastaanotettavaksi.

Esijännitysten aiheuttama puristusjännitys parantaa myös ontelolaatan leikkauslujuutta. Niin ikään esijännityksen aiheuttamat halkaisujännitykset myös heikentävät ontelolaatan leikkaukskapasiteettia laatan päissä [14, s. 1.] Jänneterästen lisäämisellä on kuitenkin vain pieni vaikutus laatan leikkauslujuuteen. Esimerkiksi jänneterästen poikkileikkausalan nelinkertaistaminen kasvattaa laatan leikkaukskapasiteettia vain 20 prosenttia [11, s. 275.] Leikkauksraudoituksen puuttumisen takia ontelolaattojen leikkauslujuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota [11, s. 255, 276.]

Ontelolaatan leikkaukskapasiteettiin vaikuttaa onteloiden muodon ja määrän lisäksi laatan korkeus ja mahdollisen pintabetonin paksuus ja sen raudoitus. Myös ontelolaatan valmistustekniikalla on vaikutusta ontelolaatan leikkauslujuuteen. Liukuvalutekniikalla valmistetut laatat kestävät leikkauskuormia pursotusmenetelmällä valmistettuja laattoja paremmin [11, s. 276.]

Ontelolaattojen lävistyslujuus on vielä yleistä leikkausmurtoakin harvinaisempi murto-tapa. Lävistysmurron tapahtumiseksi on kuorman kohdistuttava erittäin pienelle alueelle ja täysin ontelon kohdalle [11, s. 285.]

Ontelolaatan murtotavalla on suuri merkitys rakenteen turvallisuuteen mahdollisessa murtotilanteessa. Puhtaassa taivutusmurtotilanteessa ontelolaatan jänneterästen ansiosta laatan taipuma kasvaa huomattavan suureksi ennen rakenteen sortumista. Ennen laatan halkeilua jänneterästen jännitystila voi kasvaa enintään 10 prosenttia. Ontelolaatan puhdas taivutusmurto on aina sitkeä [25, s. 687.]

Puhdas leikkausmurto sen sijaan aiheuttaa rakenteen nopean ja varoittamattoman sortumisen. Leikkausmurto tapahtuu alueilla, joissa jänneterästen jännevoima ei ole vielä täysin kehittynyt [25, s. 687].

Taivutus- ja leikkauskuormakestävyyksien samanaikainen ylittyminen liittyy tilanteeseen, jossa ontelolaattaan syntyy joko laatan uumasta tai laatan alapinnasta uumaan kulkeva kaareva halkeama [25, s. 688.]

Ankkurointimurto aiheutuu samankaltaisista halkeamista, kuin taivutus-leikkausmurto. Murtotavan eron muodostaa ontelolaatan jänneterästen pieni ankkurointilujuus. Murossa jänneteräkset liukuvat ja ontelolaatan halkeamat aukeavat suuriksi.

Ontelolaattojen heikkouksina ovat huono pistekuorman kestävyys, käyttömahdollisuudet ulokkeina sekä vahvistusmahdollisuudet suurten aukkojen ympärillä [11, s. 249].

2.2 Ontelolaatan aukottaminen

2.2.1 Aukkojen vaikutus

Tapausten yleisyydestä huolimatta Suomessa ei ole olemassa yleisiä ohjeita olemassa oleviin ontelolaattoihin tehtävien aukkojen vaikutuksista ontelolaatan toimintaan. Olemassa olevissa standardeissa ei myöskään ole ohjeita aukotusten vaikutusten laske-
miseksi. Aukkojen kokoa ja sijaintia rajoittamalla ontelolaattavalmistajat ovat voineet antaa mahdollisimman yleispäteviä ohjeita aukkojen tekemiselle.

Onteloiden välisiä kannaksia katkovat aukot otetaan huomioon ontelolaatastien mitoituksessa siirtämällä aukon alueen kuormat viereisille laatan osille. Vaihtoehtoisesti voidaan määrittää aukon kohdan poikkileikkauksen alueella vaikuttavat rasitukset ja verrata niitä saman poikkileikkauksen kuormituskapasiteettiin [23, s. 6.]

Yksittäiset ontelolaatat toimivat yhteen suuntaan kantavina yksiaukkoisina laattoina. Valmiit, saumatut ontelolaatostat kuitenkin toimivat yhtenäisenä laattarakenteena. Kun laatta katkaistaan osittain tai kokonaan, sen suunniteltu rakennemalli muuttuu ja kuormat vaikuttavat siihen eri tavalla. Aukkojen tekeminen aiheuttaa kuormakeskittymiä aukon reunoille. Tästä johtuen laatan paikallinen kuormituskapasiteetti saattaa ylittyä.

Ontelolaatan aukotuksesta johtuvaa kapasiteetin laskua on erittäin vaikeaa palauttaa. Kantokykyä voidaan kasvattaa esimerkiksi raudoitetulla tai raudoittamattomalla pintavallalla, joka toimii laatan puristuspinnan osana [23, s. 6]. Uudelleenpunostaminen ei ole luonnollisesti mahdollista ja laattojen jälkijännittäminen on työlästä, joten suuria aukkoja tehtäessä, niiden vaikutusta tulee tarkastella tilannekohtaisesti ja niille tulee suunnitella kokonaistaloudellisesti järkevin ratkaisu.

Pienin vaikutus rakenteen stabiliteettiin saadaan minimoimalla aukon koko ja suunnitteleamalla tulevan aukon pisin sivu ontelolaatan onteloiden suuntaisesti [8, s.3-8]. Näin saadaan säilytettyä useampia punoksia ja ontelolaatan taivutuskapasiteetti häiriintyy mahdollisimman vähän. Toisaalta ontelolaatan yläpinnassa sijaitsevaa puristus pintaa ei tulisi tarpeettomasti pienentää.

Kun pelkkä aukkojen vaikutuksen minimoiminen ei riitä varmistamaan laataston kantavuuden säilymistä, on laattoja tuettava tai vahvistettava. Kuormia siirrettäessä viereisille laatoille, on itse aukotettavan laatan kantavuuden lisäksi varmistuttava viereisten laattojen kantokyvyn riittävydestä. Ontelolaatan kuormituskapasiteetin laskentaa käydään läpi luvussa 2.4.

Uusien aukkojen tekeminen rakenteeseen aiheuttaa paikallisia kuormakeskittymiä, joiden vaikutus tulee ottaa huomioon ja jakaa sekä aukotettavalle että viereisille laatoille [8, s. 3-8]. Kuormien paikallisuudesta ja epätasaisuudesta johtuen kuormat aiheuttavat

aukon reunojen läheisyydessä sijaitseviin laattoihin sekä vääntöä että leikkausjännityksiä. Laatan leikkauskapasiteetin määrittämisessä on siis otettava huomioon myös väännön vaikutus leikkausjännitykseen [8, s. 3-8].

Laatan rakenteelliseen toimintaan vaikuttavat uudet aukot muuttavat laatan kuormituskapasiteettia ja koko ontelolaattakentän kuormajakaumaa. Kokeellisesti on huomattu, että aukon koon pysyessä samana, aukon sijainnista riippuen laattojen kuormituskapasiteetti laskee 13...43 prosenttia ehjiin laattoihin verrattuna [9, s. 432]. Kuormituskapasiteetin lasku ei kuitenkaan ole suoraan verrannollinen aukon leveyteen tai katkaistujen jännepunosten määrään [9, s. 435]. Määräävämpänä tekijänä on aukon sijainti suhteessa kuormitettuun alueeseen.

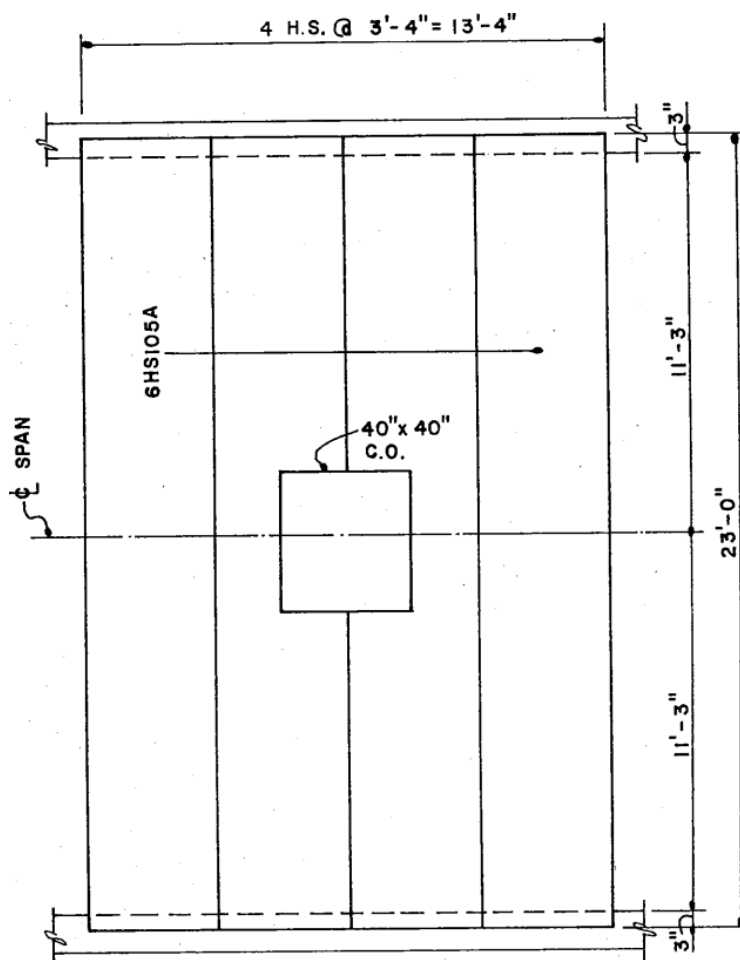
Kuormituskapasiteetin laskun lisäksi laattojen murtotavat muuttuvat kuormitetun alueen ja aukon sijainnin muuttuessa. Kokeissa laattoja kuormitettiin viivakuormilla eri etäisyyksillä tulta. Kuormien sijaintia muuttamalla vaikutettiin laatan toivottuun murtotapaan. Kuormittamalla laattaa lähempää tukia, saadaan leikkausmurto määrääväksi murtotavaksi, laatan keskikohdalla vaikuttava kuormitus aiheuttaa taivutusmurron. Kokeissa taivutusmurto muuttuu leikkausmurroksi, kun aukko sijaitsee leikkauskuormitetulla alueella. Leikkausmurto muuttuu taivutusmurroksi, kun aukko sijaitsee taivutuskuormitetulla alueella. Todellisuudessa laatan murtuminen saattaa tapahtua myös näiden kahden kuormatyyppin yhteisvaikutuksesta [9, s. 432.]

Samoissa kokeissa on huomattu leikkauskuorman heikentävän laatan kestävyyttä sekä aukotetuilla että aukottomilla laatoilla [22, s. 35]. Tasaisesti kuormitetuilla yksiaukkoisilla yhteen suuntaan kantavilla laatoilla taivutuskuormitus on suurimmillaan laatan keskialueella, leikkauskuormitus muodostuu suuremmaksi tukea lähestyessä.

Kokeissa on huomattu, että yksittäisen ontelolaatan aukottaminen 300 x 600 millimetrin, aukolla laskee laatan jäykkyyttä pahimmillaan 38...56 prosenttia riippuen aukon sijainnista [9, s. 432; 20, s. 51]. Laatan jännevälillä sijaitsevalla aukolla on suurin heikentävä vaikutus laatan jäykkyyteen kuormitustavasta riippumatta. Toisaalta leikkauskuormitetun alueen aukottaminen taivutuskuormitetulla laatalle, laskee laatan jäykkyyttä merkittävästi vähemmän [9, s. 432]. Jäykkyyden lasku tarkoittaa korkeampaa halkeamisherkkyyttä käyttörajatilan kuormien vaikutuksesta. Ontelolaatan jäykkyys lasketaan

halkeamakuorman ja -taipuman suhteena. Jäykkyyden laskiessa sallittu taipuma ja kuorma laskevat. [9, s. 432]

Aukotusten vaatimaa lisävahvistamista on tutkittu muun muassa Yhdysvalloissa. Näissä tutkimuksissa sekä ulkomaisissa ontelolaattojen suunnitteluohjeissa todetaan, että pieniä aukkoja, esimerkiksi tekniikkaläpivienneille, saa tehdä melko vapaasti [8, s. 3-9]. Kun uudet aukot poistavat laattarakenteesta vain pieniä määriä betonia, eivätkä katko jänneteräksiä, ei uusilla aukotuksilla ole merkittäviä vaikutuksia laatan rakenteelliseen toimintaan. Rakenteellisiksi aukotuksiksi määritellään aukotukset, jotka vaativat punosterästen katkaisua tai poistavat suuria määriä betonia [22, s. 25].



Kuva 6. Saumatun ontelolaataston kuormituskoejärjestelyt. 40" = 1016 millimetriä. [7, s. 11]

Yhdysvalloissa on myös tehty kokeita useammasta ontelolaatosta koostuvan laataston kantavuudelle. Kokeissa neljää korkeudeltaan $h = 150$ millimetriä ja leveydeltään $b =$

1016 millimetriä, laataston keskeltä aukotettua ontelolaattaa kuormitettiin taivutusmurtoon asti. Näillä kokeilla on todistettu laataston saumavalujen kykyä siirtää kuormia viereisille laatoille aina taivutusmurtoon asti. Saumavalun leikkauslujuutta ja kykyä siirtää kuormia vaakasuunnassa voidaan käyttää hyväksi ontelolaatastoja suunnitellessa. [7, s. 14-15]

Aukkojen ja ontelolaattojen reunoilla on kiinnitettävä erityistä huomiota reunakuormien vaikutuksiin. Paikalliset kuormakeskittymät aiheuttavat ontelolaatan onteloihin muodonmuutoksia kuten kiertymää. Ontelolaatoissa pienetkin muodonmuutokset heikentävät laataston kykyä siirtää kuormia viereisille uumille ja laatoille. Reunakuormat aiheuttavat ontelolaatoissa joko lävistysmurtoja tai vääntöleikkausmurtoja. Molemmat murtotavat ovat hauraita leikkausmurtoja. [16, s. 80]

Lävistysmurrossa ontelolaatta murtuu kolmiulotteisesti suurelta alueelta kuormitetun pisteen ympäriltä. Murrettu alue kulkee ontelolaatan läpi korkeussuunnassa 45° kulmassa ja levittäytyy vaakasuunnassa ontelolaatan keskialuetta kohti. Vääntöleikkausmurto voi murtaa ontelolaatan myös tuelta, vaikka kuormakeskittymä vaikuttaisikin ontelolaatan kentässä.

Ontelolaattojen suunnitellusta toimintatavasta johtuen, suurin osa tai kaikki laatan punosteräksistä asennetaan laatan alapintaan. Tästä johtuen laatan yläpinnalla ei ole juurikaan taivutusvetolujuutta betonin huonosta vetolujuudesta johtuen. Jotta välttyttäisiin ontelolaatan yläpinnan vetomurrolta, on aukon läheisyyteen suunniteltava laattaa kannatteleva tuki. Ulokkeellisen, kuormitetun kappaleen yläpintaan kohdistuu vetojännitystä, kun taas päistään tuetun, vastaavasti kuormitetun, kappaleen yläpintaan kohdistuu puristusjännitystä.

2.2.2 Olemassa oleva aukotuksen ohjeistus

Suomalaisilla ontelolaattavalmistajilla on hyvin samankaltaisia ohjeita laatastoon tehtäville aukoille ja ne mukailevat Betoniteollisuus ry:n ohjeita. Erilaiset reikäohjeet perustuvat laskentaan, koestukseen, valmistustekniikan tuomiin reunaehtoihin sekä aiempiin ko-

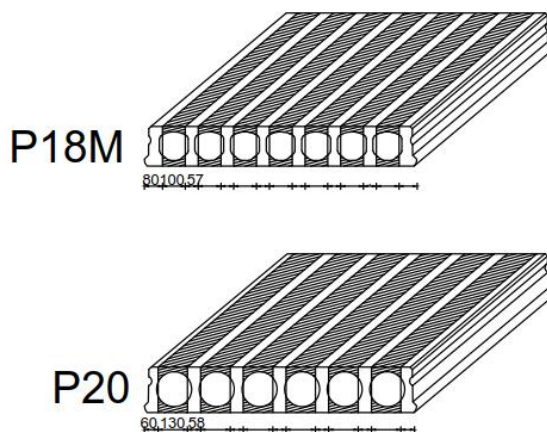
kemuksiin [15, s. 4]. Korjausrakentamisessa tehtäviä aukotuksia suunnitellaankin kokemuksen ja yksinkertaistettujen kuormituslaskelmien avulla. Betoniteollisuus ry:n ja elementtivalmistajien ohjeissa suuret aukot tulisi tehdä jo elementtitehtaalla.

Ontelolaatan onteloiden läpi saa työmaalla tehdä melko vapaasti pieniä, laatan koosta ja laattavalmistajasta riippuen, leveydeltään korkeintaan 180 mm kokoisia aukkoja, onteloiden määrästä riippuen 2 tai 3 kappaletta yhdelle poikkileikkaukselle. Yksi poikkileikkaus määritellään valmistajakohtaisesti ja esimerkiksi Parman ontelolaattojen suunnitteluohjeessa seuraavasti:

Samaksi poikkileikkaukseksi määritellään poikkileikkaus, jossa reikien sisimmäisten reunojen välinen etäisyys on alle 2500 mm. [5, s. 17]

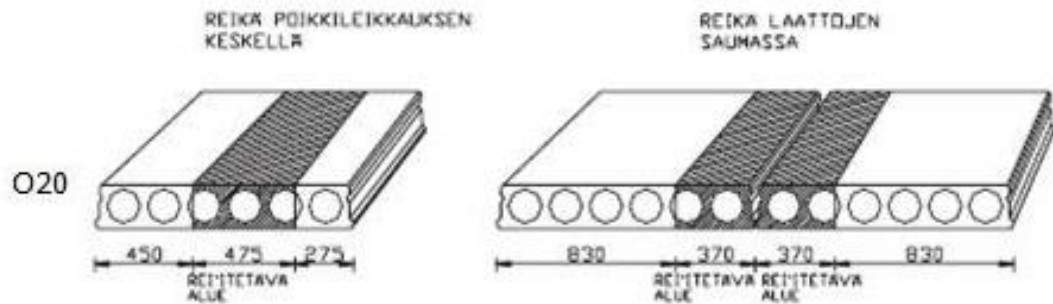
Pienten aukkojen kokoa ja sijaintia rajoittavat kuitenkin myös ontelolaattaan liittyvät rakenteet kuten seinät ja pilarit. Betoniteollisuus ry:n rei'itysohjeessa kielletään punosten katkominen pieniä reikiä tehdessä [17, s. 2]. Pienet, halkaisijaltaan korkeintaan 150 millimetrin kokoiset reiät, suositellaan tehtäväksi työmaalla.

