



Karelia-ammattikorkeakoulu

Rakennustekniikan koulutusohjelma, insinööri (AMK)

Jälkijännitettyjen betonirakenteiden minimiraudoituksen normivertailu

Jyri Pesonen

Opinnäytetyö, kesäkuu 2022

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2022
Rakennustekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä
Jyri Pesonen

Nimeke
Jälkijännitettyjen betonirakenteiden minimiraudoituksen normivertailu

Toimeksiantaja
Sweco Rakennetekniikka Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tarkasteltiin eri standardien määräyksiä jälkijännitettyjen betonirakenteiden minimiraudoituksen laskennalle. Tarkasteltavia standardeja olivat Suomessa käytössä olevan Eurokoodi 2 lisäksi American Concrete Institute, British Standards Institution sekä Standards Australia organisaatioiden standardit. Tavoitteena oli selvittää millä perusteilla Eurokoodin mukaista minimiraudoitusta voitaisiin vähentää. Teräksen valmistus tuottaa paljon hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi teräksen markkinahinta on noussut ennätystasolle, joten raudoitusta vähentämällä saavutettaisiin säästöjä kustannuksissa sekä pienennettäisiin hiilidioksidipäästöjä. Työ tehtiin toimeksiantona Sweco Rakennetekniikka Oy:lle.

Standardien laskentatapojen yhtäläisyyksiä sekä eroja vertailtiin. Yhteen suuntaan kantavien laattojen tapauksessa vertailu toteutettiin myös laskennallisesti. Kuvitteellisena vertailukohteenä laskennassa oli pihakansi, jonka mitat valittiin tyypillisen pysäköintihallin mittojen mukaan.

Eroja standardeista löytyi, mutta vertailukohteen tapauksessa niistä ei ollut hyötyä minimiraudoituksen vähentämisessä. Eurokoodi 2 laskentatapa yhteen suuntaan kantavilla laatoilla salli pienimmän raudoitusmäärän. Ristiin kantavien laattojen tapauksessa minimiraudoituksen pois jättäminen soveltuvin ehdoin mahdollistettiin American Concrete Instituten standardissa.

Jatkotutkimusaiheena voitaisiin tutkia kuitubetonin käyttöä jännitetyissä rakenteissa. Onko terästankoja mahdollista korvata teräskuiduilla niin, että terästä kuluisi vähemmän?

Kieli
suomi

Sivuja 38
Liitteet 1
Liitesivumäärä 8

Asiasanat
betonirakenteet, teräsbetoni, raudoitus



THESIS
June 2022
Degree Programme in Construction Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Jyri Pesonen

Title
Comparison of Minimum Reinforcement in Post-tensioned Concrete Structures by Different Standards
Commissioned by
Sweco Rakennetekniikka Oy

Abstract

In this thesis different standards were studied. The main goal was to find out how the minimum reinforcement of post-tensioned concrete structures according to Eurocode 2 could be reduced. The standards that were examined were published by American Concrete Institute, British Standards Institution and Standards Australia. Steel manufacture produces considerable number of carbon-dioxide emissions. Furthermore, steel price has increased in recent years. Reducing steel usage would save money and nature.

Differences and similarities between standards were searched for. Comparison on one-way reinforced slabs were made using a calculation example. Yard deck sized of a typical parking structure was selected as the reference object of comparison.

Differences between standards were found. Unfortunately, in the case of the reference object they were not useful. The Eurocode 2 calculations allowed for the minimum amount of reinforcement. For two-way reinforced slabs, the American Concrete Institute standard allowed to reduce minimum reinforcement under certain conditions.

The follow-up research could be made regarding the use of fibrous concrete. Is there a possibility to replace steel bars by steel or other fibers?

Language
Finnish

Pages 38
Appendices 1
Pages of Appendices 8

Keywords
concrete structures, reinforced concrete, reinforcing

Sisältö

Lyhenteet	5
1 Johdanto	7
2 Jännitetyt betonirakenteet.....	8
2.1 Historia	8
2.2 Miksi rakenteita jännitetään	8
2.3 Jännitettyjen rakenteiden toimintaperiaatteet	9
2.3.1 Esijännittäminen	9
2.3.2 Jälkijännittäminen	10
2.4 Materiaalit ja tarvikkeet	14
2.4.1 Betoni	14
2.4.2 Betoni- ja jänneteräkset	14
2.4.3 Suojaputket ja injektointi	16
2.5 Käyttökohteet Suomessa	16
2.6 Mittasuositukset	19
3 Minimiraudoituksen laskentaperusteet.....	20
3.1 Miksi minimiraudoitus tarvitaan.....	20
3.2 Eurokoodi 2 Suomen kansallisen liitteen mukaisilla arvoilla	21
3.3 ACI-ohjeet.....	23
3.4 British Standards	25
3.5 Standards Australia	26
4 Vertailu.....	31
4.1 Standardien erot ja yhtäläisyydet.....	31
4.2 Laskennassa käytettävä vertailukohde	32
5 Tulokset	33
6 Pohdinta.....	34
6.1 Oma oppiminen	34
6.2 Opinnäytetyön hyödynnettävyys	34
6.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet.....	35

Liitteet

Liite 1	Minimiraudoituksen laskenta esimerkikohteessa
---------	---

Lyhenteet

Eurokoodi

$A_{s,min}$	Vähimmäisraudoituksen poikkileikkausala
b_t	Vetopuolen keskimääräinen leveys
d	Poikkileikkauksen tehollinen korkeus, halkaisija
f_{ctm}	Betonin keskimääräinen vetolujuus
f_{yk}	Betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo (betoniteräksen ominaisvetolujuus)
h	Poikkileikkauksen kokonaiskorkeus
$s_{max,slabs}$	Raudoituksen enimmäisjakoväli
β_2	Kerroin

ACI American Concrete Institute

A_{cf}	Pilarin kohdassa kohtisuorasti risteävien pilarikaistoista suuremman pinta-ala ristiin kantavilla laatoilla
A_{ct}	Vetopuolen pinnan ja poikkileikkauksen painopisteen välinen ala
A_s	Pitkittäissuuntaisen jännittämättömän teräksen pinta-ala
f_c	Betonin puristuslujuus
f_t	Maksimaalinen vetojännitys laskettuna käyttötilanteen kuormilla poikkileikkauksen mukaan
f_y	Teräksen myötölujuuden ominaisarvo
l_n	Jännevälin pituus mitattuna tukien välistä
N_c	Kertoimilla korottamattoman pysyvän kuorman ja muuttuvan kuorman aiheuttama jännitysvoima betonissa

BS British Standards

A_c	Betonipoikkileikkauksen pinta-ala
-------	-----------------------------------

AS Standards Australia

A_{st}	Taivutusraudoituksen poikkipinta-ala
b	Suorakaidepoikkileikkauksen leveys
D	Taivutetun poikkileikkauksen kokonaispaksuus
D_s	Laatan kokonaispaksuus

d	Taivutetun poikkileikkauksen tehollinen korkeus
d_b	Harjaterästangon tai jänteen halkaisija
f_{sy}	Raudoituksen myötölujuuden ominaisarvo
f_{cp}	Betonin ominaislujuus jännevoiman vapautuksen hetkellä
$f_{ct.f}$	Betonin taivutusvetolujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden iässä
L	Jänneväli tukien keskeltä keskelle

1 Johdanto

Työ käsittelee jälkijännitettyjen betonirakenteiden minimiraudoitusta tartunnattomia jänteitä käytettäessä. Jännitetyt betonirakenteet koostuvat betonista sekä jännitetyistä teräksistä (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 381). Tartunnattomat jänteet ovat betonin sisällä omassa rasvatussa suojaputkessa, jolloin jänteet eivät tartu betoniin (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 382). Tavoitteena on selvittää, millä perusteilla Eurokoodi 2 kohdan 9.2.1 minimiraudoitusta voidaan vähentää (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 150). Minimirauoituksen vähentämisellä säästettäisiin sekä materiaalisäästöjä että saataisiin pienennettyä hiilidioksidipäästöjä. Tuhatta kilogrammaa tuotettua terästä kohden hiilidioksidipäästöt ovat keskimäärin 1890 kg, ja terästeollisuus aiheuttaa arviolta 7–9 prosenttia fossiilisten polttoaineiden käytöstä johtuvista hiilidioksidipäästöistä maailmanlaajuisesti (The World Steel Association 2022). Lisäksi teräksen hinta on noussut viime vuosien aikana ennätystasolle (SSAB 2022).

Toisena tavoitteena on tietojen pohjalta luoda rakennesuunnittelijalle työkalu kustannustehokkaan raudoitussuunnitelman laadintaan jälkijännitettyjä paikalla-valettuja rakenteita varten. Eri standardien mukaisia laskentatapoja vertaillaan ja pyritään löytämään laskentatapoja minimirauoituksen vähentämiseksi. Tarkasteltavia standardeja ovat Eurokoodi 2 lisäksi American Concrete Instituten standardi, British Standards standardit ja Standards Australia standardit. Eri standardien laskentatapoja hyödyntäen lasketaan vertailukohteena olevan pihakannen minimiraudoitusmäärä.

Työn pääpaino on jälkijännitetyissä rakenteissa ja erityisesti tartunnattomien jänteiden käytössä. Työssä käsitellään myös yleisesti jännitettyjä rakenteita, sillä on hyvä ymmärtää mitä eroa jälki- ja esijännitetyillä rakenteilla on. Esijännitetyissä rakenteissa jännitystila on luotu ennen betonin valamista ja jälkijännitetyissä rakenteissa jännitys tehdään vasta valmiina olevaan rakenteeseen (Leskelä 2008, 623).

2 Jännitetyt betonirakenteet

2.1 Historia

Oletettavasti ensimmäinen betonin jännittämissovellus on vuodelta 1886. Kalifornialainen insinööri P.H. Jackson sai tällöin patentin betonikappaleiden yhteen sitomiselle terästen kiristämismenetelmällä. Vuonna 1888 patentoitiin betonilaattojen jännittäminen teräslangoilla, minkä idean takana oli saksalainen C.E.W Doehringin. Kummatkaan menetelmät eivät olleet menestyneitä, sillä tehollinen jännitys hävisi nopeasti olemattomaksi. (Leskelä 2008, 622.)

Ratkaisuksi esitettiin muun muassa uudelleen jännittämistä, mutta tässä vaiheessa ei vielä tajuttu, että ongelmat johtuivat siitä, että betonin ja teräksen lujuusominaisuudet eivät olleet vielä tarpeeksi suuria. Tämä tajuttiin jo 1920-luvulla, mutta vasta 1940 ranskalainen insinööri E. Freyssinet esitteli 12-lankaisen kiila-ankkuroitavan jänteen. Tämä oli ensimmäinen tehokas jännitysmenetelmä, jonka seurauksena Euroopassa alkoi jännitettyjen rakenteiden varsinainen kehitys. Kiila-ankkurimenetelmä on edelleen käytössä. (Leskelä 2008, 622.)

2.2 Miksi rakenteita jännitetään

Jännityksen tarkoituksena on käyttää rakenteen poikkileikkaus- ja lujuusominaisuudet mahdollisimman hyvin hyväksi. Käytönaikaisten kuormien kompensoimiseksi rakenne jännitetään ennen sen käyttöönottoa. (Sainio 2007, 245.) Jännityksellä voidaan säästää rakennusmateriaaleja niin, että betonia voi kulua 15–30 % vähemmän ja terästä 60–80 % vähemmän tavalliseen teräsbetonirakenteeseen verrattuna (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 387).

Kun rakenteita jännitetään, saadaan aikaan normaaleja rakenteita kestävämpiä, ohuempia ja pidemmällä jänneväliä olevia rakenteita, jotka vaativat vain vähän huoltoa. Tästä syystä myös elinkaarikustannukset ovat pienemmät. Pidemmät jänneväliä tarkoittavat, että pystyrakenteiden määrä vähenee. Kun

pystyrakenteita on vähemmän, tarvitaan rakentamiseen vähemmän betonia. Tämän lisäksi ohuempien rakenteiden takia kuluu vähemmän betonia, jolloin rakenteiden hiilijalanjälki pienenee. (Vahanen-yhtiöt 2022)

Jännittämällä saadaan myös haitallinen ja hallitsematon halkeilu ehkäistyä. Tämä on etuna erityisesti näkyvissä sekä vedenpitävyyttä vaativissa rakenteissa. (Vahanen-yhtiöt 2022.) Lisäksi halkeilematon rakenne kestää paremmin korroosiota (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 387). Näiden lisäksi etuja on jännitettyjen rakenteiden pienemmät muodonmuutokset tavallisiin rakenteisiin verrattuna, hyvin palautuvat muodonmuutokset, vaihtelevien kuormien hyvä kesto, sekä se että rakenne saadaan jännittämällä joko erittäin jäykäksi tai notkeaksi ja sitkeäksi. Uusien rakenteiden lisäksi jännittämistä voidaan hyödyntää myös vanhojen rakenteiden vahvistamiseen. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 387–388.)

2.3 Jännitettyjen rakenteiden toimintaperiaatteet

2.3.1 Esijännittäminen

Leskelän mukaan esijännittämistä käytetään vain tehdasolosuhteissa ja elementtituotannossa. (Leskelä 2008, 623.) Esijännitetyissä rakenteissa jänteet on jännitetty ennen betonin valua. Jännittäminen tapahtuu joko valualustassa tai muotissa. Betonin lujuuden kehityttyä suunnitelmien määräämälle tasolle voidaan jänteet irrottaa kiinnityslaitteista. Menetelmää kutsutaan tartuntajännemmenetelmäksi, sillä jännevoimat siirtyvät rakenteeseen betonin ja jänneeräksen välisen tartunnan avulla. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 381.)

