



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# BM-MATALAPALKKIN PIILO- KONSOLIIITOS

Koekuormitus ja tulosten käsittely

TEKIJÄT: Jere Pihavaara  
Joonas Miettinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Jere Pihavaara ja Joonas Miettinen			
Työn nimi BM-matalapalkin piilokonsoliliitos. Koekuormitus ja tulosten käsittely.			
Päiväys	22.5.2015	Sivumäärä/Liitteet	29/5
Ohjaaja(t) Arto Puurula, rakennetekniikan yliopettaja, TkT, ja Juha Pakarinen, päätoiminen tuntiopettaja			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Betonimestarit Oy, Insinööritoimisto SRT Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä opinnäytetyö on jatkoa Visa Järvisen opinnäytetyöhön <i>BM-matalapalkin piilokonsoliliitos. Lujuuslaskenta ja koesuunnittelu, 26.5.2014</i>. Järvisen opinnäytetyössä tarkasteltiin uudentyypistä elementtiliitosta, jossa matalapalkki tukeutuu piilokonsolin varaan lovipääliitoksella. Liitoksen suunnitteli Insinööritoimisto SRT Oy, ja työn tilaaja oli Betonimestarit Oy. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli toteuttaa Järvisen opinnäytetyössä suunniteltu koejärjestely ja tehdä suunnitellut murtokuormituskokeet.</p> <p>Murtokuormituskokeet tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa yhdessä laboratoriohenkilökunnan kanssa. Kokeista saatiin tulokset Excel-tiedostoina, jotka käsiteltiin luettavampaan muotoon. Kokeista saatuja tuloksia vertailtiin Järvisen opinnäytetyön laskelmiin.</p> <p>Järvisen opinnäytetyön laskelmissa liitokselle saatu kestävyys oli noin 400 kN. Tekemissämme murtokuormituskokeissa pilarin konsoliosa murtui kokeessa 2 noin 232 kN:n kuormalla, jolloin konsoliosien terästen jännitykset olivat enimmillään 345 MPa. Palkin konsoliosa murtui kokeessa 4 noin 485 kN:n kuormalla, jolloin konsolin teräksissä jännitykset menivät myötörajan yli noin 300 kN:n kohdalla. Kuormituskokeiden tuloksista saatiin hyödyllistä tietoa liitoksen käyttäytymisestä jatkokehitystä varten.</p>			
Avainsanat runkorakenteet, liitokset, palkit, kuormituskokeet			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Jere Pihavaara and Joonas Miettinen			
Title of Thesis Stress testing and result analyzing for BM-palkki Series Low-Beam.			
Date	22.5.2015	Pages/Appendices	29/5
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, Principal Lecturer in Structural Engineering, PhD and Mr Juha Pakarinen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Betonimestarit Oy, Insinööritoimisto SRT Oy			
<p>Abstract</p> <p>This thesis is a continuation of the thesis <i>Load capacity calculation and design of test arrangement for BM-palkki Series Low-Beam, 26.5.2014</i> by Visa Järvinen. Järvinen's thesis assessed the usability of a hidden concrete corbel joint between pre-stressed concrete low-beam and a concrete column. The joint was designed by Insinööritoimisto SRT Oy to be used by Betonimestarit Oy in manufacturing of their BM-palkki series low-beam. In this project the goal was to implement the test arrangement which was planned in Järvinen's thesis and to run the load capacity test.</p> <p>The load capacity test was made in the laboratory of Tampere University of Technology with the help of the laboratory staff. The results of the test were in an Excel file which we then converted to more readable form. The results from the load capacity test were compared to the calculations of Järvinen's thesis.</p> <p>In Järvinen's thesis the load capacity of the joint was approximately 400 kN. In the load capacity test for this thesis the console of column broke at 232 kN load in a second test, but steel stresses of console parts did not exceed 345 MPa. Console part of beam broke at 485 kN load in fourth test, but steel stresses of console exceeded the yield strength at about 300 kN load. The results provided useful information about the behavior of the joint for further development.</p>			
Keywords skeleton frame, joints, beams, loading test			

## ESIPUHE

Kiitämme Pauli Oksmania Insinööritoimisto SRT Oy:stä sekä Timo Venhoa Betonimestarit Oy:stä mielenkiintoisesta insinööriyöaiheesta sekä mahdollisuudesta osallistua käytännön tuotekehitykseen.

Kiitämme Savonia-ammattikorkeakoulun rakennetekniikan yliopettajaa tekniikan tohtori Arto Puurulaa työmme ohjauksesta, arvokkaista kommentteista sekä tutkimustiedon käsittelystä. Kiitämme myös Tampereen teknillisen yliopiston henkilökuntaa liitoskokeiden ja mittausten suorittamisesta.

Kuopiossa 31.5.2015

Jere Pihavaara

Joonas Miettinen

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	MURTOKUORMITUSKOKEEN JÄRJESTELYT .....	7
3	KOKEET 1-3 (KEHÄJÄRJESTELMÄ) JA TULOSTEN KÄSITTELY .....	11
4	KOKEET 4 JA 5 (PALKIN KONSOLIOSAN MURTAMINEN) JA TULOSTEN KÄSITTELY.....	19
5	PORANÄYTTEIDEN OTTO JA BETONIN PURISTUSKOKEET .....	25
6	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	28
	LÄHTEET .....	29
	<del>LHTE 1: KOKEEN 1 TERÄSTEN VENYMÄKÄYRÄT</del>	
	<del>LHTE 2: KOKEEN 2 TERÄSTEN VENYMÄKÄYRÄT</del>	
	<del>LHTE 3: KOKEEN 3 TERÄSTEN VENYMÄKÄYRÄT</del>	
	<del>LHTE 4: KOKEEN 4 TERÄSTEN VENYMÄKÄYRÄT</del>	
	<del>LHTE 5: KOKEEN 5 TERÄSTEN VENYMÄKÄYRÄT</del>	

## 1 JOHDANTO

Työn taustalla on Visa Järvisen opinnäytetyö *BM-matalapalkin piilokonsoliliitos. Lujuuslaskenta ja koesuunnittelu. 26.5.2014*. Järvisen työssä suunniteltiin uudenlainen matalapalkin lovipääliitos, laskettiin kuormituskestävyydet kyseiselle liitokselle ja suunniteltiin murtokuormitukseen koejärjestelyt. Tarkoitus oli myös koeuormittaa liitos ja käsitellä koetulokset, mutta elementtitehtaan työtilanteen takia tätä ei keretty tekemään Järvisen opinnäytetyössä.

Nyt elementtitehdas on saanut valmistettua koestettavat pilarit ja palkit ja tässä työssä toteutetaan Järvisen työssä suunniteltu koejärjestely ja suoritetaan murtokuormituskoe. Tuloksia vertaillaan Järvisen opinnäytetyön laskelmiin. Koekappaleista porataan myös koelieriöt, joille tehdään puristuskoekkeet betonin todellisen puristuskestävyyden selvittämiseksi.

Työn tarkoituksena on selvittää vastaako Järvisen opinnäytetyön laskelmista saadut tulokset ja koeuormituksista saadut käytännön tulokset toisiaan. Toimiessaan liitos olisi taloudellisempi vaihtoehto teräksisille piilokonsoliliitoksille. Liitoksen kehitys on vielä kesken, joten opinnäytetyössä on piilotettu tai poistettu kaikki liitoksen rakenteeseen viittaavat osat.

## 2 MURTOKUORMITUSKOKEEN JÄRJESTELYT

Tässä luvussa kerromme minkälaisen murtokuormituskokeen Järvinen oli työssään suunnitellut sekä mitä muutoksia lopulliseen koejärjestelyyn tuli. Murtokuormituskokeessa puristetaan liitosta palkin keskeltä liitoksen murtoon asti. Alkuperäisen suunnitelman mukaan kehää oli tarkoitus testata viidellä palkilla ja kymmenellä pilarilla. Yhteensä kokeita varten on valmistettu kymmenen palkkia ja kaksikymmentä pilaria. Kuormituskertoja olisi tullut yhteensä kaksikymmentä, joista viisi on kehälle, viisi palkille ja kymmenen pilarille. Koekappaleita olisi kuormitettu kolmella eri tavalla. Palkin lovipäätä olisi testattu viidellä palkilla, jossa lovi on vain toisessa päässä. Tätä lovipäätä olisi kuormitettu teräsosaa vasten. Pilarin konsolia olisi testattu kymmenellä pilarilla, joilla olisi testattu myös kahta eri tuotantomenetelmää. Viidessä pilarissa erikseen valettu konsoli on liitetty valuvaiheessa pilariin. Rakennetta testataan myös kehänä, jolloin palkin molemmissa päissä on lovipää ja koestettava pilari-konsoli.

Suunnitelmiin tuli kuitenkin muutoksia ennen koestuspäiviä ja kokeiden aikana. Päätettiin, että vähempikin koemäärä antaa tässä vaiheessa riittävän kuvan liitoksen kestävydestä ja kehitystarpeista. Loppujen lopuksi tehtiin viisi koetta. Ensimmäiset kolme koetta testattiin kehäjärjestelmänä, eli palkin molemmissa päissä on pilari. Kahdessa viimeisimmässä kokeessa palkin konsoliosa kuormitettiin murtoon asti teräksisen pilariosan avulla. Tarkoitus on jatkaa kokeita tulevaisuudessa joko Kuopiossa tai Tampereella.

Järvisen työssä oli suunniteltu kokeet tehtäväksi Kuopiossa Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa. Savonian laboratorion remontin takia kokeet tehtiin kuitenkin Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa. Koesuunnitelmia täytyi muokata Tampereen laboratorioon sopiviksi (kuva 1 ja kuva 2).



