

Juha Matti Antero Silvennoinen

JÄLKIJÄNNITYSMENETELMIEN VERTAILU

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Olli Asp
Toukokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Juha Matti Antero Silvennoinen: Jälkijännitysmenetelmien ja merkkien vertailu
(Comparison of post-tensioning methods)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2024

Rakenteen esijännittäminen on vakiinnuttanut asemansa suosittuna rakennusmenetelmänä isommissa betonirakenteissa. Se mahdollistaa hoikemille rakenteille materiaalisäästöjä ja lisää kantavuutta verrattaessa suuremmissa perinteisissä teräsbetonirakenteissa. Rakenteen esijännitys tarkoittaa rakenteen jännittämistä ennen käytöstä aiheutuvaa kuormitusta. Paikallavaletun betonirakenteen jälkijännitysmenetelmää nimitetään ankkurijännemenetelmäksi. Työssä käsitellään tarkemmin ankkurijännemenetelmän sisäisiä jännekulkuja.

Työssä keskitytään selvittämään, esittämään ja vertailemaan sisäisien jännekulkujen ankkureita ja niiden raudoituksia. Työssä tarkasteltavia jännekulkuja ovat tartunnallinen jännepunosankkuri ja tartunnaton rasvapunosankkuri. Työn aluksi kartoitetaan jälkijännityksen ja jännekulkujen taustaa ja teoriaa, jonka jälkeen kartoitetaan taustalla ilmenevä ilmiö. Kartoittamisen jälkeen esitellään ankkureiden valmistajien tuotteiden ominaisuuksia. Esittelyn jälkeen kyseisiä ankkureita vertaillaan keskenään niiden ominaisuuksien avulla. Vertailun tarkasteluna toimivat ankkurin ja raudoituksien muotoilut ja ominaisuudet. Vertailun tarkoituksena on selvittää eroavaisuudet valmistajien tuotteiden välillä. Tämän pohjalta muodostetaan päätelmä ankkureiden erilaisuudesta tai samankaltaisuudesta.

Tutkimuksen pohjalta todetaan ankkureiden olevan samankaltaisia, mutta ei kuitenkaan täsmälleen samoja. Jälkijännitetyt rakenteet ovat vaativimman toteutusluokan rakenteita ja muotoilua on kehitetty tuotekehityksestä asti. Tämä ominaisuus korostaa jännitettyjen rakenteiden tärkeyttä ja edistyneisyyttä tulevaisuuden rakennusprojekteissa. Jännitetyn rakenteen kyky tarjota kevyempää, vahvempaa ja taloudellisempaa rakenneratkaisua täyttää tarpeet kestäväälle ja tehokkaalle rakentamiselle.

Avainsanat: Jälkijännitys, rakenteen esijännittäminen, ankkurijännemenetelmä, tartunnallinen jännepunos ankkuri, tartunnaton jännepunos ankkuri, rasvapunos

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. TEORIA	3
2.1 Tartunnallinen ja tartunnaton jännepunosrakenne	3
2.1.1 Yleistä.....	3
2.1.2 Tartunnallinen jännepunos	6
2.1.3 Tartunnaton jännepunos.....	8
2.2 Paikallinen, yleinen ja päädyllinen alue	9
2.2.1 Yleistä.....	9
2.2.2 Paikallinen alue	12
2.2.3 Yleinen ja nurkka-alue	14
3. VALMISTAJIEN TUOTTEET	17
3.1 Yleistä	17
3.2 Dywidag	17
3.3 Mekano4	20
3.4 BBR.....	22
3.5 Freyssinet.....	24
4. VERTAILU	26
4.1 Muotoilu ja punosten asettelu	26
4.2 Jälkijännitysankkurin ominaisuuksia ja mittasuhteita	26
4.3 Jälkijännitysankkurin helix-, helica- tai spiraalirauditus	27
4.4 Jälkijännitysankkurin hakaraudituksen mittoja ja vaatimuksia	28
5. YHTEENVETO	29
LÄHTEET	32

1. JOHDANTO

Sillat ja parkkihallit ovat suuria betonirakenteita, joihin kohdistuu ja syntyy suuria kuormia. Rakenteet mitoitetaan kohdistuvia kuormia kestäviksi. Betonirakenteen kapasiteettia lisätään muokkaamalla rakenteen muotoa, betoniseosta, lisäämällä raudoitusta tai lisäämällä jälkijännitys. Tässä työssä keskitytään neljänteen vaihtoehtoon eli jälkijännitykseen. Tämä on menetelmältään tehokas vaihtoehto betonirakenteen vahvistamiselle, joka mahdollistaa normaalia suuremmat jännevälit verrattuna teräsbetonirakenteisiin, joita ihannoidaan isoissa betonirakenteissa. Jälkijännitysmenetelmän eduiksi nähdään vähempi materiaalin käyttö suhteessa tavanomaiseen betonirakentamiseen, josta seuraa rakenteen hoikkuus. (Laaksonen 2024; Mannonen 2008)

Tässä työssä tarkastellaan ankkurijännitysmenetelmän tartunnallisten ja tartunnattomien rasvapunosten ankkurointialueita eli rakenteiden päätyalueita. Kandidaatintyö on tekijälleen oman oppimisen edellytys. Tarkoituksena on lisätä omaa ymmärrystä ja tietämystä ankkurijännitysmenetelmistä, joita käytetään Suomessa. Työ on kirjallisuuskatsaus teoriaan sekä nykyisiin ja käytettyihin menetelmiin.

Päätutkimuskysymyksenä toimii ”Miten Betonin jälkijännitysmenetelmät eroavat toisistaan valmistajien kesken?”. Alakysymyksinä toimivat ”Miten vaaditut halkaisuraudoitukset eroavat jännitysmenetelmissä valmistajien ohjeistuksien kesken?” ja ”Miten eri jännepunosmääräiset ankkurit eroavat valmistajien kesken?”. Alakysymyksillä tulisi saada vastattua rajauksen mukaisesti pääkysymykseen.

Kandidaatintyön rajauksina toimivat Suomi, ankkuroiden punosmäärät, yhden tartunnattomat jännepunoksen ankkurit, 4–19 tartunnallisen jännepunoksen ankkurit ja ankkurialueet. Mitoittamista käsitellään pelkästään mittasuhteina. Työ rajautuu valmistajiin, joiden tuotteita käytetään Suomessa.

Suomessa käytetään tuotteita, jotka ovat luotettavia. Lisäksi valmistajien määrä ei kasva tällöin liian suureksi työhön suhteutettuna. Toisena rajauksena tarkastellaan jälkijännitykseen ominaista raudoitusta. Tällä tarkoitetaan ankkurointiin kuuluvaa raudoitusta, eikä kohteen kokonaisraudoitusta. Työssä on tarkoitus keskittyä valmistajien eri suosituksiin raudoituksen suhteen. Jos kohdetta katsottaisiin kokonaisuutena, tulisi työstä liian laaja, eikä se vastaisi pääasialliseen tutkimuskysymykseen. Kolmas rajaus liittyy käytetyimpiin ja punosmäärältään

yleisimpiin ankkureihin, joita käytetään tartunnallisissa ja tartunnattomissa jännepunoksissa. Neljännen rajauksen osalta keskitytään rakenteen päähän eli ankkurointialueeseen. Viidentenä rajauksena ei keskitytä mitoittamaan rakennetta, koska työstä tulisi liian laaja ja suhteessa opintokokonaisuuteen raskas.

Toteutukseltaan aihe on kirjallisuuskatsaus. Siinä tarkastellaan hakukoneiden Andorin, Google Scholarin kautta haettuja teoksia, joita ovat diplomityöt, väitöskirjat ja ohjeet. Valmistajien menetelmien vertailussa tietolähteenä toimii European Technical Approval -standardin tuoteselosteet. Tuoteselosteessa on tilastoitu eri menetelmistä saatuja arvoja.

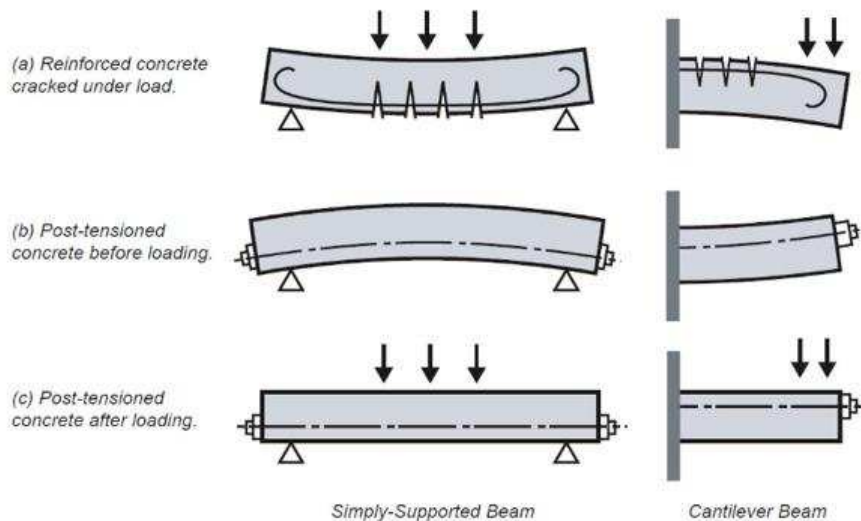
Tutkimuksessa vastataan kysymykseen ”Miten Betonin jälkijännitysmenetelmät eroavat toisistaan valmistajien kesken?” Tämän ennakoitu vastaus on, että eri valmistajien menetelmät ja tuotteet eivät eroa merkittävästi toisistaan. Merkittävä tarkoittaa tässä tilanteessa, että jännityksien suuruudet ja raudoituksien ohjeistettu määrä ja muotoilu eivät suuruusluokaltaan eroa paljoa eli noin 50–100 mm toisistaan. Tuotteita tarkastellaan, että ovatko ne samanlaisia vai onko niissä eroa.

