



Timo Pesonen

JÄREIDEN HARJATERÄSTANKOJEN ANKKUROITUMINEN

JÄREIDEN HARJATERÄSTANKOJEN ANKKUROITUMINEN

Timo Pesonen
Opinnäytetyö
Syksy 2013
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma, rakennesuunnittelu

Tekijä: Timo Pesonen
Opinnäytetyön nimi: Järeiden harjaterästankojen ankkuroituminen
Työn ohjaaja: TkL Pekka Nykyri
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2013 Sivumäärä: 141 + 9 liitettä

Tämä opinnäytetyö tehtiin Oulun seudun ammattikorkeakoulun rakennustekniikan osastolle. Työn tavoitteena oli selvittää, ankkuroituuko 32 mm:n betoniteräs suorana pelkästään tartunnan avulla palkkirakenteessa, joka on toteutettu Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeen suoran tangon ankkurointiin liittyvien vähimmäisvaatimusten mukaan. Tutkimuksessa tangon liukumalle ei asetettu mitään rajoitteita. Lisäksi tutkimusraportin sekundäärisenä tavoitteena on toimia tutkimusmenetelmien osalta opastavana asiakirjana mahdollisissa oppilasvetoisissa jatkotutkimuksissa.

Paksun tangon ankkuroituvuutta selvitettiin kuormituskokein, jossa vertailtiin yhdellä 32 mm:n tangolla ja neljällä 16 mm:n tangolla raudoitettujen palkkien kuormituskäyttämisiä. 16 mm:n tangoilla raudoitetun palkin kuormituskäyttämistä pidettiin yleiset vaatimukset täyttävänä. Palkit pyrittiin suunnittelemaan ja valmistamaan tankopaksuutta lukuun ottamatta identtisiksi. 32 mm tangon ankkuroituvuutta indikoivina kuormitusilmiöinä pidettiin kokonaiskuormaa, palkkien taipumaa ja halkeilua. Palkkityypeille suoritettiin myös laskennalliset kestävyystarkastelut materiaalien keskimääräisillä kuormituspäivän lujuuksilla ilman osavarmuuskertoimia, mitä verrattiin palkkityyppien toteutuneisiin kestävyyskykyihin.

Tutkimustulosten perusteella 32 mm:n tanko ankkuroituu ohuella betonipeitekerroksella 500 MPa:n teräsjännitystä vastaavalle vetovoimalle ilman merkittäviä muodonmuutoksia, kun rakenteessa käytetään Eurokoodi 2:n mukaista poikkiteräskäyttöä. Tutkimus antoi kuitenkin viitteitä 32 mm:n tangolla jo reilusti alle käyttörajatilan kuormilla tapahtuvasta tangon suuntaisesta halkeilusta, millä on tartunnan laatua ja mahdollisesti rakenteen säilyvyyttä heikentävä vaikutus.

Tutkimuksessa havaittujen puutteiden ja tutkimuksen suppean rajauksen vuoksi aiheeseen liittyviä ilmiöitä laajamittaisemmin tarkasteleville tutkimuksille voidaan ajatella olevan aihetta.

Asiasanat: Harjateräksen tartunta, ankkurointi, suhteellinen harjapinta-ala, tartuntajännitys-liukumariippuvuus, tartuntapituus, betonipeitteet halkeaminen, tartuntatesti

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil Engineering, Structural Engineering

Author: Timo Pesonen

Title of thesis: Anchoring of Large-sized Reinforcing Bars

Supervisor: Mr. Pekka Nykyri (Lic.Sc), Senior Lecturer

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2013 Pages: 141 + 9
appendices

This thesis was made to the department of civil engineering Oulu University of Applied Sciences. The objective of the work was to research bond based anchoring of a 32 mm thick rebar in a beam structure. The test beams were designed by the minimum requirements of Eurocode 2 and no limitations were set to the slip of the bar. The secondary objective of the work was to test and develop the subject matter methods with a view to further student-driven researches.

Bond based anchoring of the 32 mm bar was examined with load tests by comparing load behavior of two beam types with different reinforcements. The other beam type was tensile reinforced with one 32 mm rebar and the other with 4 pieces of 16 mm rebars. Concerning the other qualities, the beam types were designed to be identical. The load behavior of the beam type reinforced with 16 mm bars was considered to meet the general requirements.

In load tests the total load, the deflection of the beams and the cracking was considered to indicate the loading phenomenas of the anchoring. Additionally, the strenght values achieved from the loading tests were compared to the theoretical strength calculations of the beam types. The strength calculations were made by using the average test-day strengths of materials without partial safety factors.

Based on the results of the research, a 32 mm reinforcement bar with a thin concrete cover layer anchors with a force corresponding to 500 MPa steel stress without significant deformations if the structure contains sufficient transverse reinforcement. The research gave, nevertheless, some evidence about cracking of the concrete cover in the direction of the bars. Cracks formed on loads well under service limit state and can therefore weaken the quality of the bond and the durability of the structure.

Because of the noticed shortages and the narrow definition of this research, a need for further research can be thought.

Keywords: Bond of the reinforcing bar, anchoring, relative rib area, cracking, concrete cover, bond test, bond length

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty Oulun seudun ammattikorkeakoululla rakennustekniikan osastolle. Tutkimustehtävän tarkoituksena on ollut selvittää, ankkuroituu-ko 32 mm:n betoniteräs suorana Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeen tangon suoraan ankkurointiin liittyvien vähimmäisvaatimusten valossa. Idea tutkimusaiheeseen on saatu Oulun ammattikorkeakoulun rakennustekniikan osaston yliopettaja TkL Pekka Nykyriltä, joka toimi myös työn ohjaajana. Haluan kiittää Pekka Nykyriä haastavasta, mutta mielenkiintoisesta oppimisprosessista, jonka läpiviemiseen hän vaikeina hetkinä loi uskoa ja jakoi avoimesti laajaa tietämystään. Lisäksi haluan kiittää Oulun seudun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion henkilökunnasta laboratorioinsinööri Esa Perälää, laboratoriomestari Heikki Isohookanaa, laboratoriomestari Pertti Uhlbäckkiä ja testausinsinööri DI Ari Oikarista, jotka antoivat merkittävän työpanoksen laboratoriotutkimusten valmistelu- ja mittausvaiheessa.

Suurin kiitos kuuluu kuitenkin vaimolleni Hennalle suuresta kärsivällisyydestä sekä pojilleni Eliakselle ja Ilmarille, joiden elämään osallistumista työn tekeminen rajoitti kohtuuttomasti.

Oulussa 23.11.2013

Timo Pesonen

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
1 JOHDANTO	9
2 HARJATANGON TARTUNTAMEKANISMI	13
2.1 Alkutartuntavaihe	13
2.2 Kitkatartuntavaihe	13
2.3 Mekaaninen vuorovaikutus	15
3 MEKAANISEN VUOROVAIKUTUKSEN AIHEUTTAMA HALKEILU	19
4 TARTUNTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	24
4.1 Betoni	24
4.2 Raudoitus	27
4.2.1 Tangon pintakuviointi	27
4.2.2 Tankopaksuuden vaikutus	33
4.2.3 Tangon pinnan laadun, pinnoituksen ja lujuuden vaikutus	34
4.3 Tangon sijainti, betonointisuunta ja tankojen väliset etäisyydet	35
5 TARTUNTAJÄNNITYS-LIUKUMARIIPPUVUUS	39
5.1 Tartuntajännitysten jakautuminen	42
5.2 Liukuman vaikutus rakenteen toimintaan	43
6 SUORIEN TANKOJEN ANKKUROINTIMITOITUS	48
6.1 Tartuntaan perustuvan ankkurointimitoituksen periaate	48
6.2 Suorien tankojen ankkurointimitoitus Eurokoodi 2:n mukaan	50
6.3 Muita ankkurointimitoituksessa huomioitavia tekijöitä	56
7 BETONITERÄSTEN TARTUNTAOMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMINEN KOKEELLISESTI	58
7.1 Menetelmän kuvaus	58
7.2 Testipalkki	59
7.3 Materiaalivaatimukset	63
7.4 Testivälineistö	64
7.5 Testin toteutus	65

7.6 Tartuntajännitysten laskeminen	66
8 32 MM HARJATANGON ANKKUROINTITUTKIMUS	68
8.1 Tutkimuksen lähtökohta	68
8.2 Tutkimuksen ongelma	69
8.3 Tutkimuksen tavoite	70
8.4 Koekappaleet	71
8.4.1 Tartuntatestipalkit	71
8.4.2 Ankkurointipalkit	73
8.5 Tutkimuksessa käytetyt teräkset	76
8.6 Betoni	79
8.7 Koekappaleiden valmistus	79
8.7.1 Tartuntatestipalkit	79
8.7.2 Ankkurointipalkit	81
8.7.3 Koekappaleiden betonointi	83
8.8 Koejärjestelyt	85
8.8.1 Tartuntatestit	85
8.8.2 Ankkurointitutkimukset	86
8.9 Kuormitusten kulku ja suoritettut mittaukset	87
8.9.1 Betonin puristuslujuuksien määrittäminen	88
8.9.2 Terästen lujuus- ja geometriaominaisuuksien määrittäminen	88
8.9.3 Tartuntatestit	92
8.9.4 Ankkurointipalkkien kuormitus	94
9 TULOKSET	98
9.1 Betoni	98
9.2 Teräkset	99
9.2.1 Lujuus- ja sitkeysominaisuudet	99
9.2.2 Tankojen geometriset ominaisuudet ja pituusmassat	100
9.3 Tartuntatestit	101
9.4 Ankkurointipalkit	107
10 TULOSTEN TARKASTELO	118
10.1 Tankojen tartuntaominaisuudet ja niistä aiheutuneet ilmiöt	118
10.2 32 mm tangon ankkuroituminen	125
10.3 Johtopäätökset	130

11 YHTEENVETO	131
LÄHTEET	140
LIITTEET	142

1 JOHDANTO

Raudoituksen betonirakenteita vahvistavat vaikutukset havaittiin jo 1800-luvun alussa. Ensimmäisenä terästä betonin vahvistamiseen seinärakenteessa käytti tiettävästi saksalainen Rabitz vuonna 1822. Tunnetuimpana teräsbetonin keksijänä pidetään kuitenkin yleisesti ranskalaista puutarhuria Joseph Monieria, joka 1800-luvun puolessa välissä kukkaruukkuja valmistaessaan havaitsi teräsverkon betonin halkeilua hillitsevät ja kestävyyttä parantavat vaikutukset. Melko pian ensimmäisten teräsbetonirakenteiden patentoimisten ja niiden käytön yleistymisen jälkeen alettiin pohtia raudoitteen ja betonin välistä yhteistoimintaa myös syvällisemmin. Vaihtelevin tarkoitusperin sekä menestyksin ympäri maailmaa aina 1800-luvun puolivälistä näihin päiviin asti suoritettujen tutkimusten tuloksena on ymmärrys teräsbetonirakenteissa esiintyviä monimutkaisia ilmiöitä kohtaan lisääntynyt huimasti. Jatkuvan tutkimus- ja tuotekehitystyön myötä rakenteiden suunnittelukäytännöt ovat tarkentuneet ja rakenteiden toiminnan ennustettavuus parantunut. (Jokela 1979, 13; Leskelä 2008, 24.)

Suomalaisessa rakennesuunnittelussa siirryttiin 1.7.2013 käyttämään pelkästään yleiseurooppalaisia Eurokoodistandardeihin perustuvia mitoituskäytäntöjä. Toimenpiteet eri maiden suunnittelukäytäntöjen yhtenäistämiseksi alkoivat Euroopan komission päätöksellä jo 1970-luvun puolessa välissä, ja suunnitteluohjeiden standardisoinnin kehittelyyn ryhdyttiin puolueettoman Euroopan standardisointikomitean CEN toimesta 1990-luvun vaihteessa. Esistandardien erinäisten lausuntokierrosten ja lopullisten standardien vahvistamisen jälkeen suomalaisessa rakennesuunnittelussa on vähitellen, vuodesta 2007 alkaen, alettu tottella perinteisten suunnittelukäytäntöjen rinnalla uusiin Eurokoodimitoituskäytäntöihin. (Eurokoodi help desk 2013.)

Nykyään betonirakenteet suunnitellaan Suomessa siis Eurokoodi 2:n mukaan entisen rakentamismääräyskokoelman B4-osan sijaan. Suunnittelukäytännön muutoksella ei ole juurikaan ollut vaikutuksia mitoituksellisiin lopputuloksiin, sillä molemmat suunnittelukäytännöt pohjautuvat samaan CEB-FIP:n perusnormiin. Eurokoodi 2:n myötä mitoituskäytännöt ovat B4:ään verrattuna tarkentuneet ja

muuttujia on tullut jonkin verran lisää, mikä näkyy erityisesti nykyisessä betoni-rakenteiden ankkurointi- ja leikkausmitoituksessa. (Nykyri 2012–2013.)

Osittaisista tarkennuksista huolimatta nykyisten suunnitteluohjeiden mitoitusmenetelmät on kuitenkin pyritty luomaan mahdollisimman yksinkertaisiksi, helpokäyttöisiksi ja yleistettäviksi. Näistä syistä johtuen monia mitoituksellisia asioita lähestytään niihin liittyvien ilmiöiden moninaisuuksiin nähden usein suhteellisen karkeasti. (Leskelä 2008, 24–25; Nykyri 2008, 5.)

Teräsbetonirakenteiden toiminta perustuu yleisesti hyvän puristuslujuuskapasiteetin omaavan betonin ja suurta vetorasitusta kestävän raudoituksen yhteistoimintaan. Rakenteen mekaaniseen toimintaan vaikuttaa olennaisesti raudoituksen ja betonin välinen tartunta, jonka laatu määrittelee näiden materiaalien erilaisten ominaisuuksien hyödyntämistason rakennekokonaisuudessa. (Nykyri 1986, 10.) Teräksen ja betonin väliseen tartunnanlaatuun ja sitä kautta ankkurointikestävyyteen vaikuttavat monet näiden materiaalien yleisistä ominaisuuksista, geometriasta sekä rakenteellisista ratkaisuksista riippuvat tekijät. Tartuntailmiön moninaisuudesta johtuen parhaan mahdollisen tartunnan saavuttaminen vaatii näiden usein myös vuorovaikutuksellisten muuttujien keskinäistä optimointia.

Yksi harjatankojen tartunnanlaatuun ja sitä kautta suorien tankojen ankkuroitumiskestävyyteen voimakkaasti vaikuttava tekijä on muun muassa tankopaksaus. Tankopaksuuden kasvaessa kasvaa ankkuroitava voima tangon vaipan tartunta-alaan nähden suhteellisesti nopeammin, minkä seurauksena tankoa ympäröivän betonin paikalliset jännitykset tangon rasitetummassa päässä muodostuvat tangon pituusyksikköä kohden suuremmiksi. Paikallisten jännitysten ylittäessä betonin kestävyysalka raudoituksen ja betonin välinen yhteistoiminta heikentyy murtumisilmiöiden seurauksena. Murtumisilmiöiden tyypistä riippuen yhteistoiminnan heikkeneminen ilmenee rakenteessa muun muassa suurempina muodonmuutoksina, joiden seurauksena esimerkiksi rakenteen ympäristöolosuhteista riippuva säilyvyys voi heikentyä. Pahimmillaan tankopaksuudesta aiheutuva tartuntaa oleellisesti heikentävä betonipeitteen lohkeaminen voi aiheuttaa rakenteen yhtäkkisen murtumisen oletettua kestävyyttä huomatta-

vasti pienemmällä kuormituksella, mikäli tankopaksuuden vaikutuksia ei ole huomioitu suunnittelussa riittävästi. (Nykyri 2008, 6.)

Paksuilla tangoilla kehittyvistä suurista halkaisuvoimista huolimatta Eurokoodi 2 mahdollistaa suorien tankojen pelkästään tartuntaan perustuvan ankkurointimitoituksen ohuillakin betonipeitekerroksilla ilman erityistoimenpiteitä aina 32 mm:n tankopaksuuteen saakka. Vaikka Eurokoodi 2:n mitoitusmenetelmät perustuvatkin laajoihin kokeellisiin tutkimuksiin ja niiden perusteella tehtyihin mitoitussmalleihin, ei 32 mm tankojen täyttä myötövoimaa vastaavasta suorasta ankkuroituvuudesta ole ilmeisesti kuitenkaan varsinaista kokeellista näyttöä. Suoran tangon pelkästään tartuntaan perustuvan ankkurointimitoituksen 32 mm:n yläraja onkin ilmeisesti määritetty extrapoloimalla ohuempien tankojen tutkimuksiin perustuvan tartuntamallin muuttujia. (Nykyri 2012–2013.)

Tämän tutkimusopin näytetyön päätarkoituksena oli selvittää, ankkuroituuko suora 32 mm:n harjaterästanko pelkästään vaipan tartunnan avulla Eurokoodi 2:n mukaan mitoitettussa palkkirakenteessa, kun tankoon kohdistui tangon myötölujuutta vastaava vetovoima ja betonipeitekerroksen paksuutena käytettiin ohuinta mahdollista tartunnan vaatimaa betonipeitekerrospaksuutta. Tutkimushypoteesin mukaan paksun tangon aiheuttamien suurten paikallisten jännitshuippujen ja halkaisuvoimien vaikutuksesta ohut betonipeite todennäköisesti halkeaisi, eikä tankoon näin ollen ehkä pystyisi kehittymään myötölujuutta vastaavaa vetorasitusta. Hypoteesin mukaan tangon rasitetummasta päästä alkavien paikallisten tartuntamurtojen ketju saattaisi edetä lopulta koko tartunta-alueen läpi, eikä rakenne näin ollen ehkä saavuttaisi laskennallista kestävyyttä.

Tutkimuksessa tangon ankkuroituvuutta tarkasteltiin pelkästään saavutettavan kokonaiskuorman näkökulmasta eikä tangon liukumalle ja siitä seuraaville muodonmuutoksille asetettu mitään rajoitteita. Ankkuroituvuutta indikoivana vertailukohtana pidettiin rakenteen laskennallista myötökuormaa sekä ohuemmillä tangoilla raudoitettun, mutta muuten identtisen, vertailupalkkityypin kuormituskäytäytymistä. Lähtökohtaisesti tutkimuksen tavoitteena oli järjestää koeolosuhteet sellaisiksi, että tankopaksuus toimisi ainoana tangon ankkuroitumiseen vaikuttavana parametrina.

Tutkimuksen edetessä sekundääriseksi arvoksi muodostui tutkimuksessa havaittujen ongelmien esiintuominen ja niiden välttämiseksi esitetyt ehdotukset oppilasvetoisia jatkotutkimuksia silmällä pitäen.

Työ koostuu kahdesta osasta, joista ensimmäisessä käydään yleisesti läpi aiempiin tutkimuksiin ja teorioihin viitaten harjateräksen ja betonin välisiä tartuntailmiöitä, niihin vaikuttavia tekijöitä, tartunnanlaatua kuvaavia ilmiöitä ja tartunnan laadulle asetettuja vaatimuksia. Lisäksi teoriaosassa käsitellään Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeeseen perustuvan suoran tangon ankkurointimitoituksen periaatteita sekä esitellään Eurokoodi 2:n mukaisessa suunnittelussa käytettävien harjaterästen kokeellinen tartuntaominaisuuksien määrittäminen. Työn jälkimmäinen osa muodostuu halkaisijaltaan 32 mm paksuisen harjatangon ankkuroitumista käsittelevästä tutkimusraportista.

2 HARJATANGON TARTUNTAMEKANISMI

Harjatangon ja betonin välinen tartunta voidaan jakaa kolmessa vaiheessa tapahtuvaan osaan. Nämä ovat alkutartunta-, kitkatartunta ja mekaanisen vuorovaikutuksen vaihe. Harjatankojen pintakuvioidin tartuntaa parantavat vaikutukset tulevat esiin tartunnan mekaanisessa vuorovaikutusvaiheessa. (Jokela 1979, 22.)

2.1 Alkutartuntavaihe

Alkutartuntavaiheella tarkoitetaan tartunnan tilaa, jolloin raudoituksen ja betonin välillä ei ole vielä tapahtunut siirtymistä. Tällöin teräksessä vaikuttavat voimat ovat hyvin pieniä. Liitoksen kestävyys perustuu teräs- ja betonipintojen välisiin kohtisuoriin sidosvoimiin. Sidosvoimien oletetaan kehittyvän muun muassa teräksen pinnan ja sementtiliiman välillä tapahtuvan ionidiffuusion, veden haihtumisen ja sementin sitoutumisen seurauksesta aiheutuvien kapillaarivoimien sekä pintojen välisten adheesiovoimien vaikutuksesta. Alkutartuntavoimilla ei kuitenkaan ole käytännössä juurikaan merkitystä betonin ja raudoituksen yhteistoiminnan laatuun tai tartuntalujuuteen. Alkutartuntavaiheessa tartuntajännitysten arvellaan olevan noin 0,5–1,5 MPa:n luokkaa. (Jokela 1979, 23–27; Jokela - Pukki 1983, 25.)

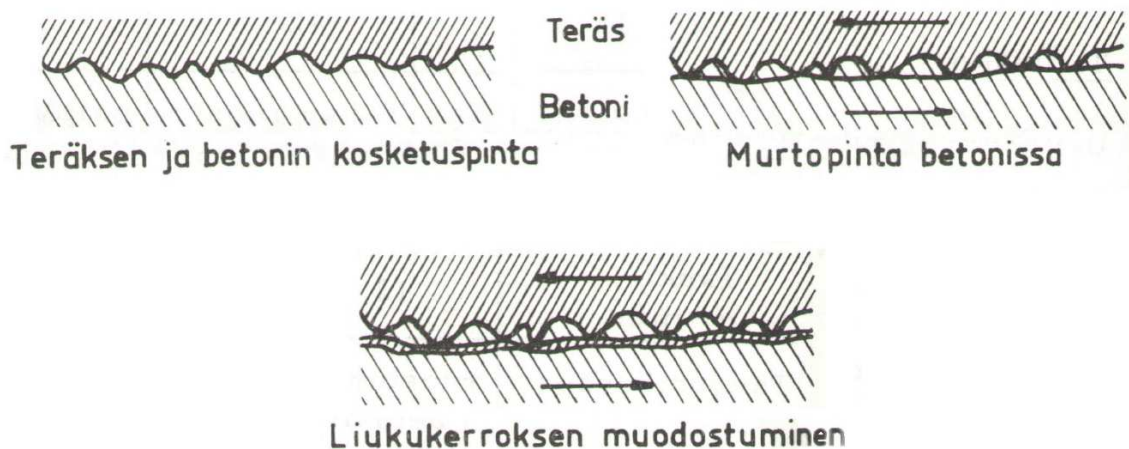
2.2 Kitkatartuntavaihe

Kitkatartuntavaiheen katsotaan perustuvan pääosin tangon harjattomien osien ja betonin väliseen liitokseen, minkä lujuus riippuu sementtikiven kitka- ja leikkausvastuksesta sekä tangon pinnan epätasaisuudesta. Kitkatartuntavaiheessa tangon liukumaa ei juuri tapahdu tai liukuma on hyvin pientä, alle 0,005 mm. (Jokela 1979, 27 ja 136.)

Kitkatartunnan katsotaan muodostuvan kahdesta vaiheesta. Ensimmäisen vaiheen aikana ei vielä ole tapahtunut liukumaa ja tartunta perustuu pääosin tangon pinnan epätasaisuudet täyttäneiden sementtikivivaarujen leikkauslujuuteen. Kitkatartuntakapasiteetin katsotaan saavuttaneen huippunsa, kun suurimmat sementtikivivaarnat ovat leikkautuneet. (Jokela 1979, 30.)

Toisessa vaiheessa, sementtikivivaarujen leikkautumisen jälkeen, tanko on alkanut liukua. Tällöin liukumavastus perustuu täysin epätasaisten leikkauspintojen väliseen kitkaan. Tangon alkuperäisellä pinnan epätasaisuudella on suora vaikutus siihen, kuinka epätasaisiksi leikkauspinnat muodostuvat. Mitä epätasaisimmiksi leikkauspinnat muodostuvat, sitä suurempi on liukumavastus ja sitä pidempään vastus säilyy. Tästä johtuen muun muassa hieman ruostuneilla tai kuumavalssatuilla tangoilla liukumavastus säilyy tasaisempuna sementtikivivaarujen leikkaututtua. Leikkauspintojen epätasaisuudet hioutuvat kuitenkin tangon liukuessa. Pintojen hioutuessa leikkauspintojen väliin muodostuu hieno jauhekerros, joka tunkeutuu leikkauspintojen epätasaisuuksiin tasoittaen epätasaisuuksia. Samalla jauhe toimii laakerikerroksena pintojen välillä pienentäen liukumavastusta entisestään liukuman edetessä. (Jokela 1979, 31.)

Kuvassa 1 on esitetty betonivaarujen leikkaantumispinta ja leikkautuneiden pintojen hioutuessa syntyvä liukukerros.



KUVA 1. Kitkatartuntavaiheen murtumisilmiöt (muokattu lähteestä Jokela 1979, 30)

Molemmissa kitkatartunnan vaiheissa sementtikiven leikkauslujuus määrittelee loppujen lopuksi liukumavastuksen. Ero muodostuu vain leikkauspintojen erilaisuudesta ennen ja jälkeen liukuman alkamisen. Ennen liukumaa tangon epäta-

saisuuksista riippuvat leikkautuvat pinnat ovat pinta-aloiltaan suurempia kuin leikkautumisen jälkeen. Tästä johtuen liukumavastus ennen liukuman alkamista on kitkatartuntavaiheessa aina suurempi kuin liukuman syntymisen jälkeen. (Jokela 1979, 32.)

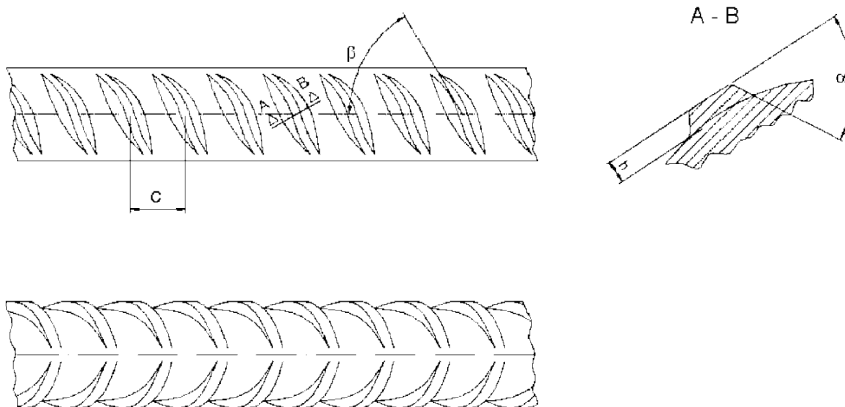
2.3 Mekaaninen vuorovaikutus

Mekaanisella vuorovaikutuksella tarkoitetaan tartuntatilaa, jolloin raudoitustangon pintaan tarkoituksella tehty kuviointi tai muut liukumavastusta lisäävät mekaaniset esteet siirtävät suurimmaksi osaksi tai kokonaan voimat tangon ja betonin välillä. Toimintaperiaate mekaanisessa vaiheessa on näin ollen sama kuin kitkatartuntavaiheessa, perustuen tangon liukuesteinä toimivien betonivaarujen murtumisilmiöihin. (Jokela 1979, 34; Nykyri 1986, 17.)

Mekaanisen vuorovaikutuksen laatuun tangon pintakuviointin osalta vaikuttavat olennaisimmin:

- harjakorkeus h
- harjaväli c
- harjan sivun kaltevuuskulma α
- harjan vinouskulma β . (Jokela 1979, 34.)

Kuvassa 2 on havainnollistettu yllä mainitut pintageometriset muuttujat.



KUVA 2. Olennaisimmat pintageometriset muuttujat nykyisissä harjaterästangoissa (SFS-EN 10080. 2005, 40)

Mekaanisen vuorovaikutuksen aikana tangon sileillä alueilla vaikuttaa käytännössä yhtä aikaa myös kitkatartunta, mutta sen vaikutus kokonaistartuntaan mekaanisen vuorovaikutuksen rinnalla on lähes merkityksetön. (Jokela 1979, 34.)

Mekaanisen vaiheen alussa tangon liukumien aiheutuvat pääosin harjojen edessä olevan betonin kimmoisesta kokoonpuristumisesta. Tällöin harjavälillä ei ole vaikutusta jännitys-liukumariippuvuuteen ja liukuman suuruus riippuu pelkästään harjankorkeudesta sekä betonin lujuudesta. (Jokela - Pukki 1983, 23.)

Leikkausjännitysten kehittyttyä betonissa harjojen ulkopintojen rajaamalla sylinterin muotoisella alueella noin 40–60 prosenttiin betonin puristuslujuudesta, alkaa tangon liukuman kehitys kiihtyä sementtikivikonsolien murtuessa vähitellen jännitysalueilla. Kyseisen jännitystilän jälkeen harjavälin vaikutus alkaa näkyä ympäröivän betonin murtumismekanismeissa. (Jokela 1979, 36.)

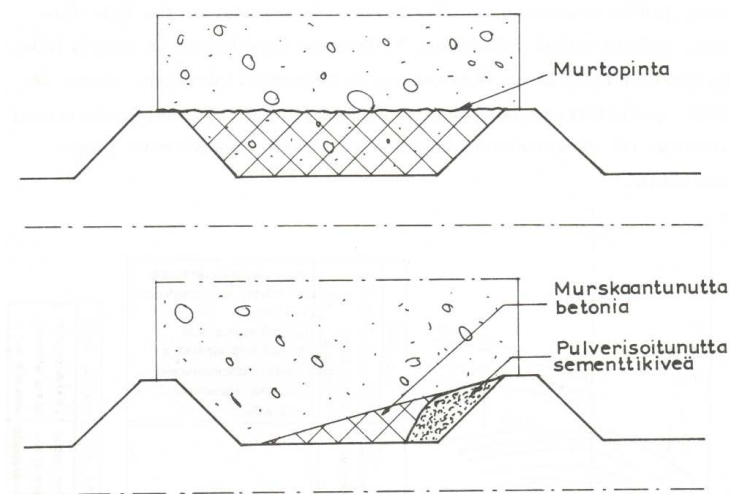
Mikäli harjaväli suhteessa harjakorkeuteen on liian pieni, alle 7 kertaa harjakorkeus, tapahtuu betonin murtuminen harjojen välisen betonikannaksen leikkaantumisenä harjojen ulkopintojen rajaamalla sylinterinmuotoisella alueella. Leikkaantumisen seurauksena liukumien kasvavat yhtäkkisesti eivätkä tartuntavoimat enää kehity. Liukumien kasvaessa tartunta heikkenee nopeasti. Ennen leikkaantumista tangon liukumien jäivät sitä pienemmiksi, mitä pienempi harjavälin ja harjakorkeuden suhde on. Leikkaantumisen aiheutuva tartuntamurtotyyppi on epätoivottu, koska totaalista murtumista ennakoivat ilmiöt jäivät tällöin pieniksi. Äkkinäistä tartuntamurtotyyppiä kutsutaan hauraaksi. (Nykyri 1986, 19; Jokela 1979, 37; Jokela - Pukki 1983, 23.)

Jos taas harjaväli on riittävän suuri harjakorkeuteen nähden, vähintään 10 kertaa harjakorkeus, tapahtuvat murtumisilmiöt aluksi asteittain harjojen etupuoliossa betonissa. Tällöin murskaantunut betoni muodostaa harjojen etupuolelle kiilamaisesti etenevän vyöhykkeen. Murtumisilmiöiden ja murskaantumisen seurauksena harjojen etupuolisen betonin tilavuus pienenee, mikä aiheuttaa tangon liukumista. Harjojen edessä tapahtuvien murtumisilmiöiden alkamisen jälkeen tartuntavoimat pystyvät kuitenkin edelleen kehittymään niin kauan, kun harjojen välisellä alueella on murtumatonta betonia. Tartuntamurrosta muodostuu näin

ollen sitkeä liukumien kasvaessa tasaisemmin suhteessa tartuntavoimien kehitykseen. (Jokela 1979, 36–38; Jokela - Pukki 1983, 23–24; Nykyri 1986, 19.)

Harjojen etupuolella tapahtuvat murtumisilmiöt ja kiilamainen vyöhyke aiheuttavat ympäröivään betoniin vetojännityksiä. Jännitysten ylittäessä betonin vetolujuuden alkaa tankoa ympäröivässä betonissa tapahtua aluksi tankoon nähden poikittaista, mutta jännitysten kasvaessa myös pituussuuntaista halkeilua. Tankoa ympäröivän betonin halkeilulla on olennainen vaikutus tartunnan laatuun. Betonipeitteen halkeiluun liittyviä asioita käsitellään tarkemmin luvussa 3. (Jokela - Pukki 1983, 30.)

Kuvassa 3 on esitetty harjavälistä riippuvat murtumistavat yhdellä harjavälillä, kun tartuntaa heikentävää pituussuuntaista halkeilua ei pääse tapahtumaan. Leikkaantumisen oletetaan tapahtuvan ylemmän kuvan murtopintaa pitkin harjavälin ollessa pieni suhteessa harjakorkeuteen.



KUVA 3. Murtumistavat yhdellä harjavälillä mekaanisessa tartuntavaiheessa (Jokela 1979, 37)

Harjakorkeuden ja -välin lisäksi tartunnan laatuun vaikuttavat myös harjan vino-
us tangon pituusakseliin nähden ja harjan sivun kaltevuuskulma. Harjan vinou-

della ja harjan sivun kaltevuudella ei suoranaisesti ole tartuntaa parantavaa funktiota. Niillä pyritään lähinnä varmistamaan tangon väsymislujisuuden ja taivutussitkeyden säilyminen. On todettu, että harjan vinouskulman β ja harjan sivun kaltevuuskulman α ollessa noin alle 40 astetta, lisääntyvät tangon liukummat harjan ja betonin välisen kitkan pienentyessä. Pieni harjan sivun kaltevuuskulma lisää myös kiilautumisvaikutuksen myötä halkaisuvoimia betonissa. Tästä syystä harjan vinoudelle ja sivun kaltevuudelle on asetettu rajoitteita sekä toisistaan riippuvaisia ehtoja. (Jokela - Pukki 1983, 17–20; Jokela 1979, 69–71; SFS-EN 10080. 2005, 40; SFS 1268. 2010, 10.)

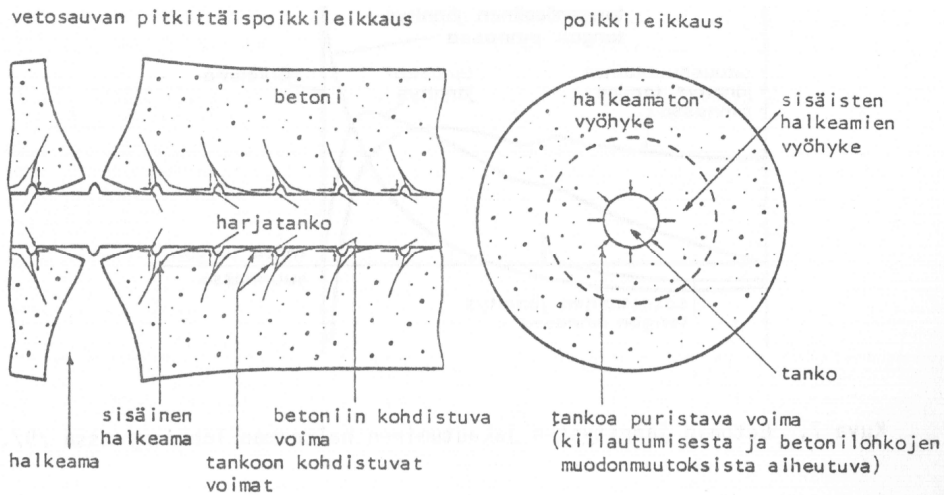
Mekaaniseen vuorovaikutukseen perustuvan tartunnan laatu ja murtotapa riippuvat siis pitkälti tangon pintakuviosta. Murtuminen voi johtua pintakuviosta riippuen joko betonikannasten leikkautumisesta betonin leikkauslujuuden ylittyttyä, betonipeitteen halkeamisesta betonin vetolujuuden ylittyttyä tai betonin murskaantumisesta harjojen edessä puristuslujuuden ylittyessä. Murtumistapa muodostuu sitkeimmäksi, kun murtumisilmiöt keskittyvät harjojen etupuoliseen betoniin eikä betonipeite pääse halkeamaan. (Jokela - Pukki 1983, 26.)

3 MEKAANISEN VUOROVAIKUTUKSEN AIHEUTTAMA HALKEILU

Mekaanisessa vuorovaikutuksessa harjat aiheuttavat tankoa ympäröivään betoniin kehämäisiä halkaisuvoimia. Pintakuvioinnin osalta harjakorkeudella on todettu olevan suurin vaikutus halkaisuvoimien kehitykseen. Vaikka korkeilla harjoilla varustetun tangon liukumat jäävät pienemmiksi, voivat harjojen aiheuttamat halkaisuvoimat kuitenkin muodostua tangon ankkurointikestävyyttä rajoittavaksi tekijäksi. Vetojännitysten ylittäessä betonin vetolujuuden alkaa tankoa ympäröivään betoniin syntyä sisäisiä halkeamia, jotka rasitusten kasvaessa saattavat kehittyä ja edesauttaa tartuntaa olennaisesti heikentävien tangon pituussuuntaisten ja rakenteen pintaan ulottuvien halkeamien kehittymistä. Myös tankopaksuudella on paikallisia jännityksiä kasvattavien ominaisuuksiensa vuoksi halkeilua lisäävä vaikutus. (Jokela - Pukki 1983, 24, 30 ja 34.)

Harjan siirtäessä tangossa vaikuttavaa voimaa betoniin, puristuu harjan etupuolella oleva betoni kasaan, jolloin betonin kokoon puristuvan alueen vastakkaiselle puolelle muodostuu vetojännityksiä. Betonin vetolujuuden ylittyttyä alkaa harjan kohdalle muodostua tangon pituusakseliin nähden poikittainen halkeama. Sisäistä halkeilua tapahtuu aluksi tangon rasitetumman pään läheisyydessä olevien harjojen kohdalla. Tangon vetorasituksen suuntaan suuntautuvia noin 60 asteen kulmassa olevia poikittaisia halkeamia alkaa kehittyä jo hyvin pian alkutartuntavaiheen jälkeen noin 2–3 MPa:n tartuntajännityksillä. Mekaanisen tartuntavaiheen aktivoitumisen vuoksi niitä kutsutaan usein tartuntahalkeamiksi. Tangon pinnan muodoilla on suuri vaikutus halkeamien muodostumiseen. Mikäli tankoa ympäröivä betonipeite on riittävän paksu suhteessa tangon halkaisijaan, rajoittuvat poikittaiset tartuntahalkeamat tangon ympärille muodostuvaan sisäisten halkeamien vyöhykkeeseen. Tällöin halkeamat eivät ulotu rakenteen pinnalle. (Jokela - Pukki 1983, 26 ja 29.)

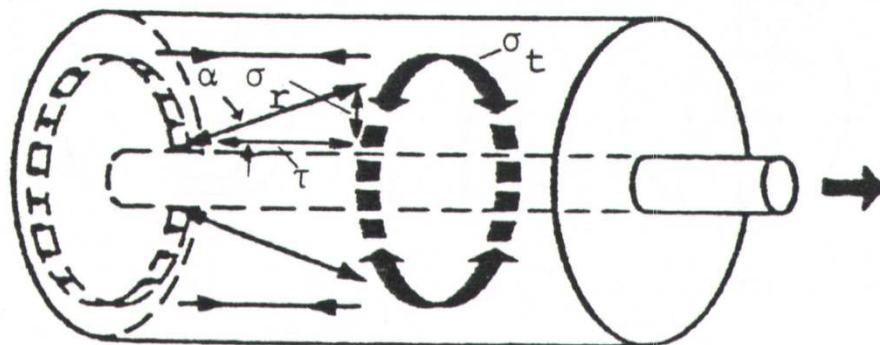
Kuvassa 4 on esitetty periaatepiirros poikittaisten tartuntahalkeamien sijainnista ja harjoilta siirtyvien voimaresultanttien suuntautumisesta tartunta-alueella.



KUVA 4. Periaatekuva voimien siirtymisestä harjoilta betoniin ja sisäisten halkeamien sijainnista (Jokela - Pukki 1983, 30)

Tartuntahalkeaman syntyessä betoniin harjan vetorasitetulle puolelle, pääsee tanko liukumaan paikallisesti. Tangon liukuessa puristuvat harjoihin kiillautuvat etupuoliset betonilohkot tiukasti tankoa vasten, mikä lisää tangon ja betonin välistä tartuntakitkaa. Kiillautunut puristus- ja taivutusrasitettu betonilohko pyrkii, sen kaltevuudesta johtuen, laajentamaan ympäröivää betonia, jolloin tangon ympärille alkaa kehittyä säteittäisiä, kehämäisiä ja poikittaisia vetojännityksiä. Rasitusten ja raudoituksen liukuman kehittyessä tartuntahalkeamia alkaa muodostua yhä syvemmälle tartunta-alueella olevien harjojen ympärille. Samalla tangon poikkileikkauspiirin suuntaiset vetojännitykset kasvavat tankoa ympäröivässä betonissa tartunta-alueen rasitetummassa päässä. (Jokela - Pukki 1983, 26 ja 30–31; Ronkainen 1985, 39.)

Kuvassa 5 on esitetty periaatepiirros mekaanisen vuorovaikutuksen aiheuttamista jännityksistä tankoa ympäröivässä betonissa.



KUVA 5. Mekaanisesta vuorovaikutuksesta aiheutuvat jännitykset tankoa ympäröivässä betonissa (Ronkainen 1985, 39)

Poikittaisten tartuntahalkeamien seurauksesta kiilautuneiden betonilohkojen ja harjojen etupuolelle muodostuneen murskaantuneen kiilamaisen betonivyöhykkeen aiheuttamien halkaisuvoimien yhteisvaikutuksesta tangon pinnasta alkaa kehittyä myös säteittäisiä tangon pituussuuntaisia halkeamia. (Jokela - Pukki 1983, 31; Jokela 1979, 37–39.)

Pituussuuntaisen halkeaman saavuttaessa betonipeitteen pinnan ohuimmalta kohdalta, pääsee tankoa ympäröivä betoni laajenemaan vapaasti, mikäli laajenemista ei ole estetty. Laajenemisen seurauksena tangon tartuntavaste alenee radikaalisti halkeama-alueella ja tanko pääsee liukumaan lähes vapaasti. (Nykyri 1990, 34; Jokela - Pukki 1983, 26, 33 ja 65.)

Betonin alhaisen vetolujuuden vuoksi betonipeitteen paksuudella suhteessa tankopaksuuteen, on merkittävä vaikutus betonipeitteen tangonsuuntaiseen halkeiluun. Betonipeitepaksuuden ollessa vähintään 5-kertainen tankopaksuuteen nähden, ei pintaan ulottuvaa pitkittäishalkeilua katsota tapahtuvan. Käytännössä, etenkin paksuilla tangoilla, ei kuitenkaan ole järkevää toteuttaa rakenteita näin paksuilla betonipeitekerroksilla. (Nykyri 2008, 6; Jokela - Pukki 1983, 33; Nykyri 1990, 11.)

Halkeilun rajoittaminen

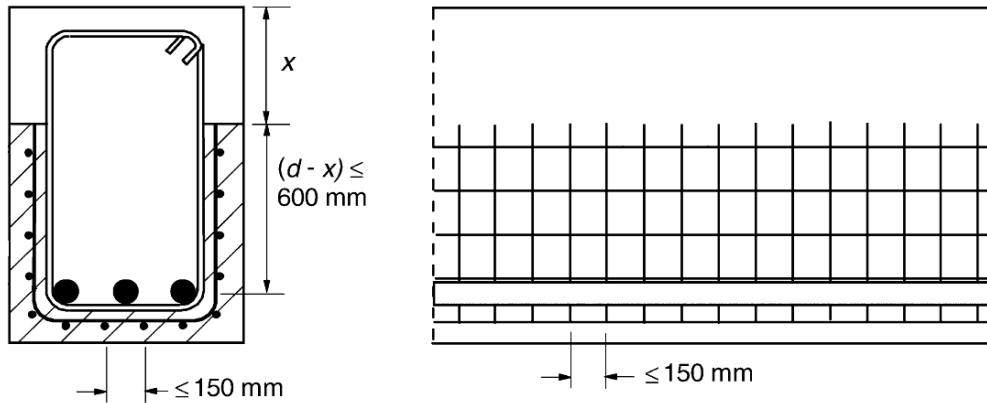
Pitkittäishalkeaman syntymisestä aiheutuva totaalinen tartunnan menetys voidaan ehkäistä rajoittamalla halkeaman avautumista muun muassa riittävällä

poikittaisella raudoituksella, mikä lisää tartunnan sitkeyttä. Poikittainen raudoitus ei sinänsä estä pitkittäshalkeaman syntymistä, mutta se rajoittaa halkeaman avautumista, jolloin tartuntavoimat pystyvät edelleen kehittymään. Poikittaisraudoituksesta huolimatta pitkittäshalkeilu lisää aina jonkin verran tangon liukumia, koska poikittainen raudoitus alkaa toimia tehokkaasti vasta betonipeitteen halkeamisen jälkeen. Tällöin tangon ja betonin välinen tartunta ei luonnollisestikaan ole enää yhtä tiivis kuin ennen halkeamista. (Jokela - Pukki 1983, 26 ja 33.)

Suurin hyöty poikittaisesta raudoituksesta saadaan, kun se sijoitetaan pääraudoituksen ja betonin ulkopinnan välillä mahdollisimman lähelle päätankoa. Paksut tangot vaativat suuremman halkaisuvaikutuksensa vuoksi runsaamman poikittaisen raudoituksen kuin ohuemmat tangot. (Jokela - Pukki 1983, 34; Nykyri 1990, 35.)

Poikittaisraudoituksen lisäksi paksuilla tangoilla voidaan käyttää vielä erillistä pintaraudoitusta, joka toteutetaan yleensä tiheäsilmäisenä verkkohaotuksena. Toisaalta pintaraudoitusta käytettäessä joudutaan kasvattamaan myös betonipeitettä vaadittavan suojabetonikerroksen saavuttamiseksi. Paras halkeilua rajoittava vaikutus saadaan, kun pintaraudoitus sijoitetaan mahdollisimman lähellä betonin ulkopintaa. Halkeilua rajoittavaa pintaraudoitusta käytetään yleensä halkaisijoiltaan yli 32 mm:n tangoilla ja tankonipuilla, joiden ekvivalentti halkaisija on yli 32 mm. Käytetty pintaraudoitus voidaan ottaa huomioon vetoraudoituksen kokonaisuudessa, mikäli sen ankkurointi on riittävä. (Leskelä 2008, 486; SFS-EN 1992-1-1 + AC liite J. 2005, 214.)

Kuvassa 6 on esitetty periaatepiirros pintaraudoitteesta.



x on neutraaliakselin korkeusasema murtorajatilassa

KUVA 6. Pitkittäishalkeilua rajoittava pintaraudoite (muokattu lähteestä SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, liite J, 214)

Tartunta-alueella esiintyvillä poikittaisilla vähintään 7,5 MPa:n suuruisilla puristusjännityksillä on luonnollisesti betonipeitteen pitkittäishalkeilua rajoittava vaikutus. Yksiaksiaalisia puristusjännityksiä voidaan hyödyntää esimerkiksi tukialueilla, mikäli tukialueen pinta on riittävän jäykkä ja tukipinnan sekä betonin välillä vallitsee riittävä betonin laajenemista rajoittava kitka. (Nykyri 2008, 6; Nykyri 1990, 36.)

4 TARTUNTAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Harjaterästangon hyvä tartunta on seurausta useiden tartuntaan vaikuttavien tekijöiden ja ilmiöiden optimaalisesta yhteistoiminnasta. Tartuntaan ja sen laatuun vaikuttavat muun muassa:

- betonin koostumus ja lujuus
- raudoituksen geometriset ominaisuudet ja lujuus
- raudoituksen sijainti ja suunta rakenteessa
- raudoitteiden väliset etäisyydet
- raudoitusta ympäröivän betonikerroksen paksuus
- tarkasteltavaan tankoon nähden poikittainen raudoitus
- tankoa ympäröivään betoniin kohdistuva poikittainen paine. (Jokela 1979, 63–84.)

Alla on pyritty avaamaan edellä mainittuja tekijöitä ja niiden muutoksista seuraavia ilmiöitä. Poikittaisen raudoituksen, betonipeitepaksuuden ja poikittaisen paineen vaikutuksia käsiteltiin jo mekaanisen vuorovaikutuksen aiheuttamaa halkeilua käsittelevässä osiossa.

4.1 Betoni

Merkittävimpanä tartuntaan vaikuttavaista betonin ominaisuuksista pidetään yleisesti sen lujuutta. Lopullinen tartuntaan vaikuttava lujuus koostuu kuitenkin useiden ainesosasten yhteistoiminnasta sekä niiden optimaalisista keskinäisistä suhteista. (Jokela 1979, 63–68; Ronkainen 1985, 29.)

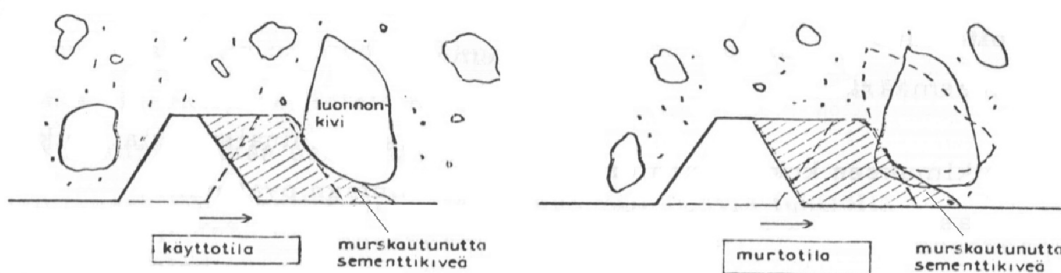
Betonin lujuuden kasvattaminen lisää yleensä tartuntalujuutta ja pienentää tangon liukumia, mikäli pitkittäishalkeilu ei asetu rajoittavaksi tekijäksi. Betonin lujuudesta saatavat hyödyt käyttörajatilan halkeilussa saattavat kuitenkin kääntyä murtorajatilassa epätoivotuiksi ilmiöiksi, sillä lujuuden kasvun ja liukumien pienentymisen myötä tartuntamurto muuttuu hauraammaksi. (Jokela - Pukki 1983, 78.) Kuvassa 9 on esitetty betonin lujuuden ja tartunnan jäykkyyden välinen yhteys. Betonin lujuuden vaikutus tartunnanlaatuun on esitetty kuvan 9 katkoviivalla piirretyllä kuvaajalla, jonka suhteellinen harjapinta-ala on 0,1.

Merkittävimmin betonin ainesosista tartuntaan vaikuttavat sementtikivi ja runkoaines. Sementtikiven ominaisuuksia tarkasteltaessa sementtikiven lujuudella ja sementtikiven sekä runkoainepartikkelien välisellä tartunnalla on olennaisin vaikutus raudoituksen ja betonin väliseen yhteistoimintaan. (Jokela 1979, 63.)

Sementtikiven lujuuden vaikutus näkyy tartunnan kitka- ja mekaanisen vuorovaikutuksen vaiheissa suurempana leikkaus- ja puristuslujuutena, jolloin varsinkin kuormituksen alkuvaiheen liukumät jäävät pienemmiksi. (Jokela 1979, 27–37)

Liukumisen alettua, sementtikiven leikkaantumisen ja puristuslujuuden ylittymisen jälkeen, runkoaineen laadulla alkaa olla merkittävä vaikutus tartuntaan. Tällöin runkoaineen lujuudella, maksimirakekoolla, rakeisuuden optimaalisella painotuksella ja raemuodolla on suuri vaikutus liukumien kehitykseen ja tartunnan sitkeyteen. (Jokela 1979, 63–68.)

Suuret, lujat ja lähes kokoonpuristumattomat runkoainepartikkelit toimivat harjojen edessä liukuesteinä, jakaen harjoilta tulevan paineen suuremmalle alalle ympäröivään betoniin (kuva 7). Luja ja suuri kiviaines kestää luonnollisesti sementtikiveä sekä pienempiä runkoainepartikkeleita paremmin harjoilta tulevia rasituksia murtumatta. Karkean raekoon vaikutus näkyy pienempinä liukumina ja tartunnan sitkeytenä. (Jokela 1979, 66 ja 144.)



KUVA 7. Periaatekuva harjojen kiilaumisesta runkoainepartikkeleihin, kuvan harjaa kiilaavan runkoainepartikkelin koko ei ole oikeassa suhteessa harjan kokoon nähden (muokattu lähteestä Jokela 1979, 64)

Mikäli runkoaines koostuu pääosin hienojakoisista runkoainepartikkeleista, kohdistuu harjojen paine useista pienistä partikkeleista muodostuneisiin matriiseihin. Tällaisten matriisien lujuus on pienempi ja kokoonpuristuvuus huomattavasti suurempi kuin yhden homogeenisen kiinteän partikkelin. Tästä syystä tangon liukumat muodostuvat suuremmiksi paljon hienojakoista runkoainesta sisältävässä betonissa. Jos taas runkoaines koostuu pääosin karkeasta raekoosta, muodostuu massa jakautuvuudeltaan epähomogeenisemmaksi ja huokoisuus lisääntyy tangon ympärillä. Tällainen massa ei ympäröi tankoa hyvin ja tartunta jää vajaaksi. Tartunnan kannalta optimi hienoainesmäärä on noin 15–20 prosenttia koko runkoainesmäärästä. Hienoainesmäärän kasvaessa lisääntyvät myös betonin kutistumisesta aiheutuvat vetojännitykset tankoja ympäröivässä betonissa, millä on betonipeitteen halkeamista edesauttava vaikutus. (Jokela 1979, 66–67; Jokela - Pukki 1983, 32.)

Varsinaisella betonin huokostamisella ei ole havaittu olevan, huokostetun betonin yleisesti alentunutta puristuslujuutta lukuun ottamatta, erityistä vaikutusta tartuntaan. (Jokela 1979, 68.)

Vaikka sementtikiven lujuus vaikuttaa luonnollisesti suurimmalta osin betonin lujuuteen, jää sen kapasiteetti hyödyntämättä, mikäli sementtikiven ja runkoaineksen välinen tartunta muodostuu puutteelliseksi. Betonin lujuuden kannalta partikkelien välinen tartunta on olennaisen tärkeää, koska murtuminen alkaa ensimmäiseksi runkoainepartikkelien ja sementtikiven välisillä rajapinnoilla tapahtuvista mikromurtumisista. Runkoaineksen puhtaudella, raemuodolla ja vedenimukyvyllä on olennainen vaikutus partikkelien väliseen tartuntaan ja siten betonin vetolujuuteen. Sementtikiven ja runkoaineksien tartunnalla on vaikutusta myös massan koossapysyvyyteen ja notkeuteen. (Jokela 1979, 66.)

Massan notkeudella voi puolestaan olla kaksijakoinen vaikutus tartuntaan. Toisaalta notkea massa tunkeutuu helpommin rakenteeseen ja ympäröi siten tasaisemmin raudoituksen. Toisaalta taas notkeassa massassa tapahtuu herkemmin erottumista, jolloin tankojen alle muodostuu enemmän tartuntaa heikentäviä huokosia ja vesipesiä. (Ronkainen 1985, 29.)

4.2 Raudoitus

Raudoituksen osalta tartuntaan katsotaan olennaisimmin olevan vaikutusta:

- tangon pintakuviointilla
- tankopaksuudella
- tangon pinnan laadulla
- mahdollisella tangon pinnan pinnoituksella
- raudoitustangon lujuudella. (Jokela 1979, 68.)

4.2.1 Tangon pintakuviointi

Tangon pintakuviointin geometrian vaikutuksia tartuntaan käsiteltiin olennaisimmilta osin harjatangon tartuntamekanismia käsittelevässä osiossa. Poikittaisen harjan korkeuden, harjavälin, harjan kaltevuuden ja harjan vinouden lisäksi pintakuviointin geometrisista ominaisuuksista tartuntaan katsotaan olevan vaikutusta myös:

- poikittaisharjan muodolla
- poikittaisten harjarivien määrällä
- pitkittäisharjan korkeudella
- pitkittäisharjojen lukumäärällä
- pitkittäisharjan nousumatkalla kierteisissä harjoissa. (Jokela - Pukki 1983, 13.)