Kuva 1. Kuormituskokeiden 1–3 koejärjestely. Kehäjärjestelmä. (Haavisto Jukka, TTY)



Kuva 2. Kuormituskokeiden 4–5 koejärjestely. Palkin konsoli murretaan teräksisellä pilariosalla. Tunkit mittaavat tukireaktiota toisessa päässä palkkia. (Haavisto Jukka, TTY)

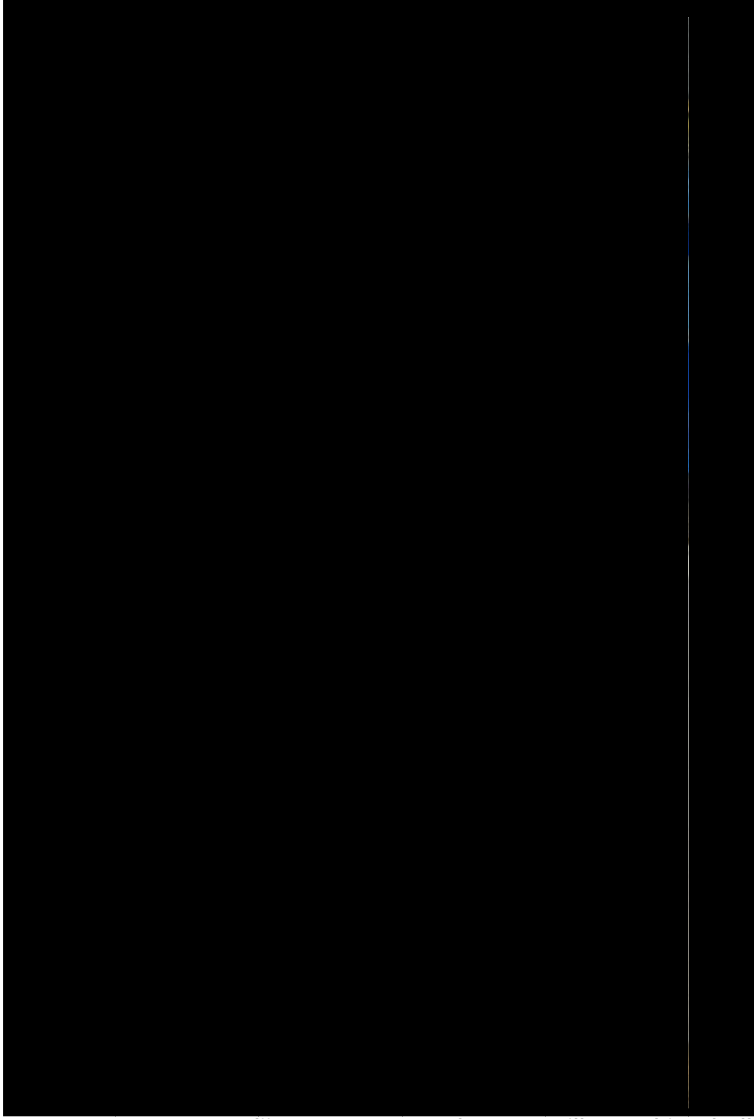
Kuormituskokeisiin tehtiin myös etukäteen suunnitelmat kuormitustasoille. Kuormitus säädettiin manuaalisesti, joten kuormitus poikkesi hieman kuormitussuunnitelman arvoista. Tarkemmat kuormituksen arvot näkyvät kuormituksesta saaduista tuloksista. Kuormiin täytyi lisätä tuloksia käsitellessä myös 2,75 kN tunkkia kohden, joka on kuormitusvälikkappaleiden paino. Kokeissa 1–3 palkin oma paino on 6,3 kN, joten kuormaa siitä tulee 3,15 kN konsolia kohden. Kokeissa 4 ja 5 palkin omapaino on 6,1 kN, josta 3,7 kN menee tukiantureille ja 2,4 kN liitokselle (kuva 2).

Ennen kuormitusta palkkiin ja pilareihin oli merkitty löydetyt halkeamat punaisella tussilla (kuva 3). Halkeamat tarkistettiin jokaisella kuormitustasolla, missä pysähdyttiin ja uudet halkeamat merkattiin sinisellä tussilla.

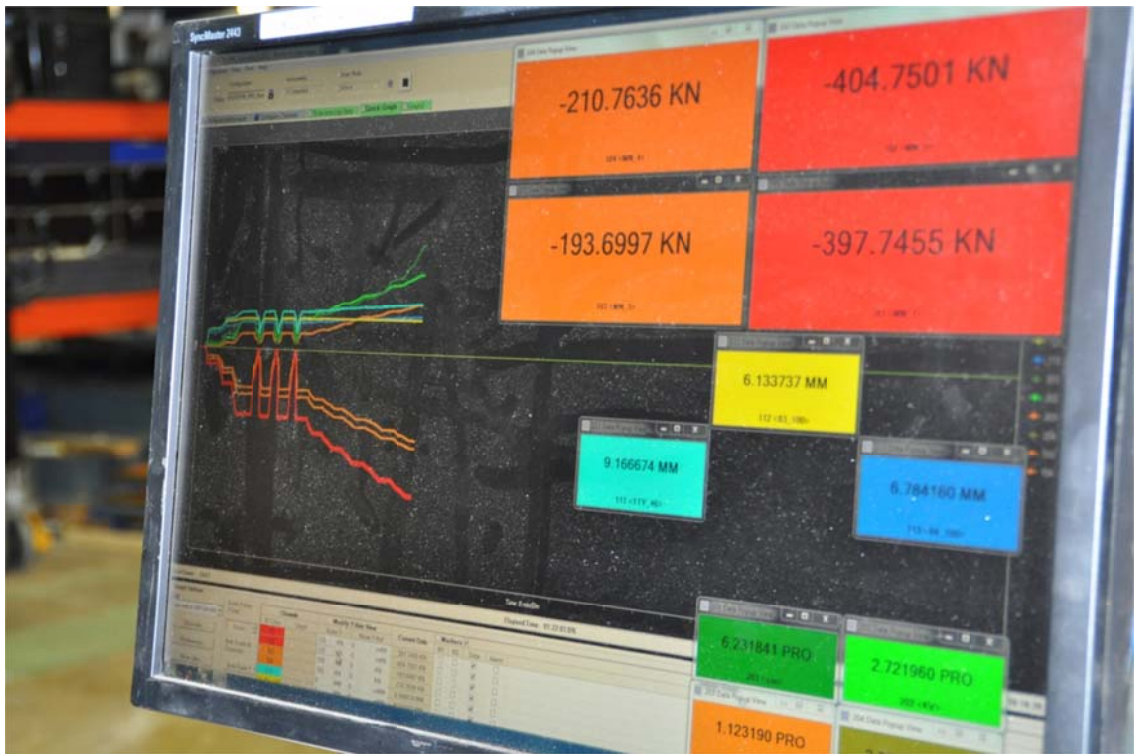
Kokeissa mitattiin kuorman lisäksi terästen venymiä teräksiin etukäteen asennetuilla venymäantureilla sekä siirtymiä siirtymäantureilla palkin ja konsolin eri kohdista (kuva 3). Tarkemmat anturien paikat kerrotaan erikseen jokaista koetta käsitellessä.

Kokeet dokumentoitiin yhdellä videokameralla sekä valokuvaamalla. Lisäksi tietoa saatiin antureista sekä kirjoittamalla muistiinpanoja. Kokeen tulokset tallentuivat Excel-tiedostoihin. Tietokoneen näytöltä pystyi seuraamaan reaaliaikaisesti kuormaa sekä antureiden dataa (kuva 4).





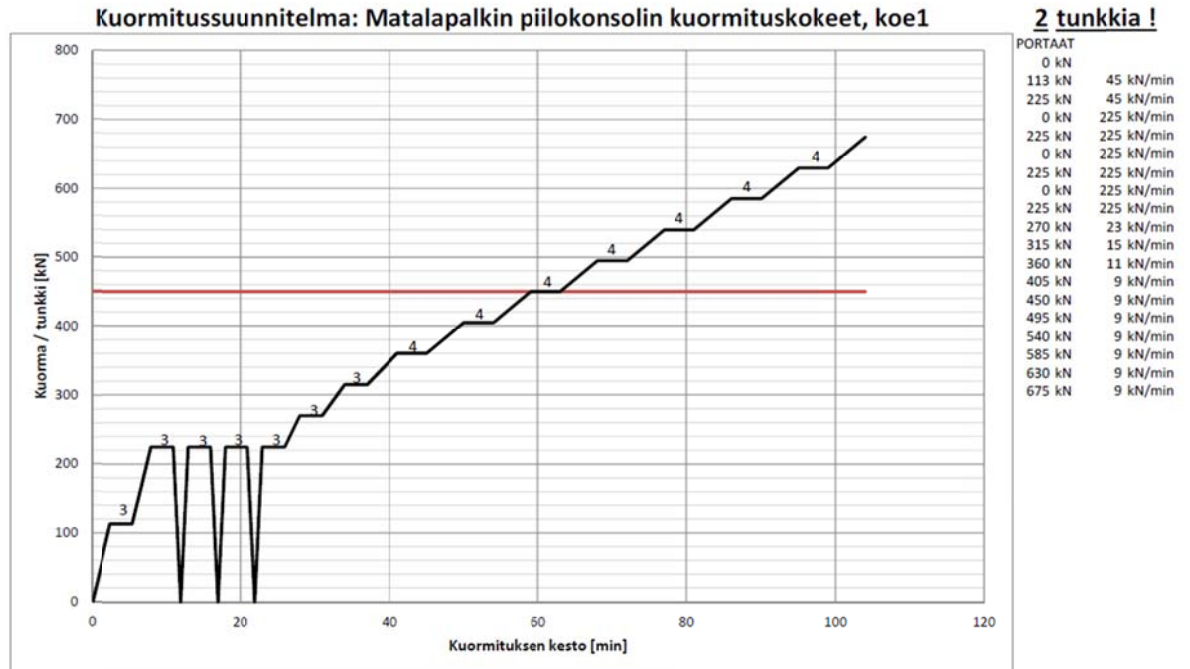
Kuva 3. Koestettava liitos. Kuvassa näkyy tusseilla merkityt halkeamat sekä siirtymäantureita. (Piha-vaara Jere)



Kuva 4. Kuorman, siirtymien ja venymien arvoja seurattiin tietokoneen näytöltä. (Pihavaara Jere)

## 3 KOKEET 1-3 (KEHÄJÄRJESTELMÄ) JA TULOSTEN KÄSITTELY

Ensimmäisessä kokeessa koestettiin kehäjärjestelmää. Kuormitussuunnitelma oli tehty laskenta-kuormaan, 450 kN, pohjautuen (kuvio 1).