2. TEORIA

2.1 Tartunnallinen ja tartunnaton jännepunosrakenne

2.1.1 Yleistä

Tartunnallisen jälkijännityksen ideana on betonin suhteellisen suuren puristuslujuuden hyödyntäminen ja rakenteen saattaminen puristettuun tilaan, ettei kuormista syntyisi vetoa. Betonirakenteelle tavoitellaan pysyvää esijännitystilaa, jossa minimoidaan vetojännityksiä. Näitä ominaisuuksia parannetaan esijännittämällä, jossa pyritään rakenteeseen aiheuttamaan kuormista aiheutuvaa jännitystilaa vastaan vedetylle puolelle. Kuvassa 1 havainnollistetaan jännitysten vaikutusta betonirakenteeseen. Kohdassa a kuvataan, kuinka betonipalkki taipuu ja halkeilee tavanomaisella raudoituksella. Kohdassa b kuvataan jälkijännitetyn palkin tilannetta ennen kuormaa ja kohdassa c kuvataan kuorman asettamisen jälkeen. (Laaksonen 2024a)

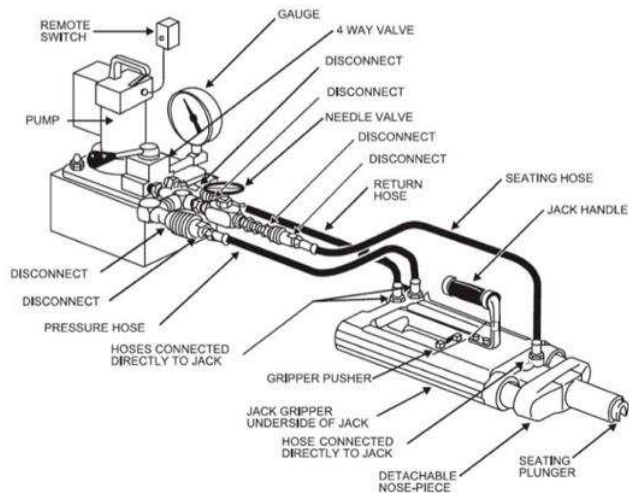


Kuva 1. Jännittämättömän ja jännitetyn betonirakenteen toiminnallinen ero (Maurer-Sanfield 2024).

Jännevoimasta aiheutunut esijännitystilaa laskee erilaisten materiaalista johtuvien häviöiden takia. Betonirakenteen häviöt jaetaan ajasta riippuviin ja välittömiin häviöihin. Välittömiä häviöitä ovat betonin kimmoisa kokoonpuristuminen, jänneankkureiden kiilojen liukuminen jänteen suhteen, jännitysankkureiden toiminta ja muodonmuutosten muodostuminen jännittämisen jälkeen ja jännepunoksen jänteen ja suoja-putken välinen kitka. Ajasta riippuvia häviöitä ovat betonin virumisen ja kutistumisen muodonmuutokset sekä jännepunoksen relaksaatio. (Järviö 2019, s.24—27)

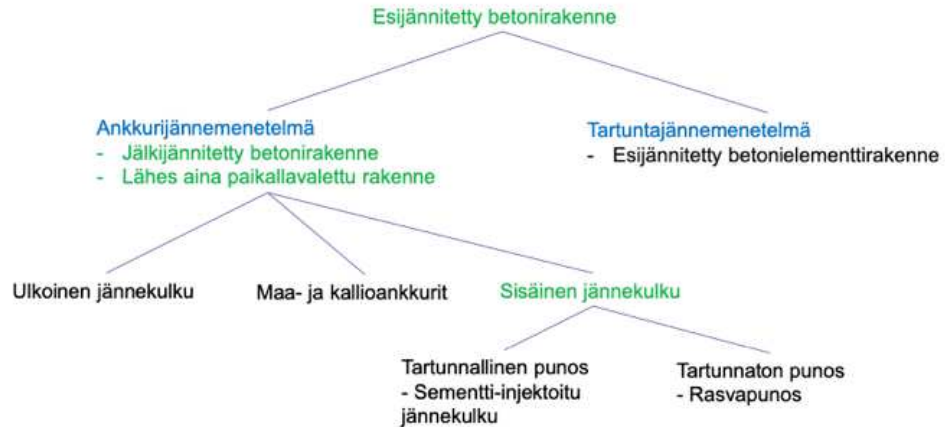
Esijännitys tarkoittaa yleisesti rakenteen jännittämistä ennen sen varsinaista käyttöä. Menetelmiä tarkasteltaessa puhutaan yleisesti esi- tai jälkijännityksestä. Erona jännitysmenetelmillä on se,

millä ajanhetkellä jännitetään rakenteen jännepunokset kuvan 2 mukaisella hydraulisella tunkilla haluttuun jännitystilaan. Esijännityksessä vaijeri kiristetään ennen betonin valamista, jolloin jännepunokseen aiheutettu jännitys siirtyy tartunnan kautta betoniin. Jälkijännityksessä puolestaan jännepunokset kiristetään betonin valamisen ja kovettumisen jälkeen. Jännittämisen lopuksi jännepunokset kiilataan kiiloilla aktiiviankkureihin. Jännepunosten kulut asetetaan kulkemaan kaareutuvasti ainoastaan jälkijännitetyissä rakenteissa, punosten asennustilanteessa ennen betonin valamista. Jännepunosten kulut mahdollistavat jatkuvien rakenteiden jännittämisen.



Kuva 2. Hydraulinen tunkki (PTI Technical Advisory Board 2013).

Aktiiviankkurimenetelmä kattaa jälkijännitetyn ja paikallavaletun betonirakenteen. Kuvassa 3 on havainnollistettu ennen käyttöä olevan esijännitetyn betonirakenteen kronologiaa. Ankkurijännemenetelmiä ovat ulkoinen jännekulku, maa- ja kallioankkurit ja sisäinen jännekulku. Työssä tarkastellaan tarkemmin sisäisiä jännekulkuja ja niiden ankkureita. Sisäiseen jännekulkuun kuuluvat tartunnallinen sementti-injektoitu jännekulku ja tartunnaton jännekulku eli rasvapunos.



Kuva 3. Esijännitetyn betonirakenteen kronologia (Laaksonen 2024a, s. 11).

Sisäisessä jännekulussa betonirakenne jännitetään rakenteen sisältä, kun rakennetta jännitetään jännepunoksen, -ankkurin ja hydraulisen tunkin avulla. Tämän ansiosta betonirakenteen halkeilukapasiteetti kasvaa ja halkeamalevytykset pienentyvät. (Laaksonen 2024a) Jännittämällä betonin taipumaa ja halkeilua pystytään paremmin hallitsemaan kuin rakenteessa, jossa ei ole jännepunoksia (Ranua 2014, s. 5). Seurauksena materiaalin määrä vähenee, jolloin rakenne voidaan toteuttaa hoikempana, ilman halkeilukapasiteetin vähentymistä verrattuna teräsbetonirakenteeseen. Koska materiaalia kuluu vähemmän, tulee se huomioida raudoituksen sijoittelussa ja rakenteen suunnittelussa.

Verrattaessa jännitettyjä rakenteita tavanomaisiin teräsbetonirakenteisiin huomataan merkittäviä eroavaisuuksia. Jännitetty rakenne halkeilee vähemmän kuormitustason takia. Rakenteen taipumat käyttörajatilassa ovat pieniä haikailemattomuuden takia. (Laaksonen 2024a) Lisäksi materiaalia kuluu vähemmän. Jännitetyissä rakenteissa kuluu betonia suurin piirtein 15–30 % ja raudoitusta 60–80 % vähemmän kuin perinteisissä teräsbetonirakenteissa. (Betonitieto 2024) Vähemmästä materiaalista seuraa rakenteen hoikkuus.

Hoikkuutta korostavat suuret jänneväli, jotka mahdollistetaan ankkurijännerakenteilla. Rakenne toimii kimmoisasti ja väsymiskapasiteetti kasvaa puristumisesta, jonka ansiosta rakenne on jäykempi. Näiden lisäksi rakenteeseen vaikuttaa merkittävästi betonin puristuslujuus. Näistä seuraa parempi rakenteen säilyvyys. Säilyvyyttä parantavat rakenteissa käytettävä betonin lujuusluokka ja rakenteen ohjaaminen puristettuun tilaan, jotka ovat jännitetyissä rakenteissa suurempia kuin teräsbetonirakenteessa. Näillä tekijöillä ehkäistään betonin halkeilua, etteivät teräkset korroosioituisi rakenteessa. (Laaksonen 2024a)

Standardeissa käsitellään tukirakenteita, muotteja, materiaaliominaisuuksia, tarkastusraportteja, betonointia, jälkihoitoa, jännitystyötä, betonielementtien asennusta ja tarkastuskäytäntöjä. Toleranssiluokilla kuvataan mittatarkkuustasoa poikkileikkauksen, betoniteräsradoituksen sijainnin ja jatkospituuksien täyttymisen suhteen. Luokkia ovat 1 ja 2, joista 2 on tiukempi.

Jänneteräksillä käytetään tiukinta toleranssiluokkaa. Tästä on yleistetty yksi toleranssiluokka. (Laaksonen (2024a)

Toteutusluokan perusteella valitaan suurin sallittu betonilujuusluokka, jota voidaan käyttää. Toteutusluokka määräytyy rakenneosan toteutuksen haastavuuden perusteella. Jännitetyt rakenteet kuuluvat aina toteutusluokan 3 eli vaativimman mukaiseen toteutustapaan. Toteutusluokan ja toleranssiluokat määräävät materiaaliosavarmuuslukujen käytön. (Laaksonen 2024a)

Onnistuneeseen kokonaisuuteen kuuluu tarkastella raudoituksen ja ankkuroinnin minimietäisyyksiä muista objekteista ja eri reunoista ja pinnoista (Kytölä 2022). Kuvassa 4 on havainnollistettu, kun vähimmäisetäisyydet ovat alittuneet. Kuvan 4 tilanteeseen voi lisäksi vaikuttaa rakenteen virheellinen tai vähäinen raudoitus suhteessa kuormituksen aiheuttamaan jännitykseen. Vähäisestä raudoituksesta seuraa useasti betonin merkittävää halkeilua. (Hamakareem; Rakennusvirhepankki 2017)



Kuva 4. Esimerkki raudoituksen ja ankkurointialueen vähimmäisetäisyyksien alittumisesta (Laaksonen 2024c, s. 11).

Jännitettyjen rakenteiden onnistumisen edellytyksenä on onnistunut kokonaisuus, johon vaikuttaa esimerkiksi onnistunut vähimmäisetäisyydet ja betonin tiivistäminen. Betonin lohkeamisen ja muodonmuutoksen syitä esitellään ankkurialueesta luvussa 2.2.

2.1.2 Tartunnallinen jännepunos

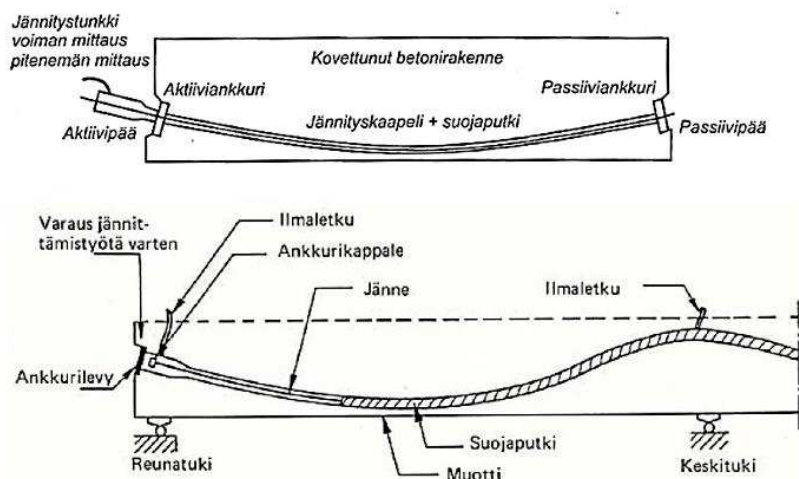
Tartunnallisissa ja tartunnattomissa jännitystavoissa on samankaltaisuuksia ja eroavaisuuksia. Eroavaisuutena ovat jännepunosten asentamistavat, jänteiden suojaus, jänne- ja ankkurirakenne, kuormankantokyky. Jännekulut eroavat jännepunostenpunosten määrällä ankkuria kohden, rakenteella ja rasisasteella.