Raudoituksen ja betonin välisen hyvän yhteistoiminnan kannalta tangon pintakuviointin tulee olla sellainen, että:

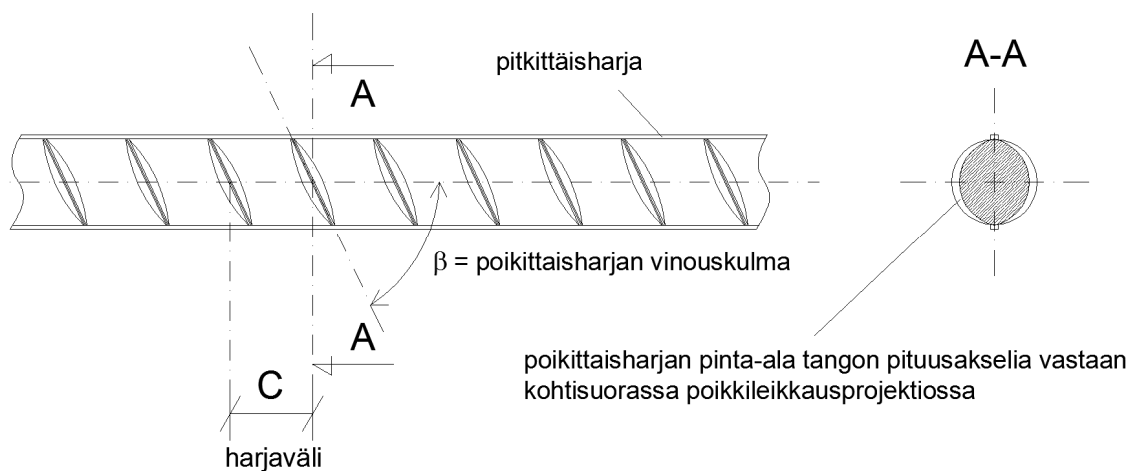
- tartuntalujuus muodostuu mahdollisimman suureksi
- tartuntamurto muodostuu tarpeeksi sitkeäksi
- käyttötilan liukumat jäävät mahdollisimman pieniksi
- syntyvät halkaisuvoimat jäävät mahdollisimman pieniksi
- tanko ei pääse kiertymään akselinsa ympäri. (Jokela - Pukki 1983, 19.)

Koska pintageometrisista muuttujista muun muassa poikittaisharjan vinous, kaltevuus, harjan muoto ja pitkittäisharjan malli ovat pitkälti määräytyneet muista kuin puhtaasti tartunnallisista syistä (Jokela - Pukki 1983, 17–20), keskitytään

tässä työssä käsittelemään pintakuvioidin geometrian vaikutusta lähinnä suhteellisen harjapinta-ala -käsitteen kautta.

Suhteellinen harjapinta-ala

Tangon tartuntaominaisuuksia yleisesti kuvaavana suurena pidetään suhteellista harjapinta-alaa. Suhteellisella harjapinta-alalla tarkoitetaan harjavälillä esiintyvien poikittais- ja pitkittäisharjojen harjapinta-alojen summan suhdetta tangon nimellisellä halkaisijalla laskettuun vaippapinta-alaan harjavälillä. Yksittäisen harjan harjapinta-ala määritetään tangon pituusakselia vastaan kohtisuorasta poikkileikkausprojektiosta. Pitkittäisharja huomioidaan suhteellista harjapinta-alaa määritettäessä vain, jos sen sijainti muuttuu poikkileikkauksessa tangon pituusakselilla edettäessä. Asian havainnollistamiseksi suhteellisen harjapinta-alan muuttujat on esitetty kuvassa 8. (Leskelä 2008, 64; EN ISO 15630-1. 2002, 20–26.)



KUVA 8. Suhteelliseen harjapinta-alaan vaikuttavat pintakuvioidin parametrit (muokattu lähteestä SFS-EN ISO 15630-1. 2002, 24)

Kaavamuodossa suhteellinen harjapinta-ala f_R voidaan esittää seuraavasti:

$$f_R = \frac{1}{\pi \cdot d} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (F_{R,i,j} \cdot \sin \beta_{i,j})}{c_i} \right) + \frac{1}{p} \sum_{k=1}^q a_k, \text{ missä} \quad \text{KAAVA 1}$$

d = tangon nimellinen halkaisija

n = poikkileikkauksessa esiintyvien poikittaisharjarivien lukumäärä

m = samassa rivissä olevien erisuuntaisten poikittaisharjojen lukumäärä

F_R = yhden poikittaisharjan pituusleikkauksen pinta-ala

β = poikittaisharjan vinouskulma

c = harjaväli

P = kylmäkierretyn tangon pituusharjan nousu mittaussvälillä

q = kylmäkierrettyjen tankojen pituusharjojen lukumäärä

a = pitkittäisharjan korkeus. (SFS-EN ISO 15630-1. 2002, 22, 24 ja 26.)

Kaavan 1 jälkimmäinen summatekijä koskee vain kylmäkierrettyjä tankoja eikä sen osuus suhteellisen harjapinta-alan kokonaisarvosta saa olla enempää kuin 30 prosenttia. (SFS-EN ISO 15630-1. 2002, 26.)

Harjojen pinta-alojen määrittämiseen käytetään yleensä siihen suunniteltuja erikoislaitteita, mutta harjapinta-alat voidaan määrittää myös käsin mittaamalla harjan korkeuksia esimerkiksi kolmesta kohdasta riittävän tarkalla mittalaitteella ja laskemalla harjan otaksuttua muotoa vastaava pinta-ala likiarvokaavalla. (Jokela - Pukki 1983, 15; SFS-EN ISO 15630-1. 2002, 20, 22, 24, 26 ja 28.)

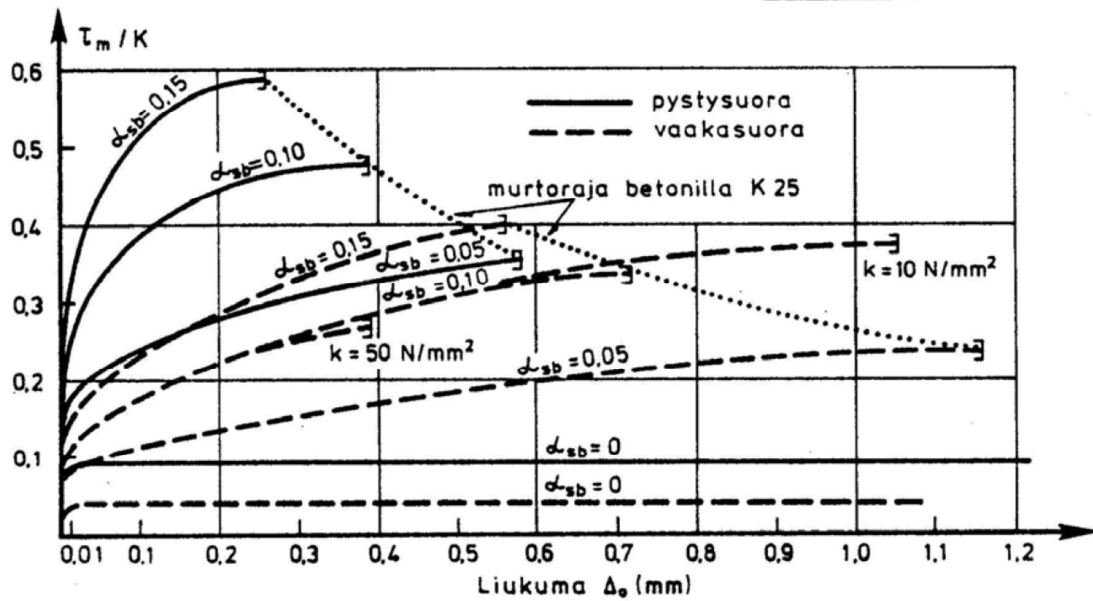
Kuten edellä on esitetty, on harjan korkeudella, harjavälillä ja niiden suhteella olennaisin vaikutus tartunnan laatuun. Kaavan 1 mukaan myös suhteellinen harjapinta-ala koostuu pitkälti näiden muuttujien suhteesta, jota Jokelan ja Pukin mukaan poikittaisharjan vinous voi ääripäiden välillä muuttaa maksimissaan kolmasosan verran. (Jokela - Pukki 1983, 24.)

Pelkkä suhteellisen harjapinta-alan arvo ei kuitenkaan kerro suoraan tartunnan laadusta, sillä sama suhteellisen harjapinta-alan arvo voidaan saavuttaa sekä korkeilla harjoilla ja pitkällä harjavälillä että matalammilla harjoilla ja lyhyemmällä harjavälillä. Vaikka tankojen suhteelliset harjapinta-ala -arvot olisivat yhtä

suuria, voivat murtumisilmiöt näin ollen muodostua harjakorkeudesta ja -välistä riippuen hyvinkin erilaisiksi. Tästä syystä harjakorkeuksille ja harjaväleille on asetettu rajoitteita. (Jokela - Pukki 1983, 24; SFS-EN 10080. 2005, 40.)

Tangon tartuntaominaisuuksien katsotaan paranevan tiettyyn rajaan saakka suhteellisen harjapinta-alan kasvun myötä. Aluksi suhteellisen harjapinta-alan kasvun myötä tartuntalujuus paranee, tartuntajännitykset kasvavat ja tangon liukumien pienenevät. Tartunnan muuttuessa näin ollen jäykemmäksi, pienenevät myös taivutushalkeamavälit ja -leveydet. Suhteellisen harjapinta-alan kasvaessa kehittyvät kuitenkin myös pintakuvioidin aiheuttamat halkaisuvoimat samalla suuremmiksi. Tällöin tartuntaa heikentävien halkeamien muodostumisriski kasvaa. Liukumien pienentyessä myös tartuntamurto alkaa muodostua hauraammaksi. (Leskelä 2008, 64–65; Nykyri 2008, 6.) Suhteelliseen harjapinta-alaan liittyvissä tutkimuksissa on havaittu, että suhteellisen harjapinta-alan ylittäessä arvon 0,10...0,13, eivät taivutushalkeamaleveydet enää pienene ja tartuntamurto alkaa muodostua liian hauraaksi. (Leskelä 2008, 65.)

Kuvassa 9 on esitetty suhteellisen harjapinta-alan vaikutus tartuntajännitysten ja tangon liukuman kehittymiseen. Kuvasta käy ilmi myös tangon asennon sekä betonin lujuuden vaikutus tartuntaan. Katkoviivalla piirretyt kuvaajat ilmaisevat vaakatasossa olevien tankojen tartuntaa, kun betonointisuunta on ollut kohtisuora tangon pituus akseliin nähden.



KUVA 9. Suhteellisen harjapinta-alan ($f_R = \alpha_{sb}$) ja betoninlujuuden vaikutus tartuntajännitys-liukumariippuvuuteen (Jokela - Pukki 1983, 15)

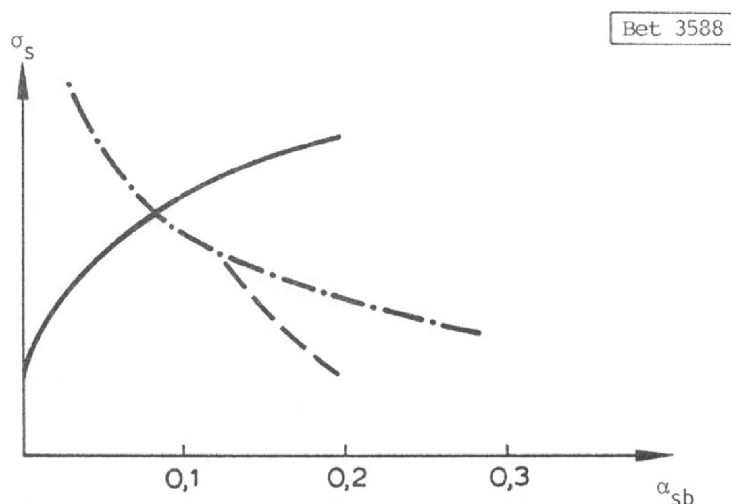
Betonin ja raudituksen välisen toivotun yhteistoiminnan varmistamiseksi suhteelliselle harjapinta-alalle on asetettu yleensä maa- ja tuotekohtaisia vähimmäisvaatimuksia. (Jokela - Pukki 1983, 20.)

Taulukossa 1 on esitetty suhteellisen harjapinta-alan vähimmäisvaatimukset Suomessa pitkään käytössä olleelle A500HW-harjaterästangolle ja Eurokoodi 2:n vaatimukset täyttävälle B500B-harjaterästangolle.

TAULUKKO 1. Tankotyypeille asetetut vähimmäisvaatimukset suhteellisen harjapinta-alan suhteen (muokattu lähteestä Nykyri 2008, 3)

Nimellishalkaisija [mm]	Suhteellisen harjapinta-alan vähimmäisarvo $f_{R,min}$	
	B500B	A500HW
6	0,039	0,043
8	0,044	0,050
10	0,052	0,058
12	0,056	0,063
14	0,056	0,063
16	0,056	0,063
20	0,056	0,063
25	0,056	0,063
28	0,056	-
32	0,056	0,063

Vaikka suunnitteluohjeet ja tuotestandardit eivät suoranaisesti aseta ylärajaa suhteelliselle harjapinta-alalle, on selvää, että se sijaitsee jossain edellä mainittujen tutkimushavaintojen 0,10–0,13:n alueella. Kuvassa 10 on esitetty, kuinka suhteellisen harjapinta-alan kasvusta aiheutuvat ei-toivotut ilmiöt alkavat rajoittaa käytettävissä olevan teräsjännityksen hyödyntämistä.



KUVA 10. Suhteellisen harjapinta-alan vaikutus teräsjännitysten hyödynnettävyyteen (Jokela - Pukki 1983, 76)

Kuvan 10 yhtenäisellä viivalla piirretty kuvaaja esittää, kuinka suhteellisen harjapinta-alan kasvun myötä tangon liukumat jäävät pienemmiksi eivätkä taivutushalkeamat näin ollen rajoita teräsjännitysten hyödyntämistä. Samalla kuitenkin pistekatkoviivalla kuvattu tartuntamurto muuttuu hauraammaksi. Lisäksi katkoviivalla esitetty tangon suuntainen halkeilu alkaa rajoittaa hyödynnettäviä teräsjännityksiä. Kuvan 10 mukaan suhteellisen harjapinta-alan lähestyessä arvoa 0,1, alkavat tartuntaa heikentävät ilmiöt rajoittaa käytettävissä olevien teräsjännitysten hyödyntämistä. (Jokela – Pukki 1983, 75–76.)

4.2.2 Tankopaksuuden vaikutus

Pienempi tanko ankkuroi pituusyksikköä kohti suhteellisesti suuremman voiman kuin paksu tanko, koska tangon tartunta- ja poikkileikkausalan suhde on kääntäen verrannollinen tangon halkaisijaan. (Jokela 1979, 77.)

Asiaa voidaan havainnollistaa seuraavalla esimerkillä: Jos halkaisijaltaan 8 mm:n tanko ankkuroi vaipan pituusyksikköä kohden voiman F , ankkuroi 16 kappaletta 8 mm:n tankoja silloin voiman $16F$. Tarkasteltaessa taas esimerkiksi halkaisijaltaan 32 mm:n tankoa todetaan, että sen poikkileikkausala on 16 kertaa suurempi kuin 8 mm tangon poikkileikkausala. 32 mm:n tanko kestää siis yhtä suuren rasituksen kuin 16 kappaletta 8 mm:n tankoa. 32 mm tangon tartuntapinta-ala kasvaa pituusyksikköä kohden poikkileikkauspiirin mukaan kuitenkin vain 4-kertaisesti 8 mm:n tankoon nähden. 32 mm tangon ankkurointikyky kasvaa siis vain 4-kertaisesti mahdollisen rasituksen kasvaessa 16-kertaisesti. Tästä johtuen paksut tangot tarvitsevat suhteellisesti pidemmän ankkurointipituuden kuin ohuemmat tangot. Lisäksi tankopaksuuden kasvaessa myös halkaisuvoimat kasvavat ympäröivässä betonissa suurempien paikallisten jännitysten myötä, millä on taas kerrannaisvaikutuksia muun muassa tangon kuormitetun pään liukumisiin. (Jokela 1979, 77; Jokela - Pukki 1983, 34; Nykyri 1990, 57.)

4.2.3 Tangon pinnan laadun, pinnoituksen ja lujuuden vaikutus

Tangon pinnan laadulla on pääsääntöisesti vaikutusta vain kitkatartuntavaiheessa, kuten kitkatartuntaa käsittelevässä luvussa esitettiin. Tankopaksuuden kasvaessa pinnan laadun merkitys vähenee. Pinnan laadun katsotaan olevan riippuvainen valmistusprosessista, korroosioasteesta, tangon pinnalla olevista epäpuhtauksista ja mahdollisista korroosiota ehkäisevistä pinnoitteista. (Jokela 1979, 72–74.)

Valmistusprosessin osalta on todettu, että kuumavalssattujen tankojen pinta on yleensä epätasaisempi kuin kylmämuokatuilla tangoilla. Tästä johtuen kuumavalssattu tanko saavuttaa paremman liukumavasteen kitkatartuntavaiheessa. (Jokela 1979, 73.)

Pintakorroosion vaikutusta tartuntaan on tutkittu paljon ja tutkimustulosten perusteella kevyesti korroosioaurioitunut tangon pinta, tehdaspintaa epätasaisempaan, saattaa parantaa hieman tangon alkuvaiheen tartuntaa. Jos taas korroosioaste on edennyt pidemmälle ja tangon pinnalla esiintyy irtoavaa ruoste-liusketta, on tällaisella korroosiolla yleensä jonkin verran tangon tartuntaa heikentävä vaikutus. Mikäli ruostumisaika on ollut ilmassa alle 3 kuukautta, sillä ei katsota olevan ainakaan tartuntaa heikentäviä vaikutuksia. (Jokela 1979, 31, 73–74.)

Muista pinnan epäpuhtauksista mainitaan öljy, jolla on havaittu olevan merkittävä vaikutus tangon liukumien kasvamiseen. Öljyllä ei kuitenkaan ole todettu olevan juurikaan vaikutusta tartuntalujuuden maksimiarvoihin murtotilassa. (Jokela 1979, 76.)

Pinnoituksen vaikutus

Tankojen pinnoitteista mainitaan sen verran, että pinnoitusmateriaalista riippuen pinnoituskerroksen paksuudella, pinnoituksen asennustavalla sekä joillakin pinnoitusmateriaalien ominaisuuksilla on todettu olevan tartuntaa heikentäviä vaikutuksia. (Jokela 1979, 75–76.)

Esimerkiksi epoksinnoituksen paksuus saa olla korkeintaan 0,25 mm. Tätä paksuudella kerroksilla on todettu alkavan olla tartuntaa heikentäviä vaikutuksia. Kuumasinkitys saattaa aiheuttaa tartuntaa alentavia vetyhuokosia tuottavan reaktion betonin kalsiumhydroksidin kanssa. Sinkin ja kalsiumhydroksidin välinen reaktio voidaan kuitenkin estää passivoimalla sinkkipinnoite tai valitsemalla betonilaatu, joka ei reagoi sinkin kanssa. Sinkkipinnoite passivoituu myös itsensä ulkoilman vaikutuksesta noin neljässä viikossa. (Jokela 1979, 75–76; SFS 1266. 2006, 3-4.)

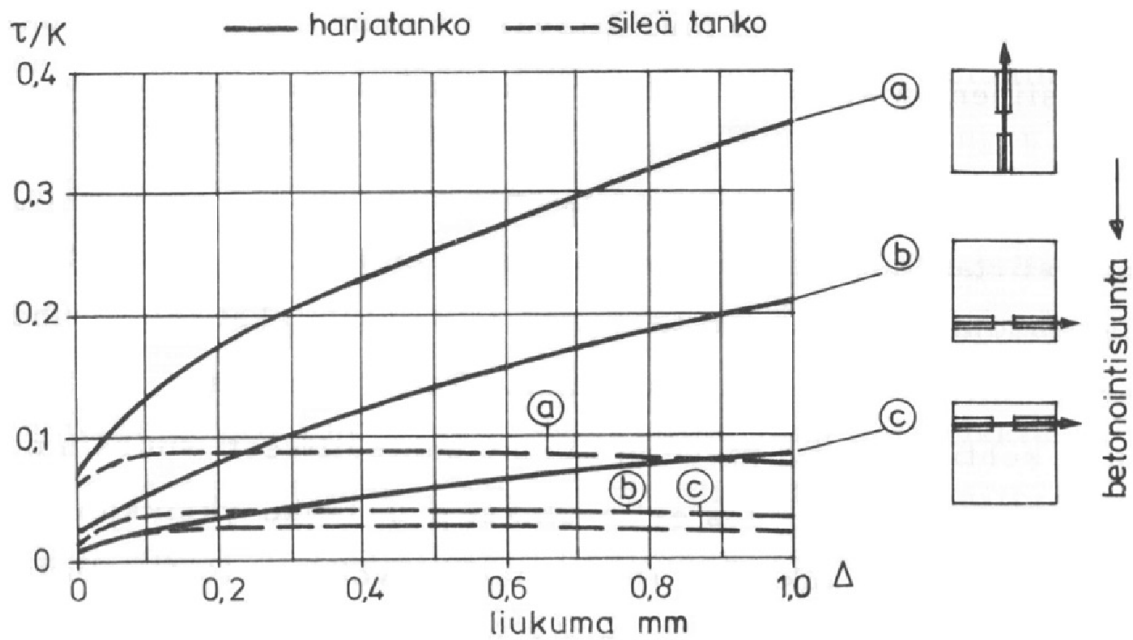
Lujuuden vaikutus

Tangon lujuuden kasvamisella on samantapainen vaikutus tangon ankkuroitumiseen kuin tankopaksuudella. Mitä suurempia jännityksiä tanko kestää ja aiheuttaa tartunnan välityksellä ympäröivään betoniin, sitä pidemmän tartuntapi- tuuden tanko vaatii. Tästä syystä tankojen ankkurointipituudet on määritettävä uudestaan, mikäli rakenteen kestävyyttä halutaan kasvattaa suunnitteluvai- heessa vaihtamalla heikompi teräslaatu lujempaan. (Jokela 1979, 77.)

4.3 Tangon sijainti, betonointisuunta ja tankojen väliset etäisyydet

Tangon suuntautumisella suhteessa betonointisuuntaan ja tangon sijainnilla rakenteessa on todettu olevan tangon pintapintakuvioinnin jälkeen merkittävin vaikutus tartuntaominaisuuksiin. Lisäksi tankojen keskinäiset etäisyydet, suoja- betonipeitekerroksen paksuus ja poikittainen rauditus vaikuttavat olennaisesti suorien tankojen tartuntaan. (Leskelä 2008, 64; Nykyri 1990, 32–34; Jokela 1979, 77.)

Tangon korkeussuuntaisen sijainnin ja suunnan vaikutus tartuntajännityksiin on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. Tangon suunnan ja sijainnin vaikutus tartuntajännityksiin (Jokela 1979, 78)

Kuvan 11 mukaan pystysuuntaisten tankojen liukumavastus on selkeästi suurin, kun vetorasitus kohdistuu betonointisuuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan. Huonoimman tartunnan puolestaan saavuttavat rakenteen yläpintaan vaakasuoraan sijoitetut tangot.

Tartuntaan vaikuttavien ilmiöiden katsotaan aiheutuvan tankoa ympäröivän betonin tiivistymisestä ja sedimentoitumisesta. Tangon yläpuolisen betonimassan aiheuttama hydrostaattinen paine parantaa betonin tiivistymistä tangon ympärille. Tästä johtuen rakenteen alaosaan sijoitettujen tankojen tartunta on aina parempi kuin yläosassa sijaitsevilla tangoilla. Varsinaisen tiivistystyön aikana ja sen jälkeen betonissa tapahtuu, notkeudesta riippuen, aina jossain määrin sedimentoitumista ja massassa olevan ilman poistumisesta aiheutuvaa painumista. Tällöin vaakasuuntaisten tankojen alle ja pystysuuntaisten tankojen poikittaisharjojen alle voi muodostua vesipesiä ja huokosia. (Jokela 1979, 78; Nykyri 1990, 32.)

Erottuminen ja painuminen on voimakkainta rakenteen yläosissa, mutta sitä tapahtuu aina jonkin verran myös rakenteen alaosissa. Vaakatasossa olevien

tankojen alapinnoille muodostuu tartuntaa heikentäviä huokosia ja vesipesiä suhteellisesti enemmän kuin pystysuuntaisten tankojen poikittaisharjojen alle. Epäedullisissa olosuhteissa korkeiden rakenteiden yläpintaan sijoitettujen vaakasuuntaisten tankojen liukumavastus voi jäädä jopa puolet pienemmäksi alapinnassa sijaitseviin tankoihin verrattuna. (Jokela 1979, 78–79.)

Painevalutekniikkaa, jossa betoni pumpataan muotin alaosaan, käytettäessä tankojen tartuntaominaisuudet todennäköisesti paranevat jonkin verran betonin virtaussuunnan muutoksesta johtuen. Painevalussa tankojen alapuolelle pakkautuu enemmän karkeaa runkoainesta kuin tankojen yläpuolelta betonoidessa. Tämä saattaa parantaa erityisesti rakenteen alaosaan sijaitsevien tankojen tartuntaa. Lisäksi painevalussa usein käytettävällä itsetiivistävällä betonilla saavutetaan paremmasta tiivistymisestä johtuen yleisesti parempi tartunta kuin normaalibetonilla. Painevalutekniikka ei kuitenkaan poista betonin plastisesta painumisesta aiheutuvia tartuntaa heikentäviä ilmiöitä. (Nykyri 2013.) Varsinaista tutkimustietoa painevalun vaikutuksista tankojen tartuntaominaisuuksiin ei löytynyt.

Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeen mukaan betonin painumisesta johtuvien ilmiöiden aiheuttamaa tartunnan heikkenemistä ei tarvitse huomioida rakenteen yläpinnan raudotteiden osalta, mikäli betonointi korkeus on maksimissaan 250 mm. Yli 600 mm korkeissa betonoinneissa massan painosta aiheutuvan hydrostaattisen paineen katsotaan kompensoivan painumisesta aiheutuvien ilmiöiden vaikutuksia rakenteen yläosassa, kun tangon yläpuolisen betonin paksuus on vähintään 300 mm. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 133.)

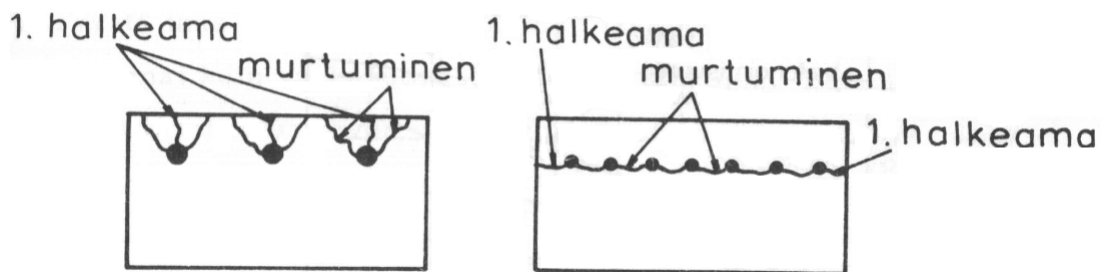
Pystysuuntaisten tankojen liukumavastuksen on todettu olevan noin 1,5–2-kertainen rakenteen alaosaan sijaitseviin vaakasuuntaisiin tankoihin verrattuna, kun pystysuorien tankojen kuormitus on tapahtunut betonointisuuntaan nähden vastakkaiseen suuntaan. Pysty- ja vaakasuuntaisten tankojen tartuntajännitysten erot ovat suurimpia pienillä liukuma-arvoilla. Erot pienenevät hieman betonin lujuuden kasvaessa. Jos taas pystysuuntaista tankoa kuormitetaan betonointisuuntaan, muuttuu tilanne suurin piirtein samassa suhteessa vaakatasossa olevan tangon eduksi. (Jokela 1979, 78–79; Ronkainen 1985, 36–37.)

Tangon katsotaan vastaavan pystysuuntaista tankoa, jos se on 45–90 asteen kulmassa vaakatasoon nähden. Vaakatasossa olevien tankojen betonin painumisesta aiheutuvien tartuntaa heikentävien ilmiöiden vaikutus pienenee tangon poikittaisharjojen korkeutta kasvatettaessa. Kuten edellä on esitetty, on harjakorkeuden kasvattamisella kuitenkin myös ei-toivottuja vaikutuksia, mistä johtuen tartunnan laatu ei välttämättä parane pelkästään harjakorkeutta kasvattamalla. (Jokela 1979, 80; Jokela - Pukki 1983, 74–75.)

Tankojen välinen etäisyys

Mikäli tangot sijoitetaan poikkileikkauksessa liian lähemmäksi toisiaan nähden, voi rakenteen pintaa lähimpänä olevan tangon betonipeitteen pintaan aiheuttama pitkittäshalkeama edetä tankojen välillä koko poikkileikkauksen läpi. Tällöin rakenne menettää kantokykynsä. (Jokela - Pukki 1983, 32.)

Kuvassa 12 on esitetty tankojen välimatkojen vaikutus halkeamien mahdollisiin suuntautumisiin.



KUVA 12. Tankovälin vaikutus halkeamien suuntautumiseen (Jokela 1979, 80)

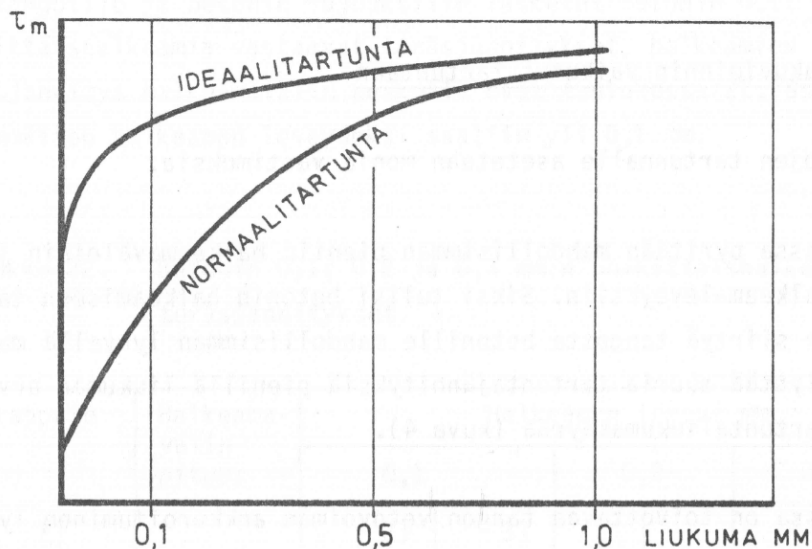
Lisäksi liian lähemmäksi sijoitetut tangot vaikeuttavat maksimirakokoolta suuren ja jäykän betonimassan tunkeutumista tankojen väleistä, minkä seurauksena tankojen tartunta voi jäädä vajaaksi. Valuvirheiden vaikutus tankojen tartuntaan korostuu tankopaksuuden pienentyessä. (Nykyri 1990, 32 ja 83.)

5 TARTUNTAJÄNNITYS-LIUKUMARIIPPUUUS

Raudoituksen ja betonin välisen yhteistoiminnan laatua kuvaa parhaiten tangon paikallisen tartuntajännityksen ja vastaavan kohdan betonin ja tangon välisen suhteellisen siirtymän välinen riippuvuus. Suhteellisesta siirtymästä käytetään myös nimitystä tangon liukuma. (Jokela - Pukki 1983, 25.)

Tartunta-liukumasuhteen tulisi olla sellainen, että kuormituksen alkuvaiheessa tangon tartuntajännitykset kehittyisivät nopeasti liukumien jäädessä mahdollisimman pieniksi. Tällöin rakenteen halkeilu jäisi käyttörajatilassa mahdollisimman pieneksi. Lisäksi suurimpien tartuntajännitysten tulisi säilyä mahdollisimman pitkään tangon liukumisesta huolimatta, jolloin tartuntamurto muodostuu sitkeäksi ja rakenteen murtuminen on näin ollen paremmin ennakoitavissa. (Jokela - Pukki 1983, 73.)

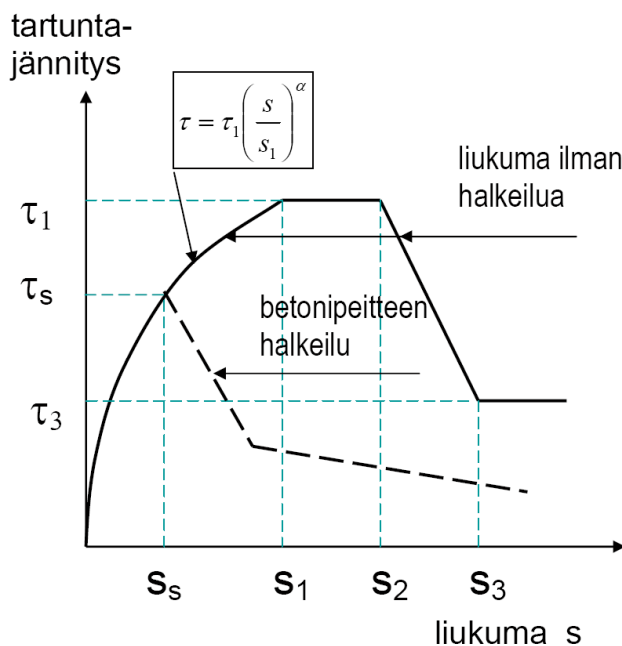
Kuvassa 13 on esitetty ideaalinen liukumien kehitys suhteessa tartuntajännityksiin. Ideaalista tartuntaa kuvaava käyrä nousee alussa jyrkästi, liukumien alettua kaartuu suhteellisen loivasti ja pysyy silti nousujohteisena mahdollisimman pitkään liukumien kasvaessa. (Jokela - Pukki 1983, 73.)



*KUVA 13. Ideaali- ja normaalitartunta-liukumariippuvuus
(Jokela - Pukki 1983, 74)*

Edellisessä luvussa esitettyjä tartuntaan vaikuttavia tekijöitä saadaan harvoin rakenteellisista, tuotantoteknisistä ja taloudellisista syistä optimoitua niin, että tartunta muodostuisi ideaaliksi. Kuvassa 13 on esitetty myös normaalia tartuntaa kuvaava käyrä, joka saavuttaa lähes ideaalikäyrän suuruiset tartuntajännitykset. Normaalitartunnassa varsinkin alkuvaiheen liukumata muodostuvat muun muassa betonin painumiseen liittyvien ilmiöiden seurauksesta huomattavasti ideaalitartuntaa suuremmiksi. (Jokela - Pukki 1983, 73–74.)

Tartunta-liukumariippuvuudelle on luotu myös matemaattisia malleja, joiden avulla tangon tartuntaa voidaan tarkastella laskennallisesti ja arvioida tartuntaan vaikuttavien tekijöiden merkitystä. Kuvassa 14 on esitetty laajojen tutkimusten pohjalta muodostettu tartunta-liukumariippuvuutta kuvaava malli, joka on yleisesti hyväksytty suunnitteluohjeiden perustaksi. (Nykyri 2008, 6.)



KUVA 14. Tartunta-liukumariippuvuutta kuvaava malli (Nykyri 2008, 7)

Malli kuvaa raudoituksen ja betonin välistä yhteistoimintaa lyhyellä tartuntapi-
tuudella sellaisessa tilanteessa, ettei betonipeite pääse halkeamaan pintaan

saakka. Tällöin murtuminen tapahtuu harjojen etupuolisessa betonissa. Tanko liikuu ulos betonista, kun liukuma ylittää s_3 -arvon. s_3 on harjavälin C pituus. (Nykyri 1990, 17.)

Mallin nousevan osan parametrien τ_1 , s_1 ja α arvot muodostuvat betonin lujuuden, valusuunnan sekä tangon suhteellisen harjapinta-alan mukaan. Mallin mukaista tartuntajännityksen maksimiarvoa τ_1 ei saavuteta, mikäli betonipeite halkeaa ennen sitä tartuntajännityksen arvolla τ_s . Betonipeitteen halkeamisen seurauksesta tartuntajännitysten oletetaan häviävän kokonaan. Tartuntajännitys pysyy vakiona liukumavälillä s_1 – s_2 ja laskee arvoon τ_3 välillä s_2 – s_3 . Tartuntajännitys τ_3 vastaa likimain sileän tangon kitkatartuntaan perustuvaa tartuntajännitystä. (Nykyri 1990, 18.)

CEB mallinormissa tartuntamallin parametreille on annettu taulukon 2 mukaiset arvot.

TAULUKKO 2. Tartuntamallin parametrit (Nykyri 2008, 7)

parametri	lohkeilua ei estetty		estetty (confined)	
	hyvät olosuhteet	muut	hyvät olosuhteet	muut
s_1	0,6 mm	0,6 mm	1 mm	1 mm
s_2	0,6 mm	0,6 mm	3 mm	3 mm
α	0,4	0,4	0,4	0,4
τ_1	$2,0\sqrt{f_{ck}}$	$1,0\sqrt{f_{ck}}$	$2,5\sqrt{f_{ck}}$	$1,25\sqrt{f_{ck}}$

Taulukon 2 arvot vastaavat tyypillisen standardin mukaisen harjateräksen tartuntakäyttäytymistä. Eurokoodi 2:ssa suhteelliselle harjapinta-alalle asetettu vähimmäisvaatimus on määritetty taulukon 2 arvojen perusteella. (Nykyri 2013.)

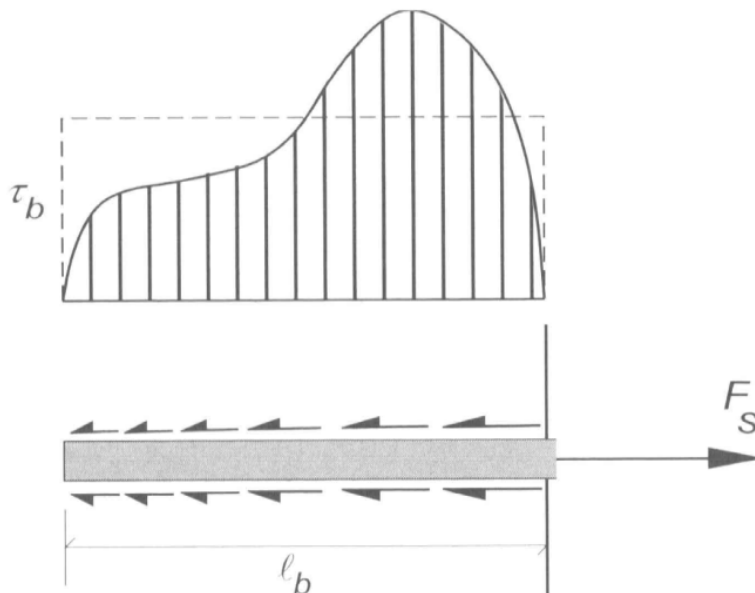
Taulukon 2 arvoilla lasketut tartuntamallin mukaiset maksimitartuntajännitykset muodostuvat hyvissä tartuntaolosuhteissa 2–4-kertaisiksi ankkurointimitoituk-

sessä käytettävään tartuntalujuuteen nähden. Huonoissakin olosuhteissa mallin mukaiset tartuntajännitykset muodostuvat 1,5–3-kertaisiksi. Tartuntamalli antaa taulukon 2 arvoilla laskettuna muutenkin varmallalla puolella olevia tartuntajännityksen arvoja. (Nykyri 2008, 8.)

5.1 Tartuntajännitysten jakautuminen

Tartuntajännityksillä τ_b tarkoitetaan tangon vaipalle leikkausjännityksiksi jaettua voimaa, joka tarvitaan ankkuroimaan tanko sitä ympäröivään betoniin. Suunnitteluohjeissa tartuntajännitysten oletetaan jakautuvan tasaisesti koko tartuntapituudelle, mutta todellisuudessa tartuntajännitysten huippu sijoittuu tartunta-alueen rasitetumpaan päähän pienentyen tartuntavaiheesta ja tangon liukumista riippuen kohti tangon rasittamatonta päätä. (Leskelä 2008, 78, 80; Jokela 1979, 47.)

Kuvassa 15 on esitetty arvio tartuntajännitysten todellisesta jakautumisesta tangon tartuntapituudella. Kuvassa on esitetty katkoviivalla myös suunnittelussa käytettävä keskimääräinen tartuntajännityksen oletusjakauma.



KUVA 15. Periaatekuva tartuntajännitysten todellisesta jakautumisesta ankkurointipituudella (Leskelä 2008, 80)

Tangon liukuessa tartuntajännitykset alkavat jakautua paikallisesta huippuarvosta laajemmalle alueelle tangon tartuntapituudella. Liukumien kasvaessa tartuntajännitykset jakautuvat yhä tasaisemmin koko tartuntapituudelle, jolloin tartuntajännitys jakauma alkaa muistuttaa enemmän suunnittelussa käytettävää jakaumamallia. (Jokela - Pukki 1983, 73.)

5.2 Liukuman vaikutus rakenteen toimintaan

Tangon liukumaa ei yleensä esiinny pienillä tartuntajännityksen arvoilla ja kuten edellä on esitetty harjatangon ja betonin välinen mekaaninen vuorovaikutus aktivoituu kunnolla vasta liukuman alettua. Rasiusten kasvaessa ja tangon tartunnan laadusta riippuen, alkavat liukumat kehittyä tangon rasitetusta päästä aluksi betonin kimmoisina muodonmuutoksina muuttuen edellä kuvatuiksi murtumis- ja halkeiluilmiöiksi. (Jokela - Pukki 1983, 25.)

Liukuman suuruuteen vaikuttavat muun muassa:

- rakenteellisista ja valmistuksellisista syistä betonin ja tangon välille muodostuvan tartunnan laatu
- betonin irtoaminen raudoitteesta taivutushalkeamien läheisyydessä (harjojen aiheuttamien vinojen puristusvoimien pystykomponenttien vaikutuksesta)
- betonin murskaantuminen harjojen edessä
- tangon ympäristössä tapahtuva sisäinen poikittaishalkeilu
- tangon suuntainen betonipeitteen halkeilu. (Jokela - Pukki 1983, 26–28.)

Edellä luetellut ilmiöt ovat seurausta useista edellä tarkemmin käsitellyistä materiaalisista, geometrisista, rakenteellisista yms. tartuntaan vaikuttavista tekijöistä.

Tangon paikallinen liukuma on seurausta tangon ja betonin välisen tartunnan paikallisesta heikkenemisestä, jolloin tartuntajännitykset laskevat liukuma-alueella ja jakautuvat eteenpäin tartunta-alueella kohti tangon jännityksettömämpää päätä. Liukumisesta aiheutuvan tasaisemman tartuntajännitysjauman seurauksesta tangon ankkuroitumiskyky kuitenkin kasvaa, jolloin tanko

pystyy ankkuroitumaan lyhyemmällä matkalla. Tähän liittyen muun muassa Nykyri on betoniraidoituksen ankkurointia käsittelevässä *VTT:n tutkimuksia 693* -julkaisussa todennut, että 10 prosentin liukuman lisäys tangon rasitetussa päässä lyhentää saman voiman ankkuroitumiseen tarvittavaa tartuntapituutta noin 20 prosenttia. Suuret liukumukset aiheuttavat kuitenkin rakenteelle myös muodonmuutoksia, mistä johtuen liukumien ei voida sallia kasvaa rajattomasti. (Nykyri 1990, 15 ja 57; Jokela - Pukki 1983, 73.)

Teräksen liukumisen seurauksena muun muassa taivutetun rakenteen taivutus- halkeamaleveydet ja taipumat kasvavat. Suurten muodonmuutosten seurauksena myös rakenteen sisäinen jännitysjaakauma muuttuu, jolloin rakenteen poikkileikkauksen kiertymäkyky ja puristusvyöhykkeen murtokapasiteetti saattavat asettaa rajoitteita liukuman suuruudelle. Esimerkiksi, jos rakenteen leikkauskapasiteetti on suuri rakenteen mittoihin nähden ja vaatii näin ollen suurta puristusvyöhykettä, voi muodonmuutoksista aiheutunut puristusvyöhykkeen piene- neminen alentaa suunniteltua leikkauskapasiteettia. Tästä johtuen liukuman on oltava riittävän alhainen, jotta ankkurointimurtorajatilan muodonmuutokset ovat yhteensopivia leikkausmitoituksen kanssa. (Nykyri 1990, 81.)

Toinen liukumaa rajoittava tekijä on betonipeitteen pituussuuntainen halkeami- nen, mihin muun muassa betonipeitteen paksuudella on suuri vaikutus. Taulu- kossa 3 on esitetty laskennalliset rajaliukumukset eri tankopaksuuksille ja betoni- peitepaksuuksille, kun rajoittavaksi tekijäksi on asetettu betonipeitteen halkea- minen. Betonin lujuudella ei ole merkittävää vaikutusta rajaliukuman suuruu- teen. (Nykyri 1990, 81.) Taulukon 3 arvot perustuvat ruotsalaisen Tepfers`in tutkimuksiin ja hänen kehittämänsä fysikaaliseen malliin, joka on laajasti hy- väksytty. (Nykyri 2013.)

TAULUKKO 3. Betonipeitteen halkeamisen perusteella määritetyt liukumarat (Nykyri 1990, 82)

Betonipeite c/d_s	Rajaliukuma (mm) Tankopaksuuksilla d_s (mm)		
	6	10	32
1	0,006	0,013	0,03
2	0,06	0,11	0,26
4	0,6	0,83	1,44
10	12,8	13,5	14,0

Taulukon 3 arvojen mukaan paksujen tankojen aiheuttamat halkaisuvoimat muodostuvat liukumaa rajoittavaksi tekijäksi. Taulukon arvojen mukaan betonipeitepaksuuden ollessa esimerkiksi 4-kertainen tangon halkaisijaan nähden, muodostuu 6 mm tangon rajaliukuma suhteessa betonipeitekerroksen paksuuteen yli kaksinkertaiseksi 32 mm:n tankoon nähden. $4\varnothing$:n betonipeitepaksuudella rajaliukumat suhtautuvat toisiinsa likimain samassa suhteessa, kuin tankopaksuuksien neliöjuuret. Jos sallittua liukumaa tarkastellaan pelkästään halkeilun perusteella, muodostuvat betonipeitekerrokset varsinkin paksuilla tangoilla kohtuuttoman paksuiksi, koska käyttökelpoisiin liukuma-arvoihin päästään vasta $2-4\varnothing$:n betonipeitepaksuuksilla. Eurokoodi 2:n asettama vähimmäisbetonipeitekerroksen paksuus tankopaksuudesta riippumatta on yksittäisille tangoille kuitenkin vain $1\varnothing$. (Nykyri 1990, 81–82; SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 50.)

Suurimpana sallittuna tangon rasitetun pään liukumana muun muassa entisesä Saksan liittotasavallassa on pidetty 0,2–0,3 mm ja Yhdysvalloissa 0,25 mm. Kyseiset rajat ovat olleet tankopaksuudesta riippumattomia. (Nykyri 1990, 82.)

VTT:n tutkimuksia 693 Betoniraudoituksen ankkurointi -julkaisussa Nykyri esittää myös vaihtoehtoisen tankopaksuuden huomioivan rajaliukuman määrittämistä, missä käytetään tankopaksuudesta riippumatonta rajaliukuma-arvoa ja tankopaksuuksien neliöjuuresta riippuvaa arvoa. Jos tankopaksuuden mukaan muuttuvan rajaliukuman tapauksessa 12 mm tangon liukumarajaksi valitaan 0,3

mm, määritetään muiden tankopaksuuksien liukumien silloin kaavalla 2. (Nykyri 1990, 82.)

$$0,3 \cdot \sqrt{\frac{\phi}{12 \text{ mm}}}$$

KAAVA 2

Kaavalla 2 eri tankopaksuuksille lasketut rajaliukuman arvot on esitetty taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Tankopaksuuden mukaan muuttuvat rajaliukumien

Tankopaksuus [mm]	6	8	10	12	16	20	25	32
Rajaliukuma [mm]	0,21	0,24	0,27	0,30	0,35	0,39	0,43	0,49

Eurokoodi 2 ei suoraan aseta tangon liukumalle numeerista raja-arvoa, mutta huomauttaa, että tangon ankkurointi on toteutettava siten, ettei tangon suuntaista halkeilua pääse tapahtumaan. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 131.)

Murtotilassa tangon rasitetun pään liukumaa voidaan arvioida tartuntapituudella kaavalla 3, kun betonin kokoonpuristuma jätetään huomioimatta. Betonin teräkseen nähden pienestä muodonmuutoskyvystä johtuen betonin kokoonpuristuvuuden merkitys tangon rasitetun pään liukumien tarkasteluissa pienenee teräs-jännitysten kasvaessa. 500 MPa:n teräs-jännityksellä betonin kokoonpuristuvuuden osuus on merkityksetön, koska teräksen venymä on tuolloin noin 25-kertainen betonin venymään nähden. (Nykyri 2013.)

$$S = S_0 + \Delta l, \text{ missä}$$

KAAVA 3

S = tangon rasitetun pään liukuma [mm]

S_0 = tangon jännityksettömän pään liukuma [mm]

Δl = tangon keskimääräinen venymä tartuntapituudella [mm].

Tangon keskimääräinen venymä Δl tartuntapituudella lasketaan kaavalla 4 (Nykkyri 2013):

$$\Delta l = \frac{\sigma_s}{E_s} \cdot l_b, \text{ missä}$$

KAAVA 4

σ_s = teräsännitys [N/mm²]

E_s = teräksen kimmomoduuli [N/mm²]

l_b = tartuntapituus [mm].

6 SUORIEN TANKOJEN ANKKUROINTIMITOITUS

Tangon ankkurointi mahdollistaa tangon hyödyntämisen rakenteen vetoa ja/tai puristusta siirtävänä osana raudoitetussa teräsbetonirakenteessa ja luo näin ollen perustan koko rakenteen toiminnalle. Kuten edellä on esitetty, on tartunnan laadulla olennainen merkitys tangon suoraan ankkuroituvuuteen ja ankkuroitumiseen tarvittavaan tartuntapituuteen. (Jokela - Pukki 1983, 12 ja 34.)

Alla on esitetty nykyisen betonirakenteiden suunnitteluohjeen mukaisia suorien tankojen ankkurointimitoituksen periaatteita, jotka ovat tartunta- ja ankkuroitumislähtöjen moninaisuuksiin nähden kuitenkin erittäin pelkistettyjä ja tuottavat näin ollen karkeita arvioita tangon todellisesta ankkuroitumiskestävyydestä. (Nykyri 2008, 5.)

6.1 Tartuntaan perustuvan ankkurointimitoituksen periaate

Suoran tangon ankkuroituessa tankoon kohdistuva voima siirtyy pelkästään tangon vaipan välityksellä ympäröivään betoniin. Suunnitteluohjeissa tangon pinnalla vaikuttavien tartuntajännitysten oletetaan jakautuvan tasaisesti koko tartuntapituudelle. Tietyn suuruisen voiman ankkuroimiseen tarvitaan siis tietyn pituinen osa tangon vaippaa, jonka pintakuviointityypillä on suuri vaikutus tartunnan laatuun ja lujuuteen. (Nykyri 2008, 5.)

Ankkurointimitoituksen perusajatus lähtee yleisestä kaavan 5 mukaisesta voimatasapainoajattelusta, missä tiettyä tankoon kohdistuvaa kokonaisvoimaa vastaan täytyy muodostua samansuuruinen tartuntavoima.

$$F_b = F_s, \text{ missä}$$

KAAVA 5

$$F_b = \text{ankkuroitumiseen tarvittava kokonaistartuntavoima [N]}$$

F_s = tangossa vaikuttava veto- tai puristusvoima [N]. (Muokattu lähteestä Leskelä 2008, 79.)

Koska suoran tangon tartunta tapahtuu pelkästään tangon vaipan avulla, on kokonaistartuntavoiman F_b suuruus kaavan 6 mukaisesti riippuvainen vaipan tartunta-alasta sekä tangon ja betonin välillä vaikuttavasta tartuntajännityksestä.

$$F_b = \tau_b \cdot \pi \cdot \varnothing \cdot l_b, \text{ missä} \quad \text{KAAVA 6}$$

τ_b = tangon vaipalla vaikuttava tartuntajännitys [N/mm²]

\varnothing = tangon halkaisija [mm]

l_b = tartuntapituus [mm]. (Muokattu lähteestä Leskelä 2008, 79.)

Tankoon kohdistuvan voiman F_s suuruus taas riippuu kaavan 7 mukaan teräksen jännitystilasta ja tangon poikkileikkausalasta.

$$F_s = A_s \cdot \sigma_s, \text{ missä} \quad \text{KAAVA 7}$$

A_s = tangon poikkileikkausala [mm²]

σ_s = tangossa vaikuttava teräsjännitys [N/mm²]. (Muokattu lähteestä Leskelä 2008, 79.)

Koska tankoon kohdistuvan voiman F_s ja tartuntavoiman F_b täytyy olla samansuuruisia, voidaan voiman F_s ankkuroimiseen tarvittava tartuntapituus laskea sievennyksen jälkeen kaavalla 8. (Leskelä 2008, 79.)

$$l_b = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_s}{\tau_b} \quad \text{KAAVA 8}$$

Kaavan 8 mukaan tarvittavan tartuntapituuden suuruus riippuu tankopaksuudesta, ankkuroitavan tangon jännityksestä ja käytettävästä tartuntajännitystasosta.

Betonirakenteiden murtorajatilan suunnittelukäytäntöihin liittyen tangot ankkuroidaan rakenteissa, muun muassa katkaisukohtia määritettäessä, yleensä tangon mitoitusmyötölujuutta vastaavaa teräsjännitystä käyttäen. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 151–152; Jokela 1979, 45–46.)

Ankkurointimitoituksessa tartuntajännityksiä τ_b käsitellään tartuntalujuuden f_b kautta. Koska tartuntalujuus perustuu betonin leikkauskestävyyteen, käytetään tartuntalujuuden määrittämisessä betonin vetolujuutta f_{ct} . Lisäksi tartuntalujuudessa huomioidaan tankojen sijainnin ja suunnan vaikutus sekä tankopaksuuden vaikutus halkaisijoiltaan yli 32 mm:n tangoilla. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 132–133.)

6.2 Suorien tankojen ankkurointimitoitus Eurokoodi 2:n mukaan

Eurokoodi 2:n mukaan tangon suoraan ankkuroitumiseen vaadittavan ankkurointipituuden perusarvo lasketaan tankopaksuudesta riippumatta kaavalla 9. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 133.)

$$l_{b,rqd} = \frac{\sigma}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}, \text{ missä} \quad \text{KAAVA 9}$$

$l_{b,rqd}$ = vaadittavan ankkurointipituuden perusarvo [mm]

σ_{sd} = ankkuroitavan teräsajännityksen mitoitusarvo [N/mm²]

f_{bd} = tartuntalujuuden mitoitusarvo [N/mm²].

Tartuntalujuuden mitoitusarvo f_{bd} määritetään kaavalla 10. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 132–133.)

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}, \text{ missä} \quad \text{KAAVA 10}$$

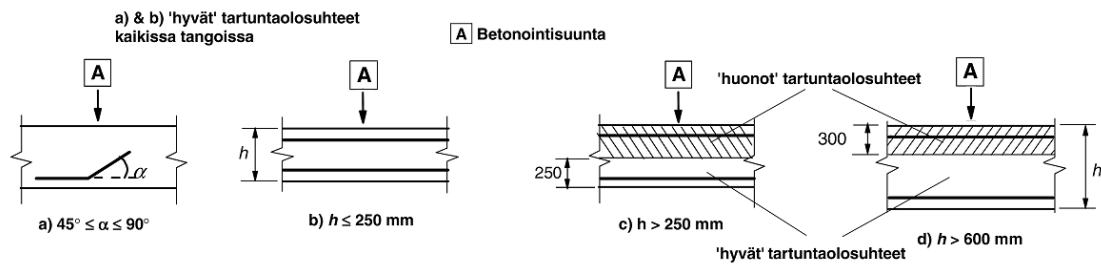
2,25 = tartuntaliukumariippuvuusmallin (kuva 14) mukaan määritetty yleinen tartuntakerroin

η_1 = tartuntaolosuhteiden laadusta ja tangon sijainnista riippuva kerroin

η_2 = tankopaksuuden vaikutuksen huomioiva kerroin

f_{ctd} = betonin vetolujuuden mitoitusarvo [N/mm²].

Tartuntaolosuhteiden laadun ja tangon sijainnin vaikutuksen huomioiva kerroin η_1 määritetään kuvan 16 mukaan.



KUVA 16. Tartuntaolosuhdevaihtoehdot tartuntaolosuhdekertoimen η_1 määrittämistä varten (muokattu lähteestä SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 133)

Kuvan 16 mukaan:

$\eta_1 = 1,0$ hyvissä tartuntaolosuhteissa

$\eta_1 = 0,7$ kaikissa muissa tartuntaolosuhteissa ja liukuvaletuissa rakenneosissa, ellei niissä voida osoittaa vallitsevan ”hyvät” tartuntaolosuhteet. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 131–132.)

Tankopaksuudesta aiheutuvat tartunnan laatua heikentävät ilmiöt huomioiva kerroin η_2 lasketaan kaavalla 11. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 133.)

$$\eta_2 = \frac{132 - \emptyset}{100}, \text{ kun } \emptyset > 32 \text{ mm}$$

KAAVA 11

Betonin lujuuden kasvaessa ja tartunnan sitkeyden vähentyessä betonin vetolujuudelle f_{ctd} ei saa käyttää lujuusluokan C60/75:tä vastaavaa vetolujuutta suurempaa arvoa, ellei muuten voida osoittaa, että keskimääräinen tartuntalujuus nousee tätä rajaa suuremmaksi. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 132.)