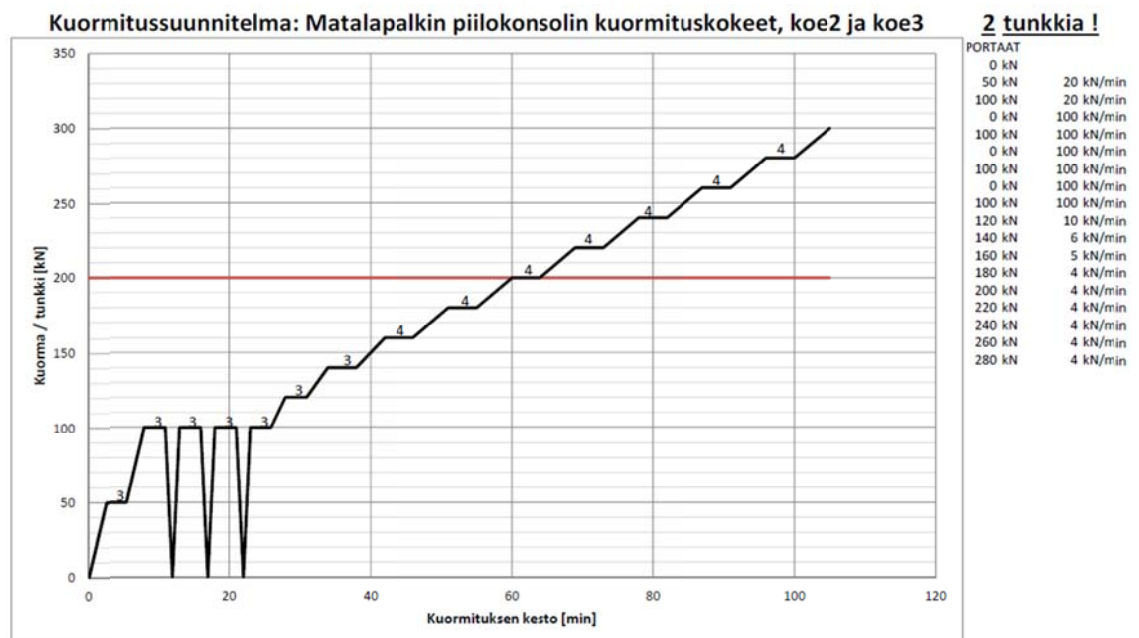
Kuvio 1. Ensimmäisen kokeen kuormitussuunnitelma. Laskentakuorma 450 kN (Haavisto Jukka, TTY)

Kuormituksen alku meni suunnitelman mukaan. Kuormitus aloitettiin nostamalla kuorma 25 %:n laskentakuormasta 450 kN eli 113 kN:iin. Kolmen minuutin pidon jälkeen nostettiin kuorma 50 %:n laskentakuormasta eli 225 kN:iin. Tässä vaiheessa pilarin konsoliosassa oli havaittavissa murtumisen merkkejä ja 4 minuutin pidon jälkeen kuorman poiston sijasta kasvatettiin kuormaa suunnitelman mukaisesti. Pääsimme tarkastelemaan halkeamat vielä 270 kN:n kohdalla, mutta seuraavassa kuorman nostossa pilarien konsoliosat murtuivat. Palkki säilyi silmämääräisesti ehjänä ja tätä samaa palkkia käytettiin kokeessa 3. Ensimmäisen kokeen pilarin konsolien kestävyuden johdosta, seuraavien kokeiden kuormitussuunnitelmaa muutettiin ja laskentakuorman 450 kN:n sijasta kuormitustasot pohjautuivat 200 kN:iin.



Kuva 5. Koejärjestely kokeissa 1–3 (Pihavaara Jere)

Kokeessa kaksi oli samanlaiset koejärjestelyt kuin ensimmäisessä kokeessa, kts kuva 5. Ainoa ero on kuormitustasoissa, joita päätettiin alentaa (kuvio 2). Koe eteni kuormitussuunnitelman mukaisesti pilarin konsoliosan murtoon asti, joka tapahtui 232,3 kN:n kuormalla.



Kuvio 2. Toisen ja kolmannen kokeen kuormitussuunnitelma. Laskentakuorma 200 kN (Haavisto Jukka, TTY)

Kolmannessa kokeessa testattiin myös samanlaista kehäjärjestelmää kuin kahdessa ensimmäisessä, mutta tämän kokeen tuloksissa on huomioitava, että käytössä oli ensimmäisen kokeen palkki. Tietokoneen mukaan antureihin jäi hieman venymää ensimmäisen kokeen jälkeen ja anturit nollaantuivat kokeen 3 alkaessa, joten palkin venymäanturien tiedot eivät ole luotettavia. Tässä kokeessa käytet-

tiin samaa kuormitus suunnitelmaa kuin kokeessa kaksi (kuvio 2). Koe eteni kuormitus suunnitelman mukaisesti 270,9 kN:n, jossa pilarin konsoliosa murtui.

Liitokselle oli laskettu 400 kN:n kestävyys. Kokeiden aikana huomattiin kuitenkin nopeasti, että liitos ei kestä laskennallisia kuormia. Tulokset käsitellään kahdessa osassa. Seuraavaksi käsitellään kolmen ensimmäisen kokeen tapahtumia, koska näissä pilariosa oli heikoin kappale ja jokaisen kokeen tulokset antavat samantyyppisiä tuloksia. Kuvasta 6 nähdään pilariosien murtotapa. Kaikissa kolmessa kokeessa murto tapahtui samalla tavalla. Tietystä kuormituksen vaiheessa pilarin konsoliosan pohja läpileikkautuu.

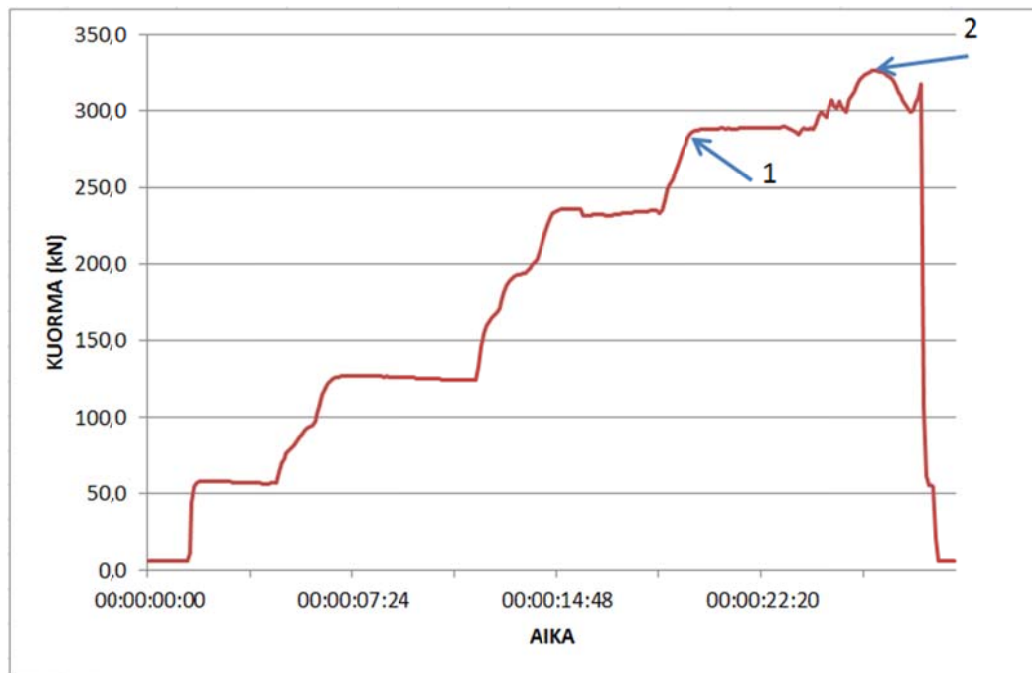


Kuva 6. Kokeen 2 murtuneet pilariosat (Pihavaara Jere)

Terästen jännitykset on laskettu Hooken lain avulla, jossa teräksen kimmomoduuli  $E=200$  GPa ja venymä  $\varepsilon$  on saatu venymäantureista.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

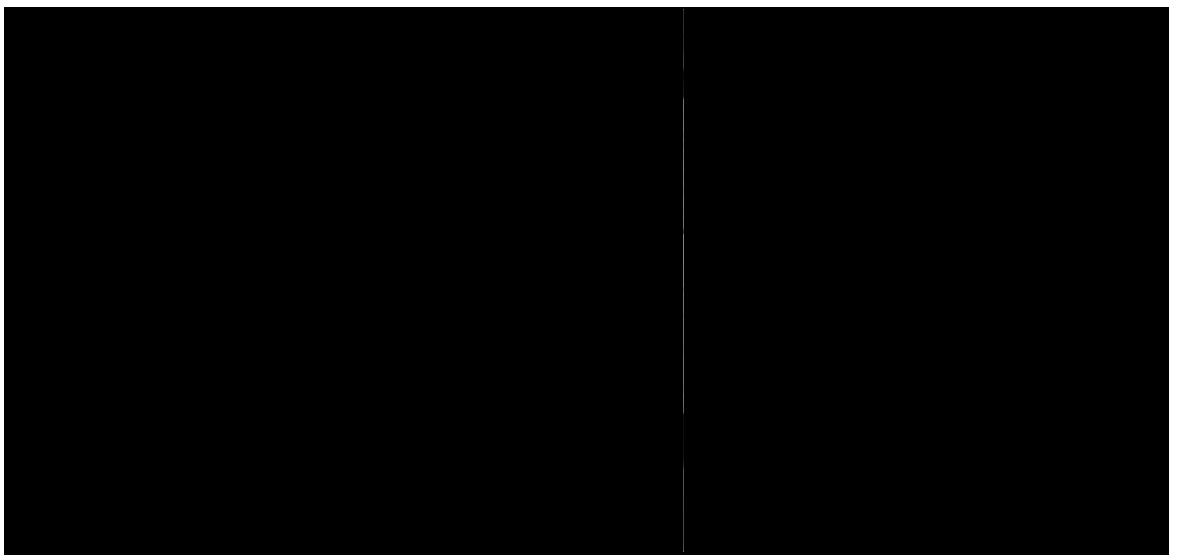
Kaava toimii teräksen myötörajalle saakka. Teräksen myötöraja on Visan opinnäytetyössä teräksen vetokokeilla rajattu arvoon  $F_{ym} = 550 \frac{N}{mm^2}$ . Myös liitoksen kestävyys tässä kehitysvaiheessa rajataan teräksen myötörajalle vaikka liitos kestäisikin enemmän kuormaa.