Tartunnallisessa jänteessä punoksia asennetaan ankkuria kohden useampia, jota on havainnollistettu kuvassa 5 tartunnallisen jännepunoksen rakenteella. Isommasta määrästä jännepunoksia seuraa kronologisesti suurempi kuormankantokyky, kuin yhdestä rasvapunoksesta. (Laaksonen 2024a)



Kuva 5. Tartunnallisen jännepunoksen rakenne (Kärki 2018, s. 10).

Tartunnallisessa menetelmässä valettavan betonin keskelle sijoitetaan suojaputket, joiden sisään sijoitetaan jännepunokset jännittämättömänä. Punoksen tulee päästä liikkumaan vapaasti ja olla irti betonista ennen jännittämistä. Ennen betonivalua putken päihin sijoitetaan aktiivi- ja passiiviankkurit. Betonin lujittumisen jälkeen aloitetaan punosten jännitys kuvan 2 mukaisella hydraulitunkilla. Tunkilla aiheutettu voima siirtyy ankkureiden kautta jännityksenä rakenteeseen. Jännitystyön lopuksi punokset kiillataan niiden päistä ankkurikappaleeseen. Kiillauksen jälkeen suojaputket täytetään injektointimassalla niiden täyttöaukkoja käyttäen. Jäljelle jääneet punoksenpäät leikataan lyhyemmäksi ja valetaan muurauslaastilla suojaten päitä ulkoilmalta. Suojaus toteutetaan teräsosien korroosioitumisen estämiseksi (Laaksonen 2024a). Kuvassa 6 on havainnollistettu tartunnallisen ankkurijännemenetelmän jännekulkua ja rakennetta.



Kuva 6. Tartunnallinen ankkurijännerakenne (Betonitieto 2024).

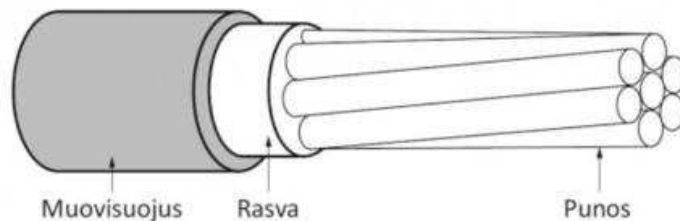
Menetelmää käytetään raskaasti kuormitetuissa paikallavalurakenteissa. Soveltavia rakenteita ovat esimerkiksi sillat. Menetelmien osien valmistajia ovat esimerkiksi Freyssinet, Dywidag, BBR,

Mekano4 ja useita muitakin. Jokaisen valmistajan ankkurointituotteella on oma käyttöseloste, kuten jännepunoksillakin. (Laaksonen 2024a)

2.1.3 Tartunnaton jännepunos

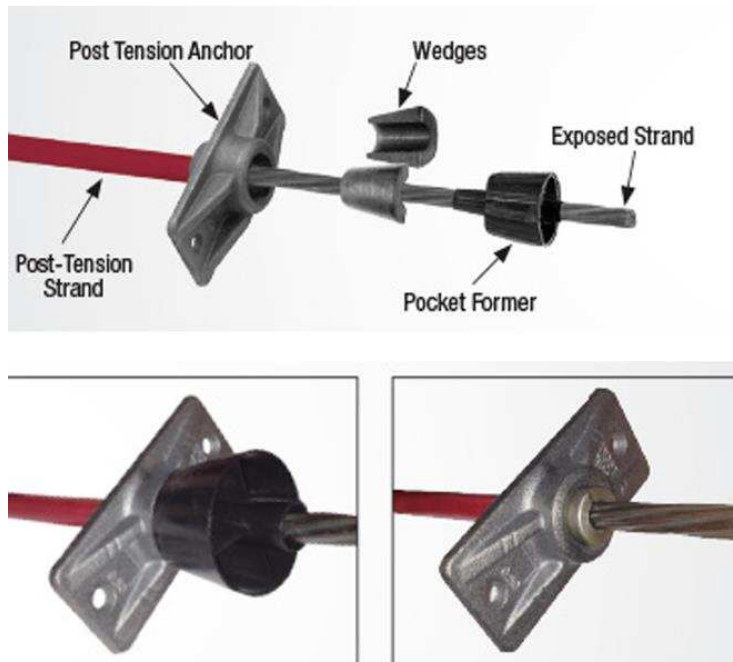
Tartunnattomassa jännepunos-menetelmässä erona tartunnalliseen jännepunokseen on rakenne. Tartunnaton ankkurijännemenetelmä on kehitetty tartunnallisesta ankkurijännemenetelmästä. Menetelmässä yhtä ankkuriparia kohden on yksi punos, kuin tartunnallisessa menetelmässä. (Laaksonen 2024a)

Kuvassa 7 on havainnollistettu tartunnattoman jännepunoksen rakennetta. Punoksen sisäisten lankojen osuminen betoniin estetään ja korroosiosuoja muodostetaan muoviputkella ja janteen ja putken väliin laitettavalla rasvalla. Rasvan tulee sisältää inhibiittia, joka estää korroosion ja kestää jännepunoksen jännittämisestä aiheutuvaa plastisuutta. (Suominen 2019)



Kuva 7. Tartunnattoman jännepunoksen rakenne (Betonitieto 2024).

Asennusvaiheessa, ennen betonin valamista, punoksen päihin asennetaan aktiivi- ja passiiviankkurit. Jännepunos jännitetään hydraulisella tunkilla suunnitelman mukaisella voimalla ja kiilataan ankkuriin betonin valamisen ja riittävän kovettumisen jälkeen. Lopuksi punos katkaistaan polttoleikkaamalla tai kulmaleikkauskoneella. Leikkauksen jälkeen ankkurikappleen kuppi korroosiosuojataan rasvalla, rasvakupilla ja betonilaastilla. Kuvassa 8 on havainnollistettu tartunnattoman aktiivipäisen ankkurin rakennetta.



Kuva 8. Tartunnattoman aktiiviankkurin rakenne (Goodman 2024).

Tartunnattomia jännepunoksia on käytetty kevyemmissä paikallavalurakenteissa. Soveltuvia rakenteita ovat kerrostalot, toimistorakennukset ja parkkihallit. (Laaksonen 2024a; Mannonen 2008)

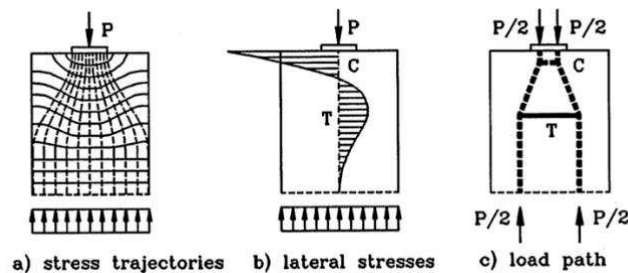
2.2 Paikallinen, yleinen ja päädyllinen alue

2.2.1 Yleistä

Jännityksen siirtymisen rakenteeseen vaatii yleensä ankkurointia jänteiden ja rakenteen välillä eli rakenteen päissä. Jänteet voivat loppua myös keskelle rakennetta. Rakennetta suunniteltaessa tulisi huomioida kuinka edestä siirtyvät voimat vaikuttaa kappaleen materiaaleihin, betoniin ja raudoitukseen. Ankkuroinnista syntyy suuria ja paikallisia jännitystiloja, jotka vaikuttavat osassa poikkileikkauspinnasta. Tästä syystä betonin paikallisten kestävyysien tarkastelu on olennaista onnistuneen lopputuloksen kannalta. Ankkuroinnin kestävyuden arvioinnin taustana toimii yleisimmin kokemus ja erilaiset kokeet. Suurimmat jännitykset syntyvät ankkurijännerrakenteen jännittämisen aikana. Suurimmat jännitykset kohdistuvat alueilla, joissa jännevoimat siirretään rakenteelle. (Laaksonen 2024c)

Jännevoima siirtyy jännitystilanteessa ankkurin kautta suoraan betonirakenteeseen. Tartunnallisissa ankkureista voima siirtyy tartunta-ankkurin välityksellä rakenteeseen. Jännittäessä rakenteeseen syntyy osalle poikkileikkausta suuria puristus- ja poikittaisvetojännityksiä, verrattaessa muuhun rakenteen poikkileikkaukseen. Pistekuorman aiheuttavia puristusjännityksiä arvioidaan Saint Venant -periaatteen mukaisesti. (Kytölä 2022; ScienceDirect 2024)

Kuvassa 9 on havainnollistettu jännityksien ääri viivoja poikkileikkauspinnassa. Kohta a) kuvaa voimien virtausta. Voimien tulee levitä kuormalle vastakkaiseen suuntaan. Tästä aiheutuu purkautumisjännityksiä, eli lateraalisia puristus- ja vetojännityksiä, joita on kuvattu kohdassa b). Heti ankkurista alkaen syntyy puristusjännityksiä ja tämän jälkeen vetojännityksiä. Vetovoiman jälkeen voimat tasaantuvat. Kohdassa c) on havainnollistettu tukirakennemallia.

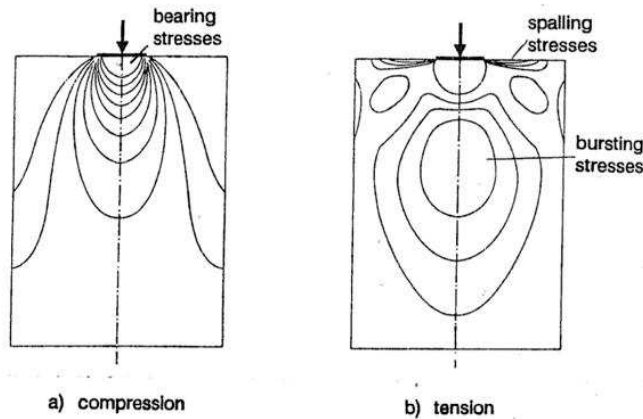


Kuva 9. Jännityksien ääri viivat ja jakautuminen (Wollman 1992, s. 6).

Kolmesta kuvasta voidaan havaita ankkurointialueen ongelmallisen kriittisiä alueita. Kriittisiä alueita ovat välitön kuorman alainen alue, mistä alkaa lateraaliset vetovoimat ja kuormituksen reuna-alueet. Kuvassa 9 on havainnollistettu ankkurilla aiheutetut puristus (C) - ja vetojännitykset (T).