Saumattuun laatastoon voidaan onteloiden kohdalle tehdä reikiä mihin kohtaan tahansa alla olevien ehtojen mukaisesti. Reikien suurin koko on esitetty oheisessa kuvassa.



Kuva 7. Pienten reikien rei'itysohje Parman ontelolaattojen suunnitteluohjeesta. Reikien sallitut sijainnit ja suurin sallittu leveys P18M ja P20 –tyyppien ontelolaatoissa. Näiden lisäksi määritellään reikien suurin sallittu määrä yhdessä poikkileikkauksessa. [5, s. 19]

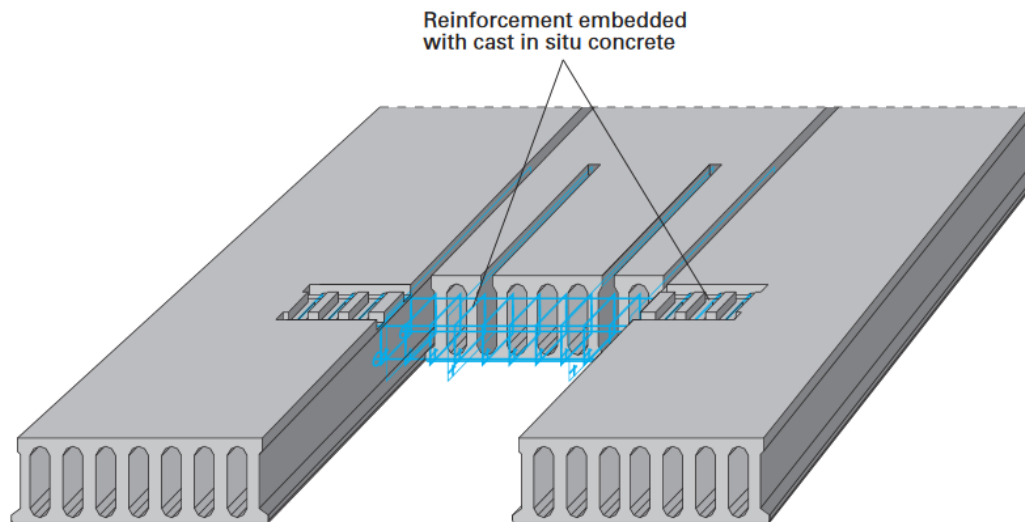
Suuret reiät pyritään sijoittamaan kahden laatan saumakohtaan tai yksittäisen laatan keskimmäisten uumien kohdalle. Laattojen aukottamista saa tehdä uudiskohteissa melko vapaasti, yleisesti ehtona kuitenkin on, että aukotus tehdään jo elementtitehtaalla. Reikiä sijoittaessa tulee huomioida, että punosteräksille säilyy riittävän suuri suojabetonipeite [2].



Kuva 8. Ohje suurien aukkojen sijoittamiseen ontelolaattakentässä. Suuret aukot pyritään sijoittamaan laattojen saumakohtiin. Aukot reuna tuodaan lähelle ontelolaatan uumaa. [2]

Ontelolaatasta pyritään säilyttämään vähintään kahden kannaksen verran ehjää ontelolaattaa, yhden ehjän kannaksen ei katsota tulevan lainkaan tuelle. Lisäksi laatan päätä kavennettaessa, laatan katkaistun osuuden suurin sallittu pituus rajoitetaan 2500 millimetriin, turvallisen noston varmistamiseksi [4, s. 60]. Mikäli laatan päähän tuleva aukko vie vähintään kaksi kannasta, rajoitetaan laatan pituus korkeintaan 7000 millimetriin.

Leveydeltään 800 millimetriset ja sitä suuremmat aukot ohjeistetaan tehtäväksi katkaisemalla laatta elementtitehtaalla. Katkaistut laatat tuetaan joko paikallavalupalkeilla tai laattatuki –valmisosilla. Tukien tarkoituksena on paitsi kannatella katkaistua laattaa, myös jäykistää rakennetta [23, s. 9]. Kun suuri aukko sijaitsee kahden nelionteloisen laatan saumakohdassa, tulee paikallavalupalkin pääteräkset ankkuroida ontelolaatan onteloihin tehtäviin täyttövaluihin. Tämän jälkeen aukot tarvittaessa valetaan oikeisiin mittoihinsa paikallavalukentillä. Kohteen uudisrakentamisen suunnitteluvaiheessa aukotukset huomioidaan usein punosmitoituksessa ja lisäpunoksilla jo ennen laatan valua.



Kuva 9. Esimerkki paikallavalupalkin terästen ankkuroinnista. Kannateltava palkki sidotaan onteloiden valuilla kannattelevaan teräsbetonipalkkiin. Teräsbetonipalkki ankkuroidaan viereisiin ontelolaattoihin. [19, s. 164]

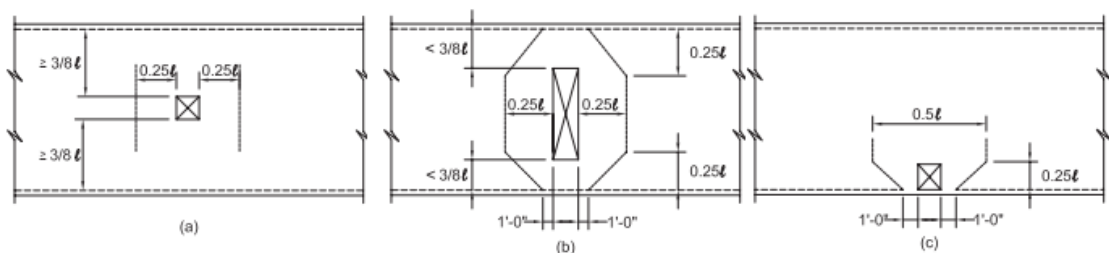
Ontelolaattaa aukotettaessa on aina säilytettävä 4- ja 5-onteloisilla laatoilla vähintään kaksi ehjää uumaa ja 6-onteloisilla laatoilla 3 ehjää uumaa laatan päästä päähän. Laatan keskelle ja reunaan saa tehdä korkeintaan 380...650 millimetriä leveän aukon laatan onteloiden määrästä riippuen ja viisienteloisilla laatoilla lisäksi laatan paksuudesta riippuen [4, s. 8 ja 12].

Yhdysvaltalaisen Precast/Prestressed Concrete Institutin ontelolaattojen suunnitteluohjeissa on annettu ohjeistusta työmaalla tehtävien aukkojen suunnitteluun ja toteutukseen. Työmaalla tehtäviä aukotusvaihtoehtoja on annettu kolme, joista kaksi on toteutuskelpoisia korjauskohteissa. Neljäntenä vaihtoehtona annetaan ontelolaattojen katkaisu jo elementtitehtaalla. PCI, kuten suomalaiset betoniteollisuuden toimijatkin, suosittelee aukkojen jakamista useampiin pienempiin aukkoihin yhden suuren aukon sijaan.

Ensimmäisessä PCI:n vaihtoehdossa ontelolaattaan sahataan aukko saumavalujen kovetuttua. Toisessa vaihtoehdossa ontelolaattojen päät tuetaan aukon reunalta teräksillä kannakkeilla. Ontelolaattojen avoimien päiden tukeminen teräskannakkeilla on yleistä myös suomalaisissa uudiskohteissa, ja tähän tarkoitukseen on olemassa eri valmistajien valmisosat tuotteita. Tällaisia laattakannakkeita valmistetaan tyypillisesti 1200 ja

2400 millimetrin levyisinä. Elementtiteollisuus ry suosittelee tekemään näistä mitoista poikkeavat aukot jälkivalupalkeilla. Kolmannessa vaihtoehdossa laatta tuetaan ja aukko sahataan.

PCI:n elementtisuunnittelun ohjeessa on lisäksi ohjeistettu ontelolaattaan tulevien aukkojen sijainnin vaikutusta laatan leikkaus- ja taivutuskapasiteettiin. Ohjeessa on kolme esimerkkitapausta, joissa aukon sijainti laataston pituussuunnassa vaihtelee. Ohjeessa ei ole otettu erikseen kantaa aukon sijaintiin yksittäisen ontelolaatan suhteen.



Kuva 10. Esimerkkejä erilaisista aukkosijainneista laataston kantosuuntaan nähden. Aukon sijainti suhteessa tukeen vaikuttaa oleellisesti laattaan vaikuttavien kuormien vaikutuksiin. [8, s. 3-9]

Pienillä (kuva 10, tapaus a), laataston keskellä sijaitsevilla aukoilla, kuormien ajatellaan siirtyvän täysin tietyllä etäisyydellä sijaitseville viereisille laatoille ja näin aukon vaikutus voidaan jättää huomioimatta. [8, s. 3-9]

Suuremmilla tai lähempänä tukea sijaitsevilla aukoilla (kuva 10, tapaus b) leikkauskuorman oletetaan siirtyvän reunakuormana viereisille laatoille. Tämä taas aiheuttaa laattoihin vääntöä, mikä tulee huomioida pienentyneenä tehokkaana leveytenä leikkauskapasiteetin laskennassa. [8, s. 3-9]

Vaihtoehtoisesti leikkauslujuus voidaan laskea yhdistettynä leikkaus- ja vääntökestävyytenä. Kolmannessa vaihtoehdossa (kuva 10, tapaus c) aukko sijaitsee aivan tuen vieressä. Ohje sisältää myös esimerkkilaskelmat aukon läheisyydessä vaikuttavien taivutus- ja leikkausjännitysten suuruuksien laskentaan. [8, s. 3-9]

Kanadalaisen Canadian Precast Prestressed Concrete Instituten suunnitteluohjeessa on annettu yhdysvaltalaisia suunnitteluohjeita mukailevia ohjeita ontelolaattoihin tehtäviin

aukkoihin. Kanadalaisessa ohjeessa suositellaan halkaisijaltaan korkeintaan 200 mm kokoiset aukot tehtäväksi työmaalla. Mikäli aukon pituus on vähintään neljännes laatan jännevälillä, tulisi viereisten laattojen reunat käsittää tukemattomina reunoina. [3, s. 3-127]

Molemmissa pohjoisamerikkalaisissa suunnitteluohjeissa aukot jätetään taivutusmitoituksessa huomioimatta, jos aukon mitat ovat pieniä ja aukko sijaitsee alle jännemitan kahdeksasosan etäisyydellä tuesta. Näissä ohjeissa pieniä aukkoja sallitaan tehtäväksi enemmän ja aukkojen suurin sallittu leveys on suurempi kuin suomalaisissa ohjeissa [3, s. 3-9; 8, s. 3-127].

Ontelolaatan jänneteräksiset eivät kykene vastaanottamaan täyttä vetojännitystä koko matkaltaan. Teräksen katkaisukohdasta alkaen jännevoima kehittyy teräksessä siirtymäpituuden pituisen matkan. Siirtymäpituuden päässä jänneteräksissä vaikuttava vetojännitys on jännehäviöillä pienennetyn esijännitysvoiman suuruinen. [11, s. 290]

Taivutusmitoituksessa on huomioitava jännepunosten jännevoiman riittävän suuri siirtymäpituus suhteessa mitoittavaan taivutusmomenttiin [3, s. 3-127; 6, s. 15]. 12,5 millimetrin jänneteräksen jännevoiman siirtymäpituus voi olla 1,5 ja 2,0 metrin välillä [11, s. 288]. Mikäli siirtymäpituus ei ole riittävän suuri aukon kummallakin puolella, ei käytettävissä olevaa kuormituskapasiteettia voida laskea täydellä jännevoiman arvolla. Tällöin laatan kuormia on siirrettävä muille laatoille tai kuormien vaikutusta on pienennettävä muilla tavoin.

Uudiskohteiden rajoitukset ontelolaattoihin tehtäviin suuriin aukkoihin perustuvat osittain myös turvallisen noston varmistamiseen. Elementtivalmistajilla tai Betoniteollisuus Ry:llä ei ole olemassa olevia ohjeita suurten aukkojen tekemiseen korjauskohteissa.

2.3 Aukkosuunnittelun prosessi

Ontelolaattoihin tehdään uusia aukkoja esimerkiksi erilaisia uusia tekniikkaläpivientejä, kuten LVI –läpivientejä, varten. Tekniikkaa uusiessa putkien ja muiden läpivientien mitat saattavat kasvaa alkuperäisestä, jolloin aiemmin tehtyjä aukkoja joudutaan todennäköisesti suurentamaan tai aukkojen sijaintia muuttamaan.

Kun tilojen käyttötarkoitus muuttuu erilaisissa muutoshankkeissa, voi läpivientejä tulla myös alueille joihin niitä ei ole alun perin suunniteltu. Myös erilaiset arkkitehtoniset uudistukset, kuten valoaukot, portaat tai hissit, saattavat luoda tarpeen uusille aukoille. Rakenteen kantokyky ja vakaus ei saa uusien aukkojen takia heikentyä.

Ennen suunnittelutyön aloittamista rakennesuunnittelija tutustuu kohteen lähtötietoihin. Lähtötiedoista selvitetään muun muassa olemassa oleva rakennetyyppi ja sen ominaisuudet, siihen liittyvät rakenteet, rakenteiden tuentatavat ja niille lasketut kuormat. Lähtötietoja hankitaan vanhoista suunnitelmista sekä kohdekäynneillä. Kohdekäyntien merkitys korostuu korjauskohteissa, joissa rakennuksen ja rakenteen koko elinkaari ei ole tarkasti tiedossa. Kaikista vaaka- ja pystyrakenteille tehdyistä aukotuksista ja ummistuksista ei välttämättä ole saatavilla dokumentaatiota. Kohdekäyntien avulla voidaan selvittää olemassa olevien aukkojen mitat ja sijainnit, sekä mahdollisen saumavalun olemassaolo.

Talotekniikan ja arkkitehdin tasopiirustuksiin merkittyjen uusien ja olemassa olevien reikien paikat tutkitaan huolellisesti. Rakennesuunnittelijan tehtävänä on reikäkierron aikana varmistaa reikien toteutuskelpoisuus.

Aukkojen sijainti ja mitat pyritään tekemään Betoniteollisuus ry:n pienten aukkojen mitoitusohjeiden mukaan. Aukot sijoitetaan mahdollisuuksien mukaan ontelolaatan onteloiden kohdalle ja niiden suurimmat sallitut mitat ja määrät määrätään ontelolaattavalmistajan tai Betoniteollisuus ry:n ohjeiden mukaan. Suuret aukot tulisi myös pyrkiä sijoittamaan lähelle tukea, jossa leikkausvoimien vaikutus on suurin. Laatan leikkauskapasiteetin kasvattaminen on huomattavasti taivutuskapasiteetin kasvattamista helpompaa.

Mahdollisuuksien mukaan hyödynnetään jo olemassa olevia aukkoja. Suuremmat läpiviennit jaetaan pienempiin yksittäisiin läpivienteihin. Tavallisimmat talotekniset läpiviennit saadaan usein toteutettua aukkojen sijaintien huolellisella suunnittelulla.

Mikäli uudet aukot voidaan toteuttaa pienten aukkojen reikäohjeen mukaan, voi rakennesuunnittelija antaa luvan aukkojen tekemiseen. Mikäli reikiä ei pystytä jakamaan pienempiin, sijoittamaan edullisimmille alueille tai useampia läpivientejä yhdistämään, tulee rakennesuunnittelijan selvittää vaatimukset uudelle aukolle.

Mikäli uudet aukot eivät katkaise punoksia, mutta aukkojen mitat tai määrä yhdessä poikkileikkauksessa ylittää suunnitteluohjeiden salliman maksimimäärän, tulee ontelolaatan kestävyys tarkastaa laskennallisesti. Uudet aukot voidaan toteuttaa, mikäli ontelolaatan todetaan kestävänsä uusien aukkojen aiheuttamat kantavuusmuutokset. Sekä aukotettavaan, että viereisten laattojen on kestävä niille aiheutuvat kasvaneet kuormat.

Suuri aukko pyritään ensisijaisesti asettamaan pisin sivu ontelolaatan onteloiden suuntaisesti. Näin saadaan säilytettyä suurin mahdollinen määrä ehjiä uumia ja punosteräksiiä. Mikäli katkaisun leveys ylittää ontelolaattojen suunnitteluohjeessa esitetyn laattatyyppin suurimman sallitun aukkoleveyden, laatta katkaistaan kokonaisuudessaan ja tuetaan jälkivalupalkilla tai teräskannakkeella.

Viereisten laattojen kantavuus tarkastetaan ontelolaattavalmistajakohtaisesti ontelolaatan kantavuuskäyrästä tai vaihtoehtoisesti laskennallisesti ehjän ontelolaatan mitoilla. Mitoitettavaan kuormaan on huomioitava katkaistujen laattojen tuennan aiheuttamat paikalliset kuormat. Paikallisten kuormien vaikutusta ei jaeta viereisille laatoille, ellei sauma- ja pintavalujen toimivuutta ole varmistettu.