Jännepunokset vedetään hydraulikkatunkeilla ennalta määriteltyyn venymään ja kiinnitetään ankkureilla jännityspukkiin tai muottiin. 7-lankaiset punokset muodostuvat halkaisijaltaan 6,3 mm jännelangoista ja punoksia on nimellishalkaisijaltaan kolmea eri kokoa: 9,5 mm, 12,5 mm ja 12,9 mm. Punoksia on myös

käyttötarkoituksen mukaan pinnaltaan erilaisia tartunnan parantamiseksi. (Leskelä 2008, 623.)

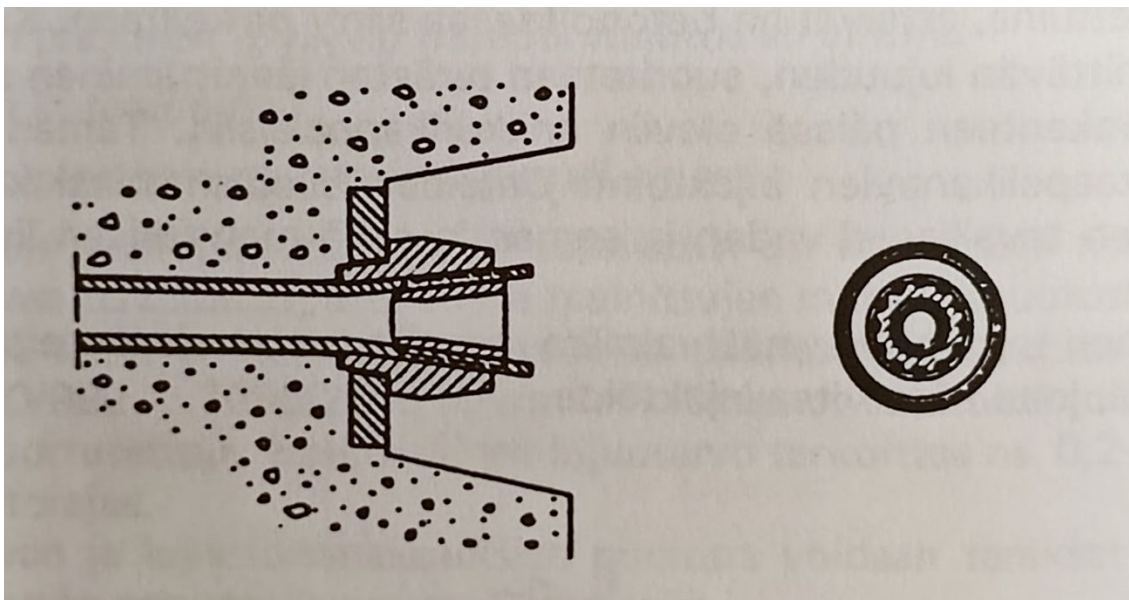
Tehdasoloissa tehtävä esijännittäminen tapahtuu pitkillä sarjatuotantoon tarkoitetuilla linjastoilla. Linjastolla tuotetaan leveydeltään ja paksuudeltaan samansuuruisia elementtejä, joiden jänneväli voi kuitenkin vaihdella ja niihin saadaan erilaisia reikiä ja varauksia. Kuivumiskutistumien estämiseksi sekä valmistusajan lyhentämiseksi betonia lämpökäsitellään valualustaa lämmittämällä sekä höyrykarkaisua käyttämällä. Höyrykarkaisu tarkoittaa valetun betonin lämmittämistä höyryn avulla. (Leskelä 2008, 623.)

2.3.2 Jälkijännittäminen

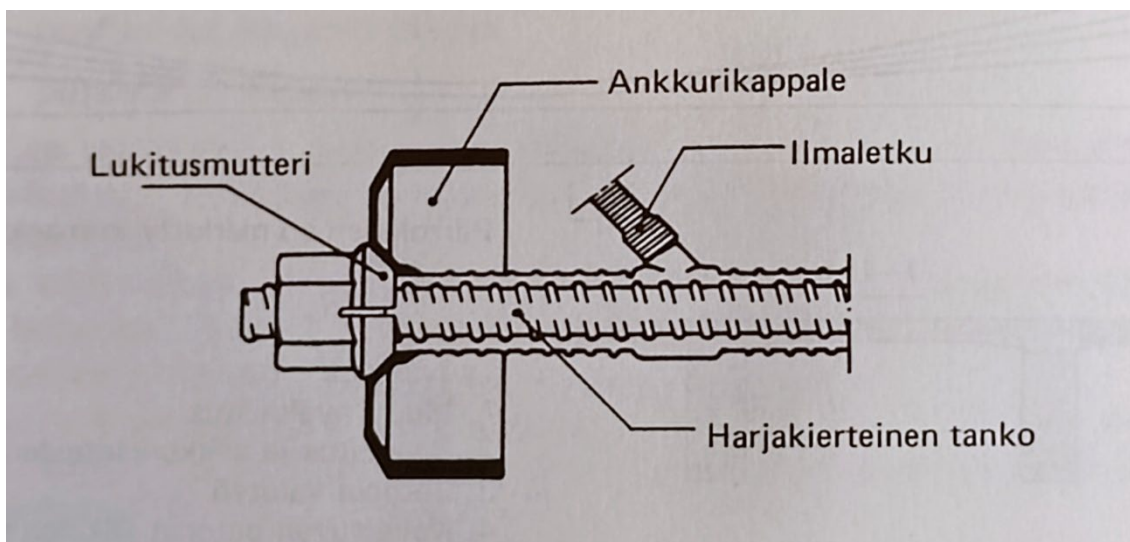
Jälkijännittämistä kutsutaan myös ankkurijännemenetelmäksi, sillä punokset ankkuroidaan tarpeeksi kovettuneeseen betoniin päätyankkureilla. Rakenteet ovat tyypillisesti paikalla valettuja tosin menetelmää voidaan käyttää myös elementtirakentamisessa. Tehokkuus on suurin rakenteissa, joita ei suuren painonsa tai kokonsa takia voida kuljettaa helposti. (Leskelä 2008, 623–624.)

Ankkurijännemenetelmät voidaan jakaa kahteen pääryhmään, joita ovat monilankamenetelmät sekä tankomenetelmät. Monilankamenetelmässä punos koostuu useasta ohuemmasta langasta ja tästä esimerkkinä on Freyssinet-

menetelmä erilaisin sovelluksin (kuva 1).



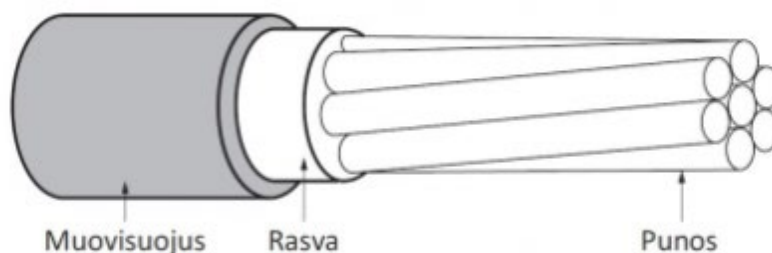
Kuva 1. Freyssinet-menetelmän mukainen punos ja ankkuri (Sainio 2007, 248). Tankomenetelmässä yksi halkaisijaltaan 25–32 mm tanko muodostaa jänteen ja tästä esimerkkinä on Dywidag-menetelmä (kuva 2). (Sainio 2007, 247–248.)



Kuva 2. Dywidag-menetelmän tanko ja ankkuri (Sainio 2007, 248).

Punokset on ankkurijännerakenteissa suojattu joko metalliputkella tai esimerkiksi muovikuorella. Metalliputkella suojatut jänneet voidaan asentaa putkeen myös valun jälkeen. Nämä putket injektoidaan juotoslaastilla jänneiden tartunnan saavuttamiseksi sekä korroosiosuojan parantamiseksi. Muovikuorella suojatut jänneet ovat rasvatussa kanavassa ja tällä saadaan estettyä tartunnan muodostuminen betonin ja punosten välillä. Siksi rakennetta kutsutaan

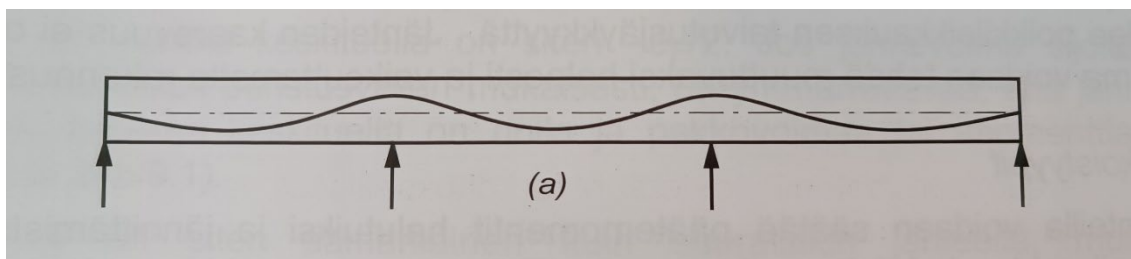
tartunnattomaksi jännemenetelmäksi (kuva 3).



Kuva 3. Tartunnaton jänne (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 384).

Punokset jännitetään tarkoitusta varten suunniteltujen hydraulikkatunkkien avulla kuten muissakin ankkurijännerakenteissa. (Leskelä 2008, 623–624.) Kitkan vähentämisen lisäksi rasvakerros myös suojaa punosta korroosiolta (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 328). Tartunnattomien jänteiden käyttö on yleisintä laattarakenteiden jännittämisessä ja sillä voidaan jännittää jopa kymmenen peräkkäistä laattakenttää (Leskelä 2008, 624).

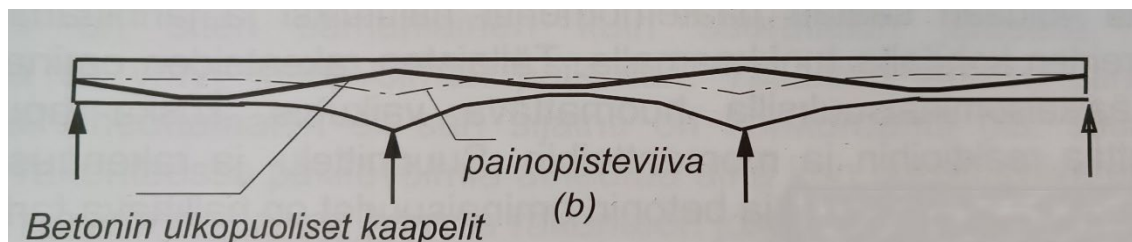
Pitkissä jänneväleissä momentin suuruus vaikuttaa rakenteen kokoon eniten, jolloin jännitetyissä rakenteissa kannattaa hyödyntää jatkuvuutta. Mikäli kyseessä ei ole elementtirakenne, ovat jänteet poikkeuksetta kaarevia jatkuvissa rakenteissa ja jännevoiman kulku ja sijainti voidaan poikkileikkauksessa järjestää monin tavoin. Seuraavissa kuvissa on esimerkkejä erilaisista jatkuvista jälki-jännitetyistä rakenteista. Kuvassa 4 on laatta muuttumattomalla poikkileikkauksella, jossa jänteet ovat kaarevat sekä niiden paikka muuttuu.



Kuva 4. Muuttumaton poikkileikkaus laattassa (Leskelä 2008, 625).

Hyviä puolia rakenteessa on helppo laskettavuus, muottityöt ovat yksinkertaiset sekä taloudellisuus saattaa olla hyvä yksinkertaisen muodon takia. Huono puoli rakenteella on suuret kitkahäviöt, joita voidaan pyrkiä vähentämään väliankku-reilla ja vaihteittain jännittämisellä.

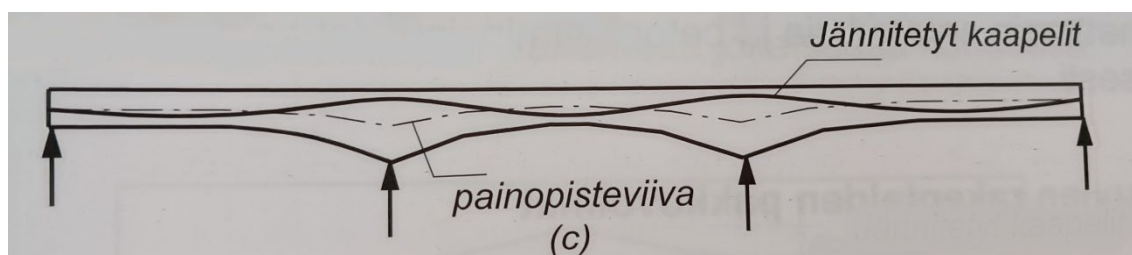
Kuvassa 5 on muuttuvakorkeuksinen rakenne vahvistettuna ulkopuolisilla kaapeleilla.



Kuva 5. Laatan poikkileikkaus muuttuu ja jänteet sijaitsevat laatan ulkopuolella (Leskelä 2008, 625).

Menetelmää voidaan käyttää vanhojen jännittämättömien siltojen vahvistamiseen, mutta se sopii myös uusiin siltoihin. Periaate sopii myös muihin betonirakenteisiin kuin siltoihin.

Kuvassa 6 on esitetty muuttuvakorkeuksinen poikkileikkaus kaarevilla jänteillä.



