

Teräsbetonipalkin leikkausvahvistaminen hiilikuitukankaalla

Tommi Auvinen, Ville Kantola

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Ville Kantola, Tommi Auvinen	
Työn nimi Teräsbetonipalkin leikkausvahvistaminen hiilikuitukankaalla	
Päiväys 21.12.2012	Sivumäärä/Liitteet 70 / 22
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT, Arto Puurula, lehtori Juha Pakarinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu	
Tiivistelmä <p>Insinööriyön tavoitteena oli tutkia betonipalkkien leikkausvahvistamista hiilikuitukankaalla. Työn kokeellinen osuus toteutettiin Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa talven 2011 - 2012 aikana. Hiilikuituvahvistamista on tutkittu useissa maissa, mutta aiheesta on vain vähän suomenkielistä materiaalia. Opinnäytetyön aiheeksi valittiin hiilikuituvahvistaminen ja sen soveltuvuus leikkausvahvistukseen, jotta aiheesta saataisiin oppimateriaalia sekä Suomessa tehtyjen kokeiden tutkimustuloksia.</p> <p>Tutkimuksen suorittamiseksi valmistettiin kaksi samanlaista teräsbetonipalkkia. Ensimmäinen vahvistamaton palkki kuormitettiin murtoon saakka, jonka jälkeen se korjattiin ja vahvistettiin hiilikuitukankaalla. Toinen palkista vahvistettiin betonin kuivumisen jälkeen hiilikuitukankaalla ennen kuormituskoetta. Tällä tavoin vertailtiin, kuinka hyvin hiilikuitukangas sopii vaurioituneen palkin korjaamiseen, sekä ehjän palkin vahvistamiseen. Kokeista saatuja tuloksia vertailtiin Euronormi 2:n laskennallisiin tuloksiin sekä kahden eri epälineaarisen laskentaohjelman, Response 2000:n ja Abaqus FEA:n, antamiin tuloksiin.</p> <p>Työssä todettiin hiilikuitukankaan olevan toimiva ratkaisu rakenteelle, jossa on sattunut jonkinlainen rakennevirhe tai rakenteen tuleva käyttö vaatii suurempaa kuormitusta. Kokeessa hiilikuitukankaan todettiin estävän myös puristusmurron syntymistä asennettaessa hiilikuitukangasta oletulle puristusmurtuman alueelle, koska betoni ei pääse laajenemaan kankaan alla. Hiilikuitukangas ei murtunut leikkausrasituksen vaikutuksesta lyhyen jännevälin ja palkin mataluuden takia. Kokeissa saavutettiin 65 %:n vahvistusvaikutus, kun käytettiin hiilikuitukangasta ehjään rakenteeseen. Myös korjattu palkki saatiin kestämään 24 % enemmän hiilikuidun avulla, kuin mitä vahvistamaton palkki kesti.</p>	
Avainsanat Rakennesuunnittelu, hiilikuituvahvistaminen, leikkaus, murto, epälineaarinen FEM, betonipalkki	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Ville Kantola, Tommi Auvinen			
Title of Thesis Shear Strengthening of a Concrete Beam with Sheets of Carbon Fibre Reinforced Polymers, CFRP			
Date	21.12.2012	Pages/Appendices	70 / 22
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, Principal lecturer, PhD and Mr Juha Pakarinen, lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to study how to use carbon fibre reinforced polymers for shear strengthening of concrete beams. Carbon fibre strengthening has been studied in many countries, but there is only little Finnish material available. That is why shear strengthening of concrete beams with carbon fibre reinforced polymers was suggested as a topic of this thesis.</p> <p>For the study, two identical concrete beams were made. The first one was loaded without previous strengthening. Then the beam was repaired and strengthened with FRP sheets. The other beam was strengthened first and then loaded. In this way it was found that carbon fibres are suitable for strengthening of both damaged and not damaged concrete beams. The results of the loading tests were compared to the results of two different non-linear calculation programs, Response 2000 and Abaqus FEA.</p> <p>As a conclusion, carbon fibre strengthening was found to be a good method for strengthening structures which need higher shear force capacity. It was also proved that carbon fibres can be used to prevent compression failure. Because of their high tensile strength, carbon fibre sheets did not fail as an effect of shear force in the loading tests. In conclusion, carbon fibre sheets proved to be a suitable method for shear strengthening.</p>			
<p>Keywords Structural design, shear, strengthening, Carbon Fibre Reinforced Polymers, CFRP, concrete beam</p>			



SAVONIA

Alkusanat

Haluamme molemmat kiittää osaltamme kaikkia työmme eri vaiheissa apuna olleita henkilöitä, etenkin laboratorioinsinööri Eemeli Lehmusoksaa, joka auttoi laboratoriokokeiden suorittamisessa. Erityisesti haluamme kiittää ohjaajaamme yliopettaja Arto Puurulaa, joka ohjasi asiantuntevasti työtämme.

Kuopiossa 21.12.2012

Tommi Auvinen

Ville Kantola

SISÄLTÖ	
SYMBOLIEN SELITTEET	7
1 JOHDANTO.....	9
1.1 Tausta ja tavoitteet.....	9
1.2 Hiilikuituvahvistaminen rakentamisessa	9
2 TERÄSBETONIPALKIN MITOITUS LEIKKAUSVOIMALLE.....	12
2.1 Raudoitettun betonirakenteen murtuminen leikkausvoimasta.....	12
2.2 Esimerkitapaus palkkien hiilikuituvahvistamisesta.....	19
2.2.1 Kohteen kuvaus	19
2.2.2 Vahvistustoimenpide.....	19
2.3 Mitoitus leikkausvoimavahvistamiselle.....	21
2.3.1 Arviointi ennen vahvistamista	21
2.3.2 Raudoitettun betonirakenteen leikkausvoimavahvistaminen	22
2.3.3 Leikkausvahvistamisen laskentamalli	23
2.3.4 FRP-raudoituksen hyöty leikkauskestävyyteen	24
2.3.5 Mitoitus	25
2.4 Esimerkki leikkausvoimavahvistamisesta	28
3 INSINÖÖRITYÖN VAIHEET	34
3.1 Suunnittelu	34
3.2 Hiilikuitukankaan asennus.....	41
3.3 Venymäliuskat	43
3.4 Materiaalien koestus.....	45
3.4.1 Harjaterästen koestus	45
3.4.2 Liimattujen hiilikuitukangaskomposiittien koestukset	46
3.4.3 Betonin koestus	47
3.5 Palkkien koestus	48
3.6 Työssä käytetyt mitoitusohjelmat	50
3.6.1 Frame analysis.....	50
3.6.2 Response 2000	50
3.6.3 Abaqus FEA	50
4 TULOKSET.....	52
4.1 Laboratoriokokeiden tulokset.....	52
4.1.1 Vertailupalkki	52
4.1.2 Vahvistettu palkki.....	56
4.1.3 Korjattu palkki	62
4.2 Pohdinta	68
LÄHTEET	70

LIITTEET

Liite 1 Palkkien valmistus

Liite 2 Venymäliuskojen asennus ja kytkentä

Liite 3 Abaqus FEA -ohjelman tulokset vertailupalkista

Liite 4 Abaqus FEA -ohjelman tulokset vahvistetusta palkista

Liite 5 Abaqus FEA -ohjelman tulokset korjatussa palkista

SYMBOLIEN SELITTEET

L	Jänneväli	[mm]
b	Palkin leveys	[mm]
h	Palkin korkeus	[mm]
P	Pistekuorma	[kN]
g_k	Palkin omapaino	[kN/m]
h-d	Raudituksen etäisyys palkin pohjasta	[mm]
d	Vetoterästen tehollinen korkeus	[mm]
F_{ck}	Betonin lieriölujuuden ominaisarvo	[N/mm ²]
F_{cm}	Betonin puristuslujuuden keskiarvo ($F_{ck}+8\text{MPa}$)	[N/mm ²]
F_{yd}	Raudituksen suunnittelulujuus	[N/mm ²]
F_{yk}	Raudituksen myötölujuus	[N/mm ²]
F_{myk}	Raudituksen myötölujuuden keskiarvo	[N/mm ²]
F_t	Raudituksen murtolujuus	[N/mm ²]
F_{mt}	Raudituksen murtolujuuden keskiarvo	[N/mm ²]
M_{ed}	Mitoitusmomentti	[kNm]
V_{Ed}	Mitoitusleikkausvoima	[kN]
μ	Suhteellinen momentti	[-]
β	Puristuspinnan suhteellinen korkeus	[-]
Z	Sisäinen momenttivarsi	[-]
$A_{s,m}$	Laskennallinen teräsmäärä	[mm ²]
$A_{s,min}$	Minimiteräsmäärä	[mm ²]
n	Terästen lukumäärä	[kpl]
A_s	Todellinen teräsmäärä	[mm ²]
ρ	Geometrinen raudoitussuhde	[-]
ω	Mekaaninen raudoitussuhde	[-]
M_{Rd}	Taivutusmomenttikestävyys	[kNm]
%-	Käyttöaste	[%]
V_{Rd}	Leikkauskestävyyden mitoitusarvo	[kN]
V_s	Leikkauskestävyys, teräs	[kN]
V_c	Leikkauskestävyys, betoni	[kN]
V_f	Leikkauskestävyys, FRP	[kN]
Θ	Leikkaushalkeaman kulma	[°]
b_w	Poikkileikkauksen pienin leveys vedetyllä alueella	[mm]
v_1	Lujuuden pienennyskerroin	[-]
A_s/s	Leikkausraudoituksen määrä	[mm ²]
ρ_w	Leikkausraudoitussuhde	[-]

V_0	Leikkausvoima ennen vahvistusta	[kN]
$V_{Rd,s}$	Leikkausraudoituksen myötäämiseen perustuva leikkauskestävyyden mitoitusarvo	[kN]
V_{ccd}	Puristusalueen voiman leikkauskomponentin mitoitusarvo kaltevan puristuspaarteen tapauksessa	[kN]
V_{td}	Vetoraudoituksen voiman leikkauskomponentin mitoitusarvo kaltevan vetopaarteen tapauksessa	[kN]
$V_{Rd,f}$	Hiilikuidun tuoma leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo	[kN]
$V_{Rd,max}$	Leikkauskestävyyden yläraja mitoitettaessa	[kN]
A_f	Hiilikuitukankaan määrän vaikutuskerroin	[mm]
ϵ_{fd}	Hiilikuidun venymä	[%]
β_f	Hiilikuidun kaltevuus palkin pituussuunnassa	[°]
E_f	Hiilikuidun kimmokerroin	[N/mm ²]
L_{ef}	Etäisyys FRP-vahvistuksien välillä, joilla aktiivinen tehonsiirto	[mm]
d_{ef}	Hiilikuidun tehollinen korkeus	[mm]
l_{ef}	Hiilikuidun ankkurointipituus	[mm]
$\epsilon_{fb,d}$	Tehokas ankkurointivenymä	[%]
G_f	Hiilikuidun murtoenergia	[Nmm/mm ²]
ϵ_{ef}	Hiilikuidun tehokas suhteellinen venymä	[%]
t_f	Hiilikuidun paksuus	[mm]

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia hiilikuidun käyttäytymistä teräsbetonipalkkien vahvistuksessa, koska rakenteiden vahvistamiselle on tarvetta tulevaisuudessa vanhan rakennuskannan takia. Materiaalin käyttäytymistä rakenteissa halutaan selvittää materiaalin käytön lisäämiseksi betonirakentamisessa.

Tämä opinnäytetyö on yksi osa kolmen opinnäytetyön kokonaisuudesta, joissa tutkitaan teräsbetonipalkkien vahvistamista hiilikuidulla. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan palkin leikkausvahvistusta hiilikuitukankaalla, toisessa insinööriyössä tutkitaan taivutusvahvistusta hiilikuitutangoilla ja kolmannessa tutkitaan palkin vahvistamista käyttäen sekä hiilikuitukangasta leikkausvahvistamiseen, että hiilikuitutankoja taivutusvahvistamiseen.

Tätä tutkimusta varten valmistetaan kaksi identtistä teräsbetonipalkkia. Ensimmäinen palkista koestetaan ilman ulkoisia vahvikkeita ja toinen palkki hiilikuidulla vahvistettuna. Lisäksi ensimmäisenä koestettu palkki korjataan ja vahvistetaan hiilikuitukankaalla. Palkkien koestustulosten perusteella tutkitaan hiilikuidun tuomaa vahvistusvaikutusta leikkauskestävyyteen.

1.2 Hiilikuituvahvistaminen rakentamisessa

Koska maailmalla rakennuskanta on vanhaa sekä talorakentamisessa että infrastruktuurissa, joudutaan rakenteita korjaamaan tulevaisuudessa tai purkamaan ne ja rakentamaan uusia tilalle. Korjaustarve johtuu rakenteiden rapautumisesta huonojen sääolosuhteiden takia sekä epäsuotuisien kuormitusten vuoksi. Korjaustarpeen vuoksi on kehitetty uusia menetelmiä ja yksi toimiva ratkaisu rakenteellisissa korjauksissa on hiilikuituvahvistus.

Hiilikuitumateriaalien käytöstä on monia ulkomaisia tutkimuksia, mutta Suomessa tutkimustieto on vähäistä. Suomessa aihetta on tutkinut Timo Tirkkonen teoksessaan *Betonisiltojen vahvistaminen hiilikuidulla* (Tielaitos 1999). FRP-materiaaleilla (kuituvahvistetut polymeerimateriaalit) on laajat käyttömahdollisuudet erilaisissa rakenteissa ja niillä on myös helppo ja nopea toteuttaa vahvistaminen. Näin saadaan rakenteet vahvistettua tehokkaasti taivutus- ja leikkausvoimia kestäviksi. Hiilikuituvahvisteet

saadaan tarvittaessa myös piilotettua melko helposti rakenteisiin, koska materiaali voidaan asentaa ohuina kerroksina vahvistettavan rakenteen pintaan tai upottamalla hiilikuitutangot rakenteen sisälle.

Hollawayn ja Leemingin (2000) mukaan teräksen käytön luonnolliset haitat, kuten korrosio, ovat lisänneet tutkimusta kuituvahvistettujen polymeerimateriaalien käytöstä teräksen asemasta. Kuituvahvistetut polymeerit tarjoavat syöpymättömän ja monipuolisemman vahvistusmenetelmän, jota voidaan käyttää myös esijännitetyissä betonituotteissa. Hiilikuidun materiaalikustannukset luultavasti vaikuttavat eniten arvioidessa vaihtoehtoisten menetelmien käyttöä. Hintojen voidaan olettaa laskevan materiaalityömittausten määrän ja markkinoiden kasvaessa. Liimatut kuituvahvistetut polymeerit (komposiitit) ovat jo voittaneet tarjouskilpailuja perinteisiltä ratkaisuilta.

Hiilikuituvahvistetuilla komposiiteilla on monia hyviä ominaisuuksia verrattuna teräkseen, kuten

- alhainen paino
- rajoittamaton pituus
- ohut vahvistekerros
- korkea vetolujuus ja jäykkyys
- hyvä sään ja kemikaalienkesto
- hyvä palonkestävyys
- alhaiset kokonaiskustannukset
- nopea toteutus työmaalla.

Komposiitin paino on niin alhainen, että 20 m pitkät komposiittilevyt voidaan kantaa paikan päälle miesvoimin. Joustavuuden ansiosta levyjä voidaan myös taivuttaa keulaan, joka mahdollistaa kuljetuksen pakettiautolla ja vahvistuksen ahtaissa tiloissa. Hiilikuidun keveyden ansiosta rakenteille ei muodostu huomattavaa lisäkuormaa. Komposiittilevyjen pituutta ei ole rajoitettu toisin kuin teräslevyjen, joiden pituus on rajoitettu materiaalin painon ja käsittelyongelmien vuoksi.

Hiilikuidun vetolujuus on 2-5 -kertainen verrattuna teräkseen. Se kestää myös hyvin rankoissa olosuhteissa, kuten meri- tai teollisuusympäristössä, eikä tarvitse paksua suojabetonikerrosta ympärilleen. Komposiittilevyillä on alhaisempi lämmönjohtavuus verrattuna teräkseen, joka heikentää tulen vaikutusta hiilikuidun sidosaineisiin. Hiilikuituvahvistetut hiiltävät ennemmin, kuin palavat ja siksi säilyttävät lujuutensa pidempään kuin teräs.

Hiilikuidun korkeampia materiaalikustannuksia kompensoivat ylläpito- ja korjauskustannukset. Pidemmät jännevälit ja keveys nopeuttavat huomattavasti korjaustyötä ja siten vähentävät kustannuksia. Vahvistustyö ei vaadi suurta korjaushanketta, vaan se voidaan toteuttaa lyhyessä ajassa ja siksi pienin kustannuksin.

2 TERÄSBETONIPALKIN MITOITUS LEIKKAUSVOIMALLE

Seuraavassa käsitellään Täljstenin, Blanksvärdin ja Sasin (2011) Ruotsissa julkaistusta teoksesta, Handbok för dimensionering och utförande i samband med förstärkning av betongkonstruktioner med pålimmade fiberkompositer, esitettyjä asioita leikkausvahvistamisesta.

2.1 Raudoitettun betonirakenteen murtuminen leikkausvoimasta

Työssä kerrotaan, kuinka nykyiset betonirakenteet voidaan vahvistaa leikkausvoimaa vastaan hiilikuitukankaalla. Raudoitettun betonirakenteen murtuminen leikkausvoimasta on monimutkainen ilmiö ja komposiitin asentamista varten olisi hyvä olla jonkinlainen käsitys murtumisen syistä. Leikkausmurtuma perustuu kantavuuden sisäisiin mekanismeihin, joiden merkityksistä edelleen keskustellaan. Raudoitettun betonipalkin leikkauslujuus riippuu betonin ominaisuuksista, sisäisestä teräsraudoituksesta ja vahvistettaessa leikkausvahvistuksesta. Leikkausvoiman ohjaus raudoituksille tai muille leikkausvahvisteille, ei riipu pelkästään materiaaliominaisuuksista. Leikkausvoiman ohjaukseen vaikuttavat lisäksi betonin, teräksen sekä komposiittien keskinäinen vuorovaikutus. Raudoitettun betonirakenteen tehokkain leikkausvoimavahvistus FRP:llä saavutetaan asentamalla komposiittikuidut suurimpien vetojännitysten suuntaisesti.

Täljsten ym. (2011) mukaan venymä määritellään teholliseksi venymäksi, $\epsilon_{f,e}$. Kertomalla tehollinen venymä hiilikuidun kimmokertoimella E_f ja käytettävissä olevalla poikkipinta-alalla, saadaan voima, jolla palkin leikkausmurto tapahtuu. Tehollista venymää on hankala laskea. Venymä voidaan kuitenkin arvioida suhteellisen yksinkertaisella mallinnuksella sekä laboratoriokokeiden tuloksilla. Venymä on yleensä pienempi, kuin hiilikuidun murtovenymä, ϵ_{fu} .

Oletetaan, että rakenteella on kantokykyä ennen vahvistamista. Kantokyky voidaan laskea käyttäen apuna esimerkiksi kansallisia betoninormeja ja standardeja, jotka eivät normaalisti sisällä ulkoisia vahvistuksia. Leikkauslujuus nykyisille betonipalkeille riippuu useista eri tekijöistä, kuten betonin lujuudesta, kuorman painopisteestä, palkin geometriasta, ulkoisista normaalivoimista (esim. jännitetystä raudoituksesta), raudoituksen sijoittelusta jne. Ulkoisten vahvistuksien osuus, V_f , lisätään muuhun leikkausvoimaan ja näin saadaan kokonaiskantokyky, V_{Rd} .

Betonin lujuus: Palkilla on elinkaarensa aikana kuormituksen aiheuttamaa veto- ja puristusjännitystä. Leikkaushalkeama johtuu betonin vetolujuudesta ja rakenteen raudoituksesta. Betonin vetolujuus on vaikuttavin ominaisuus leikkauslujuuden kannalta. Halkeama syntyy, kun vetojännitys ylittää betonin vetokestävyyden (kuva 1). Rakenteen sisältäessä leikkausraudoitusta, kantokyky kasvaa, kunnes lopulta syntyy joko puristus- tai taivutusmurtuma. Puristusmurtuma on seurausta betonin puristuskestävyyden pettämisestä puristusjännityksien kasvaessa.

MacGregor ja White (2005) ovat tutkineet, että betonin runkoaineksen raekoko vaikuttaa rakenteen leikkauslujuuteen. Runkoaineksen raekoon kasvaessa myös halkeamat kasvavat, jonka seurauksena suurempi leikkauskuorma kulkeutuu halkeamien ylitse.

Jänneväli leikkaustilanteessa – palkin korkeus: Poikkittaiset kuormitukset, jotka vaikuttavat lähellä tukea, siirtyvät suoraan tuelle. Monissa normeissa vähennetään kuormituksen vaikutusta lähellä tukea sen sijaan, että todellinen kuormakantomekanismi otettaisiin huomioon.

Palkin geometria: Sen lisäksi, että suurella poikkileikkauksella on paljon suurempi leikkauslujuus verrattuna pieneen poikkileikkaukseen, vaikuttavat muutkin geometriset parametrit kantavuuteen, esimerkiksi palkin kaltevuus tai raudoitus.

Normaalivoima: Aksiaaliset voimat voivat aiheutua ulkoisista normaalivoimista, kuten esijännitetystä raudoituksesta. Normaleissa rakenteissa aksiaaliset vetovoimat pienentävät rakenteen leikkauslujuutta, kun taas aksiaaliset puristusvoimat kasvattavat leikkauslujuutta.

Vetoraudoitus: Taivutushalkeama vaikuttaa muodostuvaan leikkaushalkeamaan. Kun vetoraudoitusta on vähän, taivutushalkeamat nousevat korkeammalle ja halkeamaleveys on suurempi kuin mitä se olisi suuremmalla vetoraudoituksella. Kasvanut halkeamaleveys johtaa leikkauskapasiteetin pienenemiseen vaarnavaikutuksen vähenemisen johdosta.