Riittävän tartuntalujuuden varmistamiseksi Eurokoodi 2 määrittelee liitteessä C tankojen pintakuviointiin liittyen suhteellisen harjapinta-alan vähimmäisvaatimukset. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, liite C, 199.)

Taulukossa 5 on esitetty liitteen C mukaiset suhteellisen harjapinta-alan vähimmäisarvot.

TAULUKKO 5. Eurokoodi 2:n asettamat vähimmäisvaatimukset suhteelliselle harjapinta-alalle (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, liite C, 199)

Tangon nimellishalkaisija [mm]	Suhteellisen harjapinta-alan vähimmäisarvo $f_{R,min}$
5...6	0,035
6,5...12	0,040
> 12	0,056

Eurokoodi 2:n mukaan yksittäisillä tangoilla betonipeitekerroksen paksuus on tartunnan kannalta riittävä, kun betonipeitekerroksen paksuus on vähintään ankkuroitavan tangon nimellishalkaisijan paksuinen. Lopullinen betonipeitekerros saattaa kuitenkin muodostua ympäristöolosuhteista riippuvan suojabetonikerroksen ja käytettävän mittapoikkeaman suuruuden mukaan huomattavasti paksummaksi. Lopullisen betonipeitepaksuuden vaikutus voidaan huomioida lopullisessa ankkurointipituuden mitoitusarvossa vähennyskertoimien avulla. (SFS-EN 1992-1-1+ AC. 2005, 49–52 ja 134–135.)

Ankkuroituvuutta parantavien tekijöiden huomioiminen mitoituksessa

Eurokoodi 2:n mukaan lopullisessa ankkurointipituuden mitoitusarvossa l_{bd} voidaan ottaa huomioon tangon ankkuroituvuutta parantavien tekijöiden vaikutukset taulukossa 6 esitettyjen α -kertoimien avulla, missä:

α_1 = tangon mahdolliset taivutukset,

α_2 = betonipeitepaksuuden,

α_3 = poikittaisen pitkittäishalkeaman avautumista rajoittavan raudoituksen (esimerkiksi haat),

α_4 = poikittaisen päätankoon hitsatun betonin laajenemista hillitsevän ja ankkurointikappaleena toimivan raudoitteen sekä

α_5 = tankoa ympäröivän betonin laajenemista hillitsevän poikittaispaineen (esimerkiksi tukialueilla) huomioiva kerroin. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 134–135.)

Suorien tankojen pelkästään tartuntaan perustuvassa ankkurointimitoituksessa vetorasitettujen tankojen ankkurointipituuden perusarvoa voidaan lyhentää kertoimilla α_2 , α_3 ja α_5 , joiden yhteisvaikutuksesta muodostuva mitoituspituus saa olla maksimissaan 30 prosenttia vaadittua peruspituutta lyhyempi. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 134.)

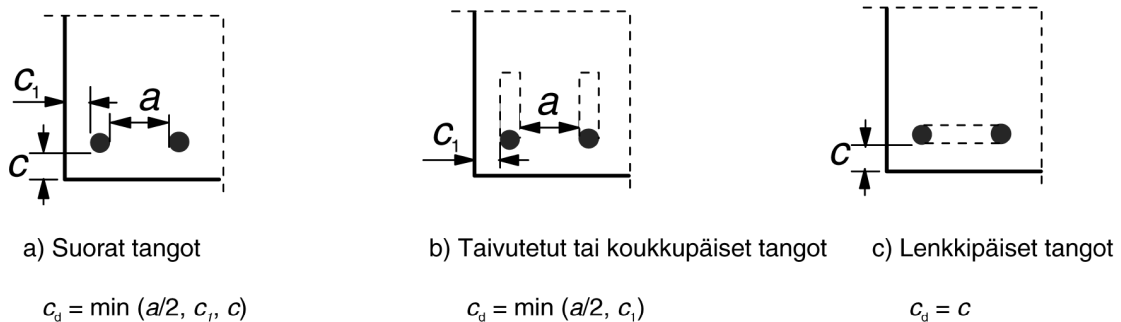
TAULUKKO 6. Ankkurointipituuden perusarvon $l_{b,rqd}$ vähennyskertoimet (SFS-EN 1992-1-1. 2005, 135)

Vaikuttava tekijä	Ankkurointityyppi	Betoniteräs	
		vetoteräs	puristusteräs
Tankojen muoto	Suora	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Muu kuin suora (ks. kuvia 8.1 (b), (c) ja (d))	$\alpha_1 = 0,7$ jos $c_d > 3\phi$ muuten $\alpha_1 = 1,0$ (mitan c_d arvot ovat kuvassa 8.3)	$\alpha_1 = 1,0$
Betonipeite	Suora	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - \phi)/\phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Muu kuin suora (ks. kuvia 8.1 (b), (c) ja (d))	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi)/\phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (mitan c_d arvot ovat kuvassa 8.3)	$\alpha_2 = 1,0$
Poikittainen laajenemisen estoraudoitus, jota ei ole hitsattu pääraudoitukseen	Kaikki tyypit	$\alpha_3 = 1 - K\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Poikittainen hitsattu laajenemisen estoraudoitus*	Kaikki tyypit; sijainti ja koko kuvassa 8.1 (e) määritellyllä tavalla	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Laajenemista estävä poikittaispaine	Kaikki tyypit	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	–
missä $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min})/A_s$ ΣA_{st} poikittaisraudoituksen poikkileikkausala pitkin mitoitusarvon mukaista ankkurointipituutta l_{bd} $\Sigma A_{st,min}$ poikittaisraudoituksen poikkileikkausalan vähimmäisarvo = 0,25 A_s palkeilla ja 0 laatoilla A_s yksittäisen halkaisijaltaan suurimman ankkuroidun tangon poikkileikkausala K kuvan 8.4 arvot p poikittaispaine [MPa] murtorajatilassa pitkin mitoitusarvon mukaista ankkurointipituutta l_{bd} .			
* Ks. myös kohtaa 8.6: Valittomilla tuilla ankkurointipituuden mitoitusarvona l_{bd} voidaan käyttää pienempää arvoa kuin $l_{b,min}$ mikäli tuen kohdalla on vähintään yksi hitsattu poikittaislanka. Tämän edellytetään olevan vähintään 15 mm tuen ulkopinnalta.			

α_2 -kertoimen määrittämiseen tarvittava betonipeitepaksuuden mitoitusarvo C_d määritetään vetoterästen osalta kuvan 17 mukaisesti, missä:

a = tankojen välinen etäisyys, kun tankoja on enemmän kuin yksi ja

c sekä c_1 = ankkuroitavan tangon ja betonipeitepinnan välisiä etäisyyksiä pysty ja/tai vaaka suunnassa. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 134.)



KUVA 17. Mitoittavan betonipeitekerroksen C_d :n määrittäminen (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 134)

Suorien tankojen osalta betonipeitteen mitoitusarvo C_d määritetään kuvan 17 vasemman puolimmaisimman kuvan mukaan.

Eurokoodi 2 asettaa yhdensuuntaisten tankojen väliselle etäisyydelle a vaaka- ja pystysuunnassa kaavan 12 mukaiset vähimmäisvaatimukset:

$$a_{min} = \max \begin{cases} k_1 \cdot \Phi, \\ d_g + k_2 \text{ tai } 20 \text{ mm.} \end{cases} \quad \text{KAAVA 12}$$

d_g = runkoaineksen suurin raekoko [mm]

k_1 = kunkin maan kansallisessa liitteessä ilmoitettava kerroin

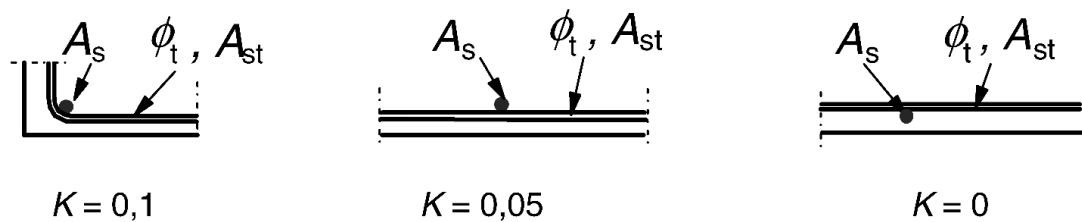
k_2 = kunkin maan kansallisessa liitteessä ilmoitettava mittalisä [mm]. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 130.)

Eurokoodi 2 suosittaa k_1 -kertoimelle arvoa 1 ja k_2 -mittalisäksi 5 mm. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 130.)

Suomen kansallisen liitteen asettama vähimmäisvaatimus k_1 -kertoimelle on 1 ja k_2 -mittalisälle 3 mm. (NA SFS-EN 1992-1-1. 2009, liite 7, 10.)

Mikäli tankoja sijoitetaan päällekkäin useisiin yhdensuuntaisiin riveihin, tulee tankojen vaakasuuntaisten a -mittojen olla kuitenkin, täryttimen liikelaajuus huomioituna, riittäviä, jotta päällekkäin sijoitettujen tankojen tartunnan laatu saadaan varmistettua asianmukaisella tiivistystyöllä. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 130.)

α_3 -kertoimen määrittämisessä käytettävä K -kerroin määritetään kuvan 18 perusteella.



KUVA 18. K -kertoimen arvot palkeille ja laatoille (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 135)

Kuvan 18 vasemman puoleisimman kuvan K -arvoa käytetään yleisesti esimerkiksi palkkirakenteilla, missä poikittainen rauditus on ankkuroitavan tangon ulkopuolella. Keskimmäisen kuvan K -arvoa käytetään esimerkiksi laattarakenteissa, joissa poikittainen rauditus sijaitsee ankkuroitavan tangon ulkopuolella. Muissa tapauksissa poikittaisen raudituksen ei katsota parantavan tangon ankkuroitumista.

Lopullinen ankkurointipituuden mitoitusarvo l_{bd} lasketaan kaavalla 13. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 134.)

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad \text{KAAVA 13}$$

Kaavan 13 mukaan mitoituspituuden l_{bd} :n tulee kuitenkin olla rasiustyyppistä riippuen vähintään kaavan 14 tai 15 mukaisen vähimmäispituuden $l_{b,min}$:n mittainen. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 134.)

Vetovoimaa ankkuroitaessa:

$$l_{bd} \geq l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,3 \cdot l_{b,rqd} \\ 10 \cdot \emptyset \\ 100 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{KAAVA 14}$$

Puristusvoimaa ankkuroitaessa:

$$l_{bd} \geq l_{b,min} \geq \max \begin{cases} 0,6 \cdot l_{b,rqd} \\ 10 \cdot \emptyset \\ 100 \text{ mm} \end{cases} \quad \text{KAAVA 15}$$

6.3 Muita ankkurointimitoituksessa huomioitavia tekijöitä

Eurokoodi 2:n mukaan ankkuroinnin suunnittelussa on otettava huomioon myös teräksen tyyppi ja tartuntaominaisuudet, mikäli ne poikkeavat liitteessä C esitetyistä normaaliominaisuuksista. Lisäksi tangon pinnoitteen ankkuroitumista mahdollisesti heikentävä vaikutus on otettava huomioon, mikäli rakenteessa käytetään pinnoitettuja tankoja. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 130, 133 ja liite C, 199.)

Vaikka Eurokoodi 2:n ankkurointimitoitusohjeistuksessa tankopaksuudelle ei aseteta mitään absoluuttista ylärajaa, voidaan ankkurointimitoitusta Leskelän mukaan pitää luotettavana vain 32 mm:n tankopaksuuteen saakka. Leskelän mukaan paksumpien tankojen ankkuroitumisesta ei ole kokeellista näyttöä. Suurten halkaisu- ja vaarnavaikutusten vuoksi Eurokoodi 2 asettaa kuitenkin

paksuille tangoille erityisvaatimuksia muun muassa poikittaisraudoituksen suhteen ja suosittelee mekaanisten ankkurointielinten sekä pintaraudoituksen käyttöä halkaisijaltaan yli 32 mm:n tangoilla. Erityisvaatimuksilla ja suosituksilla pyritään rajoittamaan paksujen tankojen aiheuttamaa halkeilua ja varmistamaan tangon ankkuroituminen. (Leskelä 2008, 463; SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 141–142)

Myös tukialueen pinnan laatu tulee huomioida ankkurointia suunniteltaessa. Tukialueella vaikuttavan poikittaispaineen betonin laajenemista estävä vaikutus on suurin silloin, kun tankoa ympäröivän betonin ja tukipinnan välinen kitka on suuri ja tukipinta jäykkä. Jos tukipinnalla käytetään esimerkiksi kimmoista kuorituslevyä, voi se kokoonpuristuessaan ja laajetessaan poikittaissuunnassa aiheuttaa tankoa ympäröivään betoniin ulkoisia halkaisuvoimia. Tällöin poikittaispaineen vaikutus kääntyy ankkuroitumista heikentäväksi tekijäksi lisäten halkaisuvoimia. (Nykyri 1990, 36.)

Eurokoodi 2:n mukaan kenttäalueen maksimiraudoitusmäärästä neljäsosa on ankkuroitava reunatuelle. Tukialueet ovat kuitenkin usein hyvin lyhyitä, mistä johtuen paksujen tankojen suora ankkurointi ei vähimmäisankkurointipituusvaatimuksista johtuen ole mahdollista. Lisäksi paksujen tankojen suuret taivutussäteet rajoittavat taivutusten hyödyntämistä. Tästä johtuen paksuilla tangoilla tukialueen ankkurointi tulee hoitaa esimerkiksi ohuemmilla tangoilla, jotka limitetään paksun tangon kanssa tai käyttämällä tukialueilla mekaanisia ankkurointielimiä. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 152.)

7 BETONITERÄSTEN TARTUNTAOMINAISUUKSIEN MÄÄRITÄMINEN KOKEELLISESTI

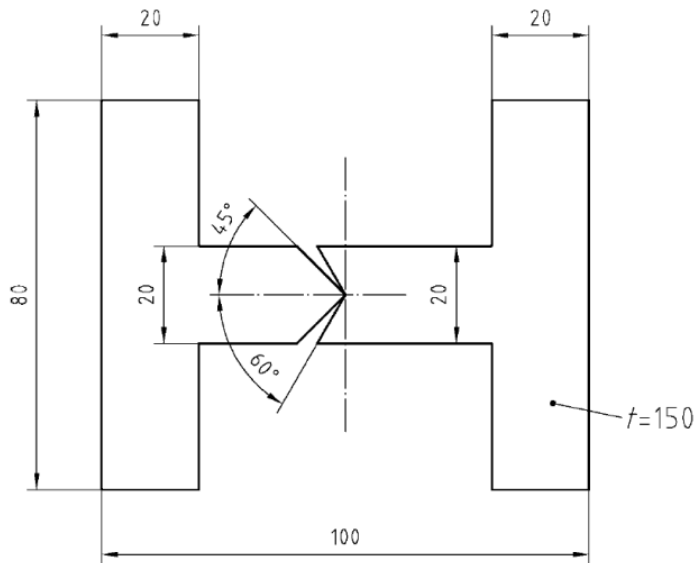
Hyvän yhteistoiminnan varmistamiseksi suunnitteluohjeissa asetetaan käytettäville betoniteräksille yleensä tarkasti määritetyt laatu- ja raja-arvovaatimukset useiden eri ominaisuuksien suhteen. Näin menetellään myös esimerkiksi betoniterästen tartuntaominaisuuksien suhteen. Riittävien tartuntaominaisuuksien varmistamiseksi Eurokoodi 2 on asettanut tangon pintakuviointille standardin SFS-EN 1992-1-1:2005 liitteessä C ja standardissa SFS-EN 10080:2005 esitettyjä vaatimuksia. Mikäli suunnittelussa kuitenkin käytetään tuotteita, joiden ominaisuudet poikkeavat näissä standardeissa esitetyistä ominaisuuksista tai raja-arvoista tai niiden ominaisuudet on määritetty muilla menetelmillä, tulee betoniterästen soveltuvuus ensin määrittää kokeellisesti standardissa SFS-EN 10080:2005 esitettyjä menetelmiä käyttäen. (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 38–39 ja liite C, 199–200.)

Eurokoodi 2:n mukaisessa suunnittelussa käytettävien betoniterästen tartuntaominaisuudet voidaan määrittää standardin SFS-EN 10080:2005 mukaan kahdella tavalla. Toinen tartuntakoe on liitteen C mukainen palkkitesti ja toinen liitteen D mukainen ulosvetokoe. Alla on esitetty betoniterästen tartuntaominaisuuksien määrittäminen liitteen C mukaisella palkkitestillä. Eurokoodi 2 suosittelee tankojen tartuntaominaisuuksien määrittämisessä liitteen C mukaista tartuntatestiä. (SFS-EN 10080. 2005, 38; SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, liite C, 200.)

7.1 Menetelmän kuvaus

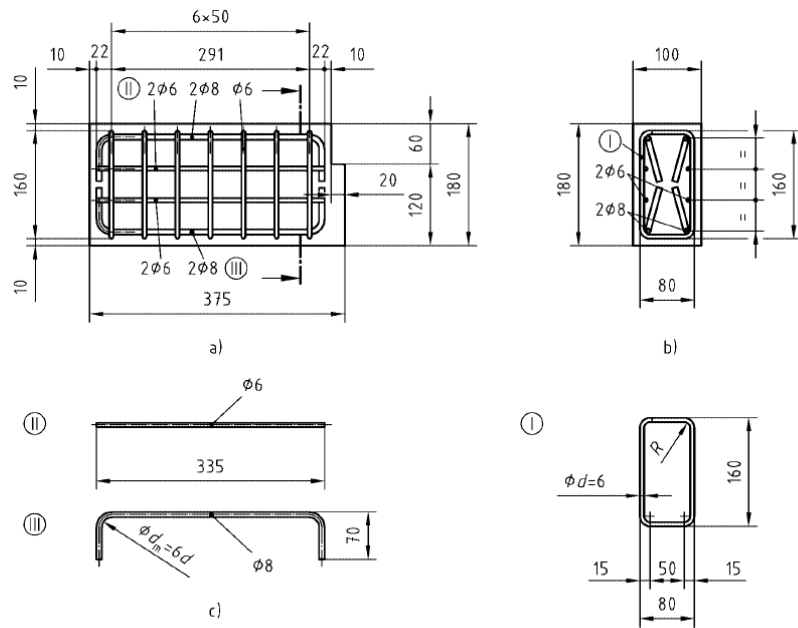
Standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaista palkkitestiä käytetään teräsbetonirakenteissa yleisesti käytettyjen pintakuviointujen ja harjapintaisten betoniterästen tartuntaominaisuuksien määrittämiseen. Testillä voidaan tarkastella myös eri pintakuviointiparametrien muutoksista aiheutuvia vaikutuksia tartunnan laatuun. Testi soveltuu maksimissaan nimellishalkaisijoiltaan 32 mm:n tangoille. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 78.)

Testausmenetelmän periaatteena on altistaa testipalkki tasaisesti kasvavalle taivutusrasitukselle, kunnes tangon tartunta pettää tankopaksuuden mukaan



*KUVA 22. B-testipalkkityypin teräsnivel,
mitat millimetreinä (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 83)*

Testipalkeissa käytettävien apuraudoitteiden lujuus- ja pintakuviointiominaisuuksien tulee olla yhtäläisiä testattavien tankojen ominaisuuksien kanssa. Palkkityyppien apuraudoitteet on esitetty kuvissa 23 ja 24. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 80.)



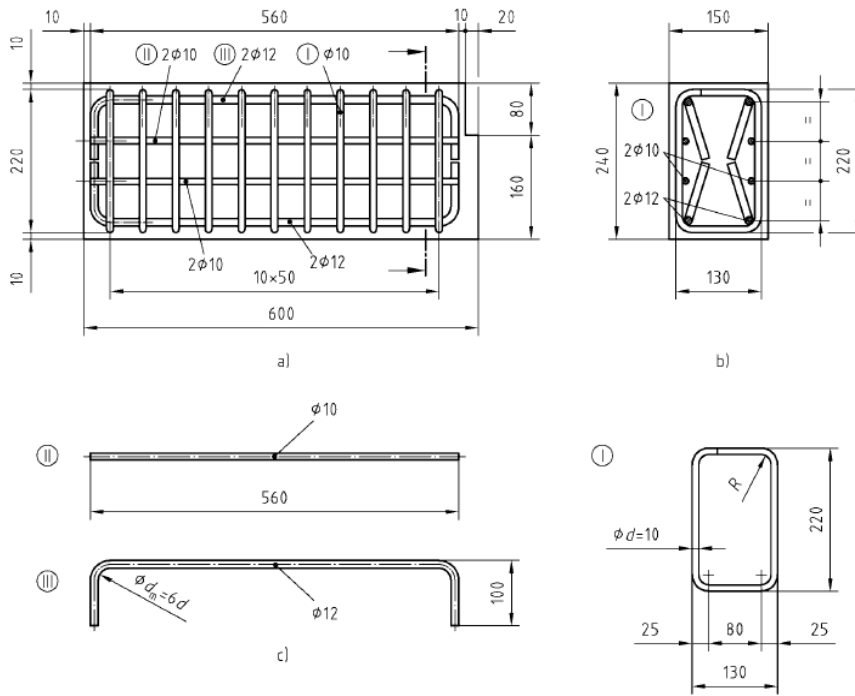
Key

a) elevation

b) section

c) bent bars (III) are placed with the bends 15° to 17° to the vertical

KUVA 23. A-testipalkkityypin apuraudoitteet, kun $d < 16$ mm, mitat millimetreinä (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 85.)



Key

a) elevation

b) section

c) bent bars (III) are placed with the bends 15° to 17° to the vertical

KUVA 24. B-testipalkkityypin apuraudoitteet, kun $d \geq 16$ mm, mitat millimetreinä (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 86.)

7.3 Materiaalivaatimukset

Testipalkkien valmistukseen käytettävien muottien tulee olla terästä, valurautaa tai jotain muuta imukyvyttöntä materiaalia, joka ei reagoi betonin osa-aineiden kanssa. Muottien tulee olla vesitiiviitä, eivätkä niiden mitat saa muuttua valupaiheen vaikutuksesta. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 79.)

Tuotannon tarkkailuun tai tuotekehittelyyn liittyvässä testauksessa testattavien terästen tulee olla siinä kunnossa, kuin ne olivat tehtaalta lähtiessään. Pinnoilla ei saa olla irtonaista valssihilettä eikä ruostetta. Jos terästen pinnoilla on rasvaa tai muita epäpuhtauksia, tulee ne puhdistaa siihen soveltuvalla rasvanpoistoaineella. Rasvan poisto voidaan suorittaa esimerkiksi hiilitetrakloridilla (CCl₄) tai eteenitrikloridilla (C₂HCl₃). Teräksiä ei saa puhdistaa aineilla, jotka saattavat muuttaa niiden pinnanlaatua. Pinnoilla ei myöskään saa olla mitään ylimääräisiä

työstöjälkiä tai koloja. Jos teräksissä on korroosio vaurioita, tulee ne kirjata testipöytäkirjaan kuvien kera. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 80.)

Tartuntakokeissa testattavien terästen tartuntapituudet rajataan esimerkiksi muovisten holkkien avulla. Holkkien tulee olla sellaisia, että ne säilyttävät muotonsa valupaineesta huolimatta. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 80.)

Testipalkin ja koekappaleiden valmistukseen käytettävä betoni tulee valmistaa, betonoida, jälkihoitaa ja säilyttää testipäivään saakka standardin EN 1766 mukaan. Betonin tulee olla joko tyyppiä C(0,70) lieriöpuristuslujuudeltaan 25 ± 5 MPa tai tyyppiä C(0,45) lieriöpuristuslujuudeltaan 40 ± 5 MPa. Arvot 0,70 ja 0,45 kuvaavat vesi-sementtisuhdetta. Testi tulee suorittaa tyyppin C(0,70) betonilla, mikäli ei ole erityistä syytä käyttää lujempaa betonityyppiä. Testissä käytetyn betonin lujuus tulee testata testipäivänä standardin SFS-EN 12390-3:n mukaisilla 150x300 mm:n lieriöillä. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 80.)

7.4 Testivälineistö

Kuormitusjärjestelmä tulee varustaa laitteella, joka mahdollistaa kuormituksen tasaisen kasvattamisen asteittain. Kuormitusvoimat tulee voida mitata vähintään 1 prosentin tarkkuudella kokeessa käytetystä maksimivoimasta. Kuormitusvoimien mittausslaitteen tulee pystyä tunnistamaan maksimikuormitushetki kokeen aikana. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 79–80.)

Kuormituksen palkille siirtävän osan on oltava sellainen, että se jakaa kokonaiskuorman symmetrisesti teräsnivelen molemmille puolille ja sallii palkin muodonmuutokset. Pistekuormien sijainnit eri palkkityypeissä on esitetty kuvissa 19 ja 21. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 79.)

Testipalkin tukien tulee olla sellaiset, että palkki pysyy suorassa ja paikoillaan koko testin ajan. Lisäksi tukien tulee sallia testipalkin vapaa taipuminen testin aikana. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 79.)

Testattavan tangon liukumaa mittaavan laitteen tarkkuuden tulee olla $\pm 0,01$ mm. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 80.)

7.5 Testin toteutus

Betonin kypsyysikänsä tulee olla testipäivänä 21–35:n päivän rajoissa ja puristuslujuuden edellä mainituissa rajoissa. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 80.)

Testipalkkia kuormitettaessa kuormitusvoimaa kasvatetaan asteittain siten, että lisäyksen vaikutuksesta testattavan tangon jännitys σ_s kehittyy 80 MPa kerrallaan. Tällöin tangon jännitystila kehittyy 0–80–160–240...jne. MPa:n jännityslisäyksin. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 81.)

Jännityksiä vastaavat kuormitusvoimat lasketaan tankopaksuudesta riippuen kaavoilla 16 tai 17.

$$F_a = \frac{A_n \times \sigma_s}{1,25}, \text{ kun } d < 16 \text{ mm} \quad \text{KAAVA 16}$$

$$F_a = \frac{A_n \times \sigma_s}{1,50}, \text{ kun } d \geq 16 \text{ mm} \quad \text{KAAVA 17}$$

A_n = testattavan teräksen nimellinen poikkileikkausala [mm²]

σ_s = jännitys testattavassa tangossa [N/mm²]. (SFS-EN 10080.2005, liite C, 81.)

Kuormitusvoimaa kasvatetaan tasaisesti siten, että 80 MPa:n jännityslisäys saavutetaan 30 sekunnin kuluessa. Jännityslisäyksen jälkeen kuormitus pidetään stabiilina niin kauan, että jännityksen kasvusta aiheutunut tangon liukuma on pysähtynyt tai jännitystason saavuttamisesta on kulunut 2 minuuttia. Tangon liukumat kirjataan ylös aina ennen jokaista kuormituslisäysvaihetta ja heti, kun tavoitekuorma on saavutettu. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 81.)

Voima-liukumamittaus voidaan suorittaa myös jatkuvalla kuormituksella ilman stabiileja kuormitusvaiheita. Tällöin on käytettävä sellaista kuormituslaitetta, jossa kuormitusnopeus voidaan ohjelmoida tasaisesti kasvavaksi. Lisäksi jatkuvassa kuormituksessa on hyvä käyttää kuormitusjärjestelmään kytkettyjä digitaalisia liukumanmittauslaitteita. Tällöin kuormituksessa käytetyt voimat ja niitä vastaavat liukumat tallentuvat automaattisesti järjestelmän loggeriin. Käytettä-

essä tasaisesti kasvavaa kuormitusta teräsjännityksen σ_s kehitysnopeus saa olla korkeintaan 1 MPa/s. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 81.)

Ideaalitapauksessa testiä jatketaan, kunnes tartunta pettää täysin molemmissa palkin puolikkaissa tai testattava tanko katkeaa. Tartuntamurto ei kuitenkaan yleensä tapahdu molemmissa puolikkaissa yhtä aikaa. Tästä johtuen tulee tangon jatkoliukuminen estää murtuneessa palkinpuolikkaassa tangon liu`uttua 3 mm. Tangon jatkoliukuminen estetään murtuneessa puolikkaassa palkin päähän tukeutuvalla mekaanisella ankkurointielimellä. Tämän jälkeen toinenkin puoli kuormitetaan vastaavaan murtoon saakka. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 81.)

Kuormituksen jälkeen automaattisesti kuormitusjärjestelmään tallentuneiden tai käsin kirjattujen kokonaisvoima-liukumamittaustulosten perusteella piirretään molemmista palkin puolikkaista voima-liukumakuvaajat. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 81.)

7.6 Tartuntajännitysten laskeminen

Tietyllä liukumalla testipalkkiin kohdistuvan kokonaisvoiman ollessa F_a , lasketaan tartuntajännitys τ_b kaavalla 18. (SFS-EN 10080. 2005, liite C, 81.)

$$\tau_b = \frac{\sigma_s}{40}, \text{ missä} \quad \text{KAAVA 18}$$

σ_s = testattavan tangon jännitys, joka lasketaan tankopaksuudesta riippuen kaavalla 19 tai 20. (EN 10080. 2005, liite C, 81.)

$$\sigma_s = \frac{1,25 \times F_a}{A_n}, \text{ kun } d < 16 \text{ mm} \quad \text{KAAVA 19}$$

$$\sigma_s = \frac{1,50 \times F_a}{A_n}, \text{ kun } d \geq 16 \text{ mm} \quad \text{KAAVA 20}$$

Tartuntaominaisuuksien määrittämistä varten tartuntajännitykset lasketaan seuraavilla tangon liukumilla niitä vastaavia teräsjännityksiä käyttäen:

$\tau_{0,01}$ = tartuntajännitys 0,01 mm:n liukumalla

$\tau_{0,1}$ = tartuntajännitys 0,1 mm:n liukumalla

τ_1 = tartuntajännitys 1 mm:n liukumalla

τ_{bu} = tartuntajännitys maksimikuormalla. (EN 10080. 2005, liite C, 81.)

8 32 MM HARJATANGON ANKKUROINTITUTKIMUS

Kokeellisten tutkimusten päätavoitteena oli tutkia halkaisijaltaan 32 mm harjaterästangon suoraa ankkuroituvuutta Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeen mukaan mitoitettussa palkkirakenteessa. 32 mm tangon suoraa ankkuroituvuutta tutkittiin kuormitustesteillä, joissa vertailtiin yhdellä 32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin ja neljällä 16 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin kuormituskäyttämisiä. Lisäksi palkkityyppien toteutuneita kestävyyskäyviä vertailtiin laskennallisiin kestävyyskäyviin. Ankkuroituvuutta indikoivina ilmiöinä pidettiin palkkien taipumaa, halkeilua ja kokonaiskuormaa. Ankkurointitutkimuksiin liittyen palkeissa käytettyjen terästen tartuntaominaisuudet pyrittiin selvittämään standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaisella palkkitestillä. Tartuntaominaisuuksien lisäksi myös terästen mekaaniset ja geometriset ominaisuudet määritettiin.

8.1 Tutkimuksen lähtökohta

Betoniterästen ankkuroituvuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä on tutkittu maailmalla vaihtelevasti 1800-luvun lopusta alkaen. Paksujen tankojen pelkästään tartuntaan perustuvasta ankkuroitumisesta on kuitenkin suhteellisen vähän tutkittua tietoa. Nykyiset euronormien mukaiset mitoituskäytännöt ovat muotoutuneet aiheeseen liittyvän tutkimushistorian pohjalta.

Betonirakenteiden suunnitteluohje Eurokoodi 2:n mukaan suorien tankojen pelkästään tartuntaan perustuva ankkurointi on mahdollista aina 32 mm:n tankopaksuuteen saakka, vaikka varsinaista kaiken kattavaa kokeellista näyttöä 32 mm tankojen suorasta ankkuroituvuudesta ei olekaan. Eurokoodi 2:n tankopaksuudelle asettama 32 mm:n yläraja suoran ankkuroituvuuden suhteen on määritetty ohuempien tankopaksuuksien tutkimustuloksia extrapoloimalla. Osa tutkijoista onkin kyseenalaistanut pelkästään tartuntaan perustuvan 32 mm tangon ankkuroituvuuden ohuilla betonipeitepaksuuksilla. Asiaa on käsitelty muun muassa CEB-FIP:n työryhmissä jo 90-luvulla, mutta varsinaisia laajamittaisia tutkimuksia asian tiimoilta ei ole saatu alulle. (Nykyri 2012–2013.)

8.2 Tutkimuksen ongelma

Tutkimuksen ongelma yksinkertaistettuna oli se, että tankopaksuuden kasvaessa kasvaa ankkuroitava myötövoima suuremmassa suhteessa kuin ankkuroitumiseen tarvittava tangon vaipan pinta-ala.

Myötövoiman kasvaessa tangon poikkileikkauksen mukaan toiseen potenssiin, kasvaa tartuntapinta-ala tangon piirin mukaan vain ensimmäiseen potenssiin, kun tangon ankkuroituvuuteen vaikuttavat muut parametrit pidetään vakioina. Tästä johtuen paksut tangot vaativat suhteellisesti pidemmän ankkurointipituuden kuin ohuemmat tangot. (Jokela 1979, 77.)

Mitoituskäytännöissä ankkuroitavan voiman oletetaan jakautuvan tasaisesti ankkuroitavan tangon vaipalla koko ankkurointipituudella. Tartuntajännitykset ovat todellisuudessa kuitenkin suurimpia ankkurointialueen alkupäässä vähentyen epälineaaraisesti tangon rasittamatonta päätä kohti. (Leskelä 2008, 80.)

Tankopaksuuden kasvaessa tartunta-alueen rasitetumman pään paikalliset tartuntajännitykset kasvavat suuremmiksi, jolloin tankoa ympäröivän betonin koonpuristuminen, murskaantuminen ja halkeilu lisääntyvät. Ilmiöiden seurauksesta raudoitustangon ja betonin välinen tartunta heikkenee paikallisesti ja tanko pääsee liukumaan betonin sisällä jännityshuipun siirtyessä eteenpäin tartunta-alueella. Jossain vaiheessa, tankopaksuutta kasvatettaessa, täyttä myötövoimaa ei enää pystytä ankkuroimaan, vaan teräs liukuu ulos betonista paikallisten tartuntamurtoketjujen edetessä läpi koko tartunta-alueen. (Nykyri 2012–2013.)

Aikaisempien tutkimusten perusteella tiedetään, että myötövoimaa ankkuroitaessa paksut tangot liukuvat ohuempia tankoja enemmän tartunta-alueen rasitetummassa päässä. Tällä on epäedullisia vaikutuksia rakenteen toimintaan liukumista aiheutuvien muodonmuutosten vuoksi. Tästä johtuen ankkuroitavien terästen rasitetun pään liukumarajaksi on aiemmin muun muassa Yhdysvalloissa ja entisessä Saksan liittotasavallassa asetettu 0,2–0,3 mm. Pekka Nykyri on *VTT:n tutkimuksia 693 Betoniraudoituksen ankkurointi* -julkaisussa 1990-luvulla todennut, etteivät halkaisijoiltaan yli 16 mm:n harjaterästangot ankkuroidu 0,3 mm liukumarajan puitteissa.

8.3 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää, ankkuroituuko normaali 32 mm:n kuumavalssattu harjaterästanko Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeen mukaisessa ja ohuella betonipeitekerrospaksuudella toteutetussa palkkirakenteessa, kun tangossa vaikuttaa tangon täyttä myötövoimaa vastaava vetorasitus. Tangon liukumalle ei tässä tutkimuksessa asetettu rajoitteita.

Kuormituskokeet ja koekappaleet pyrittiin suunnittelemaan mahdollisimman yksinkertaisiksi niin, että ne simuloisivat yleisesti rakentamisessa käytettyjä ratkaisuja ja olisivat helposti toteutettavissa käytössä olevilla resursseilla. Tästä syystä 32 mm tangon ankkuroituvuutta päätettiin tutkia yksiaukkoisessa vapaasti tuetussa Eurokoodi 2:n vaatimukset täyttävässä palkkirakenteessa.

32 mm tangon ankkuroituvuutta oli tarkoitus tutkia vertailemalla kahdella eri tankopaksuudella raudoitettujen palkkien kuormituskäyttäytymisiä. Palkkityypit pyrittiin toteuttamaan, tankopaksuutta lukuun ottamatta, ominaisuuksiltaan identtisiksi. Ankkuroituvuuteen vaikuttavana parametrina pidettiin lähtökohtaisesti ainoastaan tankopaksuutta.

Palkkityyppien välisen kuormituskäyttäytymisen vertailuparametreiksi valittiin:

- kuormituskestävyys,
- taipuma ja
- halkeilu.

Palkkityyppien kuormituskestävyyttä pyrittiin mallintamaan myös laskennallisesti.

Ankkurointitutkimuksiin liittyen testattavien terästen mekaaniset tartuntaominaisuudet oli tarkoitus määrittää standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaisella palkkikokeella, missä mitattiin terästen kuormittamattoman pään liukumaa ja kuormitusvoimaa. Myös terästen geometriset ja mekaaniset ominaisuudet pyrittiin määrittämään niitä koskevien standardien mukaan.

Lisäksi kaikkien testien suoritustavat ja havaitut ongelmakohdat oli tarkoitus kuvata tarkasti mahdollisten oppilastöinä toteutettavien jatkotutkimusten kehittämistä silmällä pitäen. Tätä puolta työstä voidaan pitää sekundaarisena tavoitteena.

8.4 Koekappaleet

32 mm harjaterästangon ankkurointitutkimuksia varten valmistettiin 4 kappaletta Eurokoodi 2 -suunnitteluohjeen mukaan mitoitettuja 150x300x3000 mm:n kokoisia teräsbetonipalkkeja. Palkeissa käytettyjen terästen tartuntaominaisuuksien määrittämistä varten valmistettiin standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaisia tartuntatestipalkkeja yhteensä 5 kappaletta. Testipalkeissa käytetyn betonin puristuslujuuden määrittämistä varten valmistettiin 6 kappaletta standardin EN 12390-1:2001 mukaisia 150x150 mm:n kokoisia kuutiolujuuskappaleita sekä 12 kappaletta 150x300 mm:n kokoisia lieriölujuuskappaleita.

Lisäksi palkeissa käytetyistä pääteräksistä lähetettiin kummastakin tankopaksuudesta 2 kappaletta noin 1200 mm:n mittaisia harjateräsnäytteitä VTT Expert Services Oy:n testattavaksi. 16 mm harjaterästankojen vetolujuusominaisuuksien määrittämistä varten otettiin palkeissa käytetyistä teräksistä 3:sta eri tangosta yhteensä 5 näytettä.

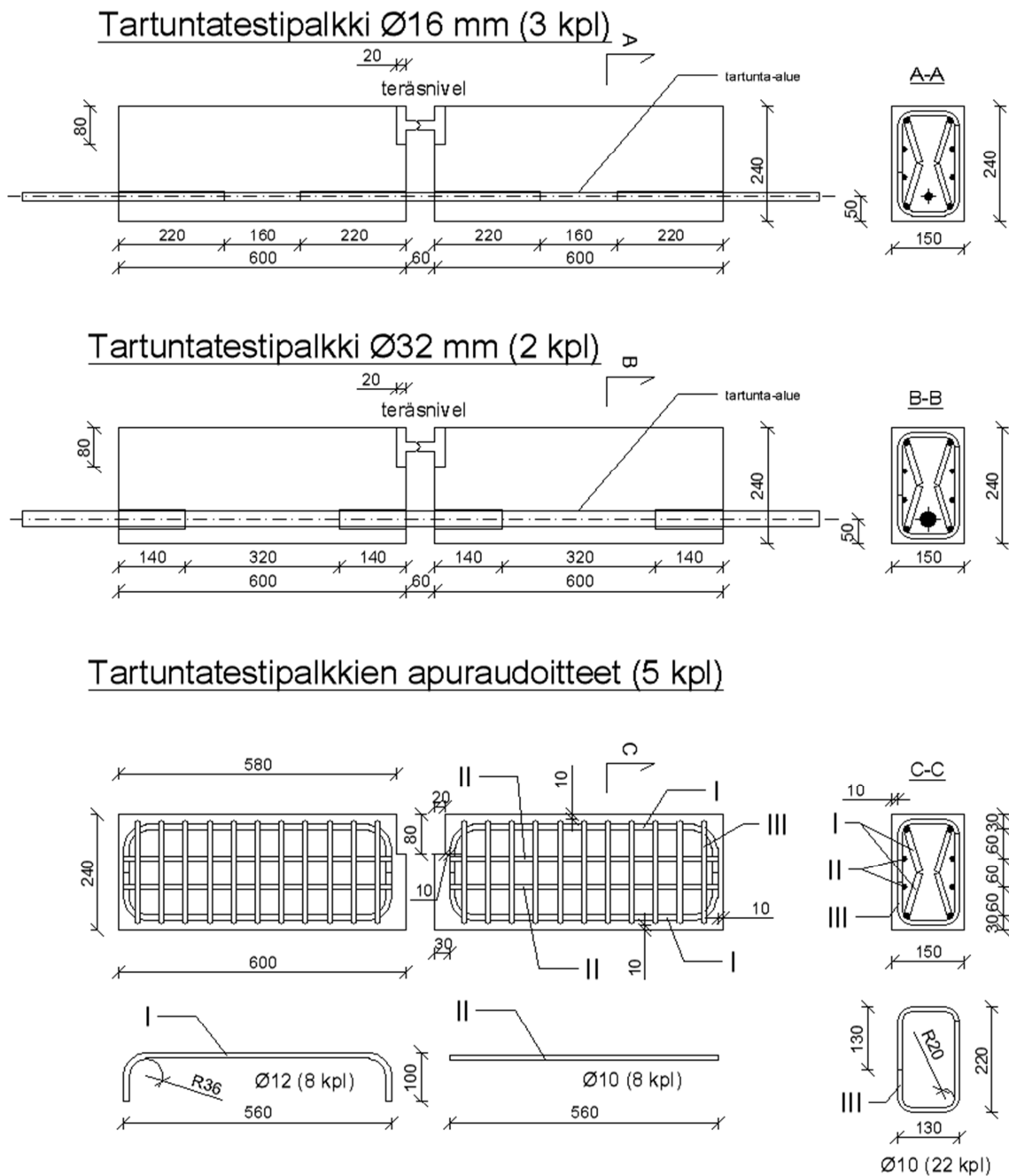
8.4.1 Tartuntatestipalkit

Standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaisia tartuntatestipalkkeja valmistettiin 3 kappaletta nimellishalkaisijoiltaan 16 mm:n teräksille ja 2 kappaletta 32 mm:n teräksille. Yksi 16 mm:n tartuntatestipalkki varattiin testin harjoittelua varten. Taulukossa 7 on esitetty tartuntatesteissä käytetyt koekappaleet.

TAULUKKO 7. Tartuntatestien koekappaleet

Tunnus	Testattavan tangon nimellishalkaisija [mm]
1/16	16 mm
2/16	16 mm
3/16	16 mm
4/32	32 mm
5/32	32 mm

Tartuntapituus kaikissa tartuntatestipalkeissa oli 10Ø pituinen. Tartunta-alueen rajaamiseen käytettiin muoviputkea. Puristusresultantin paikka asemoitiin vakio korkeudelle teräksisen nivelen avulla. Kaaviot tartuntatestipalkeista ja niiden raudoitteista on esitetty kuvassa 25.



KUVA 25. Tartuntatestipalkkien raudoitteet

8.4.2 Ankkurointipalkit

Ankkurointitutkimuksia varten suunniteltiin kaksi eri palkkityyppiä, joista toisessa vetoraudoituksena toimi yksi 32 mm:n harjateräs ja toisessa neljä 16 mm:n harjaterästä. Palkkityyppien vetoraudoitteiden nimelliset poikkileikkausalat pysyivät

näin ollen samansuuruisina. Taulukossa 8 on esitetty ankkurointitutkimuksessa käytetyt koekappaleet.

TAULUKKO 8. Ankkurointitutkimuksen koekappaleet

Tunnus	Vetoterästen määrä [kpl]	Vetoteräksen nimellishalkaisija [mm]
1/16	4	16 mm
2/16	4	16 mm
3/32	1	32 mm
4/32	1	32 mm

Palkkityyppien betonipeitepaksuudet suunniteltiin Eurokoodi 2:n mukaan mahdollisimman ohuiksi, jotta ankkurointialueilla tapahtuvat epäsuotuisat vaikutukset tulisivat esiin selvästi. Betonipeitteen vähimmäisarvo C_{min} määritettiin tarunnan vaatimusten mukaan. Tällöin terästen korroosiota aiheuttavat ympäristöolosuhteet vastaisivat rasitusluokkaa XC1, kuivat sisätilat. Mittapoikkeaman ΔC_{dev} -arvona käytettiin 5 mm, koska palkit valmistettiin helposti kontrolloitavissa olosuhteissa.

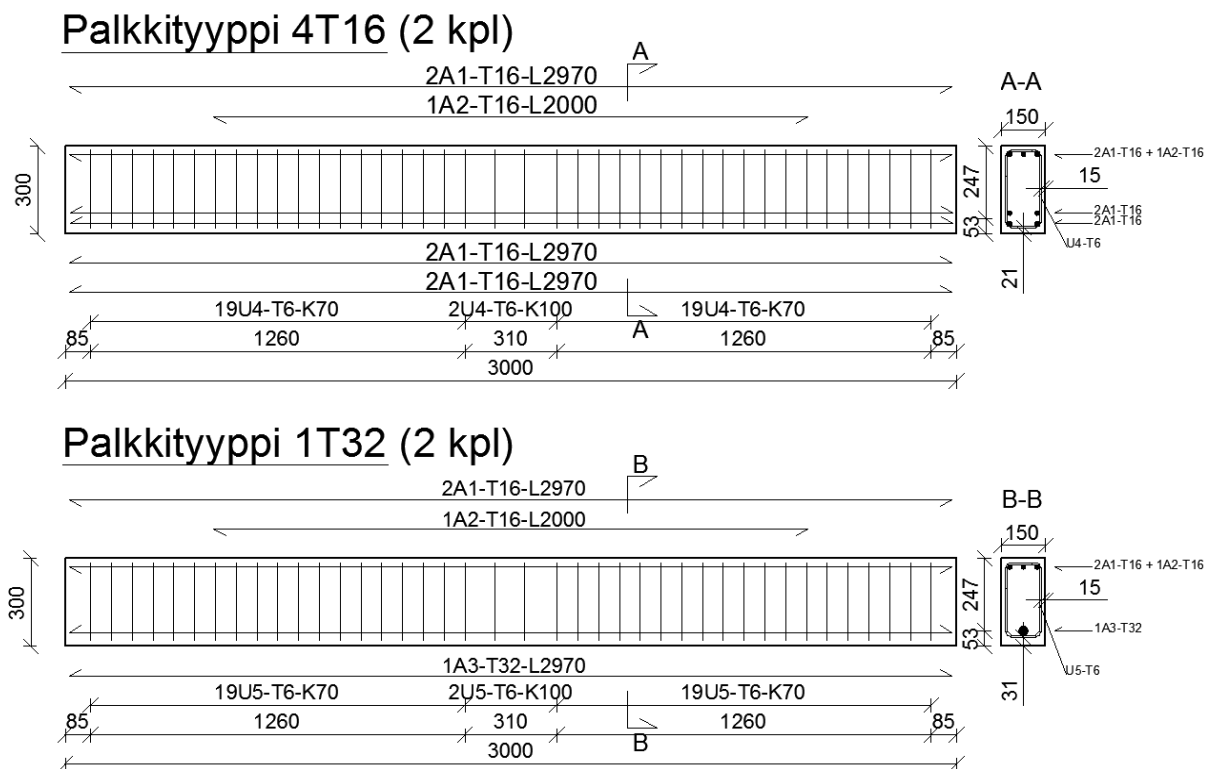
32 mm tangon betonipeitteen nimellisarvo C_{nom} oli 1T32-palkkityypin alapinnassa 31 mm. Muilta osin betonipeitekerroksen nimellisarvo oli 15 mm. 32 mm tangon ankkuroituvuuteen vaikuttava betonipeitteen paksuus muodostui päätangon pinnasta betonipeitteen pintaan mitattuna $1,16\varnothing$ paksuiseksi.

4T16-palkkityypissä betonipeitteen nimellisarvo C_{nom} vetoterästen kohdalla oli 15 mm. 16 mm tangolla ankkuroituvuuteen vaikuttavaksi betonipeitepaksuudeksi muodostui $1,31\varnothing$.

4T16-palkkityypin vetoteräokset ryhmitettiin kahteen kerrokseen siten, että veto-raudoituksen pintakeskiö sijoittui samaan korkeuteen 1T32-palkkityypin kanssa. Molemmissa palkkityypeissä pääraudoitteista tuotiin 100 prosenttia tukialueille.

Tankojen ankkuroinnin varmistamiseen tarkoitettuja ja normimitoituksessa käytettäviä vähimmäisankurointipituuksia $l_{b,min}$ ei huomioitu tässä tutkimuksessa tukialueen ankkuroinnin osalta, koska rakenteen dimensioista johtuen leikkausrasituksen ei arvioitu muodostuvan kriittiseksi tukialueen lähistöllä.

Palkkien leikkaus- ja puristusraudoitus suunniteltiin normaalisti Eurokoodi 2:n mukaan. Leikkausmitoituksessa käytettiin muusta suunnittelusta poiketen materiaaleilla osavarmuuskertoimia, mistä johtuen ankkuroitumiseen vaikuttavan poikittaisen raudoituksen määrä muodostui noin 1,15-kertaiseksi vaadittuun minimimäärään nähden. Puristusraudoituksen määrä puolestaan ylimitoitettiin tietoisesti. Ylimitoituksella pyrittiin varmistamaan puristuspuolen kestävyys, koska palkkien korkeus oli vetopuolen teräsmäärään nähden pieni. Kuvassa 26 on esitetty kaavio ankkurointipalkeista. Ankkurointipalkkien suunnitteludokumentit on esitetty liitteissä 1-4.



KUVA 26. Ankkurointipalkkien dimensiot ja raudoitteet

8.5 Tutkimuksessa käytetyt teräkset

Tutkimuksessa oli tarkoitus käyttää Eurokoodi 2 liitteen C vaatimukset täyttäviä uusia B500B-tyyppin betoniteräksiä, joiden käyttöön pikkuhiljaa ollaan siirtymässä EU:n alueella. B500B-harjaterästyypin pienten määrien nopea saatavuus oli kuitenkin hankalaa, eikä kyseistä terästyyppeä löytynyt paikallisten betoniterästen jälleenmyyjien valikoimista. Saatavuus ongelmien vuoksi kokeet päätettiin suorittaa yleisesti käytetyllä A500HW-teräslaadulla.

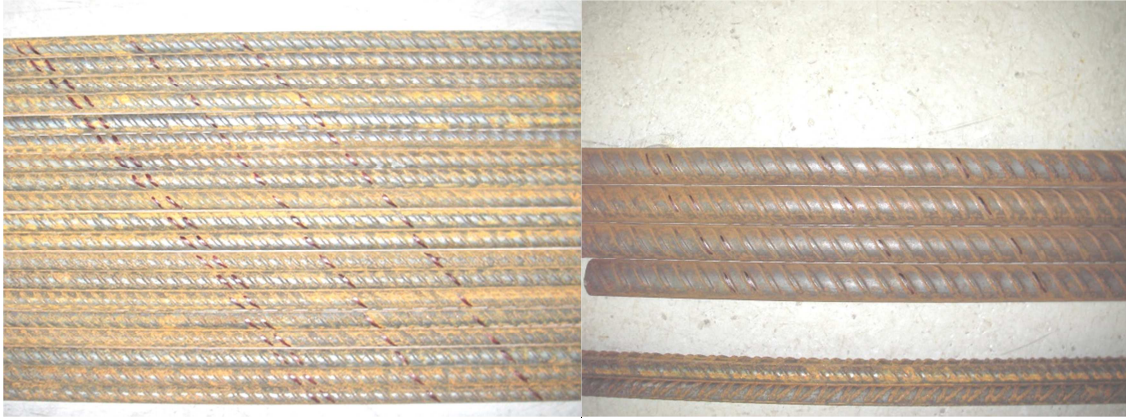
16 mm:n harjateräkset ja muut palkeissa käytetyt apuraudoitetangot hankittiin rautakaupasta. 32 mm:n tankoja ei jälleenmyyjillä ollut varastoissa, eikä pienten määrien tilaaminen onnistunut. Tankojen saamiseksi tehtiin kyselyjä pienempiin lähialueen metalliromun jälleenmyyntiyrityksiin, mistä 32 mm:n tankoa lopulta löytyi.

Koekappaleissa käytettyjen pääterästen valmistajatiedot on esitetty taulukossa 9. Valmistajatiedot perustuvat VTT Expert Service Oy:n julkaisuun *Luettelo valmistajista, joiden kanssa VTT Expert Services Oy:llä on laadunvalvontasopimus* (VTT Expert Services Oy 2012, 1).

TAULUKKO 9. Koekappaleissa käytettyjen terästen valmistajatiedot (VTT Expert Services Oy 2012, 1.)

Teräslaatu	Nimellishalkaisija [mm]	Tehtaanmerkki	Valmistaja
A500HW	16	6/6	JSC Liepajas Metalurgs, Latvia
A500HW	32	6/5	Celsa Armeringsstål AS, Norja

Kuvassa 27 on esitetty terästen tunnistemerkinnät tussilla korostettuina.



KUVA 27. Tutkimuksessa käytettyjen terästen tunnistemerkinnät, vasemmalla 16 mm:n ja oikealla 32 mm:n tangot (Pesonen 2012)

Koekappaleissa käytetyistä teräksistä lähetettiin näytteet VTT Expert Services Oy:lle tankojen geometrinen ominaisuuksien, pituusmassojen ja 32 mm tangon vetolujuusominaisuuksien määrittämistä varten.

Terästen kunto

16 mm terästen pinnalla oli paikoitellen ohutta ruostepölyä, mutta ei korroosioita aiheuttavia pinnan syöpymiä. 32 mm:n tangot puolestaan olivat lähes kauttaaltaan ruosteen peitossa ja niiden pinnoilla esiintyi lieviä syöpymiä. Kuvissa 28 ja 29 on esitetty terästen pintojen korroosioasteet.



KUVA 28. 16 mm tankojen pintakorrosioaste (Pesonen 2012)



KUVA 29. 32 mm tankojen pintakorrosioaste ennen harjausta (Pesonen 2012)

Terästen pintoja verrattiin *Tiehallinnon selvityksiä 48/2003* -julkaisun liitteen 1 mallikuviin, joiden perusteella 16 mm tankojen korroosioaste oli 0 ja 32 mm tankojen korroosioaste oli 1. Julkaisun mukaan korroosio asteen ollessa 0 tai 1 ruostetta ei tarvitse poistaa tankojen pinnalta ennen betonointia. (Tiehallinto 2003, 7.) 32 mm tankojen pinnoilta poistettiin kuitenkin enimmäkseen ruosteet kevyesti teräsharjalla ennen koekappaleiden valmistusta.

8.6 Betoni

Koekappaleissa käytetyn betonin valmisti ja toimitti Ruskon betoni Oy. Betoni tilattiin standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C vaatimusten mukaan. Tilauksessa normaalibetonin tavoitelujuudeksi pyydettiin C25/30, vesisementtisuhteeksi 0,70 ja massan runkoaineksen suurimmaksi raekooksi 16 mm. Edellä mainittujen tietojen lisäksi kuormakirja ilmoitti betonin notkeusluokaksi S2. Sementtinä oli käytetty normaalisti kovettuvaa Portland seossementtiä CEM II 42,5 N ja massan kloridipitoisuus-luokaksi oli ilmoitettu Cl 0,10.

8.7 Koekappaleiden valmistus

Kaikki koekappaleet valmistettiin kevättalvella 2012 Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa Kotkantie 1:ssä.

8.7.1 Tartuntatestipalkit

Standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaisten tartuntatestipalkkien rauditteet valmistettiin kuvan 25 mittojen mukaan. Valmis apuraudoitekokonaisuus on esitetty liitteen 9 kuvassa 1. Testattavien harjaterästankojen tartuntapituudet palkin puolikkaiden sisällä rajattiin muoviputkilla 10 \varnothing mittaisiksi kuvan 25 mukaan. 32 mm tankojen tartunta-alueen rajaamiseen käytettiin halkaisijaltaan 40 mm paksua sähköasennusputkea ja 16 mm tankojen rajaamiseen 25 mm:n putkea. Muoviputkien päät tiivistettiin Sikaflex -11FC⁺ -liimamassalla, jotta betonimassa ei pääsisi muoviputkien ja harjaterästen väliin. Testattujen terästen rajatut tartunta-alueet on esitetty kuvassa 30.