Kuva 6. Laatan poikkileikkaus muuttuu ja jänteet sijaitsevat laatan sisällä (Leskelä 2008, 625).

Vakiopoikkileikkaukseen verrattuna tässä versiossa jänteet eivät ole niin kaarevia, ja tämän takia kitkahäviöt ovat pienempiä. Pienempien kitkahäviöiden ansiosta tällä rakenteella saavutetaan usein paras lopputulos, vaikkakin laskennallisesti tapaus on vaativammasta päästä. (Leskelä 2008, 624–626).

Muita mahdollisuuksia jatkuvien rakenteiden osalta ovat erilaiset erikoistyyppit, kuten esimerkiksi jännityksen muuttaminen pilareiden kohdalta tunkilla nostamalla. Tällaiset rakenteet ovat kuitenkin haastavia suunniteltavia ja niissä betonin pitkäaikaisominaisuuksilla on suuri vaikutus. Tästä syystä betonin ominaisuudet on hallittava normaalia tarkemmin. (Leskelä 2008, 626).

2.4 Materiaalit ja tarvikkeet

2.4.1 Betoni

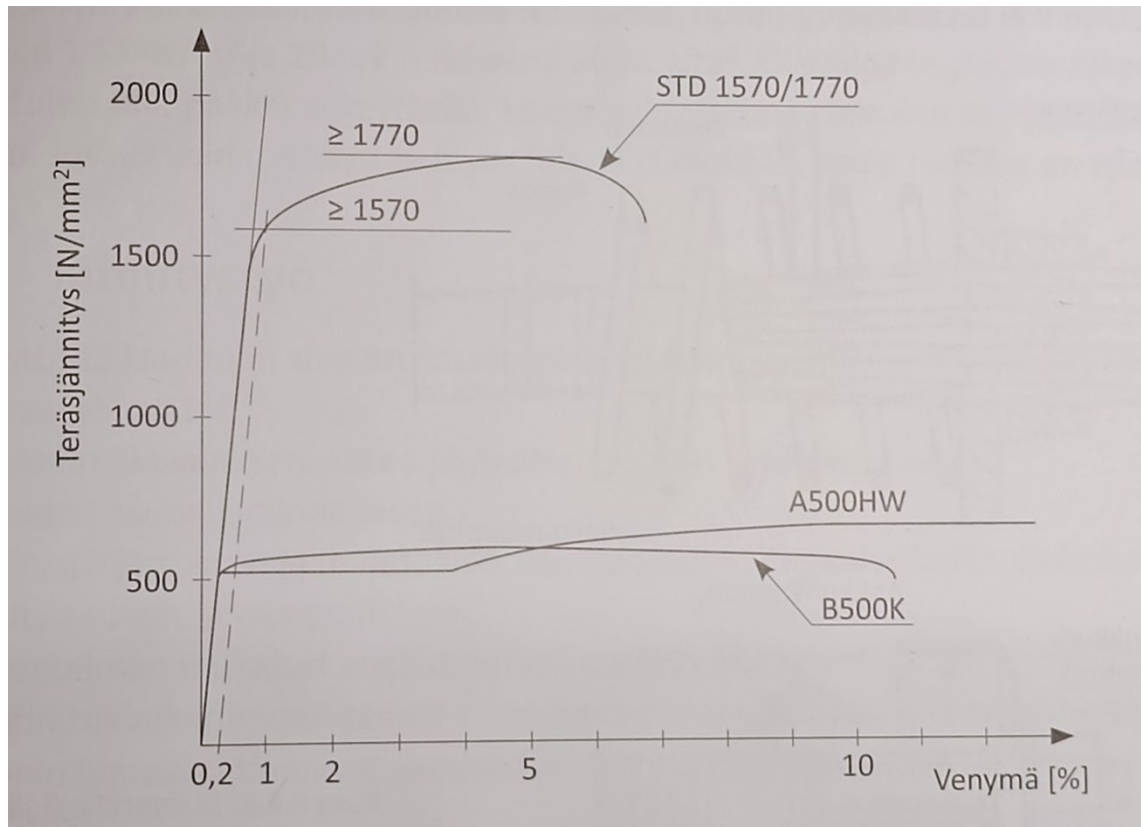
Betoniin kohdistuu suuria rasituksia jännitetyissä rakenteissa. Tämän takia betonin lujuusluokan on oltava vähintään C30/37. Muita betonin valintaan vaikuttavia ominaisuuksia ovat viruma ja kutistuma. Betonin kutistuminen tai viruminen voi aiheuttaa jännityshäviöitä. Jännityshäviöt pyritään saamaan mahdollisimman pieniksi. Viruman ja kutistuman suuruuteen vaikuttaa myös se, miten betonointi ja jälkihoito on toteutettu. (Sainio 2007, 264.) Erityisesti lämpötilan epätasainen jakautuminen tulee estää jälkihoidossa, sillä muuten betoniin aiheutuu haitallisia jännityksiä (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 383).

Betonin lujuudenkehitys voidaan määrittää antureilla, laskelmilla, koekappaleilla tai esimerkiksi kimmovasaralla. Laadunvalvonta- ja kelpoisuuskokeet tehdään kuten tavan betonillekin. Lisäaineiden osalta tulee olla tarkkana, sillä esimerkiksi klorideja sisältäviä lisäaineita ei voida käyttää jänneraudituksen korrosioherkkyyden takia. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 383.)

2.4.2 Betoni- ja jänneteräkset

Jänneteräksiltä vaaditaan suurta lujuutta. Korkealujuusteräksillä saadaan suuret venymät, jolloin suurempi osa jännitysvoimasta on edelleen tallella myös betonin viruman ja kutistuman jälkeen. Jotta tämä toteutuu, teräksen relaksaatio tulee olla pieni. Relaksaatio tarkoittaa teräksen alenevaa jännitystasoa venymän pysyessä vakiona. Suomessa käytettävillä punoksilla relaksaatio on 2,5 %. Yleisimmät lujuusluokat jänneteräksillä ovat 1570/1770 N/mm² ja 1630/1860 N/mm². Ensimmäinen lukuarvo kertoo jänneteräksen myötölujuuden arvon ja toinen murtolujuuden arvon. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 382–383.) Kuvassa 7 esitetty terästen jännitys-venymäkäyriä, mistä voidaan nähdä, että

jänneteräs STD 1570/1770 kestää huomattavasti enemmän jännitystä kuin harjateräkset A500HW sekä B500K.



Kuva 7. Terästen jännitys-venymäkäyriä (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 383).

Jänneteräkset ovat arkoja korroosiolle sekä erilaisille aineille kuten nitraateille, klorideille, joillekin hapoille sekä alumiinille. Lisäksi valmistusviat sekä mekaaniset vauriot ovat jänteille haitallisia eikä viallisia jänteitä voida käyttää. Tavallisia jänneterästuotteita ovat sileästä tai kuvioidusta langasta koostuvat punokset, punoksista punotut vaijerit sekä harjakierretangot. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 383.)

Jännitettyjen terästen lisäksi rakenteissa käytetään myös jännittämätöntä rauditusta. Tämä johtuu lähinnä taloudellisista syistä ja betoniteräkset on mitoitettu hyötykuormia varten, kun taas jänneteräkset ovat pysyviä kuormia varten. Lisäksi tavan teräksiä käytetään esimerkiksi aukkojen reunoilla vahvistamassa rakennetta, hakaraudoituksessa leikkausvoimien takia sekä elementtien siirtojen ja kuljetuksien aiheuttamien kuormitusten takia. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 385.)

2.4.3 Suojaputket ja injektointi

Tartunnattomien jänteiden eli niin sanottujen rasvakaapeleiden suojaputket ovat muovia. Näitä putkia ei injektoida. Injektoitavat tartuntajänteet suojataan metallisin putkin, jotka ovat yleensä kierreprofiloituja ja kierresaumattuja. Vaihtoehtoisesti ne voivat olla myös pitkittäin hitsattua teräspeltiputkea. Lämpimitaltaan 30–100 mm olevat putket ovat 0,25–1,0 mm paksuja ja ne asetetaan huolellisesti oikeille paikoille suunnitelmien mukaisesti. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 385.)

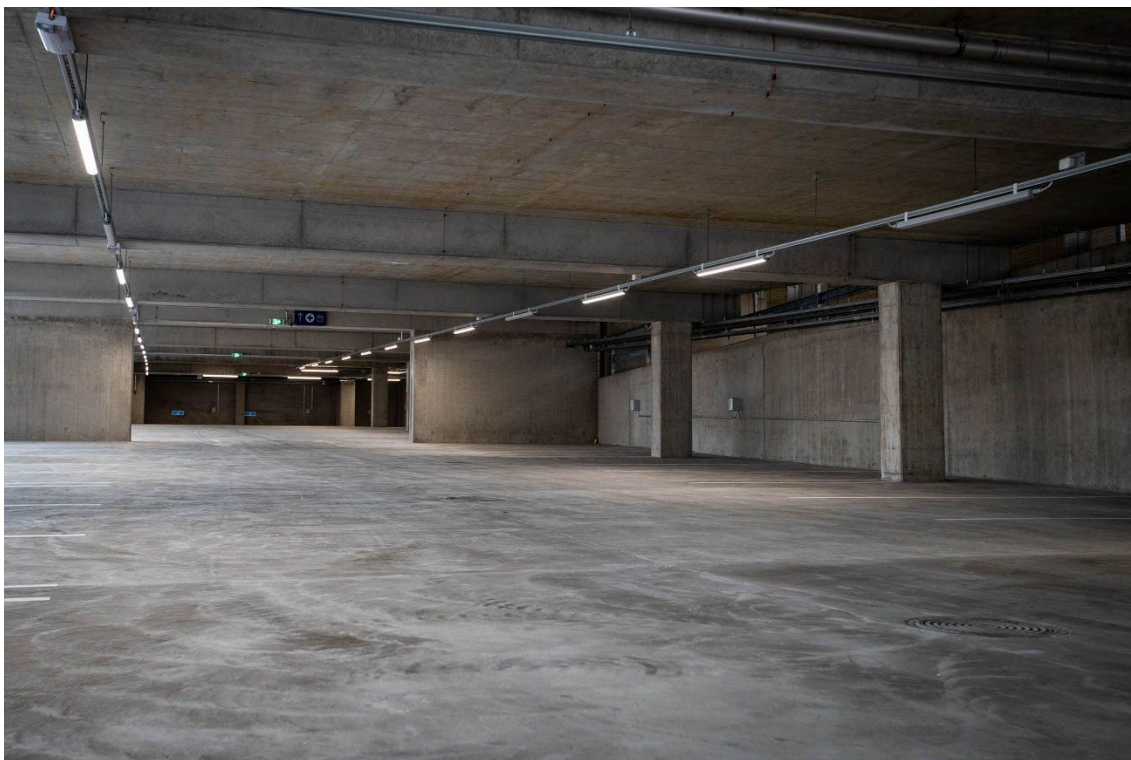
Injektointia varten putkissa tulee olla ylimmissä kohdissa ilmanpoistoputket ja alimmissa kohdissa vedenpoistoputket. Näin injektoinnin aikana vesi ja ilma poistuvat putkesta. Injektointilaastin tulee olla lujuudeltaan seitsemän vuorokauden ikäisenä vähintään 16 MN/m² ja 28 vuorokauden ikäisenä 20 MN/m². Laasti koostuu sementistä vedestä sekä lisäaineesta ja lisäksi voidaan käyttää filleriä sekä hiekkaa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 385.)

2.5 Käyttökohteet Suomessa

Jälkijännitetyjä rakenteita käytetään monessa paikassa esimerkiksi pysäköintilaitoksissa, erilaisissa rakennuksissa liiketiloista asuntoihin, silloissa, raideliikenteessä, ydinvoimaloissa, vesitorneissa, tuuli- ja vesivoimaloissa, vedenkäsittelylaitoksissa, satamissa ja jalostamoilla. (YIT 2022.)

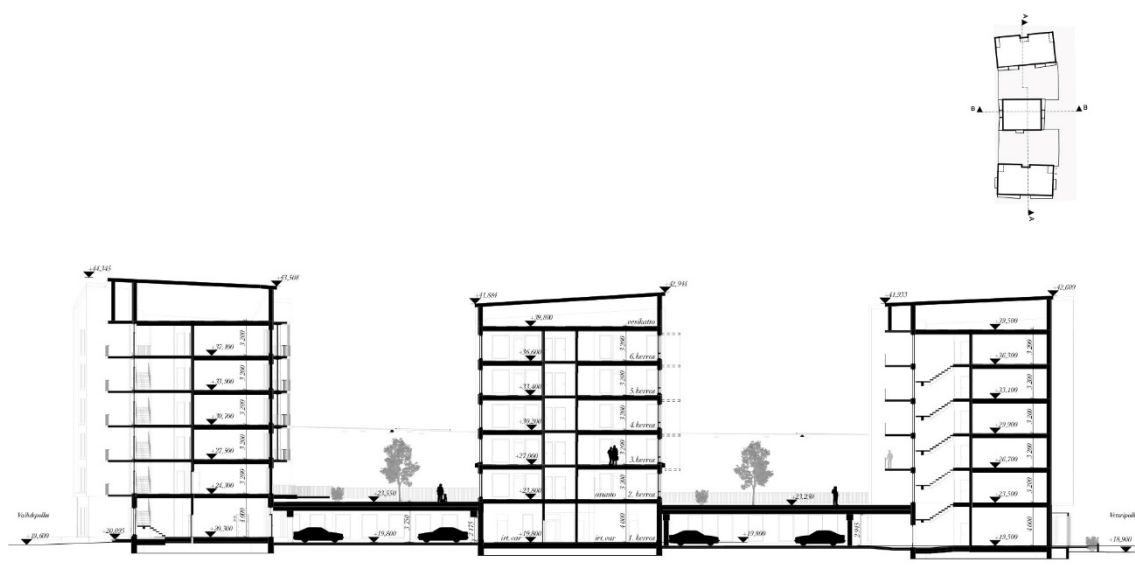
Pysäköintihalliin saadaan enemmän tilaa jälkijännitetyillä rakenteilla, jolloin tilan käytettävyys paranee (Vahanen-yhtiöt 2022). Esimerkki avoimesta tilasta

parkkihallissa esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Parkkihalliin saadaan paljon avointa tilaa jännitetyjä rakenteita käyttämällä (Kuva: Jussi Pohjavirta, Lavia. 2020).