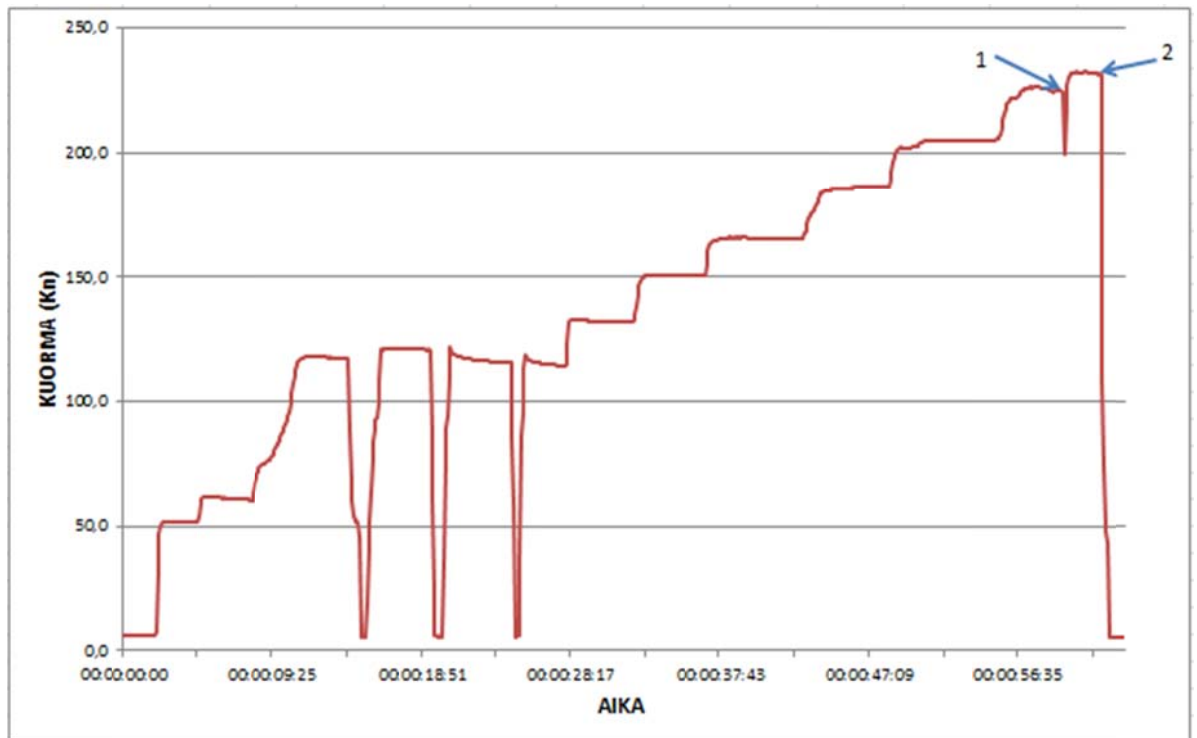
Kuvio 3. Kokeen 1 toteutunut kuormitus ajan funktiona

Kokeessa 1 alkuperäisen kuormitussuunnitelman mukaan kuormaa olisi kasvatettu ensin 113 kN:n kautta 225 kN:iin ja tämän jälkeen kuormaa olisi käytetty pois. Pilarin konsoliosassa ilmeni kuitenkin niin suuria halkeamia (kuva 7), että liitos päätettiin ajaa suoraan murtoon. Toteutunut kuormitus nähdään kuviosta 3.

Kuvion 3 pisteessä 1 pilarin P-1A.1 anturin 11 teräksen jännitys ylittää myötörajan kuormalla 287,8 kN. Pisteessä 2 pilarin konsoli murtuu kuormalla 326,5 kN. Tässä pisteessä anturin 11 teräksen venymä on 3,3 %. Muiden terästen jännitykset eivät ylitä myötörajaa. Kokeiden 1–3 terästen anturien paikat ja terästen venymäkäyrät löytyvät liitteistä 1–3.

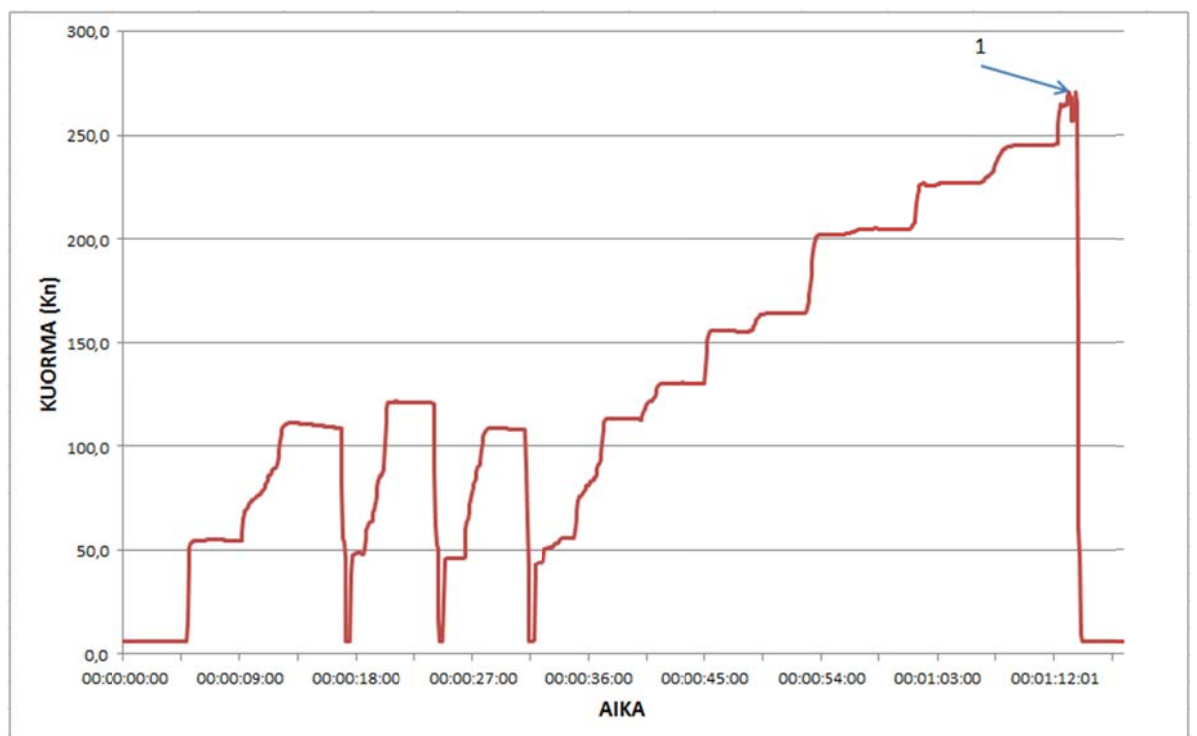


Kuva 7. Halkeama P-1A.1:n pilarikonsolissa 225 kN:n kuormituksella kokeessa 1 (Pihavaara Jere)



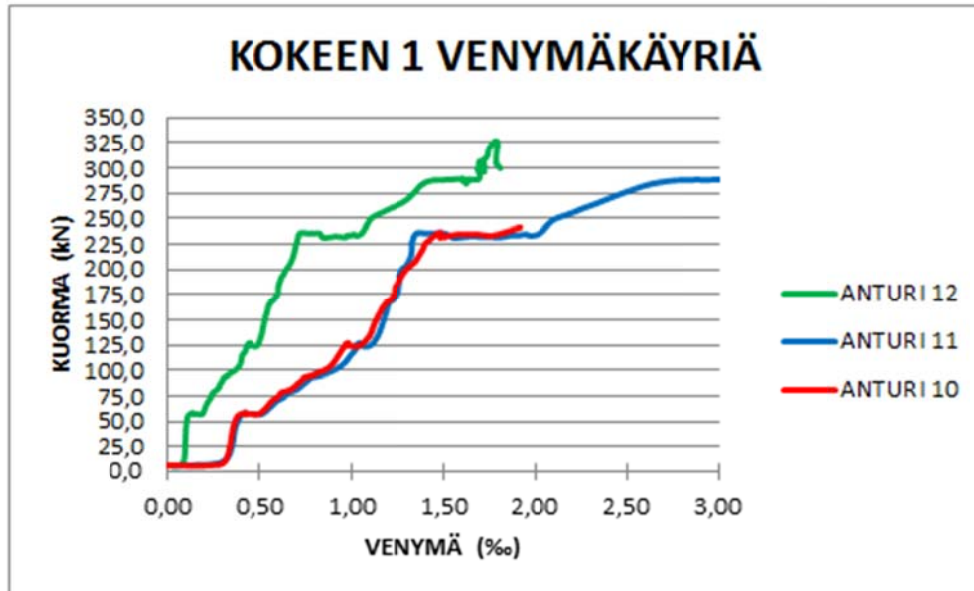
Kuvio 4. Kokeen 2 toteutunut kuormitus ajan funktiona

Kokeessa 2 kuormitus eteni lähes suunnitelman mukaisesti murtoon asti. Terästen jännitykset eivät ylittäneet myötörajaa missään vaiheessa. Kuvion 4 pisteessä 1 kuormalla 226,1 kN huomataan, että kuorman pysyessä vakiona konsoli murtuu. Liitos kuitenkin ottaa kuormaa vielä vastaan ja kuormituksen lopettaminen tapahtuu pisteessä 2 kuormalla 232,3 kN. Pisteessä 1 suurin jännitys teräksissä oli  $345,6 \frac{N}{mm^2}$  palkin anturissa 1.