KUVA 30. Testattujen harjaterästen rajatut tartunta-alueet (Pesonen 2012)

Tartuntatestipalkkien muotit valmistettiin filmivanerista kuvan 25 mittojen mukaan. Tartuntatestipalkin särmiöiden välissä käytettiin polystyreenilevyä, joka oli helppo poistaa särmiöiden välistä betonin kovetuttua. Ennen raudoitteiden asentamista muotit öljyttiin Aspoform NA –muottiöljyllä. Apuraudoitehäkkien oikeaan asemointiin käytettiin muovisia korokepaloja.

Apuraudoitteiden asentamisen jälkeen testattavat harjaterästangot työnnettiin muottien päistä paikoilleen ja lukittiin päätylevyihin Sikaflex -11FC⁺-liimamassan ja sidelangan avulla. Tartuntatestipalkin valmis muotti raudoitteineen on esitetty kuvassa 31.



KUVA 31. Tartuntatestipalkin muotti raudoituksineen ennen betonointia (Pesonen 2012)

8.7.2 Ankkurointipalkit

Ankkurointipalkkien raudoitteet valmistettiin liitteen 4 kuvien 1 ja 2 mukaisiksi. Valmiiden raudoitteiden mitat ja terästen sijainnit tarkistettiin mittaamalla (liitteen 9 kuvat 2 ja 3). Toteutuneet raudoitteet vastasivat suunnitelmia $\pm 1-2$ mm:n tarkkuudella. Suunniteltujen betonipeitekerrosten toteutumisen varmistamiseksi raudoitteiden ja muottien välissä käytettiin muovisia korokepaloja. Korokepaloja sijoitettiin raudoitteiden alapuolelle vain kaksikappaletta, koska raudoitteiden kokonaisuudet olivat riittävän jäykkiä, eikä palkin keskialueen alapinnan betonointia haluttu häiritä. Alapinnan korokepalat sijoitettiin nostolenkkien kohdille noin 700 mm:n etäisyyksille palkkien päistä. Kuvassa 32 on esitetty valmis 1T32-palkkityypin raudoittekokonaisuus.



KUVA 32. 1T32-palkkityypin raudoitekokonaisuus (Pesonen 2012)

Ankkurointipalkkien muotteina käytettiin rakennuslaboratorion aiemmin opetus- käyttöön valmistamia filmivanerimuotteja. Valmiit muottiosat koottiin ja mitat säädettiin suunnitelmien mukaisiksi. Muotit öljyttiin Aspoform NA-muottiöljyllä, minkä jälkeen valmiit raudoitteet nostettiin muotteihin ja varustettiin tunniste- merkinnöin (kuva 33). Testipalkkien puristuspuolen 2T16-raudoitusta vahvistettiin vielä juuri ennen betonointia lisäämällä kaikkiin palkkeihin yksi kaksi metriä pitkä 16 mm:n harjateräs palkin keskikohtaan. Lisäraudoitteella pyrittiin varmistamaan puristuspuolen kestävyys. Lisätty puristusraudoitus on sisällytetty lopullisiin kestävyyslaskelmiin ja rakennekuviin.



KUVA 33. Ankkurointipalkkien muotit raudoitteineen ennen lisäpuristusraudoitteiden asennusta (Pesonen 2012)

8.7.3 Koekappaleiden betonointi

Kaikki tartuntatesti- ja ankkurointipalkit sekä betonin lujuuskoekappaleet valmistettiin samasta betonierästä 24.2.2012. Betonimassa siirrettiin betoniautosta muotteihin auton valurännin avulla. Betonointisuunta oli sekä tartuntatestipalkeissa että ankkurointipalkeissa kohtisuora pääraudoitteisiin nähden.

Suuresta runkoaineksen maksimiraekoosta aiheutunut massan jäykkyys ja palkkien yläpintojen kapeahkot raudoitusten välit vaikeuttivat massan pääsyä raudoitteiden lomitse. Raudoitteiden sekä raudoitteiden ja muottien väliset etäisyydet täyttivät kuitenkin Eurokoodi 2:n kansallisessa liitteessä etäisyyksille asetetut vähimmäisvaatimukset. Ahtaudesta johtuen massan kulkua jouduttiin avustamaan sauvatäryttimellä yläpintojen terästen kohdalla kaikissa palkeissa.

Palkkien muotit täytettiin massalla aluksi puoleen väliin saakka, minkä jälkeen kerros tiivistettiin sauvatäryttimellä. Tiivistämisen jälkeen täytettiin loppuosa, joka taas tiivistettiin kuten edellä. Valun jälkeen massan annettiin ”tekeytyä”

noin puolituntia, minkä jälkeen palkkien ja lujuuskoekappaleiden pinnat tasoitettiin teräslastalla hiertämällä. Pintojen tasoittamisen jälkeen koekappaleet peitettiin huolellisesti rakennusmuoveilla liian nopean veden haihtumien estämiseksi.

Valun aikana massalle suoritettiin standardin SFS-EN 12350-2:2009 mukainen painumatesti ja lämpötilan mittaus. Painumaksi saatiin 91 mm, mikä vastasi notkeusluokkaa S2. Massan lämpötila betonointihetkellä oli +18,8 °C, mikä täytti standardin SFS-EN 206-1:2005 mukaiset alkutestausta koskevat lämpötilavaatimukset. Betonin lujuuskoekappaleet valmistettiin standardin SFS-EN 12390-2:2009 mukaan palkkien betonoinnin puolella välissä.

Muotit purettiin noin kolmen vuorokauden kuluttua 27.2.2012. Koekappaleisiin merkattiin tunnistetiedot ja niiden pinnat tarkastettiin valuvirheiden varalta. Kaikkien koekappaleiden pinnat olivat siistit, eikä mainittavia valuvirheitä näkynyt. Muottien purun jälkeen kuutiolujuuskappaleet siirrettiin +20 °C:een lämpöiseen vesisäilytykseen. Muiden koekappaleiden jälkihoitoa jatkettiin heti muottien purun jälkeen kastelemalla koekappaleet runsaalla vedellä ja käärimällä ne tiiviisti suureen rakennusmuoviin (kuva 34).



KUVA 34. Koekappaleet ennen muoviin käärimistä (Pesonen 2012)

Tästä eteenpäin kaikki testipalkit ja olosuhdelujuuskoekappaleet olivat samoissa lämpötilaltaan noin +20 °C:ssa halliolosuhteissa muovin käärittyinä. Koekappaleet poistettiin muovista vasta niiden kuormituspäivinä. Koekappaleiden pitkällä jälkihoidolla pyrittiin simuloimaan ulkoilmassa tapahtuvaa betonin hidasta kuivumista. Hallin suhteellinen kosteus oli kevättalvella hyvin alhainen, joten välikastelu oli välttämätöntä.

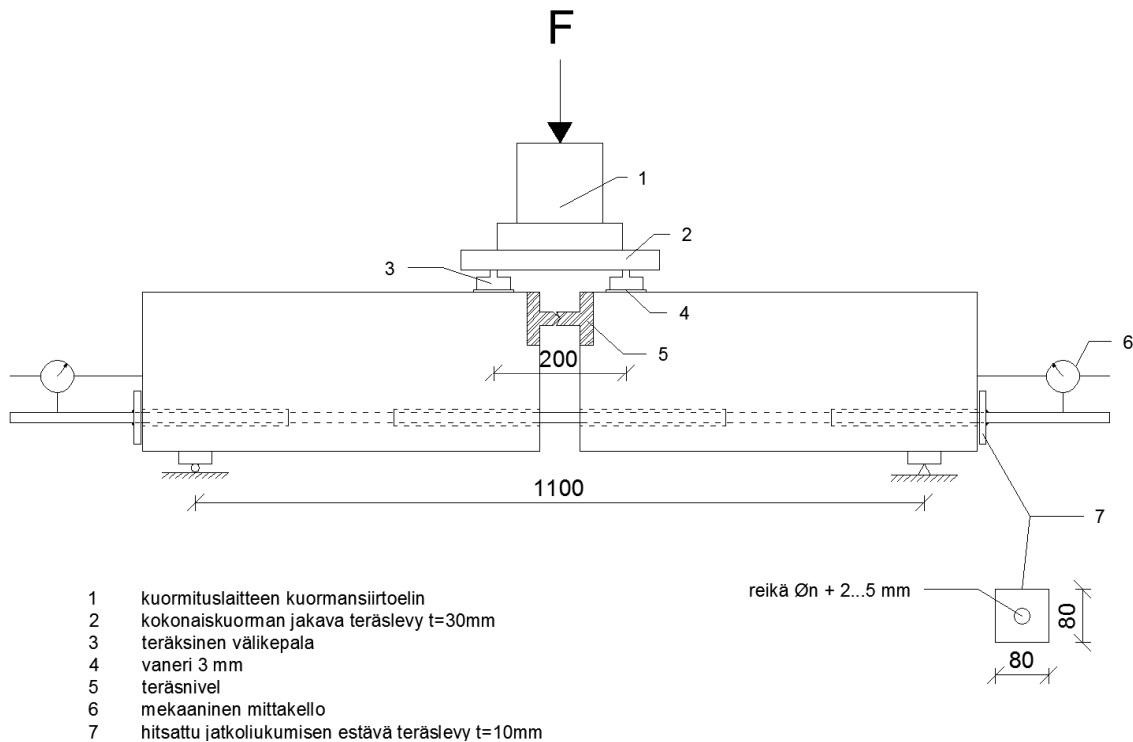
8.8 Koejärjestelyt

Ennen kuormituksia kaikkien koekappaleiden kunto tarkastettiin silmämääräisesti ja toteutuneet dimensiot mitattiin ja kirjattiin ylös. Dimensioiden mittausten jälkeen palkkien kylkiin merkattiin tukien ja pistekuormien paikat. Lisäksi palkkien yläpinnat hiottiin kevyesti hiomakivellä pistekuormien kohdilta suurimpien epätasaisuuksien poistamiseksi.

8.8.1 Tartuntatestit

Kaikkien tartuntatestipalkkien mitat vastasivat suunnitelmia $\pm 1-3$ mm:n tarkkuudella. Tankojen tartunnan pettämisen jälkeisen jatkoliukuman estämiseen kehitettiin ensimmäisten palkkien kohdalla vaijerilukkoja, mutta ne eivät kyenneet pysäyttämään terästen jatkoliukumista tartuntamurron jälkeen. Tästä johtuen tartuntatestipalkkien 3/16, 4/32 ja 5/32 tankoihin hitsattiin ennen testejä 10 mm paksut teräslaipat noin 3 mm:n etäisyydelle palkkien päistä. Teräslaippojen hitsausten jälkeen tankojen annettiin jäähtyä huonelämpötilaan ennen testausta.

Testattavat palkit tuettiin kahden viivamaisen rullatuen varaan, jotka sallivat palkin vapaan taipumisen. Tuen leveys oli 50 mm. Kuormituslaitteen kokonaiskuorma ohjattiin 30 mm paksun teräslevyn ja kahden poikkileikkausprofiililtaan T-mallisen välikepalan avulla palkin yläpintaan. 32 mm:n testipalkeilla palkin yläpinnan ja välikepalojen välissä käytettiin lisäksi 3 mm paksua vanerilevyä tasaamaan palkin pinnan epätasaisuuksia. Pistekuormien viivamainen tukileveys palkin yläpinnalla oli 50 mm. Kaavio tartuntatesteissä käytetystä kuormitusysteemistä on esitetty kuvassa 35.



KUVA 35. Tartuntatesteissä käytetty kuormitusysteemi

Kuormitusyhteemissä testipalkkien teräsiin asennettiin mekaaniset mittakellot, joiden tarkkuus oli $\pm 0,01$ mm. Mittakelloilla mitattiin testattavien terästen kuormittamattoman pään liukumaa.

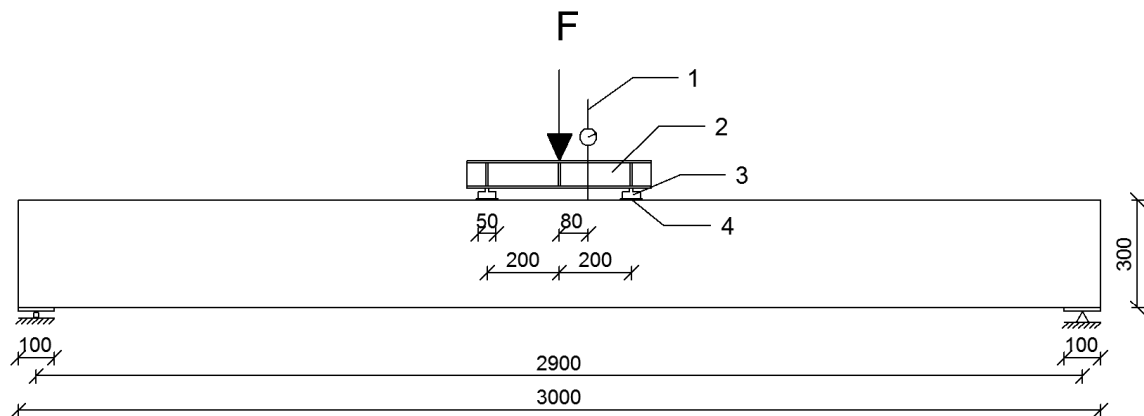
Testin suorittamiseen tarvittiin kolme henkilöä. Yksi henkilöistä ohjasi kuormituslaitetta ja ilmoitti liukumien kirjaamishetket. Kaksi muuta henkilöä kirjasi mittakellojen lukemia testauspöytäkirjaan. Kuormituslaite mittasi ja tallensi automaattisesti kuormitusvoima- ja tunkin siirtymätietoja testin aikana. Lisäksi kaikki koestukset dokumentoitiin digitaalisella videokameralla.

8.8.2 Ankkurointitutkimukset

Ankkurointipalkkien toteutuneet dimensiot vastasivat suunnitelmia keskimäärin $\pm 1-5$ mm:n tarkkuudella. Palkit tuettiin molemmista päistä 15 mm:n pyörötangosta ja 10 mm paksusta lattateräksestä valmistettujen palkin vapaan taipumisen sallivien tukien varaan. Tukileveys oli 100 mm. Tuet aseteltiin siten, että tukiväli tuen keskeltä keskelle oli 2900 mm.

Kuormitusylinterin kokonaiskuorma jaettiin lommahdusvahvistetun IPE-profiiliin ja kahden T-mallisen teräksisen välikepalan avulla kahdeksi pistekuormaksi. Pistekuormien etäisyydet palkin keskikohdasta olivat 200 mm ja tukileveydet 50 mm. Välikepalojen ja palkin välissä käytettiin 3 mm:n vahvuista vaneria tasamaan pinnan epätasaisuuksia.

Taipuman mittausta varten asennettiin palkin keskikohdasta 80 mm:n päähän digitaalinen siirtymämittausanturi. Kuvassa 36 on esitetty kaavio ankkurointitutkimuksissa käytetystä kuormitussysteemistä.



- 1 digitaalinen siirtymäanturi
- 2 vaihtopalkki (vahvistettu IPE 100)
- 3 teräksinen välikepala
- 4 vaneri 3 mm

KUVA 36. Ankkurointitutkimuksen kuormitussysteemi

Kaikki ankkurointipalkkien koestukset dokumentoitiin digitaalisella videokameralla.

8.9 Kuormitusten kulku ja suoritettut mittaukset

Kuormitukset suoritettiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa Kotkantie 1:ssä lukuun ottamatta VTT:n teräksille suorittamia mittauksia.

8.9.1 Betonin puristuslujuuksien määrittäminen

Kaikki betonin puristuslujuuskoekappaleet kuormitettiin Tonipro 4000 - betonipuristuslaitteella. Laite mittasi kuormitusvoimaa 1 prosentin tarkkuudella ja sille oli suoritettu kalibrointi 20.5.2011.

Betonin standardipuristuslujuus määritettiin 23.3.2012 standardin SFS-EN 12390-3:2009 mukaisesti kuudella 150x150 mm:n kuutiolla. Kuutiot olivat olleet 28 vuorokautta standardin SFS-EN 12390-2:2009 vaatimusten mukaisessa vesisäilytyksessä. Kuutiot nostettiin pois vedestä noin tuntia ennen kuormitusta.

Tartuntatesti- ja ankkurointipalkkien betonin puristuslujuudet määritettiin testipäivinä olosuhdesäilytyksessä olleilla 150x300 mm:n lieriökoekappaleilla. Betonin lujuus määritettiin aina kyseisenä testipäivänä kolmella lieriöllä standardin SFS-EN 12390-3:2009 mukaisesti. Lieriölujuudet määritettiin 26.- ja 27.3.2012 sekä 2.- ja 3.4.2012.

8.9.2 Terästen lujuus- ja geometriaominaisuuksien määrittäminen

Palkeissa käytettyjen 16 mm harjaterästankojen vetokokeet suoritettiin viidellä koekappaleella kahdessa erässä 1.3.2012 ja 23.4.2012. Näytteillä 1 ja 2 suoritettut mittaukset epäonnistuivat osittain virheellisen suoritustavan vuoksi. Tästä johtuen 23.4.2012 suoritettiin uudet vetokokeet näytteillä A, B ja C. Näytteet 1 ja 2 oli otettu kahdesta eri tangosta. Näytteet A, B ja C jouduttiin ottamaan kaikki samasta tangosta, koska palkeissa käytettyä 16 mm:n harjaterästä oli jäljellä tuossa vaiheessa enää yksi tanko. 16 mm tankojen vetokuormitukset suoritettiin Dartec 400 kN -yleisaineenkuormituslaitteella, jonka tarkkuusluokka oli 0,5. Hallin lämpötila testaushetkillä oli +19–21 °C.

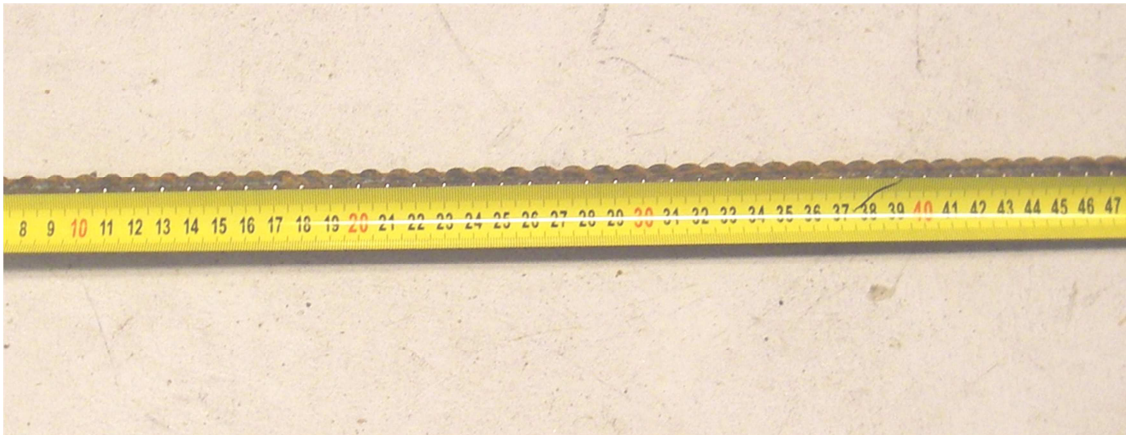
32 mm tangon lujuusominaisuudet, pituusmassa ja geometriset ominaisuudet määritettiin VTT Expert Services Oy:n toimesta 16.–23.3.2012. VTT mittasi myös 16 mm tangon pituusmassan ja geometriset ominaisuudet. VTT:n mittaukset perustuivat standardeihin SFS-EN 15630-1 ja SFS 1215. VTT:n testausraportti on esitetty liitteissä 6/2 ja 6/3.

16 mm tankojen vetolujuusominaisuuksien määrittäminen

Näytteiden 1 ja 2 osittain epäonnistuneet vetokokeet suoritettiin 1.3.2012. Näytteiden kunto tarkastettiin ennen testausta. Näytteisiin merkittiin keskikohta ja 100 mm:n mittapituudet 50 mm:n välimerkinnöin keskikohdan molemmin puolin. Mittapituusmerkintöjen jälkeen koekappaleet asetettiin kuormituslaitteeseen ja kiinnityselinten välinen etäisyys L_c mitattiin. Näytteiden 1 ja 2 kuormitus tapahtui siirtymäohjauksella. Siirtymänopeus V_c oli vakio koko kuormituksen ajan.

Näytteiden 1 ja 2 vetokoetuloksia ei voitu käyttää ylemmän myötörajan R_{eH} määrittämiseen, koska kuormituselementtien siirtymänopeus V_c oli standardin SFS-EN ISO 6892-1:2009 kohdan 10.3.2 mukaan liian suuri. Puutteellisten mittamerkkien vuoksi näytteistä 1 ja 2 ei pystytty määrittämään myöskään murtovenymä A_{10} . Standardin SFS-EN ISO 6892-1:2009 kohdan 10.3.4 mukaan näytteiden 1 ja 2 vetokoetuloksia voitiin kuitenkin käyttää murtolujuuden R_m ja kokonaistasavenymän A_{gt} määrittämiseen. Kokonaistasavenymä A_{gt} määritettiin katkenneesta sauvasta kumotun standardin SFS-ISO 10606:1997 mukaan. Korvaava standardi kumotulle standardille SFS-ISO 10606:1997 on SFS-EN ISO 15630-1:2010. Näytteestä 1 ei kuitenkaan voitu määrittää standardin SFS-ISO 10606:1997 mukaista kokonaistasavenymää A_{gt} murtokurouman synnyttyä epäedulliseen kohtaan suhteessa mittamerkkien väleihin. Tankojen 1 ja 2 venymän muutosnopeudet ja koepituudet on esitetty taulukossa 10.

Näytteiden A, B ja C vetokuormitukset suoritettiin 23.4.2012 standardien SFS-EN ISO 15630-1:2010 ja SFS-EN ISO 6892-1:2009 mukaan. Venymämittauksia varten testattavien tankojen pitkittäisharjoihin tehtiin 10 mm:n välein merkinnät koko tangon pituudelle. Merkinnät tehtiin ensin ohuella tussilla rullamittaa apuna käyttäen. Tussin jälkiä vahvistettiin kevyesti rautasahanterällä (kuva 37).



KUVA 37. Murtovenymän mittausmerkinnät 16 mm:n harjaterästangossa (Pesonen 2012)

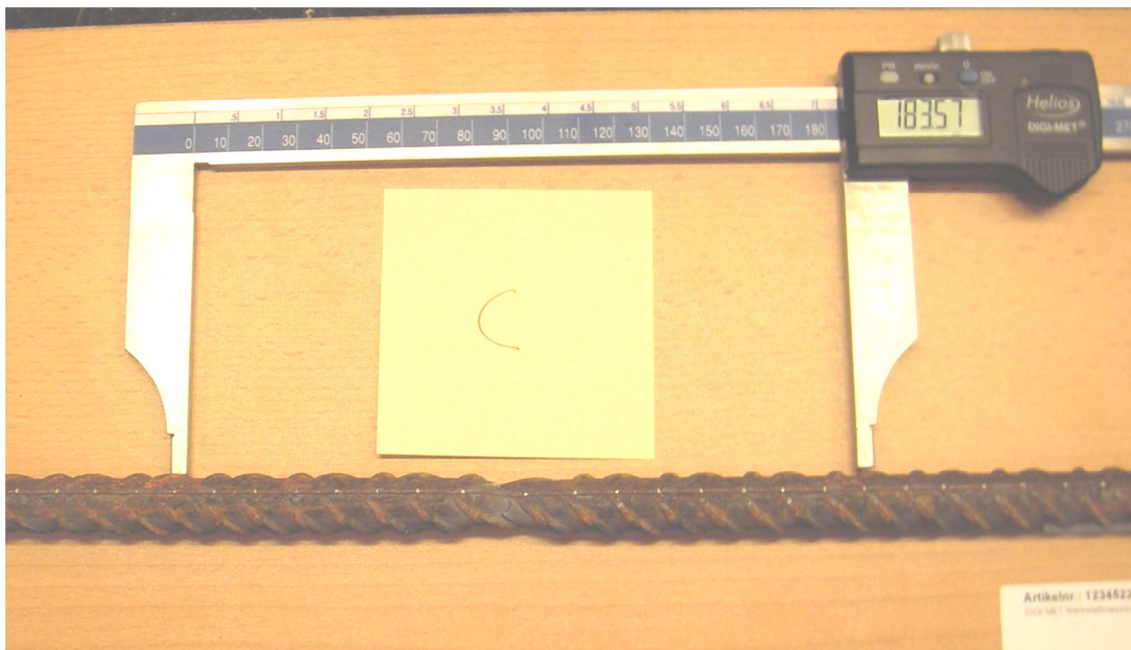
Venymämittausmerkintöjen jälkeen tanko asetettiin vetokoneen kiinnityselimiin ja suoritettiin alkukiristys. Kiristyksen jälkeen kiinnityselimien väli mitattiin. Saatua koepituutta L_c käytettiin standardin SFS-EN ISO 6892-1:2009 kohdan 10.3 mukaiseen venymänopeuden määrittämiseen. Kuormitus tapahtui siirtymäohjauksella. Siirtymänopeus pidettiin vakiona koko kuormituksen ajan. Siirtymänopeudet on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. 16 mm tankojen vetokokeisiin liittyvät koepituudet, venymän muutosnopeudet ja kuormituselementtien siirtymänopeudet

Tangon halkaisija [mm]	Koekappaleen tunnus	Kokonaispituus L_t [mm]	Koepituus L_c [mm]	Venymän muutosnopeus koepituudella $\dot{\epsilon}_{L_c}$ [1/s]	Siirtymänopeus V_c [mm/s]
16	1	427	~250	~0,00080 ^{*)}	~0,2000 ^{**)}
16	2	405	~250	~0,00080 ^{*)}	~0,2000 ^{**)}
16	A	371	210	0,00025	0,0525
16	B	370	236	0,00025	0,0590
16	C	510	342	0,00025	0,0855

^{*)} Laskettu jälkikäteen siirtymänopeuden ja koepituuden perusteella
^{**)} Määritetty kuormituslaitteen automaattisista kuormitusajotallenteista

Lujuusominaisuuksien lisäksi vetokoekuormitusten jälkeen katkenneista näytteistä A, B ja C määritettiin murtovenymä A_{10} 100 mm:n pituiselta matkalta standardin SFS-EN ISO 6892-1:2009 kohdan 20.1 mukaan. Tankotyypin murtovenymän A_{10} mittapituus määräytyi tuotestandardissa SFS 1215:1996 viitatus standardin SFS 1201:1997 mukaan. Mittaus suoritettiin tangossa olevien venymämittausmerkkien avulla siten, että murtokohta asetettiin mittauspituuden keskelle. Näytteessä A murtokohta sijoittui liian lähelle kiinnityselintä, minkä vuoksi mittauksen tulos hylättiin. Murtovenymät mitattiin digitaalisella työntömitalla, jonka tarkkuus oli 0,01 mm. Kuvassa 38 on esitetty murtovenymän mittaustapa.



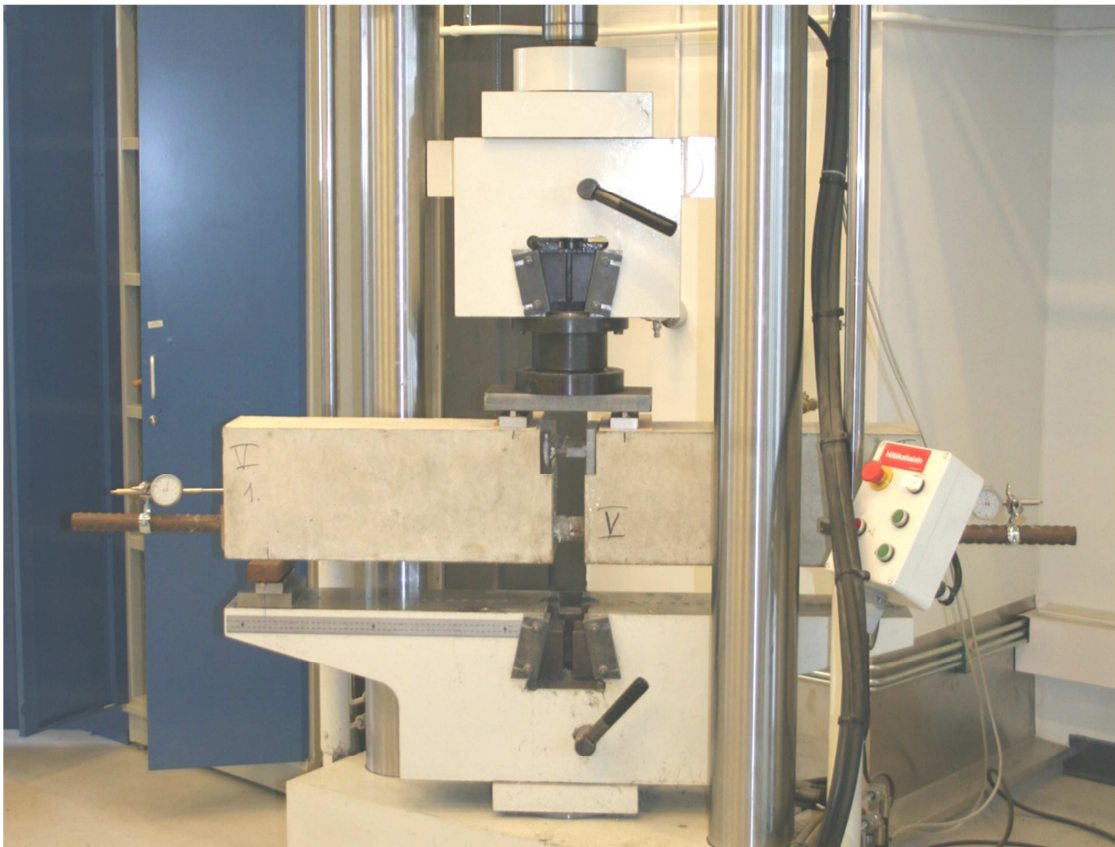
KUVA 38. Murtovenymän A_{10} mittaus 16 mm:n harjaterästangosta (Pesonen 2012)

Kokonaistasavenymä A_{gt} määritettiin katkenneista näytteistä 2, A, B ja C kumotun standardin SFS-ISO 10606:1997 mukaan. Kokonaistasavenymän määrittämisessä käytettiin 100 mm:n mittapituutta.

8.9.3 Tartuntatestit

Tartuntatestipalkkien kuormitukset suoritettiin standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaan. Testipalkit 1–3/16 kuormitettiin 26.3.2012 ja palkit 4–5/32 27.3.2012. Kuormituksen aikana testeissä mitattiin kuormitusvoimaa ja testattavien tankojen liukumaa.

Terästen liukumien mittaamiseen käytettiin Käfer Messuhrenfabrik GmbH & Co:n valmistamia mekaanisia mittakelloja, joiden tarkkuus oli $\pm 0,01$ mm. Kuormittamiseen käytettiin Dartec 400 kN -yleisaineenkuormituslaitetta, jonka tarkkuusluokka oli 0,5. Kuormituslaite oli kalibroitu viimeksi 13.12.2011. Kuvassa 39 on esitetty mittauslaitteilla varustettu tartuntatestipalkki ennen kuormitusta.



KUVA 39. Mittakelloilla varustettu tartuntatestipalkki juuri ennen kuormitusta (Pesonen 2012)

Tartuntatestipalkkien kuormitus tapahtui voimaohjauksella. Testattavien tankojen kuormitusnopeus määritettiin standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C kaavan C.2 mukaan siten, että teräsjännityksen σ_s kehitysnopeus oli 1 Mpa/s koko kuormituksen ajan. Testeissä käytetyt kuormitusnopeudet on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11. Tartuntatesteissä käytetyt kuormitusnopeudet

Nimellishalkaisija [mm]	Kuormitusnopeus [kN/s]
16	0,134
32	0,536

Kuormituksen aikana testattavien tankojen liukumien kirjattiin käsin ylös molemmista mittakelloista yhtä aikaa. 16 mm:n tangoilla liukumien kirjattiin 2,5 kN:n ja 32 mm:n tangoilla 10 kN:n välein. Vaikka mittakellojen asteikkoväli oli 0,01 mm, pystyttiin liukumia arvioimaan 0,002–0,005 mm:n tarkkuudella, varsinkin kuormituksen alkuvaiheessa. Liukumien ylöskirjaaminen oli testien alkuvaiheessa helppoa ja tarkkaa, koska liukumien kehitys oli hidasta pienillä kuormilla. Kokonaiskuorman kasvaessa liukumien kehitys kiihtyi, mikä aiheutti aistinvaraisesti suoritettuihin mittauksiin epätarkkuutta. Palkkien kuormitusta jatkettiin, kunnes testattava tanko oli liikunut yli 3 mm palkin molemmissa puolikkaissa tai kokonaiskuorma oli alkanut laskea.

16 mm tankojen tartuntamurto tapahtui alle 1 mm:n liukumilla, minkä jälkeen liukumien ryntäsivät hetkessä yli 3 mm. 32 mm:n tangoilla liukumien kehitysvahti oli tasaisempaa ja tartuntamurto muodostui huomattavasti sitkeämmäksi kuin 16 mm:n tangoilla.

Testipalkkien 1/16:n ja 2/16:n osalta tartunta saatiin pettämään vain testipalkin toisessa puoliskossa. Ensimmäisen palkin kohdalla ei osattu varautua teräksen myötäämisestä ja tartunnan pettämisestä seuranneeseen testipalkin voimakkaaseen taipumiseen. Tästä johtuen palkki 1/16:n kohdalla kuormitus jouduttiin

lopettamaan palkin taipumavaran loputtua kesken kuormitussysteemissä. Palkki 2/16:n kohdalla toisessa puoliskossa tapahtuneen tartuntamurron jälkeen teräksen jatkoliukumista ei saatu estettyä vaijerilukoilla (liitteen 9 kuva 4). Kolmannessa 16 mm:n testipalkissa ja molemmissa 32 mm:n testipalkeissa molempien palkinpuolikkaiden tartunta saatiin kuormitettua murtoon saakka tankoon hitsattujen ankkurointilaippojen avulla (liitteen 9 kuva 5).

Kaikki 16 mm:n teräkset myötäsivät testin aikana, mutta eivät katkenneet. 32 mm terästen kohdalla tartunta murtui molemmissa palkin puolikkaissa ennen terästen myötäämistä.

8.9.4 Ankkurointipalkkien kuormitus

Ankkurointipalkki 1/16 kuormitettiin 2.4.2012 ja palkit 2/16 sekä 3–4/32 3.4.2012. Testeissä mitattiin kuormitusvoimaa, taipumaa ja halkeilua. Lisäksi tarkkailtiin palkkien murtumisilmiöitä.

Palkkien kuormittamiseen käytettiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratorion kuormituskehää, jossa oli Matertest Oy:n ohjelmistolla varustettu 250 kN:n kuormitusylinterijärjestelmä. Kuormitusjärjestelmä kuului tarkkuusluokkaan 1 ja se oli kalibroitu edellisen kerran 13.12.2011. Palkkien taipuman mittaamiseen käytettiin digitaalista Solartron metrology:n valmistamaa BS50-siirtymämittausanturia. Siirtymäanturin mitta-alue oli ± 50 mm ja epälineaarinen poikkeama mitta-alueen lopussa oli alle 0,25 prosenttia. Mitta-alueen nollakohdassa laitteen tarkkuus oli lähes absoluuttinen. Siirtymäanturi oli yhdistetty kuormitusjärjestelmään, joka tallensi automaattisesti kuormituksessa käytetyt kokonaisvoima- ja siirtymätiedot.

Taivutushalkeamaleveyksiä mitattiin 20 kertaa suurentavalla Pika Tokyo -merkkisellä mikroskoopilla, jonka mitta-asteikon pienin tarkasteluväli oli 0,05 mm. Ankkurointitutkimuksissa käytetty kuormitussysteemi on esitetty kuvassa 40.



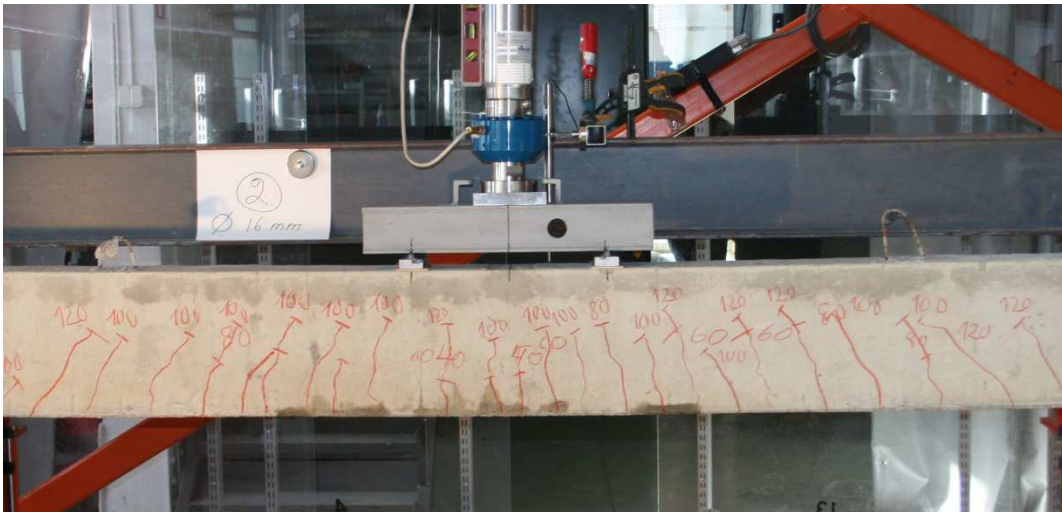
*KUVA 40. Siirtymämittalaitteella varustettu ankkurointitutkimuspalkki kuormitus-
systemissä ennen kuormitusta (Pesonen 2012)*

Keskimäärin 1,3 kN:n alkukiristuksen ja siirtymäanturin nollauksen jälkeen testattavaa palkkia alettiin kuormittaa tasaisesti 0,24 kN/s:n kuormitusnopeudella. Tutkimussuunnitelman mukaan kuormitus oli tarkoitus pysäyttää 10 kN:n välein syntyneiden halkeamien tarkastelua varten. Ensimmäisen palkin kohdalla todettiin, ettei 10 kN:n välein syntynyt merkittäviä muutoksia halkeamissa, joten halkeamatarkastelut päätettiin suorittaa 20 kN:n välein. Kuormitusnopeutta hidastettiin aina ennen 20 kN:n tasakuorman saavuttamista, jotta tavoiteltu tasakuorma saavutettaisiin mahdollisimman tarkasti.

Taivutushalkeamatarkastelujen ajan kuorma pidettiin stabiilina. Hiushalkeamien paikantamisen helpottamiseksi palkkien kylkiä kasteltiin sumuttamalla tarkasteltaviin pintoihin vettä. Sumutettu vesi imeytyi kapillaarivoimien seurauksena halkeamaan, jolloin halkeamakohta erottui kuivempana muusta pinnasta. Lisäksi apuna käytettiin voimakasta sivuvaloa.

Paikallistetut halkeamat merkattiin palkkien kylkiin piirtämällä halkeaman viereen merkkauksynällä halkeamaa mukaileva viiva. Halkeaman viereen piirretty merkkauksiiviiva päätettiin poikkiviivaan, jonka kohdalle merkattiin tarkasteluhet-

ken kokonaiskuorma. Merkkausten jälkeen todettuja halkeamia tutkittiin mikroskoopilla ja levein halkeama mitattiin pääraudoituksen korkeudelta palkin kyljestä. Taivutushalkeamaleveyksiä mitattiin vaihtelevasti 154 kN:iin saakka. Halkeamien merkkaustyylit on esitetty kuvassa 41.



KUVA 41. Halkeamamerkintöjä ankkurointipalkin kyljessä (Pesonen 2012)

Laskennallisen myötökuorman saavuttamisen jälkeen palkit kuormitettiin tasaisella 0,24 kN/s:n kuormitusnopeudella lopulliseen murtumiseen saakka. Palkkien katsottiin murtuneen lopullisesti, kun kokonaisvoima alkoi tippua tai palkin vetoteräkset katkesivat. Laskennallisen myötökuorman jälkeen kuormituksen aikana tarkkailtiin kokonaisvoiman kehitystä, vetoterästen myötöhetkeä ja palkin murtumisilmiöitä myötöhetken jälkeen. Liitteen 9 kuvissa 7–10 on esitetty palkit kuormituksen ollessa lähellä laskennallista myötökuormaa ja juuri ennen toteutunutta myötökuormaa.

Palkki 1/16:n kuormitus päättyi ohjelman suorittamaan automaattiseen keskeytykseen, koska kuormitusohjelman maksimisiirtymäksi oli jäänyt 100 mm:n asetus. Palkki 2/16:n kohdalla kuormitus päättyi pääterästen katkeamiseen. Palkki 3/32:n kuormitus jouduttiin keskeyttämään loppuvaiheessa kuormitussynterinin kääntyttyä vinoon palkin taipuessa. Palkki 4/32:n kohdalla koestus päättyi

kuormitus sylinterin iskuvaran loputtua kesken. Palkkien 2/16:n, 3/32:n ja 4/32:n kohdalla kokonaiskuorma oli kuitenkin alkanut jo laskea ennen kuormituksen päättymistä. Liitteen 9 kuvassa 11 on esitetty palkit kuormituksen jälkeen.

Palkkien 1/16:n, 2/16:n ja 3/32:n osalta kuormitusjärjestelmä tallensi kuormitusvoimat ja taipumat automaattisesti 2 sekunnin välein koko kuormituksen ajalta. Palkki 4/32:n osalta automaattinen kuormitustietojen tallennus epäonnistui ohjelmistohäiriön vuoksi. Palkki 4/32:n osalta voitiin kuitenkin hyödyntää kuormituksen aikana käsin tutkimuspöytäkirjaan halkeamatarkastelukuormilla kirjattuja taipumatietoja. Kuormitusjärjestelmän automaattisten kuormitustietotallennusten lisäksi kaikkien palkkien taivutushalkeamaleveys- ja taipuma-arvot kirjattiin kuitenkin myös käsin tutkimuspöytäkirjoihin halkeamatarkastelujen yhteydessä, mistä johtuen myös palkki 4/32:n kuormituksista saatiin näin ollen tutkimusaineistoa 154 kN:n kokonaiskuormaan saakka. Tutkimuspöytäkirjoihin kirjattiin myös jokaisen palkin osalta silmämääräiset havainnot terästen myötö- ja murtohetkistä.

9 TULOKSET

Alla on esitetty keskeisimmät tulokset edellä mainituista testeistä ja kuormituksesta sekä mittaustulosten jatkokäsittely menetelmät ja perusteet. Lisäksi tuloksissa on käyty läpi testeissä ja kuormituksissa havaitut ongelmat sekä niiden korjaamiseksi suoritettut toimenpiteet.

9.1 Betoni

Tilattu betoni C25/30 täytti standardin SFS-EN 206-1:2005 taulukossa B.1 betonin puristuslujuudelle asetetut yhdenmukaisuusvaatimukset kaikkien koestuserien suhteen. Betonin ominaispuristuslujuus f_{ck} määritettiin yhdentoista 150x300 mm olosuhdelieriön perusteella. Yhden koekappaleen lujuusarvo hylättiin liiallisen hajonnan vuoksi. Lieriöt kuormitettiin 31, 32, 38 ja 39 vuorokauden ikäisinä. Eri-ikäisinä kuormitettujen olosuhdelieriöiden lujuusarvot palautettiin vastaamaan 28 vuorokauden ikää käyttämällä standardin SFS-EN 1992-1-1 + AC:2005:n kaavaa 3.1. Olosuhdelieriöiden perusteella betonin 28 vuorokauden ominaislujuudeksi, keskihajonta huomioituna, saatiin C30,5.

Vesisäilytyksessä olleiden kuuden 150x150 mm kuution 28 vuorokauden standardilujuudeksi saatiin K34,2, joka vastasi lieriölujuutta C28. Olosuhdekappaleiden mukaan määritetty betonin ominaislujuus f_{ck} oli 8,9 prosenttia suurempi kuin standardilujuus. Koestuserien keskimääräiset puristuslujuudet on esitetty taulukossa 12. Kaikki yksittäisten koekappaleiden mittaustulokset on esitetty liitteen 5 taulukoissa 1–5.

TAULUKKO 12. Olosuhdelieriöiden keskimääräiset puristuslujuudet

Koekappale	Säilytys	Koekappaleiden määrä	Koestuspäivä	Ikä [vrk.]	Keskimääräinen puristuslujuus f_{cm} [MPa]
Lieriö 150x300	Olosuhde	2	26.3.2012	31	32,1
Lieriö 150x300	Olosuhde	3	27.3.2012	32	32,6
Lieriö 150x300	Olosuhde	3	2.4.2012	38	34,3
Lieriö 150x300	Olosuhde	3	3.4.2012	39	34,7

Taulukossa 13 on esitetty betonin keskimääräisillä lujuuksilla lasketut keskimääräiset tartuntalujuudet eri testipäivinä.

TAULUKKO 13. Keskimääräinen tartuntalujuus f_{bm} betonin lujuuden mukaan eri testipäivinä

Betonin ikä [vrk.]	Koekappaleiden lukumäärä	f_{cm} [MPa]	f_{ck} ($f_{cm} - 8$ MPa) [MPa]	f_{ctm} ($0,30 \times f_{ck}^{(2/3)}$) [MPa]	f_{bm} ($2,25 \times f_{ctm}$) [MPa]
31	2	32,1	24,1	2,50	5,63
32	3	32,6	24,6	2,54	5,72
38	3	34,3	26,3	2,65	5,96
39	3	34,7	26,7	2,68	6,03

9.2 Teräkset

Terästen testausmenetelmät perustuivat standardiin SFS-EN ISO 15630-1:2010. Lujuus- ja sitkeysominaisuudet määritettiin kahden testisarjan perusteella, koska ensimmäinen testisarja epäonnistui osittain virheellisen suoritusajan vuoksi. Tarkka kuvaus terästen lujuus- ja sitkeysominaisuuksien määrittämisestä on esitetty luvussa 8.9.2.

9.2.1 Lujuus- ja sitkeysominaisuudet

Kaikki yksittäiset 16 mm:n teräkset täyttivät suomalaisten tuotestandardien SFS 1215:1996 (A500HW) ja SFS 1268:2010 (B500B) asettamat lujuus- ja sitkeysvaatimukset.

32 mm tangon vetokoetulokset täyttivät A500HW-tuotestandardin lujuus- ja sitkeysvaatimukset. B500B-tuotestandardin osalta 32 mm tankojen kokonaistasa-venymä A_{gt} jäi todentamatta.

Terästen keskimääräiset lujuus- ja sitkeysominaisuudet on esitetty taulukossa 14. Kaikki yksittäiset mittaustulokset on esitetty liitteen 6 taulukossa 1.

TAULUKKO 14. Tartuntatesti- ja ankkurointipalkeissa käytettyjen harjaterästen lujuus- ja sitkeysominaisuuksien keskiarvot sekä tuotestandardien vähimmäisvaatimukset

Teräslaatu	Nimellishalkaisija [mm]	Myötövoima F_{eH} [kN]	Myötölujuus R_{eH} [N/mm ²]	Suurin voima F_m [kN]	Murtolujuus R_m [N/mm ²]	Murtomyötösuhde R_m/R_{eH}	Kokonaistasavenymä A_{gt} [%]	Murtovenymä	
								A_{10} [%]	A_{200} [%]
A500HW	16	111	551	131	649	1,18	9,8	14,6	-
Vaatimus SFS 1215 $\varnothing 16$ mm (A500HW)		min.101	min.500	min.111	min.550	-	-	min.12	-
Vaatimus SFS 1268 $\varnothing 16$ mm (B500B)		min.101	min.500	min.111	min.550	min.1,08	min.5,0	-	-
A500HW	32	435	541	525	653	1,21	-	-	16,8
Vaatimus SFS 1215 $\varnothing 32$ mm (A500HW)		min.402	min.500	min.442	min.550	-	-	-	min.12
Vaatimus SFS 1268 $\varnothing 32$ mm (B500B)		min.402	min.500	min.442	min.550	min.1,08	min.5,0	-	-

Huom! 16 mm tankojen lujuusominaisuudet laskettu useiden yksittäisten koetulosten perusteella, lopputulokset pyöristetty

16 mm tankojen myötölujuuden R_{eH} määrittämiseen käytettiin näytteiden A, B ja C vetokoetuloja. Murtolujuus R_m määritettiin näytteiden 1, 2, A, B ja C perusteella. Kokonaistasavenymä A_{gt} määritettiin 100 mm:n mittapituudelta katkenneista näytteistä 2, A, B, ja C kumotun standardin SFS-ISO 10606:1997 mukaan. Murtovenymä A_{10} määritettiin katkenneista näytteistä B ja C standardin SFS-EN ISO 6892-1:2009 mukaan.

32 mm tangon lujuus- ja sitkeysominaisuudet määritettiin VTT Expert Services Oy:n toimesta ilmeisesti yhden näytteen perusteella.

9.2.2 Tankojen geometriset ominaisuudet ja pituusmassat

Molempien tankopaksuuksien mitatut pituusmassat täyttivät suomalaisten tuotestandardien A500HW ja B500B vaatimukset.

16 mm tangon geometriset ominaisuudet täyttivät suomalaisten tuotestandardien A500HW ja B500B vaatimukset. 32 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala f_R jäi 12,7 prosenttia suomalaisen A500HW-tuotestandardin vähimmäisvaatimuksesta. 32 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala f_R jäi myös 1,8 prosenttia alle

B500B-tuotestandardin ja Eurokoodi 2:n suhteelliselle vähimmäisharjapinta-alalle $f_{R,min}$ asettamasta vähimmäisarvosta. Terästen pituusmassa- ja geometriaominaisuudet on esitetty taulukossa 15.

TAULUKKO 15. Terästen pituusmassat ja suhteelliset harjapinta-alat

Teräslaatu	\varnothing [mm]	Pituusmassa m_l [kg/m]	Harjaväli a [mm]	Suhteellinen harjapinta-ala f_R	$f_R/f_{R,min}$	
					A500HW	B500B
A500HW	16	1,54	20,7/10,3	0,085	1,35	1,51
Vaatus SFS 1215 $\varnothing 16$ mm (A500HW)		1,52...1,67	max. 25,6	min. 0,063	min. 1,00	-
Vaatus SFS 1268 $\varnothing 16$ mm (B500B)		1,51...1,65	8,0...16,0	min. 0,056	-	min. 1,00
A500HW	32	6,39	37,8/19,0	0,055	0,87	0,98
Vaatus SFS 1215 $\varnothing 32$ mm (A500HW)		6,06...6,57	max. 51,2	min. 0,063	min. 1,00	-
Vaatus SFS 1268 $\varnothing 32$ mm (B500B)		6,03...6,59	16,0...32,0	min. 0,056	-	min. 1,00

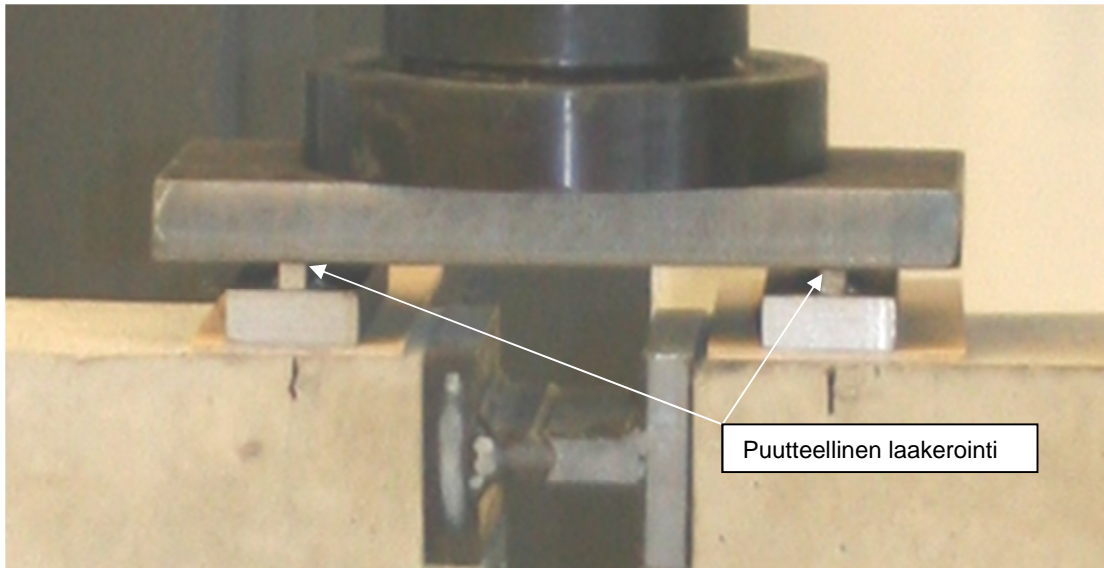
Tutkimuksessa käytettyjen harjaterästen geometriset ominaisuudet ja pituusmassat määritettiin ilmeisesti yhden näytteen perusteella molemmille tankopak-suksille.

9.3 Tartuntatestit

Harjaterästen tartuntaominaisuudet määritettiin standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukaisella CEB/RILEM palkkitestillä. Liukumien mittaaminen aloitettiin 0,001–0,005 mm:stä ja lopetettiin, kun tartunta murtui tai tanko oli liukunut 3 mm. Tarkka kuvaus tartuntatestien kulusta on esitetty luvussa 8.9.3.

Kuormitusten jälkeen tartuntajännityksiä laskettaessa havaittiin, että testeissä käytetty kuormitussysteemi ei ollutkaan toiminut asian mukaisesti. Kuormitusta jakavien osien riittämättömän laakeroinnin seurauksena osa teräsnivelen kautta kulkeviksi tarkoitetuista voimista oli päässyt siirtymään kokonaiskuorman kahdeksi pistekuormaksi jakavan teräslevyn kautta. Tämä oli aiheuttanut muutoksen rakenteen sisäiseen momenttivarten. Sisäisen momenttivarren muututtua kaavalla 20 lasketut teräsjännitykset muodostuivat epärealistisen suuriksi. Kaavalla 20 laskettuina 16 mm tankojen teräsjännitykset kohosivat jopa 753 MPa:n

suuruiseksi, mikä ylitti huomattavasti terästen murtolujuuden. Kuvassa 42 on esitetty tartuntatesteissä käytetty kokonaiskuorman kahdeksi pistekuormaksi jakava rakennekokonaisuus.



KUVA 42. Tartuntatesteissä käytetty kokonaiskuorman kahdeksi pistekuormaksi jakava rakennekokonaisuus (Pesonen 2012)

Ongelmaa analysoitaessa tehtiin seuraavia päätelmiä: Teräsnivelen ohi siirtyneet ja alkuperäisen sisäisen momenttivarren pituutta muuttaneet voimat pysyivät maksimissaan olemaan kokonaiskuorman kahdeksi pistekuormaksi jakavien osien välillä vaikuttavan pienimmän kitkavoiman suuruisia. Koska kitkavoiman suuruus on suoraan verrannollinen kappaleeseen kohdistuvaan voimaan, voitiin kitkavoiman ja kokonaiskuorman suhteen olettaa pysyneen vakiona. Näin ollen myös teräsnivelen ja teräslevyn kautta kulkeneiden sisäisten osamomenttien suhteen voitiin olettaa pysyneen vakiona lähes koko kuormituksen ajan.

Edellä mainittuihin päätelmiin nojaten rakenteen sisäisen kokonaismomenttivarren teoreettinen pituus määriteltiin 16 mm tartuntatestipalkkien automaattisten kuormitustallenteiden ja vetokoetulosten perusteella.

Kuormituslaitteen automaattisten kuormitustallennetietojen pohjalta 16 mm:n tartuntatestipalkeille piirrettiin kuormitusvoima-siirtymäkuvaajat. Kuvaajista pystyttiin määrittämään 16 mm tartuntatestipalkkien keskimääräinen myötökuorma, joka oli 85,267 kN. Sisäisen ja ulkoisen momenttitasapainon ja vetokokeilla määritetyn 16 mm terästen keskimääräisen myötöjännityksen R_{eH} :n perusteella laskettiin sisäisen kokonaismomenttivarren teoreettinen pituus kaavalla 21.

$$X = \frac{F \cdot 450 \text{ mm}}{2 \cdot \sigma_s \cdot A_n}, \text{ missä}$$

KAAVA 21

X = sisäisen momenttivarren teoreettinen pituus [mm]

F = kokonaisvoima myötöhetkellä [N]

450 mm = ulkoisen momenttivarren pituus tuelta pistekuorman kohdalle (kuva 21)

σ_s = teräsännitys [N/mm^2]

A_n = testattavan teräksen nimellinen poikkileikkausala [mm^2].

Kaavalla 21 laskettuna sisäisen kokonaismomenttivarren teoreettiseksi pituudeksi saatiin 173,23 mm. Sisäisen ja ulkoisen momentin ollessa suoraan verrannollisia, kasvaa testattavassa teräksessä vaikuttava vetovoima ulkoisen ja sisäisen momenttivarren pituuksien suhteessa. Jakamalla ulkoisen momenttivarren pituus sisäisen momenttivarren pituudella saatiin uudeksi suhdekerroimeksi noin 1,299 entisen 1,5 sijaan (kts. kaava 20). Saatua suhdekerrointa käytettiin sekä 16 mm:n että 32 mm tankojen teräsännitysten korjaamiseen.