Paikoitushallin päällä voi sijaita myös piha-alue ja pihakannesta esimerkki kuvassa 9.



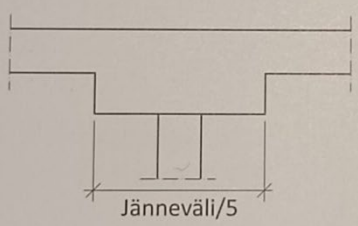
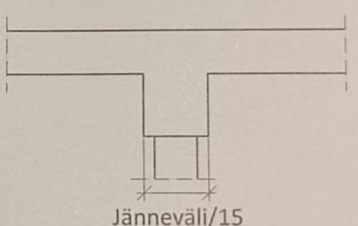
Kuva 9. Leikkaus rakennuksesta, jossa on pihakansi (Arkworks Arkkitehdit Oy).

Silloissa käytetään ankkurillisia tartuntajänteitä, sillä niissä tarvitaan suuria keskittettyjä voimia. Laatoissa taas tarvitaan pieniä hajallaan olevia voimia, jolloin käytetään tartunnattomia jänteitä. (Ruuhomäki, Jormanainen, Pärssinen, Saarikivi & Söderholm 2006, 142.)

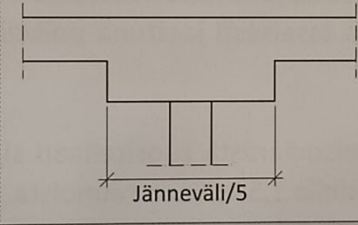
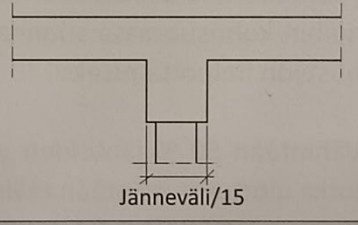
Rakenteissa, jotka ovat tekemisissä veden kanssa, joko niin että ne ovat vedessä tai esimerkiksi meren lähistöllä käytetään jännitetyjä rakenteita, sillä ne ovat tiiviitä, halkeilemattomia ja niiden kestävyys ja lujuus ovat parempia. Jo edellä mainittujen lisäksi tällaisia ovat esimerkiksi säiliöt, altaat, padot, putket, majakat, laiturit, ponttonit, uivat telakat sekä öljynporausrakenteet. (Suomen Betoniyhdistys ry 2018, 388.)

2.6 Mittasuositukset

Tartunnattomia jänteitä sisältäviä rakenteita koskevat mittasuositukset pilari- sekä umpilaattojen ja palkkien osalta on esitetty alla (kuvat 10, 11 ja 12).

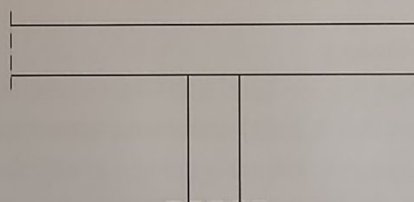
Suositukset jatkuvien palkkien korkeuksille jännevälin suhteessa L/h (laatan jänneväli $6\text{ m} \leq L \leq 13\text{ m}$)		
Kuorma Q_k [kN/m^2] (pysyvä pintakuorma + hyötykuorma)	Leveät palkit	Kapeat palkit
		
2,5	25	18
5,0	22	16
10,0	18	13

Kuva 10. Jatkuvien palkkien mittasuositukset (Suomen betoniyhdistys ry 2017, 42).

Suositukset jatkuvien yhteen suuntaan kantavien laattojen korkeuksille jännevälin suhteessa L/h ($6\text{ m} \leq L \leq 13\text{ m}$)		
Kuorma Q_k [kN/m^2] (pysyvä pintakuorma + hyötykuorma)	Leveät palkit	Kapeat palkit
		
2,5	45	42
5,0	40	38
10,0	35	34

Kuva 11. Umpilaattojen mittasuositukset (Suomen betoniyhdistys ry 2017, 45).

Suositukset jatkuvien kahteen suuntaan kantavien tasapaksujen laattojen korkeuksille
jännevälillä suhteessa L/h ($6 \text{ m} \leq L \leq 13 \text{ m}$)

Kuorma Q_k [kN/m ²] (pysyvä pintakuorma + hyötykuorma)	
2,5	40
5,0	36
10,0	30

Kuva 12. Pilarilaattojen mittasuositukset (Suomen betoniyhdistys ry 2017, 46).

Vesitorneissa jännitettynä betonirakenteina toteutetaan n. 2000–2500 m³ suuremmat vesisäiliöt. Normaalisti jännitys tapahtuu yhdessä suunnassa, mutta myös useampisuuntaisia jänneteräksiä voidaan käyttää suurissa säiliöissä. Betonina käytetään C30/37-C35/45 ja rakenneluokka vesisäiliöillä on 1. (Kaupunkiliitto 1982, 57–58.)

Jännitetyissä silloissa päästään palkkirakenteilla pisimmillään noin 200–300 m jänneväliin ja vinoköysirakenteilla jopa 500 m (Betoniyhdistys ry 2018, 388).

3 Minimiraudoituksen laskentaperusteet

3.1 Miksi minimiraudoitus tarvitaan

Eurokoodissa kohdassa 5.10.1 (5) sanotaan, että ”jänteiden murtumisesta aiheutuva rakenneosan haurasmurtumaa tulee välttää”. Kohdassa 5.10.1 (6) on mainittu tähän liittyen viisi eri vaihtoehtoa, kuinka haurasmurtumalta vältetään. Näistä ensimmäinen vaihtoehto on, että käytetään kohdan 9.2.1 mukaista vähimmäisraudoitusta. (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 75.) Laskentaperusteita kohdan 9.2.1 vähimmäisraudoitukselle käsitellään myöhemmin tässä työssä.

Eurokoodin kohdan 7.3.2 vähimmäisraudoitusalaä käytetään halkeilun rajoittamiseen rakenteissa. Halkeilu voi olla haitallista joko rakenteen säilyvyyden tai asianmukaisen toiminnan kannalta tai ulkonäöllisistä syistä. (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 117–118.) Betonin alkaessa halkeilemaan teräsjännitys nousee nopeammin kuin ennen halkeilua. Tartunnattomien jänteiden tapauksessa tämä ei kuitenkaan tapahdu niin nopeasti kuin tartuntajännerakenteissa. Halkeamat ovat normaalisti leveämpiä tartunnattomien jänteiden rakenteissa ja kohdistuvat tietyille alueille. Näillä alueilla taivutuskestävyys on pienempi kuin tartuntajänteillä. Jännittämättömiä teräksiä käyttämällä saadaan lisättyä rakenteen kestävyyttä huomattavasti. Jännittämättömän raudoituksen tarkoitus on halkeamaleveyksien pienentäminen sekä halkeamien tasainen jakaantuminen ja sillä on myös vaikutusta voimatasapainoon. (Leskelä 2008, 641.)

Tartunnattomille jänteille ei voi käyttää taivutuksen ja muodonmuutoksen välistä teoriaa (AS 5100-5, 2017, 76). Siinä rasiusten oletetaan olevan suhteellisia betonin ja teräksen välillä, sillä tartunta betonin ja teräksen välillä estää teräksen liukumisen betonin sisällä. Tartunnattomia jänteitä käytettäessä jänne pääsee liukumaan betonin sisällä, ja tämän takia eri muuttujat vaikuttavat taivutuskestävyyteen. (Leskelä 2008, 565.)

3.2 Eurokoodi 2 Suomen kansallisen liitteen mukaisilla arvoilla

Haurasmurtuman välttämiseksi olevien viiden vaihtoehdon alapuolella on Eurokoodissa mainittu, että valinta menetelmien välillä voidaan esittää kansallisessa liitteessä (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 75). Kansallisessa liitteessä on lueteltu kolme näistä vaihtoehdoista, joista yksi on kohdan 9.2.1 minimiraudoituksen käyttäminen. (Suomen RakMK 2019, 18.)

Eurokoodissa käytetään merkintää $A_{s,min}$ minimiraudoitukselle. Minimiraudoitus lasketaan yhtälöllä 1.

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot (f_{ctm}/f_{yk}) \cdot b_t \cdot d \quad (1)$$

missä b_t = vetopuolen keskimääräinen leveys
 d = poikkileikkauksen tehollinen korkeus
 f_{ctm} = betonin keskimääräinen vetolujuus ja se määritetään asianomaisen lujuusluokan perusteella SFS-EN 1992-1-1 taulukon 3.1 mukaan
 f_{yk} = betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo

Minimiraudoituksen tulee kuitenkin täyttää epäyhtälön 2 ehto

$$A_{s,min} \geq 0,0013 \cdot b_t \cdot d \quad (2)$$

(Suomen betoniyhdistys ry 2017, 45).

Yhteen suuntaan kantavilla laatoilla tulee olla poikittainen jakoraidoitus, joka on vähintään 20 % pääraudoituksesta. Tukien lähellä jakoraidoitusta ei tarvita, jos alueille ei kohdistu poikittaista taivutusmomenttia. (Suomen betoniyhdistys ry 2017, 45.)

Tankojaolle $s_{max,slabs}$ on annettu Eurokoodin kansallisessa liitteessä enimmäisarvot, jotka ovat:

- pääraudoituksessa $3h \leq 400$ mm, missä h on laatan kokonaispaksuus
- jakoraidoituksessa $4h \leq 600$ mm.

Lisäksi pistekuormien tai maksimimomenttien alueilla jako on:

- pääraudoituksessa $2h \leq 250$ mm
- jakoraidoituksessa $3h \leq 400$ mm. (Suomen RakMK 2019, 18.)

Jännteille ja jänneryhmille on myös enimmäisväli ja se on enintään 6h, kuitenkin korkeintaan 1,5 m. (Suomen betoniyhdistys ry 2017, 45)

Yläpinnan terästen tulee ulottua vähintään $L/6$ päähän tuen reunasta (Suomen betoniyhdistys ry 2017, 45). Jos tuelle on mahdollista syntyä positiivisia momentteja, jatketaan alapinnan raudoitusta tukien yli. Jos kiinnitysmomentti on vähäinen tai olematon, voidaan alapinnan raudoituksen alana käyttää

reunatuilla vähintään kertoimella β_2 kerrottua osuutta kentässä käytetystä alasta. β_2 arvo on 0,25. (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 152.)

3.3 ACI-ohjeet

Tartunnallisen raudoituksen minimivaatimus A_s lasketaan yhtälöllä 3.

$$A_s = 0.004A_{ct}, \quad (3)$$

missä A_{ct} = poikkileikkauksen vedetyn pinnan ja painopisteen välinen pinta-ala.

Raudoitus tulee jakaa yhtä suurin välein mahdollisimman lähelle laatan pintaa, johon vetojännitys vaikuttaa. Tätä kaavaa käytetään muun muassa yhteen suuntaan kantaville laatoille. (ACI 318M-08, 2008, 291.)

Tankojako ei saa ylittää kolme kertaa laatan paksuutta tai 450 mm (ACI 318M-08, 2008, 90). Edellinen koskee jännittämättömiä rakenteita ja jännitetyillä rakenteilla tankojako ei saa ylittää kahta kolmasosaa jännittämättömien rakenteiden arvosta (ACI 318M-08, 2008, 286). Kun tämä otetaan huomioon, maksimiarvo tankojaolle on 450 mm kertaa kaksi kolmasosaa eli 300 mm.

Ristiin kantaville laatoille raudoitus tulee toteuttaa seuraavasti:

- Vähimmäisraudoitusta ei tarvitse positiivisten momenttien alueilla, kun f_t ei ylitä $0.17\sqrt{f'_c}$. f_t tarkoittaa maksimaalista vetojännitystä laskettuna käyttötilanteen kuormilla poikkileikkauksen mukaan ja f'_c betonin puristuslujuutta.
- Jos $0.17\sqrt{f'_c}$ ylittyy, vähimmäisraudoitus lasketaan yhtälöllä 4.

$$A_s = \frac{N_c}{0.5f_y} \quad (4)$$

Missä N_c = hyötykuorman ja muuttuvan kuorman aiheuttama vetojännitys betonissa
 f_y on raudoitteen myötölujuus.

Myötölujuus ei saa ylittää 420 MPa. Kyseinen raudoitus tulee jakaa tasaisesti mahdollisimman lähelle laatan pintaa.

- Tuella negatiivisten momenttien kohdalla yläpinnan molempien suuntien raudoitus lasketaan yhtälöllä 5.

$$A_s = 0.00075 A_{cf} \quad (5)$$

missä A_{cf} = laatan poikkileikkauksen pinta-ala.