Leikkausraudoitus: Rakenteen leikkauslujuutta voidaan parantaa rakentamisen yhteydessä käyttämällä teräshakasia. Hakojen tarkoitus on varmistaa, että leikkausvoimat siirtyvät leikkaushalkeamien yli. Ennen leikkaushalkeamia, rasiudesta on hakasisa yhtä paljon kuin betonissa. Näillä rasiustasoilla hakasien osuus leikkausvoimaa vastaan on rajoitettu ja ne eivät ole erityisen aktiivisia, ennen kuin halkeamia alkaa

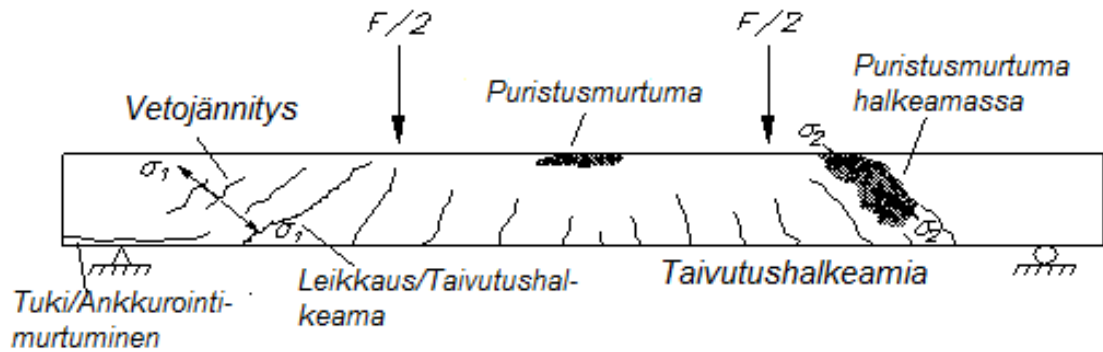
muodostua. Tämä merkitsee sitä, että haat eivät estä leikkaushalkeamien muodostumista, mutta ne ohjaavat halkeamien avautumista ja kehitystä.

Leikkausvoima kuormittamassa betonirakenteen poikkileikkauksessa jännitykset eivät jakaudu tasaisesti. Poikkileikkauksessa, jossa vaikuttaa samanaikaisesti leikkausvoima ja taivutusmomentti eivät päävenymäsuunnat eivätkä leikkausvenymät ole tasaisesti jakautuneita. Kun betonirakenne vahvistetaan ulkoisella FRP-vahvistuksella, täytyy leikkausjännitysten jakautuminen poikkileikkauksessa ottaa huomioon, koska leikkausvahvistuksen tuoma lisä leikkauskapasiteettiin on verrannollinen hiilikuidun venymään johtuen komposiittivahvistuksen lineaarisesta elastisuudesta. Osa kuiduista on suhteellisen kuormittamattomia, kun taas useimmat kuidut saavuttavat kriittisen tason, esimerkiksi tapahtuu kuitumurtuma, ankkurointirikkoontuminen tai betonin puristuskestävyyden ylittyminen

Kuormituksen epätasaisen jakaantumisen takia palkin pintaan leikkausvahvisteeksi liimattua hiilikuitukomposiittia ei voida hyödyntää täysmääräisesti. Tästä johtuen on otettu käyttöön kerroin, jolla kuvataan kuitujen keskimääräinen hyödyntäminen vahvistettavassa poikkileikkauksessa (Carolin & Täljsten 2005b). Kertomalla sillä suurin sallittu jännitys, saadaan käytettävissä oleva FRP-vahvistusvaikutus.

Leikkausmurtuma on usein hauras ja syntyy lähes ilman minkäänlaista varoitusta. Tästä johtuen betonipalkin leikkausvoimaominaisuuksia ei voida päätellä palkin kunnosta murtuman jälkeen. Ennen lopullisen leikkaushalkeaman muodostumista, leikkausvoiman alueelle syntyy useita pieniä halkeamia, jotka muodostavat leikkaushalkeamien vyöhykkeen yksin tai yhdessä taivutushalkeamien kanssa. Usein kuvattu yksittäinen leikkaushalkeama voi syntyä vasta sen jälkeen, kun lopullinen leikkaushalkeama on muodostunut. Toisin sanoen venymät keskittyvät suurimman kuormituksen omaavaan halkeamaan. Vahvistus mitoitetaan ehjälle rakenteelle ennen murtumaa ja lopullisen leikkaushalkeaman muodostumista. (kuva 7.)

Leikkausmurtuma syntyy monimutkaisen mekanismin seurauksena. Leikkaantumisen ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksesta muodostuu moniakselinen kuormitustila, missä maksimivetovoimat muodostuvat 30 - 60°:n kulmassa suhteessa rakenteen pituusakseliin (riippuen raudoituksesta ja kuormituksesta). Tämän seurauksena muodostuu kalteva leikkaushalkeama, joka lopulta johtaa murtumaan. (kuva 1.)



Kuva 1. Erilaisia leikkausmurtumatyyppejä betonipalkissa (muokattu lähteestä Täljsten, Blanksvärd & Sas 2011, 60)

Betonirakenteen ominaisuudet ja erityyppiset leikkausmurtumat on hyvä tuntea perusteellisesti, jotta betonirakenne voidaan tehokkaasti vahvistaa leikkauskuormitusta vastaan. Betonirakenne on normaaleissa olosuhteissa suunniteltu selviytymään suurista muodonmuutoksista ennen lopullista murtumaa, kun murtuminen tapahtuu taivutusmurtona. Puhtaat leikkausmurtumat betonirakenteessa ovat hyvin hauraita. Tavanomaisilla teräshakasilla raudoitettu betonipalkki voi murtua seuraavilla tavoilla:

Uuman leikkausmurtuminen: Syntyy palkissa niillä kohdin, joissa taivutushalkeamat eivät vaikuta. Murtuma syntyy kun päävetojännitykset ylittävät betonin vetolujuuden. Murtuma on usein seurausta puutteellisesta leikkausraudoituksesta tai sen puuttumisesta.

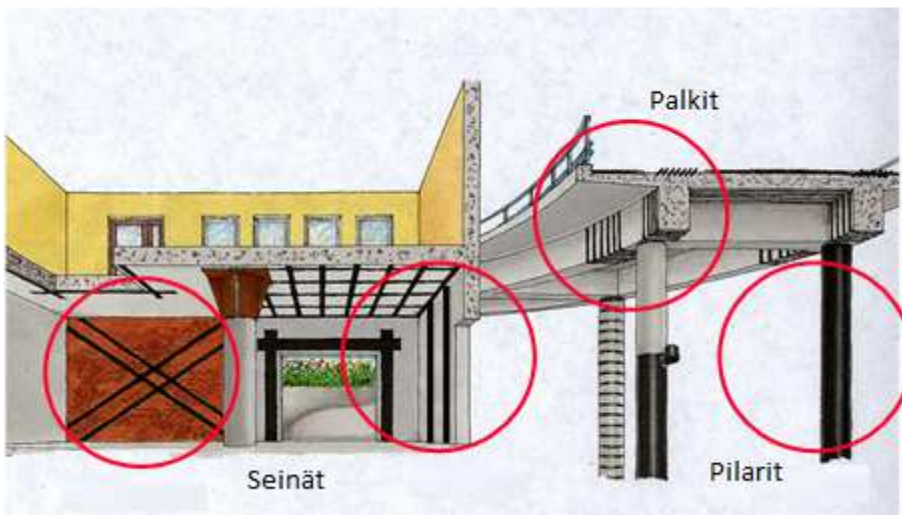
Taivutusleikkausmurtuma: Murtuma saa alkunsa taivutushalkeamasta, joka jatkuu leikkaushalkeamana. Halkeamat kasvavat rakenteen vetovyöhykkeeltä kohti puristusvyöhykettä. Lopullinen murtuma tapahtuu puristusvyöhykkeen murskautumisena tai lohkeamisena. Leikkausraudoitus ja ulkoiset vahvistukset, jotka ylittävät halkeamavyöhykkeen, parantavat leikkausvoimakapasiteettia. Leikkaus- ja taivutusraudoitus toimii vetotankoina. Betoni palkin puristuspuolella samoin kuin leikkaushalkeamien väliset vinot betoniset puristussauvat toimivat puristussauvoina ristikkomallissa.

Puristusmurtuma uumassa: Ristikon vinojen betonipuristussauvojen puristusmurto. Puristussauvojen puristusmurto voi syntyä, kun leikkausraudoitus on ylimitoitettu. Siinä tapauksessa hakaset eivät saavuta myötörajaa ennen kuin betonin puristuslujuus puristussauvoissa ylittyy.

Hakaraudoituksen myötääminen: On kyseenalaista onko hakaraudoituksen myötääminen eräs leikkausmurtumisen muoto. Myötäämisen hetkellä betonipalkkiin on muodostunut halkeamia. Useimmat normit olettavat, että kaikki teräshaat myötäävät samaan aikaan. Tämä oletamus ei ole aivan oikea. Teräksellä on hyvin määritelty myötöraja ja vaikka venymät ovat jakautuneet parabolisesti, jännitykset jakautuvat tasaisesti myötäämisen alettua ja siksi hakojen osuus leikkausvoimakapasiteettiin on yksinkertainen laskea.

Hakojen ankkurointi: Yleensä kalteva leikkaushalkeama ulottuu hyvin lähellä palkin puristuspintaa. Jännitys lähestyy tai on lähes sama kuin myötöjännitys jokaisessa kohdassa, missä hakanen risteää leikkaushalkeaman kanssa. Siksi on tärkeää, että hakanen on ankkuroitu oikealla tavalla betonipalkin puristus- ja vetovyöhykkeelle.

Betonirakenteiden leikkauskestävyyden vahvistaminen FRP:llä on melko yleistä. Monet erilaiset rakenteet voivat tarvita leikkausvahvistamista. Tavallisesti FRP-vahvistuksessa käytetään tekstiiliä tai kangasta, joka liimataan rakenteen pintaan tai kierretään rakenteen ympärille. Laminaattia voidaan myös käyttää, kunhan pinnat ovat tarpeeksi tasaisia. Kuvassa 2 näkyy monia erilaisia rakenne-elementtejä, joihin leikkausvahvistaminen FRP:llä voi sopia.



Kuva 2. Esimerkkejä vahvistamisesta leikkausta vastaan
(muokattu lähteestä Täljsten ym. 2011, 61)

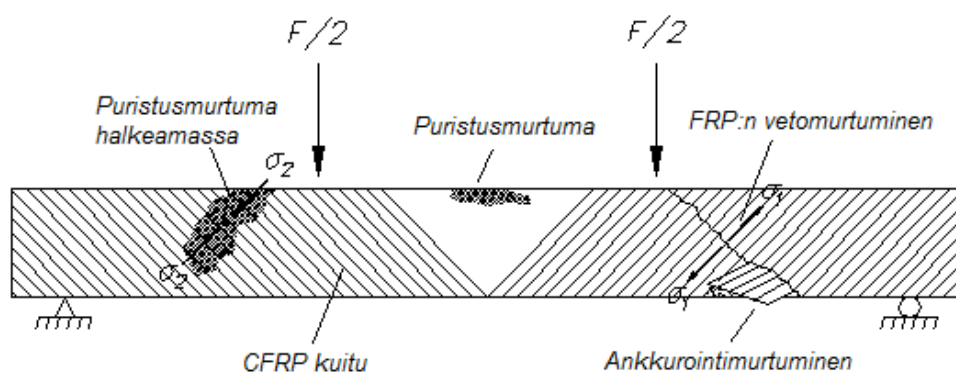
Betonirakenteissa, jotka vahvistetaan leikkausvoimaa vastaan pintaan asennettavilla komposiiteilla, komposiittiin kohdistuu rasituksia erilaisista kuormista. Kun betonirakenne halkeaa, kasvaa komposiittimateriaalin vaikutusaste huomattavasti. Optimaalisen suorituskyvyn saavuttamiseksi kierretään koko rakenne vahvisteella, esimerkiksi palkki. Ankkurointi on silloin riittävä ja ankkuroinnin pettämisen riski vahvisteeseen pääs-

sä minimoidaan. Kuitenkin on havaittu, että ankkurointimurtuma voi alkaa myös halkeiluvyöhykkeellä alueella, jossa on suurimmat leikkausjännitykset. Tämän vuoksi rakenteessa voi tapahtua ennenaikainen ankkurointimurtuma leikkaushalkeaman kohdalla, mutta rakenteen ympärille kierretty vahviste kantaa siitä huolimatta kuorman komposiitin murtumiseen saakka. Kestävyyttä ei voi taata, jos kuidut osittain irtaavat alustasta. Ylimääräistä leikkausvoimakapasiteettia, joka perustuu lisääntyneen venymän hyödyntämiseen komposiitin tartunnan petettyä, ei mitoituksessa voida käyttää hyödyksi.

Jotta leikkausvahvistamisesta saadaan paras vaikutus, on hiilikuidun ankkurointi ratkaisevassa asemassa. Edellä mainittujen leikkausmurtumatyyppien lisäksi on vielä kaksi murtumatyyppiä, kun betonipalkki vahvistetaan pintaan liimatulla FRP:llä (kuva 3).

Kuitumurtuma FRP:ssä: Kuitumurtumaa esiintyy kuitujen kriittisen venymiskapasiteetin ylittyessä. Hiilikuitukangas antaa tavallisesti murren edetessä vaiheittain periksi. Murtuma on tavallisesti hauras. Kuitujen suunta suurimpiin pääjännityksiin nähden vaikuttaa murtumatyyppiin.

Ankkurointimurtuma: Hiilikuitukankaan ankkurointimurtumaa voi esiintyä, kun betonin pintavetolujuus on liian alhainen tai ankkurointialue on liian pieni hiilikuituvahvisteen ja betonin välisiin leikkausjännityksiin nähden. Useissa tapauksissa voi tämäntyyppiset murtumat välttää kietomalla kangas palkin ympärille muodostamalla ns. FRP-haka.

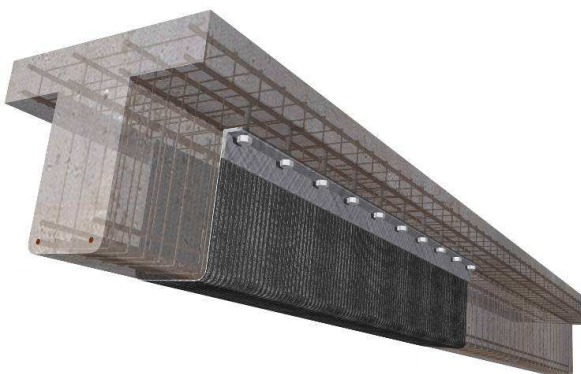


Kuva 3. Leikkausmurtuma tyypillisessä FRP kuitusysteemissä (muokattu lähteestä Täljsten ym. 2011, 62)

Erilaisten poikkileikkausten, kuten T-palkin, pyöreän poikkileikkauksen, pylvään tai laatikkopalkin leikkausvoimavahvistuksessa muutkin murtumatyypit ovat mahdollisia. Näitä ei käsitellä tässä työssä. Monesti on mahdollista muuttaa hauras leikkausmurtuma sitkaaksi taivutusmurtumaksi ulkoisella FRP-vahvistuksella.

Jos vahvistusta ei saada asennettua betonin poikkileikkauksen koko korkeudelle, kuten T-palkissa, heikentää se leikkauslujuutta. Usein on mahdollista ankkuroida hiilikuitukangas puristusvyöhykkeeseen, esimerkiksi mekaanisella pulttiliitoksella (kuva 4).

Suurin osa kirjallisuudessa esiintyvistä tutkimuksista koskien palkkien leikkausvoimakkestävyyttä perustuvat palkkien laboratoriotutkimuksiin, joissa palkit altistetaan leikkausvoimalle ja positiiviselle taivutusmomentille tutkitussa poikkileikkauksessa. Leikkausvoimat voivat olla kriittisiä T-palkissa, erityisesti negatiivisen momentin alueella. Silloin pääkuormitus ja kuitusuunta on erityisesti otettava huomioon vaaditun vahvistusvaikutuksen varmistamiseksi käytetyllä vahvistemateriaalilla. Kuvassa 4 esitetään yleiset vahvistusperiaatteet pintaan asennetuille FRP-materiaaleille. Johtuen vahvistuksen tarpeesta ja rakennuselementin tyypistä, voidaan vahvistusta muuttaa. On olemassa FRP-järjestelmiä ja tuotteita, jotka sopivat leikkausvoimavahvistamiselle, mutta niitä ei ole esitetty kuvassa 4. Kolmisivuisessa vahvistuksessa käytetään normaalisti FRP-kangasta, joka on yksinkertaisinta sitoa palkin alle. Puristusvyöhykkeen kiinnityksessä voi esiintyä ongelmia ilman mekaanista kiinnitystä, erityisesti T-poikkileikkauksellisessa palkissa. Siksi suositellaan, että komposiitti ankkuroidaan mekaanisesti puristuspinnaalle. Poikkeuksena on korkeauumainen palkki. Suorakulmaiselle tai pyöreälle poikkileikkaukselle FRP-kangas voidaan sitoa rakenteen ympärille. Tämä tarjoaa erinomaisia ankkurointimahdollisuuksia ja hyödyntää vahvistusta parhaiten, Täljsten ym (2011).



Kolmisivuisen vahvistus



Ympäri liimattu vahvistus

Kuva 4. Erilaisia tapoja FRP-vahvistamiselle (muokattu lähteestä Täljsten ym. 2011, 63)

2.2 Esimerkkitapaus palkkien hiilikuituvahvistamisesta

Seuraava leikkausvahvistusesimerkki on hiilikuituvahvistamisen käsikirjasta, Täljsten ym. (2011). Esimerkki koskee varastorakennuksen palkkien vahvistamista hiilikuitukankaalla.

2.2.1 Kohteen kuvaus

Varastorakennuksessa palkkeihin jouduttiin putkivetojen vuoksi poraamaan suuremmat reiät kuin oli tarpeellista (kuva 5). Reiät porattiin 22 palkin molempiin päihin ja niihin kaikkiin tehtiin vahvistus. Tämä olisi voitu korjata täyttämällä reiät betonilla, mutta useita hakasia oli katkennut reikiä poratessa. Vahvistus oli syytä toteuttaa ennen talvea, jotta palkit kantavat tulevan lumikuorman. Tässä tapauksessa hiilikuitulaminaatti ei ollut realistinen vaihtoehto ja siksi selkeän kehän saavuttamiseksi palkkien vahvistamiseen valittiin hiilikuitukangas. Palkit olivat esijännitetyjä ja niiden jännemitta oli 22 metriä ja korkeus vaihteli 900 mm:n ja 1 500 mm:n välillä. Palkin leveys oli noin 110 mm.

2.2.2 Vahvistustoimenpide

Varastorakennuksessa olevien palkkien kantokyky laskettiin ennen vahvistustoimenpiteen aloittamista. Laskelmat osoittivat, että tarvitaan kaksi kangaskerrosta, kankaan paksuus on 0,17 mm (300 g/m^2) ja leveys 300 mm. Vahvistettava alue oli noin 1,2 m leveä. Haluttiin, että liiketoiminta on käynnissä vahvistuksen aikana, joten häiriöiden piti olla mahdollisimman pieniä. Siksi vahvistustyöt tehtiin iltaisin. Ensimmäiseksi reiät täytettiin betonilla. Tämän jälkeen vahvistettava alue karkaistiin hiekkapuhaltamalla ja puhdistuksen jälkeen pinta pohjustettiin primerilla. Liima levitettiin pohjustetulle pinnalle, jonka jälkeen hiilikuitukangas asennettiin. Sen jälkeen päällimmäiseksi asennettiin kerros kangasta ja lisättiin liimaa kankaan kostuttamiseksi. Kangas asetettiin niin, että noin 5 cm kankaasta oli limittäin. Kangas ympäröi palkin alalaidan ja vahvistuksen jälkeen asetettiin vaakasuora kangas palkin ylälaitaan laippoja vasten kasvatamaan kiinnitystä. Vahvistustyö kesti kahdelta mieheltä alle viikon ilman, että mitään toimintoja tiloissa olisi pitänyt keskeyttää.



Kuva 5. Palkki ennen vahvistusta (Täljsten ym. 2011, 64)



Kuva 6. Palkki vahvistuksen jälkeen (Täljsten ym. 2011, 64)

2.3 Mitoitus leikkausvoimavahvistamiselle

Seuraavassa on esitetty, kuinka leikkausvoimavahvistaminen toteutetaan hiilikuitukankaalla. Täljsten ym. (2011).