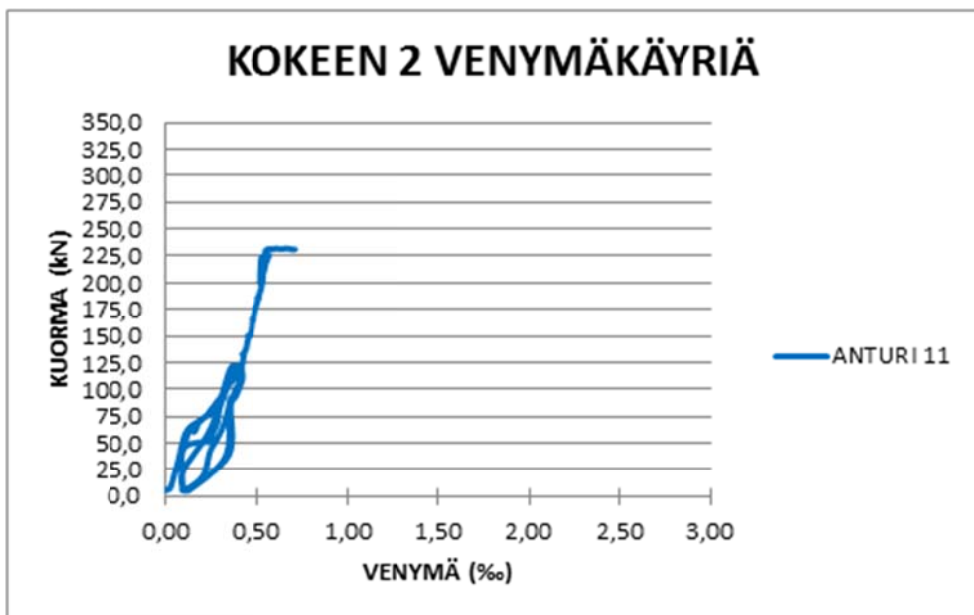


Kuvio 5. Kokeen 3 toteutunut kuormitus ajan funktiona

Koe 3 eteni kuormitus suunnitelman mukaan 270,9 kN:iin asti, jossa konsoli murtui. Terästen jännitykset eivät ylittäneet myötörajaa. Kuvion 5 pisteessä 1 suurin teräksen jännityksen arvo oli  $325 \frac{N}{mm^2}$  pilarin P-1A.6 anturissa 9. Kuten aikaisemmin jo todettiin, tämän kokeen palkin terästen venymäarvot eivät ole luotettavia, joten niitä ei käsitellä tarkemmin.

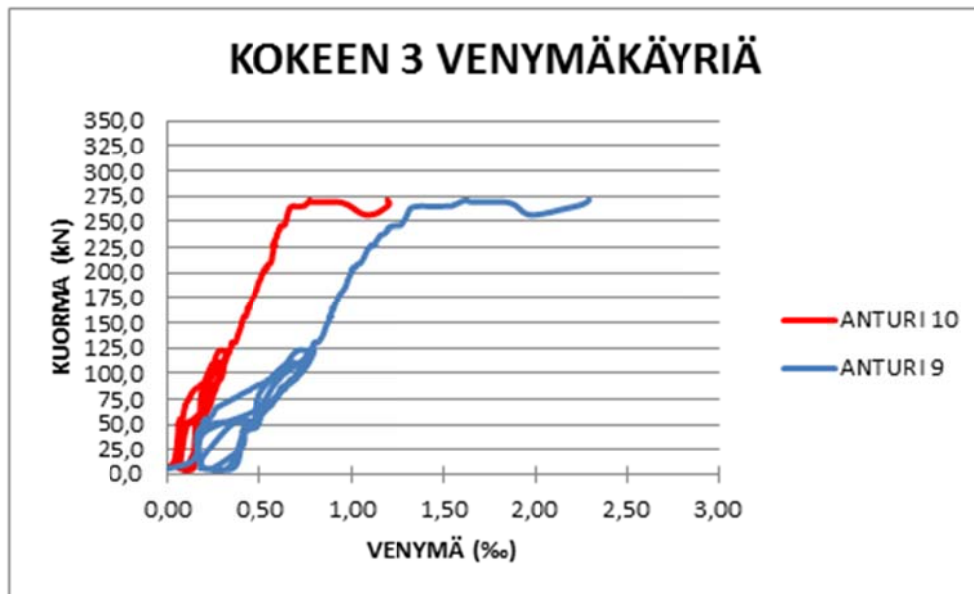


Kuvio 6. Kokeen 1 pilariosan terästen venymäkäyriä. Anturi 9 ei toiminut tässä kokeessa.

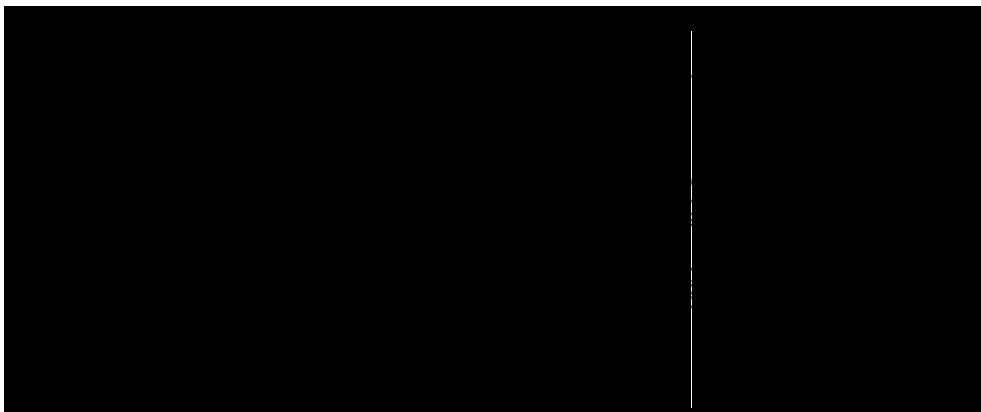


Kuvio 7. Kokeen 2 pilariosan terästen venymäkäyriä. Anturi 12 ei toiminut, eikä tässä kokeessa ollut antureita 9 ja 10.



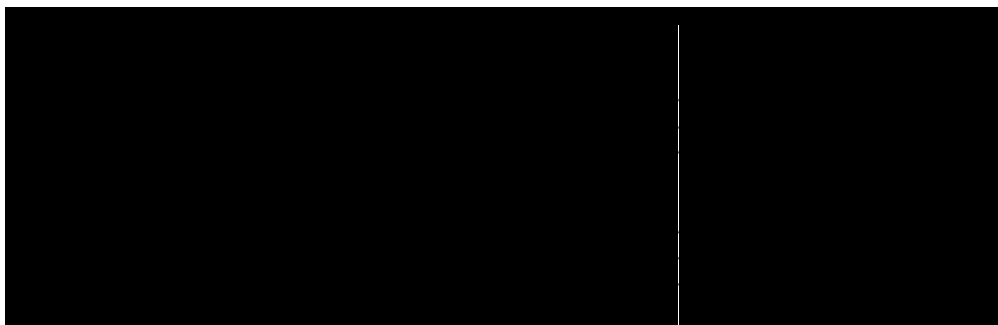


Kuvio 8. Kokeen 3 pilariosan terästen venymäkäyriä. Tässä kokeessa ei ollut antureita 11 ja 12.



Kuva 8. Kuvioiden 6–8 venymäanturien sijainti (Miettinen Joonas)

Kuvioista 6–8 huomataan, että pilarin teräkset ovat venyneet huomattavasti tietyssä pisteessä vaikka teräs ei ole vielä edes teoreettisella myötörajalla. Kokeissa 1 ja 2 teräkset konsolin yläpinnassa venyvät noin 230 kN:n kuormalla ja kokeessa 3 ne venyvät noin 260 kN:n kuormalla. Tästä voi päätellä, että pilarin konsoli murtuu pohjasta ja kuorma siirtyy hetkessä kuvan 8 teräksille.



Kuva 9. Siirtymäantureiden sijainti kokeessa 1 (Miettinen Joonas)

Kuvasta 9 nähdään siirtymäanturien sijainnit. Anturit 1, 6, 8 ja 10 mittaavat pilarin konsoliosan painumaa. Anturit 7 ja 9 ovat palkissa konsoliosan päällä. Anturit 2, 3, 4 ja 5 ovat palkin alareunassa teräksisillä leuoilla.

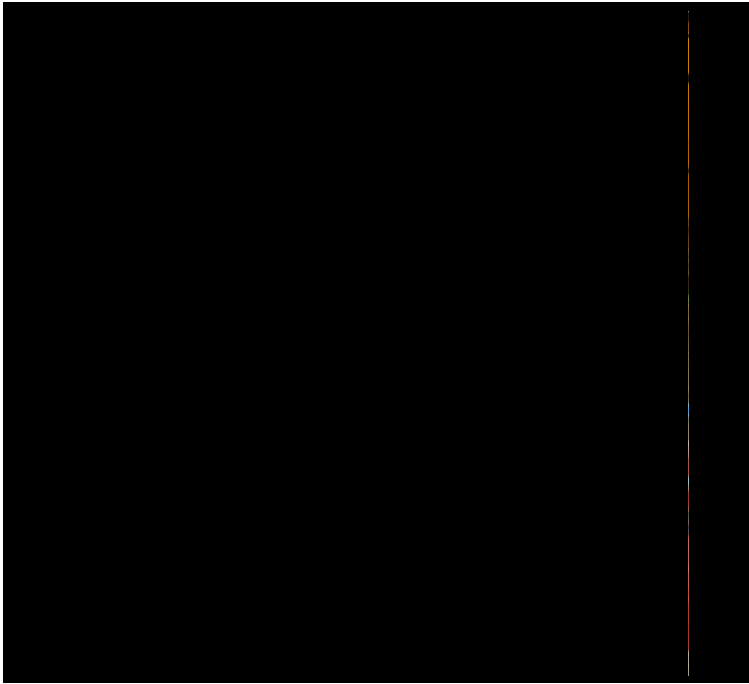
Liitoksessa palkin lovipään ja pilarikonsolin pohjan väliin on suunniteltu 5 mm:n rako. Kokeessa 1 raoksi mitattiin molemmissa päissä 12 mm. Siirtymäantureiden 7 ja 9 arvoista voidaan määrittää missä vaiheessa kuormitusta rako on umpeutunut. Anturi 9 oli painunut 12,07 mm 232,7 kN:n kuormalla ja anturi 7 oli painunut 12,34 mm 252,0 kN:n kuormalla. Kuten kuvasta 7 huomataan, pilarin konsoliosassa oli jo suuret halkeamat ennen kuin palkin lovipää oli painunut pohjaan kiinni.