Raudoitus tulee ulottaa 1.5h etäisyydelle tuen reunasta molemmin puolin. Tankojako ei saa ylittää 300 mm (ACI 318M-08, 2008, 292.)

Ristiin kantaville laatoille, joissa käytetään tartunnattomia jäniteitä, on osoitettu testeillä, että minimiraudoitusta käytettäessä voidaan välttyä haurasmurtumalta. Kun käytetään minimiraudoitusta, haurasmurtumaa ei tapahdu, sillä minimiraudoitus lisää rakenteen halkeilun jälkeistä kestävyyttä. (ACI 318M-08, 2008, 399.)

Raudoituksen pituudet, jotka pätevät molemmille yllä mainituille laattatyypeille:

- positiivisten momenttien alueella yksi kolmasosa jännevälistä l_n ja
- negatiivisten momenttien kohdalla yksi kuudesosa jännevälistä l_n tuen molemmin puolin (ACI 318M-08, 2008, 292.)

Reunatuella raudoitus ulotetaan tuelta yhden kuudesosan verran jännevälistä kentän puolelle. Reunatuon raudoituksen kokonaispituuteen lisätään tuen leveys mukaan. (Naaman 2004, 664.)

Jakoraudoitus ACI-ohjeessa on nimellä "Kutistuma- ja lämpötila-raudoitus". Dokumentin kommentointiosiossa kerrotaan, että tämä raudoitus sitoo rakenteen yhtenäiseksi ja tämän surauksena rakenne toimii suunnittelun tarkoittamalla tavalla. Kun käytetään raudoitusta, jonka myötölujuus on yli 420 MPa lasketaan

raudoituksen prosenttiosuus poikkileikkauksen alasta yhtälöllä 6.

$$\frac{0.0018 \cdot 420}{f_y}$$

(6)

Raudoituksen jako tulee olla korkeintaan viisi kertaa laatan paksuuden verran, mutta ei saa ylittää 450 mm. (ACI 318M-08, 2008, 98–99.) Edellinen koskee jännittämättömiä rakenteita ja jännitetyillä rakenteilla tankojako ei saa ylittää kahta kolmasosaa jännittämättömien rakenteiden arvosta (ACI 318M-08, 2008, 286). Kun tämä otetaan huomioon, maksimiarvo tankojaolle on 450 mm kertaa kaksi kolmasosaa eli 300 mm. Raudoitus voidaan jakaa joko ylä- tai alapintaan tai erityisissä tilanteissa tälle välille (ACI 318M-08, 2008, 99).

3.4 British Standards

Standardi BS 5400 osa neljä vuodelta 1990 käsittelee teräs- ja betonirakenteista ja yhdistetyistä rakenteista koostuvia siltoja. Tässä standardissa on kuitenkin maininta, että se ei käsittele tartunnattomia jänteitä. (BS 5400, 1990, 34.) Dokumentista löytyy kuitenkin muilta osin tietoja betonirakenteista ja jännitetyistä betonirakenteista. (BS 5400, 1990, 1–5.)

Standardin BS 8110 mukaan minimiraudoitus suorakaidepoikkileikkauksille on 0,13 prosenttia betonin kokonaispinta-alasta A_c . Ristiin kantaville laatoille käytetään tämän verran molempiin suuntiin. (BS 8110-1:1997, 1997, 78.) Standardissa todetaan, että samat ohjeet, jotka pätevät palkeille pätevät myös yhteen suuntaan kantaville laatoille (BS 8110-1:1997, 1997, 99). Palkkien laskentaohjeissa kohdassa 4.3.7.4 kerrotaan, että raudoitusta voi korvata samalla määrällä jänneteräksiä (BS 8110-1:1997, 1997, 96). Tämä ohje ei käsittele pilareilla tuetuja ristiin kantavia laattoja (BS 8110-1:1997, 1997, 99).

Yllä olevat ohjeet ovat dokumenteista BS 8110-1-1997. Tämä standardi on korvattu Eurokoodi 2 julkaisulla (British Standards Institution 2022, The Concrete Society 2022). Eurokoodin mukaan kohdan 9.2.1. minimiraudoitusta $A_{s,min}$ saadaan laskettua yhtälöllä 7.

$$A_{s,min} = 0,26 * (f_{ctm} / f_{yk}) * b_t * d \quad (7)$$

missä b_t = vetopuolen keskimääräinen leveys
 d = poikkileikkauksen tehollinen korkeus
 f_{ctm} = betonin keskimääräinen vetolujuus ja se määritetään asianomaisen lujuusluokan perusteella BS-EN 1992-1-1 taulukon 3.1 mukaan
 f_{yk} = betoniteräksen myötölujuuden ominaisarvo

Minimiraudoituksen tulee kuitenkin täyttää epäyhtälön 8 ehto

$$A_{s,min} \geq 0,0013 * b_t * d \quad (8)$$

(BS EN 1992-1-1, 2004, 152.)

Yhteen suuntaan kantavilla laatoilla tulee olla poikittainen jakoraidoitus, joka on vähintään 20 % pääraudoituksesta. Tukien lähellä jakoraidoitusta ei tarvita, jos alueille ei kohdistu poikittaista taivutusmomenttia. (BS EN 1992-1-1, 2004, 152.)

Tankojaolle $s_{max,slabs}$ on annettu Eurokoodin kansallisessa liitteessä enimmäisarvot, jotka ovat:

- pääraudoituksessa $3h \leq 400$ mm, missä h on laatan kokonaispaksuus
- jakoraidoituksessa $3,5h \leq 450$ mm.

Lisäksi pistekuormien tai maksimimomenttien alueilla jako on:

- pääraudoituksessa $2h \leq 250$ mm
- jakoraidoituksessa $3h \leq 400$ mm. (NA to BS EN 1992-1-1:2004, 2004, 10.)

3.5 Standards Australia

Standardi AS 5100.4 vuodelta 2017 käsittelee betonirakenteisten siltojen suunnittelua (AS 5100.5:2017, 2017, 1). Minimi taivutusraudoitus A_{st} lasketaan yhtälöllä 9.

$$A_{st} = 0.0025bd \quad (9)$$

missä b = suorakaidepoikkileikkauksen leveys
 d = poikkileikkauksen tehollinen korkeus. (AS 5100.5:2017, 2017, 116.)

Jakoraudotus silloissa lasketaan prosentuaalisena suhteena pääraudoitukseen nähden seuraavasti:

- a) Jos pääraudoitus on liikenteen suuntainen, se lasketaan yhtälöllä 10.

$$\text{prosenttiosuus} = \frac{1750}{\sqrt{L}} \quad (10)$$

missä minimiarvo = 30 %

L = jännevälin pituus tuen keskeltä keskelle.

- b) Jos pääraudoitus on liikenteen suuntaa vastaan kohtisuorassa, se lasketaan yhtälöllä 11.

$$\text{prosenttiosuus} = \frac{3500}{\sqrt{L}} \quad (11)$$

missä minimiarvo = 30 %.

Jännevälin ulkoreunoilla jakoraudotusta voidaan vähentää korkeintaan 50 % jännevälin neljänneksen levyiseltä alueelta. (AS 5100.5:2017, 2017, 116.)

Ristiin kantaville pilarilaatoille taivutusraudoitus A_{st} lasketaan molempiin suuntiin yhtälöllä 12.

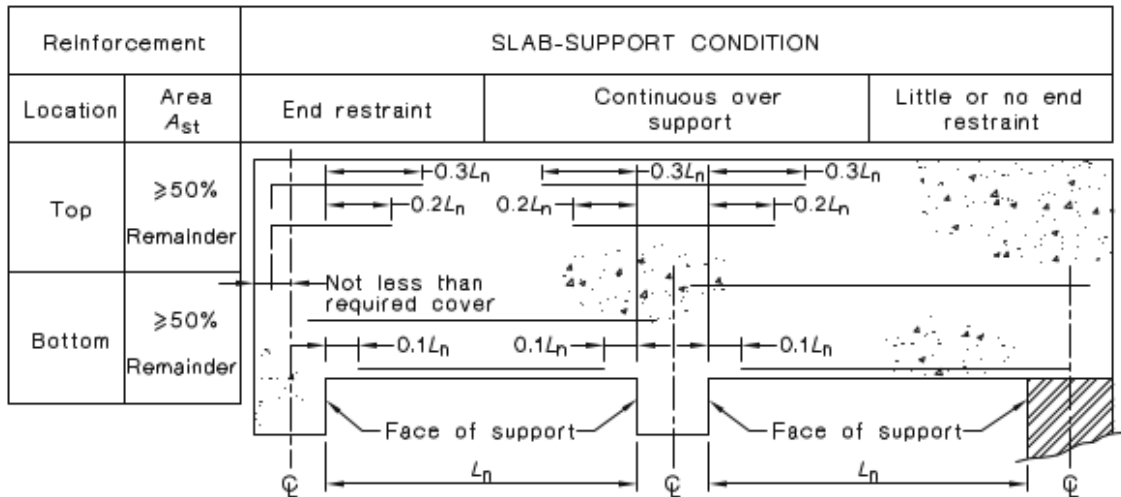
$$A_{st}/bd \geq 0.24(D/d)^2 f_{ct} / f_{sy} \quad (12)$$

- missä A_{st} = taivutusraudoituksen pinta-ala
- b = tarkasteltavan poikkileikkauksen leveys
- d = taivutuksessa olevan tason tehollinen korkeus
- D = poikkileikkauksen kokonaispaksuus
- $f_{ct,f}$ = betonin taivutusvetolujuus 28 vuorokauden iässä
- f_{sy} = teräksen myötöraja (AS 3600-2009, 2009, 121.)

Taivutusraudoitus tulee toteuttaa seuraavasti:

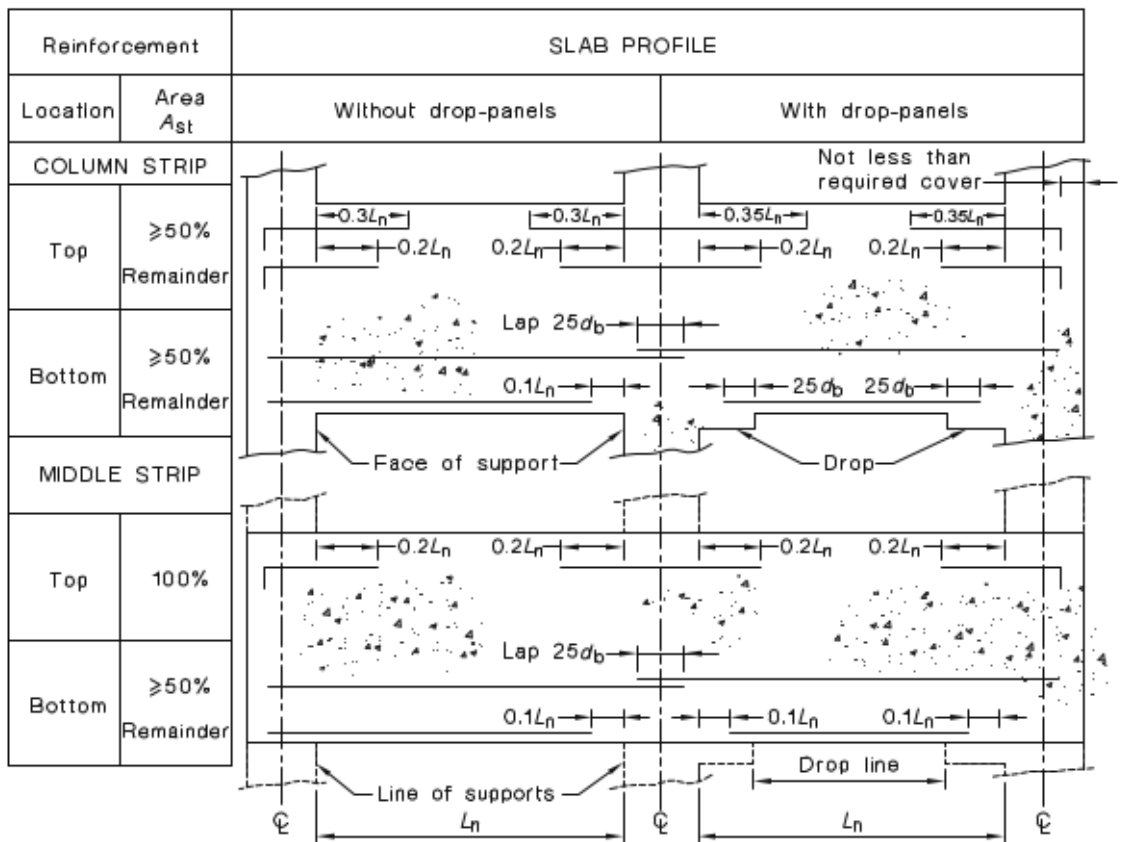
- a) Raudoituksen sijainti ja ankkurointi määräytyy kuvitteellisen momenttikuvaajan avulla:
 - a. Vähintään kolmasosa raudoituksesta tuen kohdalla tulee jatkaa $12d_b$ tai D etäisyydelle maksimimomentin kohdasta molempiin suuntiin riippuen siitä kumpi arvoista on suurempi.
 - b. yksinkertaisesti tuetun jatkumattoman laatan reunalla vähintään puolet positiivisen momentin vaatimasta raudoituksesta jännevälin keskellä tulee ankkuroida vähintään $12d_b$ tai D etäisyydelle tuesta riippuen siitä kumpi arvoista on suurempi. Jos leikkausraudoitusta ei tarvita, voidaan arvoa vähentää joko:
 - i. $8d_b$, kun sitä käytetään vähintään puolessa raudoituksesta tai
 - ii. $4d_b$, kun käytetään kaikkiin raudoituksiin.
 - iii. Tuella, jonka yli laatta jatkuu, vähintään neljäsosa raudoituksesta tulee jatkaa tuen reunan yli.
- b) Jos laatan sekä ala- että yläpuolella on seinät tai palkit, tulee raudoitus sijoittaa sekä ala- että yläpintaan. (AS 5100.5:2017, 2017, 117.)