2.3.1 Arviointi ennen vahvistamista

Laskelmat on tehty Eurokoodi 2005 mukaisesti. Leikkausvoimaa merkitään V_0 :lla ennen vahvistusta.

$$V_{Rd} \geq V_{Rd,s} + V_{ccd} + V_{td} \quad (1)$$

jossa $V_{Rd,s}$ = leikkausraudoituksen myöntämiseen perustuva
mitoituskestävyys
 V_{ccd} = puristusalueen voiman leikkauskomponentin mitoitusarvo
kaltevan puristuspaarten tapauksessa
 V_{td} = vetoraidoituksen voiman leikkauskomponentin
mitoitusarvo kaltevan puristuspaarten tapauksessa

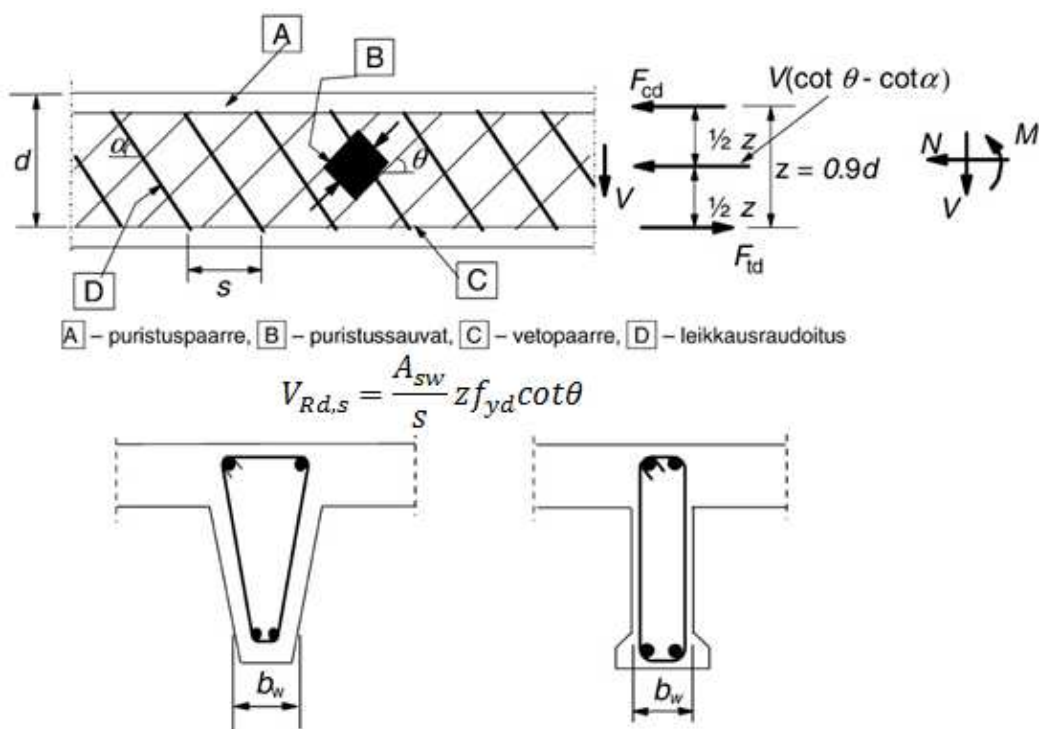
Lisäämällä liimatun hiilikuitukomposiitin vaikutus ($V_{Rd,f}$), voidaan vahvistetun rakenteen leikkausvoimakestävyys (V_{Rd}) laskea vahvistuksen jälkeen. Arvioitaessa rakennetta, jota aiotaan vahvistaa, on otettava huomioon

- kuormitukset, jotka vaikuttavat rakenteeseen ennen vahvistusta
- mahdolliset leikkaushalkeamat
- mahdollinen korroosio
- betonin puristuskestävyys.

Sen lisäksi on oltava varma, että betonielementit kestävät ylimääräistä kuormitusta, joka syntyy poikkileikkaukseen yhdessä leikkausvoimavahvistuksen ja mahdollisesti kasvavan kuorman vaikutuksesta.

Kaavalla 2 lasketaan raudoitetun poikkileikkauksen leikkausvoimakestävyys. Kuvassa 7 on ristikkomalli raudoitetusta teräsbetonipalkista, johon kaava perustuu. Siinä huomioidaan hakaterästen poikkipinta-ala, A_{sw} , hakajako, s , sisäinen momenttivarsi, z , hakaterästen vetolujuus, f_{yd} , sekä leikkaushalkeaman kulma θ . Leikkaushalkeaman kulmalla on suuri vaikutus leikkauskestävyyteen.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} 0.9d f_{yd} \cot \theta \quad (2)$$



Kuva 7. Leikkausraudoitettujen rakenneosien ristikkomalli ja merkinnät (SFS-EN 1992-1-1 + AC 2005, 87)

2.3.2 Raudoitettun betonirakenteen leikkausvoimavahvistaminen

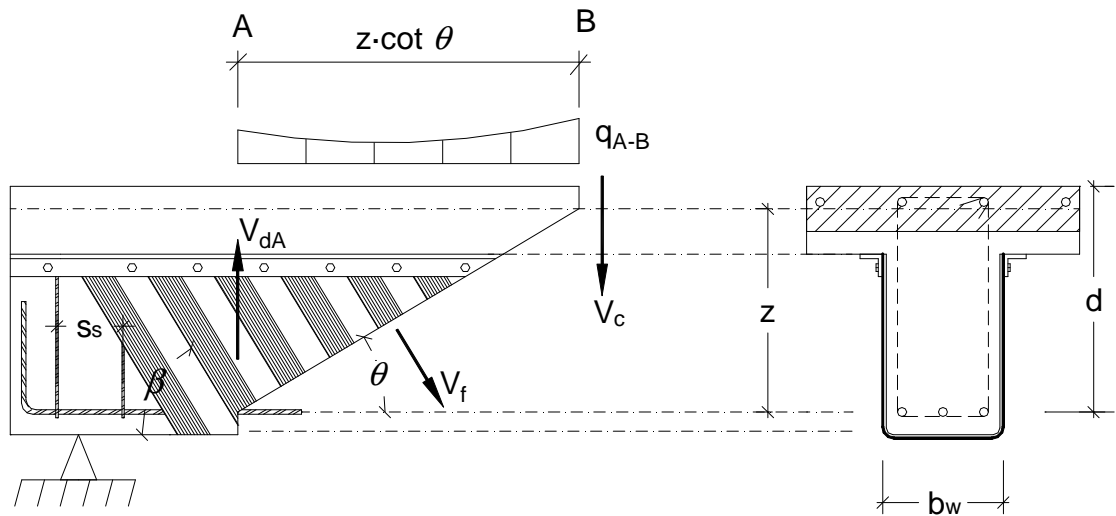
Raudoitettun betonipalkin leikkausvahvistamiselle on eduksi, jos FRP-materiaali voidaan kiertää poikkileikkauksen ympärille teräshaan tapaan. Se ei ole kuitenkaan aina mahdollista ja silloin paras vaihtoehto on ankkuroida FRP-komposiitti puristuspinnalle. Jos näin ei saada hyvää ankkurointia, on paras valikoida jokin muu vaihtoehto. Siksi kaikista tehokkainta on sekä vahvistuksellisesta että taloudellisesta näkökulmasta, että kuidut asetetaan oikeaan kulmaan halkeamaa vasten. Monessa tapauksessa on kuitenkin käytännöllisempää sijoittaa kuidut pystysuoraan. Kuitujen vaakasuora asennus antaa pienemmän vahvistusvaikutuksen kuin pystysuora asennus.

Jos vahvistustyö ja rakentaminen suoritetaan tarkasti, voidaan saavuttaa huomattavia vahvistusvaikutuksia. Mahdollista murtotavan muutosta on hyvä seurata vahvistuksen jälkeen, jotta voidaan välttää esimerkiksi betonin puristusmurto.

2.3.3 Leikkausvahvistamisen laskentamalli

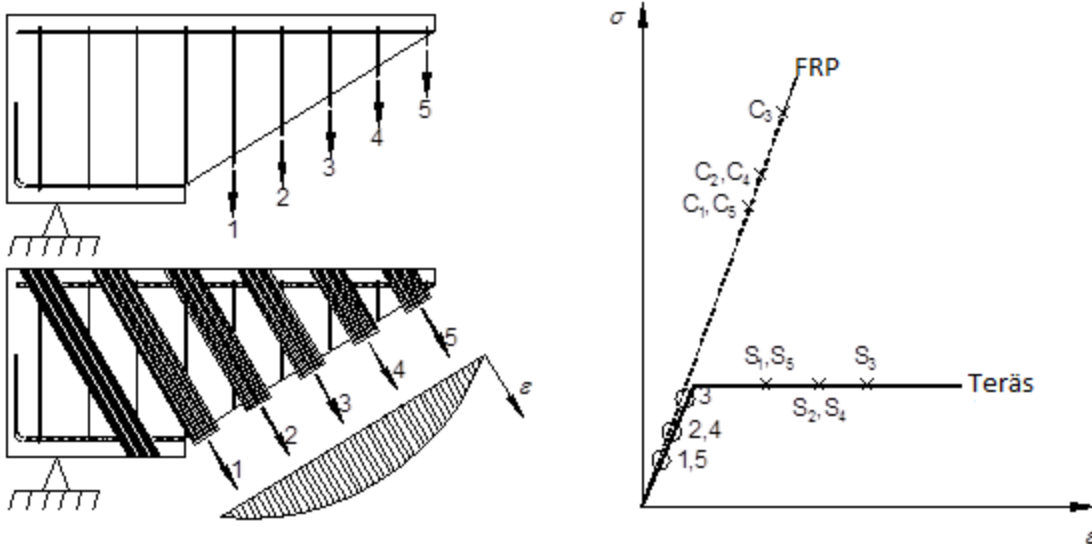
Yleinen FRP leikkausvahvistamisen rakennemalli on esitetty kuvassa 8. Näissä mitoitusohjeissa käytetään voimatasapainoa. Tämä tarkoittaa sitä, että jokainen käytetty materiaali edistää leikkausvoimakestävyyttä edellä mainitulla tavalla.

V_{Rd} on leikkausvoima, jolle rakenne mitoitetaan. Se voidaan laskea seuraavasti: $V_{dA} - q_{A-B}$, jossa V_{dA} on rakenteen leikkausvoima leikkauksessa A ja q_{A-B} mahdollinen kuormitus A:n ja B:n välillä.



Kuva 8. Laskentamalli, joka ottaa huomioon betonin, teräksen ja FRP:n hyödyn (Täljsten ym. 2011, 66)

Verrattuna tavalliseen leikkausraudoitettuun betonirakenteeseen, jossa käytetään teräshakasia, havaitaan huomattavan ero teräksen ja FRP-systeemin ominaisuuksien välillä. Teräsradoituksessa teräkset myötävät, mutta FRP:llä ei ole selkeää venymäyötorajaa ja se käyttäytyy enemmän tai vähemmän lineaarisen elastisesti murtumiseen saakka. Suorakulmaisessa palkissa suurin leikkausjännitys on keskellä poikkileikkausta (kuva 9). Teräshaat voivat jakaa kuormituksen kunnes jokainen hakanen myötää ja ehto V_s :lle täyttyy. Se ei ole kuitenkaan mahdollista FRP-hakasille. Ensimmäinen FRP-kaista, -hakanen tai -laminaatti, joka saavuttaa hiilikuidun murtovenymän määrittää murtokuormituksen, ja siten hiilikuituvahvistetun rakenteen kapasiteetin. Tämä edellyttää, että FRP vahvistuksen ankkurointi on tehty oikein.



Kuva 9. Tämä rakennemalli esittää teräksen sekä FRP- hiilikuitukankaan erilaisen käyttäytymisen kuormituksen kasvaessa (muokattu lähteestä Täljsten ym. 2011, 67)

Kuvassa 9 kaikki teräshaat saavuttavat myötörajan ($S_1 - S_5$ halkeaman kohdalla), katso jännitys/venymäkäyriä kuvassa oikealla. C_3 –FRP komposiittihakkeelle kohdistuu suurin jännitys ja venymä. Hiilikuituhakkeista C_3 –komposiittihake ottaa eniten leikkausvoimaa C_3 :n murtuessa. Paraabelin muotoinen jakaantuminen on todennettu laboratoriotutkimuksissa, katso esim. Carolin (2003).

Tämä jännitysjaakaantuminen kuormitetussa poikkileikkauksessa voi olla erilainen erilaisilla geometrioilla ja kuormituskoonpanoilla. Siksi ne voivat olla vaikeita käsitellä mitoituksessa. On olemassa monia erilaisia tapoja FRP:n leikkausvoimaosuuden arvioimiseen. Tässä suositellaan käytettäväksi tapaa, joka kehitettiin Luulajan Teknillisessä yliopistossa ja se on myös osa eurooppalaista yhteistyötä. Ensisijaisesti tutkittiin T-poikkileikkausta, mutta menetelmä on melko yksinkertainen soveltaa myös suorakulmaiselle tai pyöreälle poikkileikkaukselle. Ennen mitoituksen aloittamista on syytä tehdä karkea arvio materiaalin kulutuksesta.

2.3.4 FRP-raudoituksen hyöty leikkauskestävyyteen

Tässä johdannossa käytetään ainoastaan tasapainoyhtälöitä betonipalkkiin liimattujen ulkoisten FRP hakojen leikkausvoimakapasiteetin määrittämiseksi. Näin ollen leikkausvoimakapasiteetin johdannossa ei oteta lainkaan huomioon mahdollisia jännitysten ja venymien jakautumia vahvistusajankohtana oman painon tai muun kuormituksen vaikutuksesta. Seuraavat ehdot ovat voimassa:

- Leikkausvoima oletetaan olevan tasaisesti jakaantunut koko rakenteen leveydelle suorassa kulmassa palkin akseliin nähden.
- Leikkaushalkeamat esiintyvät samassa suunnassa kuin suurin pääve-tojännitys.
- Bernoullin hypoteesin oletetaan pätevän, eli suorat poikkileikkaukset säilyvät suorina kuormituksen aikana.

2.3.5 Mitoitus

T-poikkileikkauksen vahvistamisessa sekä kankaan että laminaattien käyttö on mahdollista, useimmiten kuitenkin suositellaan, että käytettäisiin kangasvahvistusta. Kahdenlaista vahvistuskokoonpanoa suositellaan käytettäessä hiilikuitukangasta:

- kolmen sivun vahvistaminen ankkurointia käyttäen
- palkin ympäri kierrettävä vahvistaminen

Lisäksi laskuissa pitää ottaa huomioon, miten betonielementti on raudoitettu:

Ei leikkausraudoitusta

Leikkausraudoittamattoman betonipalkin leikkauskestävyys, jossa vahvistus lasketaan seuraavasti:

$$V_{Rd} \leq V_{Rd,f} \quad (3)$$

Tässä V_{Rd} on määritetty osan 6.2.2 (Eurokoodi 2, 2005) mukaisesti.

Leikkausraudoitettu rakenne

Leikkausraudoitetun palkin leikkausvoimakestävyys. Vahvistus lasketaan seuraavasti:

$$V_{Rd} \leq \min(V_{Rd,s} + V_{Rd,f} ; V_{Rd,max}) \quad (4)$$

$$\text{jossa } V_{Rd,max} = \alpha_{cv} b_w 0,9 d v_1 f_{cd} / \cot\theta + \tan\theta \quad (5)$$

Tässä $V_{Rd,s}$ ja $V_{Rd,max}$ on määritetty osan 6.2.3 (Eurokoodi 2, 2005) mukaisesti.

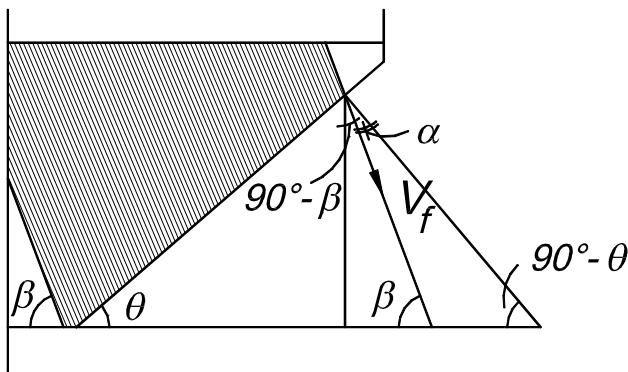
Komposiitin leikkausvoimaosuus

Palkin pinnalle asennetun FRP:n vaikutus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$V_{Rd,f} = A_f \varepsilon_{fd} E_{fd} L_{ef} \sin \beta_f \cos^2 \alpha \quad (6)$$

Missä

A_f	$2t_f w_f / s_f$ laminaatille ja $2t_f$ kuidulle, tässä t_f on paksuus yhdelle sivulle
ε_{fd}	Annettu tai laskettu venymä
β_f	Kuidun kaltevuus palkin pituussuunnassa
E_f	Komposiitin kimmokerroin
L_{ef}	Etäisyys FRP- vahvistuksien välillä, joilla on aktiivinen tehonsiirto
α	$\theta + \beta - 90$ (Kuva 10)

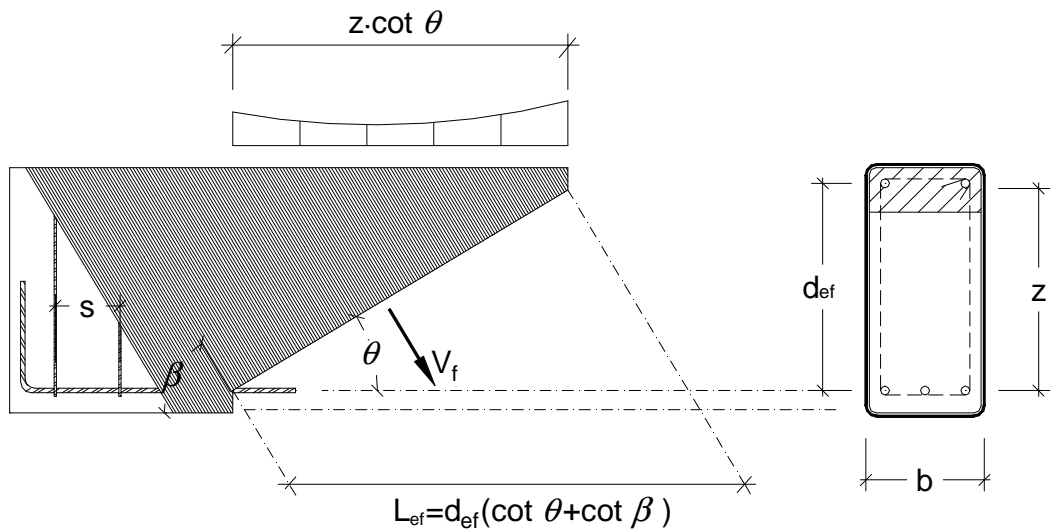


Kuva 10. Kulmien väliset suhteet

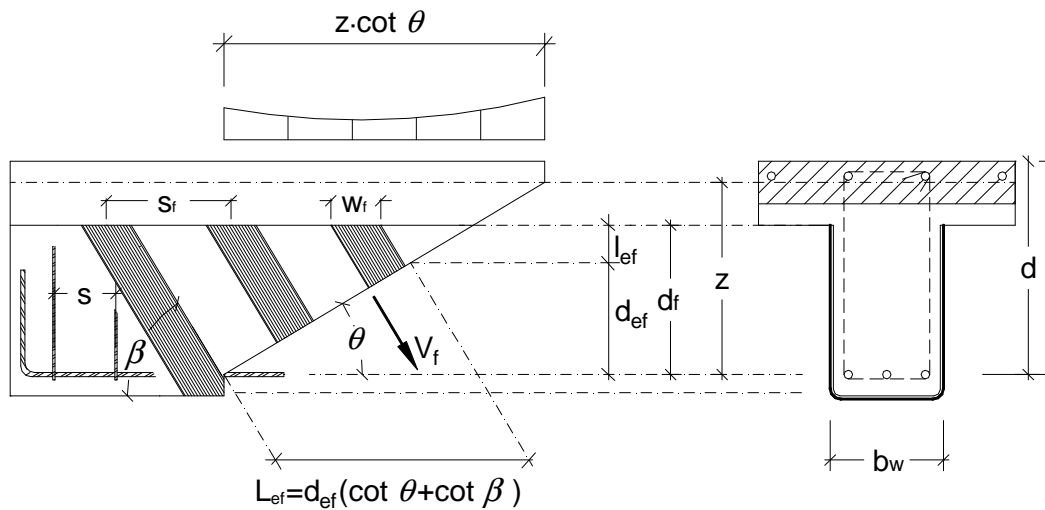
(Täljsten ym. 2011, 69)

Muut lausekkeet saadaan $V_{Rd,f}$:lle riippuen pintaan asetettujen FRP-vahvistuksien kokoonpanosta. $V_{Rd,f}$ ei ota huomioon betonin tai teräshakasten leikkausvoimaosuutta.

Palkki voidaan kietoa kokonaan FRP vahvistuskankaalla, jolloin kankaan ankkuroinnista tulee riittävä tai ankkuroimalla hiilikuitu mekaanisesti palkin puristuspuolelle. Näissä mitoitusohjeissa ehdotetaan kahta erilaista vahvistustapaa. Ensimmäinen on rakenteen ympärille kääritty vahvistus W (englannin sanasta wrapped = kääritty) (Kuva 11). Toinen on osittain ympärille kääritty vahvistus U (englannin sanasta U-wrapped) (kuva 12).



Kuva 11. Kokonaan leikkausvahvisteella ympäröity palkki. (Täljsten ym. 2011, 69)



Kuva 12. Kolmelta sivulta leikkausvahvistettu palkki (Täljsten ym. 2011, 69)

Tehollinen pituus voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$L_{ef} = d_{ef} * (\cot \theta + \cot \beta_f) \quad (7)$$

$$d_{ef} = \begin{cases} z = 0.9d & W \text{ vahvistukselle} \\ \min(z; d_f - l_{ef}) & U \text{ vahvistukselle} \end{cases} \quad (8)$$

ja d_f on vahvistuksen korkeus vetorausoituksen yläpuolelta sekä l_{ef} on ankkurointiin tarvittava korkeus (ankkuroinnin pituus). Ankkurointipituus voidaan ratkaista seuraavalla kaavalla:

$$l_{ef} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} \quad (9)$$

Tehollinen suhteellinen venymä kuidussa, ϵ_{ef} , saadaan seuraavasti:

$$\epsilon_{fd} = \min(\epsilon_{fb,d}, \epsilon_{fu,d}) \quad (10)$$

missä

$$\epsilon_{fb,d} = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} \quad (11)$$

$$G_f = 0.03k_b \sqrt{f_{ck} f_{ctm}} \quad (12)$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2-w_f/s_f}{1+w_f/s_f}} \geq 1 \quad (13)$$

$$\epsilon_{fu,d} = \frac{\epsilon_{fu}}{\gamma_m} \quad (14)$$

Jos käytetään palkin kokonaan peittävää hiilikuitukangasmenetelmää, käytetään kaavaa $b_f/s_f=1$. Osittain peittävässä vahvistuksessa $b_f/s_f \geq 0.33$ (niissä tapauksissa, joissa $b_f/s_f \geq 0.33$, käytetään arvoa 0.33).