Laatan kestävyden ylittyessä on suunniteltava tilanne- ja kohdekohtaisesti toteutuskehoitettu vahvistusmenetelmä. Leikkauslujuuden ylittyessä laatan kapasiteettia voidaan kasvattaa betonoimalla onteloita umpeen, pintavalulla tai aukon reunassa teräsbetonipalkeilla. Taivutuslujuuden ylittyessä kuorman aiheuttamaa momenttia voidaan pienentää tukemalla laattaa ja siirtämällä kuormia ehjille poikkileikkauksille, esimerkiksi riittävän jäykällä betoni- tai teräspalkilla. Ontelolaatan taivutuskapasiteettia on mahdollista kasvattaa myös esimerkiksi hiilikuitupolymeerinauhoilla [20, s. 54].

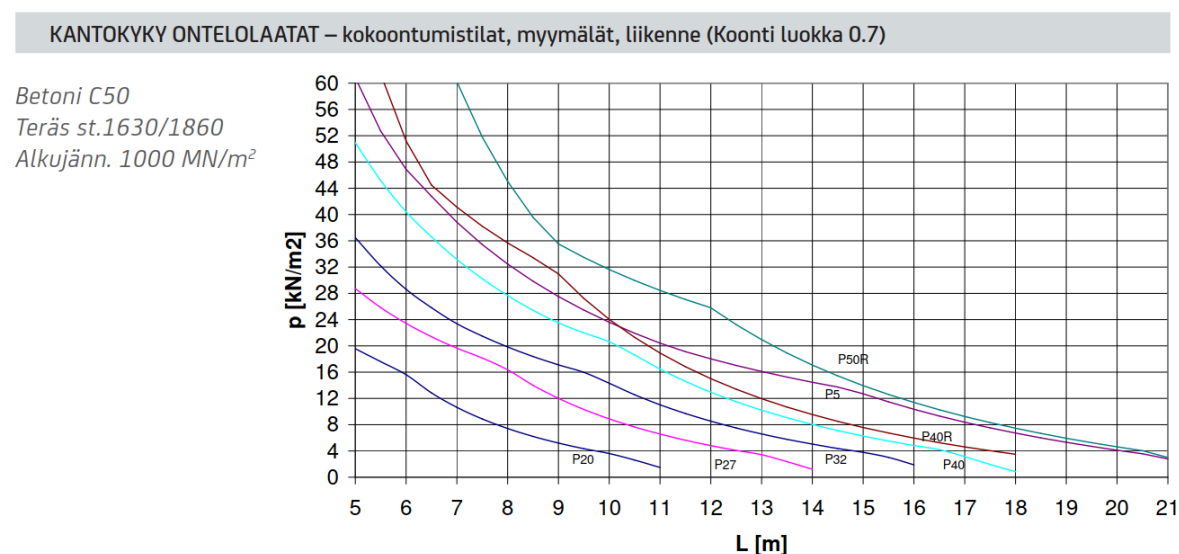
2.4 Ontelolaattojen kapasiteetin määrittäminen

Ontelolaatan kantavuuden arvioimista varten tulee rakennesuunnittelijan hankkia mahdollisimman tarkat tiedot rakenteesta ja siihen vaikuttavista kuormista. Lähtötietoja voidaan hankkia sekä vanhoista suunnitelmista että rakennetta fyysisesti tutkimalla. Rakenteiden olemassa olevia raudoituksia voidaan tutkia erilaisten rakenneilmalämpömittausten avulla. Olemassa olevia raudoituksia tutkittaessa on käytettävä rakennetta rikkomattomia tutkimustapoja.

Ontelolaatan kantavuuteen vaikuttaa jänneterästen määrä ja niiden poikkileikkauspinta-ala sekä betonisen poikkileikkauksen, etenkin onteloiden muoto, käytetyn betonin lujuusluokka ja laatan korkeus. Jänneterästen määrää ja laatan poikkileikkauksen korkeutta kasvattamalla pystytään luomaan suurempia jännevälejä.

Ontelolaatan taivutuskapasiteetti muodostuu ontelolaatan betonin puristuslujuudesta sekä jänneterästen vetolujuudesta. Laatan leikkaukskapasiteetti muodostuu taas lähes täysin ontelolaatan betonista. [11, s. 275]

Yksinkertaisissa ja yleisissä tapauksissa ontelolaatan kantavuutta voidaan arvioida ontelolaattojen kuormituskäyrästöjen avulla. Tällaiset käyrästöt on suunniteltu käytettäväksi korkeintaan rei'itysohjeen mukaan aukotetuille ontelolaatoille. Niitä voidaan kuitenkin hyödyntää, kun tarkastetaan aukotettavan laatan viereisten laattojen kantavuutta. Paikallista ja laskennallista tarkastelua tulee tehdä, kun rei'itysohjeen mukainen aukkomäärä tai ontelolaatan mitoituskäyrästön raja-arvot ylittyvät.



Kuva 11. Esimerkki Parman ontelolaatan kantavuuskäyrästöstä. Käyrästö esittää suurimman mahdollisen jännevälin erilaisilla suurimman sallitun hyötykuorman arvoilla. Kyseisen käyrästön laatoissa on suurin mahdollinen punosmäärä. [5, s. 11]

Ontelolaatan mitoituskäyrästöt ovat valmistajakohtaisia, mutta esimerkiksi Parman käyrästöjen lähtötietoina on käytetty samankaltaisia arvoja, kuin Betoniteollisuus ry:n tar-

joamissa ohjeissa. Lisäksi Parman ohjeissa, kuten Betoniteollisuus ry:n yleisissä ohjeissa, annetaan laattakohtaisesti kantavuuskäyrät myös eri punosmäärille. Jännepunoksia voi laatta kohtaisesti olla 4...18 kappaletta ja niiden poikkileikkauksen halkaisija on joko 9,3 tai 12,5 millimetriä. Käyrästöjä käyttäessä ei tarvitse ottaa huomioon ontelolaattojen omapainoa. [5, s. 10-11]

Ontelolaattojen ollessa CE –merkittyjä valmisosat tuotteita, ei niiltä suoraan vaadita eurokoodin mukaista mitoittamista. CE –merkki kuitenkin vaatii EN tuotestandardin mukaisen suunnittelun ja valmistamisen [2]. Ontelolaattojen EN -tuotestandardi 1168 sisältää ohjeet muun muassa ontelolaatan pään halkaisulle ja leikkaus- ja vääntökestävyyden sekä saumojen leikkauslujuuden laskennalle [2]. Näitä standardeja voidaan käyttää hyväksi ontelolaattojen käytettävissä olevan kuormituskapasiteetin ja paikallisen kestävyyden määrittämisessä.

Eurokoodin mukaiseen mitoittamiseen avuksi on olemassa erillinen ohjelehtinen ja se on saatavilla Elementtisuunnittelu.fi -verkkosivuilta [14]. Palkkiin tuetulle ontelolaatalle on käytettävissä, jo käytöstä poistetun Betoninormikortti 18:n mukainen Flexibl –mitoitushjelma. Taivutettua palkkia ei voida olettaa jäykäksi tueksi kuten esimerkiksi seinää tai pilaria. Ontelolaatta ja sitä tukeva palkki toimivat aina jossain määrin liittorakenteena. Laatan ja palkin liitos aiheuttaa ontelolaatan uumaan ylimääräisiä jännityksiä, joita ei esiinny jäykälle tuelle tuettaessa. Näin painuva tuki heikentää etenkin ontelolaatan leikkauslujuutta. [25, s. 692...693]

Murtorajatilamitoitusta varten on tarkasteltava ontelolaatan leikkaus-, ja taivutuslujuus. Ontelolaattoja mitoittaessa tulee lisäksi tarkastella käyttörajatilan mukainen halkeilun, jännitysten ja taipuman rajoittaminen.

Uudiskohteista poiketen korjauskohteissa ei aina ole takeita ontelolaattojen saumavalujen olemassaolosta tai onnistumisesta. Ilman ontelolaattojen saumavalujen tarkempaa tutkimista, voidaan olettaa, etteivät laattaan kohdistuvat kuormat jakaudu aukotettavalta laatalta viereisille laatoille [1].

Ennen aukon mitoitussuunnittelun aloittamista on rakennesuunnittelijan syytä selvittää rakenteen käytettävissä oleva kapasiteetti. Lähtötietoina tulisi selvittää olemassa oleva

raudoitus, betonin laatu- ja lujuusluokat sekä rakenteeseen vaikuttavat kuormat. Ontelolaattojen kantavuutta ja käytettävissä olevaa kapasiteettia määrittäessä tulee ottaa huomioon erilaisia ajan suhteen vaikuttavia rakenteen kantavuuden heikentymiä. Jänneterästen kapasiteettia laskevat esimerkiksi jänneterästen relaksaatio ja elastinen lyhenemä sekä betonin kutistuma ja viruma. Kokonaishäviöiden arvo vaihtelee noin 20...30 prosentin välillä. [11, s. 270]

Ontelolaatat mitoitetaan yhteen suuntaan kantavina laattoina. Laatalle lasketaan mitoitettava momentti sekä leikkausvoima rakenteeseen vaikuttavien kuormien avulla. Kuormia vastaan valitaan haluttu ontelolaattaprofiili sekä jänneterästen määrä, halkaisija ja jännevoima. Korjausrakentamisessa ontelolaatan profiili sekä jänneteräsmäärät ja niiden jännitys ovat ennalta määrättyjä, joten laskennan avulla voidaan tarkastaa olemassa olevan poikkileikkauksen kapasiteetti. Kapasiteettia verrataan ontelolaatan kuormitukseen.

Mikäli ontelolaatan kuormitusta ja toimintaa halutaan kuvata FEM –laskentamallilla, vähintään kaksi aukotettavan laatan viereistä ontelolaattaa tulee huomioida laskentamallia laatiessa [6, s. 16]. Lisäksi mallia laatiessa tulee varmistua saumavalujen toimivuudesta ja niiden leikkaukskapasiteetista. Kokeellisesti on osoitettu FEM –laskennan kuvaavan tarkasti ontelolaatan käyttäytymistä erilaisissa kuormitustilanteissa. Kaupallisilla laskentaohjelmilla on kyetty ennustamaan sekä ehjien että aukotettujen ontelolaattojen murto- tapoja ja arvioimaan niiden murtorajatilan kuormia sekä kuormista aiheutuvia taipumia ja halkeamia riittävällä tarkkuudella. [9, s. 436]

3 Ontelolaatan kapasiteetti ja aukon vaatima vahvistaminen

Korjauskohteissa yksittäisen ontelolaatan kuormituskapasiteetin kasvattaminen on erittäin haastavaa. Leikkauskapasiteetin kasvattaminen onnistuu käytännössä pintavalubetonilla tai onteloiden täyteen valamisella. Taivutuskapasiteettia taas voidaan kasvattaa esimerkiksi asentamalla rakenteeseen hiilikuitupolymeerinauhoja tai valamalla onteloiden sisään teräsbetonisia jälkivalupalkkeja.

Aukotettavan ontelolaatan kuormat viedään aukon leveydeltä ehjälle poikkileikkaukselle. Käytännössä tämä onnistuu esimerkiksi teräs- tai betonipalkeilla. Kuormien siirtymisen varmistamisen lisäksi on varmistettava ehjän poikkileikkauksen kapasiteetin riittävydestä.

Mikäli aukottamisesta johtuen ontelolaatan olemassa olevat rakenteelliset ominaisuudet eivät riitä laatalle kohdistuvien kuormien vastaanottamiseen, kuormat on joko pyrittävä siirtämään viereisille, riittävän kapasiteetin omaaville, laatoille tai sallittua kuormitusta tai niiden vaikutusta on pyrittävä pienentämään. Kuormia voidaan siirtää viereisille laatoille esimerkiksi palkkien avulla.

Kannattelevien, viereisten, laattojen kapasiteetin riittävydestä on myös varmistettava. Kannakoiville ontelolaatoille saadaan lisäkapasiteettia leikkaus- ja lävistysmurtoa vastaan esimerkiksi onteloiden täyteen valulla.

Etenkin palkkituentaa tehtäessä on syytä huomioida, että ontelolaatan leikkauslujuus taipuvalla tuella on pienempi kuin taipumattomalla tuella [25, s. 692...693]. Aukotettava ontelolaatta on aiemmin saatettu tukea esimerkiksi seinälle, tai muulle taipumattomalle tuelle, jolloin tuentatavan muutos saattaa aiheuttaa ontelolaatan leikkauskapasiteetin ylittymisen. Ontelolaattojen tuennasta matalapalkkien varaan on olemassa erilaisia ohjeita sekä laskentasovelluksia ja niitä on tutkittu muun muassa VTT:n toimesta. Matalapalkilla tarkoitetaan palkkia, joka on suurelta osin upotettu laataston sisään. Matalapalkki voi olla tehdasvalmisteinen, esimerkiksi WQ-, delta- tai HE –palkki, tai työmaalla tehtävä teräsbetonipalkki. Matalapalkkien mitoitus tehdään betoninormikortti 18:n mukaisesti. Kortti on yhteensopiva Eurokoodin kanssa. Kortin tueksi on kehitetty Flexibl –mitoitusso-

vellus, jonka avulla pystytään mitoittamaan ontelolaatan reunapalkkeja. Sovellus on tarkoitettu käytettäväksi uudiskohteissa, mutta sitä voidaan soveltaa myös korjausrakentamiseen.

Ontelolaatan yhteydessä toimiva matalapalkki voi toimia laatan kanssa joko ilman liittovaikutusta tai liittorakenteena. Liittovaikutuksesta johtuen laatan päähän syntyy aina lisärasituksia ontelolaatan pään ja matalapalkin sauman välisestä liitoksesta johtuen. Liittovaikutuksen määrään vaikuttaa käytetyn tukipalkin tyyppi. Kaikkia betoninormikortti 18:n ja Flexibl –sovelluksen mukaisia palkkityyppejä ei ole mahdollista käyttää korjausrakentamisessa.

3.1 Mitoitusperusteet

Ontelolaatat mitoitetaan Eurokoodin 1992-1-1, sen kansallisten liitteiden ja tuotestandardien EN 1668:n ja EN 1071:n mukaisesti. Mitoitus ja suunnittelu tulee suorittaa tarvittaessa myös Eurokoodin muiden osien, kuten 1991-1-1 (Rakenteiden kuormat) ja niiden kansallisten liitteiden mukaan.

Ontelolaattojen kantavuutta arvioitaessa on tiedettävä säästettävien onteloiden määrä, sekä säästettävän alueen punosterästen määrä. Mikäli ontelolaatoista ei ole saatavilla tarkempia tietoja, voidaan säästettävien punosten määrä tarkastaa minimipunostetun tyyppilaatan poikkileikkaukseen vertaamalla.

Ontelolaattoja aukottaessa on pyrittävä säilyttämään vähintään kaksi ehjää uumaa tuelle. Mikäli vähintään kahta vierekkäistä uumaa ei voida säilyttää, aukon leveys on yli profiilin suurimman sallitun tai aukon leveys kahden laatan saumassa on vähintään 800 millimetriä, tulee laatta katkaista kokonaan ja tukea viereisille laatoille.

Laattaa katkaistaessa tulee aina huomioida jännevoiman riittävän suuri ankkurointipituus taivutuskapasiteetin saavuttamiseksi, sekä kannattelevien laattojen taivutuskapasiteetti ja paikallinen leikkaus- ja lävistyskapasiteetti. Piste- ja viivakuormien vaikutus on tarpeen mukaan tarkastettava.

Kuormat voivat siirtyä ontelolaatalta toiselle liittorakenteena toimivan pintavalun ja saumavalujen välityksellä [5 s. 28; 10, liite C]. Saumavalujen laadusta ja tartunnasta ei kuitenkaan voida varmistua ilman asianmukaisia lisätutkimuksia. Rajatapauksissa voidaan laatoille tulevan kuormituksen vaikutusta pienentää käyttökelpoiseksi todistettujen saumavalujen tai uuden pintavalun avulla. Huomioitavaa on, että vaikka ontelolaattaan tehtävä aukko sijaitsisikin leikkauskuormitetulla alueella, on punosteräksiä katkaistaessa edelleen huomioitava jänneterästen tartuntapituus ja jännevoiman kehittyminen.

Ontelolaataston taivutuskapasiteetti muodostuu ontelolaattojen esijännitetyistä punosteräksistä, ontelolaatan profiilin korkeudesta, liittorakenteena toimivasta pintavalusta ja betonin lujuusominaisuuksista. Korjauskohteissa tiedot punosterästen määrästä ja laadusta voivat olla puutteellisia. Tästä syystä, mikäli riittävän tarkkoja lähtötietoja ei ole saatavilla, jännepunosten määränä ja laatuna käytetään laattatyyppin minimipunosmäärän mukaisia arvoja.

Ontelolaatassa käytettävän betonin lieriöpuristuslujuus on yleensä välillä C40...C70 MPa [2]. Mikäli tarkempia tietoja betonin todellisesta lujuudesta ei ole saatavilla, käytetään laskennassa puristuslujuuden arvoa C40. Jänneterästen jännevoimana ennen vähennyksiä käytetään 1000 MPa, mikäli tarkempia tietoja ei ole saatavilla.

Ontelolaatoissa käytettävät jännepunokset ovat 7-lankaisia ja halkaisijaltaan joko 9,3 tai 12,5 mm.

h_{hc} [mm]	b_{void} [mm]	h_{void} [mm]	$b_{w,hc}$ [mm]	b_{hc}/A_{vl} [1/mm]	h_{cf} [mm]
500	205	400	340	0,0150	50
400	221	320	276	0,0183	40
320	216	245	296	0,0217	35
265	185	185	235	0,0193	40
200	153	153	230	0,0261	30
150	109	109	280	0,0286	30

Kuva 12. Ontelolaattojen mitoituksessa käytettävät ohjeelliset poikkileikkausmitat. Taulukossa h_{hc} on ontelolaatan poikkileikkauksen korkeus, b_{void} ja h_{void} ovat ontelon leveys ja korkeus, $b_{w,hc}$ on ontelon uumien yhteenlaskettu vahvuus, b_{hc}/A_{vl} on poikkileikkausgeometriaan perustuva arvo ja h_{cf} on ontelolaatan kannaksen vahvuus. [25, s. 703]

Rakenteen todellisuus, kuten saumavalujen tai jänneterästen kunto, saattavat poiketa alkuperäisesti suunnitellusta. Tarkoilla tutkimuksilla voidaan kuitenkin lisätä varmuutta rakenteen kantavuudelle ja täten mahdollisesti keventää vahvistusmenetelmää.