Edellä mainitulla menetelmällä teräs- ja tartuntajännitykset pienenevät noin 13,4 prosenttia alkuperäisellä kaavalla 20 lasketuista arvoista. Kun 16 mm terästen tartuntatestien kuormitustallenteista määritellyillä testikohtaisilla maksimikuorma-myötökuormasuhteilla kerrottiin 16 mm terästen keskimääräinen myötölujuus, poikkesivat jännitykset tartuntatestikohtaisista suurimmista korjatuista teräsännityksistä enää alle 1 prosenttia. Lisäksi 16 mm tankojen suurimmat korjatut teräsännitykset tartuntatesteissä olivat hyvin linjassa terästen vetokoetulosten kanssa.

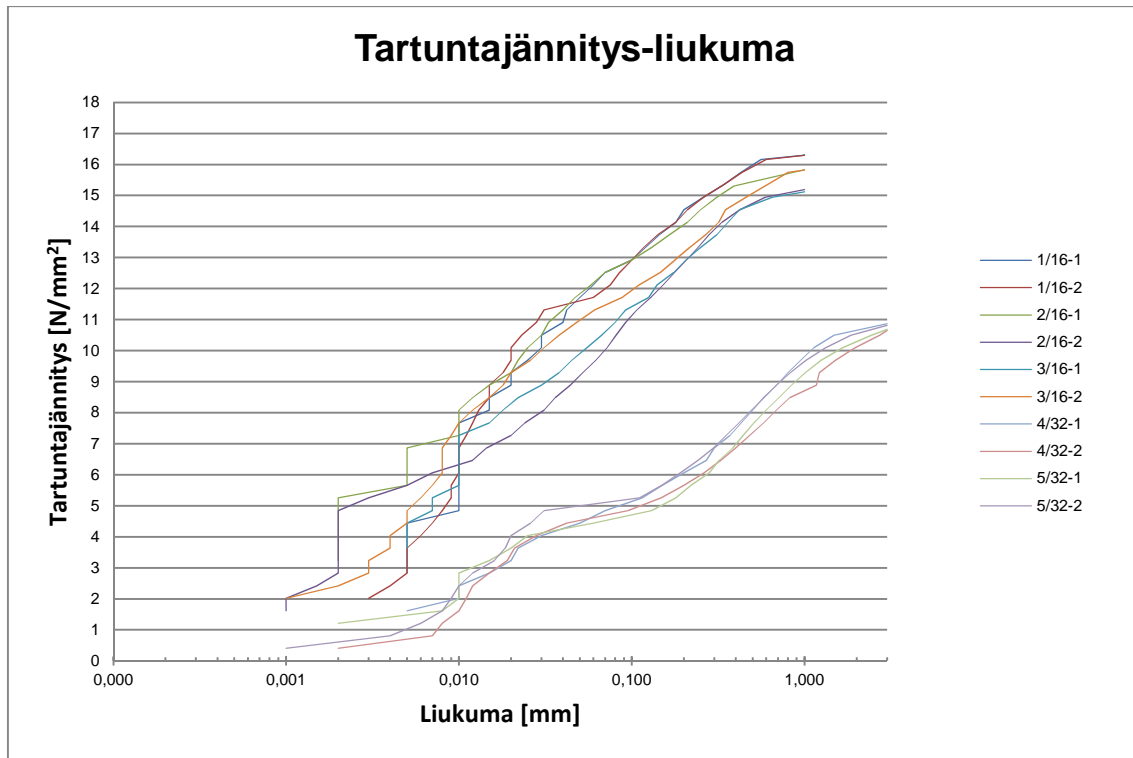
Jostain syystä 16 mm palkkien voimakkaalla myötöhetken jälkeisellä taipumiselakaaan ei näyttänyt olleen vaikutusta osamomenttien suhteeseen. Jos kitkavoimien vaikutus olisi vähentynyt taipuman seurauksesta, olisi myös sisäinen konaismomenttivarsi tällöin lyhentynyt ja laskennalliset teräsjännitykset näin ollen kasvaneet. 16 mm tankojen laskennalliset teräsjännitykset eivät kuitenkaan olisi voineet enää kasvaa korjatuista, koska silloin terästen murtojännitystila olisi ylittynyt ja tankojen olisi pitänyt murtua tartuntatesteissä. Korjattuja jännityksiä molemmilla tankopaksumuksilla voidaan siis pitää suhteellisen realistisina.

Korjattujen tartuntatestitulosten perusteella molemmat tankotyypit täyttivät reilusti Eurokoodi 2:n vähimmäistartuntajännitysvaatimukset. Tartuntatestien perusteella määritetyt tankotyyppien keskimääräiset tartuntajännitykset on esitetty taulukossa 16.

TAULUKKO 16. Tartuntatestien perusteella lasketut keskimääräiset tartuntajännitykset 0,01-1 mm:n liukumilla ja maksimi tartuntajännitykset

\varnothing_n [mm]	f_R	f_{cm} [MPa]	Keskimääräiset tartuntajännitykset [N/mm ²]					Mitatun aineiston määrä [kpl]
			$\tau_{0,01}$	$\tau_{0,1}$	τ_1	$\tau_{m\ 0,01-1}$	τ_r	
16	0,085	32,1	6,3	12,2	15,8	11,4	15,8	6
<i>Vaatus Ø 16 mm (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 200.)</i>						<i>min. 6,0</i>	<i>min. 9,8</i>	
32	0,055	32,6	2,0	5,0	9,4	5,4	10,8	4
<i>Vaatus Ø 32 mm (SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005, 200.)</i>						<i>min. 4,1</i>	<i>min. 6,8</i>	
$\tau_{0,01...1}$ = tartuntajännitys 0,01...1 mm:n liukumalla $\tau_{m\ 0,01-1}$ = keskimääräinen 0,01 – 1 mm liukumien tartuntajännitys τ_r = maksimi tartuntajännitys.								

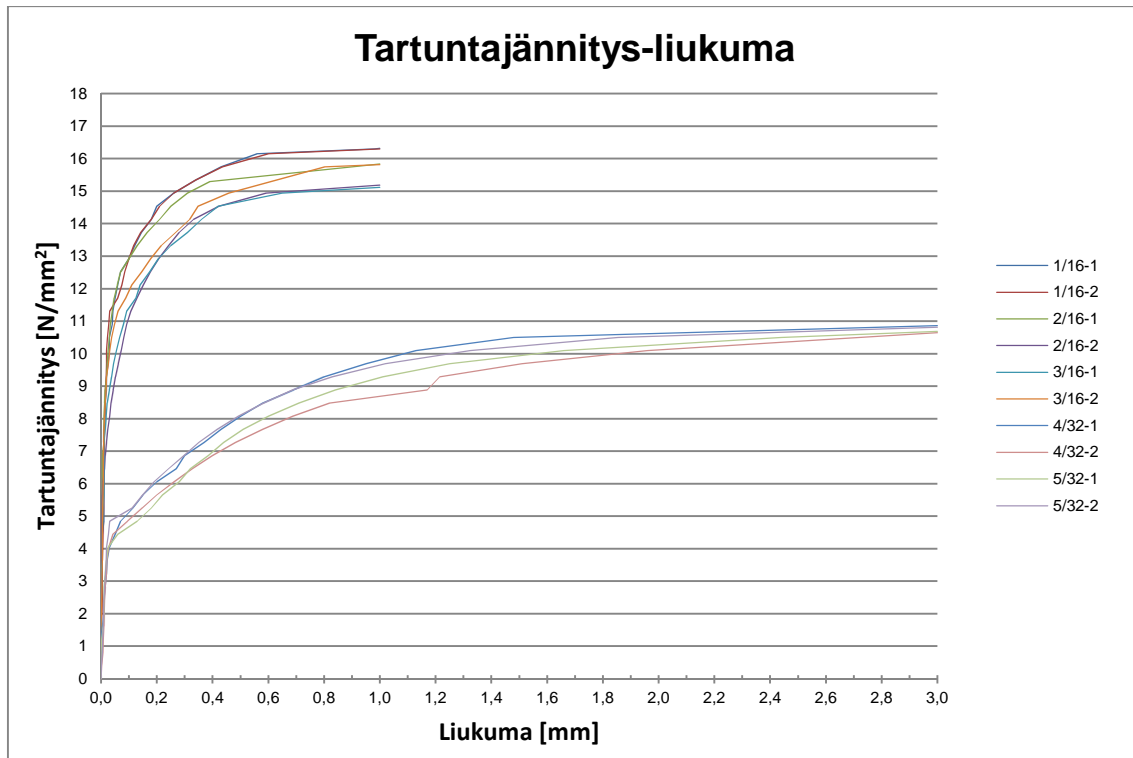
Kuvassa 43 on esitetty kaikkien palkinpuolikkaiden tartuntajännitysliukumakuvaajat logaritmisella liukuma-asteikolla. Korkeampiin tartuntajännityksiin kohoavat kuvaajat ovat 16 mm tankojen kuvaajia.



KUVA 43. Tartuntajännitys-liukumakuvaajat logaritmisella liukuma-asteikolla

Kuvan 43 kuvaajista ei käy ilmi tartuntajännitysten arvoja alle 0,001 mm:n liukumilla, koska liukumat mitattiin tangon jännityksettömästä päästä eikä mittalaitteiden tarkkuus riittänyt alle 0,001 mm liukumien aistinvaraiseen havaitsemiseen. Tankojen tartuntajännitykset aktivoituivat kuitenkin heti kuormituksen alettua, mistä johtuen tankojen rasitettujen päiden liukumat alkoivat kehittyä huomattavasti aiemmin kuin tankojen mittalaitteiden liukumat.

Kuvassa 44 on esitetty tartuntajännitys-liukumakuvaajat myös lineaarisella liukuma-asteikolla, mikä havainnollistaa selkeämmin tangon alkuvaiheen liukumien kehitystä suhteessa kokonaisliukumiin.



KUVA 44. Tartuntajännitys-liukumakuvaajat lineaarisella liukuma-asteikolla

Kuvan 44 mukaan 16 mm tankojen liukumien kehitys alkoi kiihtyä voimakkaasti keskimäärin 0,6 mm:n liukumilla, minkä jälkeen tartuntajännitykset eivät enää juurikaan kasvaneet. 16 mm tankojen tartunta murtui keskimäärin hieman alle 1 mm:n liukumalla, minkä jälkeen tartuntajännitykset luonnollisesti romahtivat ja liukumat ryntäsivät. Kuvaajissa ei näy murtohetken jälkeistä jyrkästi laskevaa osaa, koska mittaaminen lopetettiin tartunnan pettämiseen. Kuvaajien laskevat osat eivät ole merkityksellisiä tämän tutkimuksen kannalta. 32 mm:n tangoilla tartuntajännitykset eivät juurikaan kehittyneet enää noin 1,5-2 mm liukuman jälkeen. Kuvan 44 mukaan 16 mm tankojen suurimmat tartuntajännitykset erosivat toisistaan jonkin verran enemmän kuin 32 mm tankojen suurimmat tartuntajännitykset.

Kaikki tartuntatestien mittaustulokset, alkuperäiset ja korjatut teräsännitykset sekä testikohtaiset voima-liukumakuvaajat on esitetty liitteessä 7.

9.4 Ankkurointipalkit

32 mm tangon ankkuroituvuutta pyrittiin selvittämään vertailemalla kahdella eri raudoitustyypillä toteutettujen palkkien kuormituskäyttäytymisiä. 1T32-palkkityypin pääraudoituksena toimi yksi 32 mm:n harjateräs ja 4T16-palkkityypin pääraudoituksena 4 kappaletta 16 mm:n harjateräksiä. Palkit olivat muilta ominaisuuksiltaan identtisiä.

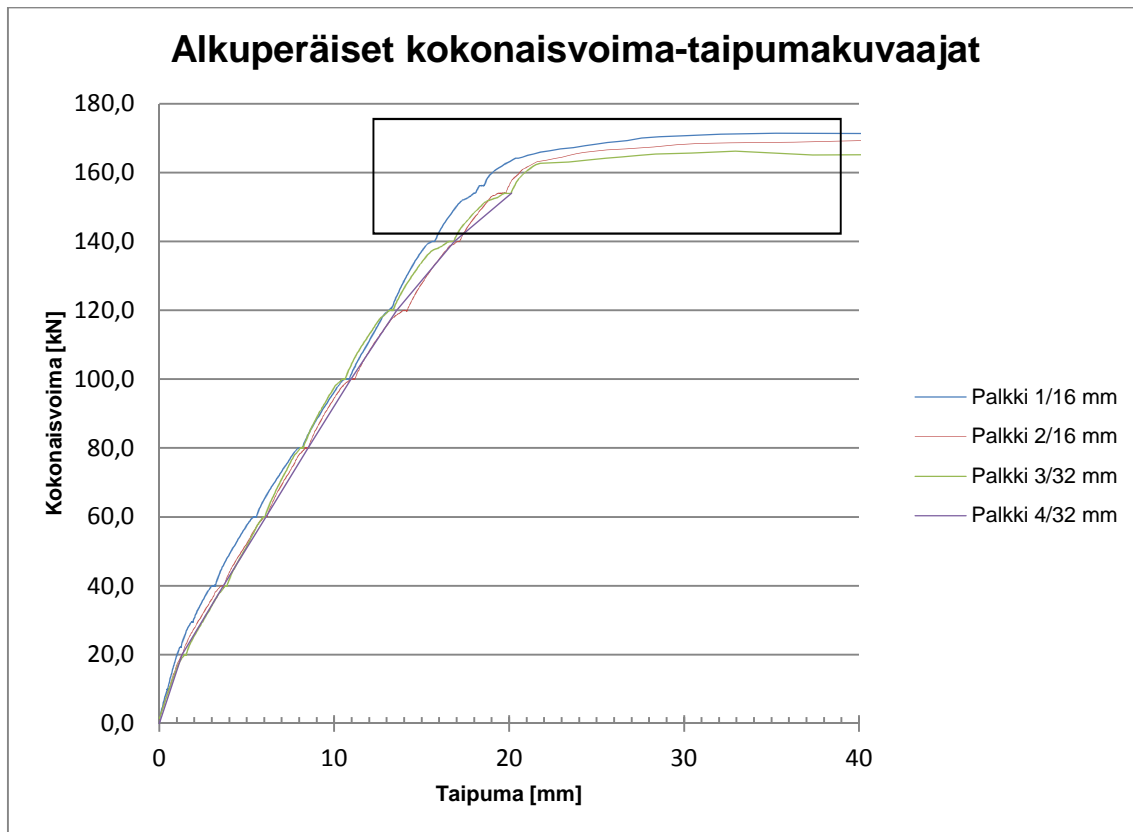
Testeissä mitattiin kuormitusvoimaa, palkkien taipumaa ja taivutushalkeamaleveyksiä. Lisäksi tarkasteltiin palkkien halkeilukäyttäytymistä. Mitattuja kuormitusvoimia verrattiin keskimääräisillä materiaalilujuuksilla laskettuihin kestävyysiin. Tarkka kuvaus ankkurointitutkimusten mittauksissa käytetyistä laitteista sekä kuormitus- ja mittaustavoista on esitetty luvussa 8.9.4.

4T16-palkkityypin laskennallinen myötökuorma oli 155,5 kN ja 1T32-palkkityypin 152,8 kN. Laskentamalli rakennettiin vastaamaan kuormitusta ilman materiaalien osavarmuus- ja pitkäaikaisvaikutuskertoimia. Laskennallisten myötökuormien määrittämisessä käytettiin materiaalien keskimääräisiä mitattuja kuormituspäivän lujuusarvoja. Erot palkkityyppien yllä esitetyissä laskennallisissa kestävyyksissä johtuivat materiaalilujuuksien eroista. Palkkityyppien kestävyyslaskut on esitetty liitteessä 2.

Kaikkien palkkien osalta alkuperäiset taipumat mitattiin välittömästi, kun kyseinen kokonaiskuorma saavutettiin. Palkki 2/16:n automaattisissa kuormitustallenteissa havaittiin 99 kN:n kokonaiskuorman kohdalla taipumassa paikallinen noin 0,5 mm:n äkillinen kehitys. Asiaa koestusvideoiden ja automaattisten kuormitustallenteiden avulla tutkittaessa havaittiin, että äkillinen taipuman kasvu aiheutui siirtymäanturin kärjen luiskahdettua pois palkin pinnalla olleen kohouman päältä. Palkki 2/16:n alkuperäisiä taipuma-arvoja korjattiin vähentämällä luiskahduksesta aiheutunut lisätaipuma luiskahduksen jälkeisistä taipuma-arvoista.

Kuormituslaitteen automaattisten kuormitustallenteiden perusteella piirretyt alkuperäiset kokonaiskuorma-taipumakuvaajat on esitetty kuvassa 45. Kuvan 45 kuvaajat on piirretty rajatulta kuormitusalueelta, eikä niissä näy palkkien maksimi kuormia. Täydelliset kuormituskuvaajat on esitetty liitteen 8 kuvassa 1.

Palkki 4/32:n kohdalla automaattiset kuormitustallenteet menetettiin ohjelmistovirheen vuoksi. Tästä johtuen palkki 4/32 kuvaajan taipuma-arvot perustuvat kuormituksen aikana käsin kirjattuihin testauspöytäkirjatietoihin, joita kirjattiin 20 kN:n välein 154 kN:iin asti.

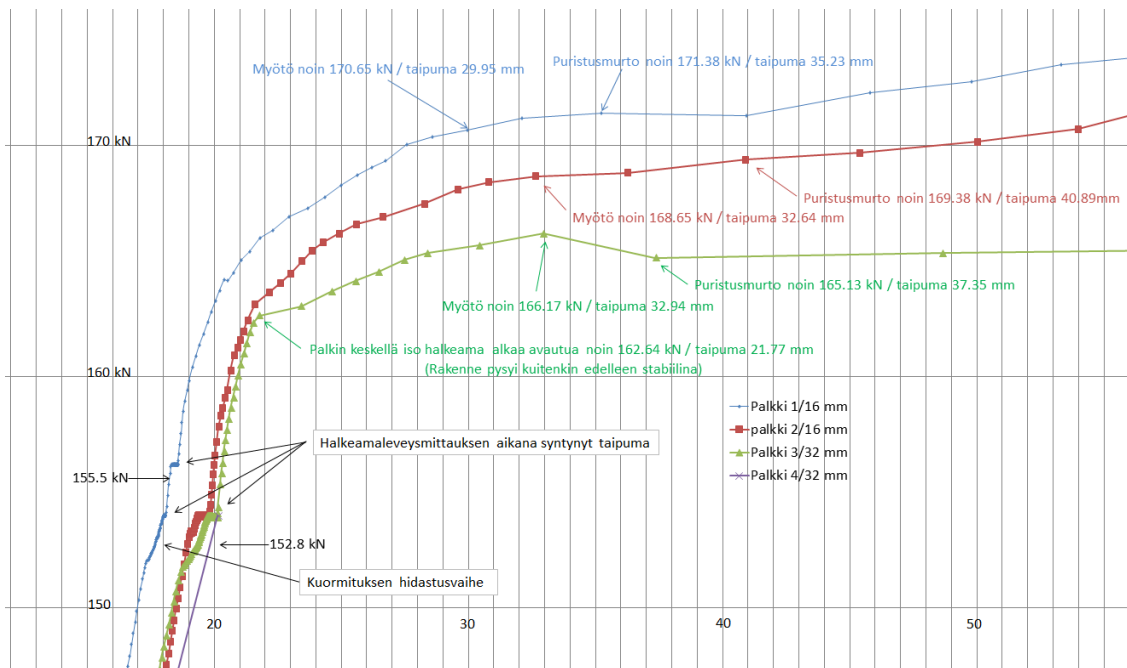


KUVA 45. Ankkurointipalkkien alkuperäiset kuormituskuvaajat

Kaikkien palkkien kohdalla palkkityyppikohtaiset laskennalliset myötökuormat ylittyivät reilusti, ennen kuin pääteräkset myötäsivät. 4T16-palkkityypin keskimääräinen myötökuorma oli 169,7 kN ja 1T32-palkkityypillä 164,6 kN.

Pääterästen katsottiin myötäävän, kun taipuman kehitys alkoi kiihtyä voimakkaasti suhteessa kokonaiskuormaan. Samalla rakenne alkoi plastisoitua maksimimomentin alueella ja halkeamat avautua silminnähden. Palkkikohtaisia myötöhetkiä arvioitiin kuormitusvideoiden ja automaattisten kuormitustallentei-

den perusteella. Kuvassa 46 on esitetty suurennos kuvan 45 rajatusta alueesta. Kuvan 46 kuvaajiin on merkitty koestusvideoiden perusteella tehdyt havainnot myötöhetkistä ja puristuspuolen murtumisista. Kuvaan on merkitty nuolilla myös laskennallisten myötökuormien paikat kokonaiskuorma-asteikolla.



KUVA 46. Koestusvideoiden perusteella arvioidut myötöhetket palkeissa 1–2/16 ja 3/32

Kuvan 46 mukaan myötöön viittaavat ilmiöt alkoivat näkyä automaattisissa kuormitustallenteissa noin 3,5–7 kN aiemmin kuin videotallenteilla. Koska terästen todellisia jännitystiloja oli mahdotonta määrittää ilman teräsiin kiinnitettyjä vastusvenymäliuskoja, pidettiin videohavaintoja näin ollen selkeämpinä ja luotettavampina myötöhetkiä arvioitaessa.

Pääterästen myötöämiseen viittaavat ilmiöt olivat havaittavissa koestusvideoissa selkeämmin 1T32-palkkityypillä muun muassa nopeampana taipuman kehityksen kiihtymisenä. Tämä näkyy myös kuvan 46 kuvaajissa, joiden mukaan palkki 3/32 taipuman kehitys myötöhetken jälkeen on mittausvälillä yli kaksinkertainen verrattuna palkkien 1/16 ja 2/16 taipuman kehityksiin. Kuormitusjärjes-

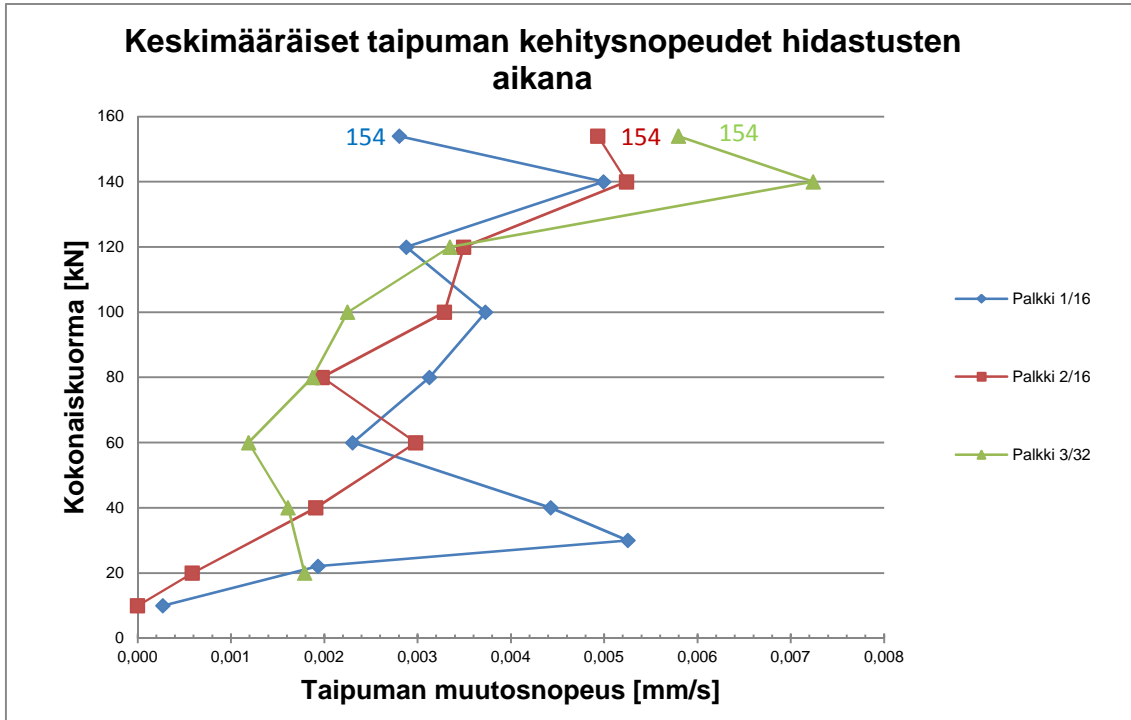
telmän automaattinen mittausarvojen tallennusväli oli kaikilla palkeilla 2 sekuntia.

Pääterästen myötäämisen jälkeen kaikilla palkeilla tapahtui kuumavalssatuille teräksille tyypillinen myötölujittumisvaihe, jolloin taipuman kehitys hidastui ennen maksimikuorman saavuttamista. Kokonaiskuorma kehittyi palkkikohtaisesti myötöhetken jälkeen vielä noin 10–15 kN, ennen kuin kuorma alkoi laskea ja taipuman kehitys jälleen kiihtyä. Palkki 1/16:n kohdalla lopullista maksimikuormaa ei saavutettu, koska kuormituslaite keskeytti kuormituksen automaattisesti virheellisen kuormitusohjelma-asetuksen vuoksi. Palkki 1/16 suurimman mitatun kokonaiskuorma-arvon on täytynyt kuitenkin olla hyvin lähellä lopullista maksimia, kun vertaillaan palkkien 1/16:n ja 2/16:n suurimpia mitattuja kokonaiskuormia. Palkki 1/16:n maksimikuorma-arvona käytettiin suurinta mitattua kokonaiskuorman arvoa. Palkkikohtaiset alkuperäiset kuormitustiedot on esitetty liitteen 8 taulukossa 1.

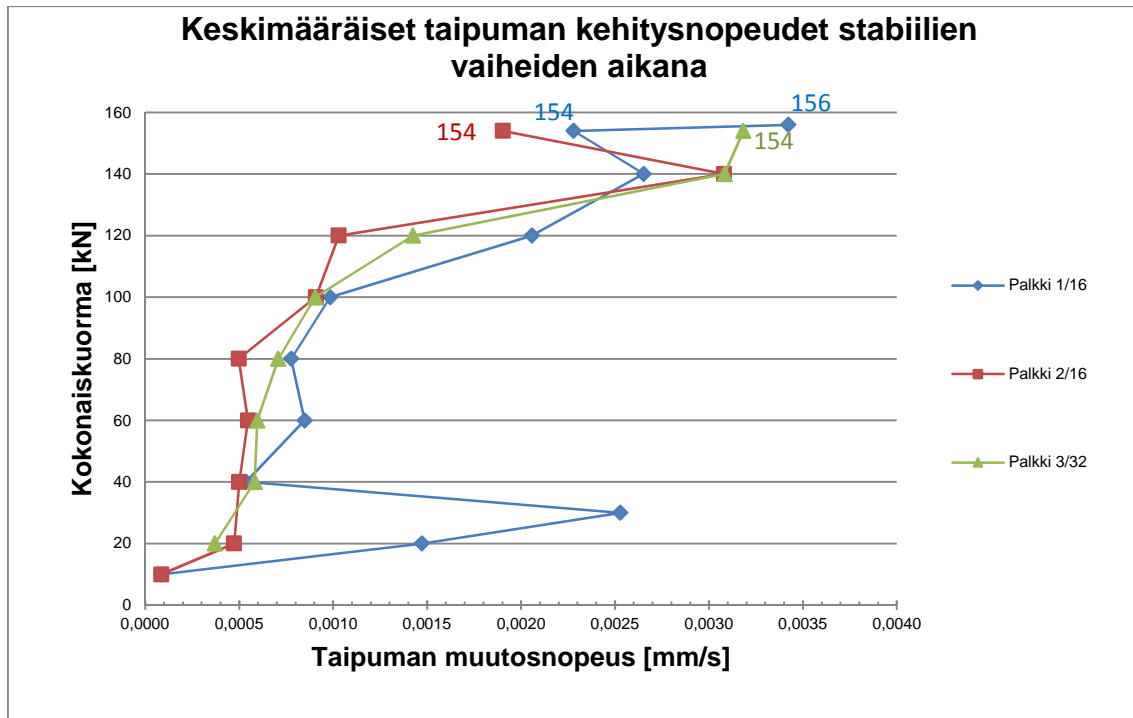
Kuvan 45 kuvaajissa tasakuormien kohdilla havaittavat paikalliset taipuman kehitykset syntyivät halkeamatarkastelujen ja niitä edeltäneiden kuormitusnopeuksien hidastusten aikana. Taipuman kehityksen jatkuminen kuormitusten hidastus- ja stabiilivaiheissa johtui todennäköisesti pääosin betonin virumisesta sekä epähomogeenisen materiaalin partikkeleiden rajapinnoilla tapahtuvista mikromurtumisista paikallisten jännityshuippujen tasoittuessa betonissa. Tällöin betoni ikään kuin tiivistyi ja lujittui. Ilmiö on havaittavissa myös kuvan 46 kuvaajissa, joiden kulmakertoimet ovat stabiilin kuormitusvaiheen jälkeen selkeästi jyrkempiä kuin normikuormituksen aikana ennen hidastusvaihetta.

Hidastetun ja stabiilin kuormituksen aikana normikuormituksesta poikkeavaa taipumista tapahtui kaikilla palkeilla aina 10 kN:sta 154 kN:iin saakka. Hidastusvaiheiden aikana taipumat kehittyivät noin 0,02–0,53 mm ja stabiilivaiheiden aikana noin 0,01–0,6 mm. Kehittyneen taipuman suuruus riippui pääsääntöisesti vaiheen kestosta ja kokonaiskuorman suuruudesta. Hidastusten kestot vaihtelivat sattumanvaraisesti 8 sekunnista lähes 2 minuuttiin. Halkeamatarkastelujen kestot vaihtelivat 30 sekunnista aina 6 minuuttiin. Vertailtavuuden mahdollistamiseksi taipuman muutokset suhteutettiin vaiheiden kestoihin. Kuvissa 47 ja 48

on esitetty palkkien 1–2/16 ja 3/32 hidastettujen sekä stabiilien kuormitusvaiheiden aikaiset taipuman kehitysnopeudet.



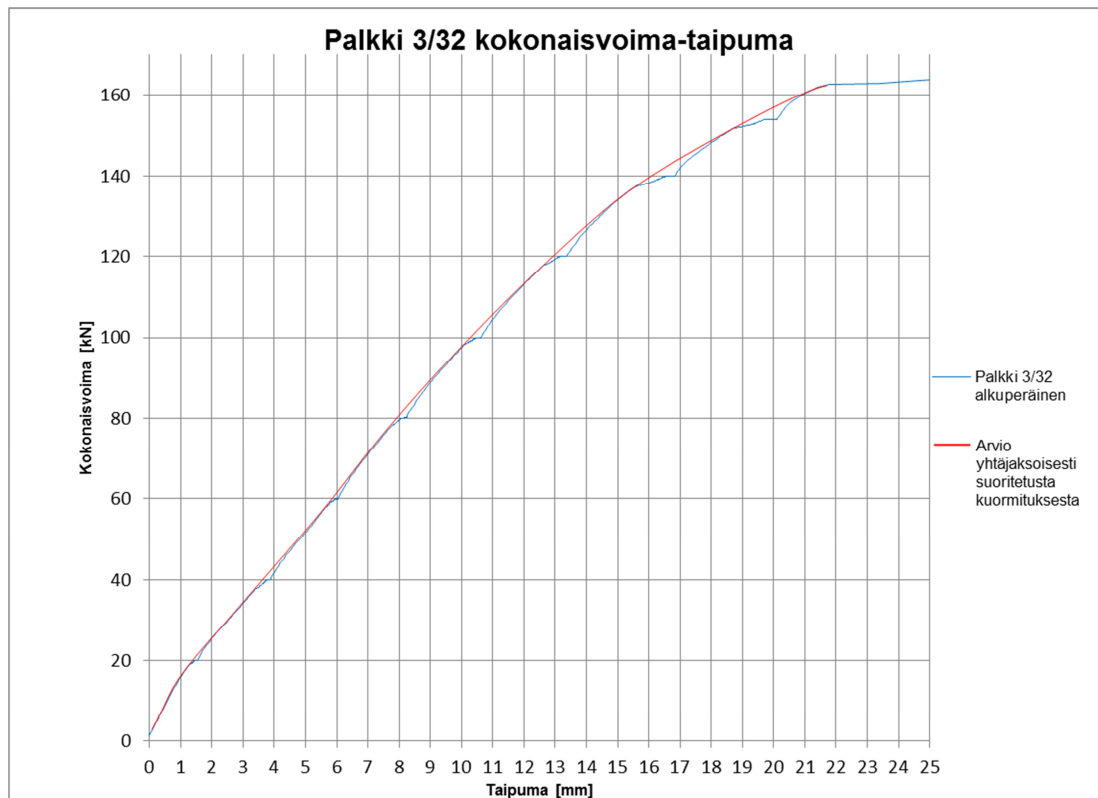
KUVA 47. Kuormitusten hidastusten aikaiset keskimääräiset taipuman kehitysnopeudet



KUVA 48. Stabiilin kuormitusvaiheen keskimääräiset taipuman kehitysnopeudet

Suurimpia halkeamatarkastelukuormia lähestyttäessä hidastusten aikana kehittyneet taipumapoiikkeamat olivat selvästi suurempia paksulla tangolla raudoitetulla palkilla. Tämä käy ilmi myös kuvan 47 taipuman kehitysnopeuksista. Hidastusten ja halkeamatarkastelujen kestot sekä niiden aikana kehittyneet taipumat on esitetty taulukoituina liitteen 8 taulukoissa 2 ja 3.

Koska halkeamatarkasteluja edeltävissä kuormitusvaiheissa esiintyi taipumien vertailtavuuteen vaikuttavaa epämääräisyyttä, hahmoteltiin alkuperäisiä kuormituskuvaajia mukailevat arviokuvaajat yhtäjaksoisesta kuormituksesta. Arviokuvaajat muodostettiin yhdistelemällä alkuperäisten kuormituskuvaajien hidastuksia edeltävät hetket kaarilla toisiinsa. Arviokuvaajat mukailivat alkuperäisten kuvaajien hidastuksia edeltäviä kaltevuuksia. Kuvassa 49 on esitetty esimerkki vertailukelpoisesta kuormituskuvaajasta.



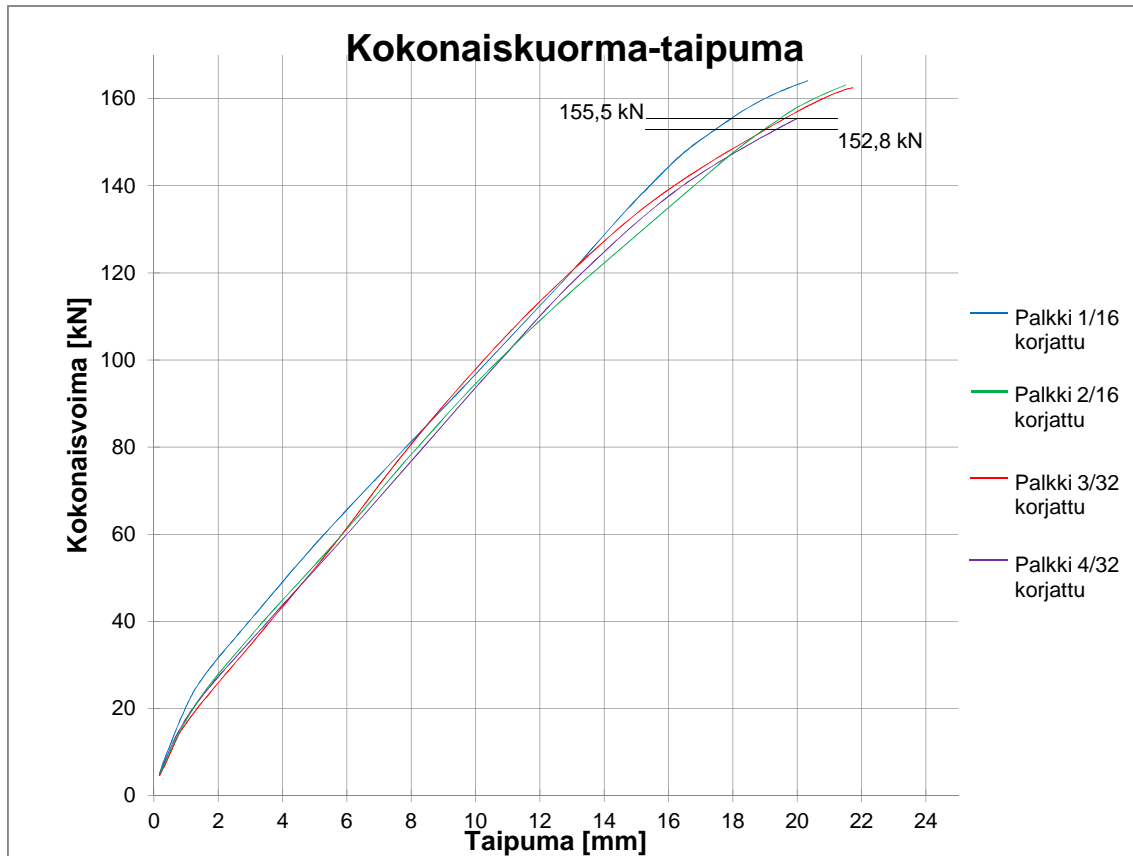
KUVA 49. Hahmotelma vertailukelpoisesta kuormituskuvaajasta

Vertailukelpoiset taipuma-arvot pystyttiin määrittämään Excel-kaavioon piirretyistä yhtenäisistä kuormituskuvaajista 0,01 mm:n tarkkuudella tiheää apuruudukkoa ja suurta suurennosta hyväksi käyttäen. Vertailtavat taipuma-arvot muodostuivat noin 0,6–5,7 prosenttia pienemmiksi kuin alkuperäiset. Hidastuksesta aiheutuneena taipuman muutoksena pidettiin alkuperäisen ja vertailukelpoisen taipuman erotusta tasakuorman saavutus hetkellä.

Koska palkki 4/32:n kohdalla ei automaattisia kuormitustallenteita ollut käytössä, korjattiin palkki 4/32:n alkuperäisiä taipuma-arvoja suhteellisesti yhtä paljon kuin palkki 3/32:n taipumia.

Kaikkien palkkien alkuperäiset taipumat olivat vertailukelpoisia noin 160 kN kokonaiskuorman jälkeen, kun viimeisen tarkasteluvaiheen tiivistymisvaikutukset hävisivät kimmokertoimien pienentyessä. Tämä on havaittavissa esimerkiksi kuvan 49 kuvaajien yhtyessä noin 160 kN kokonaiskuorman jälkeen.

Kuvassa 50 on esitetty kaikkien ankkurointipalkkien vertailukelpoiset kuormituskuvaajat.



KUVA 50. Ankkurointipalkkien vertailukelpoiset kuormituskuvaajat tarkastelualueelta

Taulukossa 17 on esitetty yhteenveto vertailukelpoisista mittaustuloksista palkkityypeittäin. Taulukossa esitetyt arvot ovat koekappaleiden keskiarvoja. Kuvan 50 mukaan 4T16-palkkityypin koekappaleiden taipuma-arvot erosivat toisistaan huomattavasti enemmän kuin 1T32-palkkityypin koekappaleiden taipuma-arvot. Ankkurointipalkkien alkuperäiset ja vertailukelpoiset taipuma-arvot on esitetty liitteen 8 taulukoissa 1 ja 4.

TAULUKKO 17. Ankkurointipalkkityyppien keskimääräiset mittaustulokset

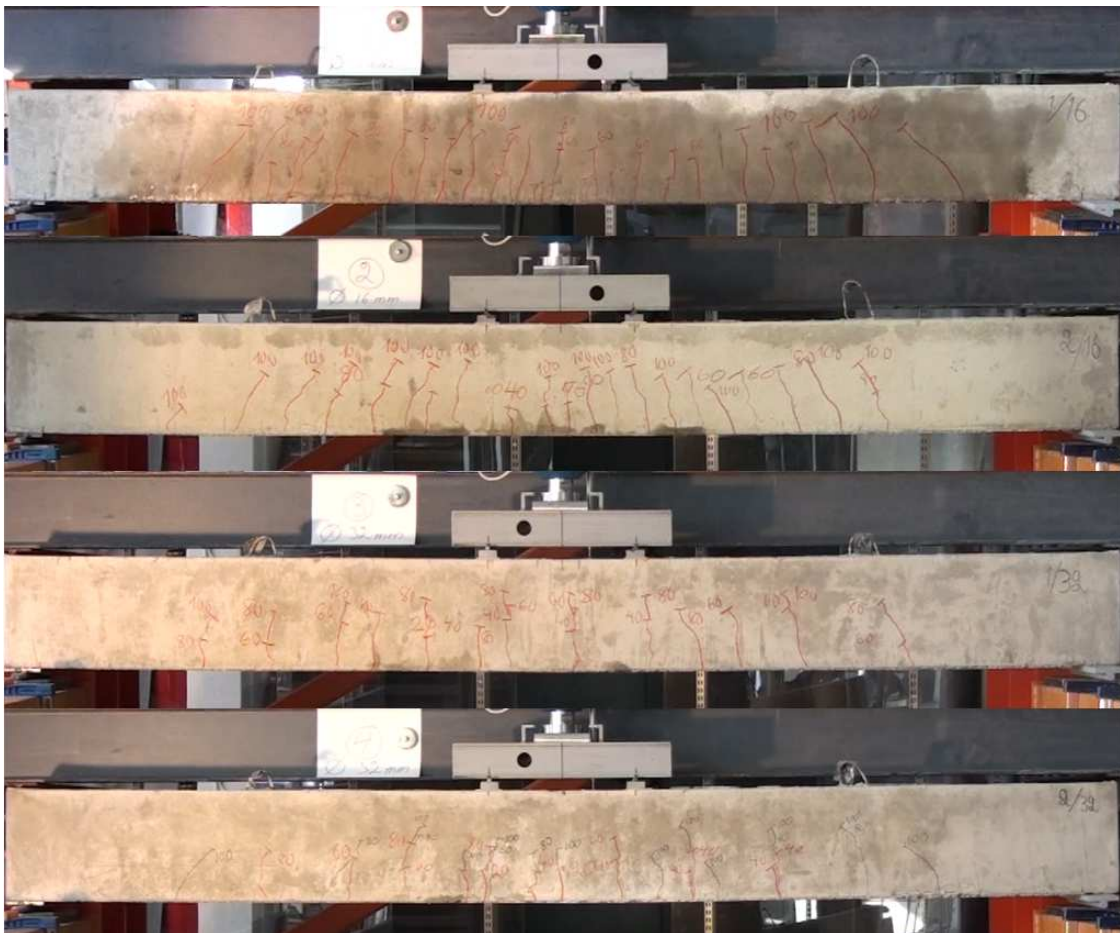
Kokonaiskuorma [kN]	Palkkityyppi 4T16		Palkkityyppi 1T32	
	Taipuma [mm]	Halkeamaleveys [mm] ^{**)}	Taipuma [mm]	Halkeamaleveys [mm]
20	1,14	-	1,3	0,05
40	3,21	0,05	3,6	0,09
60	5,61	0,10	5,9	0,15
80	8,05	0,10	8,2	0,20
100	10,61	0,15	10,6	0,25
120	13,33	0,20	13,1	0,35
140	16,11	-	16,2	0,39
152,8 ^{*)}	18,20	-	19,2	-
154	18,43	0,4	19,5	0,50
155,5 ^{*)}	18,71	-	19,9	-
164,6	21,89	-	32,90 ^{***)}	Myötö
169,7	31,30	Myötö	-	-
Max	180,5 kN		177,3 kN	

^{*)} Palkkityyppien laskennalliset myötökuormat.
^{**)} Käytetty pelkästään Palkki 2:n halkeamaleveysarvoja.
^{***)} Käytetty pelkästään Palkki 3:n taipuma-arvoja.

1T32-palkkityypin todellisen myötöhetken taipuma-arvona on käytetty pelkästään palkki 3/32:n taipuma-arvoa, koska palkki 4/32:n osalta taipumamittaustuloksia ei ollut käytettävissä 154 kN:n jälkeen.

Palkki 1/16:n halkeamaleveystulokset jouduttiin hylkäämään virheellisen mittaasteikkotulkinnan vuoksi. Taulukossa 17 4T16-palkkityypin keskimääräisinä halkeamaleveysarvoina on käytetty pelkästään palkki 2/16:n halkeamaleveysarvoja. Tutkimuksessa mitatut halkeamaleveydet ovat ”suuntaa antavia”, koska mittaus tapahtui aistinvaraisesti eikä leveintä halkeamaa aina välttämättä paikallistettu. Mittaustarkkuus parani kuitenkin kuormitusten myötä.

Ensimmäiset mikroskoopilla havaittavat halkeamat todettiin 4T16-palkkityypillä noin 30 kN:n kokonaiskuormalla. Halkeamaleveydet olivat kuitenkin niin pieniä, ettei käytetyn mittalaitteen tarkkuus riittänyt niiden mittaamiseen. 1T32-palkkityypillä ensimmäiset halkeamat havaittiin noin 20 kN:n kokonaiskuormalla, jolloin kyseiselle palkkityypille suoritettiin ensimmäiset halkeamatarkastelut. 1T32-palkkityypillä ensimmäiset halkeamat olivat kuitenkin saattaneet syntyä jo pienemmillä kokonaiskuormilla. Kuormituslaitteen automaattisten kuormituslenteiden perusteella piirretyissä kokonaisvoima-taipumakuvaajissa ei pystytty havaitsemaan yhdelläkään palkilla selkeitä merkkejä halkeiluajankohdista missään vaiheessa kuormitusta. Tämä johtui todennäköisesti suhteellisen harvasta 2 sekunnin tallennusvälistä. Kuvassa 51 on esitetty palkkeihin syntyneet taivutushalkeamat halkeilun stabiloiduttua.



KUVA 51. Palkkien halkeilu stabiloituneessa halkeilutilassa 100 kN:n kuormalla (Pesonen 2012)

Kuvan 51 kuormitusvaiheen jälkeen uusia halkeamia ei juurikaan enää syntynyt ja halkeilu kehittyi pääsääntöisesti jo olemassa olevissa halkeamissa edeten kohti puristusvyöhykettä.

Kuormituksen aikana 1T32-palkkityypillä kehittyi päätangon suuntaiset pitkittäshalkeamat palkin alapintaan teräksen koko pituudelle. Halkeamat todettiin vasta kuormituksen jälkeen, minkä vuoksi halkeamishetkestä ja sen kehittymisestä ei ole mittaustietoa. Pitkittäshalkeamia syntyi myös 32 mm:n tartuntatestipalkkeihin (liitteen 9 kuva 6). Kuvassa 52 on esitetty pitkittäshalkeama tussilla korostettuna 32 mm:n tangolla raudoitetun ankkurointipalkin alapinnassa.



KUVA 52. Pitkittäshalkeama 32 mm:n tangolla raudoitetun ankkurointipalkin alapinnalla (Pesonen 2012)

4T16-palkkityypillä ei havaittu silmämääräisesti vastaavia halkeamia palkkien kyljissä, missä betonipeite oli ohuimmillaan. Myöskään 16 mm:n tartuntatestipalkeissa ei havaittu pituussuuntaista halkeilua. Betonipeitekerroksen paksuus tartuntatesteissä oli ohuimmalta kohdalta 16 mm:n tangoilla noin 2,625Ø ja 32 mm:n tangoilla noin 1,063Ø.

10 TULOSTEN TARKASTELU

Tulosten tarkastelussa keskityttiin tutkimuksessa käytettyjen tankojen tartuntaominaisuuksiin ja ankkurointipalkkien kuormituskäyttämiseen. Tankojen tartuntaominaisuuksia tarkasteltiin tartuntaominaisuusvaatimusten täyttymisen, muodostuneen tartuntakertoimen ja tankojen geometrinen tartuntaominaisuuksien suhteen. Tartuntatestitulosten perusteella analysoitiin myös eri tartuntavaiheita tankotyypeittäin ja arvioitiin mahdollista tangon suuntaista halkeilua paksuilla tangoilla. Lisäksi arvioitiin tankojen rasitetun pään liukumia tartuntatesteissä. Ankkurointipalkkien osalta vertailtiin palkkityyppien kokonaiskuormia suhteessa taipumiin ja laskennallisiin kestävyyskiin. Lisäksi vertailtiin palkkityyppien taivutushalkeilua ja arvioitiin mahdollista 32 mm:n tangolla tapahtunutta tangonsuuntaista betonipeitteen halkeilua.

10.1 Tankojen tartuntaominaisuudet ja niistä aiheutuneet ilmiöt

Tartuntatestien perusteella määritetyt keskimääräiset 0,01–1 mm liukuman ja murtohetken tartuntajännitykset ylittivät reilusti Eurokoodi 2 standardin SFS-EN 1992-1-1 + AC:2005 liitteen C sivulla 200 tartuntajännityksille asetetut vaatimukset. Taulukossa 18 on esitetty mitatut tartuntajännitykset ja niiden suhteellinen ero liitteen C mukaan määritettyihin tankopaksuudesta riippuviin vähimmäisvaatimuksiin.

TAULUKKO 18. Tartuntatestien perusteella määritettyjen tartuntajännitysten suhteellinen ero Eurokoodi 2:n vaatimuksiin

\varnothing_n	Mitatut tartuntajännitykset		EC 2 tartuntajännityksen vaatimus		Ero	
	τ_m	τ_r	$\tau_{m,min}$	$\tau_{r,min}$	$\tau_m / \tau_{m,min}$	$\tau_r / \tau_{r,min}$
16	11,4	15,8	6,0	9,8	1,90	1,61
32	5,4	10,8	4,1	6,8	1,32	1,59

τ_m = keskimääräinen 0,01 – 1 mm liukumien tartuntajännitys
 τ_r = maksimi tartuntajännitys.

Mitattujen tartuntajännitysten suuruuteen vaikutti osaltaan käytetyn betonin lujuus, joka muodostui noin 22 prosenttia lujemmaksi kuin standardin SFS-EN 10080:2005 liitteen C mukainen testibetonin optimilujuus. Käytetyn betonin ominaislujuus ylitti kuitenkin vain noin 1,7 prosenttia standardin SFS-EN 10080:2005 liitteessä C testibetonin lujuudelle asetetun ylärajasuosituksen. Myös betonin runkoaineksen suhteellisen suurella maksimiraekolla oli todennäköisesti tankojen tartuntaominaisuuksia parantava vaikutus.

Tartuntatesteistä saatujen keskimääräisten tartuntajännitysten τ_m ja tartuntates-
tipäivien keskimääräisten betonin vetolujuuksien f_{ctm} suhdetta tarkasteltaessa
voidaan todeta, että 16 mm tangon tartuntakerroin muodostui hieman yli 2-
kertaiseksi Eurokoodi 2:n mukaisessa tartuntalujuuden f_b määrittämisessä käytet-
tävään tartuntakertoimen 2,25 arvoon nähden. 32 mm tangon tartuntakerroin jäi
puolestaan noin 0,94-kertaiseksi Eurokoodi 2 tartuntakertoimen arvosta. Näin
ollen Eurokoodi 2:n mukaan suoritettuna ankkurointimittauksen voidaan ajatella
tuottavan tartuntatesteissä käytetyllä 32 mm:n tankotyypillä hieman epävar-
memmalle puolelle jääviä ankkurointimittauksituloksia.

Tartuntatesteillä määritetty keskimääräinen tartuntajännitys τ_m muodostui 16
mm:n tankotyypillä noin 2,1-kertaiseksi ja maksimi tartuntajännitys τ_r noin 1,46-
kertaiseksi 32 mm:n tankotyyppiin nähden. Suuret erot tankotyyppien välisissä
tartuntajännityksissä johtuivat pääosin tankojen erilaisista pintageometrisista
ominaisuuksista. 16 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala oli noin 1,55-
kertainen 32 mm tangon harjapinta-alaan nähden. Näin ollen pelkän tankopak-
suuden vaikutusta ei saatu esiin tartuntatesteillä.

16 mm tankotyypin keskimääräinen jännityksettömän pään liukuma keskimää-
räisellä tartuntajännityksellä τ_m oli noin 0,067 mm ja 32 mm tankotyypin noin
0,154 mm. Keskimääräisillä tartuntajännityksillä τ_m 32 mm tangon jännitykset-
tömän pään liukuma muodostui noin 2,3-kertaiseksi 16 mm tangon liukumaan
nähden.

Suhteellisten harjapinta-alojen vaikutus näkyi liukumakehityksen lisäksi selkeäs-
ti tankotyyppien lopullisissa tartuntamurroissa. Suuremman suhteellisen harja-

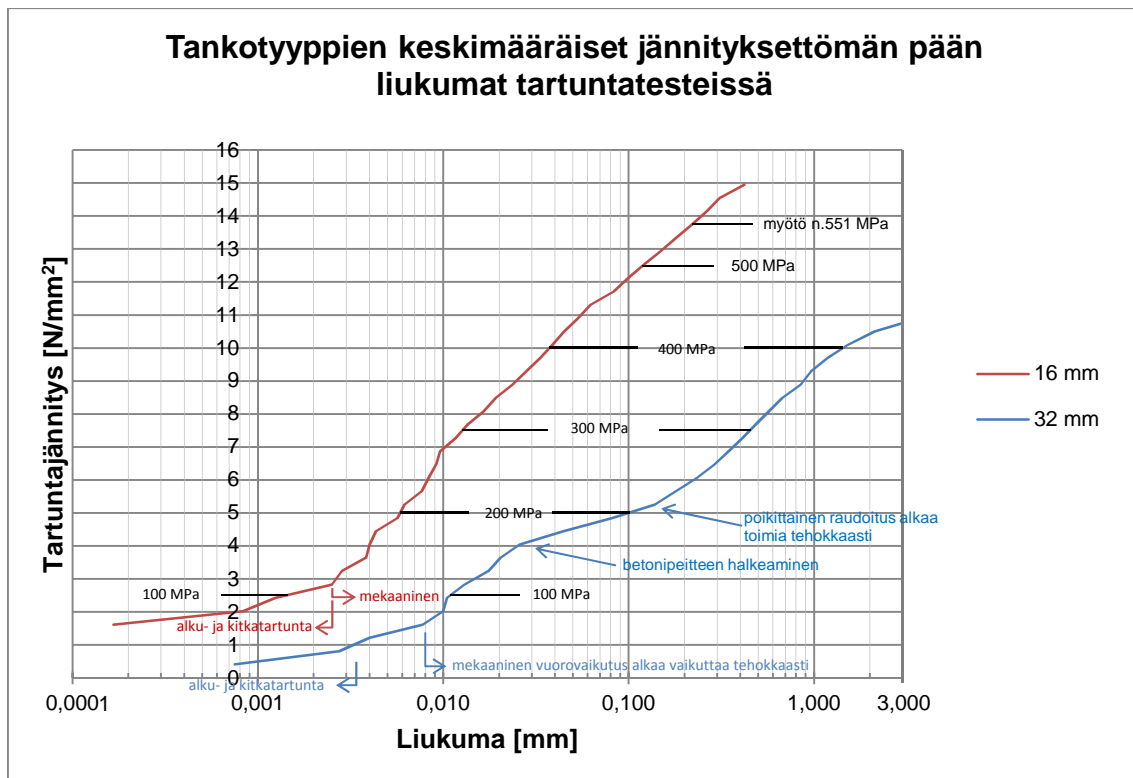
pinta-alan omanneen 16 mm tangon lopullinen tartuntamurto muodostui huomattavasti hauraammaksi kuin 32 mm:n tangolla.

Tankojen pintakuviointi pyritään suunnittelemaan siten, että suhteellista harjapinta-alaa kasvatettaessa harjaväliä lyhennetään yleensä enemmän suhteessa harjakorkeuteen korkeiden harjojen aiheuttamien suurten halkaisuvoimien vuoksi. Harjavälin tihentyessä tartunta muodostuu jäykemmäksi ja tartuntamurto hauraammaksi. Jokelan mukaan tartunnan murtuminen harjojen välisten betonikannasten leikkautumisen seurauksena on todennäköistä, kun harjaväli-harjakorkeussuhde on alle 7. Leikkautumisen seurauksena tangon liukumat kehittyvät äkillisesti ja tartuntamurto muodostuu hauraaksi. Sitkeän tartuntamurron varmistamiseksi harjaväli-harjakorkeussuhteen tulisi olla 10. (Jokela 1979, 37; Jokela 1983, 24.)

Tartuntatesteissä käytetyistä teräksistä otetuista valokuvista mitattuna 16 mm tangon harjaväli-harjakorkeussuhteen arvioitiin olleen alle 7 ja 32 mm tangon reilusti yli 7. Tankojen harjaväli-harjakorkeussuhteet näyttivät näin olleen linjassa tankojen murtumistapojen kanssa.

Tartuntavaiheet

Kuvassa 53 on esitetty yhteenveto tankotyyppeiden keskimääräisten liukumien kehityksestä suhteessa tartuntajännitykseen. Lisäksi kuvassa 53 on esitetty arvioita tartunnan vaiheista Jokelan ja Pukin tutkimuksiin perustuen.