Kuvassa 10 on havainnollistettu puristus- ja vetojännityksien ääri viivat. Kohdassa (a) on kuvattu puristusalueen ääri viivat. Ääri viivojen tiheys kuvaa puristuksen suuruutta. Kuvasta huomataan viivojen olevan tiheimmillään ankkurin seudulla, josta ne harventuvat nopeasti. Patentoidut erikoisankkurit vastaanottavat ja jakavat jännityksiä rakenteeseen erilaisten rajoitusten mukaisesti. Erilaisia rajoituksia ovat esimerkiksi tartunnat rakenteeseen ja rakenteen oma muotoilu. (Wollman 1992)

Kuvassa 10 kohdassa b on kuvattu vetojännityksen ääri viivoja. Vetojännitys alueita ja keskittymiä syntyy puristusalueen ympärille ja ankkurirakenteen reunoille. Pääjännitystilaa voidaan tarkastella yhteen puristus- ja vetojännitys kuvaajia. Jos alueille, jossa on pelkästään vetojännityksiä, ei lisätä tukirakennemallia syntyy tästä betonin lohkeilua tai murtumista.

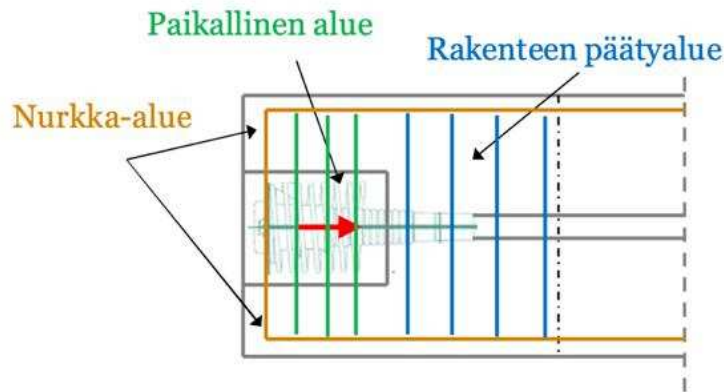


Kuva 10. Jännityksen ääriiviivat samankeskeisellä ankkurilla (Wollman 1992, s. 7).

Osasyynä betonin vaurioitumiselle nähdään vastuiden ja tiedon epäselvyys ja vähäisyys. Suurin osa betonirakenteen ankkurointialueen vaurioista syntyy rakentamisen aikana. Syyinä on liian suurien jännitysvoimien kohdistaminen liian aikaisin valamisen jälkeen betonirakenteeseen. Lisäksi osasyynä ilmenee usein huonosti tiivistetty betoni, josta seuraa betonirakenteen paikallinen murskautuminen ankkurin läheisyydessä. Toinen yleinen ongelma on halkeilu, erityisesti ankkureiden läheisyydessä. Halkeilua ilmenee yleisimmin tiheästi sijoitettujen ankkureiden välissä ja laatan reunan ja ankkurin välissä. Näillä alueilla olisi hyvä keskittyä korroosiosuojaukseen ja halkeilun hallintaan. (Wollman 1992)

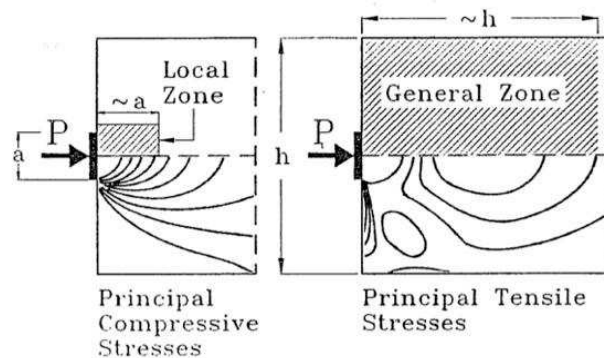
Halkeamia syntyy, kun puristuksesta aiheutunut poikittainen vetojännitys ylittää betonin vetolujuuden. Raudoituksella kasvatetaan rakenteen vetolujuutta. Halkaisuvoimista tarkastellaan pystysuuntaisia ja vaakasuuntaisia resultantteja. Resultanttien koot ja sijainnit riippuvat ankkureiden määrästä, sijainnista, poikkileikkauksen koosta ja tukireaktiosta, jos se sijaitsee D-alueella. Resultantteja lasketaan palkkimallilla ja ristikkoanalogian avulla. (Kytölä 2022)

Resultanttien lisäksi ankkurointialuetta tarkastellaan laajemmin kahdessa alueessa. Kuvassa 11 on havainnollistettu paikallista-, yleistä- ja nurkka-alueita, jossa nurkka-alue on eroteltu yleisestä alueesta. Ne määrittävät geometriset tasot jännitystasojen perusteella. Ankkurointialue rajautuu paikalliselle alueelle. Ankkurialueen jakaminen erillisiin alueisiin mahdollistaa suunnitteluvastuiden selkeän jakamisen. Jakaminen toteutuu ankkurin valmistajan ja jännityksestä vastaavan insinöörin kesken. Ankkurin valmistajan tulee varmistua tuotteensa kestävydestä, asettamalla sille reunaehdot. Jännityksestä vastaavan insinöörin tulee huolehtia voimien siirtymisestä rakenteeseen. Voimien siirtyminen rakenteisiin toteutetaan tartuntojen ja paikallisen puristuksen sulkuraudoituksen suunnittelulla, vetovoimien ja halkeamien hallinnalla, sekä puristusjännityksien suuruudella kyseisessä rajapinnassa. Suunnittelua helpottaa yleistää paikallinen- ja yleinenalue, jota tarkastellaan myös rakenteen päätyalueena. (Wollman 1992)



Kuva 11. Paikallinen alue, nurkka-alue ja rakenteen päätyalue (Laaksonen 2024c, s. 8).

Kuvassa 12 on havainnollistettu, että kuinka alueet asettuvat puristus- ja vetojännityksien suhteen. Kuvalla havainnollistetaan paikallisen ja yleisen alueen rajautumista. Kuvasta huomataan yleisen alueen yltävän paikalliselle alueelle, tästä syystä ankkurointialueella tulee tarkastella ankkurialueiden yhteen sitoutumista. Alaluvuissa 2.2.2 ja 2.2.3 käsitellään tarkemmin alueiden mittasuhteita ja alueiden leikkaantumista suhteessa toisiinsa.



Kuva 12. Paikallinen ja yleinen alue (Wollman 1992, s. 18).

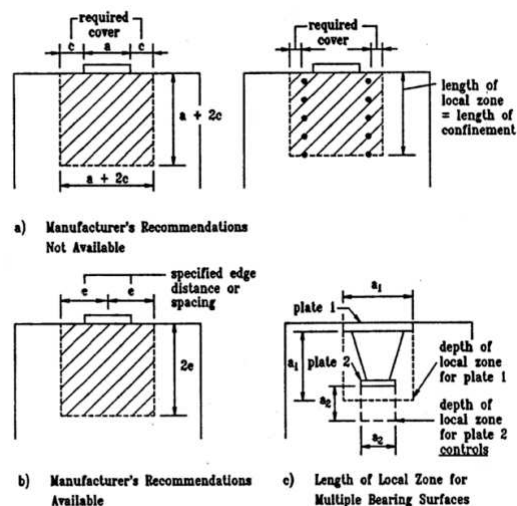
Ankkurivyöhykkeet jakautuvat geometrian lisäksi vastuiden suhteen kahteen osaan. Ankkurin valmistajalla on vastuu paikallisesta-alueesta, joka vastaa paikallisen alueen suunnittelusta ja lisävahvistustarpeista. Yleisen alueesta vastaa toteutuksesta vastaava insinööri. Insinööri valvoo, että vakioitu käytäntö toteutuu. Käytäntöön kuuluu rakenteen kestävyys ja ankkurin sijainnin valvominen oikealle sijainnilleen ja sopivalla etäisyydellä reunoihin ja suhteessa muuhun rakenteeseen. (VSL INTERNATIONAL LTD 1991)

2.2.2 Paikallinen alue

”Local zone”, paikallinen ankkurointialue, on korkea puristusjännityksellinen alue, joka ympäröi ankkurialuetta. Ankkurikappaleen muoto vaikuttaa ankkurialueen veto- ja puristusjännitysten muodostumiseen betonirakenteessa (Kytölä 2018). Lähellä ankkuria sijaitsee

sylinterilujuutta korkeampi jännitystila. Tämä aiheutuu voimakkaan kolmiaksaalisen jännitystilan kasvamisesta, joka on määritelty kuormitusalan ja jakautumisalueen avulla. Jakautuminen määräytyy geometrian avulla, jossa käytetään jakautumista kahden suhde yhden mukaisesti. Alue yletty kuormitusalan reunasta rakenteen reunaan tai toisen ankkurin jakautumisalueelle asti. (Laaksonen 2024c; Wollman 1992)

Vaikka työssä ei tarkastella mitoitusta, on hyvä tiedostaa, että mistä mittasuhteet pohjautuvat. Paikallisen alueen mittasuhteet riippuvat ankkurikappaleesta ja jännitysjärjestelmän tekniikasta. Levymäisissä ankkurikappaleille paikallisen alueen geometria määritetään ankkurikappaleen leveyden ja tyydyttävän suojabetonin mukaan. Ankkurikappaleen leveys ja pituus oletetaan samaksi, jos ankkuriin ei liity sulkuraidoitus. Sulkuraidoituksen liittyessä ankkuriin paikallinen alue yltää sulkuraidoituksen päähän asti. Erikokoisille valuankkureille pituus muodostuu paikallisen alueen suurimmasta leveydestä, sulkuraidoituksen pituudesta tai kuormituspintojen leveyksien summasta. Kuitenkaan paikallisen alueen pituus ei saa olla 1,5:tä kertaa suurempi paikallisen alueen leveydestä. (Kärki 2018; Wollman 1992) Kuvassa 13 on havainnollistettu paikallisen alueen mittasuhteita.

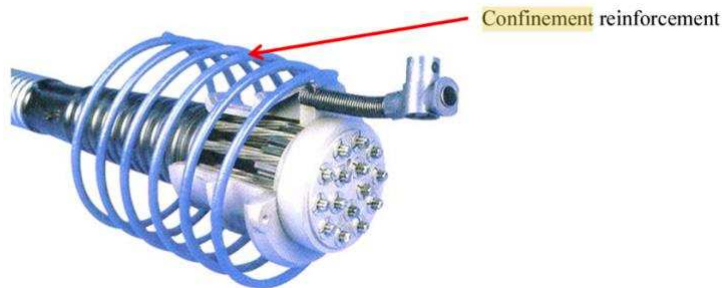


Kuva 11. Paikallisen alueen mitat (Wollman 1992, s. 20).