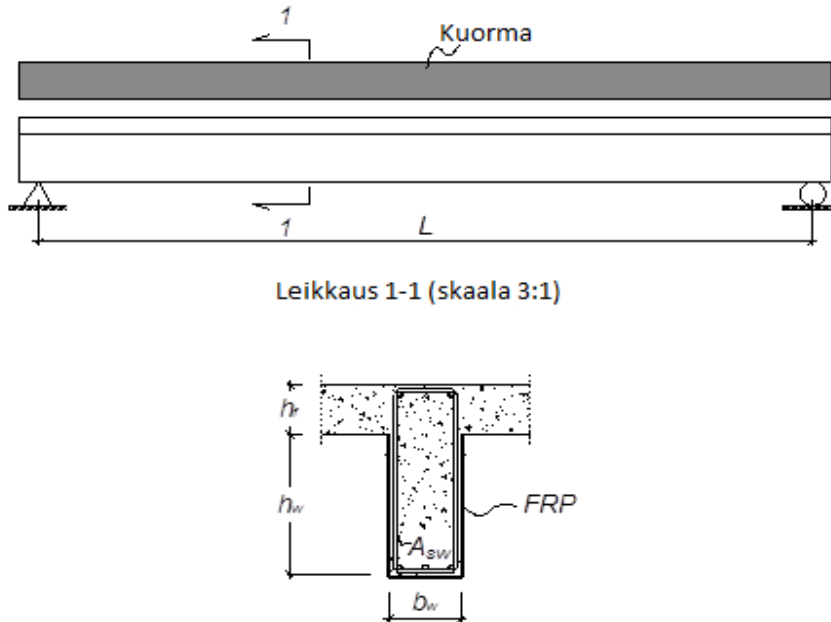
On myös huomioitava, että hiilikuituleikkausvoimavahvistuksen mahdollistama kasvanut kuormitus aiheuttaa leikkausvoimasta johtuvan vetovoimaalisän pituussuuntaisiin vetoteräksiin.

2.4 Esimerkki leikkausvoimavahvistamisesta

Palkki (kuva 13) joudutaan vahvistamaan toteutusvaiheessa tapahtuneen virheen takia. Sen sijaan, että olisi käytetty määrättyä hakaetäisyyttä 150 mm, laitettiin hakaset 250 mm:n etäisyydelle toisistaan. Palkki on alun perin suunniteltu 70 kN/m kuormalle, mikä vastaa 280 kN leikkausvoimaa ja 560 kNm taivutusmomenttia. Tehokas virumaluku voidaan olettaa olevan 2,0 ja palkin geometriset ominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Leikkausvahvistaminen toteutetaan hiilikuitukankaalla, joka asetetaan

pystysuoraan ($\beta = 90^\circ$). Mekaaniset ominaisuudet hiilikuitukankaalle on lueteltu taulukossa 3.

Laskenta tässä esimerkissä seuraa toistavaa prosessia ja sen vuoksi on suositeltavaa käyttää laskentaohjelmaa, esimerkiksi Excel tai MathCad, mikä helpottaa suunnittelua. Yleensä laskelman ratkaisu saavutetaan viiden toiston jälkeen.



Kuva 13. Palkin geometria (Täljsten ym. 2011, 141)

Taulukko 1. Palkin geometria ja raudoitus

<i>Nimitys</i>	<i>Lukuarvo</i>	<i>Yksikkö</i>	<i>Kuvaus</i>
$b_f=$	600	mm	<i>Tehokas laipan leveys (EC2 5.3.2.1)</i>
$h_f=$	150	mm	<i>Laipan korkeus</i>
$h_w=$	650	mm	<i>Palkin korkeus</i>
$b_w=$	300	mm	<i>Palkin leveys</i>
$h=$	800	mm	<i>Kokonaiskorkeus</i>
$c=$	30	mm	<i>Betonin pintakerros</i>
$d=$	755	mm	<i>Tehollinen korkeus</i>
$A_{sw}=$	157.08	mm ²	<i>Haan pinta-ala</i>
$\square_{s=}$	10	mm	<i>Haan halkaisija</i>
$s=$	250	mm	<i>Haan pituus</i>
$L=$	8	m	<i>Palkin jännitetty mitta</i>

Laskelmat perustuvat Eurokoodi 2 (EC2) standardiin. Kaikki osavarmuuskertoimet, joita käytetään laskelmissa, on esitetty taulukossa 2, osavarmuuskertoimet ovat Eurokoodi 2:sta.

Taulukko 2. Murtorajatilan osavarmuuskertoimet

<i>Betoni</i>	<i>Teräs</i>	<i>FRP</i>
$\gamma_c = 1.5$	$\gamma_s = 1.15$	$\gamma_{frp} = 1.35$
$\alpha_{cc} = 0.85$	$\alpha_{ct} = 0.85$	
$\varphi_{eff} = 2.0$		
$\gamma_{cE} = 1.2$		

Ominais- ja mitoitusarvot, joita on käytetty betonille ja teräksille, on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3 Ominais- ja mitoitusarvot teräkselle ja betonille.

<i>Betoni</i>	<i>Ominaisarvot</i>			<i>Teräs</i>	<i>Ominaisarvot</i>		
	f_{ck}	40	MPa		f_{yk}	500	MPa
	f_{ctm}	3.5	MPa		E_s	210	GPa
	E_{cm}	35	GPa				
<i>Betoni</i>	<i>Mitoitusarvot</i>			<i>Teräs</i>	<i>Mitoitusarvot</i>		
	f_{cd}	22.6	MPa		f_{yd}	435	MPa
	f_{ctm}	3.5	MPa		E_{sd}	183	GPa

Yhtälön (4) mukaan mitoitettu leikkausvoimakestävyys leikkausraudoitetulla ja hiilikuituvahvistetulla palkilla on:

$$V_{Rd} \leq \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) + V_f \quad (1)$$

Vaihe 1. Määritä nykyinen leikkausvoimakestävyys

Eurokoodi 2:n mukaan leikkausvoimakestävyyteen vaikuttaa raudoitetussa poikkileikkauksessa raudoituksen määrä seuraavan kaavan mukaisesti:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yd} \cot \theta = \frac{157.1}{250} * 0.9 * 755 * 435 * 1 = 186 \text{ kN} \quad (2)$$

Betonin puristussauvan kestävyys muodostaa leikkauskestävyyden ylärajan:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w 0.9 d v_1 f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1 * 300 * 0.9 * 755 * 0.6 * 26.6}{1 + 1} = 1630.8 \text{ kN} \quad (5)$$

Palkin leikkauskestävyyden pienin arvo on $V_{Rd,s} \cdot n$ ja $V_{Rd,max} \cdot n$ välillä, eli $V_{Rd} = 186 \text{ kN}$. Leikkauskestävyyden vajeeksi tulee siten, $280 \text{ kN} - 186 \text{ kN} = 94 \text{ kN}$. Alijäämä paika- taan hiilikuituvahvistuksella. Vaadittavan hiilikuituvahvistuksen arvioimiseksi, jonka pitää olla leikkausvoiman alijäämää suurempi, valitaan materiaaliarvot hiilikuitukan- kaalle taulukosta 4.

Taulukko 4. Ominais- ja mitoitusarvot valitulla hiilikuitukankaalla.

FRP	Ominaisarvot			Mitoitusarvot		
	ϵ_{fk}	1.8	%	ϵ_f	1.33	%
E_{fk}	228	GPa	E_f	169	GPa	

Vaihe 2. Tehollisen pituuden laskeminen, L_{ef}

Tyypillinen ankkurointipituus määritetään käyttämällä yhtälöä (9). Ensimmäiseksi on määritettävä hiilikuitukanan paksuus. Tässä tapauksessa on valittu 0.17 mm pak- suinen hiilikuitukangas (paino on 300 g/m²).

$$l_{ef} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 f_{ctm}}} = \sqrt{\frac{169 * 10^3 * 0.17}{2 * 3.5}} = 64 \text{ mm} \quad (9)$$

Huomaa, että yhtälössä (9) käytetään yksiköitä N ja mm. Seuraavaksi lasketaan käy- tetty ankkurointipituus, d_{ef} , käyttäen yhtälöä (8) U-vahvistetulle palkille.

$$d_{ef} = \min(z; d_f - l_{ef}) = \min(0.9 * 755; d - h_{fi} - l_{ef}) = 540.96 \text{ mm} \quad (8)$$

Lopuksi tehollinen pituus voidaan laskea kaavan (7) mukaan

$$L_{ef} = d_{ef} * (\cot\theta + \cot\beta_f) = 540.96 * (\cot45 + \cot90) = 540.96 \text{ mm} \quad (7)$$

Vaihe 3. Tehollisen venymän laskeminen, ε_{ef}

Käytä yhtälöä (13) geometristen kertoimien laskemiseksi:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-w_f/s_f}{1+w_f/s_f}} = \sqrt{\frac{2-1}{1+650/650}} = 0.707 \leq 1 \rightarrow k_b = 1 \quad (13)$$

Laske murtoenergia käyttäen kaavaa (12)

$$G_f = 0.03k_b\sqrt{f_{ck}f_{ctm}} = 0.03 * 1 * \sqrt{22.6 * 2.5} = 0.355 \text{ Nmm/mm}^2 \quad (12)$$

Laske tehokas ankkurointivenymä käyttäen kaavaa (11)

$$\varepsilon_{fb,d} = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} = \sqrt{\frac{2*0.354965}{169*10^3*0.17}} = 0.5 \% \quad (11)$$

Lopuksi laske tehokas suhteellinen venymä käyttäen kaavaa (10)

$$\varepsilon_{ef} = \min(\varepsilon_{fb,d}; \varepsilon_{fu,d}) = 0.5 \% \quad (10)$$

Vaihe 4. Laske vahvistuksen tarpeellinen määrä

Käyttämällä kaavaa (6) voidaan hiilikuitukankaan tarvittava paksuus laskea.

$$t_f = \frac{V_f}{2\varepsilon_f E_f L_{ef} \sin\beta_f} = \frac{94*10^3 \text{ [N]}}{2*0.5*10^{-2}*169*10^3*540.96*1} = 0.208 \text{ mm} \quad (6)$$

Tästä saadaan, että hiilikuitukankaan tarvittava paksuus pitäisi olla 0.208 mm, mikä on suurempi, kuin arvioitu paksuus vaiheessa 2 (0.17 mm). Koska paksuus vaikuttaa tehokkaaseen venymään ja tehokkaaseen ankkurointipituuteen, täytyy laskentavaiheet aloittaa uudestaan vaiheesta 2 (laskut on käteväntä tehdä jollain laskentaohjelmalla). Tässä esimerkissä iteratiivisella lähestymistavalla saatiin hiilikuitukankaalle paksuuden arvoksi 0.27 mm. Tämä vastaa kahta kerrosta hiilikuitukangasta, $2 \cdot 0.17 \text{ mm} = 0.34 \text{ mm}$.

Vaihe 5. Leikkauslujuuden varmistaminen vahvistettavassa palkissa valitulla kuidun paksuudella

Valitulla hiilikuitukankaan paksuudella 0.34 mm, voidaan leikkauslujuus laskea. Lujuus lasketaan soveltamalla vaiheita 2 – 3. Käyttämällä kaavaa (6) ja arvoja, jotka laskettiin vaiheissa 2 – 3, voidaan leikkauslujuudeksi laskea:

$$V_f = 103.87 \text{ kN} > 94 \text{ kN} \quad \text{ok!}$$

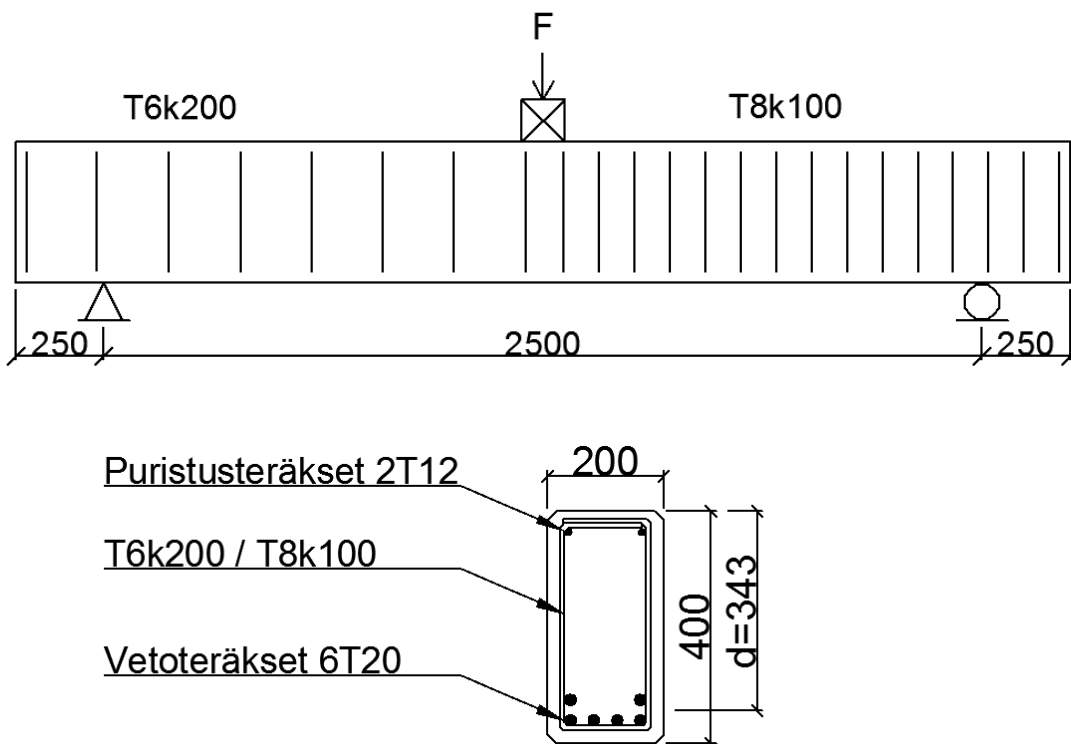
3 INSINÖÖRITYÖN VAIHEET

3.1 Suunnittelu

Tätä insinöörityötä varten tehtiin kaksi identtistä teräsbetonipalkkia. Kokeissa vahvistettiin palkin toista päätä hiilikuitukankaalla. Kokeiden tavoitteena oli selvittää hiilikuitukankaan tuoma lisä palkin leikkausvoimakapasiteettiin. Palkin toinen pää suunniteltiin leikkausraudoituksen osalta vahvemaksi, jotta se kestäisi heikomman pään vahvistuksen jälkeenkin palkkiin tulevat kuormitukset.

Teräsbetonipalkkien suunnittelu toteutettiin Excel-taulukkolaskentaohjelmaa apuna käyttäen. Koska murtokuormia ei tunnettu kokeen tyyppin takia, laskenta suoritettiin kokeilumenetelmällä, jotta saavutettaisiin paras rakenne hiilikuituvahvistamisen tutkimiseksi. Betonipalkkien mitoitus toteutettiin Eurocode 2:n mukaan.

Seuraavassa on tiedot kahdesta työssä toteutetusta palkista. Kuvissa näkyvät palkkien raudoitukset. Hiilikuitukankaan mitoitus toteutettiin työssä edellä esitetyillä kaavoilla (kaavat 1-14).



Kuva 14. Raudoituspiirustus. Kuva Tommi Auvinen 2011

Palkin tiedot

Jänneväli	2,5 m
Leveys	0,2 m
Korkeus	0,4 m
Tehollinen korkeus	0,343 m
Omapaino	2 kN/m

Betoni

Lujuusluokka	30 N/mm ²
Puristuslujuus	38 N/mm ²

Teräs

Lujuusluokka F_{yk}	500 N/mm ²
Myötölujuus F_{myk}	535 N/mm ²

$$\text{Myötölujuus} = \text{lujuusluokka} + 1.4 * 0,05 * 500$$

$$(F_{myk} = F_{yk} + 1,4 * (0,05 * 500))$$

Pääterästen laskeminen:

Palkit mitoitettiin pienelle pistekuormalle, ettei rasitukset nousisi liian suuriksi koestuslaitteistolle palkkien heikomman pään vahvistuksen jälkeen. Seuraavassa on Eurokoodi 2:n mukaiset laskukaavat, joiden avulla laskettiin palkkeihin veto- ja leikkausteräiset. (SFS-EN 1992 2005)

Suhteellinen taivutusmomentti

$$\mu = M_{ed} / (f_{cm} * b * d^2) \quad (14)$$

jossa M_{ed} = mitoitusmomentti
 f_{cm} = betonin puristuslujuuden keskiarvo
 b = palkin leveys
 d = palkin tehollinen korkeus

Puristuspinnan suhteellinen korkeus

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2\mu} \quad (15)$$

Sisäinen momenttivarsi

$$z = d * (1 - \beta / 2) \quad (16)$$

Laskennallinen teräsmäärä:

$$A_{s,m} = M_{ed} / (z * f_{myk}) \quad (17)$$

Minimiteräsmäärä:

$$A_{s,min} = 0,26 * (f_{ctm} / f_{myk}) * b * d \quad (18)$$

jossa b_t on vetopuolen keskimääräinen leveys. $A_{s,min}$ määritetään, jotta palkki kestää halkeaman syntyessä raudoitukselle siirtyvät kuormat. Halkeaman syntyessä kaikki kuormat siirtyvät vetoteräksille.

Terästen määrä

$$n = A_{s,m} / A_{s,teräs} \quad (19)$$

jossa $A_{s,teräs}$ valitun teräksen poikkipinta-ala

Todellinen teräsmäärä

$$A_s = n * A_{s,teräs} \quad (20)$$

Käyttöasteen laskeminen:

Geometrinen raudoitussuhde

$$\rho = A_s / (b * d) \quad (21)$$

Mekaaninen raudoitussuhde

$$\omega = (\rho * f_{myk}) / f_{cm} \quad (22)$$

Suhteellinen momentti

$$\mu = \omega(1 - \omega/2) \quad (23)$$

Taivustusmomenttikestävyys

$$M_{Rd} = \mu * b * d^2 * f_{cm} \quad (24)$$

Käyttöaste

$$\% = M_{ed} / M_{Rd} \quad (25)$$

Hakojen laskentakaavat:

Leikkausraudoitussuhde

$$\frac{A_s}{s} = V_{Ed} / (z * f_{myk} * \cot\theta) \quad (26)$$

Leikkausraudoitussuhteen vähimmäisarvo

$$\frac{A_s}{s_{min}} = (0,08 \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk} \quad (27)$$

Hakojen jakovälin enimmäispituus

$$S_{t,max}=0,75d \leq 600 \text{ mm} \quad (28)$$

Hakojen määrä metriä kohden

$$\begin{aligned} n &= A_s/s \cdot 1000 \cdot A_{s,haka} \\ s &= 1000/n \end{aligned} \quad (29)$$

Hiilikuitukankaan laskeminen:

Palkkeihin valittiin vahvistettavaan päähän 6 mm:n haat, jolloin haan pinta-ala $A_s=56.6\text{mm}^2$. Hakojen väliksi valittiin 200 mm ($s=200$), jotta hiilikuitukankaan tehokkuutta leikkausvahvistamisessa saataisiin tutkittua. Excel taulukkolaskentaohjelmaan ohjelmoitujen kaavojen avulla päätettiin palkkia vahvistaa kahdella kerroksella hiilikuitukangasta. Kerroksen paksuus on 0.17 mm, joten kokonaispaksuudeksi (t_f) tuli 0.34 mm. Kankaiden leveys on 150 mm ($w_f=150$ mm) ja ne tulevat 300 mm välein ($s_f=300$ mm). Leikkausvahvistuksen mitoitus etenee seuraavia välivaiheita noudattaen:

Vaihe 1. Määritetään nykyinen leikkausvoimakestävyys

Lasketaan raudoitetun palkin leikkausvoimakestävyys Eurokoodi 2 mukaan:

$$VRd,s = \frac{A_s}{s} 0,9df_{myk} \cot\theta = \frac{56,6}{200} * 0,9 * 343 * 535 * 1,43 = 66,7 \text{ kN} \quad (2)$$

Leikkauslujuuden yläraja riippuu betonin kestävydestä tuilla:

$$\begin{aligned} VRd,max &= \alpha_{cw} b_w 0,9dv_1 f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \\ &= 1 * 200 * 0,9 * 343 * 0,6 * 30 / (1,43 + 0,7) = 521,7 \text{ kN} \end{aligned} \quad (5)$$

Raudoitetun palkin leikkauslujuus on pienin arvo väliltä VRd,s ja VRd,max , toisin sanoen $V_{Rd} = 66,7$ kN.

Vaihe 2. Vahvistuksen tehokkaan pituuden laskeminen

Lasketaan vahvisteen tehollinen korkeus:

$$d_{ef} = z = 0,9d = 0,9 * 343 = 309 \text{ mm} \quad (8)$$

Lopuksi vahvisteen tehollinen pituus voidaan laskea kaavan (7) mukaan

$$L_{ef} = d_{ef} * (\cot\theta + \tan\beta_f) = 309 * (\cot35 + \cot90) = 440 \text{ mm} \quad (7)$$

Vaihe 3. Tehokkaan suhteellisen venymän laskeminen

Käytetään yhtälöä (13) geometrinen kertoimien k_b laskemiseksi:

$$k_b = \sqrt{\frac{2-W_f/S_f}{1+W_f/S_f}} = \sqrt{\frac{2-(150/250)}{1+(150/250)}} = 0,94 \leq 1 \rightarrow k_b = 1 \quad (13)$$

Lasketaan murtoenergia käyttäen kaavaa (12)

$$G_f = 0,03k_b\sqrt{f_{ck} * f_{ctm}} = 0,03 * 1\sqrt{35 * 3,4} = 0,317 \text{ Nmm/mm}^2 \quad (12)$$

Lasketaan tehollinen ankkurointivenymä

$$\varepsilon_{fb,d} = \sqrt{\frac{2G_f}{E_{ftf}}} = \sqrt{\frac{2*0,317}{240*10^3*0,34}} = 2,79 \text{ ‰} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{fu,d} = \frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_m} = \frac{17}{1,1} = 15,45 \text{ ‰} \quad (14)$$

Lopuksi lasketaan suhteellinen venymä käyttäen kaavaa (10)

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fd} &= \min(\varepsilon_{fb,d}, \varepsilon_{fu,d}) \\ \rightarrow \varepsilon_{fd} &= 2,79 \text{ ‰} \end{aligned} \quad (10)$$

Vaihe 4. Lasketaan vahvistuksen lisäys leikkausvoimakapasiteettiin

$$\begin{aligned} V_{RD;f} &= A_f * \varepsilon_{fd} * E_{fd} * L_{ef} * \sin\beta_f * \cos^2\alpha \\ &= 0,68 * 2,79 * 10^{-3} * 240 * 10^3 * 440 * \sin1,57 * \cos^20,61 = 134 \text{ kN} \end{aligned} \quad (6)$$

Vaihe 5. Lasketaan vahvistetun teräsbetonipalkin leikkausvoimakestävyys

Yhtälön (4) mukaan mitoitettu leikkausvoimakestävyys leikkausraudoitetulla ja hiilikuituvahvistetulla palkilla on:

$$\begin{aligned} V_{Rd} &= \min(V_{Rd,s}; V_{Rd,max}) + V_{Rd,f} \\ &= \min(67; 521,7) + 134 = 201 \text{ kN} \end{aligned} \quad (4)$$

Tämän leikkausvoiman avulla lasketaan sitä vastaava momentti, jonka avulla voidaan laskea pääterästen määrä. Laskentaan käytetään aikaisemmin esitettyjä kaavoja.