KUVA 53. Tankotyyppien liukumien kehitys suhteessa tartuntajännitykseen

Jokelan ja Pukin mukaan alkutartuntavaiheen katsotaan vaikuttavan alle 0,001 mm:n liukuma-alueella. Pintakuviointin vaikutukset tartuntaan alkavat Jokelan ja Pukin mukaan näkyä pintakuviointin laadusta riippuen 0,003–0,01 mm:n liukuma-alueella, jolloin mekaaninen vuorovaikutus aktivoituu. (Jokela - Pukki 1983, 51.)

Kuvan 53 mukaan 16 mm:n tangolla mekaaninen tartuntavaihe aktivoitui koko tartuntapituudella huomattavasti aiemmin kuin 32 mm:n tangolla, mihin suhteellisen harjapinta-alan suuruudella toki oli huomattava vaikutus. Kuva 53 ei anna täysin todenmukaista kuvaa alku- ja kitkatartuntavaiheista, koska tankojen liukumia mitattiin tankojen jännityksettömistä päistä. Jos esimerkiksi huomioidaan 16 mm tangon 1,6 MPa tartuntajännityksen aiheuttama keskimääräinen venymä tartuntapituudella, muodostuu tällöin 64 MPa:n teräsjännityksellä tangon rasitetun pään liukumaksi kaavoilla 3 ja 4 laskettuna jo yli 0,025 mm. Tämä tarkoittaa sitä, että tartunta-alueen rasitetussa päässä on täytynyt vaikuttaa jo mekaaninen vuorovaikutus. On siis selvää, että kuvassa 53 esitetyt 16 mm tangon alku-

ja kitkatartuntavaiheen tartuntajännitykset olivat seurausta tartunta-alueella vaikuttaneesta puolimekaanisesta tartunnasta.

Jos taas tarkastellaan 32 mm tangon käyttäytymistä Jokelan ja Pukin tutkimusten pohjalta, voidaan kuvan 53 mukaan arvioida, että 32 mm:n tangolla mekaaninen tartuntavaihe alkoi noin 0,003 mm:n liukumalla. Suhteellisen harjapinta-alan pienuudesta ja tankopaksuudesta johtuen 32 mm tangon mekaaninen vuorovaikutus alkoi toimia tehokkaasti vasta noin 0,008–0,01 mm:n liukuma-alueella.

Kuvan 53 kuvaajissa mekaanisen tartuntavaiheen alussa näkyvä portaittainen tartuntajännitysten kehitys saattoi johtua harjojen etupuolisen betonin kokoonpuristumisesta ja tiivistymisestä jännityshuippujen tasoittuessa partikkelien välisten mikromurtumien seurauksena. Samalla tartuntajännitykset alkoivat todennäköisesti jakautua tasaisemmin koko tartuntapituudelle. Tämä näkyy esimerkiksi 16 mm tangon kuvaajassa tasaisempana tartuntajännitysliukumariippuvuuden kehityksenä 7 MPa:n tartuntajännityksen jälkeen.

Betonipeitteen halkeaminen

Kuvan 53 32 mm tangon kuvaajassa 4–5,3 MPa:n tartuntajännitysalueella havaittava muutos tartuntajännitys-liukumasuhteessa viittaa betonipeitteen tangon suuntaiseen halkeamiseen, millä oli 32 mm tangon liukumaa kasvattava vaikutus. Tuolloin tangossa vaikutti noin 160–212 MPa:n teräsjännitys.

Jokela ja Pukki ovat harjatangon pintakuviointin vaikutuksia tartuntaan käsittelevissä tutkimuksissaan esittäneet 1 Ø paksuisen poikittaisraudoittamattoman betonipeitteen halkeavan 20 mm:n harjatangolla noin 209 MPa:n teräsjännityksellä tangon jännityksettömän pään liukuman ollessa juuri ennen halkeamista noin 0,06 mm. Jokelan ja Pukin tutkimuksissa betonin lujuus ja betonipeitepaksuus suhteessa tangon halkaisijaan olivat lähes vastaavia kuin 32 mm:n tangolla tässä tutkimuksessa suoritetuissa tartuntatesteissä. Tosin 20 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala oli 0,089, mikä on huomattavasti suurempi kuin 32 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala. Vastaavalla suhteellisen harjapinta-alan erolla ei Jokelan ja Pukin tutkimustuloksissa näyttänyt kuitenkaan olevan juuri-

kaan vaikutusta teräsjännitykseen, jolloin pitkittäishalkeama syntyi. Suhteellisen harjapinta-alan vaikutus näkyi Jokelan ja Pukin tutkimustuloksissa selvimmin liukumissa. (Jokela - Pukki 1983, 41, 51 ja 62.) Lisäksi 32 mm tangon harjakorkeus oli todennäköisesti jo tankopaksuudesta johtuen 20 mm tangon harjakorkeutta suurempi. Harjakorkeudesta ja tankopaksuudesta johtuen 32 mm tangon halkaisuvoimat kehittyivät todennäköisesti suuremmiksi kuin Jokelan ja Pukin tutkimuksissa käytetyllä 20 mm:n tangolla ja betonipeite halkesi näin ollen alhaisemmalla teräsjännityksellä.

Myös Nykyri on *VTT:n tutkimuksia 693 Betoniraudoituksen ankkurointi* -julkaisussa tuonut esiin ruotsalaisen Tepfers`in tutkimuksiin pohjautuvia laskelmia (taulukko 3), joiden mukaan 1 \emptyset paksuinen betonipeite halkeaa 32 mm:n tangolla jo 0,03 mm:n liukumalla. (Nykyri 1990, 81–82.)

Kuvasta 53 arvioituna betonipeitteen halkeaminen kasvatti 32 mm tangon liukumia halkeamisprosessin aikana noin 0,1 mm. Halkeamisen seurauksena teräs pääsee muun muassa venymään vapaammin halkeama-alueella, mistä johtuen tangon rasitetun pään liukumat muodostuvat helposti liian suuriksi. Tangon liukumalla on rakenteesta riippuen epäedullisia vaikutuksia rakenteen mekaaniseen toimintaan ja ulkonäköön lisääntyneiden muodonmuutosten seurauksena.

Kuvan 53 mukaan 32 mm tangolla tartuntatestipalkin tiheä poikittaisraudoitus alkoi toimia tehokkaasti koko tartuntapituudella noin 0,14 mm liukuman jälkeen. Poikittaisraudoituksen rajoittaessa pitkittäishalkeaman avautumista, alkoi mekaaninen vuorovaikutus jälleen toimia tehokkaasti ja murtoilmiöt keskittyä harjojen etupuoliseen betoniin. Tämän seurauksesta liukuman kehitys hidastui jälleen suhteessa tartuntajännityksiin.

Tangon rasitetun pään liukuma

Taulukossa 19 on esitetty arviot tankojen rasitetun pään liukumista tartuntatesteissä. 16 mm tangon kohdalla tarkasteltiin tangon rasitetun pään liukumaa 500 MPa:n teräsjännityksellä. 32 mm:n tanko ei saavuttanut tartuntatesteissä 500 MPa:n teräsjännitystä, mistä johtuen tarkastelu tehtiin 400 MPa:n teräsjännityksellä. Vertailtavuuden vuoksi 16 mm:n tangolle tehtiin liukumatarkastelu myös

400 MPa:n teräsännityksellä. Tankojen rasitetun pään liukumata laskettiin kaavoilla 3 ja 4, eikä betonin kokoonpuristumista otettu huomioon.

TAULUKKO 19. Tankojen rasitetun pään liukumata tartuntatesteissä

\varnothing [mm]	Tartuntapituus l_b [mm]	Teräsännitys σ_s [N/mm ²]	Tangon keskimääräinen venymä Δl [mm]	Tangon rasittamattoman pään liukuma S_0 [mm]	Tangon rasitetun pään liukuma S [mm]	Tankopaksuuden mukaan muuttuva liukuma-raja S_{max} [mm]	S/S_{max}
16	160	400	0,16	0,04	0,20	0,35	0,57
16	160	500	0,20	0,12	0,32	0,35	0,91
32	320	400	0,32	1,44	1,76	0,49	3,59

Taulukon 19 mukaan 10 \varnothing :n tartuntapituudella ja 500 MPa:n teräsännityksellä 16 mm tangon rasitetun pään liukuma pysyi sallituissa rajoissa, mikäli tangon sallittu liukuma määritetään tankopaksuuden mukaan. 32 mm tangon rasitetun pään liukuma taas ylitti jo 400 MPa:n teräsännityksellä yli 3,5-kertaisesti tankopaksuudesta riippuvan sallitun liukuman 0,49 mm raja-arvon. Taulukon 19 mukaan 400 MPa:n teräsännityksellä 32 mm tangon rasitetun pään liukuma oli 8,8-kertainen 16 mm tangon liukumaan nähden. Kuten edellä on todettu, tutkimuksessa käytetyn 32 mm tangon yleisesti heikohkoilla pintageometrisilla tartuntaominaisuuksilla ja betonipeitteen halkeamisella oli merkittävä vaikutus tankojen väliseen liukumien eroon.

Luvun 4.2.2 perusteella on kuitenkin syytä epäillä, että 32 mm tangon rasitetun pään liukuma 10 \varnothing :n tartuntapituudella tuskin pysyisi sallituissa rajoissa, vaikka tangon pintageometriset tartuntaominaisuudet olisivatkin tutkimuksessa käytetyn 16 mm tangon tasoisia. 500 MPa:n teräsännityksellä 32 mm tangon pelkkä keskimääräinen venymä 10 \varnothing :n pituudella olisi jo 0,4 mm. 0,49 mm:n liukumaraaja ylittyisi siis jo näin ollen tutkimuksessa käytetyn 16 mm tangon jännityksettömän pään 0,12 mm:n liukuma-arvolla. Todellisuudessa 32 mm tangon jännityksettömän pään liukuma muodostuisi huomattavasti 16 mm tangon liukumaa

suuremmaksi suhteellisesti tankopaksuuteen nähden pienemmän tartunta-alansa vuoksi. Lisäksi betonipeitteen halkeamisesta syntyisi vielä lisäliukumaa.

Tartuntatestien perusteella ohuilla betonipeitekerroksilla paksut tangot vaativat ohuempiin tankoihin nähden suhteellisesti pidemmän ankkurointipituuden pelkästään tartuntaan perustuvassa ankkuroinnissa, mikäli tangon rasetetun pään liukumalle asetetaan rajoitteita.

10.2 32 mm tangon ankkuroituminen

Ankkurointipalkkien kuormituksissa saavutettujen kokonaiskuormien perusteella voidaan todeta, että tutkimuksessa käytetyn 32 mm tangon kokonaistartunta riitti ankkuroimaan tangon todellista myötövoimaa vastaavan vetovoiman.

Kuormituskokeissa 4T16-palkkityypin kestävyys muodostui keskimäärin 9,1 prosenttia ja 1T32-palkkityypin 7,7 prosenttia palkkikohtaista laskennallista kestävyyttä suuremmaksi, ennen kuin pääteräkset myötäsivät. Palkkityyppien laskennallisten myötökuormien ylitysosuuksien (9,1 ja 7,7) ero johtui todennäköisesti lähinnä 4T16-palkkityypissä käytetyn teräslaadun 1,8 prosenttia suuremmasta keskimääräisestä myötölujuudesta ja epätarkkuudesta myötöhetkien arvioinnissa.

Tartunnan laatua indikoiva palkkien taipuminen

Palkkityyppien keskimääräisten taipumien erot eivät muodostuneet niin merkittäviksi kuin tartuntaominaisuuksien perusteella olisi voitu olettaa. Osaltaan palkkityyppien keskimääräisten taipumien eroa kavensi kuitenkin 4T16-palkkityypin koekappaleiden välinen suurempi hajonta. 4T16-palkkityypillä koekappaleiden taipumat erosivat toisistaan keskimäärin 9,8 prosenttia, kun taas 1T32-palkkityypin koekappaleiden välillä eroa oli keskimäärin vain 3,6 prosenttia.

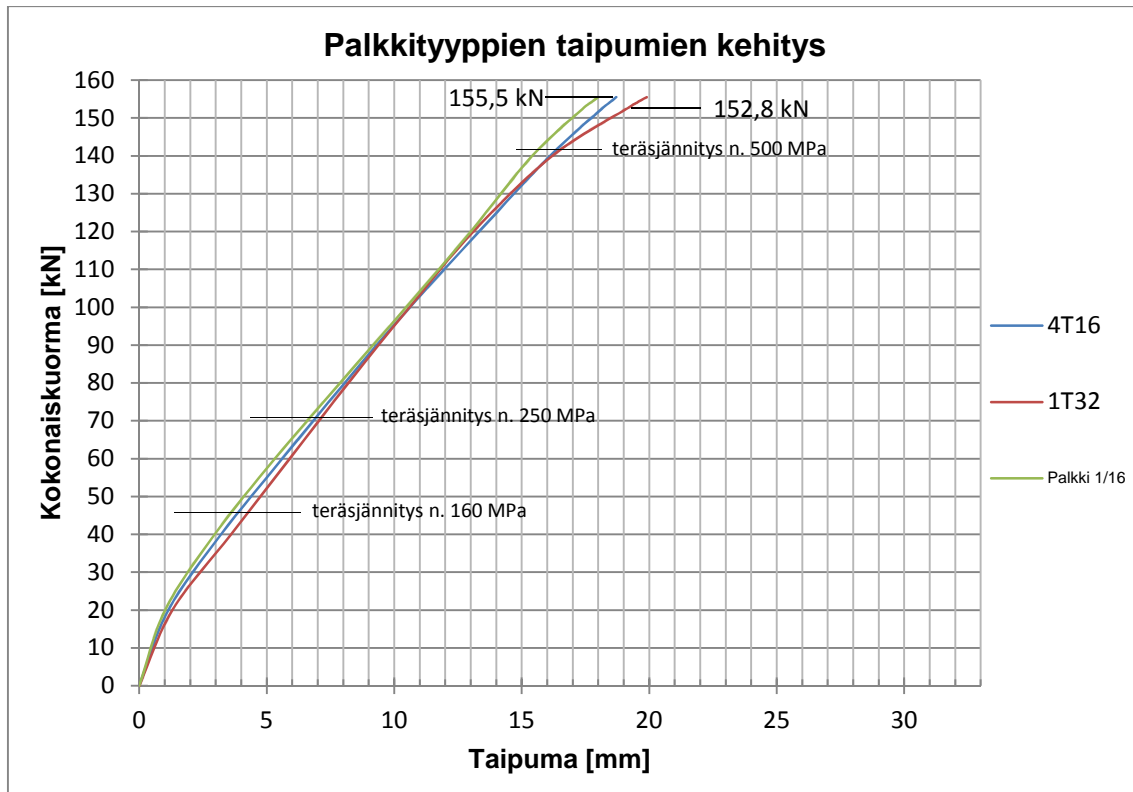
Palkkityyppien sisäiset erot olivat suurimpia kuormituksen alussa. Laskennallisella myötökuormalla 4T16-palkkityypin koekappaleiden taipumien ero oli noin 8 prosenttia ja 1T32-palkkityypillä noin 2,2 prosenttia. 4T16-palkkityypin koekappaleiden välinen suurempi hajonta saattoi osittain johtua palkki 2/16:n kohdalla mahdollisesti heikommin onnistuneesta tiivistyksestä betonointivaiheessa. Run-

koaineksen maksimiraekoon suuruus sekä raudoitteiden ja muottien väliset minimietäisyydet vaikeuttivat betonin tiivistystä betonointivaiheessa.

1T32-palkkityypin taipumat olivat lähes koko kuormituksen ajan suurempia kuin 4T16-palkkityypillä. Palkkityyppien taipumaerot olivat suurimpia kuormituksen alkuvaiheessa, mikä on linjassa tartuntatesteissä tehtyjen havaintojen kanssa 32 mm tangon suuresta alkuliukumasta ennen tehokkaan mekaanisen vuorovaikutuksen aktivoitumista.

Kuormituksen alussa 20–40 kN:n kuormalla taipumien erot olivat suurimmillaan noin 12–14 prosenttia tasoittuen arvioituja käyttörajatilan kuormia kohti. 70 kN:n kuormalla eroa oli enää noin 3,5 prosenttia ja 120 kN:n kuormalla 1T32-palkkityypin keskimääräinen taipuma oli jopa 1,7 prosenttia pienempi kuin 4T16-palkkityypin keskimääräinen taipuma. 140 kN:n kuormalla 1T32-palkkityypin taipumakehitys alkoi kiihtyä ja taipumat muodostua suuremmiksi kuin 4T16-palkkityypillä. Laskennallisesti arvioituna vetoteräksissä vaikutti 500 MPa:n teräsännitys noin 141,7 kN:n kokonaiskuormalla. Tuolloin 1T32-palkkityypin keskimääräinen taipuma oli vain noin 1,3 prosenttia suurempi kuin 4T16-palkkityypin keskimääräinen taipuma. 1T32-palkkityypin laskennallisella 152,8 kN:n myötökuormalla 1T32-palkkityypin taipuma oli 5,5 prosenttia suurempi kuin 4T16-palkkityypin taipuma. Tuolloin teräsännitys oli laskennallisesti noin 541 MPa.

Erojen havainnollistamiseksi palkkityyppien taipumien kehitys on esitetty graafisesti kuvassa 54. Kuvaan on merkitty myös laskentaan perustuvia arvioita teräsännityksistä.



KUVA 54. Palkkityyppien taipumien kehitys laskennallisiin myötökuormiin saakka esitettynä

Kuvan 54 mukaan 1T32-palkkityypin 4T16-palkkityyppiä voimakkaampi taipuman kehitys kuormituksen alkuvaiheessa noin 160 MPa:n teräsännityksellä saattoi, tartuntatestituloksista tehtyjen havaintojen perusteella, aiheutua betoni- peitteen tangonsuuntaisesta halkeamisesta tartunta-alueen rasitetummassa päässä.

Kuvassa 54 on vertailun vuoksi esitetty myös 16 mm:n tangoilla raudoitettun palkki 1/16:n kuormituskuvaaja. Kuvan 54 mukaan taipumien erot olisivat muodostuneet huomattavasti suuremmiksi, mikäli 4T16-palkkityypin koekappaleiden taipumien hajonta olisi ollut pienempää.

Jos 1T32-palkkityypin keskimääräisiä taipumia verrataan palkki 1/16:n taipumiin, on taipumien ero kuormituksen alkuvaiheessa 20–40 kN:n kuormalla noin 22–28 prosenttia, 70 kN:n kuormalla noin 7,5 prosenttia, 141,7 kN:n kuormalla noin 5,9 prosenttia ja 152,8 kN:n kuormalla noin 10 prosenttia. Palkki 1/16:n

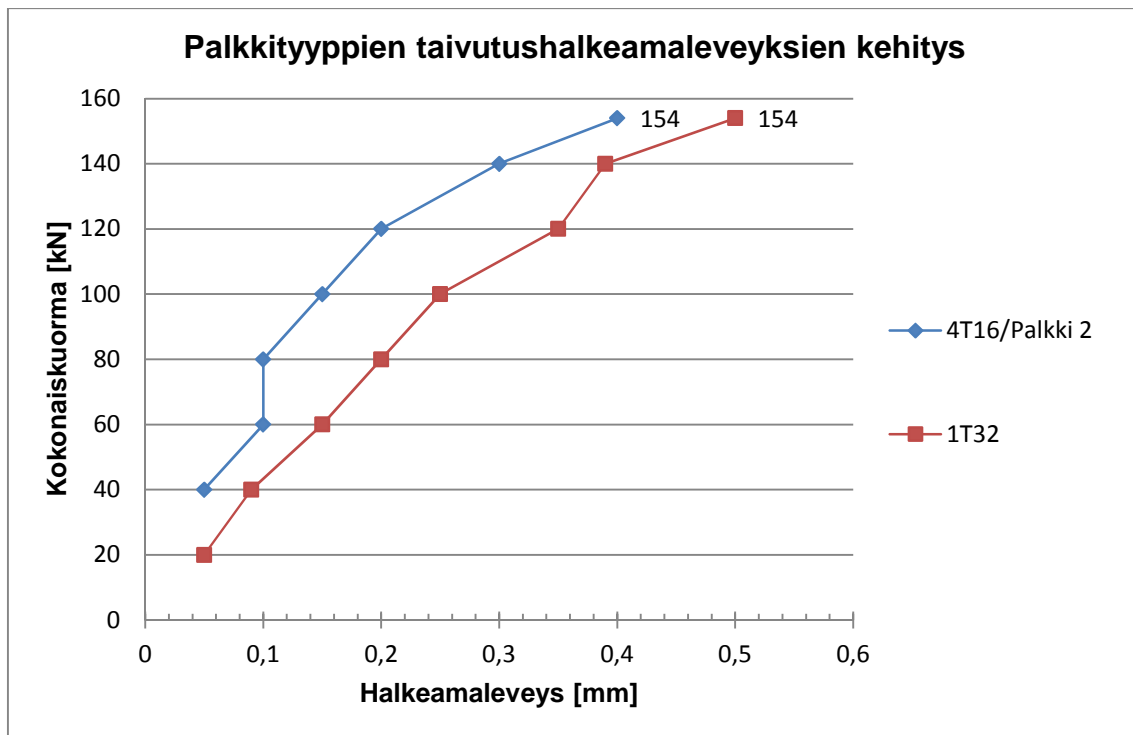
kuvaajaan verrattaessa voidaan havaita, että 1T32-palkkityypin taipumankehitysnopeus alkaa kiihtyä huomattavasti 120 kN:n tienoilla, mikä johtui päätangon liukumisesta tartunta-alueen rasitetummassa päässä. Tuolloin teräsännitys maksimimomenttialueella oli hieman yli 400 MPa. Myös kuvan 53 mukaan 32 mm tangon liukuman kehitys alkaa kiihtyä vastaavalla teräsännityksellä.

Todellisten myötöhetkien taipumien vertailu ei ollut järkevää, koska 4T16-palkkityypin keskimääräinen myötökuorma muodostui materiaaliominaisuuksista johtuen noin 3,1 prosenttia suuremmaksi kuin 1T32-palkkityypillä. Suuremman kuorman myötä jännitykset 4T16-palkkityypin betonissa kasvoivat suuremmiksi. Suurempien jännitysten vuoksi betonin kokoonpuristuvuus ja sitä kautta myös palkin muodonmuutokset muodostuivat näin ollen suuremmiksi. Vertailulla ei näin ollen olisi saavutettu objektiivista näkemystä.

Kuvan 46 mukaan ennen myötökuorman saavuttamista noin 162,6 kN:n kuormalla 32 mm:n tangolla raudoitetussa palkissa tapahtui todennäköisesti jonkinlaisia paikallisia tartuntamurtoja tartunta-alueen rasitetummassa päässä. Tämä näkyy taipuman nopeana yhtäkkisenä kehityksenä. Kokonaistartuntapituuden ollessa riittävän pitkä on jännityksillä mahdollisuus jakautua pidemmälle matkalle tartunta-alueella tangon liukuman tasoittaessa paikallisia jännityshuippuja. Kuvassa 46 ohuemmillä tangoilla raudoitettujen palkkien kuvaajat kaartuvat huomattavasti sitkeämmin ja tasaisemmin kohti myötöhetken lakipistettä, mikä viittaa parempaan tartunnan laatuun betonin ja terästen välillä.

Taivutushalkeilu

Kuvan 51 mukaan 4T16-palkkityypillä taivutushalkeamia muodostui noin kaksinkertainen määrä 1T32-palkkityypiin verrattuna. 4T16-palkkityypillä halkeamat jakoutuivat myös selvästi tasaisemmin kuin 1T32-palkkityypillä. Kuvassa 55 on esitetty palkkityyppien taivutushalkeamaleveyksien kehittyminen kuormituksen aikana.



KUVA 55. Palkkityyppien halkeamaleveyksien kehittyminen kuormituksen aikana

Paikallisen tartunnan ollessa hyvä, jäävät tangon liukumukset pieniksi, mistä johtuen taivutushalkeamia muodostuu tiheään ja niiden leveydet jäävät pieniksi. Tämä näkyy 4T16-palkkityypin halkeilukäyttäytymisessä.

Jos tutkimuksessa käytetyn rakenteen käyttörajoitilakuormien arvioidaan sijaitsevan noin 60 ja 80 kN:n välillä, olivat 32 mm:n tangolla raudoitettujen palkkien halkeamaleveydet tuolla kuormitusalueella noin 50–100 prosenttia suurempia kuin 16 mm:n tangolla raudoitetulla palkilla. 1T32-palkkityypin keskimääräinen halkeamaleveys 80 kN:n kuormalla oli 0,2 mm, mikä on kuitenkin vielä hyvinkin käyttökelpoisissa rajoissa (NA SFS-EN 1992-1-1 liite 7. 2009, 8).

Laskennallisia myötökuormia lähestyttäessä leveyksien erot kapenivat noin 25 prosenttiin. Halkeamaleveyksien erot olisivat saattaneet muodostua vieläkin suuremmiksi, mikäli palkki 1/16:n halkeamaleveysmittauksista olisi saatu käyttökelpoisia tuloksia.

10.3 Johtopäätökset

Mittaustulostarkastelujen perusteella voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä 32 mm tangon ankkuroitumisesta ja siihen liittyvistä ilmiöistä:

1. 32 mm tanko pystyy ankkuroimaan 500 MPa teräsjännityksen ohuillakin betonipeitekerroksilla, mikäli tangon ankkurointipituus on riittävän pitkä, ankkurointipituudella on riittävä poikittainen raudoitus eikä tangon liukumalle aseteta rajoitteita.
2. Vähimmäisbetonipeitepaksuuksilla betonipeitteen halkeaminen on todennäköistä jo noin 160 MPa:n teräsjännityksillä, eikä sitä voida estää järeällä poikittaisraudoituksella. Eurokoodi 2:n standardissa SFS-EN 1992-1-1 + AC:2005 sivulla 131 esitetty ankkurointimitoitukseen liittyvä halkeamattomuusvaatimus ei näin ollen toteudu.
3. Tangon suuntainen betonipeitteen halkeaminen lisää tangon liukumaa halkeama-alueella.
4. Paksun tangon liukuma muodostuu aina ohuempaa tankoa suuremmaksi suhteellisesti pienemmän tartunta-alan vuoksi, vaikka tankojen pinta-geometriset tartuntaominaisuudet vastaisivat toisiaan.
5. Tankopaksuudesta ja tangon suuntaisesta halkeilusta johtuen on hyvin todennäköistä, ettei 32 mm:n tanko ankkuroidu ohuella betonipeitekerroksella murtotilassa, jos tangon liukuma-raja on 0,49 mm.

11 YHTEENVETO

Tutkimuksen päätarkoituksena oli selvittää, ankkuroituuko 32 mm:n harjaterästanko Eurokoodi 2:n mukaan mitoitettussa taivutusrasitetussa palkkirakenteessa pelkästään vaipan tartunnan avulla, kun tangossa vaikuttaa myötöjännitystä vastaava vetovoima ja betonipeitekerroksen paksuus on Eurokoodi 2 vaatimusten mukaisesti ohuin mahdollinen. Tutkimushypoteesin mukaan tankopaksuuden kasvaessa tangossa vaikuttavat voimat muodostuvat jossain vaiheessa niin suuriksi, ettei tankoa ympäröivä betoni kestä paikallisesti harjojen aiheuttamaa painetta vaan murskautuu ja halkeaa jännityshuippualueella, jolloin jännityshuippu siirtyy eteenpäin tartunta-alueella. Hypoteesin mukaan paikallisten tartuntamurtojen sarja voi edetä läpi koko tartunta-alueen sen pituudesta riippumatta, minkä seurauksena tanko liikuu ulos betonista ankkuroitumatta. Tästä johtuen tutkimuksessa käytettyä tartuntapituutta ei rajattu Eurokoodi 2 - ankkurointimitoitusohjeen mukaiseksi eikä tangon liukumalle myöskään asetettu rajoitteita.

Paksun tangon ankkuroituvuutta tutkittiin vertailemalla 32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin kuormituskäyttäytymistä neljällä 16 mm:n tangolla raudoitetun vertailupalkkityypin kuormituskäyttäytymiseen. Palkit pyrittiin toteuttamaan, käytettyä tankopaksuutta lukuun ottamatta, ominaisuuksiltaan identtisiksi. Palkeissa käytettyjen terästen tartunta- ja lujuusominaisuudet sekä betonin lujuus määritettiin niitä koskevien standardien mukaisesti. Laskennalliset tarkastelut suoritettiin käyttämällä materiaalien keskimääräisiä mitattuja lujuuksia ilman materiaali- tai kuormitusosavarmuuskertoimia.

Kummankin tankotyyppin standardin (SFS-EN 10080:2005) liitteen C mukaisella tartuntatestillä määritetyt 0,01–1 mm liukumien keskimääräiset tartuntajännitykset ja maksimitartuntajännitykset täyttivät reilusti Eurokoodi 2:n harjateräksille asettamat tartuntajännitysvaatimukset, vaikka 32 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala jäikin hieman Eurokoodi 2:n vähimmäisvaatimuksista.

16 mm tangon suhteellinen harjapinta-ala oli noin 1,55-kertainen 32 mm tangon harjapinta-alaan nähden, mikä osaltaan kasvatti joidenkin tartunnasta riippuvien

ilmiöiden eroja rakenteiden kuormituskäyttäytymisessä. Tangon tartuntaominaisuuksista, tankopaksuudesta ja betonipeitekerroksen paksuudesta johtuen 16 mm tangon keskimääräiset 0,01-1 mm liukuman tartuntajännitykset muodostuivat tartuntatesteissä yli kaksinkertaisiksi 32 mm tangon tartuntajännityksiin nähden.

Tartuntatestitulokset antoivat vahvoja viitteitä 32 mm tangon voimakkaasta betonipeitteen halkaisuvaikutuksesta. Tartuntatesteissä 32 mm tangon katsottiin aiheuttaneen noin 1,06 \varnothing :n paksuisen betonipeitteen halkeamisen tangon liu'uttua noin 0,026 mm tangon jännityksettömästä päästä mitattuna. Tuolloin tangossa vaikutti noin 160 MPa:n teräsjännitys. Tangon liukuma 10 \varnothing mittaisen tartuntapituuden rasitetussa päässä oli halkeamishetkellä luonnollisesti huomattavasti suurempi. Pitkittäishalkeilun stabiloiduttua 32 mm tangon tartuntajännitykset kehittyivät vielä noin 2,04-kertaisiksi järeän poikittaisraudoituksen vaikutuksesta. Tartuntatesteissä havaittu paksun tangon voimakas betonipeitteen halkaisuvaikutus oli linjassa aiheesta aiemmin muun muassa Jokelan ja Pukin VTT:lle ohuemmillä tangoilla suorittamien tutkimusten kanssa (Jokela - Pukki 1983, 41, 55–63).

Ankkurointitutkimuksissa saavutettujen kokonaiskuormien perusteella voidaan todeta, että kokeissa käytetyn 32 mm harjaterästangon tartuntaominaisuudet riittivät ankkuroimaan jopa reilusti yli tangon todellista myötöjännitystä vastaavan vetovoiman, kun tangon liukumalle ei asetettu rajoitteita. Testeissä 32 mm:n tankoon kohdistui myötöhetkellä noin 540 MPa:n teräsjännitystä vastaava vetorasitus, minkä ankkuroimiseen oli käytettävissä kokonaisuudessaan 1285 mm:n pituinen tartunta-ala maksimimomenttialueen alusta mitattuna. Ankkurointitutkimuksissa 32 mm:n tangolla raudoitetussa palkissa ei tapahtunut tutkimushypoteesin mukaista tangon rasitetusta päästä alkavaa ja loppujen lopuksi koko tartunta-alueen läpi kulkevaa tartuntamurtoketjua, minkä seurauksena laskennallinen myötökuorma olisi jäänyt saavuttamatta ja/tai rakenteen muodonmuutokset olisivat muodostuneet kohtuuttomiksi.

Ankkurointipalkkien kuormituksessa 32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin myötöhetken kokonaiskuorma ylitti keskimäärin noin 7,7 prosenttia materiaalien mitatuilla lujuusominaisuuksilla lasketun teoreettisen 152,8 kN myötökuorman.

Palkkityypin kuormituksissa saavuttama myötökuorma oli linjassa ohuemmilla tangoilla raudoitetun vertailupalkkityypin myötökuorman kanssa, kun tutkimuksessa käytettyjen terästen lujuuserot otettiin huomioon. 32 mm:n tangoilla totaalista tartuntamurtoa ei saavutettu edes terästen myötäämisen jälkeisellä kuormituksella, minkä aikana kokonaiskuorma kehittyi vielä keskimäärin 12,7 kN. Veto-teräksen myötäämisen jälkeen tartunta heikkeni kuitenkin radikaalisti maksimomomenttialueella ja sen läheisyydessä teräksen suuren venymän ja kuroutuman seurauksesta.

32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin keskimääräiset taipumat olivat enimmillään noin 14 prosenttia suurempia kuormituksen alkupuolella, mutta tasoittuivat kuormituksen keskivaiheen jälkeen ja olivat noin 120 kN:n kuormalla hetkelisesti jopa 1,7 prosenttia pienempiä kuin vertailupalkkityypin keskimääräiset taipumat. 32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin kuormituksen alkupuolella esiintynyt vertailupalkkityyppiä voimakkaampi taipuminen antoi viitteitä mahdollisesta betonipeitteen halkeamisesta. Tangossa vaikuttanut teräsjännitys oli tuolloin noin 100–160 MPa. Laskennallisesti arvioidulla 500 MPa:n teräsjännitystä vastaavalla kokonaiskuormalla 32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin keskimääräinen taipuma oli vain noin 1,3 prosenttia vertailupalkkityypin taipumaa suurempi. Laskennallisella 152,8 kN:n maksimikuormalla 32 mm:n tangolla raudoitetun palkkityypin taipuma oli noin 5,5 prosenttia suurempi kuin vertailupalkkityypin taipuma samalla kuormalla.

1T32-palkkityypin halkeamaleveydet ja välit olivat huomattavasti suurempia kuin ohuemmilla tangoilla raudoitetun vertailupalkin halkeamaleveydet. Halkeamaleveyksien suhteelliset erot olivat suurimmillaan 40–80 kN:n kuormitusalueella, minne rakenteen käyttörajatilakuormakin sijoittunee. 80 kN:n kokonaiskuormalla 1T32-palkkityypin suurin halkeamaleveys oli noin 0,2 mm, mikä oli kaksinkertainen 4T16-palkkityypin halkeamaleveyteen nähden. 0,2 mm:n halkeamaleveyttä pidetään normaaliolosuhteissa ylärajana rakenteen säilyvyyden kannalta (Leskelä 2008, 70). Kun huomioidaan kuormituksen pitkäaikaisvaikutukset, voidaan olettaa, että 0,2 mm:n raja todennäköisesti ylittyisi kyseisellä tankotyypillä.

Koestuksen jälkeen 32 mm:n tangolla raudoitettujen ankkurointipalkkien alapinnoilla, missä betonipeite oli ohuimmillaan, havaittiin tangon suuntaisten pitkit-

pitkittäishalkeamien syntyneen tangon koko pituudelle. Pitkittäishalkeaman syntyminen kertoo tangon pintakuvioidin aiheuttaneiden halkaisuvoimien ylittäneen ankkurointimitoituksen perustana käytettävän betonin vetolujuuden. Palkeissa käytetty tiheä poikittainen rauditus rajoitti kuitenkin tangon suuntaisen pitkittäishalkeaman avautumista, mistä johtuen jännitykset pystyivät kehittymään halkeamisesta huolimatta harjaterästä ympäröivässä betonissa. Vaikka poikittainen rauditus mahdollistaa harjateräksen ja betonin yhteistoiminnan jatkumisen halkeamisen jälkeen, on tangon suuntaisella halkeamisella epäedullisia vaikutuksia muun muassa rakenteen jäykkyyteen tangon liukumien kasvaessa halkeama-alueella. Pitkittäishalkeaman syntyajankohtaa ja sen kehitystä ei pystytty määrittämään tarkasti, koska pitkittäishalkeilua ei tarkkailtu kuormituksen aikana. Tartuntatestitulokset ja ankkurointipalkkien kuormituskäyttäytyminen antoivat kuitenkin viitteitä siitä, että 32 mm:n tangolla pitkittäishalkeilua on saatanut alkaa muodostua jo huomattavasti alle käyttörajatilan kuormituksella.

Leikkausraudoituksen suunnittelussa käytettiin muusta suunnittelusta poiketen materiaaliosavarmuuskertoimia. Tämä saattoi osaltaan parantaa 32 mm tankojen ankkuroitavuutta ja rajoittaa tehokkaammin pitkittäishalkeamien avautumista. Leikkausraudoituksen suunnittelussa hakateräksen lujuutta alennettiin materiaaliosavarmuuskertoimella, mistä johtuen toteutunut hakaväli muodostui 15 prosenttia tiheämmäksi, kuin ominaislujuudella suunniteltuna.

Ankkurointitutkimuksissa paksujen terästen liukumaa indikoivien taipumien ja halkeamaleveyksien erot olisivat todennäköisesti muodostuneet suuremmiksi palkkityyppien välillä, mikäli vertailupalkkien kaikki mittaustulokset olisivat olleet käyttökelpoisia ja paremmin linjassa keskenään.

Tiheästä raudituksesta ja suhteellisen suuresta betonin runkoaineksen maksimiraekoosta johtuen koekappaleiden tiivistys osoittautui haasteelliseksi betonivaiheessa. Mahdollisista tiivistysvirheistä johtuen toisessa 16 mm:n tangolla raudoitettun vertailupalkin pääteräksiä ympäröivässä betonissa oli saattanut tapahtua jonkin asteista erottumista, millä saattoi olla vaakatasosuuntaisten terästen tartuntaa yleisesti heikentävä vaikutus. Todennäköisesti pääterästen heikommasta tartunnasta johtuen vertailupalkki 2/16 taipuman kehitys oli huo-

mattavasti voimakkaampaa kuin vertailupalkki 1/16 taipuman kehitys. Tämä kavensi keskimääräisten taipumien eroa palkkityyppien välillä.

Jos 32 mm:n tangolla raudoitettujen palkkien keskimääräisiä taipumia olisi vertailtu pelkästään paremmat tartuntaominaisuudet saavuttaneen vertailupalkin taipumiin, olisivat erot kuormituksen alku- ja loppupuolella kaksinkertaistuneet. Näin ollen on myös syystä oletettavaa, että erot palkkityyppien halkeamaleveysissä olisivat muodostuneet suuremmiksi, mikäli palkki 1/16:n halkeamaleveysmittauksista olisi saatu käyttökelpoisia tuloksia.

Vaikka tutkimuksen tavoitteena oli tutkia pelkästään tankopaksuuden vaikutusta tangon ankkuroituvuuteen, toimi toisena tuloksiin olennaisesti vaikuttavana parametrina myös suhteellinen harjapinta-ala. Mikäli tankojen suhteelliset harjapinta-alat olisivat olleet vertailukelpoisia, olisivat palkkityyppien taipumien ja taiputushalkeamaleveysien erot ankkurointitutkimuksissa todennäköisesti kaventuneet.

Tämän ja aikaisempien tutkimusten pohjalta voidaan todeta, että 32 mm tangon aiheuttamat suuret halkaisuvoimat ylittävät tankoa ympäröivän normaalibetonin vetolujuuskapasiteetin jo hyvin alhaisella teräsännityksellä, mistä johtuen ohuen betonipeitekerroksen tangonsuuntaista halkeamista ei 32 mm:n tangolla voida välttää. Näin ollen Eurokoodi 2:n standardissa SFS-EN 1992-1-1 + AC:2005 sivulla 131 tankojen ankkuroinnille asetettu pitkittäishalkeamattomuusehto ei todennäköisesti toteudu 32 mm:n tangoilla. Aiheeseen liittyvässä kirjallisuudessa yleisesti tartunnan kannalta erityisen haitallisena pidetty betonipeitteen halkeaminen ei kuitenkaan tämän tutkimuksen perusteella osoittautunut poikittaisraudoitetussa rakenteessa tartuntakapasiteettia olennaisesti alentavaksi ilmiöksi. Tartuntatestien ja ankkurointitutkimusten perusteella halkeaminen lisäsi tangon liukumaa jonkin verran suhteellisen pienillä teräsännityksen arvoilla, mutta ei rajoittanut merkittävästi rakenteen mekaanista toimintaa murtokapasiteettia lähestyttäessä. 32 mm tangon aiheuttaman voimakkaan halkeilutaipumuksen vuoksi rakenteen säilyvyysominaisuuksiin käyttörajatilassa tulee kuitenkin suhtautua varauksella.

Tutkimuksessa käytettyjen terästen pintageometristen tartuntaominaisuuksien huomattavan eron ja ylipitkien tartuntapituuksien (ilman varmuuskertoimia tarkasteltuina) vuoksi jäi epäselväksi, pystyisikö 32 mm:n harjaterästanko ankkuroimaan 500 MPa:n teräsjännitystä vastaavan vetovoiman heikentämättä rakenteen toimintaa ja käyttöikä, jos toteutuksessa käytettäisiin Eurokoodi 2:n suhteelliselle harjapinta-alalle ja betonipeitteelle asettamia vähimmäisvaatimuksia ja ankkurointipituus määritettäisiin ilman materiaaliosavarmuuskertoimia. Koska tässä tutkimuksessa ei asetettu rajoitteita kaikille edellä mainituille tekijöille, voisi nämä rajoitteet huomioon ottaville ja tangon liukumiin kriittisesti suhtautuville jatkotutkimuksille ajatella olevan aihetta.

Tutkimuksen läpivieminen oppilastyönä osoittautui erittäin haastavaksi, kun huomioidaan opinnäytetyön tekijän koulutustaso, kokemattomuus, tutkittavan asian vaikeusaste ja oppilaitoksen tutkimukseen käyttämät resurssit. Alkuvaiheen kiireen, kokemattomuuden ja standardien vaikeaselkoisuuden vuoksi tutkimuksessa tehtiin useita virheitä, joiden ymmärtämiseen ja korjaamiseen myöhemmin kului huomattavan paljon aikaa. Tehdyt virheet osoittivat hyvin sen, kuinka olennaista osaa tutkimussuunnitelma tutkimushankkeessa näyttelee ja kuinka tarkkaan tutkittavaan aiheeseen on perehdyttävä, mikäli tutkimuksesta halutaan luotettavia ja kattavia tuloksia. Tutkimuksen tarkemmalla ja selkeämmällä rajauksella olisi todennäköisesti saavutettu täsmällisempiä tutkimustuloksia. Tutkimuksessa tehtyjen virheiden esiintuominen ja ehdotukset niiden välttämiseksi jatkossa antanevat työlle kuitenkin lisäarvoa oppilasvetoisia jatkotutkimuksia silmällä pitäen.

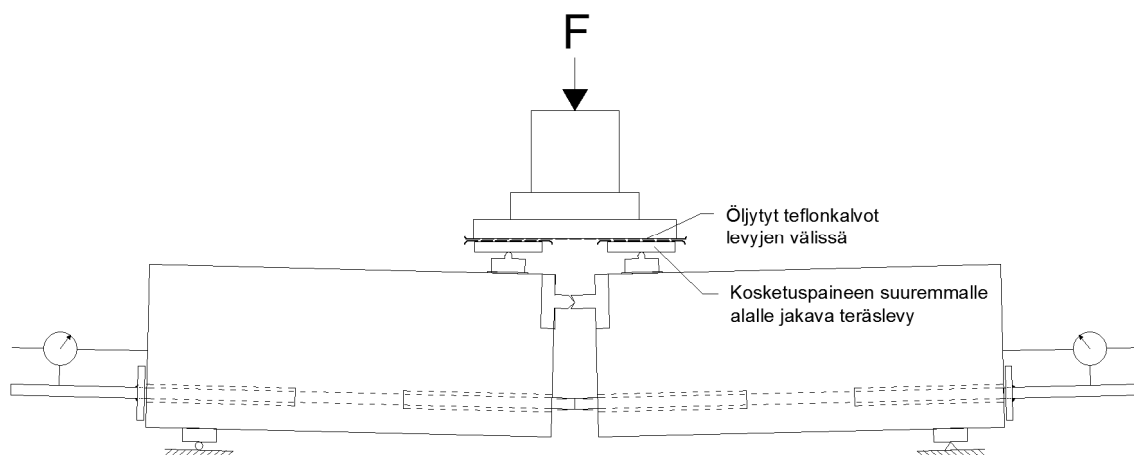
Vaativuudesta huolimatta työn aihe oli koulutuksen kannalta ihanteellinen, koska sen ympärille kiteytyi paljon olennaisia asioita betonirakenteiden toiminnan kannalta. Varsinkin tutkimuksen laboratoriovaihe konkretisoi ja syvensi ymmärrystä monien teräsbetonirakenteiden suunnittelukäytäntöihin liittyvien teorioiden osalta, jotka muuten peruskoulutuksen puitteissa olisivat jääneet epämääräisiksi.

Tutkimusmenetelmien kehitysideat

Tutkimus antoi viitteitä siitä, että paksujen tankojen ankkuroituvuuteen liittyviin täsmällisempiin jatkotutkimuksiin saattaisi olla aihetta. Tutkimuksen edetessä monissa käytetyissä menetelmissä ja tarkkailtavien asioiden määrässä havaittiin puutteita. Alla on esitetty ideoita joidenkin tässä tutkimuksessa esiintyneiden ongelmien korjaamiseksi sekä ajatuksia asioista ja ilmiöistä, joihin olisi ehkä syytä kiinnittää huomiota jatkossa.

Mikäli tutkimukset toteutetaan oppilastöinä ja niistä halutaan käyttökelpoisia tuloksia, on oppilaitoksen puolelta käytettävä riittävästi resursseja ja aikaa tutkimussuunnitelman ohjaukseen ja tutkimuksen esivalmisteluun, koska oppilaiden asiantuntemus on yleensä vähäistä tutkimuksen alkuvaiheessa. Lisäksi on syytä miettiä opinnäytetyöksi kaavailtavan tutkimuksen laajuutta ja kuormittavuutta, jotta työ on mahdollista suorittaa opintosuunnitelmassa sen tekemiseen varatussa ajassa. Tarvittaessa laajemman kokonaisuuden voisi jakaa osaluottain useammalle oppilaalle.

Tutkimuksessa ilmennyt kuormitussysteemien laakerointiongelma voisi olla ratkaistavissa kohtalaisen helposti ja pienillä investoinneilla käyttämällä kokonaisu-kuoman kahdeksi pistekuormaksi jakavien osien välissä kahta voideltua teflonkalvoa kitkan pienentämiseksi. Teflonkalvojen kestävyys kannalta on syytä kasvattaa myös kappaleiden kosketuspinta-alaa riittävän jäykkien teräslevyjen avulla. Laakeroinnin periaate on esitetty kuvassa 56.



KUVA 56. Esimerkki kuormituksen jakavien osien laakeroinnista

Vastaavaa laakerointiperiaatetta on käyttänyt aiemmin muun muassa Antti Kuusela Celsa Steel Service Oy:lle vuonna 2009 tekemissään tutkimuksissa suhteellisen harjapinta-alan vaikutuksista taivutushalkeamaleveyksiin. Tutkimusraportti on vapaasti luettavissa internetissä ja sen internetosoitetiedot löytyvät lähdeluettelosta.

Tulevissa tartuntajännitys-liukumamittauksissa olisi hyvä käyttää sellaista kuormitusjärjestelmää, joka mahdollistaisi tangon liukuman mittauksen digitaalisilla siirtymäantureilla ja tallentaisi mittaustulokset automaattisesti sekä riittävän tiheästi kuormituksen aikana. Näin mittauksista saataisiin tarkempaa tietoa aistinvaraisiin mittauksiin nähden varsinkin kuormituksen alku- ja loppuvaiheissa.

Muita aiheeseen liittyviä mittauksia voisi myös kehittää käyttämällä esimerkiksi vastusvenymäliuskoja halkeamaleveyksien ja mahdollisesti teräsännitysten tarkempaan määrittämiseen. Liuskojen avulla olisi kohtalaisen helppoa ja turvallista tutkia myös tartuntaan olennaisesti vaikuttavan tangonsuuntaisen pitkittäis-halkeaman syntyä ja kehitystä palkin alapinnalla kuormituksen kasvaessa. Olisi myös hyvä selvittää, pystyisikö vastusvenymäliuskoja käyttämään tangon liukumien tarkastelussa tartunta-alueen eri kohdissa. Vastusvenymäliuskojen toimintaperiaatteesta ja käyttökohteista sekä valmistajista ja jälleenmyyjistä löytyy runsaasti tietoa internetistä.

Kun kuormituksissa käytetään digitaalisia kuormitusjärjestelmän kanssa synkronoituja mittareita halkeamien, taipumien ja muiden tutkittavien ilmiöiden mittaamiseen, voidaan palkit kuormittaa tasaisesti ilman taukoja alusta loppuun saakka. Tällöin virumisesta tai muista mahdollisista syistä aiheutuvaa lisätaipumaa ei muodostu ja taipumat ovat suoraan vertailukelpoisia. Mikäli kuormituksen kehitys halutaan jostain syystä keskeyttää mahdollisten mittausten tai muiden ilmiöiden tutkimiseksi, on tarkasteluun käytettävät ajat hyvä standardisoida.

Kuormitusten video- ja stillkuvadokumentoinnista oli korvaamaton apu myöhemmin tuloksia ja kuormituksissa esiintyneitä ongelmia analysoitaessa. Kuormituksissa havaittujen ilmiöiden syntyhetkien tarkkaa määrittämistä videoista olisi helpottanut huomattavasti, mikäli kuva-alaan olisi saatu näkymään kuormi-

tuksen kehitys reaaliaikaisesti. Tämä olisi mahdollista toteuttaa esimerkiksi kuormitusjärjestelmään kytketyn siirrettävän näytön avulla.

Jatkotutkimuksissa koekappaleita on syytä valmistaa riittävän paljon, jotta mittauksista on mahdollista saada riittävästi käyttökelpoisia tuloksia. Osa koekappaleista kannattaa varata mittausten ja menetelmien harjoittelua varten. Harjoittelukoekappaleilla saatuja mittaustuloksia on myös hyvä analysoida ja jatkokäsitellä ennen varsinaisia mittauksia. Näin varmistutaan menetelmien ja laitteiden soveltuvuudesta tutkimukseen sekä vähennetään inhimillisten virheiden osuutta.

Mikäli jatkotutkimuksissa liukumille ja teräsjännityksille asetetaan rajoitteita, on teräksen ja betonin välillä tapahtuneen mekaanisen vuorovaikutuksen laatua ja liukumien suuruutta tartunta-alueen eri kohdissa hyvä tutkia myös paljastamalla lopuksi tutkittava teräs betonista kuormituksen jälkeen. Hakojen katkaisuun sekä betonipeitteen siistiin halkaisuun olisi ehkä hyvä käyttää timanttiterällä varustettua katkaisulaikkaa. Näin tanko saadaan esiin koko tartuntapituudelta sitä ympäröivää betonia mahdollisimman vähän vaurioittaen.

LÄHTEET

- Eurokoodi help desk. 2013. Eurokoodien historia. Sivuston ylläpito: Rakennusteollisuus RT ry/Timo Tikanoja. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi/Historiaa/contentstausta.htm>. Hakupäivä 17.8.2013.
- Jokela, Jukka 1979. Betonin ja raudoituksen yhteistoiminta ja suomalaisten betoniterästankojen tartuntaominaisuudet. Espoo: VTT.
- Jokela, Jukka – Pukki, Esa 1983. Harjatangon käyttöjännitysten kohottaminen pintakuviointin avulla. Espoo: VTT.
- Kuusela, Antti 2009. Betoniteräksen suhteellisen harjapinta-alan vaikutus taivutetun rakenteen halkeamaleveyteen. Helsinki: Metropolia ammattikorkeakoulu, tekniikan ja liikenteen yksikkö. Insinööriyö. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200906043680>. Hakupäivä 6.9.2013.
- Leskelä, Matti 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008, by 210. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy.
- NA SFS-EN 1992-1-1 liite 7. 2009. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1 Eurocode 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt [verkkodokumentti]. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <http://www.eurocodes.fi/1992/1992-1-1/NA%20SFS-EN1992-1-1-YM.pdf>. Hakupäivä 6.9.2013.
- Nykyri, Pekka 1986. Raudoituksen liukuman ja jännityksen määrittäminen halkeamassa tartunta-liukumariippuvuuden perusteella. Espoo: VTT.
- Nykyri, Pekka 1990. Betoniraudoituksen ankkurointi. Espoo: VTT.
- Nykyri, Pekka 2008. Standardiehdotuksen mukaisen betoniteräksen B500B soveltuvuus rakentamismääräyskokoelman B4 mukaiseen rakenteiden suunnitteluun [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=98599>. Hakupäivä 6.9.2013.

Nykyri, Pekka 2012-2013. Yliopettaja, Oulun seudun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö. Haastattelut 2012-2013.

Pesonen, Timo 2012. Tutkimuksen laboratoriovaiheen dokumentointi. Valokuvia 1.2.–15.4.2012.

Ronkainen, Mauri 1985. Betonin ja raudoituksen välinen yhteistoiminta ja sen matemaattinen mallintaminen. Oulu: Oulun yliopisto, rakentamistekniikan osasto. Diplomityö.

SFS 1266. 2006. Kuumasinkityt betonirauδοitteet. Vaatimukset pinnoitteelle. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS 1268. 2010. Betoniteräkset. Hitsattava kuumavalssattu harjatanko B500B. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 1992-1-1 + AC. 2005. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN 10080. 2005. Hitsattavat betoniteräkset. Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 15630-1. 2002. Betoni- ja jänneteräkset. Koemenetelmät. Osa 1: Betoniteräkset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Tiehallinto. 2003. Rauδοitteiden korroosioasteen määrittäminen. Tiehallinnon selvityksiä 48/2003. Saatavissa:
<http://alk.tiehallinto.fi/sillat/julkaisut/ruosteaste4803.pdf>. Hakupäivä 6.9.2013.

VTT Expert Services Oy. 2012. Luettelo valmistajista, joiden kanssa VTT Expert Services Oy:llä on laadunvalvontasopimus [verkkodokumentti]. Helsinki: VTT Expert Services, Jukka Kiiskinen. Saatavissa:
http://www.vttexpertservices.fi/files/services/exp/brochures_fin/Laadunvalvontaluettelo_betoniterakset_raudoitteetjne.pdf. Hakupäivä 6.9.2013.

LIITTEET

Liite 1 Ankkurointipalkkien suunnitelmat: Betonipeitepaksuudet

Liite 2 Ankkurointipalkkien suunnitelmat: Taivutuskestävyydet

Liite 3 Ankkurointipalkkien suunnitelmat: Leikkausmitoitus

Liite 4 Ankkurointipalkkien suunnitelmat: Raudoituskuvat

Liite 5 Betonin lujuusmittaustulokset

Liite 6 Terästen lujuus- ja geometriaominaisuuksien mittaustulokset

Liite 7 Tartuntatestien mittaustulokset

Liite 8 Ankkurointitutkimusten mittaustulokset

Liite 9 Valokuvia tutkimuksen laboratoriovaiheesta

PALKKITYYPPIEN BETONIPEITEPAKSUUDET:

Tavoitteena mahdollisimman ohut betonipeite.

Lähtötietoja:

Valitaan rasitusluokka XC1 --> Ohuin rasitusluokan määräämä betonipeite

Normaalibetonin tavoitelujuus C25/30

Käytetään mittapoikkeaman ΔC_{dev} :n arvona pienintä mahdollista.