Ontelolaattojen poikkileikkausgeometrian lähtöarvoina käytetään Betoniyhdistys ry:n by 210 –kirjassa esitettyjä arvoja, sekä kuvissa 3 ja 12 esitettyjä poikkileikkauskorkeuksia ja ontelomääriä. Katkaisut tuodaan aina uuman ulkoreunaan asti, aukotusohjeiden kuvien mukaisesti. Tarvittaessa aukot pienennetään oikeaan mittaan jälivalupalkeilla.

3.2 Ontelolaatan kapasiteetilaskenta

3.2.1 Leikkauskapasiteetti

3.2.1.1 Ontelolaatan leikkauskestävyys

Tasaisesti jakaantuneiden kuormien vaikutuksesta aiheutuvat leikkauskuormat ovat vain harvoin ontelolaattojen mitoituksessa määrääviä. Leikkausmurto on usein määräävä lyhyillä, noin 3...6 metrin pituisilla, 150...400 millimetrin paksuisilla laatoilla [11, s. 275] tai kun ontelolaattaa tuetaan taipuisalla tuella [25, s. 692...693]. Leikkausmurto voi muuttua määrääväksi myös aukkojen reunojen läheisyydessä sijaitsevien piste- tai viivakuormien vaikutuksesta.

Leikkausmitoituksessa on huomioitava ontelolaatan mahdollisen halkeilun aiheuttama leikkauskapasiteetin lasku. Ontelolaattojen EN 1168 –standardissa on olemassa leikkauslujuuden laskentakaavat sekä halkeilleelle, että halkeilemattomalle betonille. Lisäksi on huomioitava kiertymän aiheuttama leikkauskapasiteetin lasku.

Ontelolaatan halkeilematon alue määritellään taivutusrasituksessa niin, että taivutusve-tojännityksen arvo on pienempi kuin $f_{ctk0,05}/\gamma_C$. Mikäli ontelolaatan poikkileikkaukseen kohdistuvien leikkausvoimien arvo on pienempi kuin ontelolaatan leikkauslujuus kyseisessä poikkileikkauksessa, voidaan aukko toteuttaa ilman reunojen vahvistamista, mikäli taivutuskuormien siirtymisestä voidaan muutoin varmistua.

Ontelolaattojen tuotestandardin EN 1168:n mukaan ontelolaatan leikkauslujuus, $V_{Rd,c}$, on laskettavissa yksinkertaistetun kaavan mukaan:

$$V_{Rd,c} = \varphi * \frac{I * b_w}{S} * \sqrt{f_{ctd}^2 + \beta * \alpha_l * \sigma_{cp} * f_{ctd}} \quad (1) [10, s.17]$$

Jossa,

- φ on pienennyskerroin (= 0,8),
- I on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti,
- b_w on poikkileikkauksen leveys painopiste akselin kohdalla,
- S on staattinen momentti painopiste akselin suhteen,
- f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo,
- β on jännevoiman siirtymäpituuteen viittaava pienennyskerroin (= 0,9),
- α_l on jännevoiman siirtymisaste ($\leq 1,0$) ja
- σ_{cp} on betonin täysi puristusjännitys painopiste akselilla.

α_l arvo lasketaan kaavalla l_x / l_{pt2} , jossa,

- l_x on tarkasteltavan poikkileikkauksen etäisyys jännevoiman kehittymisen alkukohdasta ja
- l_{pt2} on jännevoiman siirtymäpituuden yläraja-arvo.

Täyteen valetuille onteloille voidaan laskea leikkauslujuus EN 1168:n mukaisesti. Onteloiden täyteen valamisella saadaan lisäkapasiteettia yhteensä $V_{Rt,d}$:n arvon mukaisesti. Arvo lasketaan kaavalla:

$$V_{Rt,d} = V_{Rd,c} + \frac{2}{3} * n * b_c * d * f_{ctd(i)} \quad (2) [10, s. 42]$$

Jossa,

- $V_{Rd,c}$ on ontelolaatan leikkauslujuuden arvo,
- n on täytettävien onteloiden määrä,
- b_c on ontelon leveys,
- d on laatan tehollinen korkeus ja
- $f_{ctd(i)}$ on täytön mitoitusvetolujuuden arvo.

3.2.1.2 Saumojen leikkauskestävyys

Uudiskohteissa ontelolaattasaumojen kykyä siirtää kuormia käytetään hyödyksi ontelolaatastoa mitoittaessa. Mikäli seuraavana esitellyllä vahvistusmenetelmällä ei saada riittävää varmuutta ontelolaatan kestävydestä, voidaan kuormien vaikutusta mahdollisesti pienentää saumavalujen avulla. Tämä kuitenkin edellyttää, että ontelolaatan saumavalujen laatu ja kuormansiirtokyky tutkitaan. Saumavalujen kunnosta ja tartunnasta on ehdottomasti varmistuttava.

Saumavalujen leikkauskapasiteetti on laskettavissa EN 1168 –tuotestandardin mukaisesti. Leikkauslujuus ilmoitetaan viivakuormakestävyysinä, joka on kannaksen tai sauman kestävyyksistä pienempi.

Kannaksen kestävyys lasketaan kaavalla:

$$v'_{Rdj} = 0,25 * f_{ctd} * \Sigma h_f \quad (3) [10, s. 18]$$

Jossa,

- v'_{Rdj} on kannaksen kestävyys,
- f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo ja
- Σh_f on ylä- ja alakannaksen pienempien paksuuksien summa.

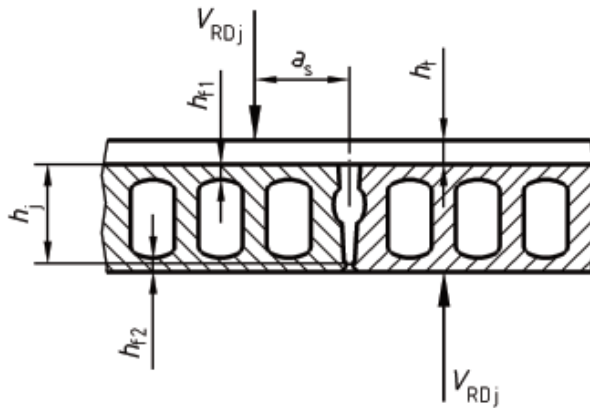
Sauman kestävyys lasketaan kaavalla:

$$v''_{Rdj} = 0,15 * (f_{ctdj} * h_j * f_{ctdt} * h_t) \quad (4) [10, s. 18]$$

Jossa,

- v''_{Rdj} on sauman kestävyys,
- f_{ctdj} on saumojen betonin vetolujuuden mitoitusarvo,
- h_j on sauman nettokorkeus,
- f_{ctdt} on pintabetonin vetolujuuden mitoitusarvo ja
- h_t pintabetonin paksuus.

Sauman nettokorkeus ja pintabetonin paksuus määritellään kuvasta:



Kuva 13. Sauman leikkauslujuuden määrittämiseen tarvittavien mittojen määrittäminen [10, s. 19].

Lopullinen pituussuuntaisen sauman leikkauslujuus V_{Rdj} määritetään kaavasta:

$$V_{Rdj} = v_{Rdj} * (a + h_j + h_t + 2 * a_s) \quad (5) [10, s. 18]$$

Jossa,

- v_{Rdj} on pienempi edellä lasketuista v'_{Rdj} ja v''_{Rdj} arvoista,
- a on sauman suuntaisen kuorman pituus
- ja a_s on kuorman ja sauman keskipisteiden välinen etäisyys.

3.2.2 Taivutuskapasiteetti

Ontelolaatan taivutusmitoituksessa tulee tarkastella murtorajatilan mukainen taivutuskapasiteetti sekä käyttörajatilan mukainen jännitysten, taipuman ja halkeilun rajoittaminen. Käyttörajatilan mukainen mitoittaminen käydään läpi kappaleessa 3.2.2.2.

3.2.2.1 Murtorajatilamitoitus

Tartuntajänteiset rakenteet voivat saavuttaa taivutusmurtorajatilan neljällä eri tavalla – halkeilun alkamisen seurauksena, jänneterästen katketessa, terästen myötäämisen ja betonin murtumisen seurauksena sekä betonin puristumurron seurauksena [25, s. 646].

Näistä tavanomainen ja toivottu on kolmas murtotapa, jossa jänneteräkset myötäävät ennen betonin murtumista.

Jännerakenteiden mitoitus tehdään jänneterästen poikkileikkausalan ja lujuuksien sekä terästen venymän mitoitusarvojen perusteella. [12, s. 44]

Ontelolaatoille on asetettu EN 1168:n mukaan pienin sallittu jänteiden määrä, laatan leveydestä riippuen. 1200 millimetrin laatalle jänteitä tulee olla 4, 600-1200 millimetrin laatalle 3 ja tätä pienemmillä vähintään 2. Tästä johtaen seuraavissa laskelmissa käytetään laatan leveydestä riippuen jännepunosten määränä vähintään 2 punosta. Mikäli rakenteeseen jäisi vähemmän kuin 2 punosta, laatta katkaistaan koko leveydeltään ja aukon mitat tuodaan haluttuihin mittoihin jälkivalukaistoilla.

Jänneterästen jännitys laskee punosten laukaisun jälkeen. Jännehäviön suuruuteen vaikuttavat jänneterästen relaksaatio, kutistuma, terästen elastinen lyhenemä sekä betonin viruma. Jännehäviöiden suuruus voidaan laskea, mikäli ontelolaatan elinkaaren aikaiset olosuhteet ovat tiedossa. Jos näin ei ole, voidaan jänne suuruudeksi olettaa 70-75 prosenttia alkuperäisestä.

Ontelolaatan murtorajatilan mukaista taivutuslujuutta rajoittavat ontelolaatan betonin poikkileikkausmitat ja puristuslujuus, f_{ck} (MPa), sekä jänneterästen määrä ja niiden myötövetolujuus, f_{pb} (MPa) [11, s. 270]. Valmisosarakentamisessa voidaan CE –merkittyjen tuotteiden suunnittelulujuuksia laskettaessa käyttää pienennettyjä materiaaliosavarmuuslukuja. Osavarmuuslukujen suuruudet ovat näissä tapauksissa betonille $\gamma_c = 1,35$ ja jänneteräkselle $\gamma_s = 1,1$ [24, s. 3]. Teräksen vetolujuus on riippuvainen teräksen häviöillä pienennetyn esijännityksen suuruudesta [11, s. 270].

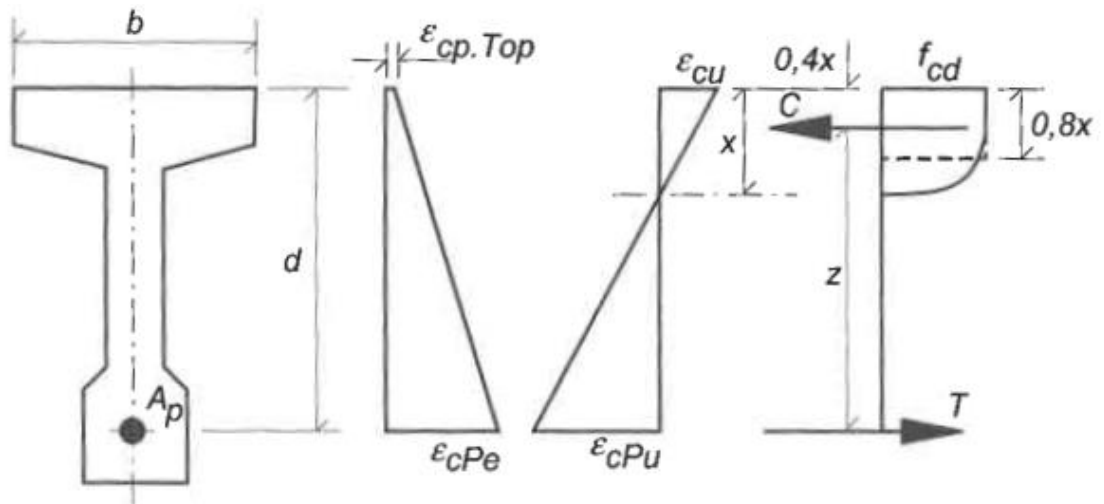
Jänneteräksen jännityksen, f_{pd} :n, mitoitusarvona käytetään vetolujuuden 0,1 –rajaa, $f_{p0,1k}/\gamma_s$, jossa $f_{p0,1k}$ määritellään jänneteräksen 0,1 prosentin muodonmuutoksen aiheuttavan kuorman ominaisarvon ja jänneteräksen nimellispoikkileikkauksen osamäärästä.

Murtorajatilan taivutuskapasiteetti voidaan määrittää joko niin kutsutulla sisäisen momenttivarren menetelmällä tai mekaanisen raudoitussuhteen avulla. Mekaanisen raudoitussuhteen, ω , avulla mitoitus tehdään pääosin kuten muillekin teräsbetonisille rakenteille.

Molemmat menetelmät ovat melko suoraviivaisesti toimivia ja ongelman muodostaa lähinnä betonin puristuspinnan pinta-alan määrittäminen. Sisäisen momenttivarren menetelmässä, sisäisen momenttivarren pituus riippuu betonin puristuspinnan korkeudesta. Mekaanista raudoitussuhdetta määrittäessä tarvitaan suhteellista momenttia, μ , joka lasketaan puristetun pinnan mittojen avulla. Nykyisin ontelolaatat mitoitetaan pääosin sisäisen momenttivarren menetelmällä.

3.2.2.1.1 Sisäisen momenttivarren menetelmä

Sisäisen momenttivarren menetelmä perustuu ontelolaattapoikkileikkauksen jännitysjauman momenttitasapainoehdojen toteutumiseen. Ontelolaatan sisäisten kuormitusten ajatellaan jakautuvan lineaarisesti, jolloin momenttitasapaino saavutetaan kahden vastakkaisuuntaisen voiman ja niiden välisen momenttivarren avulla.



Kuva 14. Muun kuin suorakaidepoikkileikkauksen muodonmuutos- ja jännitysjauma murtorajatilassa. [25, s. 648]

Ylläolevassa kuvassa $\epsilon_{cp,Top}$ on jännevoimasta aiheutunut ontelolaatan yläpinnan puristuma, ϵ_{cu} on betonin murtopuristuma, ϵ_{cPe} on jännevoiman aiheuttama betonin puristuma

jänneterästen painopisteessä ja ϵ_{cPu} on betonin näennäinen venymä murtorajatilassa kuormista. Kuvan oikeassa reunassa on muodonmuutosten aiheuttama ekvivalentti voimajakauma, jossa C on betonin puristusvoiman resultantti (myöhemmin tekstissä F_{cc}), T on jännevoiman resultantti (myöhemmin tekstissä F_{st}) ja z on sisäinen momenttivarsi.

Kun $\epsilon_{cp,Top}$ oletetaan nolaksi (esijännityksen vaikutuksesta ontelolaatan yläpinta venyy, ei puristu), ϵ_{cPu} merkitään jänneteräksen myötörajan mukaisen venymän suuruiseksi (murtorajatilassa betonin alapinnan ja jänneteräksen venymät oletetaan yhtä suuriksi) ja ϵ_{cu} :n arvoksi merkitään käytössä olevan lujuusluokan mukainen murtopuristuma ja ϵ_{cPe} :n arvoksi jännevoiman aiheuttama puristuma, saadaan sisäinen momenttivarsi selvitettyä puristusvoiman korkeuden avulla [12, s. 82.]

Murtorajatilassa jänneterästen jännevoiman resultantti on saavuttanut teräksen myötörajan ja on yläpinnan betonin puristusresultantin kanssa saman suuruinen. Suorakaidepoikkileikkaukselle betonin yläpinnan puristusresultantin suuruus voidaan laskea ϵ_{cu} :n ja betonin kimmokertoimen avulla. Ontelolaatoissa on kuitenkin mahdollista, että puristusvoiman alareuna on onteloiden yläreunan alapuolella. Tällöin puristusvoiman leveydenä ei voida käyttää vakioarvo b:tä.

Tartuntajänteillä raudoitettujen poikkileikkauksen taivutuskestävyys voidaan laskea poikkileikkauksen tasapainoehdon mukaisesti kaavalla:

$$M_{Rd} = f_p * A_p * Z \quad (6)$$

Jossa,

- f_p on jänneterästen myötölujuus,
- A_p on jänneterästen yhteenlaskettu poikkipinta-ala,
- Z on ontelolaatan sisäinen momenttivarsi,
- d on ontelolaattapoikkileikkauksen tehollinen korkeus ja
- x on puristusvoiman korkeus ja samalla neutraaliakselin etäisyys laatan yläpinnasta.

Saatu taivutuskapasiteetti on aukotettavan ehjän osan taivutuskapasiteetti. Muu osa ontelolaatasta katsotaan kuormia kantamattomaksi. On kuitenkin myös varmistuttava, että

kuormat siirtyvät näiltä kantamattomilta alueilta kantavalle alueelle. Kuormia voidaan siirtää aukon reunoilta esimerkiksi jälkivalupalkeilla. On huomioitava, että kantamattoman osan kuormat kasvattavat ehjän ontelolaattaosuuden kuormia. Mikäli ehjä osuus ei kestä näitä kasvaneita kuormia, on kuormat vietävä edelleen kauemmas laatastolle tai aukon kokoa on pienennettävä. Toisaalta, mikäli ontelolaatta katkaistaan koko leveydeltään ja katkaistujen laattojen päät kannakoidaan viereisiltä laatoilta, on katkaistun laatan kantoleveys täyden ontelolaatan leveyden suuruinen ja täten taivutuskapasiteettikin on suurempi.