Lisäksi kohtisuoraa laajenemista pääjännityksiä vasten on kehitetty ja laadittu vähimmäisreuna- ja keskiöetäisyydet, sekä sulkuraidoitus "confinement reinforcement". Etäisyydet ovat laadittu vähentämään rakenteen vaurioitumista, eli betonin lohkeilua ja halkeilua reunan suhteen. Sulkuraidoitus sijoitetaan ankkurin läheisyyteen, jotta saataisiin betonirakenteelle riittävä puristuskestävyys.

Rakenteen puristuskestävyyden parantamiseksi ankkureiden ympärille laaditaan kierrehaallinen tai tarkkasijaintinen ortogonaalinen raidoite. Kooltaan kierrehaka on pinta-alallisesti pienempi, kuin ortogonaalinen raidoite. Yleisesti raidoitus on tartunnattomissa jännepunoksissa ortogonaalinen ja tartunnallisissa raidoituksena toimii spiraalimainen kierreraidoitus.

(Laaksonen 2024b) Spiraalimaista kierrehaallista raudoitusta on havainnollistettu kuvassa 14 spiraaliraudoitteella. Kyseistä spiraaliraudoitusta esitellään merkkikohtaisesti luvussa 3 hexal-, helical- tai spiralraudoitteena.



Kuva 12. Tartunnallinen jännepunosankkuri spiraalimaisella kierreraudoituksella (PTI Technical Advisory Board 2013).

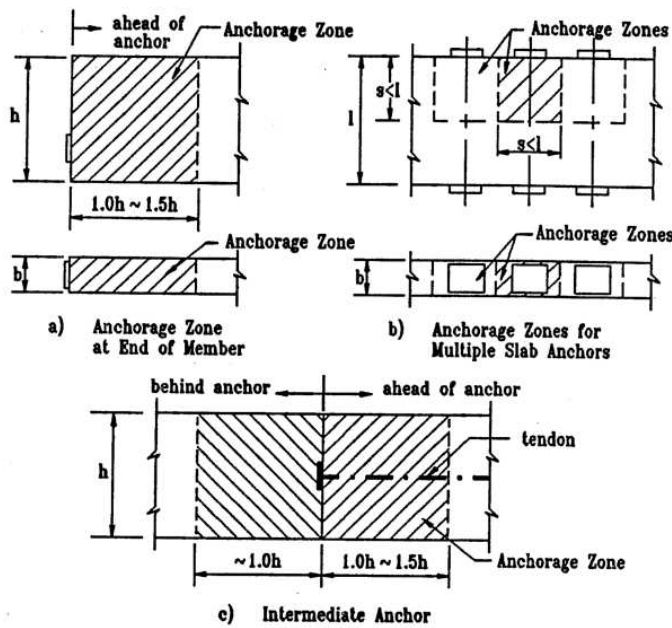
Rauditusvaatimukset esitetään jännemenetelmän European technical approval -standardissa, jotka perustuvat ankkureiden ja raudoitusten testaamiseen. Järjestelmän tulee siirtää voimia jännepunosesta rakenteeseen siten, että rakenteeseen ei synny kohtuutonta betonin halkeilua tai plastisoitumista. Järjestelmän tulee kestää jänneteräksen murtolujuuden voima staattisessa rasituksessa ilman, että ankkurien komponentit vaurioituvat pysyvästi. Tällainen vaurioituminen on esimerkiksi murtuma. Järjestelmän on kestävä dynaamisesti väsyttävää kuormitusta. Tästä syystä järjestelmässä on pyrittävä ennakoimaan jännityshäviöt kitkasta ja lukittumisesta.

Testausten pohjalta European technical approval -standardin omaava taho määrittää raudoitukset ja betonilujuudet, joita tullaan käyttämään rakenteissa. (Kytölä 2018) Kappaleissa 3.2–3.5 käsitellään raudoituksen European technical approval -standardeja.

2.2.3 Yleinen ja nurkka-alue

”General zone”, yleinen ankkurointialue, ympäröi ankkurikappaletta ja paikallista-aluetta. Paikallisen alueeseen syntyneet puristusjännitykset jakaantuvat yleisellä alueella koko poikkileikkaukseen Saint Venant -periaatteen mukaisesti. Jännitys jakauma jakaantuu epälineaarisesti. (Kytölä 2022; Sciencedirect 2024)

Yleisen ankkurointialueen mittasuhteisiin vaikuttaa jännevoiman suuruus, jännitysjärjestys ja puristusjännityksen jakautumisnopeus. Näihin tekijöihin vaikuttaa myös rakenteen poikkileikkaus, ankkureiden lukumäärä, ankkureiden sijoittelu ja keskinäiset etäisyydet poikkileikkauksen suhteen. (Kärki 2018) Kuvassa 15 on havainnollistettu yleisen alueen mittasuhteita. Palkkimaisessa rakenteessa yleisen alueen pituus on sama, kuin rakenteen suurimman poikkileikkauksenmitta. Laattojen yleisen alueen pituus on tyypillisesti keskiötäisyyden mitta. Jatkosankureilla yleinen alue ylettää ankkurin taakse samalla pituudella, kuin edessäkin. (Kärki 2018; Wollman 1992)



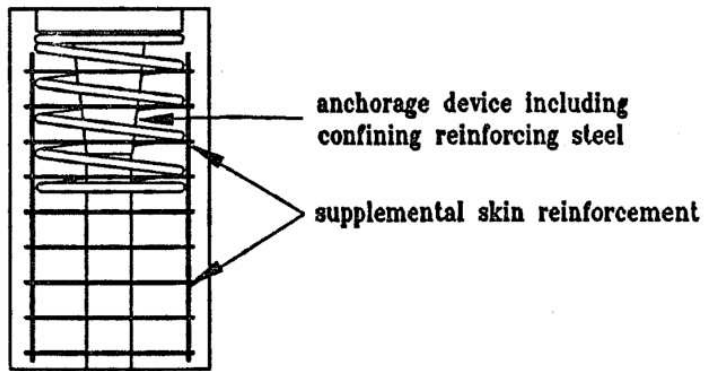
Kuva 13. Yleisen alueen mittasuhteet a) suorakaidepalkista b) Laatasta c) Jänneteräksen jatkoskappaleesta (Wollman 1992, s. 19).

Yleiselle ankkurointialueelle poikittaisia vetojännityksistä aiheutuvia halkaisuvoimia vastaan kehitetään rauditus, joka vastaanottaa epäjatkuvuuskohtiin muodostuvia vetojännityksiä. Kokonaisuus sitoutetaan paikallisen ja yleisen alueen suhteen yhteen. Rakennesuunnittelija suunnittelun vastuuseen kuuluu raudituksen suunnittelu, joka ei ole liian tiivis tiivistämisen ja valamisen suhteen. (Kytölä 2018)

Kyseinen rauditus toteutetaan yleisesti suorilla tangoilla, umpi- tai pistohaoilla. Raudituksen toteutustapoja yhdistellään tarvittaessa keskenään. Halkaisuraudoitus jaetaan vähintään yleisen alueen pituudelle. Erityisen epäkeskisissä ankkureissa rauditus sijoitetaan pienemmän reunaetäisyyden kaksinkertaista arvoa vastaavalle matkalle. (Kärki 2018)

Rakenteen halkaisukapasiteettia ei saavuteta, jos ankkurin mitoituslujuus on pienempi kuin betonin mitoituslujuus. Halkaisuraudoitus suunnitellaan kuitenkin, vaikka ehto, suurin poikittainen vetojännitys ei yltäisikään vetolujuutta. Sementti-injektoiduilla jännerakenteella ei pelkästään betonin vetolujuus ole riittävä verrattuna jännityksistä syntyviin vetojännityksiin. Halkaisuraudoituksella otetaan vastaan kyseisiä vetojännityksiä.

Nurkka-alueet sijaitsevat paikallisen alueen ympärillä, rakenteen päädyn nurkissa. Nurkkiin aiheutuu vetojännityksiä, joiden resultantteja vastaan asetetaan rauditus. Rauditus estää nurkan lohkeamista. (Laaksonen 2024c) Kuvassa 14 on havainnollistettu tartunnallisen jännepunosankkurin raudoitusta. Kohdassa "supplemental skin reinforcement", nuolet viittaavat spiraali ja hakaraudoitukseen. Nuolenpäät koskettavat hakaraudoitukseen.



Kuva 14. Tartunnallisen jännepunosankkuri ja raudoitus (Wollman 1992, s. 25).

Hakaraudoitusta lisäämällä estetään kohtisuoran suuntaiset halkeamat, jotka aiheutuvat päävetojännityksistä. Lisäksi betonin puristuskapasiteetti tulee tarkistaa, ettei ankkurikappale aiheuta vauriota betoniin. (Kytölä 2018) Alaluvuissa 3.2–3.5 käsitellään hakaraudoituksia. Valmistajien European technical approval -standardeissa hakaraudoitusta käsitellään ”stirrup”-raudoituksena.

3. VALMISTAJIEN TUOTTEET

3.1 Yleistä

Jälkijännitystuotteet tuotetaan kohdekohtaisesti kokonaisuuksina. Kokonaisuuteen kuuluvat materiaalit, laitteet ja suoritettavat työmenetelmät. Aikaisemmin Suomen Betoniyhdistys myönsi Suomessa hyväksytyjä käyttöselosteita viideksi vuodeksi kerrallaan. Nykyään jännemenetelmälle haetaan vapaaehtoinen Eurocode-standardin tapainen European technical approval -standardi, joka on sopiva tuotteille, joilla ei ole vakituista tuotestandardia. Rakennusvalvonta voi myös hyväksyä rakennuskohteelle oman jännemenetelmän.

Ankkuria kohden ankkurijännerakenteessa on suurin piirtein 3–55 kpl punosta, joista syntyy ankkuria kohden 0,2–11,5 MN jännitysvoima. Suomessa käytetyt ankkurikoot ovat yleisesti 12–19 kpl punoskokonaisuuksia. Sulkuraidoitus sijoittuu paikalliselle alueelle. Halkaisuraidoitus sijoittuu rakenteen päätyalueeseen eli paikallisen alueen ympärille. Nimensä mukaisesti se on vahvistamassa betonirakenteen vetolujuutta. Päädyn nurkan läheisyydessä olevat raidoitteet estävät nurkan lohkeamista. (Laaksonen 2024c)

Työssä käsiteltäviä valmistajia ovat Dywidag, Mekano4, BBR ja Freyssinet. Valmistajien European technical approval -standardeista tarkastellaan tartunnallisia ja tartunnattomia jälkijännitysankkureita. Rajauksina toimivat punosmäärät 1–19 ja ankkurin käyttötarkoitus, eli ankkurin on oltava monipunosellisena tartunnallinen jännepunos ja yhden rasvapunosken tapauksessa tartunnaton. Muita rajauksia ovat ankkurialueelle sijoitettava helix- tai helica- tai spiraaliraidoitus ja hakaraidoitus. Raidoituksista tarkastellaan raudan mittasuhteita ja jaotusta. Lisäksi tarkastellaan jännitysankkurin kokoja, vähimmäisiä betonilujuuksia ja minimietäisyyksiä.