Päätangon paksuus $\phi_{pt} := 16 \text{ mm}$

Hakatangon paksuus $\phi_h := 6 \text{ mm}$

Molempien palkkityyppien sivujen ja yläpinnan betonipeite:

Betonipeitteen nimellisarvo:

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev}$$

Betonipeitteen vähimmäisarvo:

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

Tartunnan vaatima betonipeitteen paksuus päätangon pintaan

$$C_{min.b} := \max(\phi_{pt} - \phi_h, \phi_h)$$

$$C_{min.b} = 10 \cdot \text{mm}$$

Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo: (taulukko 4.3N (FI))

$$C_{min.dur} := 10 \text{ mm} \quad \text{Rasitusluokka XC1}$$

$$C_{min.dur} = 10 \cdot \text{mm}$$

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

$$C_{min} = 10 \cdot \text{mm}$$

Mittapoikkeama:

$$\Delta C_{dev} := 5 \text{ mm} \quad \text{Tarkasti hallittavat valmistusolosuhteet}$$

$$C_{nom} := C_{min} + \Delta C_{dev} = 15 \cdot \text{mm}$$

Molempien palkkityyppien sivuilla ja yläpinnoilla

1T32-palkkityypin alapinnan betonipeite:

Päätangon paksuus $\phi_{pt} := 32\text{mm}$

Hakatangon paksuus $\phi_h := 6\text{mm}$

Betonipeitteen nimellisarvo:

Betonipeitteen vähimmäisarvo C_{\min} :

Tartunnan vaatima betonipeitteen paksuus päätangon pintaan

$$C_{\min.b} := \max(\phi_{pt} - \phi_h, \phi_h)$$

$$C_{\min.b} = 26 \cdot \text{mm}$$

Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo: (taulukko 4.3N (FI))

$C_{\min.dur} := 10\text{mm}$ Rasitusluokka XC1

$$C_{\min.dur} = 10 \cdot \text{mm}$$

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

$$C_{\min} = 26 \cdot \text{mm}$$

Mittapoikkeama:

$$\Delta C_{\text{dev}} := 5\text{mm}$$

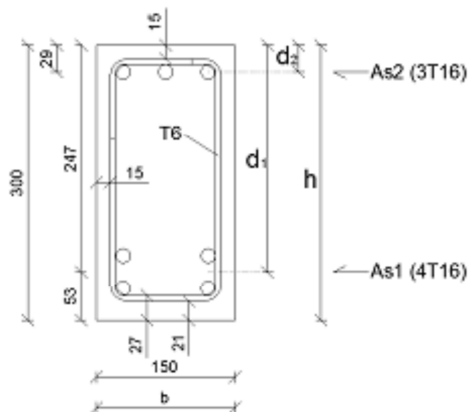
Tarkasti hallittavat valmistusolosuhteet

$$C_{\text{nom}} := C_{\min} + \Delta C_{\text{dev}} = 31 \cdot \text{mm} \quad \text{1T32-palkkityypin alapinnalla}$$

4T16-PALKKITYYPIN LASKENNALLINEN KESTÄVYYS

Koestuspäivä 2.4.2012

Palkin poikkileikkaus:



Poikkileikkauksen dimensiot ja raudoitteet:

Poikkileikkauksen leveys:	$b := 150 \text{ mm}$
Poikkileikkauksen korkeus:	$h := 300 \text{ mm}$
Betonipeite alaosa:	$c_{\text{nom1}} := 21 \text{ mm}$
Betonipeite yläosa ja sivut:	$c_{\text{nom2}} := 15 \text{ mm}$
Haan paksuus:	$\phi_h := 6 \text{ mm}$
Vetorausdoitus:	
- Tankopaksuus:	$\phi_1 := 16 \text{ mm}$
- Määrä:	$n_1 := 4$
Puristusraudoitus:	
- Tankopaksuus:	$\phi_2 := 16 \text{ mm}$
- Määrä:	$n_2 := 3$

Lujuudet:

Betoni keskimääräinen lujuus testipäivänä: (kolmen olosuhtelieriön keskiarvolujuus)	$f_{\text{cm}} := 34.3 \text{ MPa}$	(ikä 38 vrk.)
Betoniin murtopuristuma:	$\epsilon_{\text{cu}} := -0.0035$	
Puristusvyöhykkeen tehollisen korkeuden määrittelykerroin	$\lambda := 0.8$	($f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa}$)
Betoniin suurin raekoko:	$d_g := 16 \text{ mm}$	
Terästyyppi: A500HW		
Teräksen keskimääräinen vetolujuus: (vetokoetulosten keskiarvo)	$f_{\text{ym}} := 551 \text{ MPa}$	
Betoniteräksen kimmokerroin:	$E_s := 200000 \text{ MPa}$	

Tehollinen korkeus:

$$i := 1 .. 2$$

$$A_{s_i} := n_i \cdot \frac{(\phi_i)^2}{4} \cdot \pi \quad A_{s_i} = \begin{pmatrix} 804.2 \\ 603.2 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}^2$$

$$(a_{\min} := \max(\phi_1, d_g + 3\text{mm}, 20\text{mm})) \quad (a_{\min}) = 20 \cdot \text{mm}$$

$$\left(d_1 := h - \phi_h - \phi_1 - \frac{1}{2} \cdot a_{\min} - c_{\text{nom}1} \right) \quad (d_1) = 247 \cdot \text{mm}$$

$$d_2 := \phi_h + \frac{\phi_2}{2} + c_{\text{nom}2} \quad d_2 = 29 \cdot \text{mm}$$

Mekaaninen raudoitussuhde:

Koska puristusraudoituksen määrä on ylimitoitettu, se ei saavuta myötölujuutta vetoterästen myödetessä. Puristusraudoituksen jännitystilä määritetään iteratiivisesti. Iteraation avulla saadaan selville puristusvyöhykkeen todellinen korkeus X.

$$\sigma_{s,2} := -344.7436 \text{ MPa} \quad \text{Arvioitu puristusraudoituksen jännitys}$$

$$\omega_1 := \frac{A_{s_1} \cdot f_{ym}}{b \cdot d_1 \cdot f_{cm}} \quad \omega_2 := \frac{A_{s_2} \cdot |\sigma_{s,2}|}{b \cdot d_1 \cdot f_{cm}} \quad \omega = \begin{pmatrix} 0.349 \\ 0.164 \end{pmatrix}$$

Raudoituksen myötääminen:

Käytetyn terästyypin keskimääräinen myötövenymä:

$$\varepsilon_{ym} := \frac{f_{ym}}{E_s} \quad \varepsilon_{ym} = 0.00276$$

Vetorausoituksesta toimii puristusraudoituksen kanssa määrä A_{s2} .
Betonipoikkileikkauksen kanssa toimii jäljelle jäävä osuus $A_{s1} - A_{s2}$.

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta := \omega_1 - \omega_2 \quad \beta = 0.185$$

Puristusvyöhykkeen korkeus

$$X := d_1 \cdot \frac{\beta}{\lambda} \quad X = 57 \cdot \text{mm}$$

Raudoituksen venymät, sekä veto että puristus

$$\varepsilon_{s_i} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(1 - \frac{d_i}{X} \right) \quad \varepsilon_s = \begin{pmatrix} 0.01163 \\ -0.00172 \end{pmatrix}$$

Saavuttaako rauditus murtotilassa laskentalujuuden ?

1<=> ok

Vetorausoititus

$$\varepsilon_{s_1} \geq \varepsilon_{ym} = 1$$

Puristusraudoitus

$$|\varepsilon_{s_2}| \geq |-\varepsilon_{ym}| = 0 \quad \text{Puristusraudoitus ei myötää!}$$

$$\left(\sigma_{s,2} := \varepsilon_{s_2} \cdot E_s \right)$$

$$\left(\sigma_{s,2} \right) = -344.74 \cdot \text{MPa}$$

Puristusvyöhykkeen korkeudella X toteutunut puristusraudoituksen jännitys. Iteraatio OK!

Keskimääräinen momenttikestävyys:

Puristusvyöhykkeen ottaman momentin suhteellinen arvo

$$\mu_c := \beta \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \quad \mu_c = 0.168$$

Taivutuskestävyys, betonin osuus

$$M_{Rm.c} := \mu_c \cdot b \cdot (d_1)^2 \cdot f_{cm} \quad M_{Rm.c} = 52.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Taivutuskestävyys, puristusraudoituksen osuus

$$M_{Rm.sc} := A_{s2} \cdot (d_1 - d_2) \cdot |\sigma_{s,2}| \quad M_{Rm.sc} = 45.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

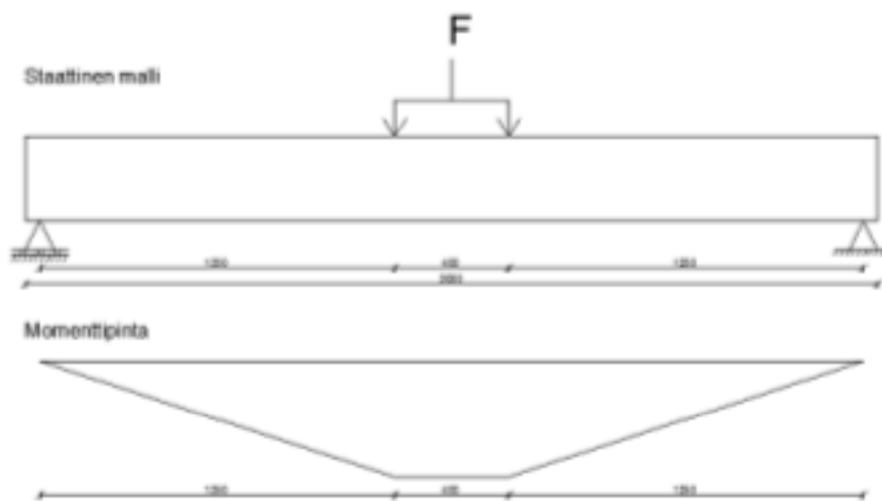
Momenttikestävyys kokonaisuudessaan

$$M_{Rm} := M_{Rm.c} + M_{Rm.sc}$$

Keskimääräinen momenttikestävyys

$$M_{Rm} = 98.0496 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Palkkityypin kokonaiskuormakestävyys:



Tuen leveys 100 mm

Tehokas jänneväli 2,9 m

Palkin omapaino:

$$q := 0.15 \text{ m} \cdot 0.3 \text{ m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1.125 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

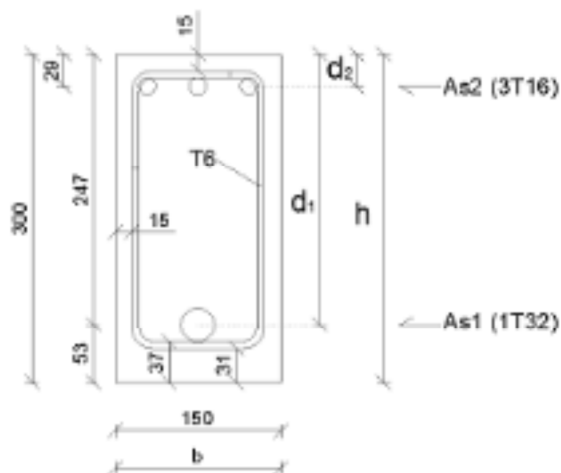
Myötöhetken suurin keskimääräinen kokonaiskuorma F:

$$F := \frac{\left[M_{Rm} - q \cdot \frac{(1.25 \text{ m})^2}{2} \right] \cdot 2}{1.25 \text{ m}} \quad F = 155.5 \cdot \text{kN}$$

1T32-PALKKITYYPIN LASKENNALLINEN KESTÄVYYS

Koestuspäivä 3.4.2012

Palkin poikkileikkaus:



Poikkileikkauksen dimensiot ja raudoitteet:

Poikkileikkauksen leveys:	$b := 150 \text{ mm}$
Poikkileikkauksen korkeus:	$h := 300 \text{ mm}$
Betonipeite alaosa:	$c_{\text{nom1}} := 31 \text{ mm}$
Betonipeite yläosa ja sivut:	$c_{\text{nom2}} := 15 \text{ mm}$
Haan paksuus:	$\phi_h := 6 \text{ mm}$
Vetorausoituis:	
- Tankopaksuus:	$\phi_1 := 32 \text{ mm}$
- Määrä:	$n_1 := 1$
Puristusrauditus:	
- Tankopaksuus:	$\phi_2 := 16 \text{ mm}$
- Määrä:	$n_2 := 3$

Lujuudet:

Betoni keskimääräinen lujuus testipäivänä: (kolmen olosuhdelierion keskiarvolujuus)	$f_{\text{cm}} := 34.7 \text{ MPa}$	(ikä 39 vrk.)
Betonin murtopuristuma:	$\epsilon_{\text{cu}} := -0.0035$	
Puristusvyöhykkeen tehollisen korkeuden määrittävä kerroin	$\lambda := 0.8$	($f_{\text{ck}} \leq 50 \text{ MPa}$)
Betonin suurin raekoko:	$d_g := 16 \text{ mm}$	
Terästyppi: A500HW		
Teräksen keskimääräinen vetolujuus: (vetokoetulosten keksi-arvo)	$f_{\text{ym}} := 541 \text{ MPa}$	
Betoniteräksen kimmokerroin:	$E_s := 200000 \text{ MPa}$	

Tehollinen korkeus:

$$i := 1..2$$

$$A_{s_i} := n_i \cdot \frac{(\phi_i)^2}{4} \cdot \pi$$

$$A_{s_i} = \begin{pmatrix} 804.2 \\ 603.2 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}^2$$

$$d_1 := h - \phi_h - \frac{\phi_1}{2} - c_{\text{nom}1}$$

$$d_1 = 247 \cdot \text{mm}$$

$$d_2 := \phi_h + \frac{\phi_2}{2} + c_{\text{nom}2}$$

$$d_2 = 29 \cdot \text{mm}$$

Mekaaninen raudoitussuhde:

Koska puristusraudoituksen määrä on ylimitoitettu, se ei saavuta myötölujuutta vetoterästen myödaesä. Puristusraudoituksen jännitystilä määritetään iteratiivisesti. Iteraation avulla saadaan selville puristusvyöhykkeen X todellinen korkeus.

$$\sigma_{s,2} := -336.1645 \text{ MPa} \quad \text{Arvioitu puristusraudoituksen jännitys}$$

$$\omega_1 := \frac{A_{s1} \cdot f_{ym}}{b \cdot d_1 \cdot f_{cm}} \quad \omega_2 := \frac{A_{s2} \cdot |\sigma_{s,2}|}{b \cdot d_1 \cdot f_{cm}} \quad \omega = \begin{pmatrix} 0.338 \\ 0.158 \end{pmatrix}$$

Raudoituksen myötääminen:

Käytetyn terästyypin keskimääräinen myötövenymä:

$$\varepsilon_{ym} := \frac{f_{ym}}{E_s} \quad \varepsilon_{ym} = 0.0027$$

(Vetorausoituksesta toimii puristusraudoituksen kanssa määrä A_{s2} .
Betoni-poikkileikkauksen kanssa toimii jäljelle jäävä osuus $A_{s1} - A_{s2}$.)

Puristusvyöhykkeen suhteellinen korkeus

$$\beta := \omega_1 - \omega_2 \quad \beta = 0.181$$

Puristusvyöhykkeen korkeus

$$X := d_1 \cdot \frac{\beta}{\lambda} \quad X = 56 \cdot \text{mm}$$

Raudoituksen venymät, sekä veto että puristus

$$\varepsilon_{s_i} := \varepsilon_{cu} \cdot \left(1 - \frac{d_i}{X}\right) \quad \varepsilon_s = \begin{pmatrix} 0.01199 \\ -0.00168 \end{pmatrix}$$

Saavuttaako rauditus murtotilassa laskentalujuuden ?

1<=> ok

Vetorausoititus

$$\varepsilon_{s1} \geq \varepsilon_{ym} = 1$$

Puristusraudoitus

$$|\varepsilon_{s2}| \geq |-\varepsilon_{ym}| = 0 \quad \text{Puristusraudoitus ei myötää!}$$

$$\sigma_{s,2} := \varepsilon_{s2} \cdot E_s \quad \sigma_{s,2} = -336.16 \cdot \text{MPa}$$

Puristusvyöhykkeen korkeudella $X = 56 \text{ mm}$ toteutunut puristusraudoituksen jännitys. Iteraatio OK!

Keskimääräinen momenttikestävyys:

Puristusvyöhykkeen ottaman momentin suhteellinen arvo

$$\mu_c := \beta \cdot \left(1 - \frac{\beta}{2}\right) \quad \mu_c = 0.164$$

Taivutuskestävyys, betonin osuus

$$M_{Rm.c} := \mu_c \cdot b \cdot (d_1)^2 \cdot f_{cm} \quad M_{Rm.c} = 52.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Taivutuskestävyys, puristusraudoituksen osuus

$$M_{Rm.sc} := A_{s2} \cdot (d_1 - d_2) \cdot |\sigma_{s,2}| \quad M_{Rm.sc} = 44.2 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

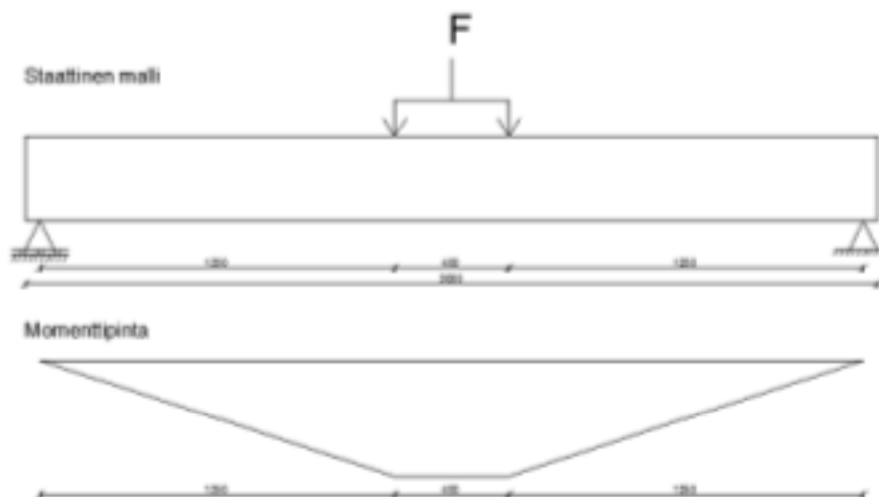
Momenttikestävyys kokonaisuudessaan

$$M_{Rm} := M_{Rm.c} + M_{Rm.sc}$$

Keskimääräinen momenttikestävyys

$$M_{Rm} = 96.404 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Palkkityypin kokonaiskuormakestävyys:



Tuen leveys 100 mm Tehokas jänneväli 2,9 m

Palkin omapaino:

$$q := 0.15\text{m} \cdot 0.3\text{m} \cdot 25 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 1.125 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

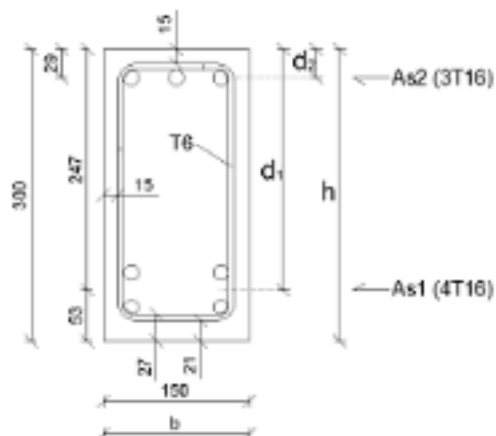
Myötöhetken suurin keskimääräinen kokonaiskuorma F:

$$F := \frac{\left[M_{Rm} - q \cdot \frac{(1.25\text{m})^2}{2} \right] \cdot 2}{1.25\text{m}} \quad F = 152.8 \cdot \text{kN}$$

ANKKUROINTIPALKKIEN LEIKKAUSMITOITUS

Molemmissa palkkityypeissä käytettiin samaa leikkausraudoitusta. Mitoitukseen valittiin 4T16-palkkityyppi, koska sen laskennallinen taivutuskestävyys oli hieman suurempi kuin 1T32-palkkityypillä.

Palkin poikkileikkaus:



Lähtöarvoja:

- Poikkileikkauksen leveys	$b := 150\text{mm}$
- Poikkileikkauksen korkeus	$h := 300\text{mm}$
- Suojabetonikerros (palkin alaosassa)	$c_{\text{nom}} := 21\text{mm}$
- Pääraudoitus	
Tankopaksuus	$\phi_1 := 16\text{mm}$
Määrä	$n_1 := 4$
- Hakatangon paksuus	$\phi_h := 6\text{mm}$
- Betonin lujuusluokka C25/30 =>	$f_{\text{ck}} := 25\text{MPa}$ (Tavoitelujuus)
- Rauditus A500HW	
- Runkoaineksen suurin raekoko	$d_g := 16\text{mm}$
- Leikkausrasituksen mitoitussarvo	$V_{\text{Ed}} := 77.75\text{ kN}$

Materiaalien osavarmuusluvut:

$$\gamma_c := 1.5 \quad \gamma_s := 1.15$$

Lujuudet:

$$f_{\text{ck}} = 25 \cdot \text{MPa} \quad f_{\text{cm}} := f_{\text{ck}} + 8\text{MPa} \quad f_{\text{cm}} = 33 \cdot \text{MPa}$$

$$\alpha_{\text{cc}} := 0.85 \quad f_{\text{cd}} := \alpha_{\text{cc}} \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_c} \quad f_{\text{cd}} = 14.17 \cdot \text{MPa}$$

$$f_{\text{yk}} := 500\text{MPa} \quad f_{\text{yd}} := \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_s} \quad f_{\text{yd}} = 434.8 \cdot \text{MPa}$$

Poikkileikkaussuureet:

Tehollinen korkeus:

$$a_{\min} := \max(\phi_1, d_g + 3\text{mm}, 20\text{mm}) \quad (a_{\min}) = 20 \cdot \text{mm}$$

$$d_1 := h - c_{\text{nom}} - \phi_h - \phi_1 - \frac{a_{\min}}{2} \quad d_1 = 247 \cdot \text{mm}$$

Leikkausmitoitus (EC 6.2):

$$\text{Leikkausrasitus} \quad V_{\text{Ed}} = 77.8 \cdot \text{kN}$$

Merkinnät:

$$d := d_1 \quad b_w := b$$

Leikkausraudoituksen antama leikkauskestävyys (EC 6.2.3)

$$V_{\text{Rd.s}} := \frac{A_{\text{sw}}}{s} \cdot z \cdot f_{\text{ywd}} \cdot (\cot(\theta) + \cot(\alpha))$$

Pystyhaat

$$\alpha := 90\text{deg} \quad \cot(\alpha) = 0$$

Mitoitusehto:

$$V_{\text{Rd.s}} \geq V_{\text{Ed}}$$

Puristussauvan kaltevuus:

$$\theta := 45\text{deg} \quad \cot(\theta) = 1$$

Valitaan hakatangon paksuus ja leikkeisyys:

$$\phi_h = 6 \cdot \text{mm} \quad n_h := 2$$

Leikkausraudoituksen pinta-ala

$$A_{\text{sw}} := n_h \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi_h}{2}\right)^2 \quad A_{\text{sw}} = 57 \cdot \text{mm}^2$$

$$z := 0.9d \quad z = 222 \cdot \text{mm}$$

$$f_{\text{ywd}} := f_{\text{yd}}$$

Hakavälin maksimi

$$s := \frac{A_{\text{sw}} \cdot z \cdot f_{\text{ywd}}}{V_{\text{Ed}}} \quad s = 70 \cdot \text{mm}$$

Leikkausraudoitus kaksileikkeinen T6K70

Leikkauskestävyyden maksimi (EC 6.2.3)

$$V_{\text{Rd.max}} := \alpha_{\text{cw}} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot \frac{f_{\text{cd}}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)}$$

$$v_1 := 0.6 \cdot \left(1 - \frac{f_{\text{ck}}}{250\text{MPa}}\right) \quad v_1 = 0.54$$

$$\alpha_{cw} := 1 \quad \text{Jännittämätön rakenne}$$

$$V_{Rd,max} := \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot \frac{f_{cd}}{\cot(\theta) + \tan(\theta)}$$

$$V_{Rd,max} = 127.545 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,max} \geq V_{Ed} = 1 \quad \text{OK!}$$

Vähimmäisleikkausraudoitusalan tarkistus (EC 6.2)

$$\frac{A_{sw}}{s} \geq 0.08 \cdot b_w \cdot \sin(\alpha) \cdot \left(\sqrt{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}}} \cdot \frac{\text{MPa}}{f_{yk}} \right)^2$$

Hakavälin maksimi valitulla T6 tangolla

$$s_{max} := \frac{A_{sw}}{0.08 \cdot b_w \cdot \sin(\alpha)} \cdot \sqrt{\frac{\text{MPa}}{f_{ck}}} \cdot \frac{f_{yk}}{\text{MPa}} = 0.471 \text{ m}$$

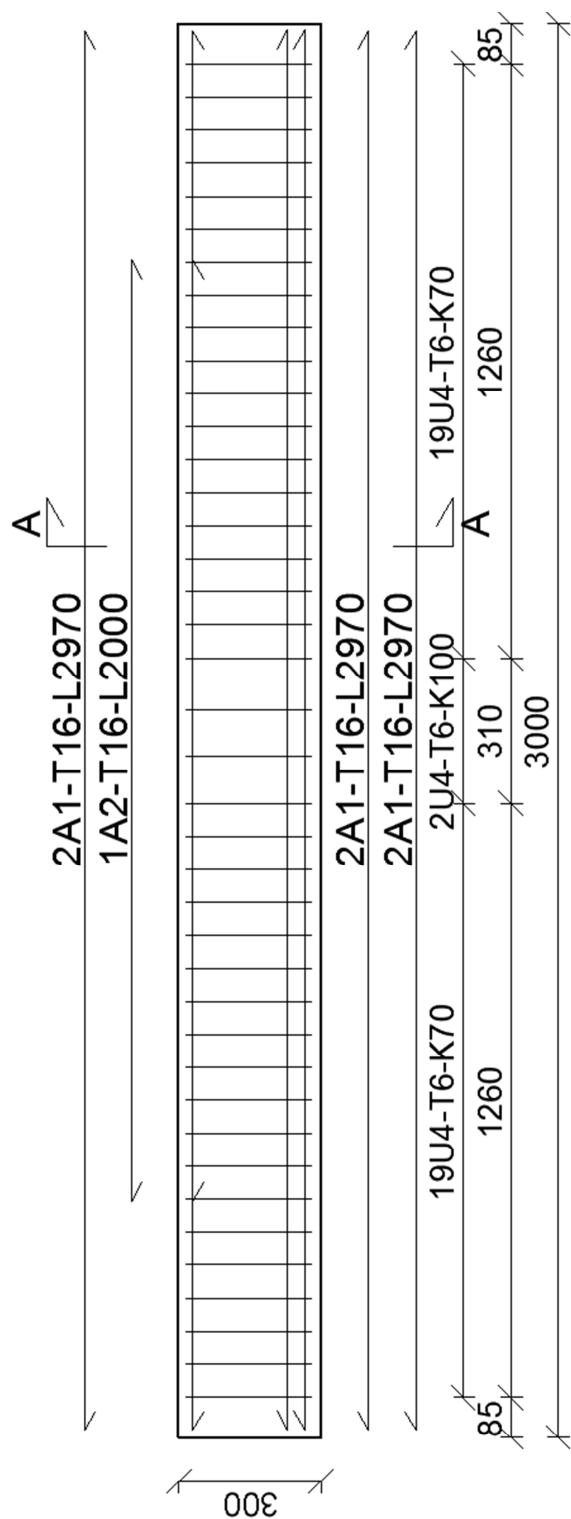
Valittu raudoitus T6K70 ylittää reilusti vähimmäisraudoitusvaatimuksen

Taivutustelan vähimmäishalkaisija ja haan ankkurointipituus

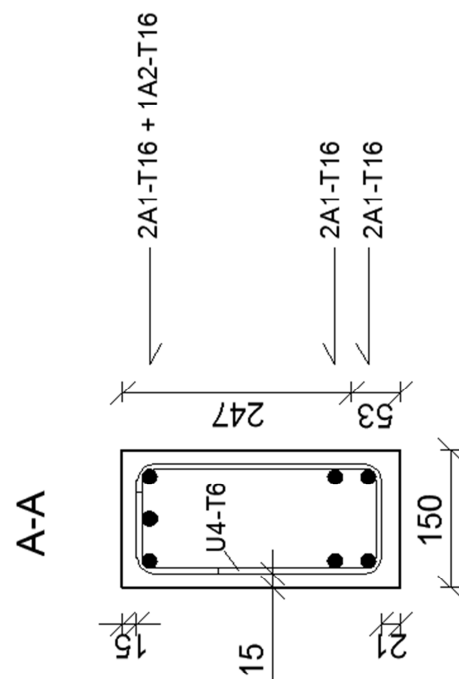
$$\phi_m := 4 \cdot \phi_h = 24 \cdot \text{mm}$$

Hakojen vähimmäisankkurointipituus $10 \cdot \phi_h$ tai 70 mm.

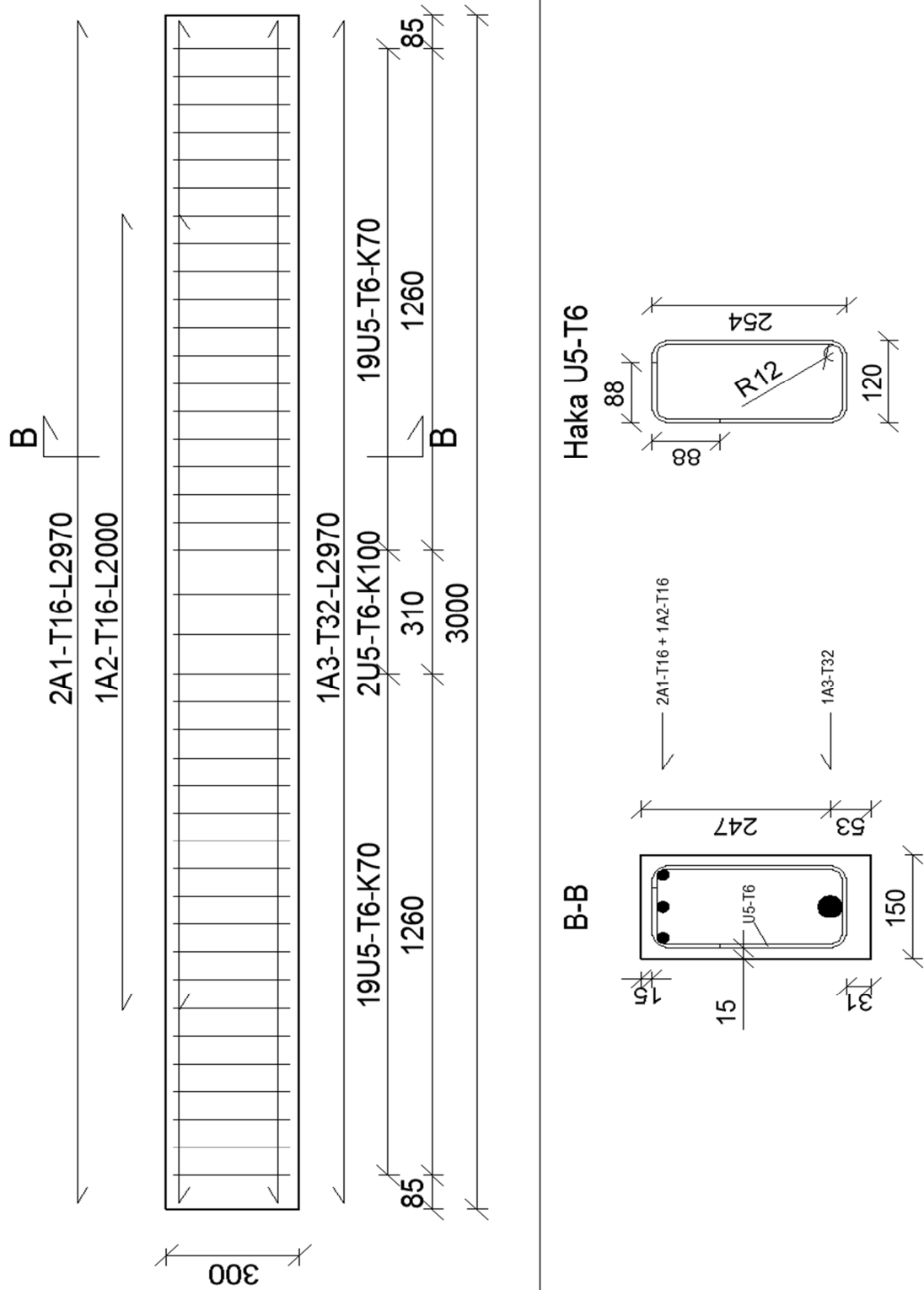
Käytetään ankkurointipituutena 70 mm.



Haka U4-T6



KUVA 1. 4T16-palkkityypin raudoitus



KUVA 2. 1T32-palkkityypin raudoitus

TAULUKKO 1. Vesisäilytyksessä olleiden kuutioiden 28 vuorokauden mittaustulokset

Koekappale	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	$f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	$f_{ck}/f_{ck,cube}$	f_{ck} [N/mm ²]
1	150	150	150	7923	2350	803	35,7	0,815	29,1
2	150	150	150	7901	2340	809	36,0	0,814	29,3
3	150	150	150	7893	2340	797	35,4	0,816	28,9
4	150	150	150	7876	2330	784	34,8	0,818	28,5
5	150	149	150	7849	2340	806	36,1	0,814	29,3
6	150	150	150	7874	2330	769	34,2	0,820	28,0

TAULUKKO 2. Olosuhdelieriöiden mittaustulokset 26.3.2012

Koekappale	d [mm]	h [mm]	A [mm ²]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f_c [N/mm ²]
4	150	297	17671	12275	2340	584	33,0
5	150	296	17671	12228	2340	485	27,4 ⁾
10	149	296	17437	12114	2350	544	31,2
						f_m	32,1

⁾ Hylätty

TAULUKKO 3. Olosuhdelieriöiden mittaustulokset 27.3.2012

Koekappale	d [mm]	h [mm]	A [mm ²]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f_c [N/mm ²]
6	149	296	17437	12084	2340	558	32,0
9	150	297	17671	12261	2340	597	33,8
12	149	295	17437	12113	2360	556	31,9
						f_m	32,6

TAULUKKO 4. Olosuhdelieriöiden mittaustulokset 2.4.2012

Koekappale	d [mm]	h [mm]	A [mm ²]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f_c [N/mm ²]
1	150	295	17672	12164	2330	600	34,0
2	150	297	17672	12311	2350	613	34,7
3	149	296	17437	12186	2360	595	34,1
						f_m	34,3

TAULUKKO 5. Olosuhdelieriöiden mittaustulokset 3.4.2012

Koekappale	d [mm]	h [mm]	A [mm ²]	m [g]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f_c [N/mm ²]
7	149	297	17437	12164	2350	618	35,4
8	151	296	17908	12562	2370	648	36,2
11	150	296	17672	12250	2340	575	32,5
						f_m	34,7

TAULUKKO 1. Terästen vetokoetulokset

Koekappale			Vetokoe						
Teräslaatu	Ø [mm]	Tunnus	Myötövoima $F_{eH}^{1)}$ [kN]	Myötöraja $R_{eH}^{2)}$ [N/mm ²]	Suurin voima $F_m^{3)}$ [kN]	Murtolujuus $R_m^{4)}$ [N/mm ²]	Murtovenymä		Kokonais- tasa- venymä $A_{gt}^{6)}$ [%]
							$A_{10}^{5)}$ [%]	$A_{200}^{5)}$ [%]	
A500HW	16	1	117	583 ^{***)}	135	669	- ⁾	-	- ⁾
A500HW	16	2	114	565 ^{***)}	131	651	- ⁾	-	9,3
A500HW	16	a	110	549	129	642	- ^{**)}	-	10,1
A500HW	16	b	112	555	130	646	14,4	-	9,8
A500HW	16	c	110	548	128	639	14,7	-	10,0
A500HW	32	-	435	541	525	653	-	16,8	-
<u>Tuotestandardien SFS 1215 ja SFS 1268 mukaiset vaatimukset:</u> 1) min. Ø = 16mm, 101 kN; Ø = 32, 402 kN 2) min. 500 N/mm ² 3) min. Ø = 16 mm, 111 kN; Ø = 32, 442 kN 4) min. 550 N/mm ² 5) min. A_{10} = 12 %; A_{200} = 12 % 6) min. 5 %.					*) Alkumittamerkinnot puutteelliset murtovenymän määrittelyyn **) Murtokurouma liian lähellä kiinnityselintä ***) Hylätty tulos, kuormitusnopeus liian suuri				

Tilaaaja	Oulun seudun ammattikorkeakoulu Tekniikan yksikkö, Pekka Nykyri Kotkantie 1, 90250 Oulu
Tilaus	Sähköposti 16.2.2012, P. Nykyri
Yhteyshenkilöt	VTT Expert Services Oy Tuotepäällikkö Jukka Kiiskinen ja asiantuntija Aki Neuvonen Kemistintie 3, Espoo, PL 1001, 02044 VTT Puh. 020 722 6909 ja 020 722 6910 Faksi 020 722 7003 Sähköposti: jukka.kiiskinen@vtt.fi ja aki.neuvonen@vtt.fi

Tehtävä **Kuumavalssattujen 16 ja 32 mm A500HW-harjatankojen testaus**

Näytteet

27.2.2012 tilaaja toimitti VTT:hen 32 mm A500HW harjatankoja vetokokeita varten sekä 16 ja 32 mm A500HW harjatankoja suhteellisen harjapinta-alan mittausta varten.

Koetulokset

Testauspäivät: 16. – 23.3.2012.

Taulukko 1. Vetokoe (SFS-EN ISO 15630-1, SFS 1215).

Koekappale			Vetokoe					
tuote	d mm	sulatus	nro	myötö- voima F _{eH} kN	myötö- raja R _{eH} N/mm ²	Suurin voima F _m kN	Murto- lujuus R _m N/mm ²	Murto- venymä A _{200mm} %
A500HW	32	-	1	435	541	525	653	16,8

Taulukko 2. Harjamatit (SFS-EN ISO 15630-1/SFS 1215).

Näyte			Pituus- massa m_l kg/m	Harjaväli a mm	Suhteellinen harjapinta-ala f_R 1)	$f_R/f_{R,min}$
d mm	sulatusnro	no.				
<i>Vaatus</i>			1,52... 1,67	<i>maks. 25,6</i>	0,063	<i>min. 1,00</i>
16	-	1	1,54	20,7 / 10,3	0,085	1,35
<i>Vaatus</i>			6,06... 6,57	<i>maks. 51,2</i>	0,063	<i>min. 1,00</i>
32	-	1	6,39	37,8 / 19,0	0,055	0,87

1) f_R on laskettu kaavasta:

$$\frac{\Sigma S_{pr}}{\pi \cdot d \cdot a}, \text{ jossa}$$

ΣS_{pr} on poikittaisharjojen projektiopinta-alasumma
d on tangon nimellishalkaisija ja
a on harjaväli.

Espoo 29.3.2012



Jukka Kiiskinen
Tuotepäällikkö


Aki Neuvonen
Asiantuntija**Jakelu**- Tilaaja
- ArkistoAlkuperäinen
alkuperäinen.

TAULUKKO 1. Tartuntatestipalkki 1/16:n mittaustulokset

Tartuntatestipalkki 1/16 Ø16 mm								
F [kN]	Alkuperäiset			Korjatut			Liukuma	
	Suhdekerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	Suhdekerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	S ₁ [mm]	S ₂ [mm]
0	1.5	0	0.0	1.299	0	0.0	0.000	0.000
2.5	1.5	19	0.5	1.299	16	0.4	0.000	0.000
5	1.5	37	0.9	1.299	32	0.8	0.000	0.000
7.5	1.5	56	1.4	1.299	48	1.2	0.000	0.000
10	1.5	75	1.9	1.299	65	1.6	0.000	0.000
12.5	1.5	93	2.3	1.299	81	2.0	0.000	0.003
15	1.5	112	2.8	1.299	97	2.4	0.000	0.004
17.5	1.5	131	3.3	1.299	113	2.8	0.005	0.005
20	1.5	149	3.7	1.299	129	3.2	0.005	0.005
22.5	1.5	168	4.2	1.299	145	3.6	0.005	0.005
25	1.5	187	4.7	1.299	162	4.0	0.005	0.006
27.5	1.5	205	5.1	1.299	178	4.4	0.005	0.007
30	1.5	224	5.6	1.299	194	4.8	0.010	0.008
32.5	1.5	243	6.1	1.299	210	5.3	0.010	0.009
35	1.5	261	6.5	1.299	226	5.7	0.010	0.009
37.5	1.5	280	7.0	1.299	242	6.1	0.010	0.010
40	1.5	299	7.5	1.299	258	6.5	0.010	0.010
42.5	1.5	317	7.9	1.299	275	6.9	0.010	0.010
45	1.5	336	8.4	1.299	291	7.3	0.010	0.011
47.5	1.5	354	8.9	1.299	307	7.7	0.010	0.012
50	1.5	373	9.3	1.299	323	8.1	0.015	0.013
52.5	1.5	392	9.8	1.299	339	8.5	0.015	0.015
55	1.5	410	10.3	1.299	355	8.9	0.020	0.015
57.5	1.5	429	10.7	1.299	372	9.3	0.020	0.018
60	1.5	448	11.2	1.299	388	9.7	0.025	0.020
62.5	1.5	466	11.7	1.299	404	10.1	0.030	0.020
65	1.5	485	12.1	1.299	420	10.5	0.030	0.023
67.5	1.5	504	12.6	1.299	436	10.9	0.040	0.028
70	1.5	522	13.1	1.299	452	11.3	0.042	0.031
72.5	1.5	541	13.5	1.299	469	11.7	0.050	0.060
75	1.5	560	14.0	1.299	485	12.1	0.060	0.075
77.5	1.5	578	14.5	1.299	501	12.5	0.070	0.085
80	1.5	597	14.9	1.299	517	12.9	0.100	0.100
82.5	1.5	616	15.4	1.299	533	13.3	0.120	0.117
85	1.5	634	15.9	1.299	549	13.7	0.145	0.142
87.5	1.5	653	16.3	1.299	565	14.1	0.180	0.180
90	1.5	672	16.8	1.299	582	14.5	0.200	0.210
92.5	1.5	690	17.3	1.299	598	14.9	0.260	0.260
95	1.5	709	17.7	1.299	614	15.3	0.340	0.340
97.5	1.5	728	18.2	1.299	630	15.8	0.430	0.435
100	1.5	746	18.7	1.299	646	16.2	0.560	0.600
100.86	1.5	753	18.8	1.299	652	16.3	-	Murto

Testi päättyi tartunnan yhtäkkiseen pettämiseen 2-puoliskossa. Tartunnan petettyä palkki taipui voimakkaasti ja kuormitus jouduttiin keskeyttämään, koska kuormitussysteemin taipumavara loppui kesken.

TAULUKKO 2. Tartuntatestipalkki 2/16:n mittaustulokset

Tartuntatestipalkki 2/16 Ø16 mm								
F [kN]	Alkuperäiset			Korjatut			Liukuma	
	Suhde- kerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	Suhde- kerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	S ₁ [mm]	S ₂ [mm]
0	1.5	0	0.0	1.299	0	0.0	0.000	0.000
2.5	1.5	19	0.5	1.299	16	0.4	0.000	0.000
5	1.5	37	0.9	1.299	32	0.8	0.000	0.000
7.5	1.5	56	1.4	1.299	48	1.2	0.000	0.000
10	1.5	75	1.9	1.299	65	1.6	0.000	0.001
12.5	1.5	93	2.3	1.299	81	2.0	0.000	0.001
15	1.5	112	2.8	1.299	97	2.4	0.000	0.002
17.5	1.5	131	3.3	1.299	113	2.8	0.000	0.002
20	1.5	149	3.7	1.299	129	3.2	0.002	0.002
22.5	1.5	168	4.2	1.299	145	3.6	0.002	0.002
25	1.5	187	4.7	1.299	162	4.0	0.002	0.002
27.5	1.5	205	5.1	1.299	178	4.4	0.002	0.002
30	1.5	224	5.6	1.299	194	4.8	0.002	0.002
32.5	1.5	243	6.1	1.299	210	5.3	0.002	0.003
35	1.5	261	6.5	1.299	226	5.7	0.005	0.005
37.5	1.5	280	7.0	1.299	242	6.1	0.005	0.007
40	1.5	299	7.5	1.299	258	6.5	0.005	0.012
42.5	1.5	317	7.9	1.299	275	6.9	0.005	0.015
45	1.5	336	8.4	1.299	291	7.3	0.010	0.020
47.5	1.5	354	8.9	1.299	307	7.7	0.010	0.024
50	1.5	373	9.3	1.299	323	8.1	0.010	0.031
52.5	1.5	392	9.8	1.299	339	8.5	0.012	0.036
55	1.5	410	10.3	1.299	355	8.9	0.015	0.044
57.5	1.5	429	10.7	1.299	372	9.3	0.020	0.052
60	1.5	448	11.2	1.299	388	9.7	0.022	0.062
62.5	1.5	466	11.7	1.299	404	10.1	0.025	0.072
65	1.5	485	12.1	1.299	420	10.5	0.030	0.081
67.5	1.5	504	12.6	1.299	436	10.9	0.033	0.092
70	1.5	522	13.1	1.299	452	11.3	0.040	0.107
72.5	1.5	541	13.5	1.299	469	11.7	0.047	0.129
75	1.5	560	14.0	1.299	485	12.1	0.058	0.152
77.5	1.5	578	14.5	1.299	501	12.5	0.070	0.177
80	1.5	597	14.9	1.299	517	12.9	0.100	0.207
82.5	1.5	616	15.4	1.299	533	13.3	0.130	0.242
85	1.5	634	15.9	1.299	549	13.7	0.165	0.280
87.5	1.5	653	16.3	1.299	565	14.1	0.210	0.332
90	1.5	672	16.8	1.299	582	14.5	0.250	0.422
92.5	1.5	690	17.3	1.299	598	14.9	0.310	0.592
94.78	1.5	707	17.7	1.299	612	15.3	0.390	Murto

Testi päättyi tartunnan yhtäkkiseen pettämiseen 2-puoliskossa. Pettäneen puoliskon jatkoliukumaa ei pystytty pysäyttämään vajerilukoilla, minkä vuoksi 1-puolta ei pystytty kuormittamaan murtoon saakka.

TAULUKKO 3. Tartuntatestipalkki 3/16:n mittaustulokset

Tartuntatestipalkki 3/16 Ø16 mm								
F [kN]	Alkuperäiset			Korjatut			Liukuma	
	Suhde- kerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	Suhde- kerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	S ₁ [mm]	S ₂ [mm]
0	1.5	0	0.0	1.299	0	0.0	0.000	0.000
2.5	1.5	19	0.5	1.299	16	0.4	0.000	0.000
5	1.5	37	0.9	1.299	32	0.8	0.000	0.000
7.5	1.5	56	1.4	1.299	48	1.2	0.000	0.000
10	1.5	75	1.9	1.299	65	1.6	0.000	0.000
12.5	1.5	93	2.3	1.299	81	2.0	0.000	0.001
15	1.5	112	2.8	1.299	97	2.4	0.000	0.002
17.5	1.5	131	3.3	1.299	113	2.8	0.000	0.003
20	1.5	149	3.7	1.299	129	3.2	0.000	0.003
22.5	1.5	168	4.2	1.299	145	3.6	0.005	0.004
25	1.5	187	4.7	1.299	162	4.0	0.005	0.004
27.5	1.5	205	5.1	1.299	178	4.4	0.005	0.005
30	1.5	224	5.6	1.299	194	4.8	0.007	0.005
32.5	1.5	243	6.1	1.299	210	5.3	0.007	0.006
35	1.5	261	6.5	1.299	226	5.7	0.010	0.007
37.5	1.5	280	7.0	1.299	242	6.1	0.010	0.008
40	1.5	299	7.5	1.299	258	6.5	0.010	0.008
42.5	1.5	317	7.9	1.299	275	6.9	0.010	0.008
45	1.5	336	8.4	1.299	291	7.3	0.010	0.009
47.5	1.5	354	8.9	1.299	307	7.7	0.015	0.010
50	1.5	373	9.3	1.299	323	8.1	0.018	0.012
52.5	1.5	392	9.8	1.299	339	8.5	0.022	0.015
55	1.5	410	10.3	1.299	355	8.9	0.030	0.018
57.5	1.5	429	10.7	1.299	372	9.3	0.038	0.020
60	1.5	448	11.2	1.299	388	9.7	0.045	0.026
62.5	1.5	466	11.7	1.299	404	10.1	0.055	0.031
65	1.5	485	12.1	1.299	420	10.5	0.067	0.038
67.5	1.5	504	12.6	1.299	436	10.9	0.080	0.048
70	1.5	522	13.1	1.299	452	11.3	0.092	0.061
72.5	1.5	541	13.5	1.299	469	11.7	0.125	0.088
75	1.5	560	14.0	1.299	485	12.1	0.140	0.110
77.5	1.5	578	14.5	1.299	501	12.5	0.175	0.146
80	1.5	597	14.9	1.299	517	12.9	0.205	0.178
82.5	1.5	616	15.4	1.299	533	13.3	0.250	0.216
85	1.5	634	15.9	1.299	549	13.7	0.310	0.268
87.5	1.5	653	16.3	1.299	565	14.1	0.360	0.318
90	1.5	672	16.8	1.299	582	14.5	0.420	0.348
92.5	1.5	690	17.3	1.299	598	14.9	0.650	0.458
93.6	1.5	699	17.5	1.299	605	15.1	Murto	-
95	1.5	709	17.7	-	-	-	> 3 mm	-
97.5	1.5	728	18.2	1.299	630	15.8	-	0.803
97.98	1.5	731	18.3	1.299	633	15.8	-	Murto

Testattavaan teräkseen oli hitsattu jatkoliukuman estävät laipat 3 mm päähän palkin päistä. 1-puoliskon tartunta petti yhtäkkisesti kokonaiskuorman ollessa 93,6 kN. Tartunnan pettämisen jälkeen kyseisen puoliskon teräs liukui välittömästi yli 3 mm, kunnes teräkseen hitsattu laippa pysäytti jatkoliukuman. Tämän jälkeen kuormitusta jatkettiin, kunnes 2-puoliskon tartunta petti ja liukuma ryntäsi.

TAULUKKO 4. Tartuntatestipalkki 4/32:n mittaustulokset

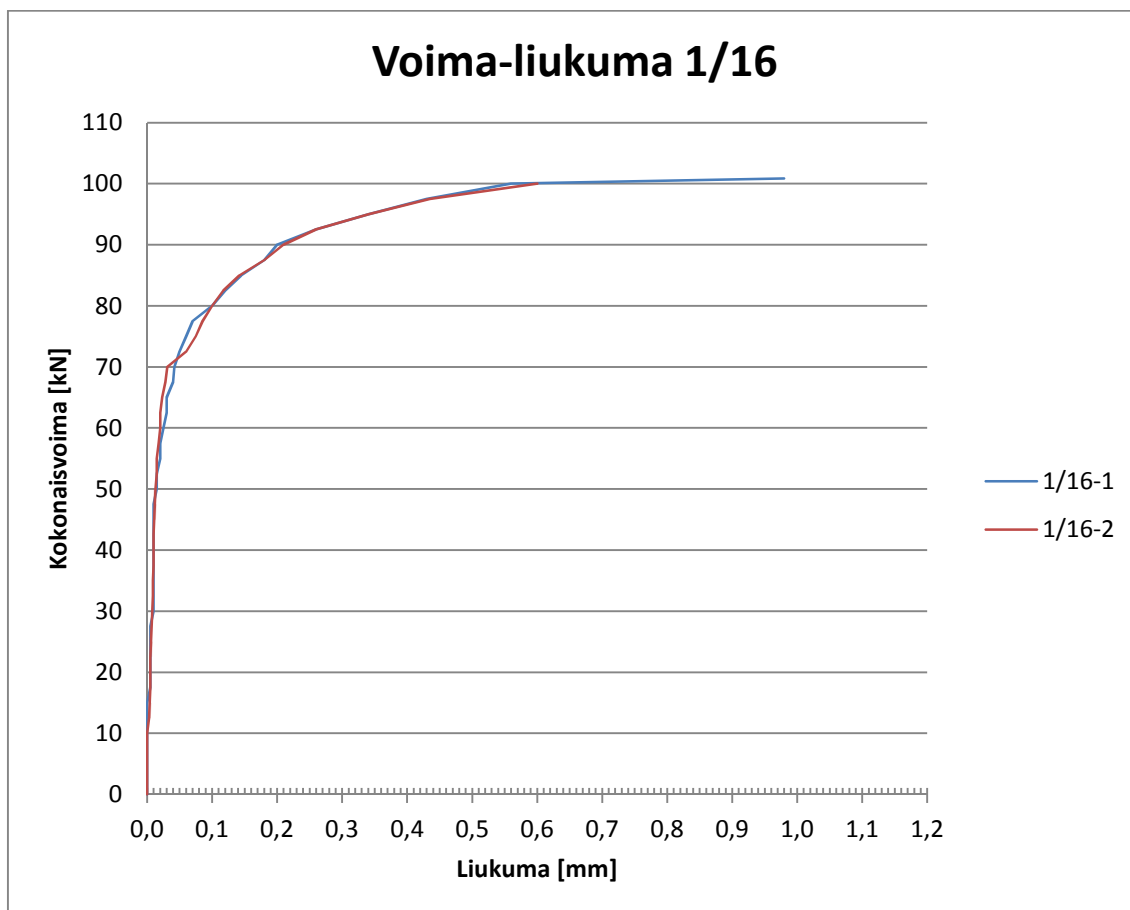
Tartuntatestipalkki 4/32 Ø32 mm								
F [kN]	Alkuperäiset			Korjatut			Liukuma	
	Suhde- kerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	Suhde- kerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	S ₁ [mm]	S ₂ [mm]
0	1.5	0	0.0	1.299	0	0.0	0.000	0.000
10	1.5	19	0.5	1.299	16	0.4	0.000	0.002
20	1.5	37	0.9	1.299	32	0.8	0.000	0.007
30	1.5	56	1.4	1.299	48	1.2	0.000	0.008
40	1.5	75	1.9	1.299	65	1.6	0.005	0.010
50	1.5	93	2.3	1.299	81	2.0	0.010	0.011
60	1.5	112	2.8	1.299	97	2.4	0.010	0.012
70	1.5	131	3.3	1.299	113	2.8	0.015	0.015
80	1.5	149	3.7	1.299	129	3.2	0.020	0.019
90	1.5	168	4.2	1.299	145	3.6	0.022	0.021
100	1.5	187	4.7	1.299	162	4.0	0.030	0.028
110	1.5	205	5.1	1.299	178	4.4	0.050	0.042
120	1.5	224	5.6	1.299	194	4.8	0.070	0.095
130	1.5	243	6.1	1.299	210	5.3	0.115	0.148
140	1.5	261	6.5	1.299	226	5.7	0.150	0.200
150	1.5	280	7.0	1.299	242	6.1	0.200	0.262
160	1.5	299	7.5	1.299	258	6.5	0.270	0.327
170	1.5	317	7.9	1.299	275	6.9	0.300	0.400
180	1.5	336	8.4	1.299	291	7.3	0.370	0.482
190	1.5	354	8.9	1.299	307	7.7	0.430	0.580
200	1.5	373	9.3	1.299	323	8.1	0.500	0.688
210	1.5	392	9.8	1.299	339	8.5	0.580	0.820
220	1.5	410	10.3	1.299	355	8.9	0.690	1.170
230	1.5	429	10.7	1.299	372	9.3	0.800	1.215
240	1.5	448	11.2	1.299	388	9.7	0.950	1.510
250	1.5	466	11.7	1.299	404	10.1	1.130	1.960
260	1.5	485	12.1	1.299	420	10.5	1.480	2.720
263.7	1.5	492	12.3	1.299	426	10.7	-	3 mm
269	1.5	502	12.5	1.299	435	10.9	3 mm	-

Tartunnan pettäminen tapahtui tasaisesti liukumanopeuden kiihtyessä loppua kohti.