Yksinkertaistettu malli raudoituksen järjestämisestä on esitetty AS 3600. Yhteen suuntaan kantavalle laatalle ohjeet on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Raudoituksen asettelu yhteen suuntaan kantaville laatoille AS 3600 mukaisesti (AS 3600-2009, 2009, 122).

Ristiin kantaville laatoille rauditus järjestetään kuvan 14 mukaisesti.



Kuva 14. Raudoituksen asettelu ristiin kantaville laatoille AS 3600 mukaisesti (AS 3600-2009, 2009, 122).

Kun maksimaalinen taivutusvetorasitus lyhytaikaisen muuttuvan kuorman vaikutuksesta käyttörajatilassa on alle $0.25\sqrt{f'c}$, katsotaan halkeilun olevan jännityksessä rakenteessa rajoitettu. $f'c$ tarkoittaa betonin lieriölujuuden arvoa 28 päivän ikäisenä. Jos tämä arvo ylitetään, käytetään raudoitusta tai tartunnallisia jänteitä tai molempia, joiden jakoväli on korkeintaan 300 mm tai $2.0D_s$ riippuen siitä kumpi arvoista on pienempi ja rajoitetaan:

- a) suurin taivutusvetorasitus arvoon $0.5\sqrt{f'c}$ ja $0.5\sqrt{f'cp}$; tai
- b) teräksen kuormituksen lisääntyminen taulukon 1 arvoihin. Kuormituksen lisääntyminen lasketaan tilanteesta, jossa lyhytaikaista muuttuvaa kuormaa ei ole aina siihen asti, kun raskainten kuormitettuun osaan käyttörajatilassa vaikuttaa lyhytaikainen muuttuva kuorma kokonaisuudessaan.

$f'cp$ tarkoittaa betonin lujuutta teräksen jännityksen laukaisuhetkellä ja D_s tarkoittaa laatan kokonaispaksuutta. (AS 5100.5:2017, 2017, 121.)

Raudoituksen tankokoko (d_b) mm	Suurin sallittu raudoituksen kuormituksen kasvu (MPa) kokonaispaksuuteen nähden, D_s (mm)	
	≤ 300	> 300
≤ 10	320	360
12	300	330
16	265	280
20	240	
24	210	
≥ 28	200	
Kaikki tartunnalliset jänteet	200	

Taulukko 1. Raudoituksen kuormituksen kasvamisen maksimiarvot eri kokoisille tangoille (AS 3600 133, AS 5100 122).

4 Vertailu

4.1 Standardien erot ja yhtäläisyydet

Britanniassa käytetään nykyään samaa Eurokoodi 2 betonirakenteiden mitoituksessa kuin Suomessa. Näin ollen eroja laskentatavoissa ei ole. Molemmilla mailla on omat kansalliset liitteet, joissa on pieniä eroja laskennassa käytettävissä arvoissa. Minimiraudoituksen laskentaan vaikuttavista arvoista eroa oli ainoastaan jakoraudoituksen osalta. Suomen kansallisen liitteen mukaan jakoraudoituksen maksimiväli saa olla korkeintaan 600 mm, kun vastaava arvo UK kansallisen liitteen mukaan 450 mm.

Yhteen suuntaan kantavilla laatoilla minimiraudoituksen laskentatapojen periaatteissa ei ole suuria eroja. Jokainen laskentatapa käyttää hyödyksi betonin ja/tai teräksen ominaislujuuksia ja rakenteiden dimensioita. Eurokoodin mukainen laskentatapa on ainut, joka antaa mahdollisuuden käyttää minimiraudoitusta pienempää raudoitusta hyödyksi tartunnattomia jänteitä käytettäessä (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 75). Muissa tapauksissa minimiraudoitusta on määrätty käytettäväksi.

Ristiin kantavissa laatoissa ACI-ohjeet mahdollistavat minimiraudoituksen poisjättämisen positiivisten momenttien kohdalla määrätyn ehdon. Tämä on myös standardeista ainoa, joka käsittelee erikseen tartunnattomilla jänteillä varustettujen rakenteiden minimiraudoitusta. (ACI 318M-08, 2008, 291–292.)

Australian standardissa kohdassa 9.4.2 määritetään, miten halkeilun rajoittaminen toteutetaan. Jos betonin taivutusvetolujuus ylittää arvon $0.25\sqrt{f'c}$ tarvitaan minimiraudoituksen lisäksi raudoitusta. (AS 3600-2009, 2009, 132.) Ehto on vastaavanlainen kuin ACI-ohjeissa mainittu ristiin kantaville laatoille osoitettu ehto, minkä mukaan positiivisten momenttien kohdalla ei tarvita minimiraudoitusta. Australian standardi ei kuitenkaan minimiraudoituksen poisjättämiselle anna mahdollisuutta.

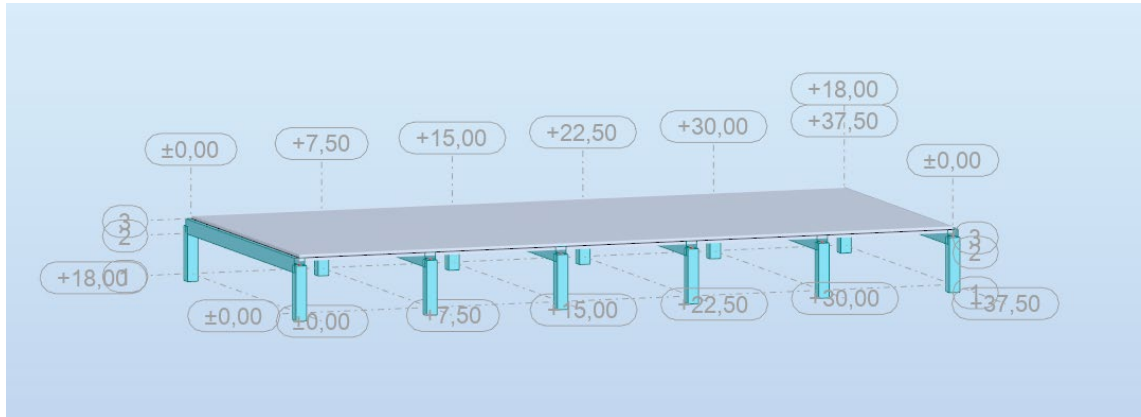
Tankojaossa esiintyy eroja Eurokoodin ja ACI sekä AS välillä. Eurokoodin mukainen maksimijako pääraudoituksessa on 400 mm ja maksimimomenttien tai pistekuormien alueella 250 mm, kun taas ACI ja AS on annettu maksimiväliksi vain yksi arvo, joka on 300 mm. Eurokoodin kansallisen liitteen mukaisten arvojen välillä on jakoraidoituksen osalta ero. Suomen kansallinen liitteen mukaan arvo on 600 mm, kun taas BS kansallinen liitteen mukaan arvo on 450 mm.

4.2 Laskennassa käytettävä vertailukohde

Vertailukohteeksi valittiin liikennöity pihakansi. Tyypillisen pysäköintialueen leveys on noin 18 metriä ja se koostuu viidestä peräkkäisestä kentästä, joiden jänneväli tuen keskeltä keskelle on 7,5 metriä (Naaman 2004, 662). Pihakannen tiedot:

- rakenteen mitat
 - jänneväli $L = 7,5$ m, viisi peräkkäistä kenttää
 - avoin jänneväli $l_n = 6,9$ m
 - tukien leveys 600 mm
 - leveys 18 m
 - tarkasteluleveys $b_t = b = 1000$ mm
 - laatan paksuus 350 mm
 - tehollinen korkeus $d = 305$ mm
- betoni
 - C30/37
 - rasitusluokka XC4, XD1, XF3
 - $f_{ctm} = 2,9$ MPa
- harjateräksset
 - B500B
 - $f_{yk} = 500$ MPa
- kuormaluokka G
 - muuttuva hyötykuorma 5 kN/m²
 - pysyvä hyötykuorma 10 kN/m²

Laskentaesimerkki havainnollistettu kuvassa 15.



Kuva 15. Tyypillinen rakenne pysäköintitasolle.

5 Tulokset

Eri standardien mukaiset laskentatavat minimiraudoitukselle vaikuttavat hyvin samanlaisilta. Kaikki laskentatavat perustuvat betonipoikkileikkauksen mittojen hyödyntämiseen. Lisäksi laskentaan voi vaikuttaa teräksen ja betonin lujuusominaisuudet. Laskelmat minimiraudituksen määrittämiseen esimerkin mukaisessa kohteessa yhteen suuntaan kantavalle laatalle on esitetty liitteessä 1. Minimirauditusalan määrät:

- Eurokoodin mukainen arvo on $458 \text{ mm}^2/\text{m}$
- ACI-ohjeiden mukainen arvo on $700 \text{ mm}^2/\text{m}$
- AS mukainen arvo on $762,5 \text{ mm}^2/\text{m}$

Minimirauditus yhteensä:

- Eurokoodi 4422 kg
- ACI 5830 kg
- AS 7000 kg

Rauditusalan perusteella voisi luulla, että laatan rauditukseen kuuluu Eurokoodin mukaan selvästi vähiten terästä. Näin ei kuitenkaan aivan ole. Eurokoodin vaatima $458 \text{ mm}^2/\text{m}$ terästä eroaa noin 35 % ACI vastaavasta arvosta, mutta kokonaiskilomäärissä on eroa enää 25 %. Tämä johtuu ACI vaatimien terästen lyhemmästä pituudesta. Teräkset jännevälin keskellä ovat vain yhden kolmasosan vapaan jännevälin pituudesta, kun taas eurokoodin mukaan rauditus kulkee koko jännevälin ylitse.

Eurokoodin ja AS välillä vastaavanlaista eroa ei ole. Rauditusalojen ja kokonaiskilomäärien välisissä suhteissa ei ole eroa kuin noin 3 %-yksikköä.

Ristiin kantavien laattojen osalta ACI-ohjeissa oleva maininta positiivisten momenttien kohdalla raudituksen poisjättämisestä voisi vähentää käytettävän teräksen määrää. Tähän liittyy kuitenkin ehto, jonka mukaan taivutusjännitys ei saa ylittää arvoa $0,17\sqrt{f'c}$, joten tämäkään ei ole yleispätevä sääntö.

Työkalua tehokkaan rauditussuunnitelman laadintaan ei näillä tiedoilla vielä voida tehdä. Tarkasteltavat standardit tarjoavat mahdollisuudet ikään kuin yleisten tapausten laskentaan, mutta esimerkiksi minimiraudituksen vähentäminen tulisi suunnitella ainakin vielä toistaiseksi tapauskohtaisesti.

6 Pohdinta

6.1 Oma oppiminen

Ammattikorkeakoulun opinnoissa ei käsitellä kovinkaan laajasti jälkijännitettyjä rakenteita, eikä myöskään ulkomaisia standardeja erityisemmin. Tästä syystä opinnäytetyöprosessin aikana on saanut oppia paljon uusia asioita, joista on mahdollisesti hyötyä työelämässä ja jatko-opinnoissa.

6.2 Opinnäytetyön hyödynnettävyys

Opinnäytetyön osalta ei päästy kaikkiin tavoitteisiin. Ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää millä perusteilla Eurokoodin kohdan 9.2.1 minimirauditusta voitaisiin vähentää. Minimiraudituksen laskennan osalta onnistuttiin löytämään eroja standardien välillä. Näillä ei kuitenkaan ollut vaikutusta minimiraudituksen määrään yhteen suuntaan kantavilla laatoilla. Sen sijaan ristiin kantavilla laatoilla ACI-ohjeiden mukaan minimirauditusta ei tietyissä tilanteissa tarvittaisi.