Nämä asiat on listattu taulukoihin 1–12, joita käsitellään kattavammin luvussa 4. Taulukot 1, 4, 7 ja 10 käsittelevät ankkurin pään mittoja ja suhteita ankkurin raidoitukseen, ankkurien välisiä ja reunaetäisyyksiä. Mittoja on annettu kahden betonin vähimmäislujuuden, joiden tarkoituksena on antaa suuruusluokkaa ja vertailtavuutta muiden merkkien suhteen. Kaikilla merkeillä ei ole samat vähimmäislujuudet. Taulukot 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11 ja 12 käsittelevät helix- tai helica- tai spiraali- ja hakaraidoituksien ulkomittoja, jaotusta tai nousua, jaotuksen määrää ja kyseisen raidoituksen paksuutta.

3.2 Dywidag

Alaluvun 3.2 taulukkojen lukuarvot on kerätty European technical approval -standardeista ETA-13/0815 (2018) ja ETA-19/0077 (2019).

Taulukko 1. Dywidag-jälkijännitysankkurin ominaisuuksia ja mittasuhteita

Punosmäärä ankkuria kohden (<i>kpl</i>)	Aktiivi ja passiivi ankkurin pään halkaisija. (<i>mm</i>)	Betonin vähimmäislujuus (<i>MPa</i>)	Helix- raudoituksen etäisyys ankkurin päädyistä (<i>mm</i>)	Hakaraudoituksen etäisyys ankkurin päädyistä (<i>mm</i>)	Ankkurien minimi keskietäisyys toisiinsa nähdessä (<i>mm</i>)	Ankkurien minimi keskietäisyys reunaan. c=betonin suojapeite (<i>mm</i>)
1	105*75	22/27	-	35	175 (x) 100 (y)	105+c (x) 40+c (y)
4	-	-	-	-	-	-
5	117	28/34&36/45	40&40	40&40	235&220	110+c & 100+c
7	130	28/34&36/45	40&40	40&40	280&245	130+c & 115+c
9	145	28/34&36/45	40&40	40&40	305&270	145+c & 125+c
12	170	28/34&36/45	45&45	45&45	350&310	165+c &
15	190 (148)	28/34&36/45	50&50	50&50	390&345	145+c
19	210 (159)	28/34&36/45	50&50	50&50	435&380	185+c & 165+c 210+c & 180+c

Taulukko 2. Dywidag-jälkijännitysankkurin helix-raudoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (kpl)	Helix-raudoituksen ulkomitat (mm)	Helix-raudoituksen paksuus (mm)	Helix- raudoituksen jaotus (mm)	Helix-raudoituksen jaotuksen määrä (kpl)
1	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	185&180	12&12	40&50	5&5
7	220&200	14&14	50&50	5&5
9	250&220	14&14	50&50	6&6
12	265&255	14&14	50&50	7&7
15	310&285	14&14	50&50	8&7
19	375&310	16&16	50&50	8&7.5

Taulukko 3. Dywidag-jälkijännitysankkurin hakaraudoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (kpl)	Hakaraudoituksen ulkomitat (mm)	Hakaraudoituksen paksuus (mm)	Hakaraudoituksen jaotus (mm)	Hakaraudoituksen jaotuksen määrä (kpl)
1	155 (Reunassa 185) (x) 80 (y)	8	25	4
4	-	-	-	-
5	215&200	12&12	45&50	5&5
7	260&225	12&12	50&50	6&6
9	285&250	14&14	55&55	7&7
12	330&290	14&14	50&55	8&8
15	370&325	16&16	60&60	8&8
19	415&360	16&16	65&65	8&8

Taulukko 5. Mekano4-jälkijännitysankkurin spiraaliraidoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (kpl)	Spiraaliraidoituksen ulkomitat (mm)	Spiraaliraidoituksen paksuus (mm)	Spiraaliraidoituksen jaotus (mm)	Spiraaliraidoituksen jaotuksen määrä (kpl)
1	-	-	-	-
4	184&169	8&8	25&30	10&8
5	199&179	8&8	25&27	10&9
7	256&220	12&10	50&45	7&7
9	271&241	12&12	45&45	8&7
12	336&276	12&12	45&40	9&9
15	343&308	16&16	55&60	8&7
19	403&348	16&16	65&65	8&7

Taulukko 6. Mekano4-jälkijännitysankkurin hakaraidoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (kpl)	Hakaraidoituksen ulkomitat (mm)	Hakaraidoituksen paksuus (mm)	Hakaraidoituksen jaotus (mm)	Hakaraidoituksen jaotuksen määrä (kpl)
1	160	8	50	3
4	200&185	8&8	165&185	3&3
5	215&195	8&8	150&170	4&3
7	280&230	8&8	104&125	6&5
9	295&265	8&8	100&110	7&6
12	360&300	10&10	142&190	6&4
15	375&340	10&10	125&140	7&6
19	435&380	10&10	108&125	9&7

3.4 BBR

Alaluvun 3.4 taulukkojen lukuarvot on kerätty European technical approve - standardeista ETA-09/0286 (2018) ja ETA-12/0282 (2018).

Taulukko 7. BBR-jälkijännitysankkurin ominaisuuksia ja mittasuhteita

Punosmäärä ankkuria kohden (<i>kpl</i>)	Aktiivi ja passiivi ankkurin pään halkaisija. (<i>mm</i>)	Betonin vähimmäislujuus (<i>MPa</i>)	Helix- raudoituksen etäisyys ankkurin päädyistä (<i>mm</i>)	Hakaraudoituksen etäisyys ankkurin päädyistä (<i>mm</i>)	Ankkurien minimi keskietäisyys toisiinsa nähdessä (<i>mm</i>)	Ankkurien minimi keskietäisyys reunaan. c=betonin suojapeite (<i>mm</i>)
1	130*80	20/24	-	55	180&140	70+c & 50+c
4	100	31/38&35/43	15&15	30&30	210&205	95+c & 95+c
5	130	31/38&35/43	18&18	33&33	250&250	115+c & 155+c
7	130	31/38&35/43	18&18	33&33	255&255	120+c & 120+c
9	160	31/38&35/43	20&20	35&35	310&310	145+c & 145+c
12	160	31/38&35/43	20&20	35&35	325&310	155+c & 145+c
15	200	31/38&35/43	27&27	42&42	365&365	175+c &
19	200	31/38&35/43	27&27	42&42	410&390	175+c 195+c & 185+c

Taulukko 8. BBR-jälkijännitysankkurin helix-raudoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (<i>kpl</i>)	Helix-raudoituksen ulkomitat (mm)	Helix-raudoituksen paksuus (mm)	Helix-raudoituksen jaotus (mm)	Helix-raudoituksen jaotuksen määrä (<i>kpl</i>)
1	-	-	-	-
4	160&155	10&10	45&45	5&5
5	195&195	10&10	60&50	5&5
7	200&200	12&12	50&50	5&5
9	250&250	12&12	50&50	6&6
12	260&250	14&14	50&50	7&6
15	305&305	14&14	50&50	7&7
19	330&325	16&16	50&50	8&7

Taulukko 9. BBR-jälkijännitysankkurin hakaraudoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (<i>kpl</i>)	Hakaraudoituksen ulkomitat (mm)	Hakaraudoituksen paksuus (mm)	Hakaraudoituksen jaotus (mm)	Hakaraudoituksen jaotuksen määrä (<i>kpl</i>)
1	100&140	8	50	2
4	190&190	10&12	45&55	4&3
5	230&230	12&12	65&50	3&4
7	240&240	14&14	55&55	4&4
9	290&290	14&14	65&55	4&5
12	310&290	16&14	70&50	5&6
15	350&350	16&16	55&60	6&5
19	390&370	16&16	65&60	7&7

3.5 Freyssinet

Alaluvun 3.5 taulukkojen lukuarvot on kerätty European technical approval - standardista ETA 06/0226 (2018).

Taulukko 10. Freyssinet-jälkijännitysankkurin ominaisuuksia ja mittasuhteita

Punosmäärä ankkuria kohden (<i>kpl</i>)	Aktiivi ja passiivi ankkurin pään halkaisija (<i>mm</i>)	Betonin vähimmäislujuus (<i>cyl</i>) (<i>MPa</i>)	Helix- raudoituksen etäisyys ankkurin päädyistä (<i>mm</i>)	Hakaraudoituksen etäisyys ankkurin päädyistä (<i>mm</i>)	Ankkurien minimi keskietäisyys toisiinsa nähdessä (<i>mm</i>)	Ankkurien minimi keskietäisyys reunaan. c=betonin suojapeite (<i>mm</i>)
1	130*70	22	-	35	161.5 (x) 119 (y)	70.8+c (x) 49.5 (y)+c
4	95	44&60	40	100&100	187&170	83.5+c&75+c
5	-	-	-	-	-	-
7	110	44&60	40	120&120	221&204	100.5+c &92+c
9	150	44&60	40	120&120	255&238	117.5+c &109+c
12	150	44&60	40	120&120	272&255	126+c &117.5+c
15	180	44&60	40	150&150	306&289	143+c &134.5+c
19	185	44&60	40	160&160	340&323	160+c &151.5+c

Taulukko 11. Freyssinet-jälkijännitysankkurin helical-raudoituksen mittoja ja vaatimuksia

Punosmäärä ankkuria kohden (kpl)	Helical-raudoituksen ulkomitat (mm)	Helical- raudoituksen paksuus (mm)	Helical-raudoituksen jaotus (mm)	Helical-raudoituksen jaotuksen määrä (kpl)
1	-	-	-	-
4	160&160	10&10	60&60	5&5
5	-	-	-	-
7	200&200	12&12	60&60	6&6
9	250&250	14&14	70&70	6&6
12	260&260	14&14	50&50	7&7
15	310&310	14&14	70&70	7&7
19	320&320	16&16	60&60	8&8

Taulukko 12. Freyssinet-jälkijännitysankkurin hakaraudoituksen mittoja ja vaatimuksia.

Punosmäärä ankkuria kohden (kpl)	Hakaraudoituksen ulkomitat (mm)	Hakaraudoituksen paksuus (mm)	Hakaraudoituksen jaotus (mm)	Hakaraudoituksen jaotuksen määrä (kpl)
1	160*110	8	70	2
4	200&200	8&10	75&75	3&2
5	-	-	-	-
7	240&240	12&12	90&90	3&3
9	290&290	12&12	110&110	3&3
12	300&300	14&14	120&120	3&3
15	330&330	16&16	125&125	3&3
19	380&380	16&20	125&125	3&3

4. VERTAILU

Luvun 3 taulukoihin on kerätty erimerkkisten jälkijännitysankkureiden tuotteiden ominaisuuksia. Lisäksi ankkureita vertaillaan niiden omien European technical approval -standardien lisäksi. Tuotteina ovat tartunnalliset ja tartunnattomat ankkurit. Jokainen ankkuri eroaa erinäisistä syistä toisistaan.