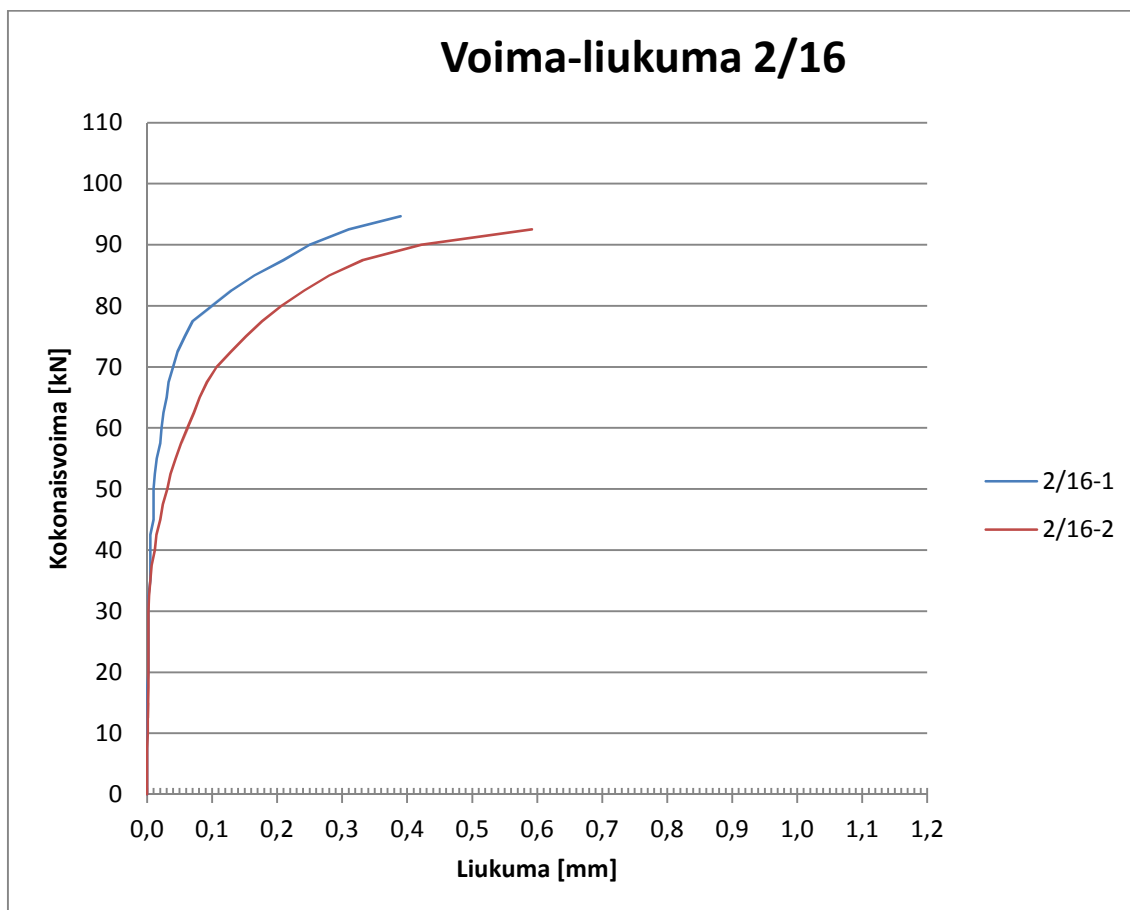
TAULUKKO 5. Tartuntatestipalkki 5/32:n mittaustulokset

Tartuntatestipalkki 5/32 Ø32 mm								
F [kN]	Alkuperäiset			Korjatut			Liukuma	
	Suhdekerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	Suhdekerroin	σ_s [N/mm ²]	τ_b [N/mm ²]	S_1 [mm]	S_2 [mm]
0	1.5	0	0.0	1.299	0	0.0	0.000	0.000
10	1.5	19	0.5	1.299	16	0.4	0.000	0.001
20	1.5	37	0.9	1.299	32	0.8	0.000	0.004
30	1.5	56	1.4	1.299	48	1.2	0.002	0.006
40	1.5	75	1.9	1.299	65	1.6	0.008	0.008
50	1.5	93	2.3	1.299	81	2.0	0.010	0.009
60	1.5	112	2.8	1.299	97	2.4	0.010	0.010
70	1.5	131	3.3	1.299	113	2.8	0.010	0.012
80	1.5	149	3.7	1.299	129	3.2	0.015	0.016
90	1.5	168	4.2	1.299	145	3.6	0.020	0.019
100	1.5	187	4.7	1.299	162	4.0	0.025	0.020
110	1.5	205	5.1	1.299	178	4.4	0.060	0.026
120	1.5	224	5.6	1.299	194	4.8	0.130	0.031
130	1.5	243	6.1	1.299	210	5.3	0.180	0.111
140	1.5	261	6.5	1.299	226	5.7	0.220	0.149
150	1.5	280	7.0	1.299	242	6.1	0.280	0.191
160	1.5	299	7.5	1.299	258	6.5	0.320	0.242
170	1.5	317	7.9	1.299	275	6.9	0.385	0.297
180	1.5	336	8.4	1.299	291	7.3	0.440	0.351
190	1.5	354	8.9	1.299	307	7.7	0.510	0.417
200	1.5	373	9.3	1.299	323	8.1	0.600	0.493
210	1.5	392	9.8	1.299	339	8.5	0.710	0.583
220	1.5	410	10.3	1.299	355	8.9	0.840	0.686
230	1.5	429	10.7	1.299	372	9.3	1.010	0.829
240	1.5	448	11.2	1.299	388	9.7	1.250	1.019
250	1.5	466	11.7	1.299	404	10.1	1.660	1.324
260	1.5	485	12.1	1.299	420	10.5	2.440	1.854
264.5	1.5	493	12.3	1.299	427	10.7	3 mm	-
267.8	1.5	500	12.5	1.299	433	10.8	-	3 mm

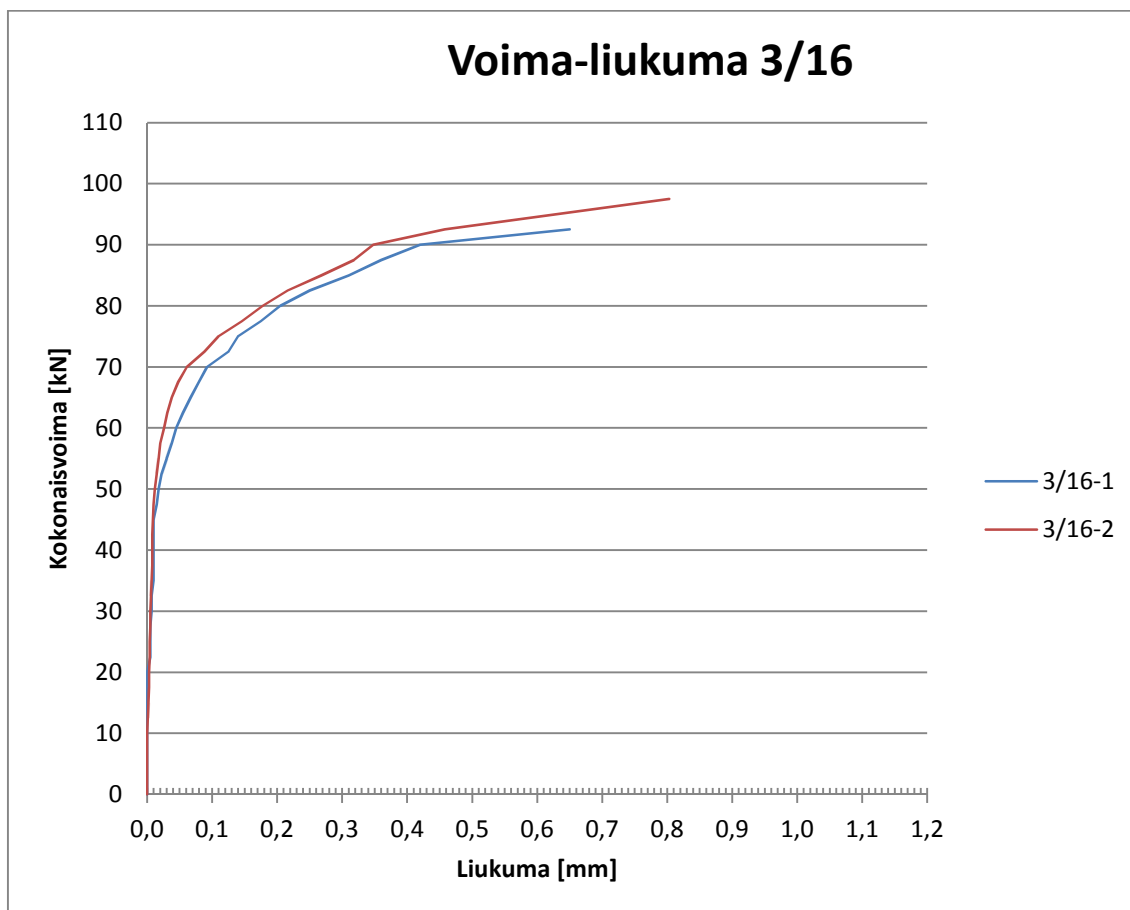
Tartunnan pettäminen tapahtui tasaisesti liukumanopeuden kiihtyessä loppua kohti.



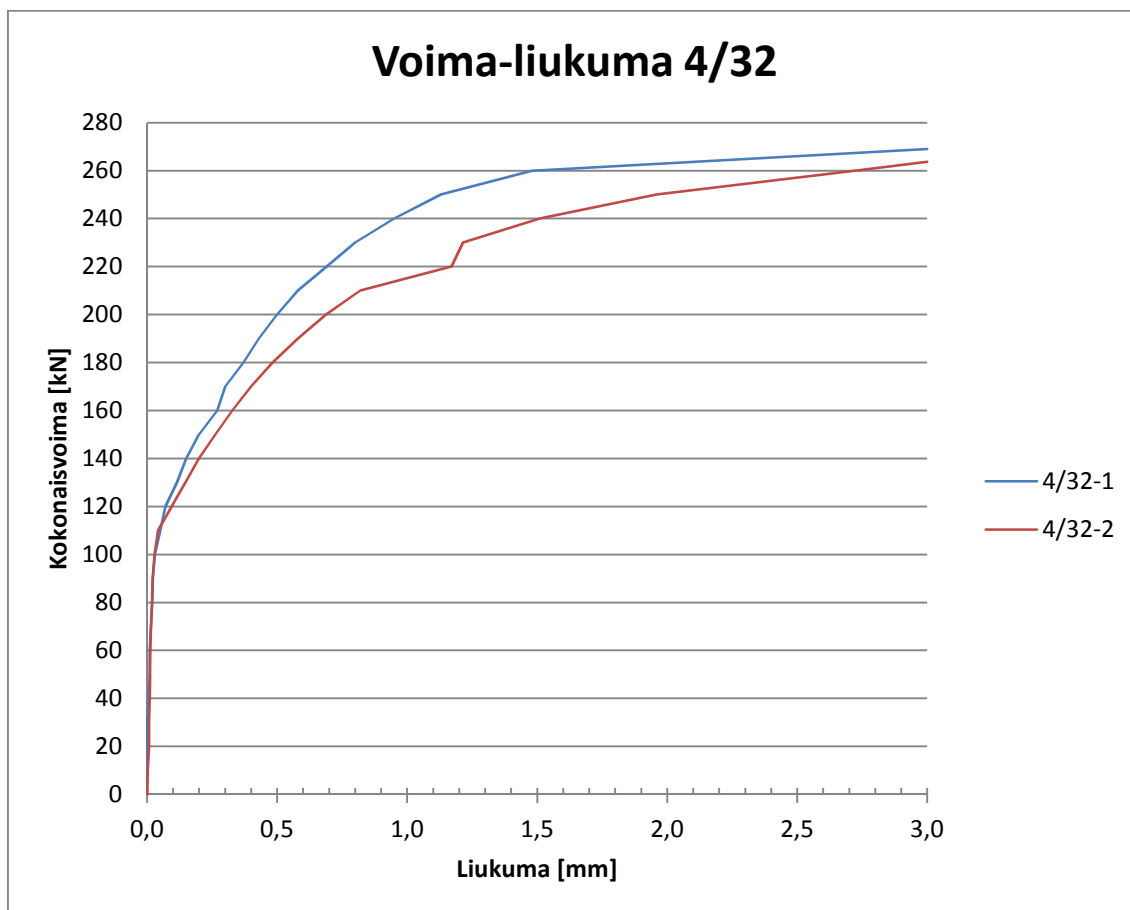
KUVA 1. Tartuntatestipalkki 1/16:n voima-liukumakuvaaja



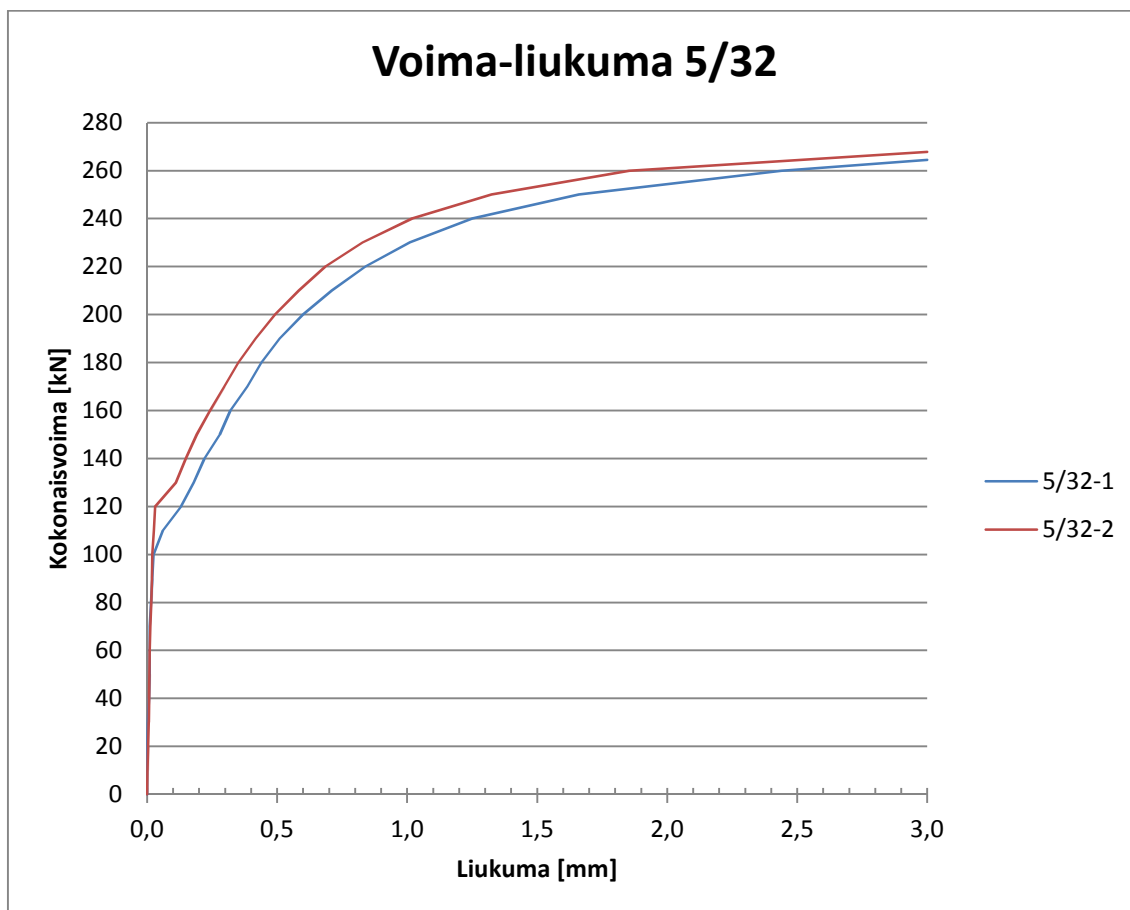
KUVA 2. Tartuntatestipalkki 2/16:n voima-liukumakuvaaja



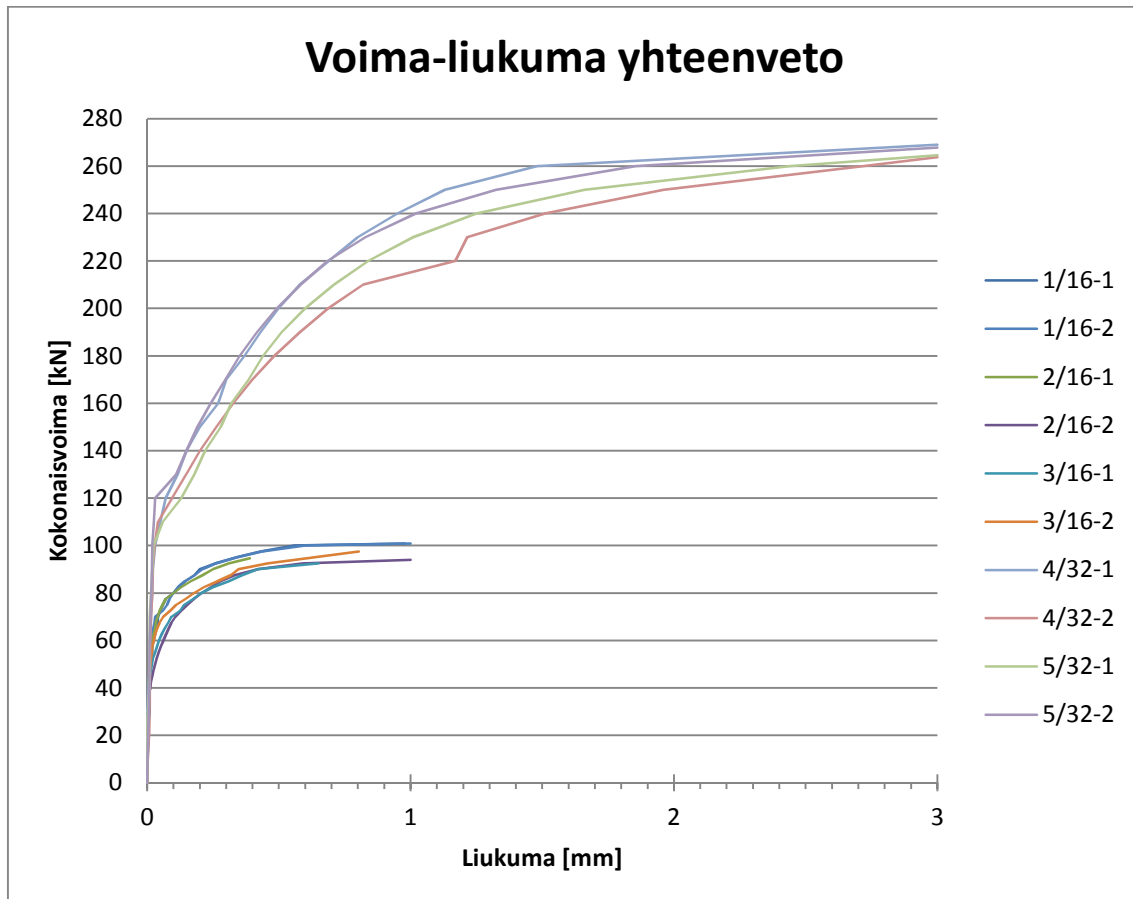
KUVA 3. Tartuntatestipalkki 3/16:n voima-liukumakuvaaja



KUVA 4. Tartuntatestipalkki 4/32:n voima-liukumakuvaaja



KUVA 5. Tartuntatestipalkki 5/32:n voima-liukumakuvaaja

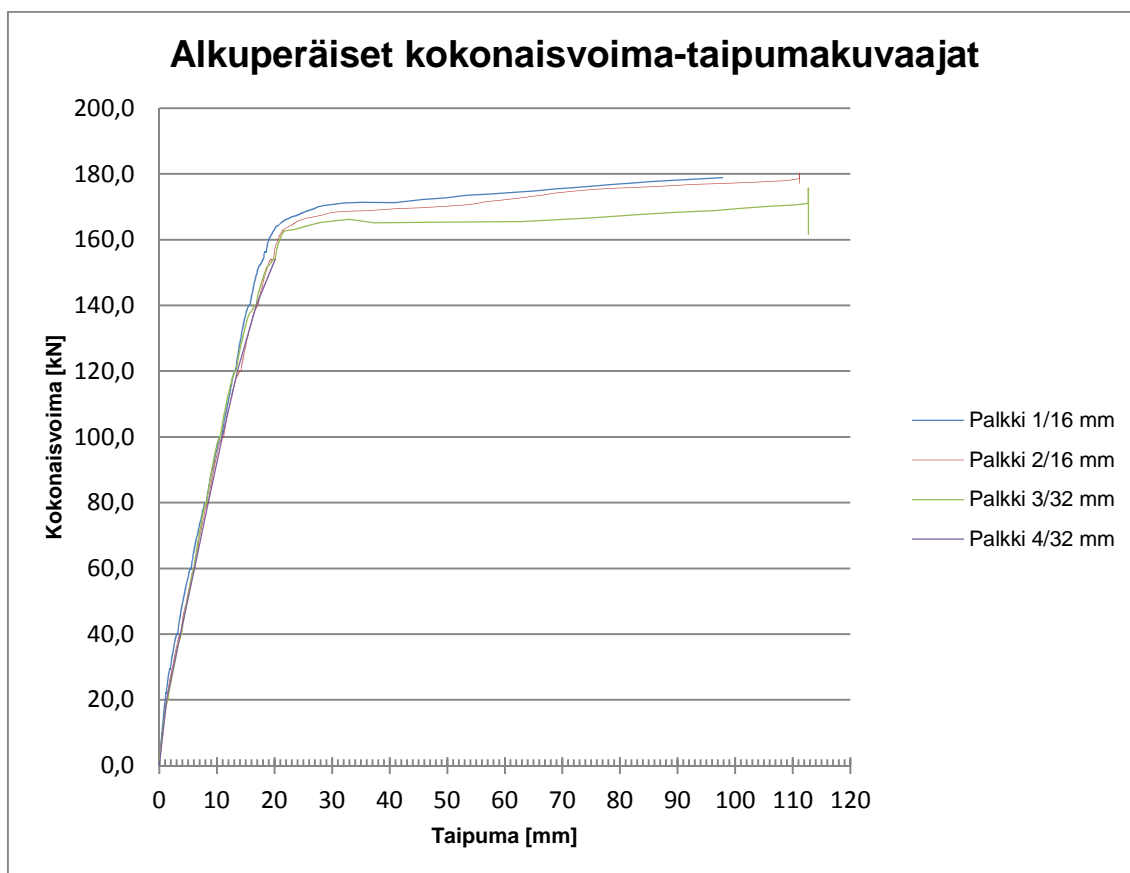


KUVA 6. Kaikkien tartuntatestipalkkien voima-liukumakuvaajat

TAULUKKO 1. Ankkurointipalkkien alkuperäiset mittaustulokset

Kokonais- kuorma [kN]	Palkki 1 (4T16)		Palkki 2 (4T16)		Palkki 3 (1T32)		Palkki 4 (1T32)	
	Taipuma [mm]	Halkeamaleveys [mm]	Taipuma [mm]	Halkeamaleveys [mm]	Taipuma [mm]	Halkeamaleveys [mm]	Taipuma [mm]	Halkeamaleveys [mm]
20	1,01	-	1.29	-	1.44	0.05	1.31	0.05
40	3.01	< 0,05 ^{*)}	3.54	0.05	3.76	0.10	3.67	0.07
60	5.38	< 0,01 ^{*)}	6.00	0.1	5.94	0.20	6.10	0.10
80	7.93	0,5 ^{*)}	8.35	0.1	8.06	0.25	8.51	0.15
100	10.57	0,8 ^{*)}	10.94	0.15	10.46	0.30	10.97	0.20
120	13.13	-	13.94	0.2	13.17	0.40	13.57	0.3
140	15.59	-	17.03	-	16.59	-	16.87	0.35
152,8	17.68	-	18.95	-	19.36	-	19.78 ^{**)}	-
154	18.00	4 ^{*)}	19.36	0.4	19.74	0.50	20.14	0.5
155,5	18.22	-	19.92	-	20.24	-	20.62 ^{**)}	-
Myötö	≈170.65 kN (Taipuma 29.95 mm)		≈168.65 kN (Taipuma 32.64 mm)		≈166.17 kN (Taipuma 32.94 mm)		≈163 kN	
Puristusmurto	≈171.38 kN (Taipuma 35.23 mm)		≈169.38 kN (Taipuma 40.89 mm)		≈165.13 kN (Taipuma 37.35 mm)		≈163.8 kN	
Max	≥180.7 kN ^{***)}		180.3 kN		175.8 kN		178.7 kN	

*) Mittaustulos hylätty mitta-asteikon tulkintavirheen vuoksi
**) Arvio, ei mitattua arvoa
***) Kuormituslaite keskeytti kuormituksen automaattisesti, kokonaiskuorma ei ollut alkanut vielä laskea tuolloin
HUOM! Taipuma-arvot mitattu välittömästi, kun kyseinen kokonaiskuorma on saavutettu



KUVA 1. Ankkurointipalkkien alkuperäiset kokonaisvoima-taipumakuvaajat

TAULUKKO 2. Halkeamatarkastelujen kestot, niiden aikana kehittyneet taipumat ja taipumankehitysnopeudet

Kokonaiskuorma [kN]	Palkki 1/16			Palkki 2/16			Palkki 3/32			Palkki 4/32		
	Kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Kehitysnopeus [mm/s]*10 ⁻³	Kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Kehitysnopeus [mm/s]*10 ⁻³	Kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Kehitysnopeus [mm/s]*10 ⁻³	Kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Kehitysnopeus [mm/s]*10 ⁻³
10	138,01	0,0119	0,0864	170,00	0,0146	0,0857	-	-	-	-	-	-
20	46,00	0,0678	1,4730	30,00	0,0142	0,4727	256,02	0,0950	0,3710	148 ^{*)}	0,0549 ^{**)}	0,3710
30	38,00	0,0961	2,5289	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	355,92	0,1911	0,5368	275,94	0,1381	0,5005	187,95	0,1096	0,5831	185 ^{*)}	0,1079 ^{**)}	0,5831
60	197,95	0,1680	0,8487	315,92	0,1727	0,5467	161,96	0,0966	0,5965	101 ^{*)}	0,0602 ^{**)}	0,5965
80	323,92	0,2516	0,7767	309,92	0,1542	0,4975	259,94	0,1841	0,7081	253 ^{*)}	0,1792 ^{**)}	0,7081
100	321,92	0,3171	0,9850	269,93	0,2452	0,9084	167,96	0,1520	0,9049	324 ^{*)}	0,2932 ^{**)}	0,9049
120	78,08	0,1607	2,0579	218,21	0,2247	1,0296	131,97	0,1881	1,4251	147 ^{*)}	0,2095 ^{**)}	1,4251
140	50,05	0,1328	2,6531	44,04	0,1357	3,0800	78,08	0,2408	3,0837	200 ^{*)}	0,6167 ^{**)}	3,0837
154	38,04	0,0867	2,2801	240,23	0,4573	1,9035	118,12	0,3759	3,1828	140 ^{*)}	0,4456 ^{**)}	3,1828
156	82,08	0,2809	3,4222	-	-	-	-	-	-	-	-	-

^{*)} Kesto arvioitu koestusvideosta
^{**)} Laskettu Palkki 3:n taipumankehitysnopeusarvolla

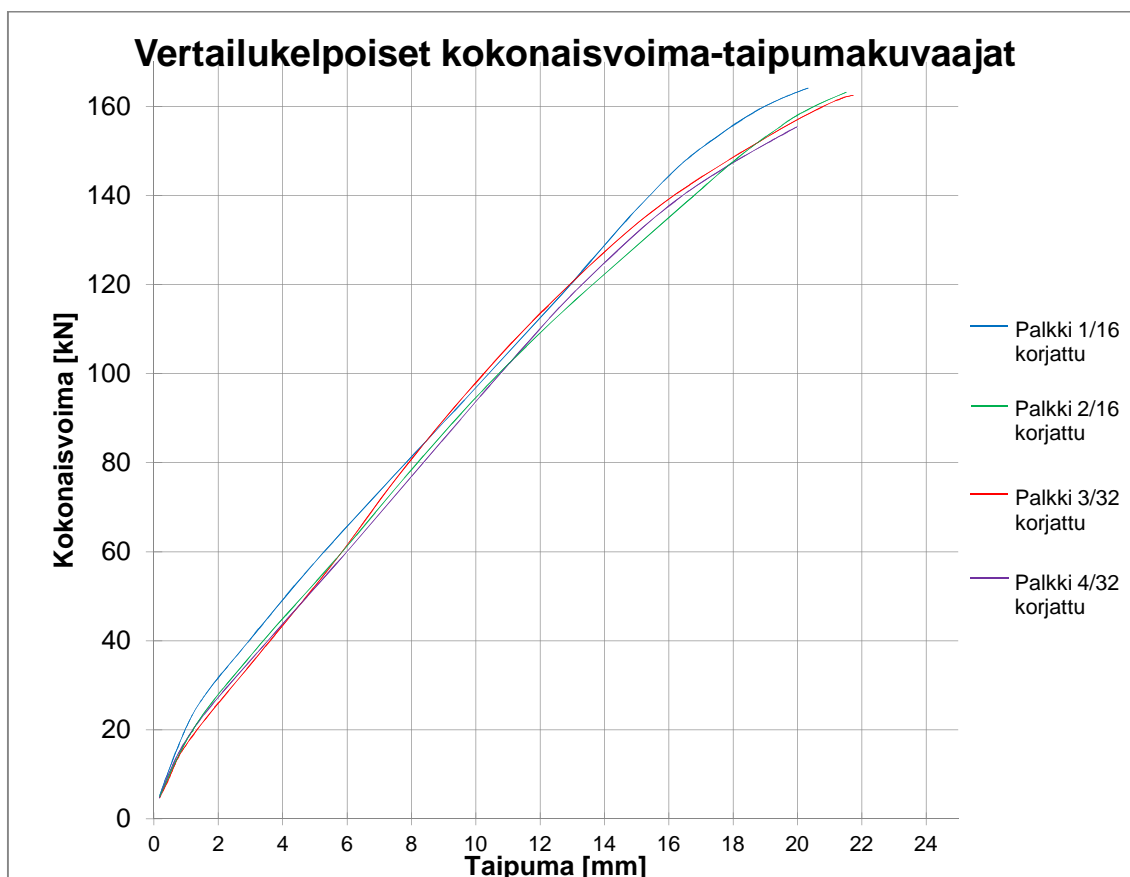
TAULUKKO 3. Hidastusten kestot ja niiden aikana kehittyneet taipumien muutokset

Kokonaiskuorma [kN]	Palkki 1/16		Palkki 2/16		Palkki 3/32		Palkki 4/32	
	Hidastuksen kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Hidastuksen kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Hidastuksen kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]	Hidastuksen kesto [s]	$\Delta\delta$ [mm]
10	72	0,02	18	0	-	-	-	-
20	12 (22 kN)	0,02 (22 kN)	58	0,03	46	0,08	- ^{*)}	0,07 ^{**)}
30	8	0,04	-	-	-	-	-	-
40	12	0,05	46	0,09	62	0,10	- ^{*)}	0,10 ^{**)}
60	24	0,06	36	0,11	60	0,07	- ^{*)}	0,07 ^{**)}
80	16	0,05	68	0,13	52	0,10	- ^{*)}	0,10 ^{**)}
100	26	0,10	58	0,19	70	0,16	- ^{*)}	0,17 ^{**)}
120	46	0,13	80	0,28	66	0,22	- ^{*)}	0,23 ^{**)}
140	36	0,18	42	0,22	72	0,52	- ^{*)}	0,53 ^{**)}
154	110	0,31	40	0,20	74	0,43	- ^{*)}	0,44 ^{**)}

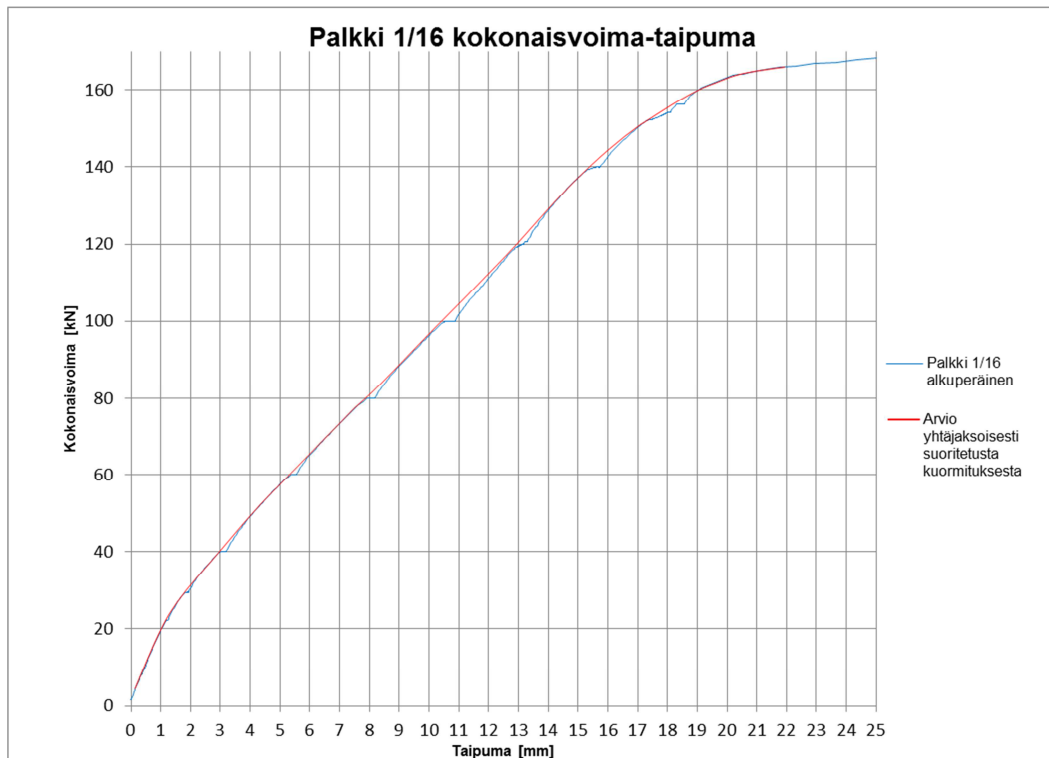
^{*)} Kesto tuntematon
^{**)} Taipuman muutos arvioitu käyttämällä samaa taipuman muutoksen suhdetta alkuperäiseen taipumaan kuin Palkki 3:lla

TAULUKKO 4. Ankkurointipalkkien vertailukelpoiset taipumat yhtäjaksoisista kuormituskuvaajista mitattuina

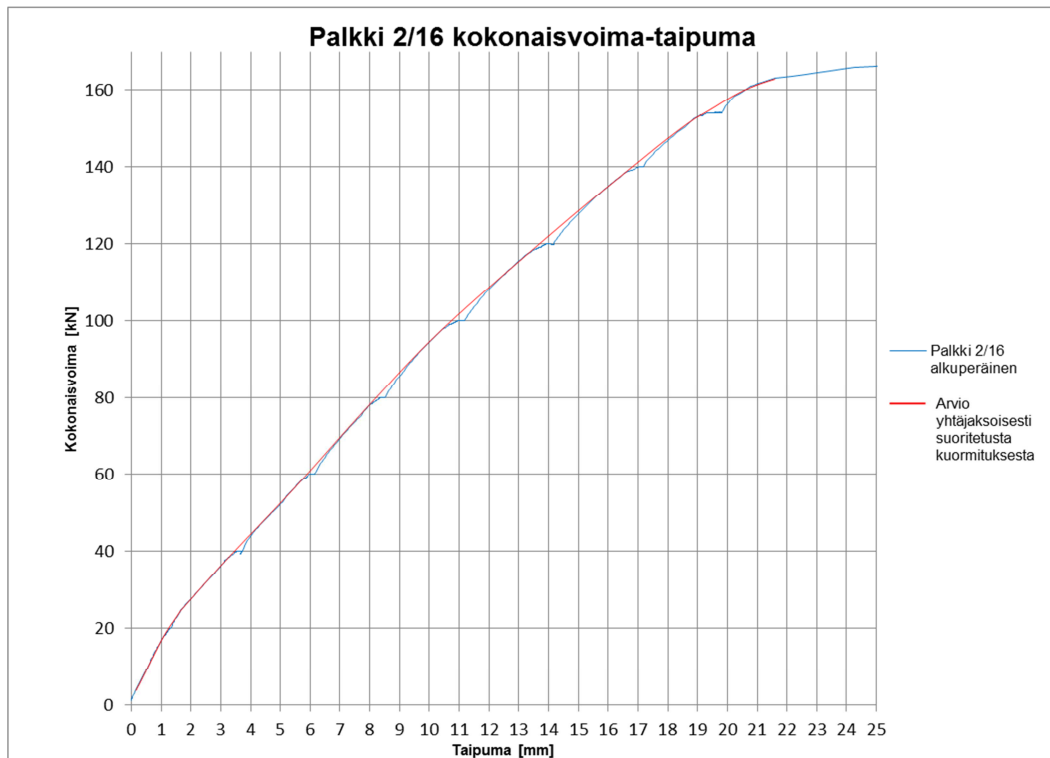
Kokonaiskuorma [kN]	Palkki 1/16		Palkki 2/16		Palkki 3/32		Palkki 4/32	
	Taipuma [mm]	Ero alkupe- räiseen [%]	Taipuma [mm]	Ero alkupe- räiseen [%]	Taipuma [mm]	Ero alkupe- räiseen [%]	Taipuma [mm]	Ero alkupe- räiseen [%]
20	1,01	0	1,26	2,6	1,36	5,7	1,24	5,7
40	2,96	1,8	3,45	2,5	3,66	2,7	3,57	2,7
60	5,32	1,0	5,89	1,8	5,87	1,2	6,03	1,2
80	7,88	0,6	8,22	1,6	7,96	1,2	8,41	1,2
100	10,47	0,9	10,75	1,7	10,31	1,5	10,80	1,5
120	13,00	1,0	13,66	2,0	12,95	1,7	13,34	1,7
140	15,41	1,2	16,81	1,3	16,07	3,1	16,34	3,1
152,8	17,45	1,3	18,95	0,0	19,01	1,8	19,42	1,8
154	17,69	1,7	19,16	1,0	19,31	2,2	19,70	2,2
155,5	17,99	1,2	19,44	2,5	19,69	2,7	20,06	2,7



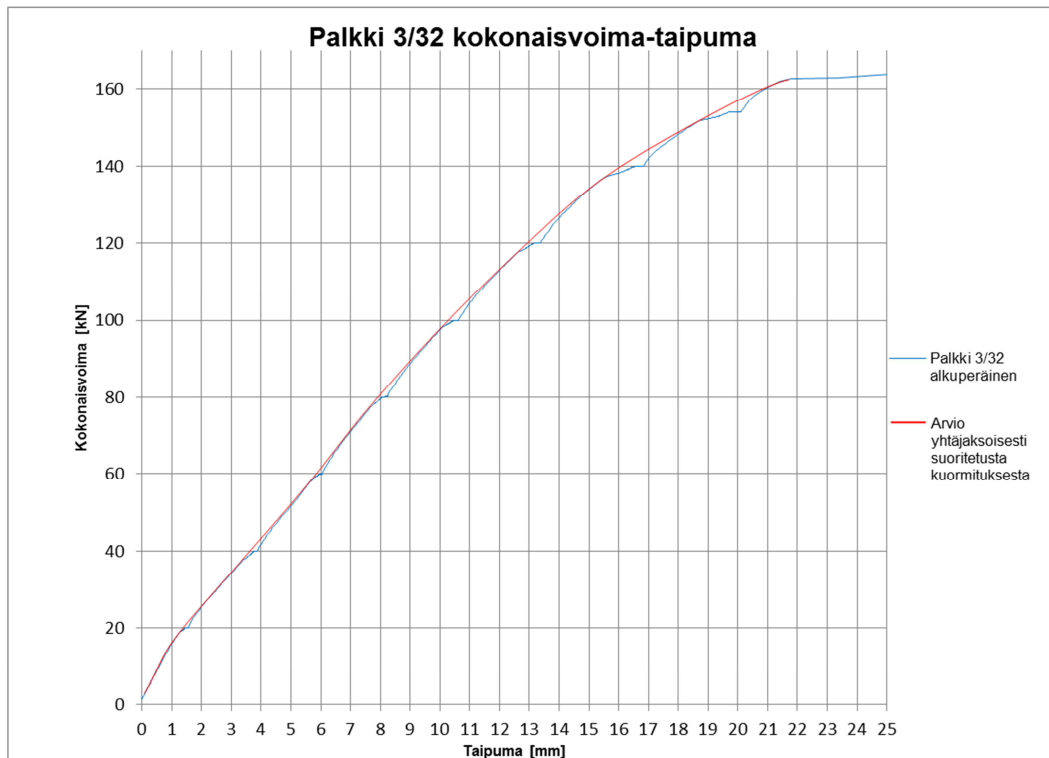
KUVA 2. Kaikkien ankkurointipalkkien vertailukelpoiset kokonaisvoima-taipumakuvaajat



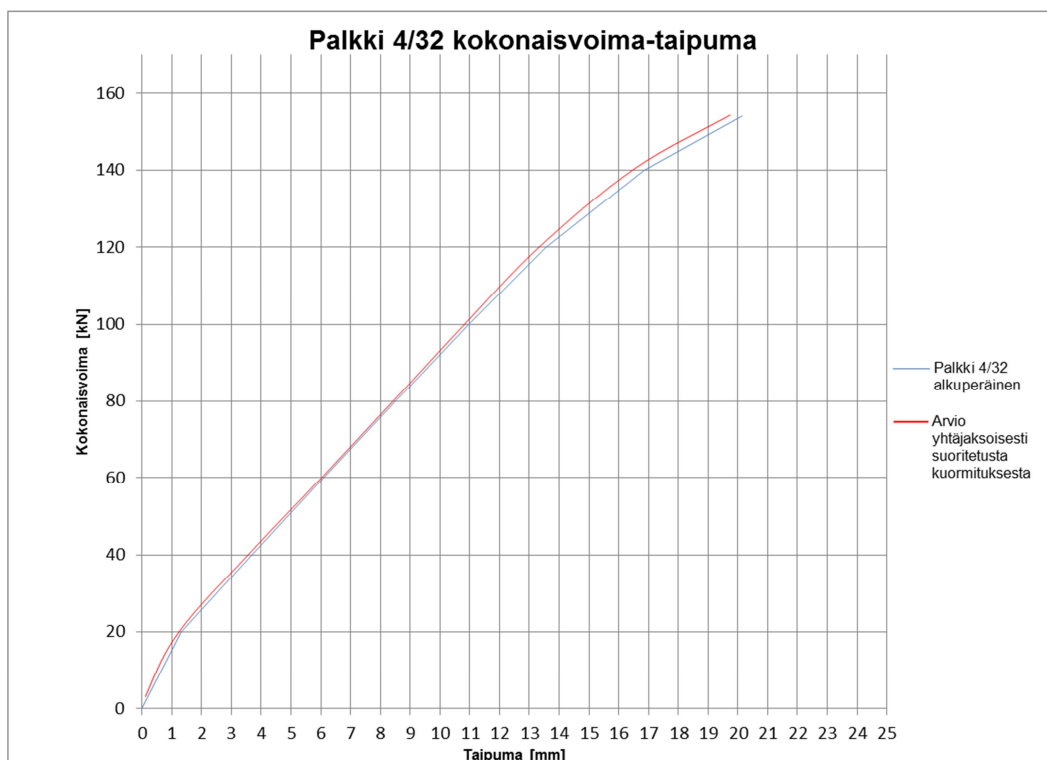
KUVA 3. Ankkurointipalkki 1/16:n alkuperäinen ja korjattu kokonaisvoima-taipumakuvaaja



KUVA 4. Ankkurointipalkki 2/16:n alkuperäinen ja korjattu kokonaisvoima-taipumakuvaaja



KUVA 5. Ankkurointipalkki 3/32:n alkuperäinen ja korjattu kokonaisvoima-taipumakuvaaja



KUVA 6. Ankkurointipalkki 4/32:n alkuperäinen ja korjattu kokonaisvoima-taipumakuvaaja



KUVA 1. Tartuntatestipalkin valmiit apuraudoitteet, viitattu luvussa 8.7.1 (Pesonen 2012)



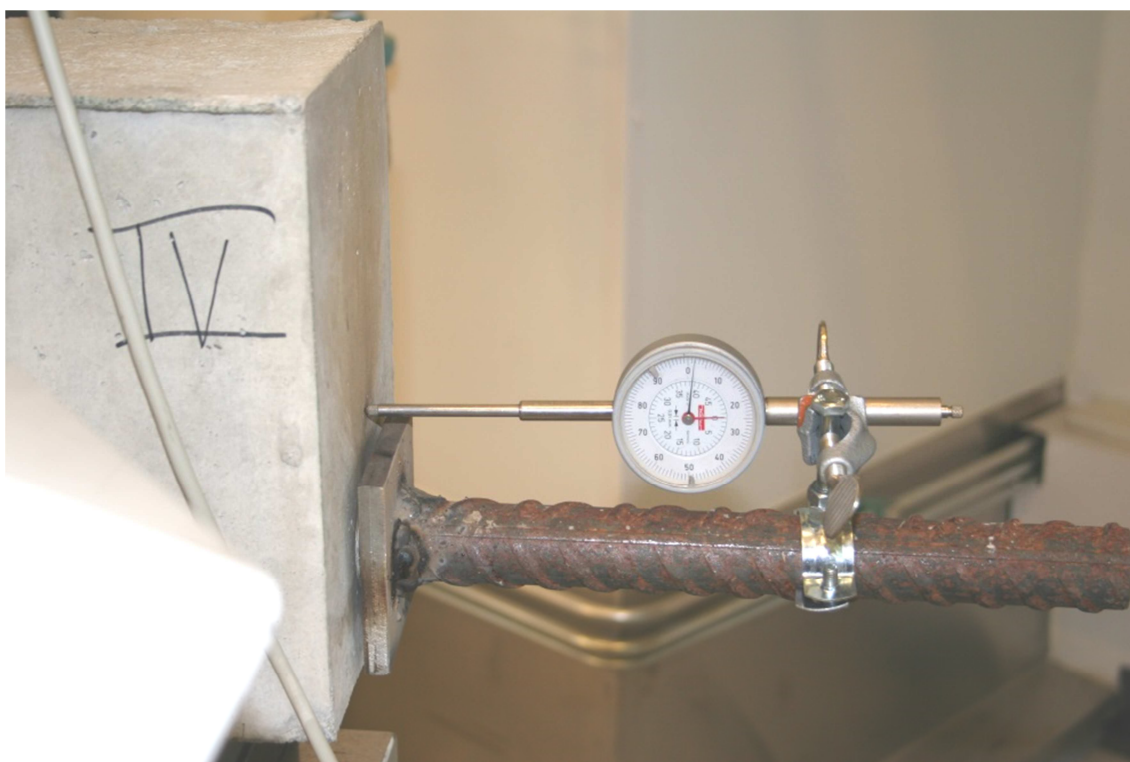
KUVA 2. 32 mm ankkurointipalkin päätangon etäisyys tulevan betonipeitteen pinnasta, viitattu luvussa 8.7.2 (Pesonen 2012)



KUVA 3. Valmiin ankkurointipalkkiraudoitteen mittojen tarkistus, viitattu luvussa 8.7.2 (Pesonen 2012)



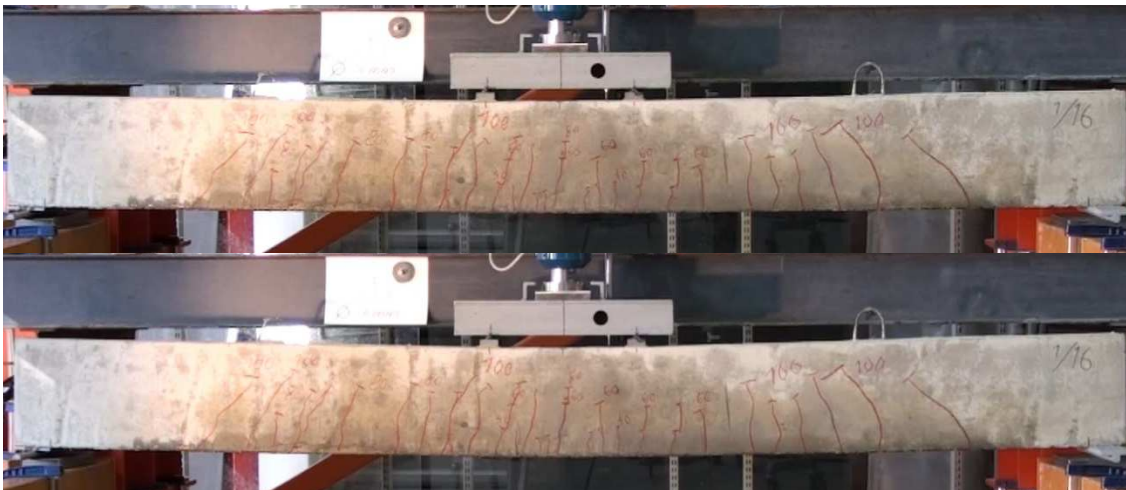
KUVA 4. 16 mm tangon jatkoliukumisen estämiseen kokeiltuja vaijerilukkoja, viitattu luvussa 8.9.3 (Pesonen 2012)



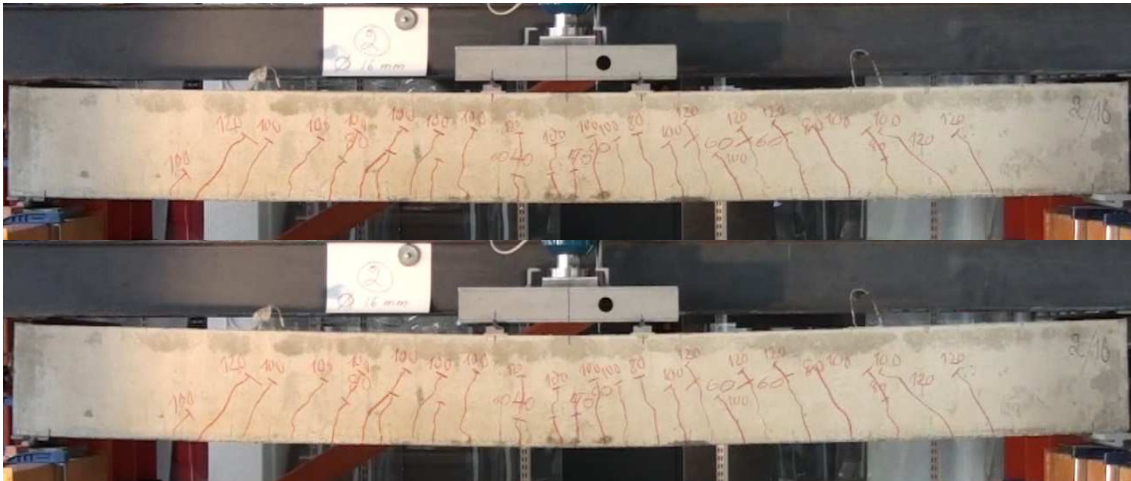
KUVA 5. Jatkoliukumisen estävä tankoon hitsattu teräslaippa noin 3 mm:n etäisyydellä palkin päästä, viitattu luvussa 8.9.3 (Pesonen 2012)



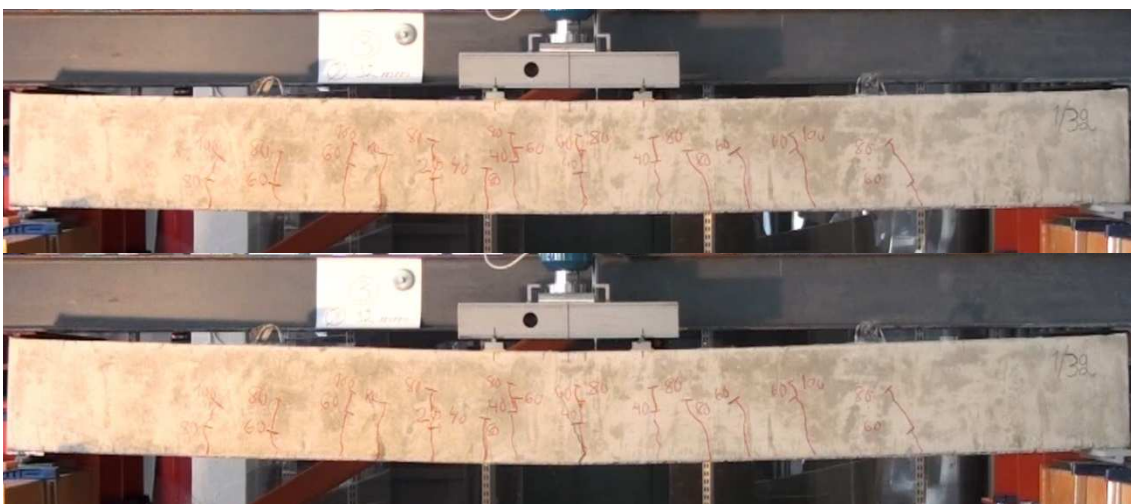
KUVA 6. Tangonsuuntaisia halkeamia 32 mm tartuntatestipalkkien alapinnoilla, viitattu luvussa 9.4 (Pesonen 2012)



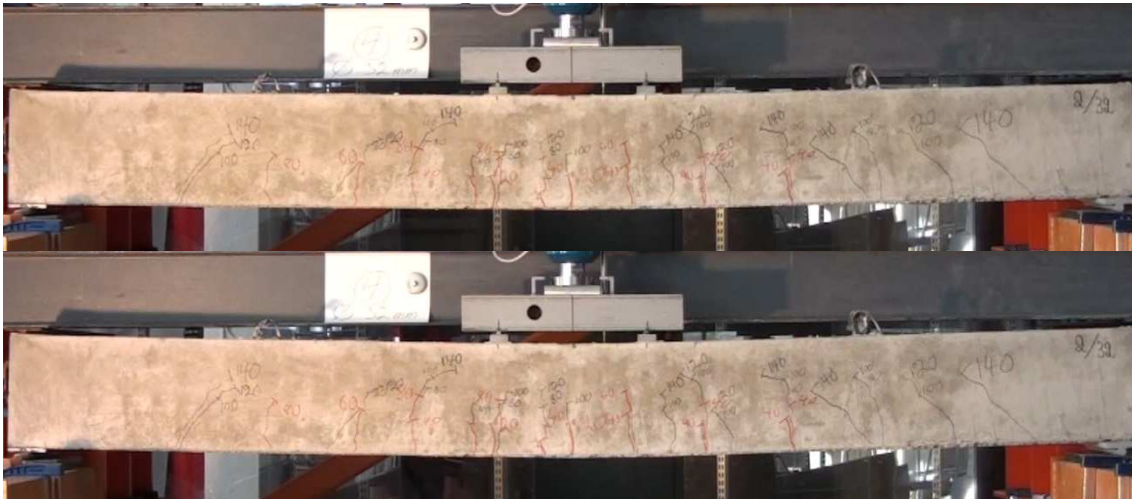
KUVA 7. Palkki 1/16, yläkuva 154 kN, alakuva myötöhetki, viitattu luvussa 8.9.4 (Pesonen 2012)



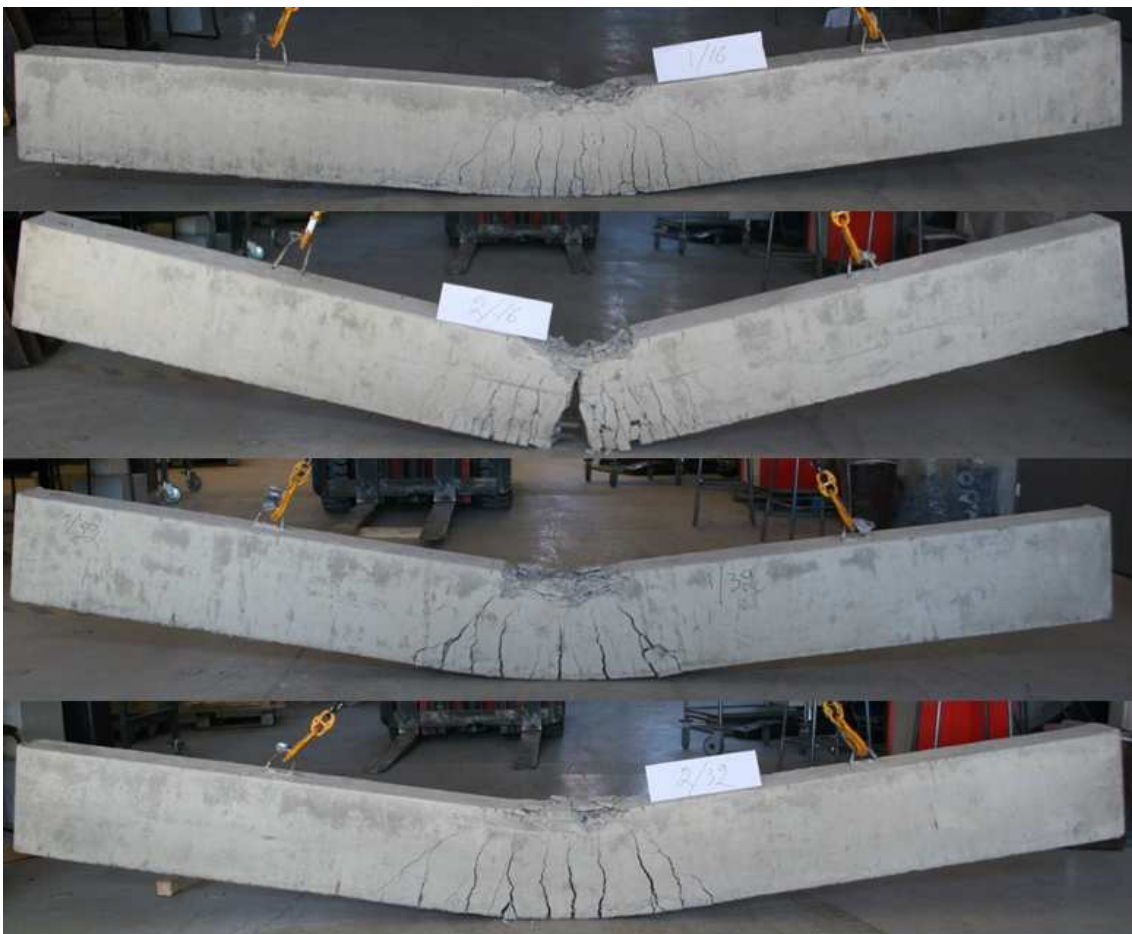
KUVA 8. Palkki 2/16, yläkuva 154 kN, alakuva myötöhetki, viitattu luvussa 8.9.4 (Pesonen 2012)



KUVA 9. Palkki 3/32, yläkuva 154 kN, alakuva myötöhetki, viitattu luvussa 8.9.4 (Pesonen 2012)



KUVA 10. Palkki 4/32, yläkuva 154 kN, alakuva myötöhetki, viitattu luvussa 8.9.4 (Pesonen 2012)



KUVA 11. Ankkurointipalkit koestuksen jälkeen, viitattu luvussa 8.9.4 (Pesonen 2012)