Kokeessa 2 palkin lovipään ja pilarin konsolin pohjan raoksi mitattiin molemmissa päissä 7,5 mm. Siirtymäanturien sijainnit olivat samat kuin kokeessa 1 (kuva 9). Anturi 9 oli painunut 7,53 mm jo 91 kN:n kuormalla. Anturi 7 oli painunut 7,5 mm 204,7 kN:n kohdalla.

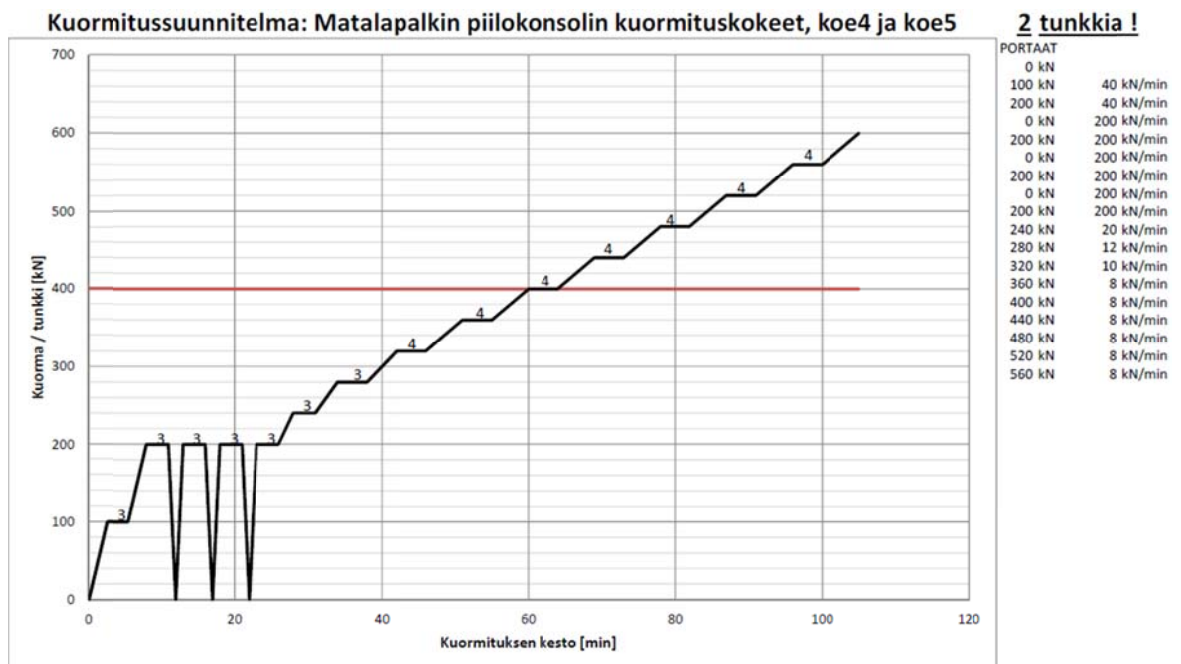
Kokeessa 3 palkin lovipään ja pilarin konsolin pohjan raoksi mitattiin molemmissa päissä 8,7 mm. Siirtymäanturien sijainnit olivat samat kuin kokeessa 1 ja 2 (kuva 9). Anturi 9 oli painunut 8,7 mm jo 164,4 kN:n kuormalla. Anturi 7 oli painunut 8,72 mm 189,4 kN:n kohdalla.

## 4 KOKEET 4 JA 5 (PALKIN KONSOLIOSAN MURTAMINEN) JA TULOSTEN KÄSITTELY

Tässä kokeessa haluttiin koestaa pelkästään palkin konsoliosaa, joten pilarin konsoliosaksi valmistettiin ylimitoitettu teräsosa (kuva 9). Kuormitustasot tehtiin palkin ulokkeen laskentakuorman pohjalle, joka on 400 kN (kuvio 9). Koe 4 eteni kuormitussuunnitelman mukaan palkin murtoon asti, jossa palkin liitoksen tukireaktio oli 484,7 kN.



Kuva 9. Teräksinen pilariosa (Pihavaara Jere)

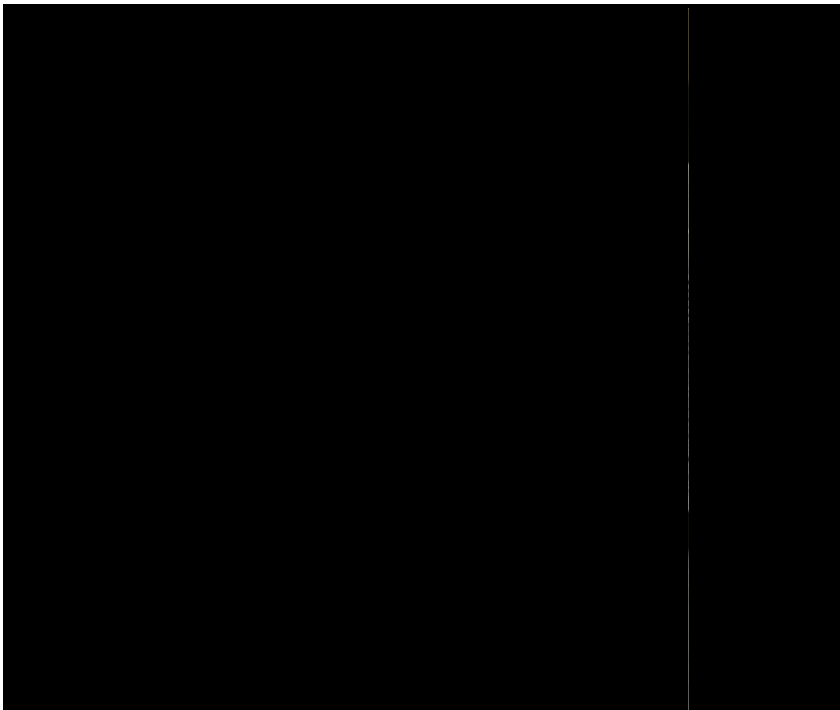


Kuvio 9. Kokeiden 4 ja 5 kuormitussuunnitelma. Laskentakuorma 400 kN (Haavisto Jukka, TTY)



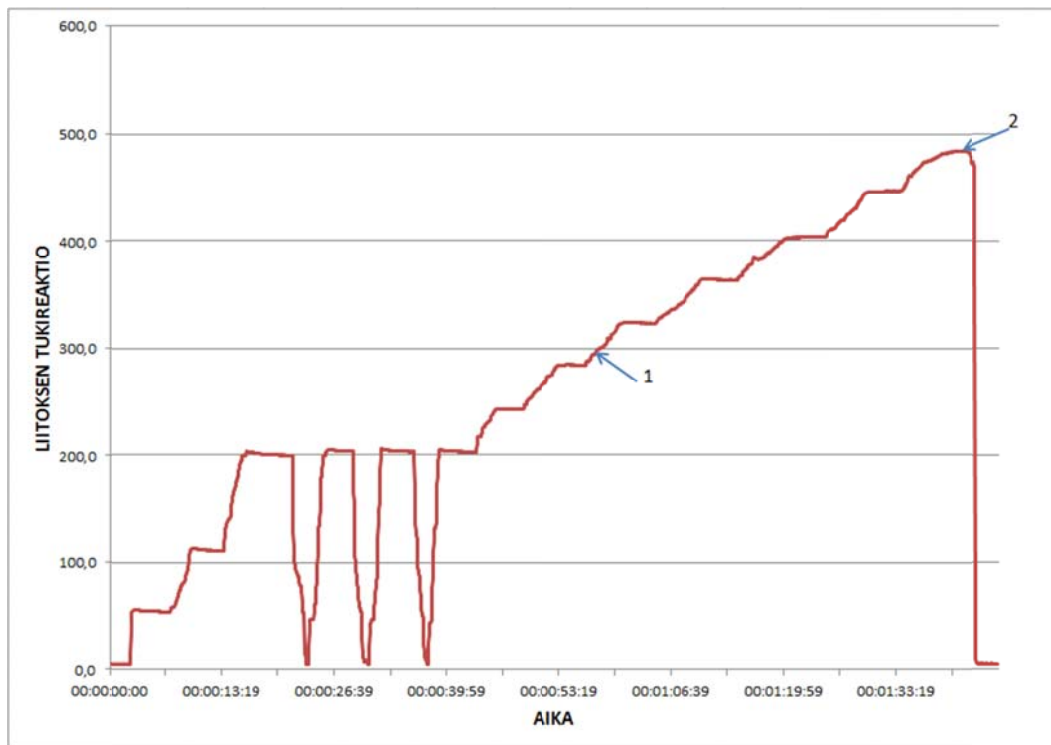
Kuva 10. Kokeiden 4 ja 5 koejärjestely (Pihavaara Jere)

Koe 5 oli koejärjestelyiltään samanlainen kokeen 4 kanssa (kuva 10). Koe eteni kuormitussuunnitelman mukaan kuormaan, jossa liitoksen tukireaktio oli 554,8 kN.