4.1 Muotoilu ja punosten asettelu

Muodoltaan tartunnallisten ankkureiden päät eli kiilalevyt eroavat toisistaan. BBR-ankkurissa on porrastus ankkurin, trumpetin, rungon mallien A1–A6 välillä ja mallista A7 eteenpäin on molemmilta puolilta tasapintainen poikkileikkaus ilman porrastusta. Porrastettua levyä ja tasapintaista levyä valmistetaan 31 jännepunokselle asti. Dywidagin kaikki käsiteltävät ankkurin päät, eli kiilalevyn, reunat on porrastettu poikkileikkauksen molemmin puolin ankkurin trumpetin rungon myötäisesti. Mekano4-tartunnallisen ankkurin muotoilu eroaa verrattuna muihin ankkureihin. Aktiiviankkurin pää, eli kiilalevy, on symmetrinen molemmin puolin. Passiiviankkurin pää on porrastus passiiviankkurin, trumpetin, rungon myötäisesti. Freyssinetillä ankkurin päät, kiilalevyt, ovat porrastamattomia. Porrastuksella helpotetaan ankkurin asentamista asentamistilanteessa. Ajatuksena on kiilalevyn asettaminen loveensa suoraan.

Tartunnattomien ankkureiden muotoilu ei eroa merkkien kesken merkittävästi muuten kuin kooltaan. Ankkurin muotoilu ei eroa merkittävästi verrattuna muihin merkkeihin. Kyseessä on yleinen ankkurirakenne kevyemmissä betonirakenteissa. Isosta eroavaisuudesta seuraisi mahdollinen rajautuminen suunnittelutilanteessa, mikä aiheuttaisi rajautumista pois kyseiseltä markkinalta.

Dywidag- ja Mekano4-punosten asettelu on samanlainen ankkureissa, joissa on punoksia 5–19. BBR 4- ja 7-punosten asettelu kiilalevyssä on samanlainen Mekano4:ssa ja Dywidagissa vastaavissa kiilalevyissä. Muut punosten asettelut eroavat huomattavasti toisistaan. Ankkurin suunnittelija on paine- ja vetojännityksien suhteen määrittänyt punosten asettelun. Freyssinet ei ole ilmoittanut standardeissa punosten asettelusta ankkurissa.

4.2 Jälkijännitysankkurin ominaisuuksia ja mittasuhteita

Taulukoissa 1, 4, 7 ja 10 verrataan ankkurirakenteen ominaisuuksia. Mekano4-hakaraudoituksen etäisyyttä kiilalevyn päähän ei ole ilmoitettu. Muiden merkkien etäisyyksiin verrattaessa kohdassa oletetaan kyseisen raudoituksen etäisyyden olevan päädyistä suurin piirtein betonin suojabetonoinnin verran.

Ankkuroiden halkaisijat ovat samansuuruisia, mutta eivät kuitenkaan samoja. Lukuarvot erosivat toisistaan suurimmillaan noin 25 mm. Betonin vähimmäislujuudet vaihtelivat merkittävästi. Taulukoissa tarkastellaan tartunnallisissa ankkureissa yli 28 MPa sylinterilujuuden betonia ja tartunnattomissa ankkurirakenteissa noin 20 MPa sylinterilujuuden betoneita. Tästä syystä lukuarvot saattavat vaihdella ja erota toisistaan ja saattaa syntyä mittasuhteissa pieniä eroja.

Helix-, spiral- ja helical-raudoituksen etäisyys tartunnallisen ankkurinpään etäisyydestä vaihteli merkkien kesken suurimmillaan noin 30 mm. Hakarautoituksen etäisyys kiilalevystä vaihteli BBR:n ja Dywidagin kesken 8 mm. Freyssinetin raudoitusten etäisyydet alkoivat 100 mm, joka on yli kaksi kertaa suurempi kuin muilla ankkureilla. Tartunnattomissa ankkureissa hakarautoituksen suurin eroavaisuus merkkien välillä on 35 mm. Pienin etäisyys on 35 mm ja isoin etäisyys on 70 mm.

Tartunnallisten ankkureiden minimietäisyydet ankkureiden Dywidagin, Mekano4:n ja BBR:n kesken on 10 mm. Freyssinetin minimietäisyydet eroavat isoimmillaan 100 mm. Freyssinetin hakarautoitukselle annetaan suuremmat etäisyydet ankkurin päästä, mistä seuraa, että raudoitus on syvemmällä rakenteessa. Raudoituksella on enemmän kapasiteettia syvemmällä, joten ankkureiden kesken nämä mahtuvat olemaan lähempänä toisiaan. Samanlaisella ajatuksella ankkurien reunaetäisyyksissä on enemmän tilavuutta.

Tartunnattomien ankkureiden väliset ja reunaetäisyydet ovat suurin piirtein samanlaiset. Suurimmat eroavaisuudet etäisyyksissä olivat ankkureiden kesken poikkileikkauksen vaakasuuntaisessa pituudessa, eli x-suunnassa, 18,5 mm ja pystysuuntaisessa pituudessa, eli y-suunnassa, 61 mm. Eroavaisuuksia esiintyy, kun etäisyyksille yleistetään sama etäisyys x- ja y-suunnassa vai onko kummallakin suunnalla ominainen mitta. Reunan suhteen etäisyyksissä ei ole suurta eroavaisuutta. Isoin ero ilmenee x-suunnassa 35 mm ja y-suunnassa 40 mm. Syynä on sama, mikä todetaan ankkurien välisen etäisyyden suhteen.

4.3 Jälkijännitysankkurin helix-, helica- tai spiraalirautoitus

Taulukoissa 2, 5, 8, 11 käsitellään helix-, helica- tai spiraalirautoitusten ominaisuuksia. Tartunnallisissa ankkureissa merkittävät eroavaisuudet johtuvat minimibetonilujuudesta. Esimerkiksi suurin ero 83 mm syntyy freyssinetin ja mekano4 välillä, jossa betonilujuuksina toimivat Freyssinetiltä sylinterilujuutena 44&60 ja Mekano4 30/37&50/60. Mekano4 käytetään helix-raudoituksissa halkaisialtaan 8 mm raudoitetta, joka kompensoituu jaotuksen/nousun määrällä. Teräsmäärältään kyseistä rautaa tulee tuplasti enemmän. Muuten raudan määrä on sama ja se kasvaa isompaa punosmäärää kohden.

Jaotuksessa ja nousussa raudan koot ovat suhteutettu raudan määrän ja paksuuden suhteen. Ohuemman halkaisijan raudoitteen tilanteessa raudoitusta tulee lyhyemmällä jaotuksella ja paksumman suhteen raudoitusta tulee pidemmällä jaotuksella.

4.4 Jälkijännitysankkurin hakaraidoituksen mittoja ja vaatimuksia

Taulukoissa 3, 6, 9 ja 12 tarkastellaan hakaraidoituksen ominaisuuksia. Ulkomitat tartunnallisessa hakaraidoituksessa ovat suhteessa samankokoiset ja kokojen eroavaisuudet johtuvat betonin sylinterilujuuden vaihtelusta. Raudoituksen paksuus kasvaa kronologisesti merkkikohtaisesti. Mekano4 eroaa kuitenkin paksuuden suhteen muista merkeistä raudan paksuudella, mutta se kompensoituu jaotuksen määrällä. Jaotuksen koko on samansuuruinen Dywidag:n ja BBR:n kesken. Lisäksi jaotuksen määrä on näiden suhteen samansuuruinen. Mekano4 ja Freyssinet:n raudoituksen jaotus on suhteessa samaa suuruusluokkaa pienemmän punosmäärän ankkureissa. Mekano4 on suuremmat jaotusvälit ja jaotuksien määrä verrattuna Freyssinettiin. Tähän syynä on aikaisemmin todettu raudoituksen paksuus, joka on Freyssinetillä suurempi. Mekano4:lla, Dywidag:lla ja BBR:llä on jaotukset yhtä suuret.

Tartunnattomissa ankkurirakenteissa hakaraidoituksella ei ole merkittävää eroa ulkomittojen, raudoituksen paksuuden, jaotuksen tai jakomäärän suhteen. Eroavaisuus johtuu vaihtelevista betonin vähimmäislujuuksista.

5. YHTEENVETO

Esijännittäminen tarkoittaa rakenteen jännittämistä ennen rakenteen suunniteltua kuormittamista. Rakennetta jännitetään ennen betonin kovettumista tai tämän jälkeen. Työn suhteen keskitytään betonin kovettumisen jälkeiseen jännittämiseen. Betonin kovettumisen jälkeistä jänteiden jännittämistä kutsutaan rakenteen jälkijännittämiseksi. Jälkijännityksessä betonirakenteessa hyödynnetään betonin puristuslujuutta ja rakenne saatetaan pysyvään esijännitystilaan. Tällöin rakenteen kantavuus kasvaa käyttörajatilakuormille, materiaalia kuluu vähemmän, rakenne hoikkenee ja teräsbetonirakenteelle ominaiset ajallisesti riippuvat ja välittömät häviöt vähenevät.

Jännitetyn betonirakenteen välittömiä häviöitä ovat betonin kokoonpuristuminen, jännitysankkureiden kiilojen liukuminen jänteen suhteen, jännitysankkureiden toiminta ja muodonmuutosten muodostuminen jännittämisen jälkeen ja jännepunoksen jänteen ja suojaputken välinen kitka. Ajasta riippuvia häviöitä ovat betonirakenteen viruminen ja kutistumisesta aiheutuva betonin muodonmuutokset ja jännepunoksen relaxaatio. Vaikka jälkijännitetyssä rakenteessa häviöt vähenevät merkittävästi verrattuna teräsbetonirakenteeseen, eivät ne häviä täysin.

Jälkijännitetyssä ankkurijännemenetelmässä rakenteet ovat lähes aina paikallavalettuja betonirakenteita. Työssä tarkastellaan ankkurijännemenetelmän sisäisiä jännekulkuja. Sisäisiä jännekulkuja ovat tartunnallinen jännepunos ja tartunnaton rasvapunos. Tartunnallisessa jännepunosrakenteessa asennetaan yleisesti 3–55 punosta yhtä jännitysankkuria kohden. Yleisimmin Suomessa ankkurikoot ovat 12–19 kappaleen punoskokonaisuuksia. Tartunnallista jännepunosmenetelmää käytetään yleisesti isoissa betonirakenteissa, esimerkiksi silloissa.

Tartunnatonta rasvapunosmenetelmää käytetään pienemmissä betonikonaisuuksissa, esimerkiksi parkkihalleissa ja toimitiloissa. Tartunnaton menetelmä on kehitetty tartunnallisesta menetelmästä. Työssä käsitellään yhden rasvapunoksen kokonaisuutta. Merkittävänä erona tartunnalliseen menetelmään kokonaisuus on kevyempirakenteinen ja muovikuoren ja lankojen välillä on inhibiittistä rasvaa, joka ehkäisee lankojen mahdollista korroosioriskiä. Lisäksi jännittämisen jälkeen tartunnalliset jännepunokset korroosiosuojataan täyttöaukkoja pitkin injektointimassalla.