Kun puristettu pinta on suorakaiteen muotoinen, momenttivarsi Z , voidaan laskea $d=0,4x$, jossa x on puristetun pinnan korkeus. Ontelolaatan poikkileikkauksen suorakaiteen muotoisen puristetun pinnan korkeus voidaan laskea yksinkertaisesti kaavalla:

$$x = \frac{F_{st}}{b \cdot 0,8 \cdot f_{cd}} \quad (7)$$

Jossa,

- F_{st} on jännepunoksissa murtorajatilassa vaikuttava vetävä voima ja
- b on ontelolaattapoikkileikkauksen leveys.

Muun muotoisen puristuspinnan korkeus voidaan selvittää betonin murtopuristuman, jänneterästen myötövenymän ja sisäisen momenttivarren avulla kaavalla:

$$x = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{pp}} * d \quad (8)$$

Jossa,

- ϵ_{cu} on betonin murtopuristuma,
- ϵ_{pp} on jänneterästen myötövenymä ja
- d on ontelolaatan tehollinen korkeus.

Mikäli ontelolaatan puristuspinna ei ole suorakaiteen muotoinen, eli kun puristuspinnan alareuna on onteloiden yläreunan alapuolella, neutraaliakselin korkeus tulee selvittää aritmeettisesti iteroimalla tai geometrisesti.

Neutraaliakselin korkeus voidaan selvittää poikkileikkauksen jännitys jakauman avulla. Jotta poikkileikkauksen jännitys jakauma olisi tasapainossa, on ontelolaatan yläpinnan betonissa vaikuttavan jännityksen oltava itseisarvoltaan alapinnan jännepunosten jännityksen suuruinen. Jännepunoksissa murtorajatilan vetävän voiman, $F_{st:n}$, suuruus voidaan laskea kaavalla:

$$F_{st} = n_p * f_{sb} * A_p \quad (9)$$

Jossa,

- f_{sb} on jänteissä vaikuttava vetojännitys,
- A_p on jännepunosten poikkipinta-ala ja
- n_p on jännepunosten lukumäärä.

$f_{sb:n}$ arvona käytetään jänneteräksen esijännitysvoimasta ja ontelolaatan kuormituksesta aiheutuvan teräksen venymän, $\epsilon_s:n$, ja teräksen kimmokerroimen, $E_s:n$, avulla laskettua arvoa. Muodonmuutoksista aiheutuvan jännityksen arvo voidaan yleisesti laskea kaavasta $E * \epsilon$, jossa E on muotoa muuttavan aineen kimmokerroin, ja ϵ on muodonmuutos.

Yläpinnan betonin puristusvoiman resultantti taas voidaan laskea murtopuristuman $\epsilon_{cu:n}$ ja puristetun pinnan pinta-alan avulla. Ontelolaatoissa ongelmallista on puristetun pinnan pinta-alan määrittäminen, kun pinnan alareuna on laatan ylälaipan alapuolella. Ontelolaatan puristusmurron aiheuttavan voiman resultantti voidaan laskea kaavasta:

$$F_{cc} = \epsilon_c * E_c * A_{cc} \quad (10)$$

Jossa,

- ϵ_{cu} on betonin puristuma,
- E_c on betonin kimmokerroin ja
- A_{cc} on puristetun pinnan pinta-ala.

Puristusresultantin sijainti selvitetään iteroimalla. Iterointi voidaan toteuttaa esimerkiksi jakamalla ontelolaatta siivuihin. Jokaiselle siivulle lasketaan oma puristusresultanttinsa. Lopullinen poikkileikkauksen puristusresultantti sijaitsee näiden siivujen puristusresultanttien painopisteessä.

Puristussiivun korkeus voi olla mielivaltainen, siivun leveys taas on poikkileikkauksen betonin leveys siivun kohdalla. Siivujen leveyttä laskettaessa tulee siis ottaa huomioon onteloiden vaikutus puristussiivujen kokoon.

Kun puristussiivujen pinta-ala ja niissä vallitseva jännitys on selvitetty, voidaan siivulle laskea voimaresultantti. Opinnäytetyötä varten laadittu laskentapohja laskee voimaresultantin arvon ontelolaatan yläpinnasta alkaen millimetrin korkuisille siivuilla, aina ontelolaatan ideaalipainopisteeseen asti.

3.2.2.2 Käyttörajatilamitoitus

Käyttörajatilan mukaisessa taipumamitoituksessa ontelolaatan taiputuslujuutta rajoittavat taiputuksen aiheuttamat betonin veto- ja puristusjännitykset, esikorotus ja taipuma. Esikorotus on näistä määräävä pitkissä voimakkaasti punostetuissa laatoissa, joiden hyötykuorma on pieni. [25, s. 690]

3.2.2.2.1 Halkeilun ja jännitysten rajoittaminen

Halkeilua ja halkeilua aiheuttavia vetojännityksiä voidaan rajoittaa kolmella eri tavalla; rajoittamalla vetojännitykset joko nolnaan tai käytetyn betonimateriaalin ominaisvetolujuuden avulla määritettyyn arvoon, tai rajoittamalla halkeamaleveyttä. Jännitysten suuruutta ei rajoiteta, mikäli halkeamaleveys on määräävä tekijä. [25, s. 690]

Rasitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet
	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, AC XD3 AC , XS1, XS2, XS3		Vetojännityksetön tila
HUOM. 1 Rasitusluokkien X0 ja XC1 yhteydessä halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen, ja tämä raja on asetettu, jotta tavallisesti saavutetaan kelvollinen ulkonäkö. Jos ulkonäköehtoja ei aseteta, tätä rajaa voidaan väljentää.		
HUOM. 2 Näiden rasitusluokkien yhteydessä tarkistetaan myös, ettei vetojännitystä esiinny kuormien pitkäaikaisen yhdistelmän vallitessa.		

Kuva 15. Sallittu halkeaman leveys. Ontelolaatat ovat tartuntajännerakenteita. [12, s. 118]

Ontelolaattojen halkeamaleveyttä rajoitetaan rakenteen ympäristön rasitusluokan mukaisesti. Kuivissa tai kosteissa sisätiloissa, eli rasitusluokissa X0 ja XC1, halkeamaleveys rajoitetaan 0,2 millimetriin [12, s. 118]. Halkeamaleveyttä rajoitetaan myös kuormitusyhdistelmän ajallisen pituuden perusteella.

Rasitusluokan muuttuessa haastavammaksi, esimerkiksi kloridien tai sulfidien vaikutuksesta tai rakenteen vesitiiviysvaatimuksista johtuen, ontelolaatan alapinnassa ei sallita vetojännityksiä.

Kun alapinnan vetojännityksiä rajoitetaan, ei rakenteeseen synny taivutusjännityksistä aiheutuvia halkeamia. Sallittu alapinnan vetojännitys määräämällä, voidaan määrätä myös rakenteen sallittu käyttörajatilan kuormitus. Alapinnan vetojännitysten suuruus rajoitetaan siis joko nolnaan tai betonimateriaalin ominaisvetolujuuteen f_{ctk} . [25, s. 690]

Alapinnan vetojännityksen suuruus voidaan laskea ontelolaatan jännitysjakautuman avulla. Jännitykset jakautuvat ontelolaatan poikkileikkauksen pystysuunnassa lineaarisesti. Alapinnan jännityksiin vaikuttavat jännepunokset tulee huomioida momenttikestävyyttä laskettaessa.

Betonirakenteiden Eurokoodi, SFS-EN 1992-1-1, asettaa käyttörajatilan jännityksille tiettyjä rajoitteita. Betonin puristusjännitystä tulee rajoittaa niin, että betoniin ei muodostu rakenteen toiminnalle haitallisia, jännitysten suuntaisia, halkeamia tai suurta virumaa. Raudoituksen vetojännityksiä tulee rajoittaa niin, että raudoitus ei veny epälineaarisesti tai ettei rakenne taivu tai halkeile haitallisesti [12, s. 117.] Sallitut jännitykset ovat rakenteessa käytettyjen materiaalien ominaisarvojen pienennettyjä arvoja. Jänneteräksille sallittu jännitys määritellään kaavasta $k_5 f_{pk}$, jossa kerroin k_5 on määritettävissä kansallisessa liitteessä.

Käyttörajatilan reunajännitys, M_{sr} , lasketaan ontelolaatan ylä- ja alapinnan sallittujen jännitysten avulla. Sallittu reunajännitys on siis pienempi arvoista $M_{sr,t}$ ja $M_{sr,b}$. Yläpinnan reunajännitys $M_{sr,t}$ lasketaan kaavalla:

$$M_{sr,t} = (\sigma_{tc} + 0,45 * f_{ck}) * W_t$$

(11) [11, s. 270]

Jossa,

- σ_{tc} jännevoiman aiheuttama ontelolaatan yläpinnan jännitys, jonka tulee olla pienempi kuin ontelolaatan betonin puristuslujuuden ominaisarvo f_{ck} ,
- f_{ck} on betonin lieriöpuristuslujuuden EC2:n mukaisesti pienennetty, virumisen epälineaarisen vaikutuksen välttävä, ominaisarvo ja
- W_t on poikkileikkauksen taivutusvastus neutraaliakselilta yläpinnan suhteen.

Alapinnan reunajännitys $M_{sr,b}$ taas lasketaan kaavalla:

$$M_{sr,b} = (\sigma_{bc} + f_{ctm}) * W_b \quad (12) [11, s. 270]$$

Jossa,

- σ_{bc} jännevoiman aiheuttama ontelolaatan alapinnan jännitys, jonka tulee olla pienempi kuin ontelolaatan betonin keskimääräisen vetolujuuden arvo f_{ctm} ,
- f_{ctm} on EC2 mukaan $0,3 * f_{ck}^{2/3}$ ja
- W_b on poikkileikkauksen taivutusvastus neutraaliakselilta alapinnan suhteen.

Jännevoiman aiheuttamat jännitykset, σ_{tc} :n ja σ_{bc} :n, arvot lasketaan jännevoiman, betonin poikkileikkausalan, reunaetäisyyden ja Z_{tb} :n avulla. Jännityksen arvo lasketaan kaavalla:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} * y \quad (13) [26, s. 189]$$

Jossa,

- σ on jännitys halutussa pinnassa, σ_{tc} tai σ_{bc} ,
- N on poikkileikkauksessa vaikuttava puristava voima, tässä tapauksessa puristava jännevoima,
- A on poikkileikkauksen betonin pinta-ala,
- M on jännevoiman aiheuttama momentti poikkileikkauksessa, $N * e$, kun e on jännevoiman epäkeskisyys neutraaliakselista,
- I on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja
- y on etäisyys neutraaliakselilta tarkasteltavaan pisteeseen.

3.2.2.2.2 Taipuman rajoittaminen

Ontelolaatan taipumaa rajoitetaan kolmella perusteella; laatastolle tulevan kuorman vaikutuksesta, laataan liittyvien rakenteiden perusteella ja kokonaistaipumalla. Eurokoodi 2:n mukainen sallittu kokonaistaipuma on $L/250$. Lisäksi ontelolaatan taipumaa rajoitetaan laatastolle tulevasta kuormasta arvoon $L/200$ [24, s. 5.] Esijännitetyissä rakenteissa taipumaa voidaan kompensoida esikorotuksella, jonka enimmäisarvo rajoitetaan myös suuruuteen $L/250$ [12, s. 126.] Taipumaa voivat kuitenkin rajoittaa myös muut tekijät, kuten ontelolaattaan liittyvät muut rakenteet.

Jännevoiman aiheuttaman positiivisen taipuman, δ_0 , suuruus voidaan laskea melko tarkasti halkeilemattomalle poikkileikkaukselle kaavalle:

$$\delta_0 = \frac{P_{ep}L^2}{8E_cI_c} \quad (14) \text{ [25, s. 669]}$$

Jossa,

- P_{ep} on jännevoiman momentti painopisteakselin suhteen,
- E_c on betonin kimmokerroin ja
- I_c on betonipoikkileikkauksen jäyhyysmomentti.

Taipuma tasaisen kuorman vaikutuksesta on myös laskettavissa esimerkiksi kaavalla:

$$\delta = \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (15)$$

Jossa,

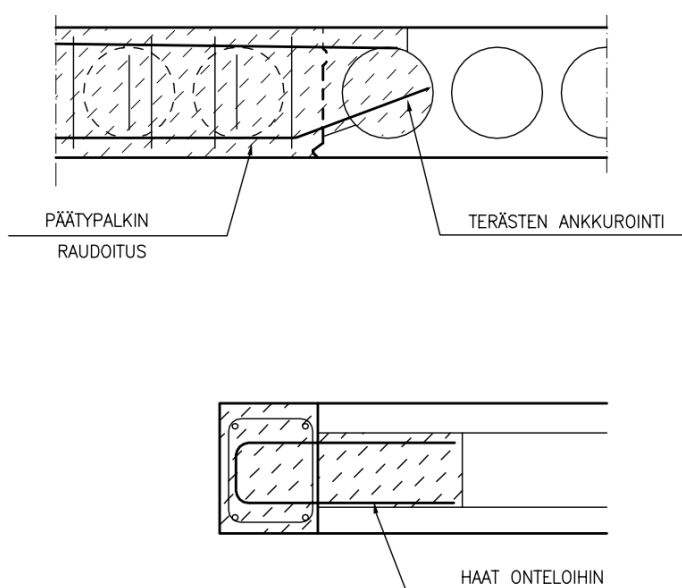
- q on tasaisen kuorman arvo,
- L on jännemitta,
- E on tarvittaessa virumakertoimella korjattu kimmokerroin ja
- I on poikkileikkauksen jäyhyysmomentti.

Taipumaa laskettaessa viruman vaikutus otetaan huomioon pitkäaikaisten kuormien osuudessa taipumaan. Taipuman suuruus kasvaa virumisen vaikutuksesta.

3.3 Vahvistusmenetelmät

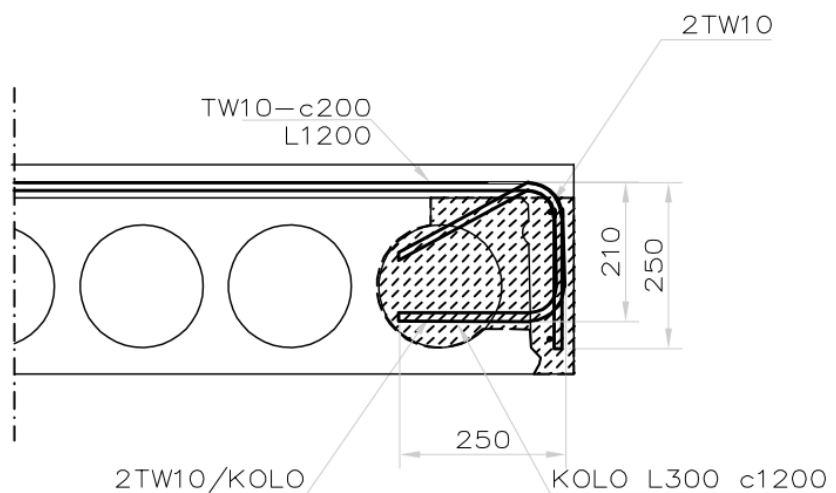
3.3.1 Palkkikannakointi

Aukotetun ontelolaatan kuormat voidaan siirtää viereisille laatoille esimerkiksi teräs- tai betonipalkeilla. Teräsbetonista jälkivalupalkkia voidaan käyttää aukon päädyn tuentaan ja aukon reunojen jäykistykseen. Jälkivalupalkilla saadaan myös ontelolaatan katkaistun osuuden kuormat tuotua ehjälle ontelolaattapoikkileikkaukselle. Teräspalkilla saadaan vietyä aukotetun ontelolaatan kuormia kauemmas, esimerkiksi tukevan laatan keskionteloihin tai seuraavaan ontelolaattasaumaan asti.



Kuva 16. Esimerkki jälkivalupalkin toteutustavasta ontelolaatan päässä. [2]

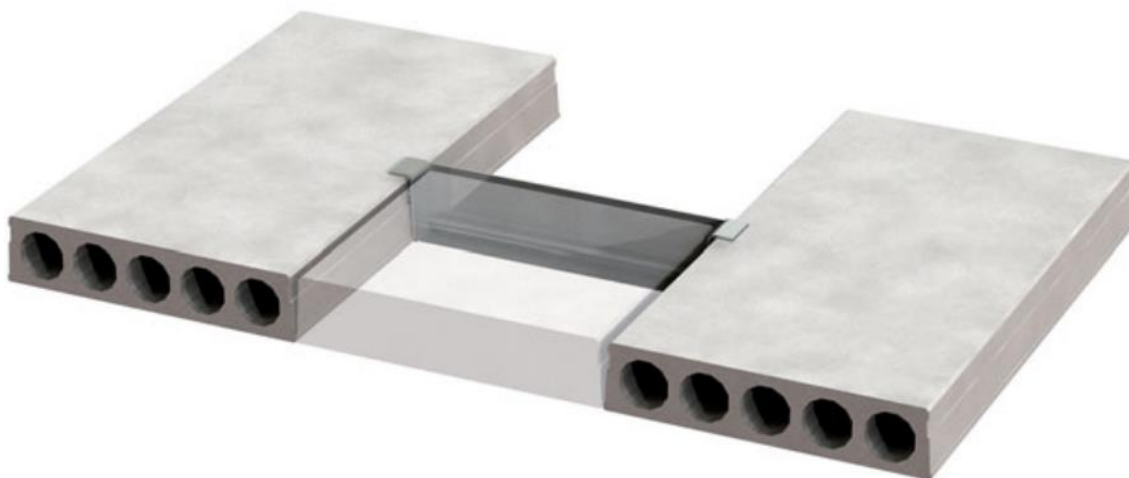
Mikäli ontelolaataston sauma- ja pintavalujen toiminta on varmistettu, voidaan katkaistun ontelolaatan kuormat siirtää viereisille laatoille standardin SFS-EN 1168 mukaan. Tällaisessa tapauksessa katkaistun laatan kuormien ajatellaan siirtyvän lyhyen laatan pitkien sivujen kautta täysin viereisille laatoille [10, Liite C.]