Leikkausvoimaa vastaava momentti lasketaan seuraavasti:

$$M_{ed} = \frac{V \cdot L}{3} - \frac{q_{omap} \cdot L^2}{18} = \frac{201 \cdot 10^3 \cdot 2500}{3} - \frac{2 \cdot 2500^2}{18} = 166.8 \text{ kNm}$$

q_{omap} on palkin omapaino (kN/m)

Suhteellinen taivutusmomentti

$$\mu = \frac{166.8 \cdot 10^6}{(43 \cdot 200 \cdot 343^2)} = 0.164 \quad (13)$$

Puristuspinnan suhteellinen korkeus

$$\beta = 1 - \sqrt{(1 - 2 \cdot 0.164)} = 0.181 \quad (14)$$

Sisäinen momenttivarsi

$$z = 343 \cdot \left(1 - \frac{0.181}{2}\right) = 311.9 \text{ mm} \quad (15)$$

Laskennallinen teräsmäärä:

$$A_{s,m} = \frac{166.8 \cdot 10^6}{311.9 \cdot 535} = 999.6 \text{ mm}^2 \quad (16)$$

Minimiteräsmäärä:

$$A_{s,min} = 0,26 \cdot \left(\frac{3.21}{535}\right) \cdot 200 \cdot 343 = 107 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Betonin keskimääräinen vetolujuus $f_{ctm} = 3.21 \text{ MPa}$

Terästen määrä

$$n = \frac{999.6}{314} = 3.18 \text{ kpl} \quad (18)$$

Valitaan vetoraidoitukseksi 20 mm:n teräs, jonka pinta-ala $A_{s,teräs}=314 \text{ mm}^2$. Tämän laskun mukaan palkkiin riittäisi 4 kappaletta 20 mm:n vetoterästä. Vetoteräksiä laitettiin kuitenkin 6 kappaletta, jotta pystyttiin varmistamaan palkin momenttikestävyys.

Todellinen teräsmäärä

$$A_s = 6 * 314 = 1884 \text{ mm}^2 \quad (19)$$

Käyttöasteen laskeminen:

Geometrinen raudoitussuhde

$$\rho = \frac{1884}{200 * 343} = 0.0274 \quad (20)$$

Mekaaninen raudoitussuhde

$$\omega = \frac{0.0274 * 535}{43} = 0.341 \quad (21)$$

Suhteellinen momentti

$$\mu = 0.341 \left(1 - \frac{0.341}{2} \right) = 0.283 \quad (22)$$

Taivustusmomenttikestävyys

$$M_{Rd} = 0.283 * 200 * 343^2 * 43 = 286.65 \quad (23)$$

Käyttöaste

$$\% = \frac{166.8}{286.65} = 58.1\% \quad (24)$$

Yllä olevilla kaavoilla saatiin vahvistetulle palkille seuraavat pistekuormakestävyudet:

Taulukko 5. Vahvistetun palkin raudoitusten yksittäiset kestävyudet.

MÄÄRÄÄVÄ TEKIJÄ	SUURIN PISTEKUORMA (KN)
Vetoteräokset	727
Haat 6 mm	131
Haat 8 mm	472
Hiilikuitu	265
Haat 6 mm+hiilikuitu	400
Betonin puristuspinnan kestävyys	860

3.2 Hiilikuitukankaan asennus

Hiilikuidun asentamisessa on monta vaihetta, mutta vahvistus on kuitenkin suhteellisen nopea toteuttaa. Seuraavassa on kerrottu lyhyesti työssä tehdyt vahvistuksen vaatimat toimenpiteet. Kuvassa 15 näkyy vahvistettu palkki, jossa on 150 mm leveä kangas. Kangasta asennettiin kaksi kerrosta palkin ympärille (0.34 mm). Näin hiilikuidun ankkurointi on saatu varmistettua. Asennuksessa käytettävien aineiden kanssa kannattaa olla huolellinen, koska osa käsiteltävistä aineista on myrkyllisiä. Vahvistuksen yhteydessä tulisi käyttää kunnollisia hengityssuojaimia sekä suojakäsineitä.



Kuva 15. Hiilikuituvahvistettu palkki. Kuva Tommi Auvinen 2012

Ennen hiilikuitukankaan asennusta koko palkki hiottiin timanttikuppilaikalla varustetulla kulmahiomakoneella. Tällä varmistettiin, että palkin pinta on tarpeeksi tasainen ja ettei pintaan jäisi tartuntaa heikentävää sementtiliimaa tai likaa. Erityisesti kulmien tulee olla tasaisen pyöreitä, jotta hiilikuitukangas taipuisi palkin ympärille muodostamatta teräviä kulmia. Terävät kulmat palkissa heikentävät hiilikuidun vetolujuutta ja hiilikuituun syntyy repeämiä herkemmin. Kulmien hiomista helpotettiin laittamalla muottiin särmältään 15 mm:n kolmiorimat viisteiden aikaansaamiseksi.

Palkki primeroitiin ennen kuin hiilikuitua voitiin ryhtyä asentamaan palkin pinnalle. Palkin pinta puhdistettiin ylimääräisestä pölystä ja liasta ennen käsittelyä. Työssä käytettiin paineilmaa ja imuria palkin puhdistukseen. Primer sitoo betonin pölyn, jota ei muuten saada poistettua palkista. Palkkiin merkattiin hiilikuituvahvikkeiden paikat, jotta primerointi tulisi vain vahvikkeiden kohdalle. Primeria kannattaa levittää muutama senttimetri vahvistettavan alueen ulkopuolelle, jotta hiilikuitukankaan jokainen kohta tarttuu kunnolla kiinni. Merkit ovat apuna myös hiilikuidun asennuksessa. Primerointiin käytettiin 2-komponenttista StoBPE 50 super -epoksiprimeria, joka levitetiin telalla palkin pinnalle. Primerin on annettava kuivua vähintään kaksi tuntia huoneenlämmössä, ennen kuin varsinainen vahvistus voidaan aloittaa.



Kuva 16. Hiilikuitukankaan asennus.

Kuva Ville Kantola 2012

Asentaminen alkoi 2-komponenttisen StoBPE 417A/417B -epoksiliiman valmistamisella. Liima ja kovete punnittiin paino-osittain astiaan digitaalisella vaa`alla. Kun liima oli sekoitettu hyvin, levitettiin sitä palkkiin merkatuille kaistoille, johon hiilikuitukangas asennettaisiin. Levitykseen käytettiin normaalia 100 mm:n levyistä vaahtomuovitelaa. Kun liimaa oli levitetty tarvittavalle kaistalle, voitiin hiilikuitukankaan asentaminen palkin ympärille aloittaa. Asennus täytyi tehdä yksi kylki kerrallaan, jotta kankaan ja betonin välistä saatiin kovalla rullatelalla poistettua ilmakuplat ja näin parannettua tartuntaa. Liimaa levitettäessä oli varmistettava, että hiilikuitukangas kastuu läpimäräksi

liimasta. Kun kierros hiilikuitukangasta oli asennettu, poistettiin suojapaperi ensimmäisen kerroksen päältä. Seuraavaksi aloitettiin uusi kierros levittämällä liimaa aiemmin asennetun kankaan päälle. Kun kerroksia oli riittävä määrä, katkaistiin kangas ja levitettiin vielä yksi kerros liimaa asennetun kankaan päälle, jolloin kangas sai täydellisen komposiittimuodon ja tasaisen pinnan (kuva 16). Hiilikuitukangas olisi hyvä asentaa mahdollisimman tiukasti ja tasaisesti palkin pinnalle. Siten hiilikuitukangas ottaa kuormitusta vastaan mahdollisimman nopeasti kuormituksen alkaessa ja kuormat jakaantuvat tasaisesti. Taulukoista 6 ja 7 näkyy leikkausvahvistuksessa käytettävät materiaalit ja niiden ominaisuudet. Liitteessä 1 kerrotaan palkkien valmistuksen vaiheita yksityiskohtaisemmin.

Taulukko 6. Hiilikuitukankaan materiaaliominaisuudet

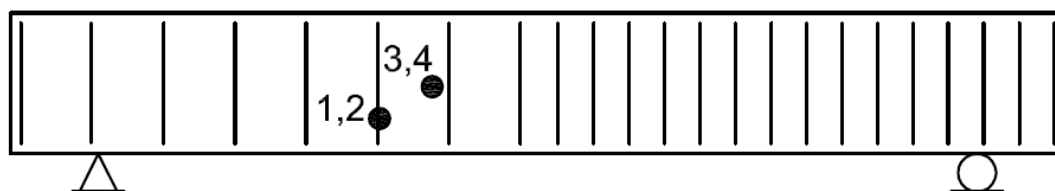
STOFRP SHEET S300C300	
Paksuus	0,17 mm
Leveys	300 mm
Paino	300 g/m ²
Vetolujuus	>4500 GPa
Kimmokerroin	240 GPa
Murtovenymä	n.17 ‰

Taulukko 7. Epoksiliiman materiaaliominaisuudet

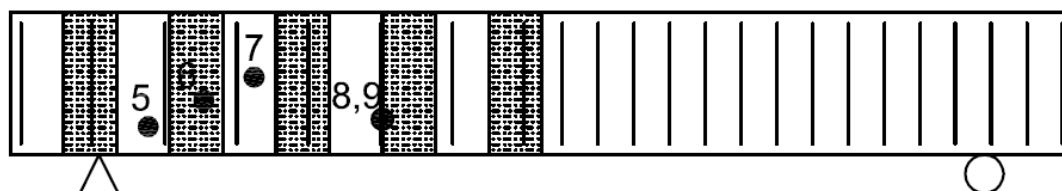
STOBPE LIM 417A/417B - EPOKSILIIMA	
Sekoitussuhde	liima:kovetin; 100:44 paino-osaa
Puristuslujuus	80 MPa
Vetolujuus	50 MPa
Kimmokerroin	2 GPa
Murtovenymä	3 ‰

3.3 Venymäliuskat

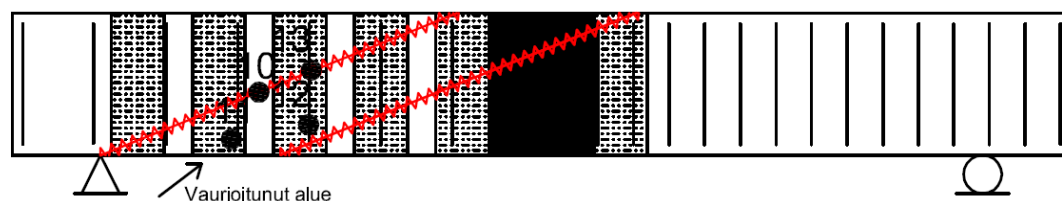
Palkissa tapahtuvien jännitysten selvittämiseksi kuormituskokeen aikana, pitää palkkiin asentaa venymäliuskoja. Niiden toiminta perustuu suhteellisen pituuden muutoksen mittaamiseen, ja näin Hooken lain avulla saadaan laskettua jännitys. Tässä tapauksessa venymäliuskoja asennettiin hakateräksiin, betonin pintaan sekä hiilikuidun pintaan. Alla olevista kuvista näkyy liuskojen sijoittelu palkkeihin. Kuvien jälkeen olevasta taulukosta selviää venymäliuskojen sijoittelu. Liitteessä 2 kerrotaan kuinka venymäliuskojen asennus tapahtui.



Kuva 17. Vertailupalkin venymäliuskojen paikat. Kuva Tommi Auvinen 2011



Kuva 18. Vahvistetun palkin venymäliuskojen paikat. Kuva Tommi Auvinen 2011



Kuva 19. Korjatun palkin venymäliuskojen paikat. Kuva Tommi Auvinen 2011

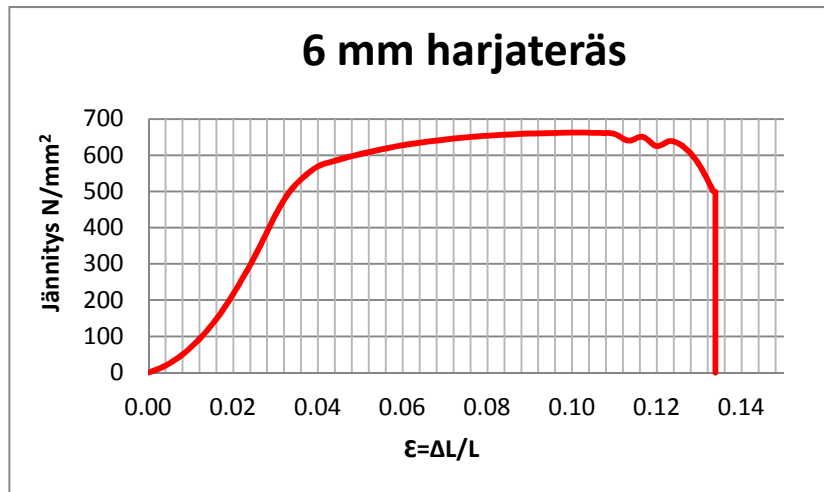
Taulukko 8. Venymäliuskojen paikat palkissa

Palkki	Liuskan nro	Liuskan paikka
Vertailupalkki	1	Teräs 1, vasen
	2	Teräs 2, oikea
	3	Betoni 1
	4	Betoni 2
Vahvistettu palkki	5	Betoni 1, ala
	6	Hiilikuitu 1
	7	Betoni 2, ylä
	8	Teräs 1
	9	Teräs 2
Korjattu palkki	10	Betoni 1
	11	Hiilikuitu 1
	12	Hiilikuitu 2
	13	Hiilikuitu 3

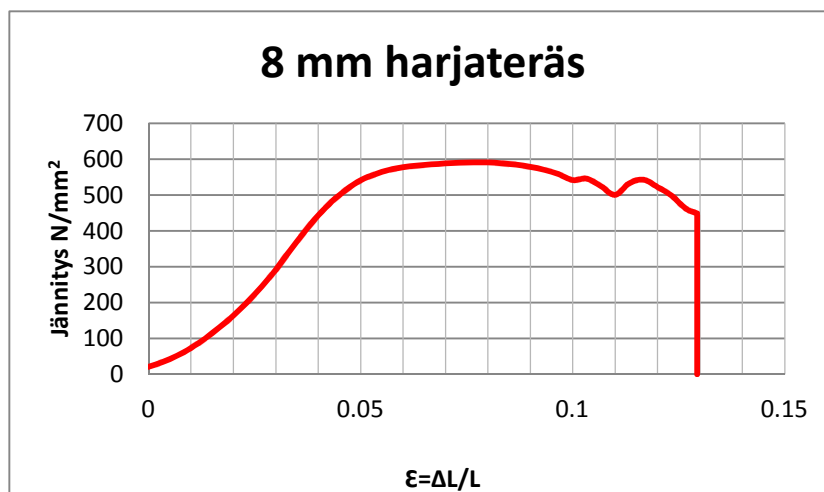
3.4 Materiaalien koestus

3.4.1 Harjaterästen koestus

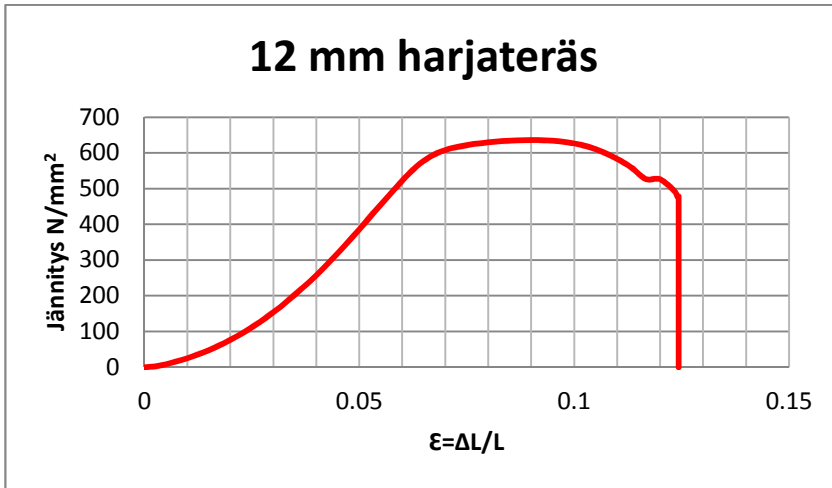
Kaikista käytetyistä harjateräspaksuuksista tehtiin vetokokeet Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa. Kymmenen kappaletta jokaista käytettyä harjateräskokoa kuormitettiin murtoon saakka. Vedettävät harjaterästangot olivat noin 300 mm:n pituisia. Näiden vetokokeiden avulla määritettiin teräksille omat murtokuvaajat. Kuvaajista tehtiin keskiarvoinen kuvaaja AutoCAD- ja Excel-ohjelmia apuna käyttäen. Kuvaajien avulla saatiin terästen omat murtolujuudet, joita käytettiin palkkien laskemisessa sekä tietokoneohjelmissa. Suhteelliset venymät eivät pidä täysin paikkaansa koestuslaitteistossa tapahtuneen harjaterästen kiinnitysten ilmeisen liukumisen vuoksi. Alla on teräksistä muodostetut murtokuvaajat.



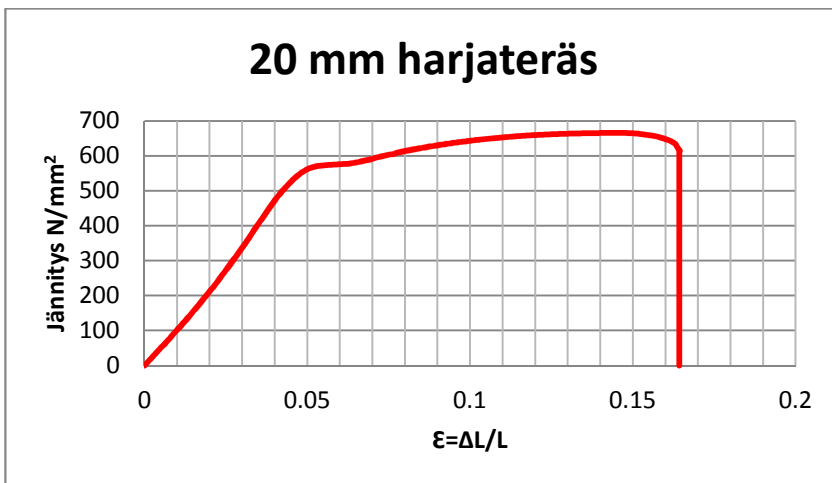
Kuvio 1. 6 mm harjateräksen vetokoekäyrä



Kuvio 2. 8 mm harjateräksen vetokoekäyrä



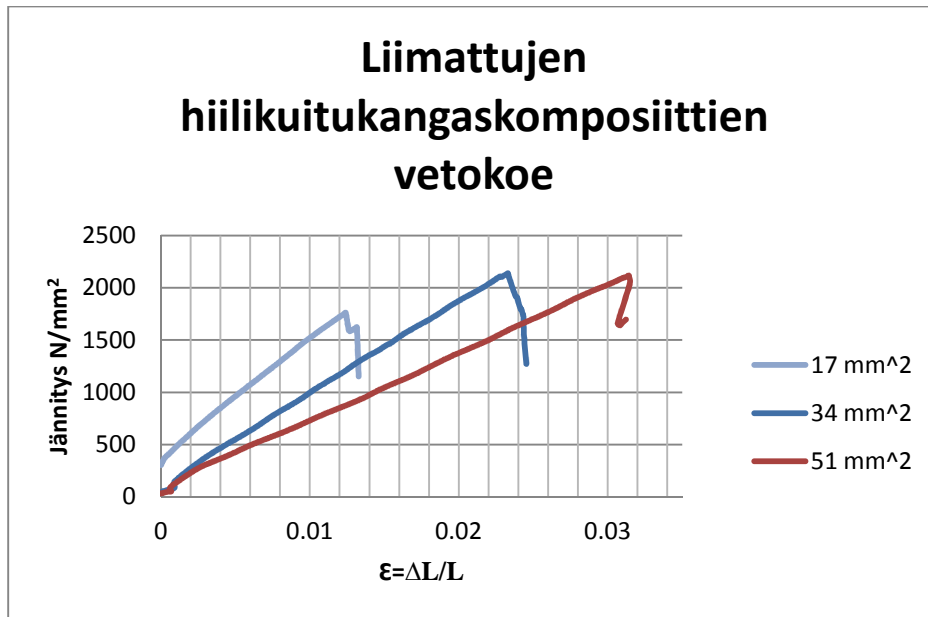
Kuvio 3. 12 mm harjateräksen vetokoekäyrä



Kuvio 4. 20 mm harjateräksen vetokoekäyrä

3.4.2 Liimattujen hiilikuitukangaskomposiittien koestukset

Myös hiilikuitukangasta koestettiin matriisimuodossa, jossa hiilikuitukangas on laminoitu liimalla. Hiilikuitukangasta päällystettiin kolmea eri paksuutta epoksiliimalla, jotta selviäisi miten hiilikuidun vetolujuus kasvaa paksuuden kasvaessa. Vetokokeiden tuloksista saatiin laskettua myös valmiiden liimattujen hiilikuitukangaskomposiittien kimmokertoimet. Kuviossa 5 on esitetty vetokokeista saadut tulokset.