Jänteiden jännittämisellä ja ankkuroinnilla siirretään jännityksiä rakenteeseen. Ankkurointi toteutetaan rakenteen päissä. Suunniteltaessa jännitettyä betonirakennetta tulisi huomioida

siirrettävien jännityksien vaikutus rakenteen materiaaleihin. Ankkuroinnista syntyy rakenteen päähän siirryttäessä merkittävä puristus- ja poikittaisvetojännityksien vaihtelu, joka on yleinen ongelma tai kriittinen alue kyseiselle menetelmälle. Pistekuorman aiheuttamia jännityksiä arvioidaan Saint Venant -periaatteen mukaisesti. Menetelmän onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi vaaditaan paikallisen kestävyuden tarkastelua, erilaisia testausmenetelmiä ja kokemusta.

Rakenteen päätyalue on jaettu vaihtelevien jännityksien takia vastuualueisiin. Nämä ovat paikallinen alue, yleinen alue ja nurkka-alue. Yleisesti nurkka-alue käsitellään yleisen alueen kanssa samassa. Aluksi ankkurin alaisella alueella puristusjännitykset kasvavat ja rakenteeseen päin mentäessä syntyy raja, jossa alueen pääjännitykseksi tulee määrääväksi poikkisuuntainen vetojännitys. Vetojännityksen saavutettuaan huippunsa tämä tasaantuu rakenteeseen päin mentäessä.

Ankkurin alaista puristusaluetta käsitellään paikallisena ankkurointialueena. Lähellä ankkuria sijaitsee sylinterilujuutta korkeampi jännitystila, joka aiheutuu kolmiakσιαalisen jännitystilan kasvamisesta. Kolmiakσιαalinen jännitystila määräytyy kuorma- ja jakautumisalueiden avulla, jotka määräytyvät geometrian avulla. Kohtisuoraa laajenemista vasten on laadittu vähimmäisreuna- ja keskiöetäisyydet sekä sulkuraudotus. Etäisyyksillä ehkäistään betonirakenteen vioittumista ja raudoituksella parannetaan rakenteen paikallisen alueen puristuskestävyyttä. Raudoitusta kutsutaan helix-, helicoil- tai spiraaliraudoitukseksi.

Yleiseen alueeseen kuuluvat paikallinen alue ja nurkka-alueet. Paikallisella alueella syntyneet jännitysjakaukset jakaantuvat epälineaarisesti rakenteeseen. Poikittaisista vetojännityksistä aiheutuvia halkaisuvoimien syntymisen takia rakenteelle kehitetään rauditus, joka vastaanottaa epäjatkuvuuskohtiin syntyviä vetojännityksiä. Kyseistä raudoitusta kutsutaan hakaraudoitukseksi.

Työssä tilastoitettiin Dywidag-, Mekano4-, BBR- ja Freyssinet-valmistajien European technical approve -standardeja. Standardeja pohjalta vastataan päätutkimuskysymykseen ”Miten Betonin jälkijännitysmenetelmät eroavat toisistaan valmistajien kesken?” ja alatutkimuskysymyksiin ”Miten vaaditut halkaisuraudotukset eroavat jännitysmenetelmissä valmistajien ohjeistuksien kesken?” ja ”Miten eri jännepunos määräiset ankkurit eroavat valmistajien kesken?”.

Merkkien ankkureita vertailtiin muotoilun, punosten asetteluun, ominaisuuksien ja mittasuhteiden, helix-, helica- tai spiraaliraudituksen ominaisuuksien ja hakaraudituksen ominaisuuksien perusteella. Ankkurirakenteet ovat samankaltaisia, minkä perusteella alkuarvaus ankkureiden samankaltaisuudesta oli oikeanlainen.

Ankkureissa ilmeni kuitenkin pieniä eroavaisuuksia. Ankkureiden kiilalevyt erosivat merkkikohtaisesti ja punosmäärältään toisistaan. Erona ilmeni levyn ulkoreunan lovitus. Toinen huomattava eroavaisuus ovat Freyssinetin raudoitusmäärät tartunnattomassa ankkurissa. Raudoitusta oli määrältään enemmän kuin muilla merkeillä. Raudoituksen etäisyys kiilalevyyn oli kaksi kertaa suurempi kuin muilla merkeillä, mikä kompensoi suurempaa raudoituksen määrää. Kuitenkaan jälkijännitysankkurit eivät suuruusluokaltaan eroa merkittävästi toisistaan.

Jännitetyt rakenteet ja niiden jännepunokset ja ankkurit ovat merkittävä osa tuoteosakauppaa, jolloin valmistaja määrittää ankkurin raudoitteet tuotteelle toimiviksi. Näiden mitoitus perustuu yhteiseen teoriaan, minkä vuoksi suuria eroja ei yleensä ole. Menetelmien väliset erot voivat johtua esimerkiksi valituista ankkureiden geometrioista tai betonin minimilujuuksista. Tuotteita suunniteltaessa on tehtävä tiettyjä valintoja. Loput valinnat määräytyvät laskelmien perusteella.

Jälkijännitetyt rakenteet ovat optimoituja rakenteita rakennustuotteiden kehityksestä lähtien. Jälkijännitysmenetelmien optimoimisen saavuttaminen ei ainoastaan palvele teknisen osaamisen kasvua. Tämä mahdollistaa rakennetun ympäristön kestäväää kehittymistä. Menetelmien tarkastelu oman oppimisen edellytyksen lisäksi heijastaa rakennusalan pyrkimystä jatkaa kohti kestävämpiä ja innovatiivisempia ratkaisuja. Tämä työ tarjoaa katsauksen insinööriyön kehitykseen ja tämän taustalla olevalle paikallavaletulle ankkurijännemenetelmän sisäisien jännekulkujen teorialle.

LÄHTEET

Betonitieto (2024). Jännitetyt rakenteet, verkkosivu. Saatavissa (9.4.2024):

<https://www.betonitieto.fi/tyomaat/betonitoiden-johtaminen-talonrakentaminen/betonityot/betonin-valu-ja-tiivistys/erityisrakenteet/jannitetyt-rakenteet.html>

ETA-13/0815 (2018). DYWIDAG Strand, Österreichisches Institut für Bautechnik.

ETA-19/0077 (2019). DSI monostrand prestressing system L1-L7 with cast iron anchors, Österreichisches Institut für Bautechnik.

ETA 19/0065 (2021). MeKano4 PT System TK, internal bonded post tensioning system with 4 to 37 strands, Institut de tecnologia de la Construcció de Catalunya.

ETA-13/0464 (2018). MK4 Post-tensioning Slab System, Österreichisches Institut für Bautechnik.

ETA-09/0286 (2018). BBR VT CONA CMI BT - Internal post-tensioning system with 02 to 61 strands, Österreichisches Institut für Bautechnik.

ETA-12/0282 (2018). BBR VT CONA Single – Internal Post-tensioning system with 01 Strand, Österreichisches Institut für Bautechnik.

ETA 06/0226 (2018). Freyssinet system, Cerema.

Goodman, B. (2024). Post tension concrete design and detailing basics, Pdf-tiedosto. 3hb structural. Saatavilla (10.4.2024):

https://seau.org/images/meeting/030122/goodman_pt_basics.pdf

Hamakareem, M, I. 4 types of Crack in concrete columns and their causes: video included, THE CONSTRUCTOR Building ideas. Saatavissa (14.3.2024):

<https://theconstructor.org/concrete/types-cracks-concrete-columns/26433/>

Järviö, V. (2019). Siltojen vahventaminen jälkijännittämällä. Diplomityö. Tampereen yliopisto.

Saatavissa (22.3.2024):

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27188/J%E4rvi%F6.pdf?sequence=4>

Kytölä, U. (2022). Luento 8: Raudoituksen yksityiskohdat ja ankkurointi. Jännitetyt betonirakenteet RAK.RS.410. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta.

Kärki, J. (2018). Ankkurointialueen suunnittelu jälkijännitetyssä betonirakenteessa. Diplomityö.

Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa (15.3.2024):

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/26221/K%c3%a4rki.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Laaksonen, A. (2024a). Luento 1. Jännitetyt betonirakenteet RAK.RS.410. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta.

Laaksonen, A. (2024b). Luento 2. Jännitetyt betonirakenteet RAK.RS.410. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta.

Laaksonen, A. (2024c). Luento 8. Jännitetyt betonirakenteet RAK.RS.410. Tampereen yliopisto. Rakennetun ympäristön tiedekunta.

Mannonen, P. (2008). Paikallavaletut pysäköintilaitokset, Betonitieto. Saatavissa (22.3.2024): <https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0801-s084-92.pdf>

Maurer-Sanfield (2024). Building post tensioned slab, verkkosivu. Saatavilla (10.4.2024): <https://sanfieldindia.in/browse/page/BuildingPostTensionedSlab>

PTI Technical Advisory Board (2013). TAB.3-13 Post-Tensioning Terminology (PTT). Saatavissa (17.3): <https://www.post-tensioning.org/Portals/13/Files/PDFs/Publications/131120-PTI-PTT.pdf>

Rakennusvirhepankki (2017). Jännebetonipalkin ja paikalla valetun pilarin puutteelliset raudoitukset sekä virheellinen laakeri, FISE. Päivitetty: (8.4.2017). Saatavissa (14.3.2024): <https://fise.fi/wp-content/uploads/2017/04/RVP-T-BE-22-P%C3%A4ivitetty-080417.pdf>

Ranua, R. (2014). Jännebetonirakenteen halkeilun hallinta tartunnattomia jänteitä käytettäessä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa (9.4.2024): <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22644/ranua.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

ScienceDirect (2024). Saint venant principle, verkkosivu. Saatavilla (8.5.2024): <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/saint-venant-principle>

Suominen, K. (2019). Jälkijännitetyn ankkurijännerakenteen välittömien häviöiden ja venymien laskenta, Insinööriyö. Metropolia ammattikorkeakoulu. Saatavissa (25.3.2024): https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/163639/Suominen_Konsta.pdf?sequence=2&isAllowed=y

VSL INTERNATIONAL LTD (04.1991). DETAILING FOR POST-TENSIONED, Päivitetty: (1.1996). Saatavissa (14.3.2024): https://www.structuraltechnologies.com/wp-content/uploads/2018/02/PT_Detailing.pdf

Wollman, G. P. (1992). ANCHORAGE ZONES IN POST-TENSIONED CONCRETE STRUCTURES. Dissertation. University of Texas at Austin. Saatavissa (15.3.2024): <https://fsel.engr.utexas.edu/pdfs/Wollmann,%20Gregor.pdf>