Kuva 17. Esimerkki aukon toteutuksesta ontelolaatan reunassa. Ontelolaattaan tehdään 300 mm levyisiä koloja 1200 mm jaolla. Koloihin asennetaan kaksi kappaletta 10 mm harjateräksiä reunaan kohdistuvien leikkausvoimien vastaanottoa varten.

Jos kuormia siirtävien valujen olemassaolosta tai toiminnasta ei ole varmuutta, tulee jälkivalupalkin kyetä kannattelemaan ontelolaatalta tulevat kuormat kokonaisuudessaan. Jälkivalupalkilta kuormat siirretään viereisille ontelolaatoille ankkuroimalla palkin teräkset onteloihin ja valamalla ontelot täyteen. Viereisten ontelolaattojen on kestettävä kannatuksen aiheuttamat leikkausrasitukset. Kannakepalkki mitoitetetaan siis kuormalle, joka on ontelolaattavälipohjarakenteen omapainon ja sen hyötykuorman suuruinen.

3.3.2 Ontelolaattakannakkeet



Kuva 18. Ontelolaattakannakkeen käyttöperiaate. [Peikko Group, Petra –tuote-esite, 06/2015]

Ontelolaatan teräspalkkituenta voidaan toteuttaa myös esi- tai konepajavalmisteisella laattakannakkeella. Suomessa esimerkiksi Peikko valmistaa tähän tarkoitukseen Petra -laattakannaketta. Laattakannakkeita valmistetaan kahta varastotyyppiä, Petra ja Petra Strong. Valinta kannaketyyppien välillä riippuu pääasiassa tuettavan ontelolaatan pituudesta ja kuormituksesta. Strong -mallia käytetään yli kuuden metrin mittaisille ontelolaatoille, normaalia kannaketta käytetään 4 – 6 metrin mittaisille laatoille. Tilanteissa, joissa kumpaakaan kahdesta varastotyyppistä ei voida käyttää, on mahdollista tilata Petra Special -kannake kohteen vaatimien mittojen mukaan [13.]



Kuva 19. Peikko Petra –laattakannake. [Peikko Group, www.peikko.fi, kuva haettu 8.1.2019]

Ontelolaattakannakkeen tehtävänä on siirtää ontelolaatan kuormaa viereisille laatoille, tukea laattaa suuren aukon kohdalla ja jäykistää laatastoa aukon kohdalla [4, s. 51]. Laattakannake asennetaan katkaistavan laatan reunasaumoihin ja aina ehjiä ontelolaattaa vasten. Kannakkeen ja laatan asennuksen jälkeen ontelolaattojen saumat valetaan umpeen. Mikäli kannaketta ei ole mahdollista asentaa ehjää laattaa vasten, avataan tukevan laatan kaksi reunimmaista onteloa ja laatan reunaan valetaan palkkirakenne.

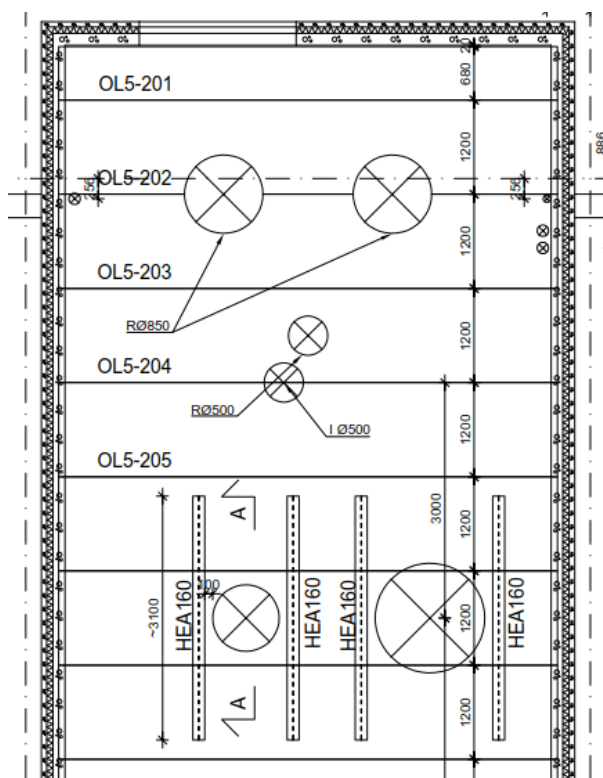
Rakennesuunnittelijan tehtävänä on varmistaa laattakannakkeen kestävyys ja soveltuvuus kyseessä olevaan kohteeseen. Esimerkiksi Peikon teknisessä käyttöohjeessa on saatavilla mitoituskäyrät kannakkeen kantavuudelle, sekä ohjeet tukevan laatan leikkaukslujuuden laskennalle. Tuentatavastaan johtuen laattakannakkeita voidaan käyttää vain kokonaisia laattoja katkaistaessa.

4 Aukotuksen toteutus

4.1 Case: K Supermarket Masi

K-Supermarket Masi on Helsingin Mellunmäessä sijaitseva liikekiinteistö. Kohteessa aukotettiin sekä ontelo- että TT-laattoja uusien LVI –läpivientien takia. Reiät pyrittiin sijoittamaan niin, että jännepunoksia ei jouduttaisi katkomaan. Reikäkierron aikana rakennesuunnittelija pyysi LVI –suunnittelijoita suosimaan pyöreitä reikiä.

Aukotettavat ontelolaatat ovat profiililtaan viisionteloisia O27 -laattoja, joiden korkeus on 265 millimetriä. Laattojen punosmäärät eivät ole tiedossa. Rakenteen omapaino on $g_{ol} = 3,8 \text{ kN/m}^2$, pintavalun omapaino $g = 0,6 \text{ kN/m}^2$ ja rakenteen hyötykuorma on $q = 1,8 \text{ kN/m}^2$. Jänneväli on 6 360 millimetriä.

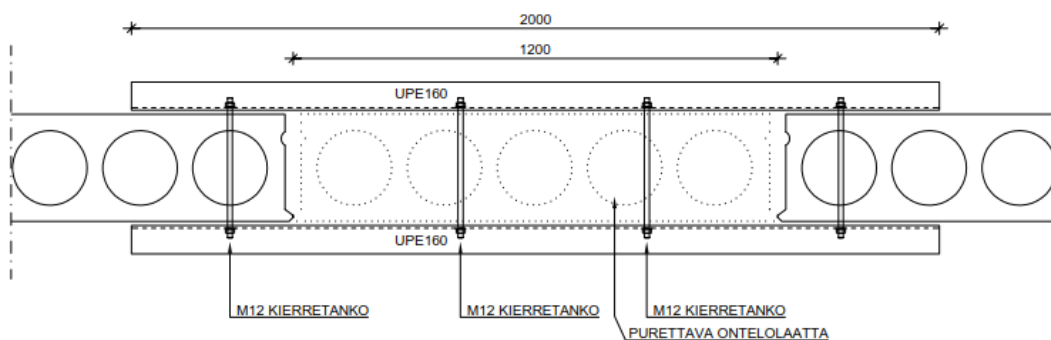


Kuva 20. Kohteen aukotettavat ontelolaatat ja niiden tuennat HEA -palkeilla. Uudet aukot ovat pyöreitä ja halkaisijaltaan 500, 850 ja 1400 millimetriä.

Kohteessa tarkastettiin reikien toteutettavuus ulkopuolisen punossuunnittelijan avulla. Ilman vahvistusta saatiin toteuttaa 850 millimetriset aukot, jotka sijaitsevat kahden laatan saumassa. Näin aukon leveys yhdellä laatalle on vain 425 millimetriä. O27 on viisioiteloinen laatta, korkeudeltaan 265 millimetriä. Betoniteollisuus ry:n ontelolaattojen suunnitteluohjeen mukaan suurin sallittu aukkoleveys laatan reunassa tällaiselle laatalle on 450 millimetriä.

Laatan keskellä sijaitsevat aukot taas ylittivät laattatyypille suurimman sallitun reiän koon, joten laattoja oli kannateltava aukkojen molemmin puolin. Halkaisijaltaan 1400 millimetrin aukko katkaisee laatan kokonaisuudessaan, jättäen kuitenkin lyhyet ulokkeet tuelta aukon suuntaan.

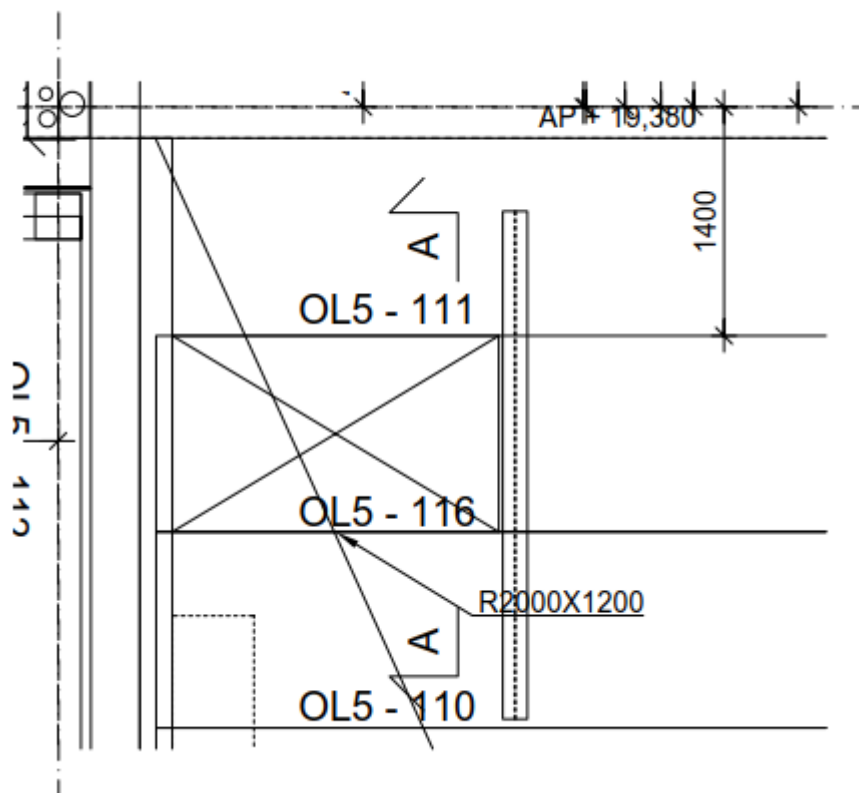
Laatan keskellä sijaitseva 850 millimetrinen aukko voidaan myös ajatella katkaisevan laatan kokonaisuudessaan. Jäljelle jäävän laattaosan kuormat tulee viedä kokonaisuudessaan ehjälle laatalle.



Kuva 21. Kuvan 21 leikkaus A-A. Katkaistu ontelolaatta on kannakoitu päästään kahdella UPE – palkilla.

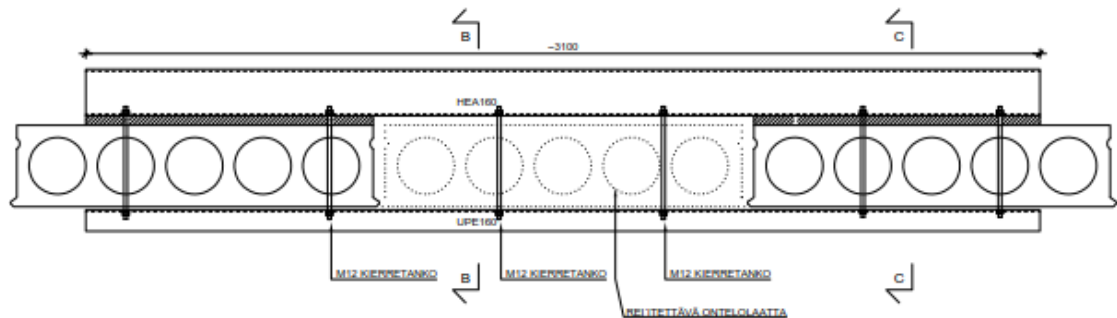
Katkaistun ontelolaatan alapuolinen UPE-palkkikannakointi on ankkuroitu kierretangoilla onteloiden läpi. Kierretangoilla tuentaa saadaan kiristettyä ja tuen taipuisuutta vähennettyä. Palkeilla tuettavan laatan viereisille laatoille aiheutuva lisäkuormitus on helppo viedä tarvittaessa kauemmaksikin laatastolle. Mikäli kannattelevien ontelolaattojen leikkauskestävyys muodostuisi määrääväksi, voitaisiin ontelolaattojen ontelot valaa umpeen.

Tällainen kannakointi, jossa tukipalkit sijoitetaan rakenteen molemmin puolin, voi olla toimiva tapauksissa jossa yläpuolisissa tiloissa lattiatason palkeista ei ole visuaalista haittaa ja jos tasolla ei liikuta. Muissa tapauksissa teräspalkkien ankkuritangot voidaan ankkuroida esimerkiksi lattateräksillä, jotka saadaan piiloon mahdollisen pintavalun sisään.



Kuva 22. Kokonaan katkaistava ontelolaatta. Tuenta on tehty HEA- ja UPE- palkeilla.

Ontelolaatta OL5 – 116:n pää on poistettu kokonaan ja jäljelle jäävä osa laatasta on kannakoitu pääpiirteittäin, kuten pyöreillä aukoilla aukotetut laatatkin. Poikkeuksena yläpinnassa käytettävä HEA –palkki UPE –palkin sijasta.

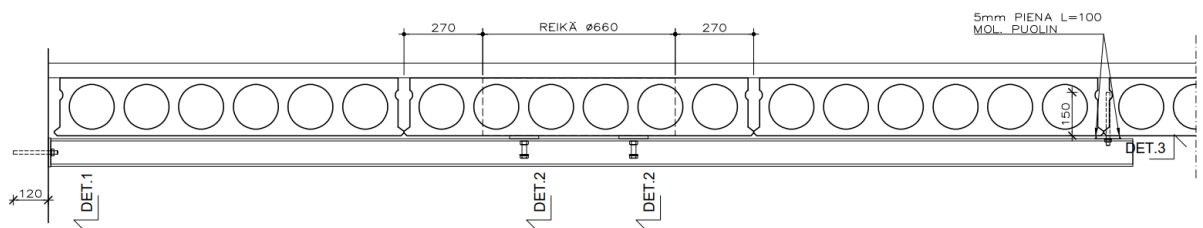


Kuva 23. Kuvan 23, leikkaus A-A.

4.2 Case Mekaanikonkatu 11

Mekaanikonkatu 11 on Helsingin Herttoniemessä sijaitseva toimitilakiinteistö. Vuonna 2012 kiinteistöön suunniteltiin LVI –muutoksia, joiden yhteydessä olemassa oleviin ontelolaattoihin suunniteltiin halkaisijaltaan 660 mm kokoista reikää uutta hormilinjaa varten. Lisäksi samassa kohteessa tehtiin kantavaan ulkoseinään uusi aukko, joka edellytti lisätuentaa ontelolaatoille.

Katkaistavan ontelolaatan kuormat jaettiin kannattelemalla ontelolaattaa kahdella HEA –palkilla viereisiltä laatoilta. Palkkien toinen pää ankuroitiin seinään, toinen pää ontelolaatan mitan päähän seuraavien laattojen saumaan.

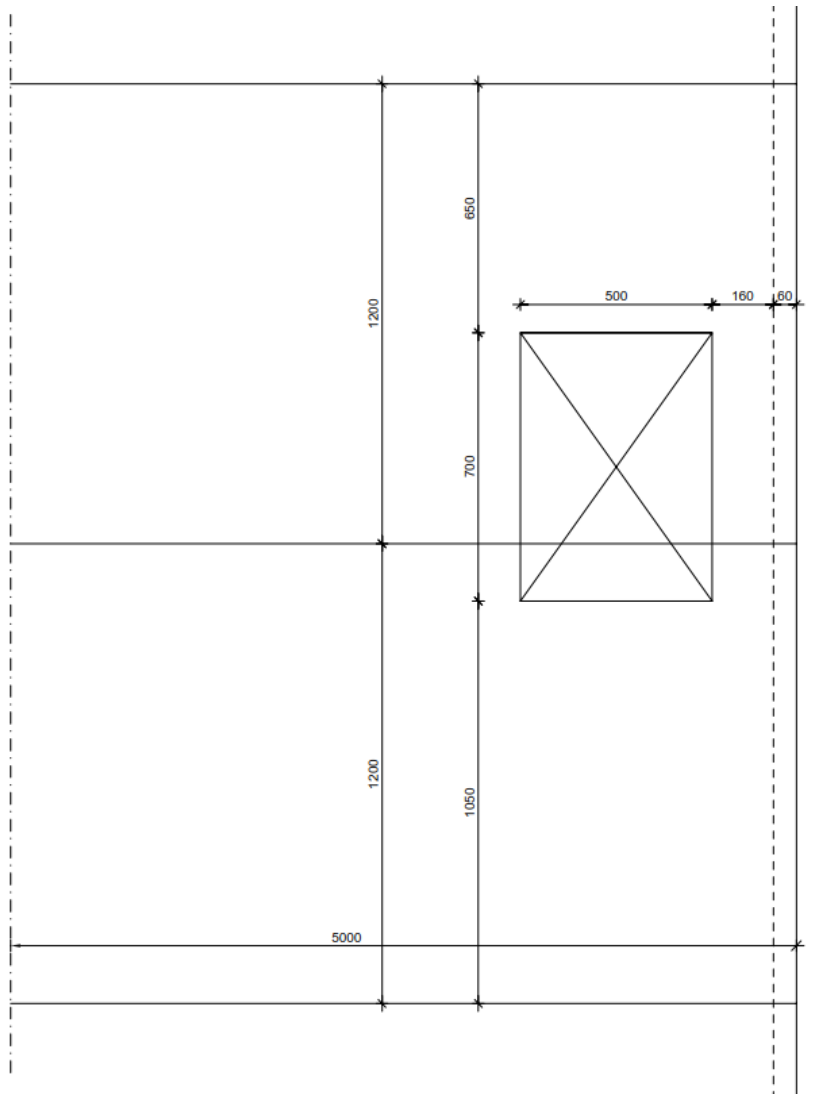


Kuva 24. Aukotettavan ontelolaatan HEA -palkki tuenta. Ontelolaatta kannateltiin aukon kahdelta sivulta kiristettävillä teräspalkeilla. Palkki on ankuroitu seinään sekä ontelolaattojen saumaan.