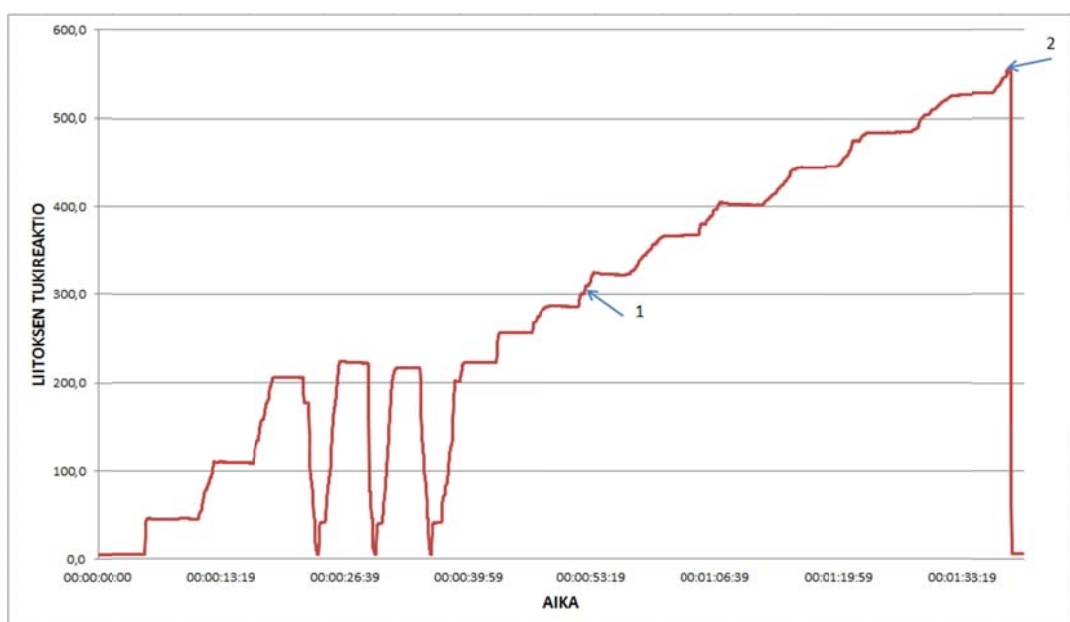
Kuva 11. Kokeen 5 murtunut palkki (Pihavaara Jere)

Kokeissa 4 ja 5 jouduttiin erikseen laskemaan tukireaktio liitokselle, koska palkki oli epätasapainossa tuen ja liitoksen välillä. Tukireaktion kasvu ajan funktiona näkyy kuvioissa 10 ja 11.



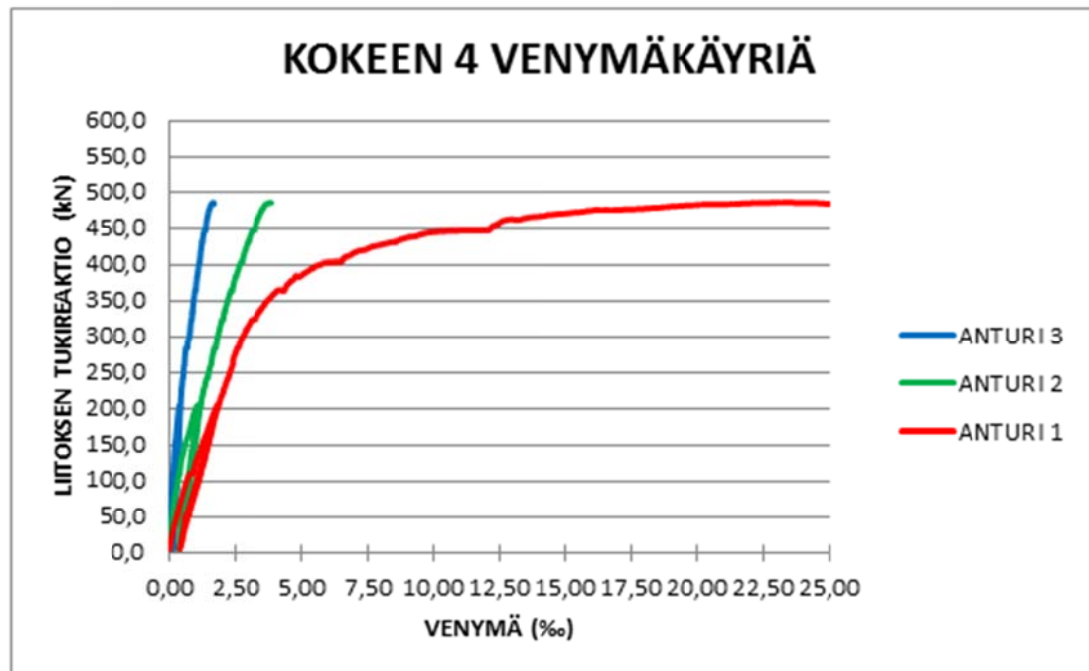
Kuvio 10. Liitoksen tukireaktio ajan funktiona kokeessa 4

Kuvion 10 pisteessä 1 teräksen jännitys anturissa 1 (kuva 12) ylittää myötörajan tukireaktion ollessa 299,1 kN. Palkin konsoliossa murtuu pisteessä 2 tukireaktiolla 484,7 kN. Anturin 1 teräksen venymä on tässä pisteessä 23,02 ‰. Kokeiden 4 ja 5 terästen venymäkäyrät ja anturien sijainnit näkyvät liitteissä 4 ja 5.

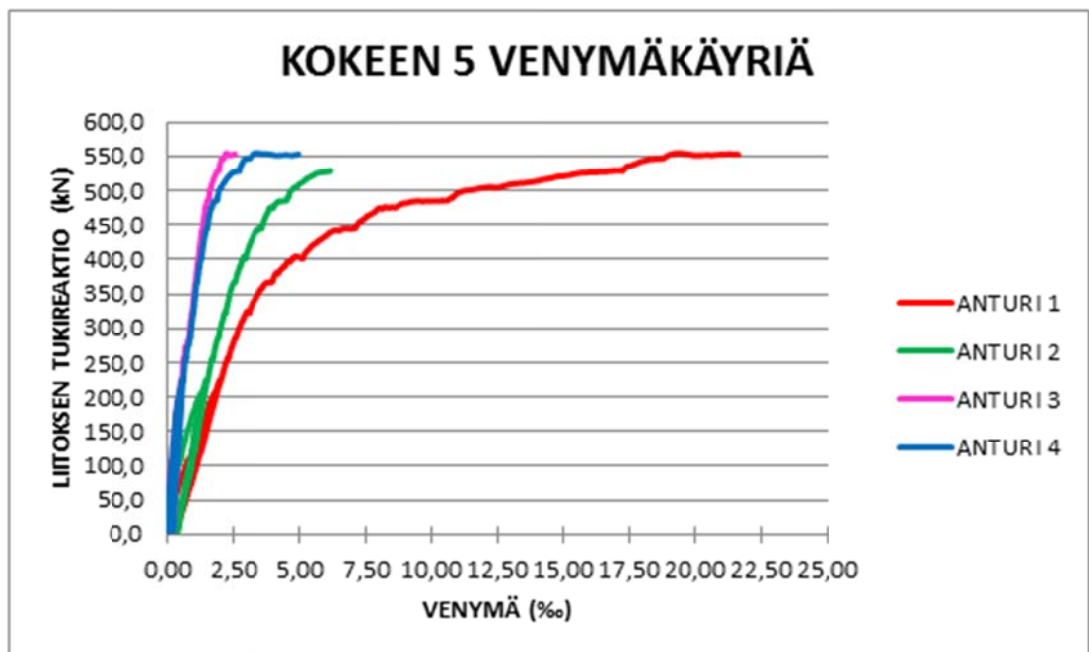


Kuvio 11. Liitoksen tukireaktio ajan funktiona kokeessa 5

Kuvion 11 pisteessä 1 teräksen jännitys anturissa 1 ylittää myötörajan tukireaktion ollessa 305,3 kN. Palkin konsoliossa murtuu pisteessä 2 tukireaktiolla 554,8 kN. Anturin 1 teräksen venymä on tässä pisteessä 19,39 ‰.



Kuvio 12. Kokeen 4 terästen venymäkäyriä. Anturi 4 ei toiminut tässä kokeessa.



Kuvio 13. Kokeen 5 terästen venymäkäyriä

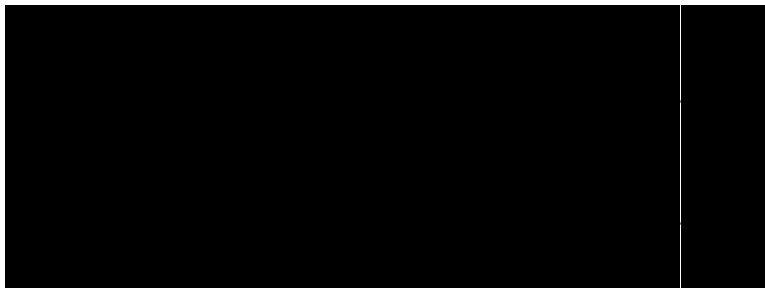


Kuva 12. Kuvioiden 12 ja 13 anturien sijainti (Miettinen Joonas)

Kokeiden 4 ja 5 terästen venymäkäyrät ovat verrattavissa kuvioissa 12 ja 13. Käyrät ovat lähes yhdenmuotoisia. Niistä huomataan, että molemmissa kokeissa ensimmäisenä myötörajan saavuttaa anturi 1 (kuva 12). Teoreettiset myötörajat laskettiin noin 300 kN:n kohdalle, jossa myös todellinen venymäkäyrä alkaa hieman myödetä.