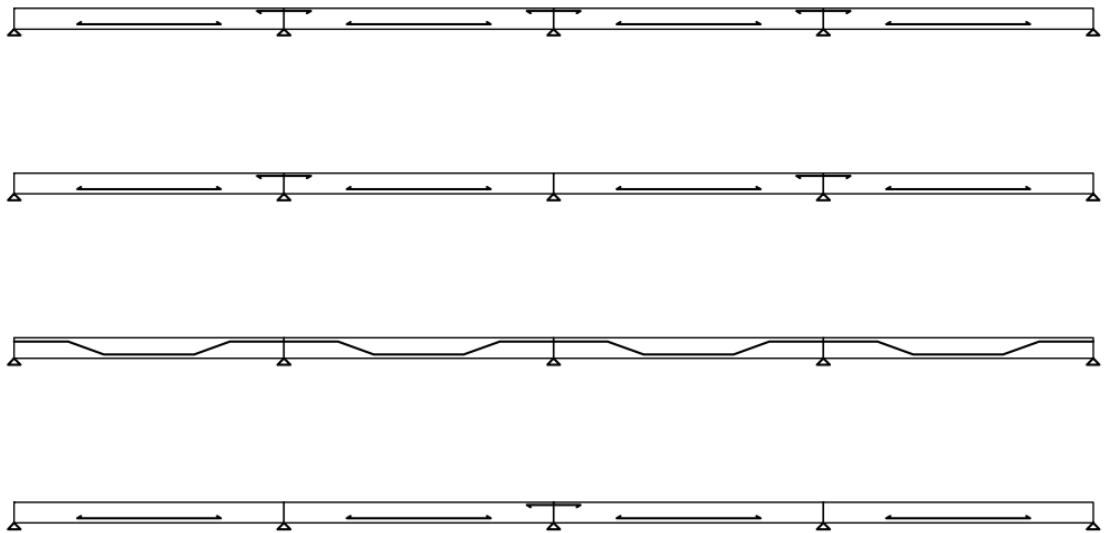
Tavoitteena oli myös luoda työkalu tehokkaan raudoitussuunnitelman laadintaan. Tämän osalta tavoitteeseen ei päästy. Käsiteltävät standardit eivät tarjoa suoraan laskuperusteita Eurokoodin kohdan 5.10.1 (6) menetelmän E laskentatavan määrittämiseksi, minkä mukaan minimiraudoitusta olisi mahdollista vähentää (SFS-EN 1992-1-1, 2015, 75). Jotta tämän kohdan huomioon ottavan yleispätevän laskentamenetelmän voisi kehittää, tulisi jälkijännitetyjen rakenteiden käyttäytyminen ja mitoituslaskelmat tuntea minimiraudoitusta paljon laajemmin etenkin tartunnattomien jänteiden tapauksessa.

6.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet

Työn aikana tuli esiin mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Standardien minimiraudoituksen yhteensopivuus olisi yksi selvitettävä asia. ACI-ohjeissa pääteräkset ovat kentän kohdalla lyhyempiä, kuin Eurokoodin mukaan, mutta ACI mukaan raudoitusta tarvitaan suurempi pinta-ala. Olisiko ACI mukaisia lyhyempiä tankoja mahdollista yhdistää Eurokoodin vaatimaan pienempään raudoitusalaan?

Raudoituksen hieman erilainen asemointi Eurokoodin ja ACI-ohjeiden välillä aiheuttaa eroja rakenteen kestävyudessa ja voimien jakautumisessa. Lyhyempien terästen tapauksessa laatan alapintaan jää raudoittamatonta alaa, joka ei ole yhtä kestävä, kuin raudoitettu ala, ainakaan taivutuksen ja vedon näkökulmasta. Tähän liittyen voitaisiin tarkastella myös rakenteen toiminnan muuttamista jänteiden vaurioituessa. Kestääkö rakenne ilman äkillistä murtumista jänteen rikkoutuessa, jos teräkset ovat totuttua lyhyempiä tai niitä esimerkiksi vähennetään laatan yläpinnasta. Havainnollistus terästen erilaisesta sijoittelusta

kuvassa 16.



Kuva 16. Eräitä mahdollisia tapoja järjestää laatan raudoitus.

Tässä voitaisiin tarkastella tarjoaisiko terästen erilainen sijoittelu rakenteessa mahdollisia säästöjä kestävyttä olennaisesti huonontamatta.

Terästen sijoittelun lisäksi voitaisiin tarkastella kuitubetonin käyttöä jännitetyissä rakenteissa. Voisiko terästankojen osittainen korvaaminen teräskuiduilla tuoda säästöjä, tai kannattaisiko kaikki jännittämättömät teräkset vaihtaa kuituihin.

Lähteet

- ACI 318M-08. 2008. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary. American Concrete Institute.
- Arkworks Arkkitehdit Oy. 2022. As. Oy Vantaan Huvikumpu. <https://www.arkworks.fi/portfolio/veturipolun-puukerrostalot/#> 15.5.2022.
- AS 3600-2009. 2009. Concrete structures. Standards Australia.
- AS 5100.5:2017. 2017. Bridge design Part 5: Concrete. Standards Australia.
- British Standards Institution. 2022. Eurocode 2: Design of concrete structures - General rules and rules for buildings. <https://shop.bsigroup.com/products/eurocode-2-design-of-concrete-structures-general-rules-and-rules-for-buildings/standard.29.4.2022>.
- BS 5400: Part 4: 1990. 1990. Steel, concrete and composite bridges Part 4. Code of practice for design of concrete bridges. British Standards Institution.
- BS 8110-1:1997. 1997. Structural use of concrete – Part 1: Code of practice for design and construction. British Standards Institution.
- BS EN 1992-1-1:2004. 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.
- Kaupunkiliitto. 1982. Vesisäiliöt. Lahti: Lahden Kirjapaino ja Sanomalehti Oy.
- Lavia, N. 2020. Lapin keskussairaalan park-kialueen tilanne helpottuu – Henkilökunnan autot pysäköidään vastaisuudessa uuteen pysäköintitaloon. Lapin Kansa. <https://www.lapinkansa.fi/lapin-keskussairaalan-parkki-alueen-tilanne-helpott/2658767> 15.5.2022.
- Leskelä, M. 2008. BY 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- Naaman, A. 2004. Prestressed Concrete Analysis and Design Fundamentals Second Edition. Michigan: Techno Press 3000.
- NA to BS EN 1992-1-1:2004. 2004. UK National Annex to Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings. British Standards Institution.
- Petrow, S. 2015. BY 63 Ruiskubetonointiohjeet 2015. Helsinki: BY-koulutus.
- Ruohomäki, J., Jormanainen, P., Pärssinen, V., Saarikivi, E. & Söderholm, K. 2006. Raudoitustyöt. 6. painos. Helsinki: Rakennustieto.
- Sainio, O. 2007. Betonirakenteiden perusteiden oppikirja. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- SFS-EN 1992-1-1. 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- SSAB. 2022. Teräsmarkkinat ja SSAB:n asema. <https://www.ssab.com/fi-fi/ssab-konserni/tietoja-ssabsta/markkinaymparisto/terasmarkkinat-ja-ssabn-asema>. 20.5.2022.
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2017. BY 69 Tartunnattomat jänteet betonirakenteissa 2017. Helsinki: BY-koulutus.
- Suomen Betoniyhdistys ry. 2018. BY 201 Betonitekniikan oppikirja 2018. 6. päivitetty painos. Helsinki: BY-koulutus.
- Suomen RakMK. 2019. Rakenteiden lujuus ja vakaus. Betonirakenteet. Helsinki: Ympäristöministeriö

- The Concrete Society. 2022. Design codes and standards. <https://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=24>. 19.05.2022.
- The World Steel Association. 2022. #steelFacts. <https://worldsteel.org/about-steel/steel-facts/>. 18.5.2022.
- Vahanen-yhtiöt. 2022. Jälkijännitetyillä ja paikalla valetuilla rakenteilla kestoä, käytettävyyttä ja laatua vaativiin kohteisiin. <https://vahanen.com/fi/palvelut/suunnittelu-ja-arkkitehtuuri/rakennesuunnittelu/jalkijannitetyt-ja-paikallavaletut-rakenteet/>. 2.3.2022.
- YIT. 2020. Jälkijännitys auttaa kantamaan suurempia kuormia. <https://www.yit.fi/ytimessa/jalkijannittaminen/>. 2.3.2022.

Laatan minimirauoituksen laskenta

Rasitusluokat liikennöity pihakansi: XC4, XD1, XF3
suunnittelukäyttöikä 50 vuotta

Laataston jännevälit 5 x 7,5 m leveys 18 m

$$l := 7.5 \text{ m}$$

Rakennejärjestelmä

- jälkijännitetty palkkilaatasto
- jäykistys mastopilareilla
- pilarien ja tason liitokset otaksuttu niveliksi

Laatan paksuus 350mm

Koko leveys 18m, koko pituus 37.5m

$$h := 350 \text{ mm} \quad D := 350 \text{ mm}$$

$$b_{kok} := 18 \text{ m} \quad L_{kok} := 37.5 \text{ m}$$

Tuen/palkin leveys

$$d_{palkki} := 600 \text{ mm}$$

Kuormat

- seuraamusluokka CC2
- muuttuva hyötykuorma $q=5\text{kN/m}^2$, SFS-EN kuormaluokka G
- pysyvä hyötykuorma $g=10\text{kN/m}^2$

Materiaalitiedot (SFS-EN 1992-1-1)

- betoniluokka (C30/37)

$$f_{ck} := 30 \text{ MPa} \quad E_{cm} := 32.8 \text{ GPa} \quad f_{ctm} := 2.9 \text{ MPa}$$

betoniteräks

$$f_{yk} := 500 \text{ MPa} \quad E_s := 200 \text{ GPa}$$

tiheys

$$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad f_y := f_{yk}$$

Jänneteräks ja -järjestelmä

- tartunnattomat yksittäiset jänneet rasvalla täytetyssä suojaputkessa, suojaputken halkaisija (ETA-123-123)

$$d_{sp} := 20 \text{ mm}$$

jännepunos $d=15,7\text{mm}$, Y1860 S7 1640/1860 ($f_{p0,1k}/f_{pk}$), $A_p=150\text{mm}^2$

$$d_{jp} := 15.7 \text{ mm}$$

murtolujuus

$$f_{pk} := 1860 \text{ MPa}$$

0,1 rajan ominaisarvo

$$f_{p0.1k} := 1640 \text{ MPa}$$

yhden punoksen pinta-ala

$$A_{p1} := 150 \text{ mm}^2$$

EC2 Suomen kansallinen liite

$$b_t := 1000 \text{ mm}$$

Määritetään suojabetonipeite:

Pääterästen halkaisija

$$d_{pt} := 10 \text{ mm}$$

Arvot Eurokoodin mukaan

$$c_{min.b} := d_{pt} = 10 \text{ mm} \quad c_{min.dur} := 30 \text{ mm} \quad \Delta c_{dev} := 10 \text{ mm}$$

$$c_{min} := \max(c_{min.b}, c_{min.dur}, 10 \text{ mm}) = 30 \text{ mm}$$

$$c_{nom} := c_{min} + \Delta c_{dev} = 40 \text{ mm} \quad d := h - c_{nom} - \frac{d_{pt}}{2} = 305 \text{ mm}$$

Vähimmäisraudoitusalan laskeminen kohdan 9.2.1. mukaisesti

$$A_{s,min} := 0.26 \cdot \left(\frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \right) \cdot b_t \cdot d = 459.94 \text{ mm}^2 \quad 0.0013 \cdot b_t \cdot d = 396.5 \text{ mm}^2$$

Valitaan $\Phi 10$ k150 524mm²

$$k_{jako.pt.s} := 150 \text{ mm}$$

$$k_{pl.pt.ec} := \frac{b_{kok}}{k_{jako.pt.s}} = 120$$

Laatan leveys on 18 m, joten 150mm teräsjaolla tarvitaan 120 tankoa.

Jatkospituudet

Arvot Eurokoodin taulukosta 8.2

$$\alpha_1 := 1 \quad \alpha_2 := 1 \quad \alpha_3 := 1 \quad \alpha_4 := 0.7 \quad \alpha_5 := 1 \quad \gamma_c := 1.35$$

Käytetään teräksen myötölujuutta σ_{sd} arvona, jolloin ollaan varmalla puolella.

$$\sigma_{sd} := 434 \text{ MPa} \quad f_{ctd} := 1 \cdot \frac{2 \text{ MPa}}{\gamma_c} = (1.481 \cdot 10^6) \text{ Pa}$$

$$f_{bd} := 2.25 \cdot f_{ctd} = (3.333 \cdot 10^6) \text{ Pa}$$

$$l_{b.rqd} := \left(\frac{d_{pt}}{4} \right) \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}} = 0.326 \text{ m}$$

$$l_b := l_{b.rqd} \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 = 0.228 \text{ m}$$

BY69 Laskentaohjeen mukaan viedään pääteräkset koko alapinnan matkalla.