Toisin kuin aiemmassa casessa, nyt ylemmän kerroksen lattialla ei ole kulkua ja estetiikkaa haittaavia palkkeja. Toki alemman kerroksen katossa nämä palkit ovat näkyvillä, mutta esimerkiksi alakatto rakentamalla ne saadaan piilotettua.

4.3 Esimerkkilaskelma

Esimerkkilaskelmassa lasketaan aukotettavan ontelolaatan kantavuus, arvioidaan tuentatarve ja valitaan tuentatapa. Lisäksi tarkastellaan tuentamitoituksen tarvitsemia lähtötietoja. Esimerkkilaskelman esimerkkikohde on fiktiivinen.



Kuva 25. Esimerkkitapaus. Ontelolaatta on tyyppiä viisienteloinen, 265 millimetriä korkea laatta. Aukon mitat ovat 500 x 700 millimetriä. Rasitusluokka on X0.

Jänneväli on 5000 millimetriä ja tukipituus molemmissa päissä 60 millimetriä. Laataston hyötykuorma on 5 kN/m^2 ja laataston omapaino on $3,8 \text{ kN/m}^2$.

Murtorajatilan laskentakuormaksi saadaan 14,244 kN/m. Käyttörajatilan laskentakuorma on 10,56 kN/m. Murtorajatilan mitoittava momentti laatan jännevälin puolivälissä on 44,513 kNm. Käyttörajatilan vastaava mitoittava momentti on 33 kNm.

Nelionteloisen, 320 millimetriä korkean laatan suurin sallittu aukkoleveys laatan reunassa on 550 millimetriä. Uuden aukon leveys laattaa kohden on 550 ja 150 millimetriä. Pienemmän ehjän laattapoikkileikkauksen leveys on siis 650 millimetriä. Tarkistetaan ontelolaatan kavennetun poikkileikkauksen taivutuskestävyys, sekä ontelolaatan leikkauskestävyys aukon alueella. Ontelolaattojen saumauksesta ei ole varmuutta. Pintavalun vaikutusta ei oteta huomioon.

Ontelolaatta on punostettu viidellä 9,3 millimetrin jännepunoksella. Alkujännitys on 1000 MPa. Käytetyn betonin lujuusluokka on C40, ja käytetyn jänneteräksen lujuusluokka on 1630/1860 MPa. Jännehäviöiden suuruudeksi oletetaan 30 prosenttia.

Laskentapohja laskee ontelolaatan poikkileikkauksarvoja, kuten staattisen momentin, jäyhyysmomentin ja puristuspinnan painopisteen. Betonipoikkileikkauksen painopiste lasketaan suorakaidepoikkileikkaukselle, josta on poistettu ontelot ja jänneteräkset. Betonipoikkileikkauksesta lasketaan muunnettu poikkileikkaus jänneteräksen ja betonin kimmokertoimien suhteen avulla.

Muunnetun poikkileikkauksen painopisteen suhteen lasketaan jäyhyysmomentti. Jäyhyysmomentti lasketaan suorakaidepoikkileikkaukselle, josta vähennetään onteloiden jäyhyysmomentti.

Staattisen momentin laskentapohja laskee siivuttamalla ontelolaatan yläpinnasta painopisteakselille asti millimetrin korkuisiin siivuihin. Siivuille lasketaan puristuspinnan leveys, joka on ontelolaatan leveys pienennettynä onteloiden leveydellä siivun korkeudella.

Puristuspinnan painopiste lasketaan siivujen positiivisten voimaresultanttien painopisteeksi. Laskentapohja laskee betonin puristumaa näille millimetrin korkuisille siivuille. Puristuman avulla lasketaan jännitys, josta saadaan voimaresultantti kertomalla jännitys pinta-alalla.

Kun kaksi punosta katkaistaan, laskentapohja antaa pienennetyn poikkileikkauksen murtorajatilan taivutuskestävyydeksi 52,384 kNm. Tällöin kavennetun poikkileikkauksen käyttöasteeksi tulee 85 prosenttia. Todetaan, että ontelolaatta kestää taivutuskuormat lisävahvistamattomana. Rakennesuunnittelijan on kuitenkin varmistuttava, että kuormat siirtyvät aukotetulta poikkileikkaukselta ehjälle. Aukon reunoihin valetaan jälkivalupalkit kuorman siirtoa varten.

Leikkauskestävyyden arvoksi poikkileikkauksessa saadaan 68,705 kN. Poikkileikkauksen mitoittava leikkauskuorma sijaitsee puolen laatan korkeuden etäisyydellä tuelta ja on suuruudeltaan 32,87 kN. Käyttöasteeksi tulee tällöin 47,8 prosenttia. Todetaan, että laatta kestää leikkauskuormat vahvistamattomana.

Käyttörajatilan määrääväksi taivutuskestävyydeksi saadaan alapinnan jännitysrajoitusten mukaan 39,22 kNm. Käyttörajatilan mitoittava taivutusmomentti on 33 kNm. Käyttöasteeksi tulee 84 prosenttia. Laatta kestää käyttörajatilan kuormituksen ja laatan alapinnan reunajännitys ei ylitä arvoa f_{ctm} .

Taipuman suuruus, kun hyötykuormien pitkäaikaisosuudeksi oletetaan 20 prosenttia on 7,25 millimetriä. 5 metrin jännevälillä sallittu taipuman arvo on 20 millimetriä. Taipumarajaa ei siis ylitetä.

5 Yhteenveto

Opinnäytetyön aikana huomattiin, että ontelolaattojen aukottamiseen on saatavilla hyvin niukasti ohjeita. Löytyneet kotimaiset ohjeet koskivat pääosin uudisrakentamista, ja jo elementtitehtaalla tapahtuvaa aukottamista. Korjausrakentamisessa tapahtuvaan aukotukseen ei löydetty kotimaisia ohjeita lainkaan. Ei siis yllätä, että aukotuksia on aiemmin tehty suunnittelijasta riippuen eri tavoin.

Peruseriaate tilaajan aiemmissa toimintatavoissa on kuitenkin ollut melko samankaltainen – tarkastetaan aukon toteutuskelpoisuus ulkopuolisella suunnittelijalla ja tarvittaessa tuetaan teräspalkkein. Betonisia jälkivalupalkkeja ei tilaaja ollut käyttänyt lähimenneisyydessä. Ontelolaattojen kapasiteettia ei oltu erikseen tarkastettu ja tuenta tavat oli tehty niin järeiksi, että ne olivat varmasti riittäviä.

Muiden suunnittelutoimistojen toimintatapoihin ei luonnollisesti päästy käsiksi, joten tietolähteinä käytettiin kokeneempien suunnittelijoiden tietotaitoa, sekä pääosin ulkomaista ohjeistusta. Ontelolaattojen aukottamista on alettu tarkemmin tutkimaan uudelleen vasta viime vuosien aikana. Tutkimuksissa on kuitenkin käsitelty lähinnä aukkojen vaikutusta laatan kantavuuteen, eikä erilaisia vahvistustapoja ole juurikaan annettu. Poikkeuksena on erilaisten hiilikuitupolymeerien tutkiminen aukon kapasiteetin palauttamisessa. Hiilikuitupolymeereillä voidaan kasvattaa sekä ontelolaatan taivutus- että leikkauskapasiteettia.

Opinnäytetyö ajautui paikoin enemmän ontelolaatan mitoitusperiaatteiden tutkimiseen kuin aukotustapojen selvittämiseen. Toisaalta, rakennesuunnittelijan on tiedettävä, miten rakenne toimii, ennen kuin sen toimintatapaa voidaan muuttaa. Aukottamiseen liittyvän, saatavilla olevan tiedon vähäisen määrän takia pieniä tiedon murusia hankittiin milloin mistäkin. Yhdysvaltalaisen betonijärjestön sivustoilta saatiin kuitenkin tärkeää tietoa aukkojen todellisista vaikutuksista.

Työn tuloksena syntynyt suunnitteluohje pyrittiin tekemään selkeäksi ja helppokäyttöiseksi. Ohjeesta tulisi ilmetä yksiselitteisesti, milloin ontelolaattaa voidaan katkaista osittain ja milloin ontelolaatta on katkaistava kokonaan. Koska parempaa tietoa ei ollut

saatavilla, rajat aukkojen kokojen luokittelussa vedettiin uudiskohteiden ohjeiden mukaan. Elementtitehtailla ontelolaatat katkaistaan sahaamalla ja mikäli korjauskohteissa katkaisu tehdään kuten tehtaalla, tulisi katkaisun vaikutuksen olla samankaltainen kuin tehdasvalmisteisessa aukossa.

Valmistunut laskentapohja pyrittiin tekemään mahdollisimman nopeakäyttöiseksi. Ongelmaksi kuitenkin muodostui ontelolaatan poikkileikkauspinnan muodon aiheuttamat erityispiirteet.

Opiskelijalle kaikki työn aikana hankittu tieto oli tärkeää. Jännittämisen teoria oli täysin uutta ja asian sisäistäminen vaati aikansa. Erilaisiin oppaisiin ja ohjeisiin tutustumalla saatiin peruskäsitys jännittämisen toimintaperiaatteesta. Haasteita toi etenkin erilaisten poikkileikkaussuureiden oikeanlainen käyttö ja suureiden ratkaiseminen matemaattisesti. Laskentapohjan luomisessa tuli ongelmia näiden poikkileikkaussuureiden laskemisen automatisoinnissa.

Tulevaisuudessa etenkin laskentapohjaa voidaan kehittää tuomalla siihen mahdollisuus lisätä pistekuormia. Myös halkeilun, viiva- ja pistekuormakestävyiden sekä ontelon täytön leikkauskestävyyden laskenta voidaan tuoda laskentapohjaan.

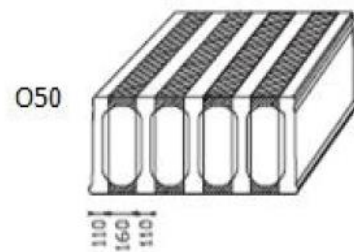
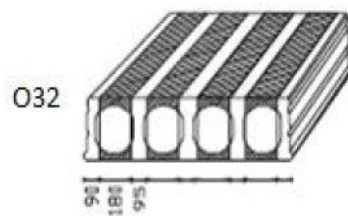
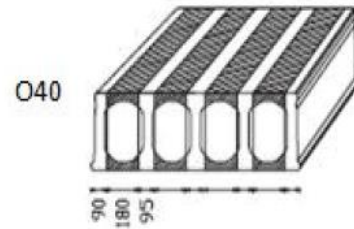
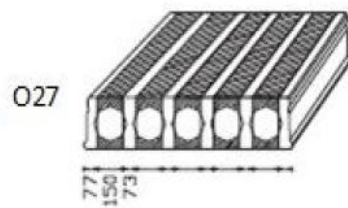
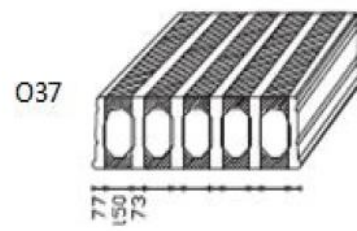
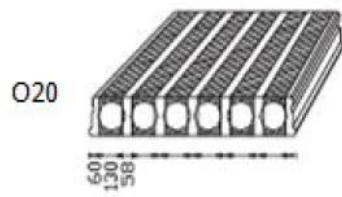
Lähteet

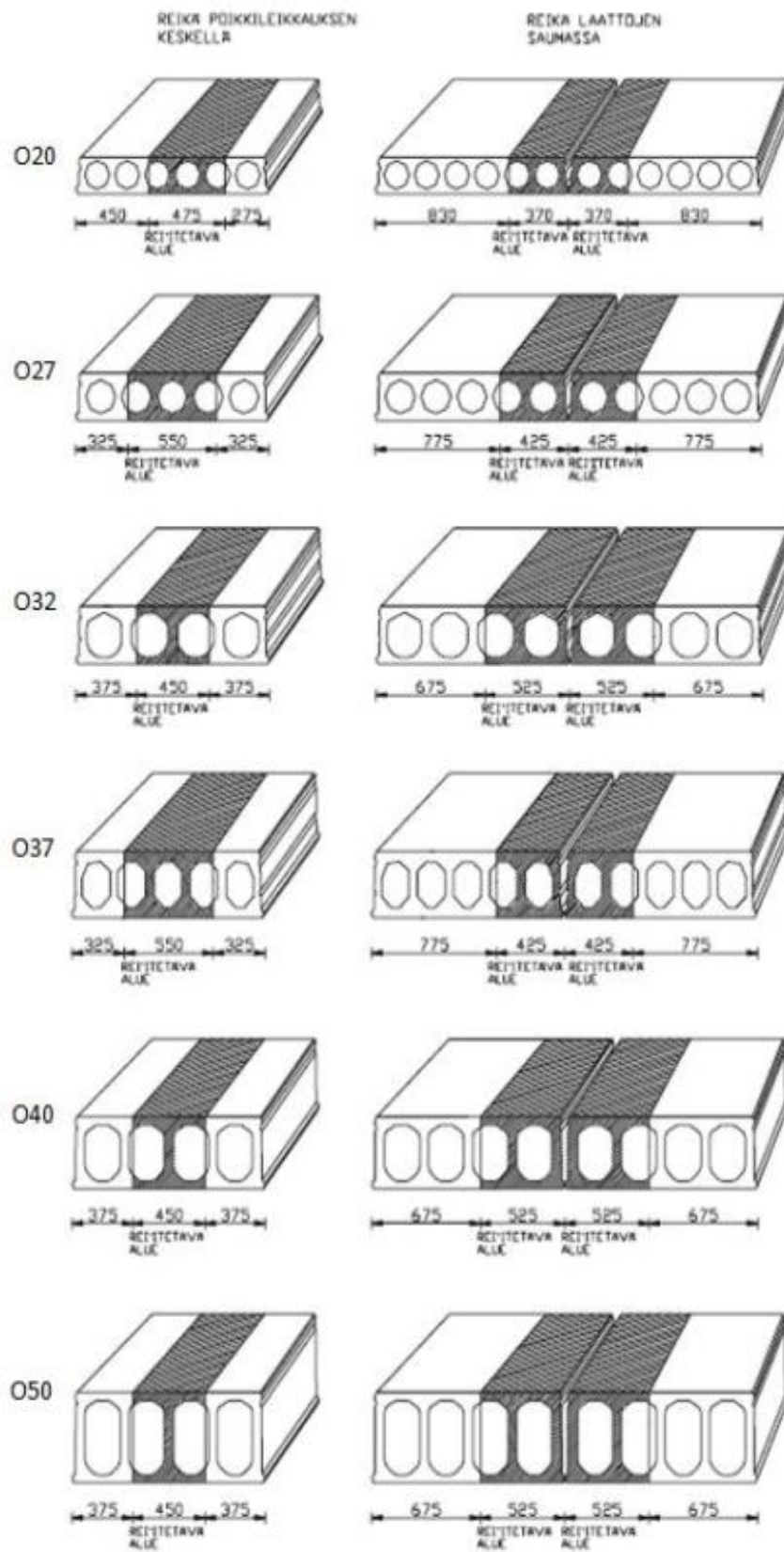
- 1 Rakennesuunnittelijan haastattelu
- 2 Elementtisuunnittelu –verkkosivut, www.elementtisuunnittelu.fi, vierailtu 18.04.2019
- 3 Canadian Precast/Prestressed Concrete Institute, CPCI Design Manual 5th Edition, 2017
- 4 Betoniteollisuus ry, Ontelolaataston suunnitteluohje, 21.05.2012
- 5 Parma Oy, Parman ontelolaatastot Suunnitteluohje, joulukuu 2018
- 6 National Council of Structural Engineers Associations, Structure Magazine, April 2013, sivut 14-16
- 7 Precast Concrete Institute: PCI Journal/September-October 1972, Load Distribution Test on Precast Hollow Core Slabs with Openings, sivut 9-19
- 8 Precast Concrete Institute: PCI Manual for the Design of Hollow-core slabs and walls, Electronic Version, 2015
- 9 American Concrete Institute: ACI Structural Journal March/April 2017, Experimental Evaluation on Effect of Openings on Behavior of Prestressed Precast Hollow Core Slabs, sivut 427-436
- 10 Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 1168 + A3 Betonivalmisosat. Ontelolaatat, Rakennustuoteteollisuus RTT ry, 2012
- 11 Elliott Kim S., Multi-Storey Precast Concrete Framed Structures, Hoboken Wiley 2013
- 12 Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Rakennustuoteteollisuus RTT ry, 2015
- 13 Peikko oy, Tekninen käyttöohje, PETRA –laattakannake, 2015
- 14 Elementtisuunnittelu.fi, Jännitettyjen ontelolaattojen CE-merkinnän mukainen suunnittelu Eurokoodin mukaan