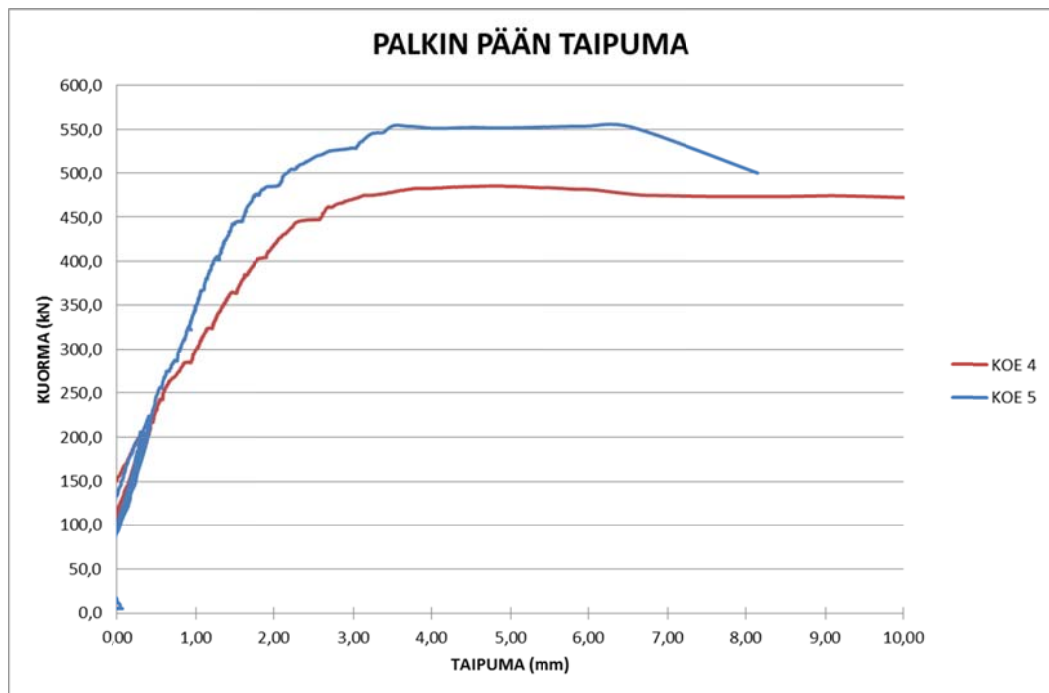
Anturi 2 saavuttaa toisena myötörajan. Teoreettisen myötörajan ylitys tapahtui 404 kN:n kuormalla kokeessa 4 ja 390 kN:n kuormalla kokeessa 5. Kuvion 13 anturin 2 käyrästä nähdään myös kuinka käyrä lähtee taipumaan noin 400 kN:n kohdalla.

Haoissa olevat anturit 3 ja 4 (kuva 12) eivät ylittäneet myötörajaa kokeessa 4. Kokeessa 5 mentiin suuremmille kuormille ja siellä anturi 4 ylittää teoreettisen myötörajan kuormalla 534 kN.



Kuva 13. Siirtymäanturien sijainti kokeessa 4 (Miettinen Joonas)

Palkin pään taipumakäyrät näkyvät kuviossa 14. Ne on laskettu vähentämällä anturien 1 ja 3 keskiarvosta anturin 2 arvo. Anturien sijainti näkyy kuvassa 13.



Kuvio 14. Palkin pään taipuma kokeissa 4 ja 5



## 5 PORANÄYTTEIDEN OTTO JA BETONIN PURISTUSKOKEET

Betonin puristuslujuudeksi on ilmoitettu K60, mutta betonin todellisen puristuslujuuden selvittämiseksi jokaisesta kokeissa käytetyistä palkeista ja pilareista otettiin poranäyte (kuva 14 ja kuva 15). Pilareista saatiin helposti otettua koelieriöt. Palkeista oli haastavampaa saada tarpeeksi suuria koepaloja niiden runsaan raudoituksen takia. Palkeista porattiinkin tästä syystä kapeampia lieriöitä.



Kuva 14. Poranäytteidenotto pilarista ja palkista (Pihavaara Jere)



Kuva 15. Poranäytteitä pilarista (Pihavaara Jere)



Kuva 16. Puristettu lieriö (Pihavaara Jere)

Puristuslujuuden vaatimustenmukaisuuden valvonnassa noudatetaan standardin SFS-EN 206-1 kohta 8.2.1 (RIL 131-2004, 113). Puristettavan lieriön halkaisijan ja korkeuden suhde on oltava  $1 \pm 0,05$  (RIL 131-2004, 114). Poratut lieriöt sahattiin ja hiottiin päistä oikean mittaisiksi. Jokaisesta koestetusta osasta valmisteltiin yksi puristettava lieriö. Yhteensä puristuskokeita tehtiin siis 10 kpl (kuva 16). 7 kpl lieriöistä oli halkaisijaltaan 104 mm, 2 kpl 74,4 mm ja 1 kpl 52,1 mm.

Puristin antoi tulokseksi voiman, jolla lieriö murtui. Yksikkönä oli kN, joten se täytyi laskemalla muuntaa  $\text{N/mm}^2$ , jota käytetään yleisesti puristuslujuuden yksikkönä. Saadut puristuslujuudet täytyi tämän jälkeen muuttaa 150 mm:n kuution lujuudeksi seuraavasti (RIL 131-2004, 6.3.3.3):

- jos lieriön halkaisija on 100 - 150 mm, kerrotaan yksittäinen lujuustulos luvulla 1,05
- jos lieriön halkaisija on 50 - 80 mm, kerrotaan yksittäinen lujuustulos luvulla 1,1.

Taulukko 1. Betonilieriöiden puristuskokeiden tulokset

Koekappale	Halkaisija d(mm)	Kuorma (kN)	Poikkipinta-ala ( $\text{mm}^2$ )	Mitattu puristuslujuus $f_k$ ( $\text{N/mm}^2$ )	150 mm kuution lujuus $f$ ( $\text{N/mm}^2$ )
P-1A.1	104,3	758,0	8544	88,7	93,2
P-1A.2	104,2	819,0	8528	96,0	100,8
P-1A.3	104,2	807,0	8528	94,6	99,4
P-1A.4	104,2	758,0	8523	88,9	93,4
P-1A.5	104,2	820,0	8528	96,2	101,0
P-1A.6	104,1	795,0	8511	93,4	98,1
BM-1.1	104,5	916,0	8577	106,8	112,1
BM-1.2	52,1	227,5	2132	106,7	117,4
BM-2.1	74,4	462,2	4347	106,3	116,9
BM-2.2	74,4	444,0	4347	102,1	112,3
				<b>Keskiarvo <math>f_{cm}</math></b>	<b>104,5</b>
				<b>Pienin koetus <math>f_{cmin}</math></b>	<b>93,2</b>

Kun koekappaleita on 3-14 kpl, vertailulujuus  $K_k$  on pienempi seuraavista arvoista

$$K_k = f_{cm} - f_n \text{ tai}$$

$$K_k = f_{cmin} + 4$$

missä	$f_{cm}$	on koetulosten keskiarvo, joka on 104,5 (taulukko 1)
	$f_{cmin}$	on pienin koetulos, joka on 93,2 (taulukko 1)
	$f_n$	on tässä tapauksessa 4, koska koekappaleita on 10-14 (RIL 131-2004, Taulukko 6.1).

Vertailulujuudeksi  $K_k$  saadaan  $97 \text{ N/mm}^2$  ilmoitettuna  $0,5 \text{ N/mm}^2$  tarkkuudella. Todellinen puristuslujuus on siis huomattavasti suurempi kuin ilmoitettu betonin lujuus, joten voidaan todeta, että liitoksen laskelmia pienempi kestävyys ei johtunut betonin huonosta laadusta.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tavoitteena opinnäytetyössä oli jatkaa Visa Järvisen opinnäytetyötä *BM-matalapalkin piilokonsoliliitos. Lujuuslaskenta ja koesuunnittelu. 26.5.2014*. Tarkoitus oli koekuormittaa Järvisen työssä suunniteltu liitos ja vertailla tuloksia Järvisen työn laskelmiin.

Koekuormitusten perusteella liitoksen pilariosan kestävyys oli noin 230 kN. Palkin lovipää murtui 485 kN:n kuormalla, mutta terästen jännitykset ylittyivät noin 300 kN:n kohdalla, joten palkin lovipään kestävyys rajataan siihen.

Liitoksen jatkokehitys on tarpeen, jotta sen kestävyyttä saadaan kasvatettua ilman kustannusten huomattavaa nousua. Kehitystä tarvitaan myös tuotannollisista syistä, koska nykyisissä osissa ongelmana oli suojabetonin riittävyys ja tämän takia terästen asennus oli hankalaa. Jos kehityksessä onnistutaan, saadaan markkinoille kilpaileva tuote teräksisille piilokonsoleille. Kokeiden aikana ja niiden jälkeen pohdittiin vaihtoehtoisia ratkaisuja.

Suojabetonin riittävyyteen ainoa järkevä keino on liitoksen geometrian muutos. Yksi vaihtoehdoista olisi ollut laittaa teräksiksi ruostumatonta terästä, mutta ruostumaton teräs on kallista ja tämän vuoksi liitoksesta ei saataisi tarpeeksi taloudellista.

Liitoksen geometrian muutos on myös tarpeen kestävyuden kannalta. Teräksen lujuuden kasvattaminen olisi hyödyllistä palkissa, koska siinä teräksen myötörajat ylittyivät huomattavasti pienemmillä kuormilla kuin murto tapahtui. Lisäksi pohdittiin, olisiko liitos tarpeeksi taloudellinen, jos liitoksen heikompi osa eli pilariosa vaihdettaisiin teräksiseen konsoliosaan. Paljaana oleva teräksinen konsolin pinta vaatii kuitenkin palosuojauksen ja tästä tulisi lisäkustannuksia.

## LÄHTEET

BETONINORMIT. RakMK B4 Betonirakenteet, mitoitusaulukot ja käyrästöt, SFS-EN 206-1 ja kansallinen liite: RIL 131-2004. HELSINKI: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

HAAVISTO, Jukka 2015. Murtokuormituskokeisiin tuotetut materiaalit.

JÄRVINEN, Visa. 2014. BM-matalapalkin piilokonsoliliitos: Lujuuslaskenta ja koesuunnittelu. Savonia Ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Saatavissa:

<http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405269868>