Kuvio 5. Liimattujen hiilikuitukangaskomposiittien vetokokeiden tulokset

3.4.3 Betonin koestus

Betonista selvitettiin kuutiolujuus betonoinnin yhteydessä otetuista 150x300 betoni-lieriöistä sekä palkkikokeiden jälkeen palkeista poratuista 50 mm:n lieriöistä. Alla olevassa taulukossa on 150x300 mm:n lieriöistä tehtyjen betonin puristuslujuuskokeiden tulokset.

Taulukko 9. Valusta otettujen betonilieriöiden puristuskoetulokset

Koekappaleen tunnus	Valmistuspäivä	Lujuusluokka	Ikä d	Puristuslujuus MPa	Tiheys kg/M ³	Murtovoima kN
1	23.11.2011	C28/35	77	58,1	2330	829
2	23.11.2011	C28/35	77	58,4	2340	846
3	23.11.2011	C28/35	77	58,8	2340	828
4	23.11.2011	C28/35	77	62,2	2340	886

Taulukossa 10 on tulokset kuormituksen jälkeen palkeista poratuista ja testatuista 50 mm:n lieriökappaleista. Tulokset on muunnettu särmältään 150 mm:n kuutiota vastaavaksi puristuslujuudeksi betoninormin BY 50 mukaan.

Taulukko 10. Palkista porattujen betonilieriöiden puristuskoetulokset

Koekappaleen tunnus	Valmistuspäivä	Lujuusluokka	Ikä d	Puristuslujuus MPa	Tiheys kg/M ³	Murtovoima kN
5	23.11.2011	C28/35	119	55,8	2310	106,3
6	23.11.2011	C28/35	119	51,3	2320	98,3
7	23.11.2011	C28/35	119	47,6	2320	91,3
8	23.11.2011	C28/35	119	48,1	2290	92,1
9	23.11.2011	C28/35	119	52,0	2290	99,3

3.5 Palkkien koestus

Palkkien koestukset tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa olevalla Fiskarsin valmistamalla koestuslaitteistolla, jonka kapasiteetti on 2 400 kN. Laitteen kalibroinnista vastaa VTT (Teknologian tutkimuskeskus). Kuormituskokeissa tarvittiin alle puolet koneen maksimikapasiteetista.



Kuva 20. Kierron salliva niveltuki. Kuva Eemeli Lehmusoksa 2012

Palkit nostettiin kuormituslaitteeseen samassa tilassa olevalla nosturilla. Palkki asetettiin keskelle pöytää ja tuet asennettiin palkin alle suunnitelluille kohdille. Toiseen päähän palkkia tuli kierron salliva ns. niveltuki (kuva 20) ja toiseen päähän jäykkä tuki. Kummankin tuen ja palkin väliin laitettiin neopreeniä estämään haitallisia paikallisia jännityshuippuja sekä tasaamaan tukireaktio halutulle alueelle.

Kokeet suoritettiin suoraan murtoon, eli kuormitusta lisättiin niin kauan, kunnes palkissa tapahtui murtuma. Välillä koe jouduttiin hetkellisesti pysäyttämään siksi aikaa, että palkkiin ilmestyneet halkeamat saatiin merkattua. Kuormituksen suuruus merkittiin halkeaman viereen. Merkintöjen avulla nähtiin halkeamien muutokset voiman kasvaessa. Merkinnät täytyi tehdä mahdollisimman nopeasti, jotta kuormitus ei ehtisi laskea tauon aikana paineen laskiessa laitteistossa. Ensimmäiseksi koestettiin vertailupalkki, jonka avulla arvioitiin seuraavissa kokeissa mahdollisesti tarvittavia muutoksia. Toisena oli vuorossa valmiiksi vahvistettu palkki ja kolmantena korjattu vertailupalkki.

Hiilikuitukankaan soveltuvuutta murtuneen rakenteen vahvistamiseen testattiin korjaamalla vertailupalkki ensimmäisen kokeen jälkeen. Halkeamat piikattiin kokonaan auki, jonka jälkeen aukot valettiin umpeen betonilla. Betoni tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun laboratoriotiloissa. Betonin annettiin kuivua viikon ajan, jonka jälkeen palkki vahvistettiin hiilikuidulla. Palkki vahvistettiin myös puristusmurtoa vastaan, koska ensimmäisessä kokeessa huomattiin puristuserästen ja betonin pettäneen kokeen aikana. Palkin keskiosan ympärille liimattiin hiilikuitukangasta alueelle, johon oletettiin puristusmurtuman muodostuvan, koska pistekuorman läheisyydessä ovat suurimmat puristusjännitykset palkin pituussuunnassa. Hiilikuituvahvisteen liiman annettiin kuivua viikon ajan, jonka jälkeen palkki koestettiin uudelleen yhdellä pistekuormalla. Korjauksen yhteydessä huomattiin hakojen kuroutuneen, joten uusissa laskuissa ei otettu huomioon hakosten leikkausvahvistusta kokonaisuudessaan. Täten hiilikuitu mitoitettiin ottamaan vastaan ylimääräinen leikkausvoima. Leikkausvahvistamiseksi päätettiin hiilikuitua asentaa kaksi kerrosta ($t_f=34 \text{ mm}^2$) 220 mm:n ($s_f=220 \text{ mm}$) välein. Puristusmurron estämiseksi palkkiin asennettiin pistekuorman molemmin puolin hiilikuitua 300 mm:n leveydelle kaksi kerrosta.

3.6 Työssä käytetyt mitoitusohjelmat

Tutkimuksen näkökulmasta työssä käytettiin myös kolmea laskentaohjelmaa, jotta pystyttiin vertailemaan, miten ohjelmien antamat tulokset eroavat todellisista palkkikokeista. Palkkikokeiden ja ohjelmien antamia arvoja vertailtiin myös käsin tehtyihin laskuihin.

3.6.1 Frame analysis

Frame analysis on FEM -kehäohjelma, jolla voidaan laskea palkin voimasuureet. Eri rakenneosat yhdistetään halutunlaisella liitoksella, ja näin ohjelmalla saadaan mallinnettua kehärakenteita. Ohjelmaan pystyy myös muodostamaan omia materiaaleja sekä poikkileikkauksia. Frame analysis -ohjelmalla saadaan laskettua kehärakenteiden momentit, leikkausvoimat ja siirtymät. Saatuja momenteja ja leikkausvoimia käytettiin työssä hyväksi Response 2000 -ohjelmassa ja käsilaskennan tulosten oikeellisuuden varmistamisessa.

3.6.2 Response 2000

Response 2000 on epälineaarinen laskentaohjelma, joka on kehitetty Toronton yliopistossa. Se laskee raudoitettun betonipalkin tai pilarin jännitykset ja venymät, kun rakenteeseen kohdistuu momenttia, leikkausvoimaa tai normaalivoimaa. Ohjelmalla voidaan analysoida myös jännitettyjä rakenteita. Response 2000 on helppokäyttöinen ja se on saatavilla ilmaiseksi Internetistä. Responsesta saadaan selville betonin ja teräksen jännitys, halkeamien leveys ja suunta sekä venymät eri kuormituksilla. Palkkien koekuormituksista saatuja tuloksia vertailtiin palkkikokeista saatuihin tuloksiin.

3.6.3 Abaqus FEA

Abaqus on epälineaarinen FEM -laskentaohjelmisto, jota käytetään rakenteiden ja komponenttien mallintamiseen ja analysointiin. Ohjelmistoa käytetään rakennusalan lisäksi myös auto-, ilmailu- sekä teollisuustuotteiden aloilla. Ohjelmaa käytetään myös betonirakenteiden epälineaarissa laskennassa haljenneessa tilassa. Sillä pystytään mallintamaan kolmiulotteisia rakenteita ja kuormittamaan kappaleita halutulla tavalla. Ohjelmaan voidaan syöttää tarkasti materiaalien erilaiset ominaisuudet eri tilanteissa

ja kuormituksen eri vaiheissa. Abaqus ottaa huomioon kuormituksen aikana materiaaleissa tapahtuvat muutokset. Ohjelma näyttää graafisesti laskennan tuloksina rakenteen rasitukset ja jännitykset. Ohjelmaa käytettiin rakenteen sisällä tapahtuvien muutosten havainnollistamiseksi ja palkkikokeista saatujen tulosten vertailuun.

4 TULOKSET

4.1 Laboratoriokokeiden tulokset

Taulukossa 11 on lasketut leikkausvoimakestävyudet sekä kuormituskokeista saadut leikkausvoimat. Palkkien mitoitus laskettiin 35° :n leikkaushalkeamakulmalla, mutta palkkikokeissa kulmat erosivat laskennassa käytetyistä leikkaushalkeamakulmista. Kulman huomataan vaikuttavan suuresti leikkausvoimakestävyteen varsinkin korjatussa palkissa, jonka leikkausvoimakestävyys tulee suurimmaksi osin hiilikuitukan-kaan vaikutuksesta. Kaikissa palkeissa laskennallinen kestävyys jäi koetuloksia pie-nemmiksi.

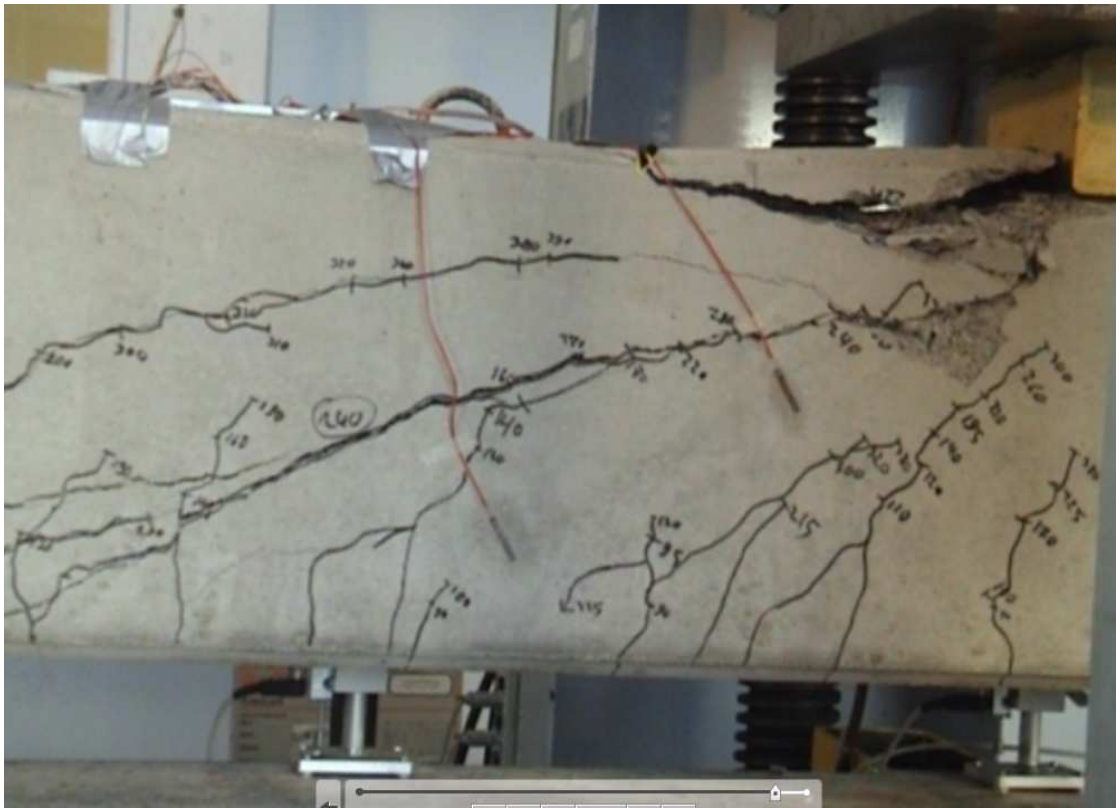
Taulukko 11. Leikkausvoimien vertailu kolmella erilaisella palkilla

	Laskettu ($\theta=35^\circ$)	Laskettu (kokeen θ)	Koetulokset
Vertailupalkki	67 kN	122 kN ($\theta =22^\circ$)	214 kN
Vahvistettu palkki	201 kN	265 kN ($\theta =30^\circ$)	352 kN
Korjattu palkki	129 kN	260 kN ($\theta =28^\circ$)	265 kN

Kokeessa valmistettiin kaksi identtistä palkkia. Aluksi koestettiin vahvistamaton ver-tailupalkki, seuraavaksi hiilikuitukan-kaalla leikkausvahvistettu palkki ja viimeisenä vertailupalkista korjattu ja vahvistettu palkki.

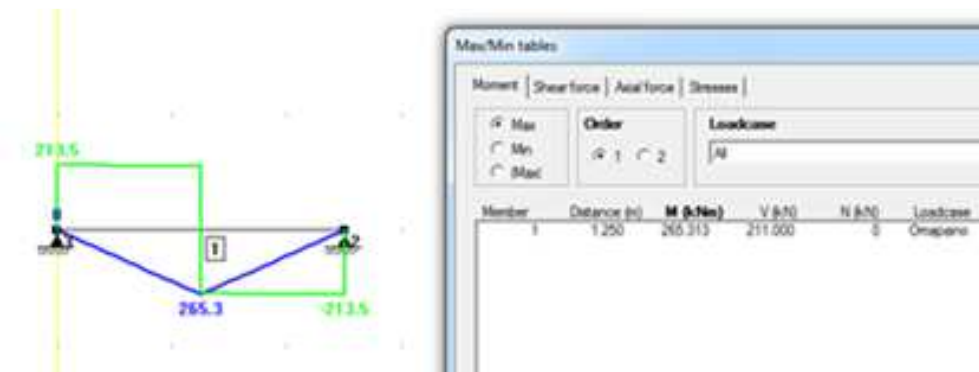
4.1.1 Vertailupalkki

Vertailupalkkia kuormitettiin yhdellä pistekuormalla. Leikkaushalkeamien kulmaksi muodostui 22° astetta, joka oli oletettua loivempi kulma. Näin ollen leikkauskestävyys-kin kasvoi lasketusta, koska vetoteräksien osuus leikkauskestävyydessä kasvoi ja useampi hakanen osallistui leikkausvoiman vastaanottamiseen. Lopulta palkki murtui leikkaushalkeamien välistä puristuspinnan murtumisena, joka on yksi leikkausmurtu-mien tyypeistä (kuva 21). Palkin puristuspinnasta lohkesi pala leikkaushalkeaman kohdalta leikkaushalkeaman noustessa puristuspinnan läheisyyteen. Palkin piste-kuormakestävyudeksi oli laskettu 129 kN ($V=67$ kN) 35° :n leikkaushalkeamakuormal-la. Murtokuormaksi muodostui odottamattomasti 422 kN, mikä oli yli kolminkertainen laskettuun verrattuna. Tämä vastaa 214 kN:n leikkausvoimaa.



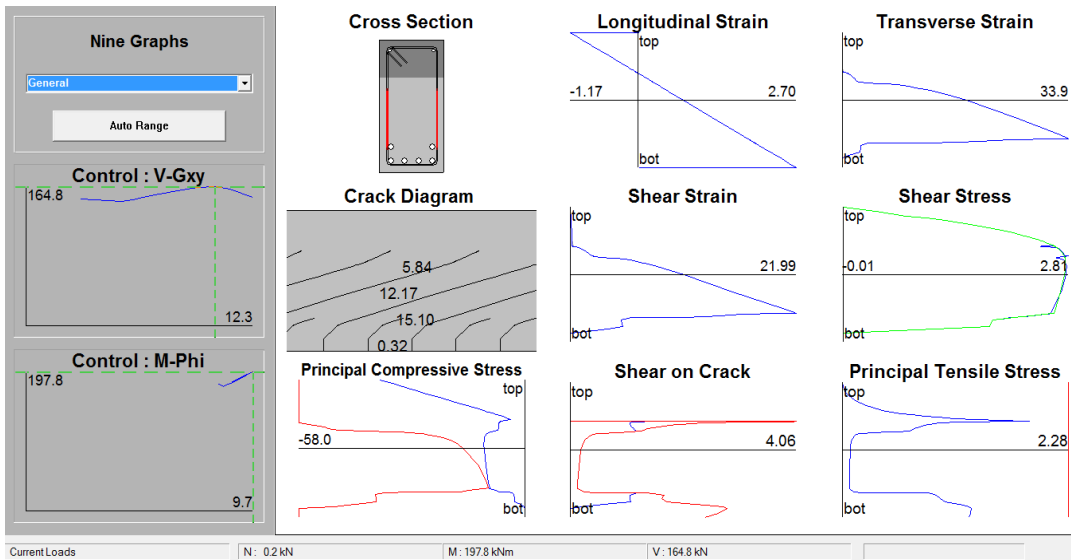
Kuva 21. Vertailupalkki murtohetkellä. Kuva Tommi Auvinen 2012

Palkin korjauksen yhteydessä huomattiin haoissa selviä kuroumia. Vahvat vetoteräksset olivat luultavasti hidastaneet leikkaushalkeaman syntyä. Tämä taas pienensi rasiuksia hakateräksissä, katso kuva 7 leikkausraudoitetusta ristikkomallista, siksi puhdasta leikkausmurtumaa ei syntynyt.



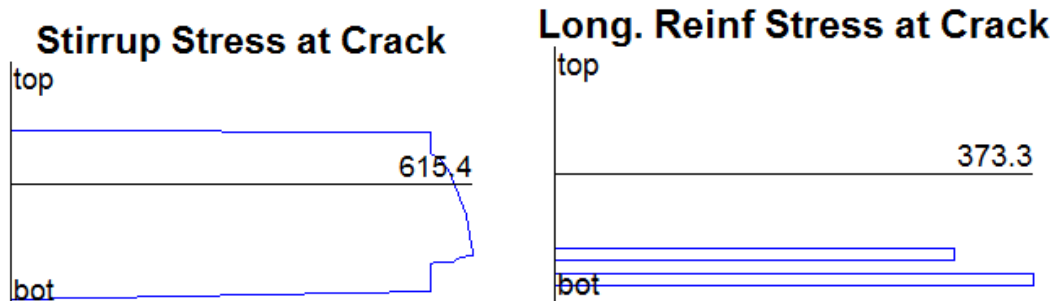
Kuva 22. FrameAnalysis -ohjelman antama momentti- ja leikkausvoima

Kuvassa 22 on kehäohjelmasta saadut momentin ja leikkausvoiman suuruudet vertailupalkin murtohetkellä. Ohjelmaan laitettiin palkkikokeesta saatu pistekuorma. Ohjelma antoi rakenteen momentiksi 265.3 kNm ja leikkausvoimaksi 211 kN. Nämä arvot Response 2000:een syöttämällä saadaan teräshakasten jännitykset selville. Jännitykset on esitetty kuvassa 24.



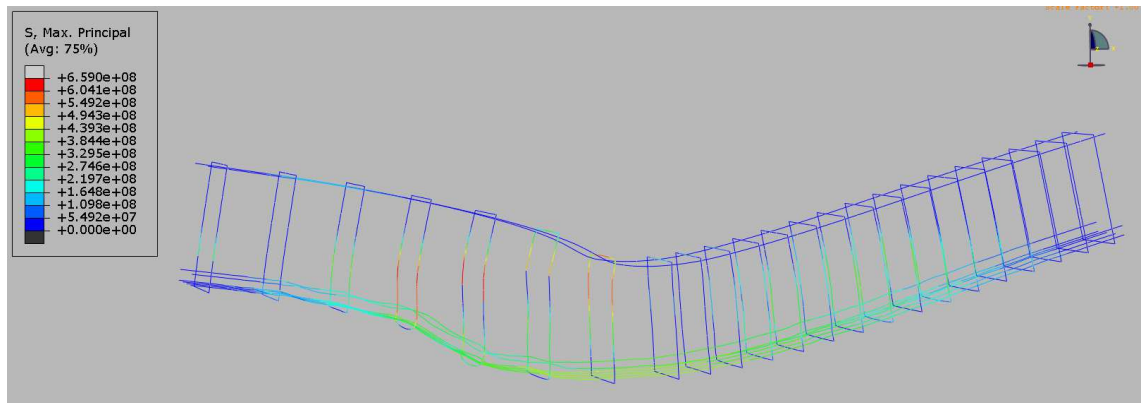
Kuva 23. Response 2000, vertailupalkki

Kuvan 23 mukaan teräshaat alkaisivat myödetä leikkausvoiman ollessa 165 kN. Ohjelman mukaan palkki ei kestä suurempaa kuormaa. Koestuksessa saatu leikkausvoima oli 214 kN. Leikkaushalkeamien suunta on melko lähellä laboratoriokokeesta saatua halkeamien kulmaa. Puristuspuolella ei näy merkkejä murtumisesta. Ohjelman mukaan palkin hakojen pitäisi saavuttaa ensimmäisenä myötölujuus, mikä pitää paikkansa, sillä hajoissa oli havaittavissa selviä kuroumia.