- 15 Elementtisuunnittelu.fi, Heikkinen Tommi, Ontelolaattojen suunnittelu, ohjelehtinen
- 16 Precast/Prestressed Concrete Institute: PCI Journal March/April 1992, Behavior of Hollow-Core Slabs Subject to Edge Loads, sivut 72-84
- 17 Elementtisuunnittelu.fi, Ontelolaatastojen suunnittelun pikaohje
- 18 Precast/Prestressed Concrete Institute: PCI Journal November/December 1971, Load Distribution Tests on Precast Prestressed Hollow-Core Slab Construction, sivut 10-18
- 19 Association of Manufacturers of Prestressed Hollow Core Floors, The Hollow Core Floor Design and Applications, Offset Printa Veneta 2002
- 20 Precast/Prestressed Concrete Institute: PCI Journal July/August 2017, Strengthening of prestressed hollow-core slab openings using near-surface-mounted carbon-fiber-reinforced polymer reinforcement, sivut 45-57
- 21 Betoniteollisuus ry, Runkorakenteet –ohjelehti, verkkojulkaisu, 10.03.2010
- 22 Precast/Prestressed Concrete Institute: PCI Journal July/August 2018, Load resistance and failure modes of hollow-core slabs with openings: A finite element analysis, sivut 25-40
- 23 Ansion Sementtivalimo Oy, Ontelolaattojen suunnittelu ohje, verkkojulkaisu, 2012
- 24 Suomen Standardisoimisliitto, SFS-EN 7016 Esijännitetyiltä ontelolaatoilta eri käyttökohteissa vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot, Rakennustuoteteollisuus RTT ry, 2008
- 25 Suomen Betonitieto Oy, BY210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005, Helsinki 2006
- 26 Klingendahl Paino Oy, Salmi, Lujuusoppi, Tampere 2010

Liite 1. Suunnitteluohje

Ontelolaatan aukotusohje korjaushankkeisiin	
Aukon halkaisija korkeintaan ontelon leveys	Aukon halkaisija yli ontelon leveys
↓	↓
Korkeintaan n aukkoa poikkileikkauksessa / 2500 mm 2 aukkoa (4- onteloiset) 3 aukkoa (5- ja 6-onteloiset)	Suurin sallittu aukkoleveys
↓	4-onteloiset laatat
↓	Laatan reunassa: 550 mm Laatan keskellä: 450 mm
↓	5-onteloiset laatat
↓	Laatan reunassa: 450 mm, < 400mm korkeilla laatoilla, muutoin 425 mm Laatan keskellä: 550 mm
↓	6-onteloiset laatat
↓	Laatan reunassa: 380 mm Laatan keskellä: 500 mm
↓	Aukko kahdessa laatassa
↓	Suurin sallittu aukkoleveys 800 mm kahden laatan saumassa
↓	↓
Tarkasta pienennetyn poikkileikkauksen kestävyys Koko laatan kuormitus pienennetylle poikkileikkaukselle Aukon reuna uuman reunaan asti	
↓	↓
Kestää	Ei Kestä
↓	↓
Varmista kuormien siirtyminen Jos ei muutoin varmuutta, esimerkiksi jalkivalupalkki, teräspalkki. Mitoitus koko aukkoleveyden kuormille	Koko laatan katkaisu ja kannakointi





Liite 2. Esimerkkilaskelma

Ontelolaatan betonilujuus:	<input type="text" value="C40"/>	<input type="text" value="C50"/>
Ontelolaatan geometriatiedot:		
laatan leveys, b_{ol} :	<input type="text" value="630"/>	
laatan korkeus, h_{ol} :	<input type="text" value="265"/>	
ontelon korkeus, h_{void} :	<input type="text" value="185"/>	
ontelon leveys, b_{void} :	<input type="text" value="185"/>	
laippojen paksuus, t_f :	$t_f = 40 \text{ mm}$	
uuman leveys, $b_{w,d}$:	<input type="text" value="39.167"/>	
ehjen onteloiden määrä n_{void} :	<input type="text" value="3"/>	
suojabetonipaksuus, c_c :	<input type="text" value="40"/>	
katkaistavan laatan pituus, $L_{ol,cut}$:	<input type="text" value="5000"/>	
Onteloiden yhteenlaskettu pinta-ala A_{void} :	$A_{void} = 80640.756 \text{ mm}^2$	
Katkaistun laatan betonipinta-ala, A_c :	$A_c = 86309.244 \text{ mm}^2$	
Jännepunosten halkaisija:	<input type="text" value="9.3"/>	
Jännepunosten määrä:	<input type="text" value="3"/>	
Jännepunosten lujuusluokka:	<input type="text" value="1630"/>	/ <input type="text" value="1860"/>
Alkujännitys:	<input type="text" value="1000"/>	
Jännehäviöiden oletettu suuruus:	<input type="text" value="30"/>	

Osavarmuusluvut (EN 1992-1-1 + NA, EN 1068):

Valubetoni:	$\gamma_c = 1.5$
Ontelolaattabetoni:	$\gamma_{c,ol} = 1.35$
Jänneteräs:	$\gamma_s = 1.1$

Ontelolaatan betonin materiaalitiedot
(EN 1992-1-1):

Ominaislieriöpuristuslujuus f_{ck} :	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$
Suunnittelupuristuslujuus f_{cd} :	$f_{cd} = 25.185 \text{ MPa}$
Keskimääräinen lieriöpuristuslujuus f_{cm} :	$f_{cm} = 3.5 \text{ MPa}$
Keskimääräinen vetolujuus f_{ctm} :	$f_{ctm} = 2.5 \text{ MPa}$
0.05% fraktiilin vetolujuus $f_{ctk,0.05}$:	$f_{ctk,0.05} = 3.5 \text{ MPa}$
Suunnitteluvetolujuus f_{ctd} :	$f_{ctd} = 2.593 \text{ MPa}$
Keskimääräinen kimmomoduuli E_{cm} :	$E_{cm} = 35 \text{ GPa}$
Betonin paino:	$g_c = 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$
Jänneterästen materiaalitiedot	
Jänneterästen kimmomoduuli E_s :	$E_s = 195 \text{ GPa}$
Myötövetolujuuden ominaisarvo f_{pk} :	$f_{pk} = 1630 \text{ MPa}$
Myötövetolujuuden 0,1 -raja $f_{p0.1k}$:	$f_{p0.1k} = 1860 \text{ MPa}$
Myötövetolujuuden mitoitusarvo f_{pd} :	$f_{pd} := \frac{f_{p0.1k}}{\gamma_s} = 1690.909 \text{ MPa}$

Kuormat:

Ontelolaatan omapaino g_{ol} :

3.8

Määrävä tasainen kuorma ontelolaatalle:

5

Tasainen kuorma 2 ontelolaatalle:

0

Tasainen kuorma 2 yhdistelykerroin:

0

Tasainen kuorma 3 ontelolaatalle:

0

Tasaisen kuorman 3 yhdistelykerroin:

0

Ontelolaatan leveys ennen aukotusta:

1200

Tukileveys:

60

Yhteenlaskettu MRT -kuorma:

$$p_d := (1.15 \cdot g_{ol} + 1.5 \cdot q + 1.5 \cdot \psi_{q2} \cdot q_2 + 1.5 \cdot \psi_{q3} \cdot q_3) \cdot b_k = 14.244 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Yhteenlaskettu KRT -kuorma:

$$p_{d,KRT} := (g_{ol} + q + \psi_{q2} \cdot q_2 + \psi_{q3} \cdot q_3) \cdot b_k = 10.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Mitoittava momentti tasaisista kuormista:

$$M_{Ed,MRT} := \frac{p_d \cdot l_{ol}^2}{8} = 44.513 \cdot \text{kNm}$$

Mitoittava leikkausvoima tasaisista kuormista:

$$V_{Ed} := \frac{p_d \cdot l_{ol}}{2} - p_d \left(t + \frac{h_{ol}}{2} \right) = 32.868 \cdot \text{kN}$$

Mitoittava käyttörajatilan momentti tasaisista kuormista:

$$M_{Ed,KRT} := \frac{p_{d,KRT} \cdot l_{ol}^2}{8} = 33 \cdot \text{kNm}$$

**Murtorajatilan
taivutuskestävyys:**

**Murtorajatilan sallittu
kokonaiskuorma (sis. omapaino):**

Jänneteräksen nimellispinta-ala $A_{s,ol}$:	$A_s = 52 \cdot \text{mm}^2$
Poikkileikkauksen tehollinen korkeus:	$d_{ol} = \dots \text{mm}$
Jänneterästen jännevoima myödetessä:	$f_{pd,ol} := \eta_p \cdot A_s \cdot f_{pd} = 263.782 \cdot \text{kN}$
Betonin murtopuristuma:	$\epsilon_{cu} = 3.5 \cdot 10^{-3}$
Jänneteräksen myötövenymä:	$\epsilon_p = 8.671 \cdot 10^{-3}$
Puristusresultantin etäisyys yläpinnasta, x_{pp} :	$x_{pp} = 21.761 \cdot \text{mm}$
Sisäinen momenttivarsi, Z:	$Z := d_{ol} - x_{pp} = 198.589 \cdot \text{mm}$
Momenttikestävyys:	$M_{Rd,MRT} := f_{pd,ol} \cdot Z = 52.384 \cdot \text{kNm}$
Mitoittava momentti tasaisista kuormista:	$M_{Ed,MRT} = 44.513 \cdot \text{kNm}$
Käyttöaste:	$\frac{M_{Ed,MRT}}{M_{Rd,MRT}} = 84.973 \cdot \%$

Leikkauskestävyys:

EN 1168, yksinkertaistettu kaava

Pienennyskerroin φ :

$$\varphi_{VRd,c} := 0.8$$

Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti I :

$$I = 816.063 \cdot \text{mm}^4 \cdot 10^6$$

Kriittisen poikkileikkauksen leveys:

$$b_w := (n_{\text{void}} + 1) \cdot b_{w,ol} = 156.668 \cdot \text{mm}$$

Staatinen momentti painopisteakselin suhteen:

$$S_i = 4.012 \cdot \text{mm}^3 \cdot 10^6$$

Betonin vetolujuus, f_{ctd} :

$$f_{ctd} = 2.593 \cdot \text{MPa}$$

Pienennyskerroin β :

$$\beta_{VRd,c} := 0.9$$

Jännevoiman siirtymisasteen laskenta:

$$\eta_{p1}, \eta_1, \beta_{cc,t}$$

$$\eta_{p1} := 3.2 \quad \eta_1 := 0.7 \quad \beta_{cc,t} := 1$$

Vetolujuuden mitoitusarvo jännevoiman siirtohetkellä $f_{ctd(t)}$:

$$f_{ctm,t} := \beta_{cc,t}^{\frac{2}{3}} \cdot f_{ctm} = 1.411 \cdot \text{MPa}$$

Tartuntajännitys f_{bpt} :

$$f_{bpt} := \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot \left(0.7 \cdot \frac{f_{ctm,t}}{\gamma_{c,ol}} \right) = 1.639 \cdot \text{MPa}$$

Jänneteräksen jännitys:

$$\sigma_{pm0} := 0.7 f_{pk} = 1141 \cdot \text{MPa}$$

Poikkileikkauksen etäisyys jännevoiman siirtymisen alkukohdasta l_x :

$$l_x := t + \frac{y_{0,i}}{\tan(35)} = 338.796 \cdot \text{mm}$$

α_1, α_2 :

$$\alpha_1 := 1.25 \quad \alpha_2 := 0.19$$

Siirtymäpituuden mitoitusarvo $l_{pt,2}$:

$$l_{pt,2} := 1.2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot (d_p) \cdot \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}} = 1845.715 \cdot \text{mm}$$

Jännevoiman siirtymisaste α_i :

$$\alpha_i := \min \left(1, \frac{l_x}{l_{pt,2}} \right) = 0.184$$

Jänneterästen lopullinen jännevoima:

$$f_p := (1 - p_l) \cdot p_0 = 700 \cdot \text{MPa}$$

Poikkileikkauksen lopullinen jännevoima:

$$P_{p0} := f_p \cdot n_p \cdot A_s = 109.2 \cdot \text{kN}$$

Betonin täysi puristusjännitys painopisteaksella σ_{cp} :

$$\sigma_{cp} := \min \left(0.2 \cdot f_{cd}, \frac{P_{p0}}{A_c - n_p \cdot A_s} \right) = 1.268 \cdot \text{MPa}$$

Ontelolaatan leikkauskestävyys:

$$V_{Rd,c} := \varphi_{VRd,c} \cdot \frac{l_i \cdot b_w}{S_i} \cdot \sqrt{f_{ctd}^2 + \beta_{VRd,c} \cdot \alpha_1 \cdot \sigma_{cp} \cdot f_{ctd}} = 68.705 \cdot \text{kN}$$

Leikkauskuorman mitoitusarvo tasaisista kuormista:

$$V_{Ed} = 32.868 \cdot \text{kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd,c}} = 47.839 \cdot \%$$

Käyttörajan kuormituskestävyys:

Jänneterästen lopullinen jännevoima:

$$f_{pA} := (1 - \rho_1) \cdot p_0 = 700 \text{ MPa}$$

Alareunan jännitysten rajoitus:

$$\sigma_{\text{sall.b}} := f_{\text{ctm}} = 2.5 \text{ MPa}$$

Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti:

$$I_i = 816.063 \cdot \text{mm}^4 \cdot 10^6$$

Poikkileikkauksen
taivutusvastus alapinnan suhteen:

$$W_{b,i} := \frac{I_i}{y_{b,i}} = 6.178 \cdot \text{mm}^3 \cdot 10^6$$

Poikkileikkauksen
taivutusvastus yläpinnan suhteen:

$$W_{t,i} := \frac{I_i}{y_{t,i}} = 6.14 \cdot \text{mm}^3 \cdot 10^6$$

Alareunan etäisyys neutraaliakselista:

$$y_0 = 132.464 \text{ mm}$$

Yläreunan etäisyys neutraaliakselista:

$$y_t := h_{o1} - y_0 = 132.536 \text{ mm}$$

Suojabetonipaksuus:

$$c_c = 40 \text{ mm}$$

Jännevoiman epäkeskisyyden e_p :

$$e_p := y_{b,i} - \left(c_c + \frac{d_p}{2} \right) = 87.448 \text{ mm}$$

Poikkileikkauksen lopullinen
jännevoima:

$$P_{p0} := f_p \cdot n_p \cdot A_s = 109.2 \text{ kN}$$

Alapinnassa vaikuttavan jännevoiman
aiheuttama jännitys:

$$f_{bc} := \frac{P_{p0}}{(A_c - n_p \cdot A_s)} + \frac{P_{p0} \cdot e_p}{I_c} \cdot y_0 = 2.84 \text{ MPa}$$

Yläpinnassa vaikuttavan jännevoiman
aiheuttama jännitys:

$$f_{tc} := \frac{P_{p0}}{(A_c - n_p \cdot A_s)} - \frac{P_{p0} \cdot e_p}{I_c} \cdot y_t = -0.306 \text{ MPa}$$

Momenttikestävyys alapinnan
jännitysten mukaan:

$$M_{sr,b} := \left[\frac{f_{bc}}{\text{MPa}} + 0.3 \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \cdot \text{MPa} \cdot W_{b,i} = 39.22 \text{ kNm}$$

Momenttikestävyys yläpinnan
jännitysten mukaan:

$$M_{sr,t} := (f_{tc} + 0.45 \cdot f_{ck}) \cdot W_{t,i} = 108.649 \text{ kNm}$$

Määrävä ehjän poikkileikkauksen
momenttikestävyys:

$$M_{Rd,KRT} := \min(M_{sr,b}, M_{sr,t}) = 39.22 \text{ kNm}$$

KRT-mitoittava momentti tasaisista
kuormista:

$$M_{Ed,KRT} = 33 \text{ kNm}$$

Käyttöaste:

$$\frac{M_{Ed,KRT}}{M_{Rd,KRT}} = 84.141\%$$

Taipuma

Virumakerroin φ_1 :	<input type="text" value="2"/>
Virumakerroin φ_{28} :	<input type="text" value="1.5"/>
Virumakerroin φ_{inf} :	<input type="text" value="2"/>
Rakenteen omapaino kN/m ² :	$g_{ol,k} := g_{ol} \cdot b_k = 4.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Tasainen kuorma kN/m ² :	$p_{d,KRT} = 10.56 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$
Tasaisen kuorman pitkäaikainen osuus %:	<input type="text" value="20"/>
Kimmokerroin 1 päivän iässä E_{cm} :	$E_{cm} = 35000 \text{ MPa}$
Kimmokerroin 28 päivän iässä E_{c28} :	$E_{c28} := 1.05 \cdot E_{cm} = 36750 \text{ MPa}$
Kimmokerroin > 28 päivän iässä E_{cin} :	$E_{cin} := \frac{E_{c28}}{1 + \varphi_{inf}} = 12250 \text{ MPa}$
Esikorotus:	$\delta_0 := \frac{P_{p0} \cdot (d_{ol} - y_{t,i}) \cdot l_{ol}^2}{8 E_{cm} \cdot I_i} = 1.041 \text{ mm}$
Taipuma rakenteen omapainosta:	$\delta_1 := \frac{5 \cdot g_{ol,k} \cdot l_{ol}^4}{384 \cdot E_{cin} \cdot I_i} = 3.712 \text{ mm}$
Taipuma lyhytaikaisista kuormista:	$\delta_2 := \frac{5 \cdot p_{d,KRT} \cdot l_{ol}^4}{384 \cdot E_{c28} \cdot I_i} = 2.866 \text{ mm}$
Taipuma pitkäaikaisista kuormista:	$\delta_3 := \frac{5 \cdot (q_{in} \cdot p_{d,KRT}) \cdot l_{ol}^4}{384 \cdot E_{cin} \cdot I_i} = 1.719 \text{ mm}$
Lopullinen taipuma:	<input type="text" value="δ<sub>fin</sub> := -δ<sub>0</sub> + δ<sub>1</sub> + δ<sub>2</sub> + δ<sub>3</sub> = 7.255 mm"/>
Sallittu taipuma:	$\delta_{sall} := \frac{l_{ol}}{250} = 20 \text{ mm}$

$\delta_{fin} < \delta_{sall} = 1$