Yhden tangon pinta-ala

$$A_{10mm} := \pi \cdot (5 \text{ mm})^2 = (7.854 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^2$$

Pääterästen kokonaispituus: teräksen pituus on 12m jolloin 37,5m matkalla joudutaan jatkamaan tankoa kolme kertaa. Tähän lisätään sama jatkos tuelle ja saadaan 39090mm tankoa koko alapinnan matkalle.

$$L_{ap.pt.ec} := 39090 \text{ mm}$$

Pääterästen kokonaistilavuus alapinnassa:

$$V_{ap.pt.ec} := kpl_{pt.ec} \cdot L_{ap.pt.ec} \cdot A_{10mm} = 0.368 \text{ m}^3$$

Yläpinnan raudoitus

Ulottettava L/6 päähän tuen molemmista reunoista

$$L_{yp.pt.ec} := \frac{l}{6} \cdot 2 + d_{palkki} = 3.1 \text{ m}$$

Yläpinnan terästen tilavuus:

$$V_{yp.pt.ec} := 4 \cdot kpl_{pt.ec} \cdot L_{yp.pt.ec} \cdot A_{10mm} = 0.117 \text{ m}^3$$

Pääterästen paino

$$m_{pt.ec} := \rho_s \cdot (V_{ap.pt.ec} + V_{yp.pt.ec}) = 3809.462 \text{ kg}$$

Jakoterästen määrä on 20 % pääterästen määrästä.

$$0.2 \cdot A_{s.min} = 91.988 \text{ mm}^2$$

Valitaan $\Phi 8$ k400 126mm²

$$k_{jako.jt.s} := 400 \text{ mm}$$

Tuet 5 x 600 mm, johon ei tarvitse jakoraudoitusta (Lkok mittaan ei ole otettu huomioon reunatukien keskeltä ulkopuolelle ulottuvaa osaa, joten lasketaan 5 tuella. Lkok matkalla on 4 keskitukea ja kaksi reunatuen puolikasta = 5.

$$kpl_{jt.ec} := \frac{L_{kok} - 5 \cdot d_{palkki}}{k_{jako.jt.s}} = 86.25 \text{ tankoa jakoraudoitukseen}$$

Yhden jakoteräksen pinta-ala

$$A_{8mm} := \pi \cdot (4 \text{ mm})^2 = (5.027 \cdot 10^{-5}) \text{ m}^2$$

Jakoterästen kokonaistilavuus

$$V_{jt.ec} := kpl_{jt.ec} \cdot b_{kok} \cdot A_{8mm} = 0.078 \text{ m}^3$$

Raudoituksen kokonaiskilomäärä

$$V_{kok.ec} := V_{yp.pt.ec} + V_{ap.pt.ec} + V_{jt.ec} = 0.563 \text{ m}^3$$

$$m_{ec} := \rho_s \cdot V_{kok.ec} = 4422.054 \text{ kg}$$

ACI-ohjeet

Lasketaan pinnan ja painopisteen välinen alue A_{ct} . Käytetään tarkasteltavan alueen leveytenä 1m.

$$A_{ct} := \frac{350 \text{ mm}}{2} \cdot 1000 \text{ mm} = 0.175 \text{ m}^2$$

$$A_s := 0.004 \cdot A_{ct} = 700 \text{ mm}^2$$

Pääteräksset

valitaan T12 k150 754mm²

$$k_{jako.pt.aci} := 150 \text{ mm}$$

1/3 vapaasta jännevälistä on raudoituksen katkaisumitta.

$$L_{ap.pt.aci} := \frac{1}{3} \cdot (l - 600 \text{ mm}) = 2.3 \text{ m}$$

150mm jaolla 18m leveydellä tankoja tarvitaan:

$$kpl_{pt.aci} := \frac{b_{kok}}{k_{jako.pt.aci}} = 120$$

Kenttiä on 5 kappaletta. Lasketaan kokonaisteräsmäärä kaikille kentille.

$$L_{ap.pt.kok.aci} := kpl_{pt.aci} \cdot 5 \cdot L_{ap.pt.aci} = 1380 \text{ m}$$

Kenttäterästen tilavuus:

$$\text{Yhden 12mm tangon pinta-ala} \\ A_{12mm} := \pi \cdot (6 \text{ mm})^2 = (1.131 \cdot 10^{-4}) \text{ m}^2$$

$$V_{ap.pt.aci} := L_{ap.pt.kok.aci} \cdot A_{12mm} = 0.156 \text{ m}^3$$

Tuen kohdalla

valitaan T12 k150 754mm²

Jatketaan raudoitusta 1/6 vapaasta jännevälistä tuen molemmin puolin.

Raudoituksen katkaisumitta keskituilla on:

$$L_{yp.pt.keski.aci} := 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot (l - 600 \text{ mm}) + d_{palkki} = 2.9 \text{ m}$$

150mm jaolla tukiterästen määrä keskituilla 18m matkalla on sama kuin pääterästen eli 120 kpl.

Keskitukien terästen yhteenlaskettu pituus on.

$$L_{keskituki.aci} := kpl_{pt.aci} \cdot 4 \cdot L_{yp.pt.keski.aci} = 1392 \text{ m}$$

Ankkurointi reunatuella on palkin leveys, jonka lisäksi tanko ulotetaan 1/6 verran vapaasta jännevälistä kentän puolelle. Reunatukien terästen pituus on:

$$L_{yp.pt.pääty.aci} := d_{palkki} + \frac{1}{6} \cdot (l - 600 \text{ mm}) = 1.75 \text{ m}$$

Tankomäärä on sama kuin aikaisemmin. Nyt tukia on kaksi kappaletta. Reunatukien terästen pinta-ala on.

$$L_{päätytuki.aci} := kpl_{pt.aci} \cdot 2 \cdot L_{yp.pt.pääty.aci} = 420 \text{ m}$$

$$V_{yp.pt.aci} := (L_{keskituki.aci} + L_{päätytuki.aci}) \cdot A_{12mm} = 0.205 \text{ m}^3$$

Kilomäärä teräksen tiheyden ja tilavuuden avulla laskettuna:

Pääterästen kokonaiskilomäärä

$$V_{pt.kok.aci} := V_{yp.pt.aci} + V_{ap.pt.aci} = 0.361 \text{ m}^3$$

$$m_{pt.aci} := \rho_s \cdot V_{pt.kok.aci} = 2833.903 \text{ kg}$$

Jakoteräokset (kutistuma- ja lämpötilateräokset)

Jakoterästen prosenttiosuus pinta-alasta:

$$pros := \frac{0.0018 \cdot 420 \text{ MPa}}{f_y} = 0.0015$$

$$pros \cdot b_t \cdot h = 529.2 \text{ mm}^2$$

Valitaan T12 k200 565mm²

$$k_{jako.jt.aci} := 200 \text{ mm}$$

Jakoteräksiä tarvitaan 200 mm jaolla:

$$kpl_{jt.aci} := \frac{L_{kok}}{k_{jako.jt.aci}} = 187.5$$

188 kpl 18m pitkällä kentällä

$$L_{jt.aci} := kpl_{jt.aci} \cdot b_{kok} = 3375 \text{ m}$$

$$V_{jt.aci} := L_{jt.aci} \cdot A_{12mm} = 0.382 \text{ m}^3$$

Tilavuus jakorauoitukselle

$$V_{kok.aci} := V_{ap.pt.aci} + V_{yp.pt.aci} + V_{jt.aci} = 0.743 \text{ m}^3$$

Terästen kilomäärä yhteensä

$$m_{kok.aci} := \rho_s \cdot V_{kok.aci} = 5830.275 \text{ kg}$$

Australian Standards

Tarkasteltava leveys $b := 1000 \text{ mm}$

Jänneväli $L := 7500 \text{ mm}$

Minimiraudoitus

$$A_{st} := 0.0025 \cdot b \cdot d = 762.5 \text{ mm}^2$$

Valitaan $\phi 10$ k100 785mm²

tankokoko d_b , jako

$$d_b := 10 \text{ mm} \quad k_{jako.pt.as} := 100 \text{ mm}$$

Raudoituksen järjestäminen

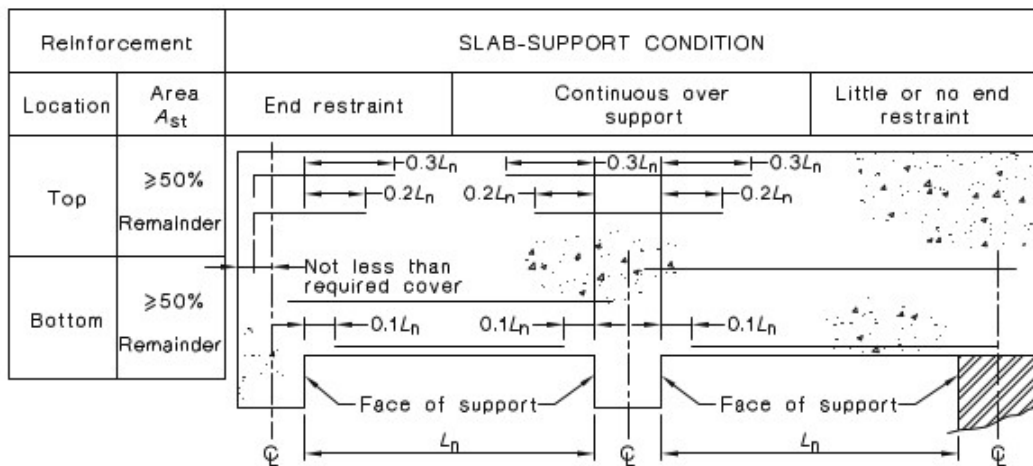


FIGURE 9.1.3.2 ARRANGEMENT OF REINFORCEMENT

Alapinnan pääteräukset

Jänneväli 7500, tuen leveys 600 mm

$$L_n := 7500 \text{ mm} - 600 \text{ mm} = 6900 \text{ mm}$$

Alapinnan raudoituksen pituus

$$L_{ap.pt.lyhyt} := L_n - 2 \cdot 0.1 \cdot L_n = 5520 \text{ mm}$$

100mm jaolla koko 18m leveyttä kohti tarvitaan raudoitusta yhdelle jännevälille:

$$kpl_{pt.as} := \frac{b_{kok}}{k_{jako.pt.as}} = 180$$

$$180 \cdot 5 = 900$$

Yhteensä tankoja tarvitaan viidelle jännevälille siis 900 kpl.

Vähintään neljäsosa alapinnan tangoista tulee ulottaa tuen yli. Lasketaan vielä näiden tankojen pituus.

$$L_{ap.pt.pitkä} := l + 12 \cdot d_b = 7.62 \text{ m}$$

Tarvitaan 3/4 lyhyitä tankoja eli 675 ja 1/4 pidempiä eli 225.

$$L_{ap.pt.kok.as} := \frac{3}{4} \cdot 5 \cdot kpl_{pt.as} \cdot L_{ap.pt.lyhyt} + \frac{1}{4} \cdot 5 \cdot kpl_{pt.as} \cdot L_{ap.pt.pitkä} = 5440.5 \text{ m}$$

Tankokoko on 10mm, joten kun lasketaan tangon pinta-ala, saadaan laskettua koko raudoitteen tilavuus.

$$A_{10mm} := \pi \cdot (5 \text{ mm})^2 = 78.54 \text{ mm}^2$$

$$V_{ap.pt.as} := L_{ap.pt.kok.as} \cdot A_{10mm} = 0.427 \text{ m}^3$$

Kun tämä kerrotaan teräksen tiheydellä, saadaan selville alapinnan terästen massa.

$$m_{ap.pt.as} := \rho_s \cdot V_{ap.pt.as} = 3354.273 \text{ kg}$$

Raudoitus tuella

Yläpinnan raudoituksen pituus: Koska nyt lasketaan pelkästään teräksen kilomäärää, voidaan laskennassa käyttää yksinkertaistusta tankojen pituudesta. Kuvan perusteella puolet tuen raudoituksesta tulee ulottaa 0.2Ln etäisyydelle tuesta ja puolet 0.3Ln etäisyydelle. Käytetään laskennassa 0.25Ln ja saadaan sama teräsmäärä.

$$L_{yp.pt.as} := 600 \text{ mm} + 2 \cdot 0.25 \cdot L_n = 4050 \text{ mm}$$

100mm jaolla koko 18m leveyttä kohti tarvitaan raudoitusta yhdelle tuelle:

$$kpl_{pt.as} := \frac{b_{kok}}{k_{jako.pt.as}} = 180$$

Yhteensä tankoja tarvitaan neljälle tuelle siis 720 kpl.

Kun lasketaan tankojen katkaisupituus ja kerrotaan se kappalemäärällä, saadaan koko keskitukien raudoitusmäärä. Tähän tulee laskea lisäksi vielä raudoitus reunatuilla.

$$L_{keskituki.as} := 4 \cdot kpl_{pt.as} \cdot L_{yp.pt.as} = 2916 \text{ m}$$

Reunatuella: Käytetään samaa yksinkertaistusta raudoituksen katkaisupituuden suhteen eli katkaisupituus on 0.25Ln + ankkurointipituus. Tähän lisätään ankkurointipituus 12db tai D riippuen siitä kumpi arvoista on suurempi.

$$L_{yp.pt.pääty.as} := 0.25 \cdot L_n + \max(10 \cdot d_b, D) = 2.075 \text{ m}$$

$$L_{päätytuki.as} := 2 \cdot kpl_{pt.as} \cdot L_{yp.pt.pääty.as} = 747 \text{ m}$$

Tankokoko on 10mm.

$$V_{yp.pt.as} := (L_{päätytuki.as} + L_{keskituki.as}) \cdot A_{10mm} = 0.288 \text{ m}^3$$

$$V_{pt.as} := V_{yp.pt.as} + V_{ap.pt.as} = 0.715 \text{ m}^3$$

Lasketaan pääterästen massa.

$$m_{pt.as} := \rho_s \cdot V_{pt.as} = 5612.65 \text{ kg}$$

Jakorauδοitus:

$$prosentti := \frac{1750}{\sqrt{\frac{L}{mm}}} = 20.207$$

Käytetään minimiä 30%.

$$A_{st} \cdot 0.3 = 228.75 \text{ mm}^2$$

Valitaan $\phi 10$ k300 262mm²

$$k_{jako.jt.as} := 300 \text{ mm}$$

Standardi ei ota tarkemmin kantaa jakorauδοituksen sijoittamiseen, joten käytetään Eurokoodin mukaisia periaatteita eli käytetään jakorauδοitusta laatan alapinnassa.

Alapintaan tarvittavat tangot:

$$kpl_{jt.as} := \frac{L_{kok}}{k_{jako.jt.as}} = 125$$

$$A_{10mm} := \pi \cdot (5 \text{ mm})^2$$

$$V_{jt.as} := b_{kok} \cdot kpl_{jt.as} \cdot A_{10mm} = 0.177 \text{ m}^3$$

Jakorauδοituksen kokonaiskilomäärä

$$m_{jt.as} := \rho_s \cdot V_{jt.as} = 1387.21 \text{ kg}$$

Kaikki rauditus yhteensä:

$$m_{as} := m_{pt.as} + m_{jt.as} = 6999.859 \text{ kg}$$