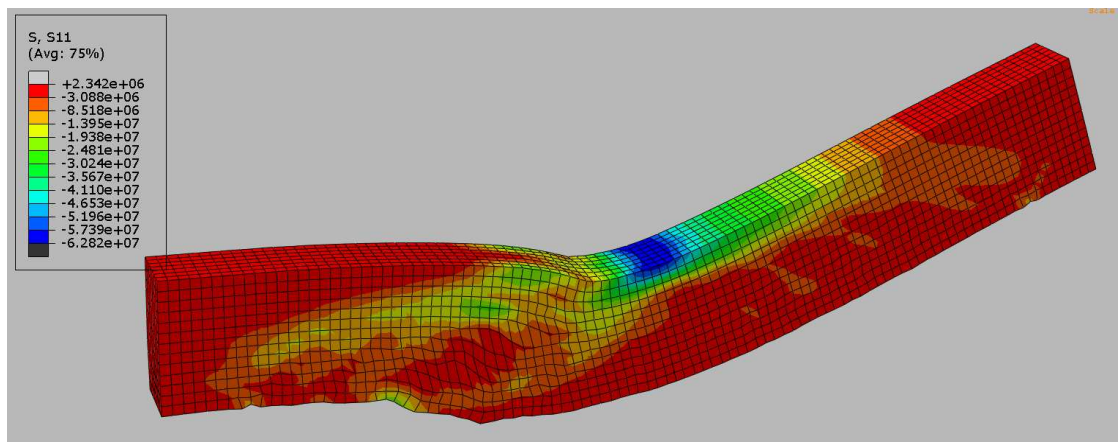
Kuva 24. Hakasten ja vetoterästen jännitys 165 kN:n leikkausvoimalla

Kuten yläpuolisesta kuvasta (kuva 24) näkee, leikkausvoiman ollessa 165 kN, teräshakasen jännitys on 615,4 MPa, eli myötäämistä on tapahtunut. Terästen vetokoikeista muodostetuista kuvaajista katsottuna hakaterästen myötölujuus oli lähellä 550 MPa ja murtolujuus noin 650 MPa. Pitkittäisraudoitus sen sijaan ei ole vielä lähelläkään myötäämistä. Vetoterästen lujuusarvot olivat lähes samat kuin hakateräksillä.



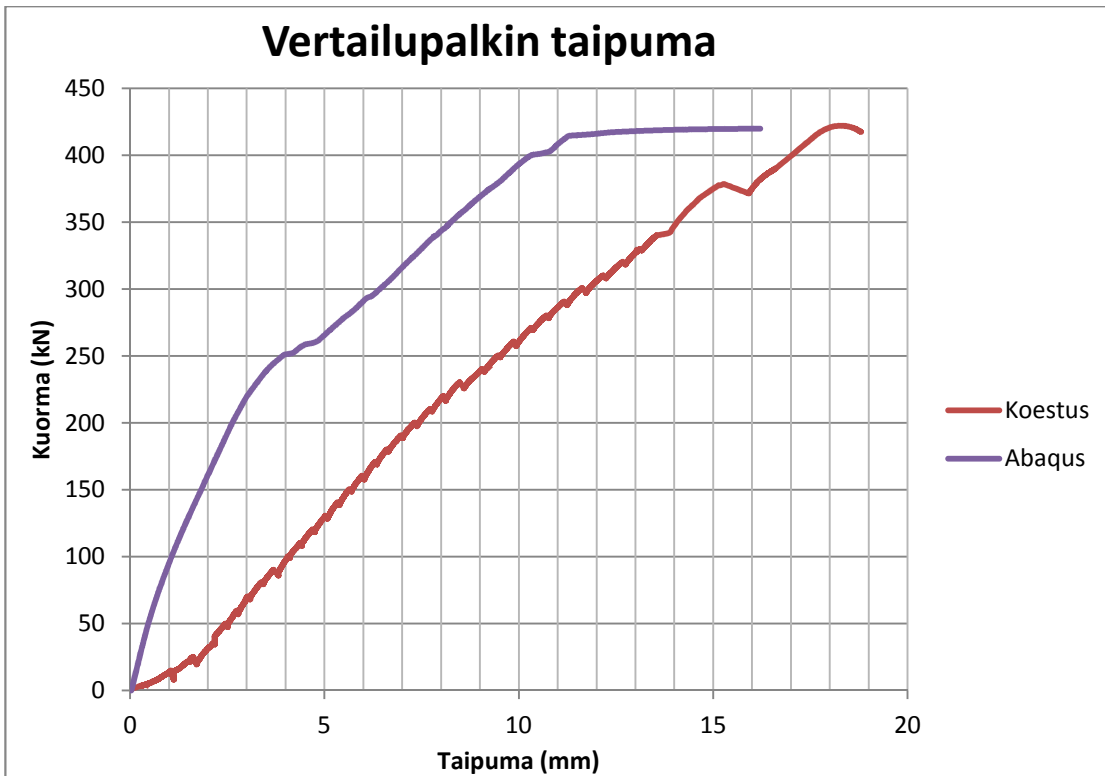
Kuva 25. Vertailupalkin terästen jännitykset (Pa) Abaqus-ohjelmasta

Kuvassa 25 näkyy vertailupalkin terästen jännitykset murtokuormalla laskettuna Abaqus -ohjelmalla. Ohjelman antamat jännitykset ovat lähes samat kuin Responsen antamat jännitykset. Suurimmat jännitykset ovat kuvan 21 esittämissä leikkaushalkeamien kohdissa. Palkin vahvemmin raudoitettussa päässä ei näy merkittäviä jännityksiä.



Kuva 26. Vertailupalkin betonin jännitykset (Pa) Abaqus-ohjelmasta

Betonin jännityskuvassa (kuva 26) näkyy, että suurimmat palkin pituussuuntaiset puristusjännitykset (57,4 MPa) palkin puristuspuolella ovat pistekuorman alla. Murtuminen tapahtui puristusjännitysten lopulta ylitettyä betonin puristuslujuuden pistekuorman vierestä. Betonin puristuskokeen tulosten mukaan betonin puristuslujuus oli lähes sama, eli 58 MPa (taulukko 9).



Kuvio 6. Vertailupalkin murtokuvaaja

Kuviosta 6 näkyy vertailupalkin taipuma pistekuorman funktiona sekä koestustuloksista että Abaqus-laskelmista. Tulosten mukaan palkki olisi jäykempi mitä todellisudessa, koska taipuma kasvaa siinä todellisuutta hitaammin. Silti murtokuorma on sama ja kulmakerroin lähes sama sekä kokeessa että Abaqus-laskussa.

4.1.2 Vahvistettu palkki

Vertailupalkista saatujen tulosten perusteella vahvistettu palkki päätettiin koestaa kahdella pistekuormalla, jonka avulla pienennettiin momenttia, ja näin oletettiin saatavan puhdas leikkausmurtuma. Leikkaushalkeamien kulmaksi muodostui noin 30 astetta, joka on suurempi vertailupalkkiin verrattuna. Leikkaushalkeamien kohdatessa hiilikuitukankaan reunan, halkeaman suunta muuttui hiilikuitukankaan reunan suuntaiseksi, nousten suoraan ylöspäin. Jännityksen noustessa suuremmaksi halkeamassa, se suuntasi jälleen kankaan alle ja jatkoi seuraavalle vahvistukselle samassa 30 asteen kulmassa. Hiilikuitu otti vastaan jännityksiä ja hidasti samalla halkeamien syntymistä. Kuormitus ei kasvanut kuitenkaan hiilikuidulle niin suureksi, että siihen olisi syntynyt murtumia. Tämä näkyy hyvin myös Abaquksesta saaduista hiilikuidun jännityksistä (kuva 31). Lopulta palkki murtui puristusmurtona kohdasta, johon hiilikuituvahvikkeet lopuivat, koska puristusjännitys vahvistamattomalla osalla nousi suuremmaksi kuin puristuskestävyys. Palkin kestävyys kokeessa oli 700 kN. Laskennallisesti kestävyudeksi saatiin 297 kN. Nämä kuormat vastaavat 352 kN:n ja 150 kN:n

leikkausvoimia. Täten palkin leikkauskestävyys kasvoi yli kaksinkertaiseksi Excel-laskuihin verrattuna.

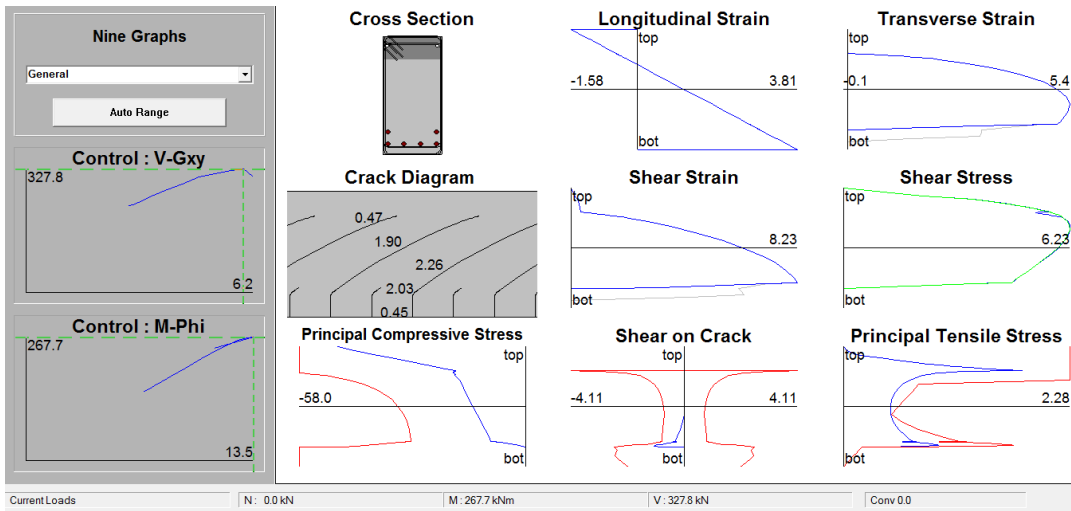


Kuva 27. Vahvistettu palkki murtumishetkellä heikomman pään pistekuorman vieressä. Kuva Tommi Auvinen 2012



Kuva 28. Momentit ja leikkausvoimat Frame Analysis -ohjelmasta

Kuvassa 28 on tarkat momentit ja leikkausvoimat Frame Analysis -ohjelmasta, joita käytettiin Response 2000:ssa laskelmien suorittamiseksi. Ohjelman antamien tulosten avulla tarkastettiin myös käsin laskettujen arvojen paikkansapitävyyden. Kuvan momentti on 290kNm ja leikkausvoima 349 kN.

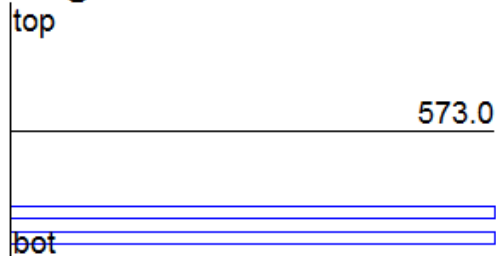


Kuva 29. Response 2000 -ohjelmasta saatuja tuloksia

Kuva 29 vahvistetun palkin Response 2000 -laskelmista kertoo, että hiilikuitu estää teräshakojen myötämisen estämällä halkeamien kasvamisen, ja puolestaan pääteräokset alkavat myödetä leikkausvoiman ollessa 328 kN. Myös vahvistettu palkki Response 2000 -ohjelman mukaan murtuisi todellisuutta aikaisemmin. Ohjelmassa ei näy puristusvyöhykkeellä murtumaan johtavia jännityksiä, vaikka puristusvyöhykkeen korkeus on jo melko matala. Halkeamakuvaajasta näkee halkeaman kulman kasvaneen, kuten kokeessa todettiin tapahtuvan.

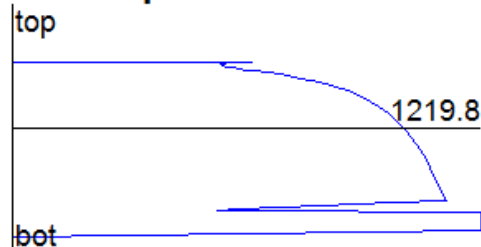
a)

Long. Reinf Stress at Crack



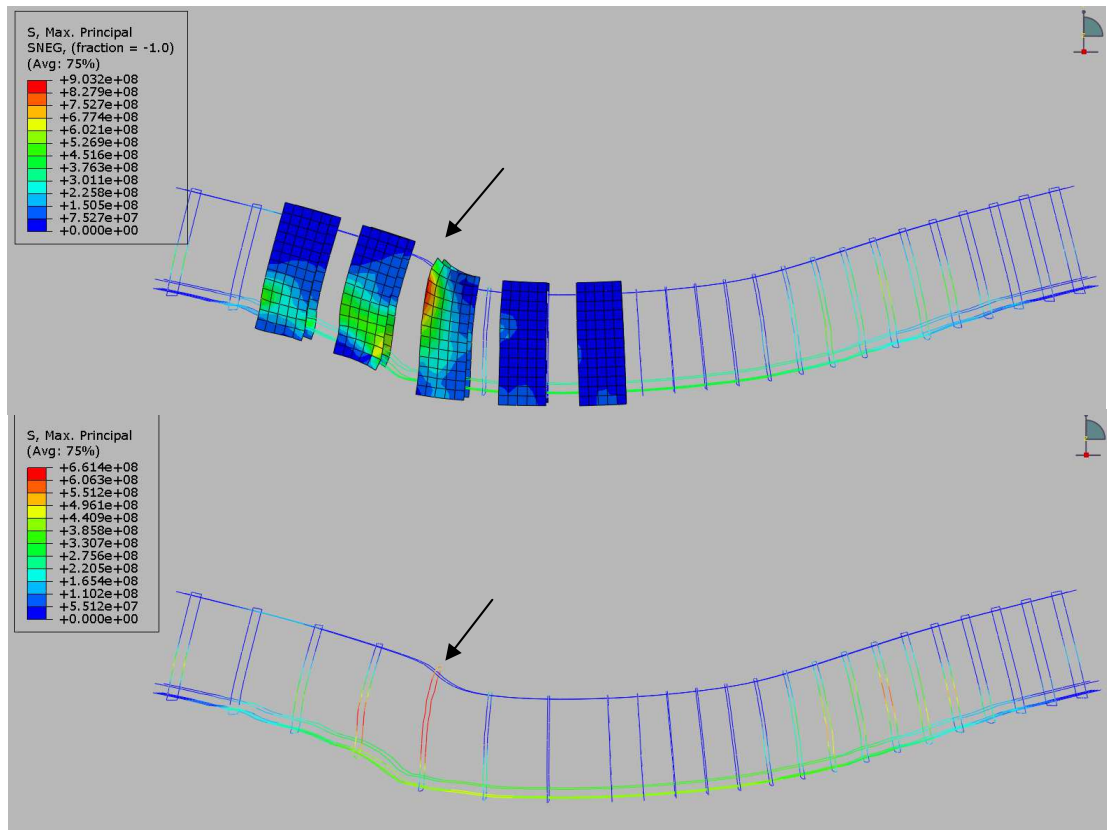
b)

Stirrup Stress at Crack



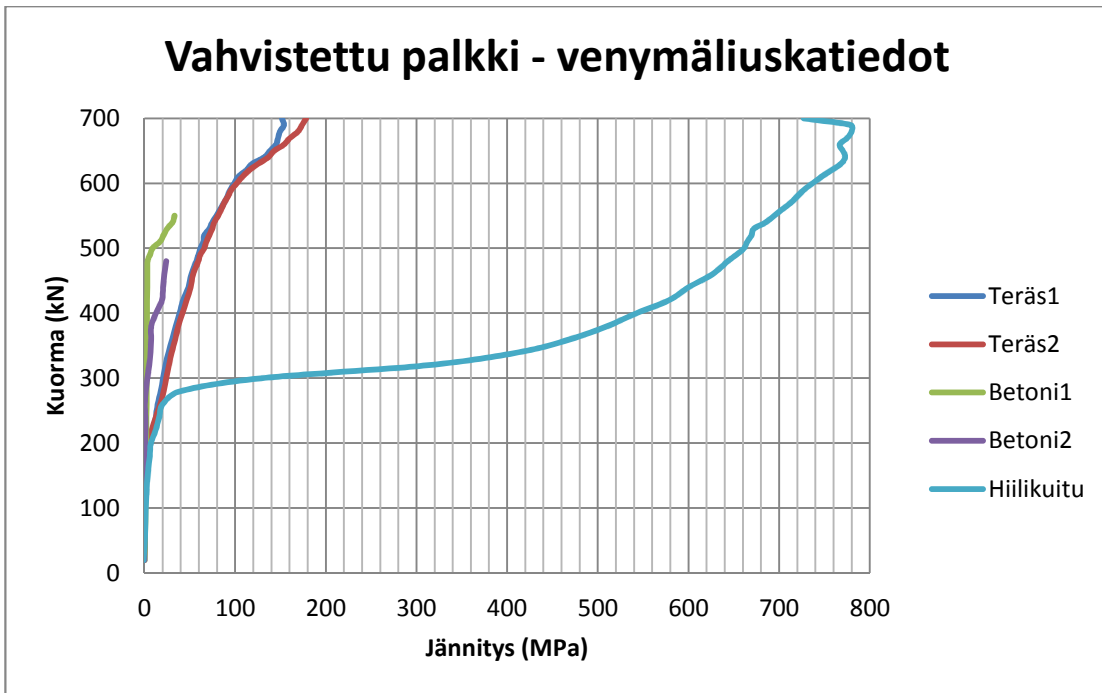
Kuva 30. a) Vetoterästen ja b) hiilikuidun jännitys 328 kN:n leikkausvoimalla

Myös kuva 30 terästen jännityksistä kertoo samaa kuin kuva 35. Pitkittäisterästen jännitys on lähellä myötämistä, kun hiilikuidun jännitys on vain 1219,8 MPa. Hiilikuitukangasta testattaessa materiaalikokeissa liimattujen komposiittihiilikuitukankaiden vetokokeiden jännitys nousi selvästi yli 2000 MPa:n ennen hiilikuidun rikkoontumista, kuvio 5.



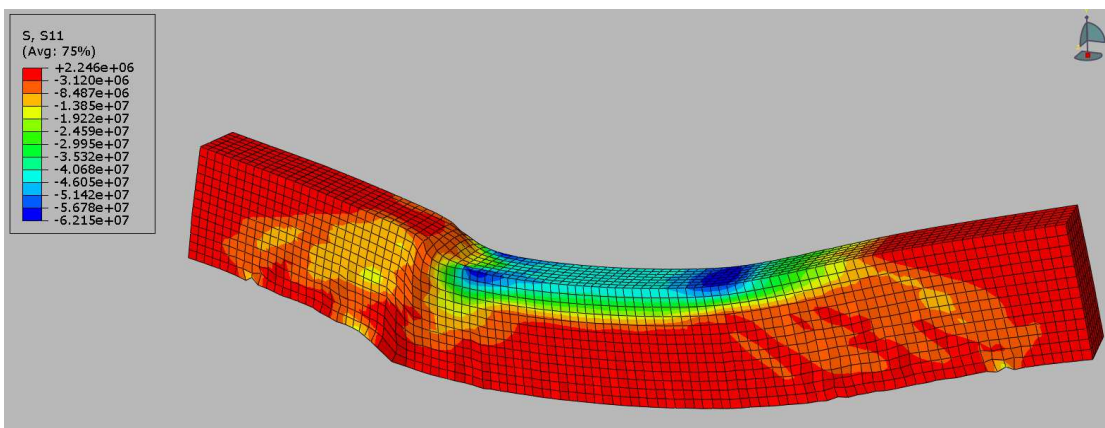
Kuva 31. Hiilikuidun ja terästen jännitykset vahvistetussa palkissa (Pa) Abaqus-ohjelmasta

Kuvassa 31 näkyy sekä hiilikuitukankaan että terästen jännitykset vahvistetussa palkissa murtumahetkellä. Suurimpien jännitysten kohdat on merkitty nuolilla. Hiilikuidussa on kuvan mukaan noin 900 MPa:n jännitys palkin murtumahetkenä, joka on alle puolet hiilikuidun vetokokeesta saadusta kestävydestä. Tämä kuvastaa hyvin hiilikuidun kestävyttä leikkausvahvistamisessa. Samassa kohdassa haoissa suurin jännitys on noin 660 MPa, joka on ylittänyt teräksen myötörajan. Hiilikuitukangas ei anna terästen venyä enempää, joten teräkset eivät pääse murtumaan eivätkä jännitykset nousemaan suuremmiksi. Hiilikuitukangas ottaa vastaan ylimenevän leikkausjännityksen. Vetoterästen jännitykset vastaavat Response-ohjelman antamia jännityksiä (kuva 30).



Kuvio 7. Vahvistetun palkin jännitykset, katso kuvat 16-18

Kuviossa 7 on vahvistetun palkin venymäliuskatiedoista lasketut jännitykset kuormituskokeen aikana. Jännitykset ovat lähes samat kuin Abaqus FEA- ja Response 2000 -ohjelmien antamat jännitykset rasiusten aikana. Teräksen jännityksiä voi verrata kuvan 31 kuudenteen hakaan vasemmalta, jossa venymäliuska sijaitsee.



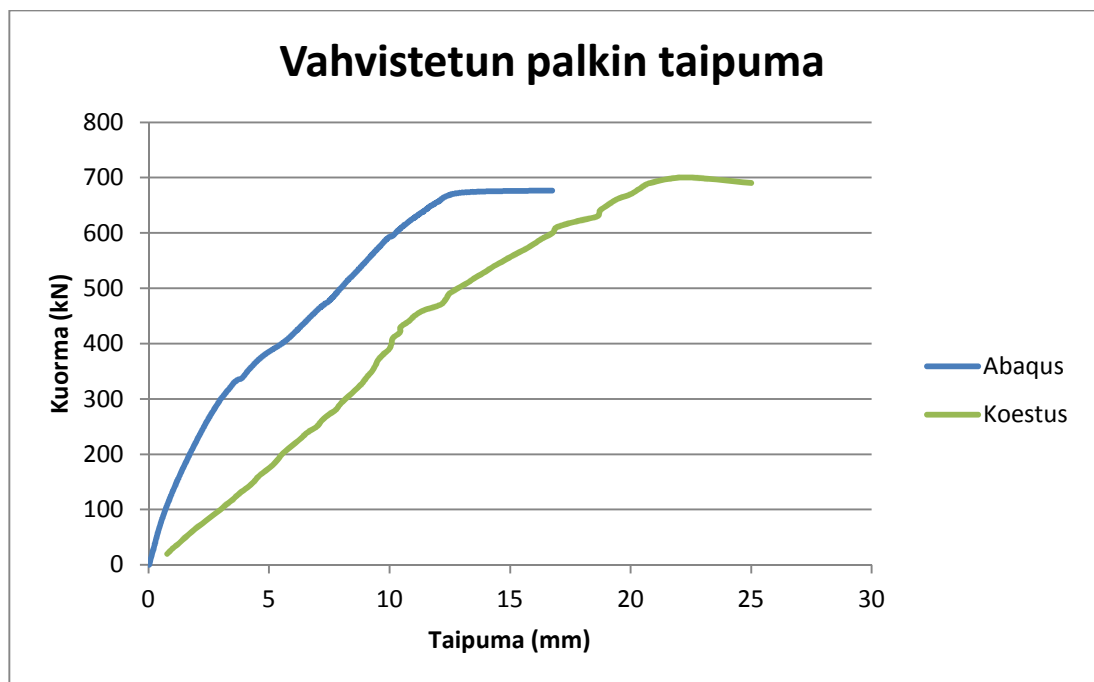
Kuva 32. Betonin jännitykset (Pa) murtokuormalla Abaqus-ohjelmasta

Betonin puristusjännitykset palkin pituussunnassa ovat suurimmillaan pistekuormien kohdilla. Jännitykset tukien alla ovat noin 62 MPa, joka on suurempi kuin puristuskoikeista saadut betonin puristuslujuudet. Tämän vuoksi palkissa tapahtui puristumurtuma kuvan 27 mukaisesti, vaikka hakateräksetkin olivat menettäneet kestävyytensä. Hiilikuitukangas kuitenkin piti rakenteen koossa estäen leikkaushalkeaman levenemisen kuormituksen kasvaessa.



Kuva 33. Vahvistetun palkin kuormituskoe. Kuva Ville Kantola 2012

Kuvassa näkyvät venymäliuskat vihreiden nuolien osoittamissa paikoissa. Halkeamat vahvistettiin mustalla värillä puristuskokeen aikana palkkeihin. Vaikka kuvan tilanteessa kuormitus on yli 500 kN, palkissa ei näy suuria halkeamia.



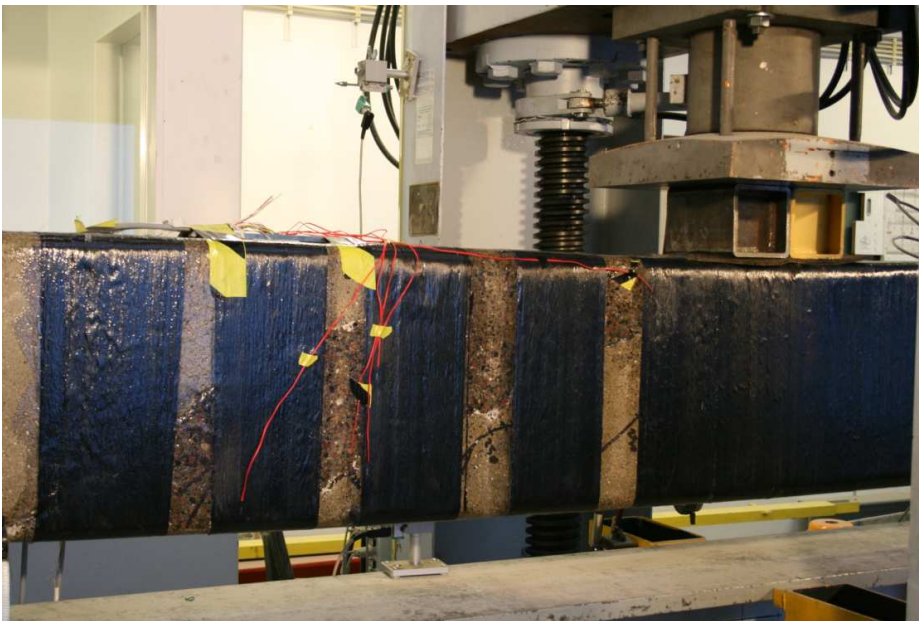
Kuvio 8. Vahvistetun palkin murtokuvaaja

Kuviossa 8 näkyy vahvistetun palkin taipuma pistekuorman funktiona. Koestuksessa palkin taipuma kasvoi tasaisesti voiman kasvaessa. Kuvassa on esitetty, kuinka Abaqus-ohjelman antamien tulosten mukaan palkki olisi todellisuutta jäykempi. Tämä johtuu hiilikuitukankaan mallinnustavasta, jossa sillä on samat materiaaliarvot mo-

lempiin suuntiin, vaikka todellisuudessa annettu kimmokerroin vaikuttaa vain kuitujen suunnassa. Myös epoksi-liiman joustava vaikutus jää pois, kun sitä ei ole mallinnettu. Vertailupalkki taipui yli 5 mm enemmän ennen palkin murtumahetkeä, kuin vahvistettu palkki samassa kuormituksessa.

4.1.3 Korjattu palkki

Korjatun palkin koe suoritettiin yhdellä pistekuormalla, jotta tuloksia voitiin verrata vahvistamattoman palkin arvoihin. Leikkaushalkeamia alkoi muodostua ensimmäiseksi uuden ja vanhan betonin rajapintaan, missä oletetusti oli heikoin kohta. Kun halkeama tuli hiilikuitukankaan reunaan, halkeama muutti suuntaa hiilikuidun pitäessä koossa betonia samalla tavoin, kuin vahvistetussa palkissa. Halkeama nousi jonkin matkaa kankaan reunaa myöten ja sen jälkeen kulkeutui kankaan alta jatkaen samalla kaltevuudella seuraavan kankaan reunaan. Palkkiin syntyi halkeamia, mutta hiilikuitukangas esti niiden levenemisen.



Kuva 34. Korjatun palkin kuormituskoe. Kuva Tommi Auvinen 2012

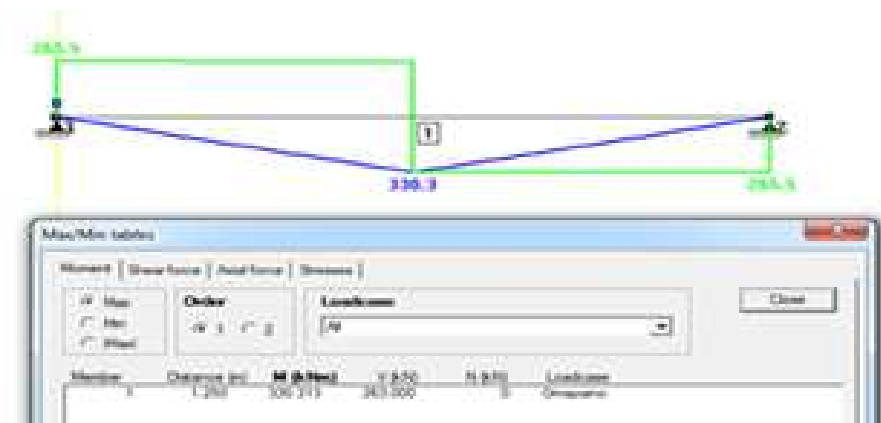
Hiilikuitukangas esti leikkaushalkeamien kasvua, joten puristusjännityksestä tuli kohteessa määräävä tekijä kuormituspisteen läheisyydessä. Puristuskuormaa vastaan asennetuissa hiilikuituvahvistuksissa näkyi kuorman kasvaessa muutoksia. Betoni alkoi pullistua kankaan alla, koska palkilla ei ollut enää kunnollista puristuskestävyyttä sen ollessa jo kerran murtunut taivutuksesta aiheutuvasta puristuksesta. Myös puristuseräket olivat vääntyneet ensimmäisessä koestuksessa. Kangas kuitenkin piti palkin puristuspinnan koossa. Puristuskuorma siirtyi hiilikuitukankaan reunalle, mistä kangas alkoi lopulta murtua. Kankaan reunasta alkoi katketa ohuita säikeitä, kunnes

se lopulta petti. Kuvassa 40 näkyvät betonin jännitykset palkin pituussunnassa maksimikuormituksella.

Palkin murtokuormaksi muodostui 526 kN, joka on yli 100 kN enemmän kuin vahvistamattomalla palkilla. Palkin aikaisemmasta murtumisesta huolimatta, se saatiin hiilikuituvahvistamisella kestäämään uudessa puristuskokeessa suurempi kuorma, mitä palkki kesti ennen vahvistusta. Vaikka hiilikuitukangas mitoitettiin vain 185 kN:n kuormalle, ja kaikkia hakasia ei voitu käyttää laskennallisessa mitoituksessa hyväksi, kesti hiilikuitukangas laskettua arvoa paljon suuremman kuorman.

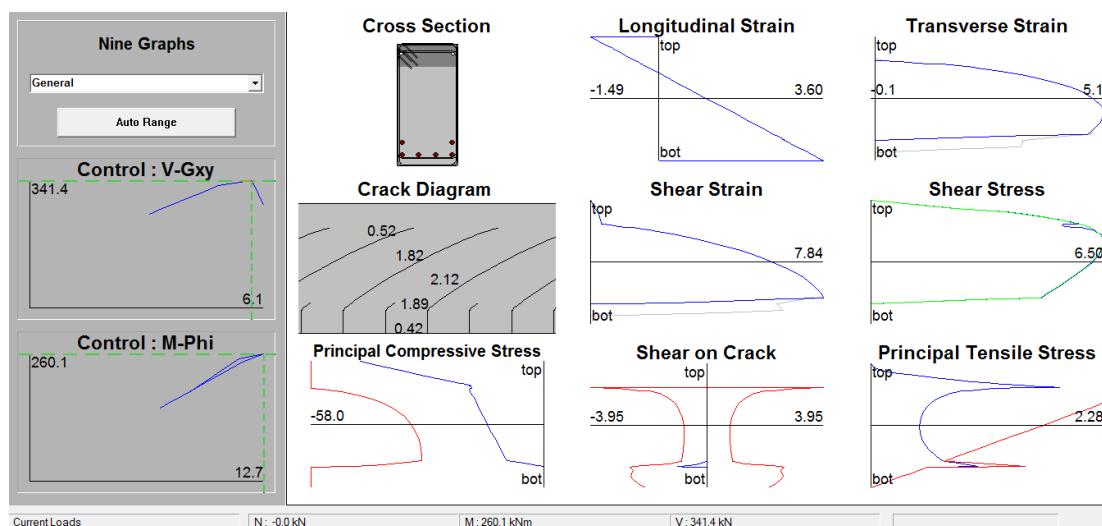


Kuva 35. Korjattu palkki murtumishetkellä. Kuva Tommi Auvinen 2012



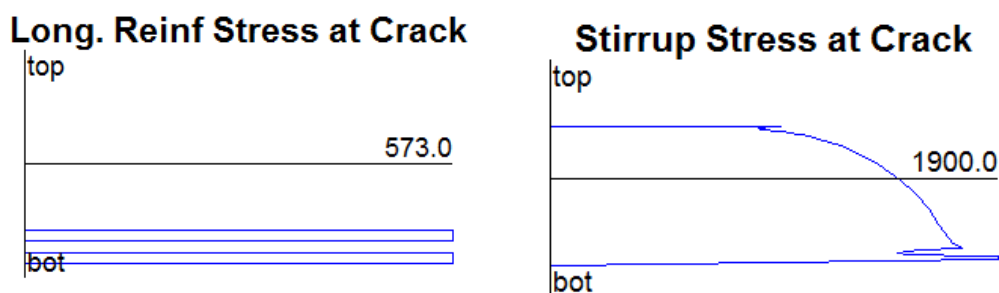
Kuva 36. Frame analysis ohjelman tulokset

Korjatun palkin murtokuormalla Frame analysis –ohjelman (kuva 36) mukaan rakenteen momentti on 330 kNm ja leikkausvoima 263 kN. Se kertoo että hiilikuitu on tuonut korjatulle palkille 24 % lisää leikkausvoimakapasiteettiä.



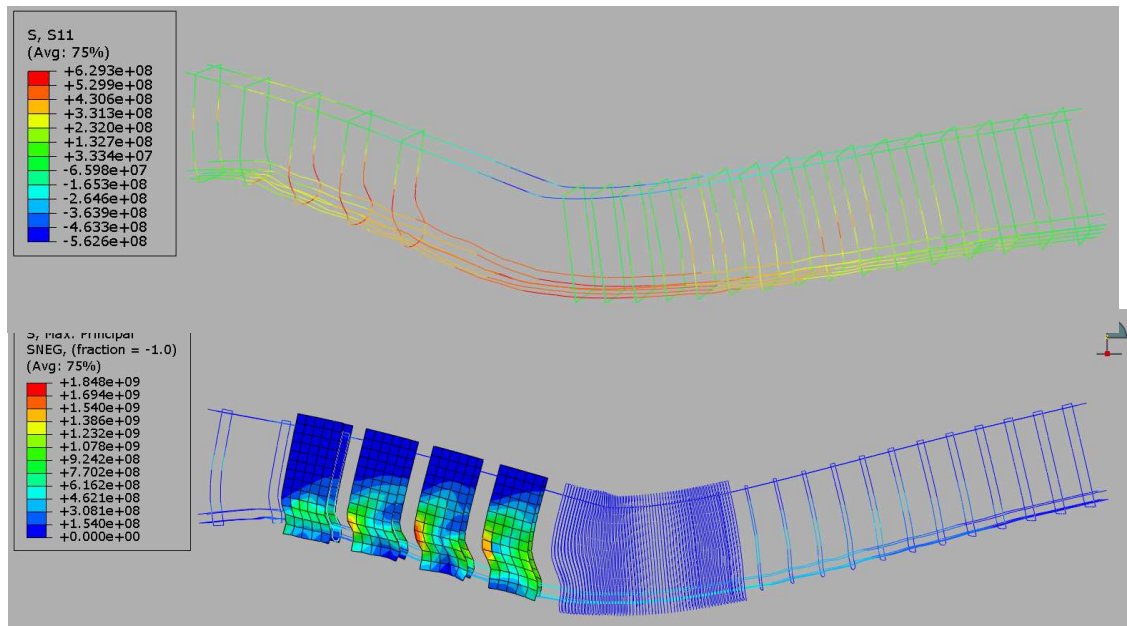
Kuva 37. Response-2000-ohjelman antamat tulokset

Myös korjatussa palkissa pitkittäisteräkset ovat lähellä myötäämistä leikkausvoiman ollessa 260 kN. Leikkaushalkeaman kulma ohjautui kokeessa uuden ja vanhan betonin rajapintaan, joten kuvassa 37 oleva halkeamakuvaajan antama halkeaman suunta ei pidä paikkaansa.



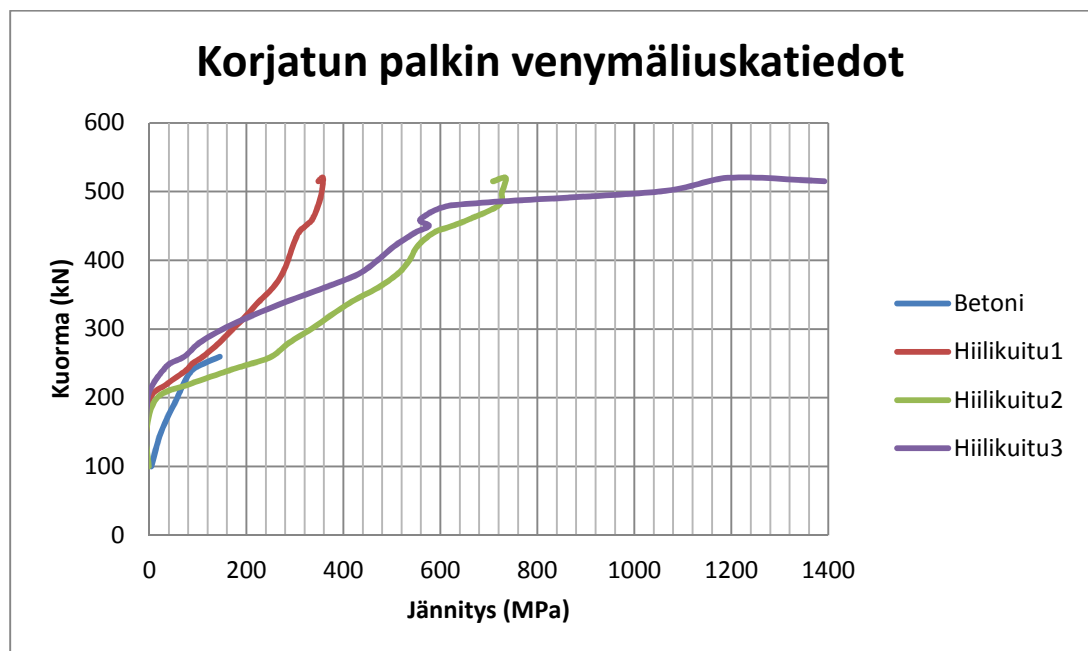
Kuva 38. Hakasten ja vetoterästen jännitys leikkausvoiman ollessa 341 kN

Jännitys korjatun palkin pitkittäisteräksissä oli 573 MPa, eli lähellä myötäämistä. Vetokokeissa saaduista tuloksista 20 mm vetoterästen myötöraja on noin 580 MPa. Myös hiilikuidun jännitys, 1900 MPa, oli lähellä murtolujuutta, joka oli vetokokeiden perusteella vähän yli 2000 MPa.



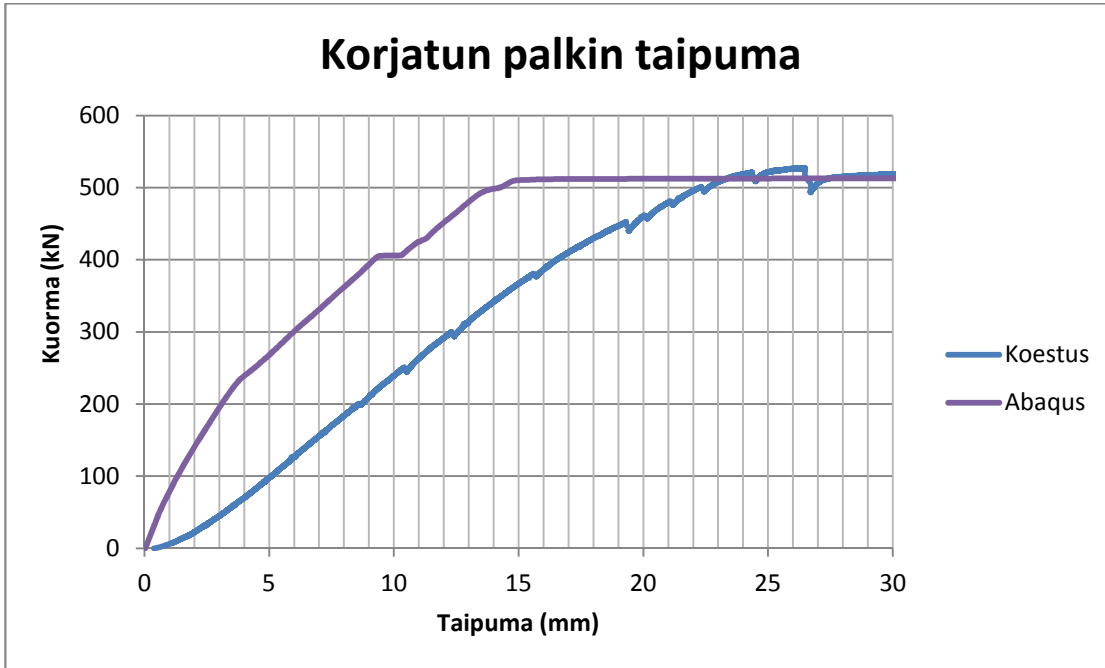
Kuva 39. Korjatun palkin jännitykset (Pa) teräksissä ja hiilikuiduissa Abaqus-ohjelmasta

Kuvasta 39 nähdään hiilikuidun ottavan vastaan kaiken leikkauskuorman, koska laskusta otettiin kuroutuneet hakaset pois. Hiilikuitu vastaa tällöin kokonaisuudessaan leikkauskapasiteetista palkin heikommassa päässä. Hiilikuidussa suurin jännitys on 1840 MPa. Myös ehjät haat ovat saavuttaneet myötörajan, jännitysten ollessa haka-teräksissä yli 620 MPa. Keskellä oleva hiilikuitukangas mallinnettiin ohuina kaistoina, jotta hiilikuitu ei jäykistäisi palkkia liikaa ja pienentäisi taipumaa. Myös betonin puristuspuoleisen jännitykset saatiin tällä tavoin vastaamaan paremmin todellisuutta.



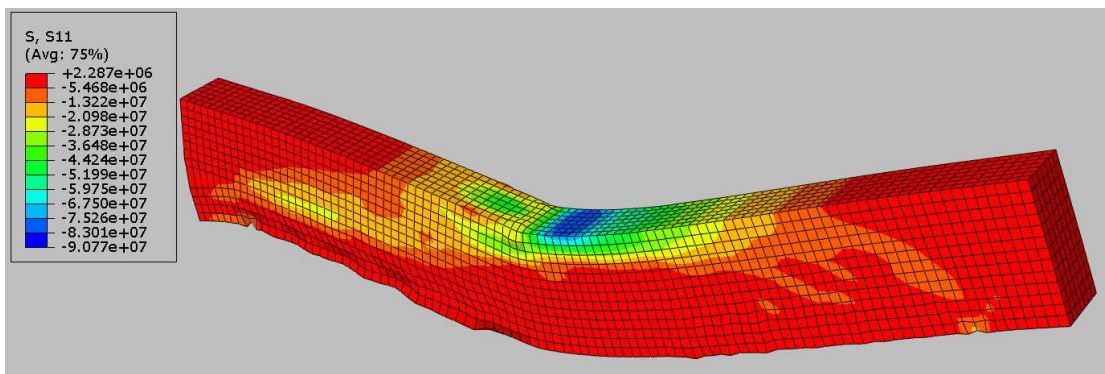
Kuvio 9. Korjatun palkin jännitykset, venymäliuskojen paikat kuva 18

Kuviosta 9 näkyy korjatun palkin jännitykset hiilikuidussa ja betonissa kuormituksen aikana. Betoniin asennettu venymäliuska sijaitsee leikkaushalkeaman kohdalla, mikä hieman suurentaa laskettua jännitystä. Hiilikuidun jännitykset ovat samaa suuruusluokkaa kuin Abaquksen antamat jännitykset.



Kuvio 10. Korjatun palkin murtokuvaja

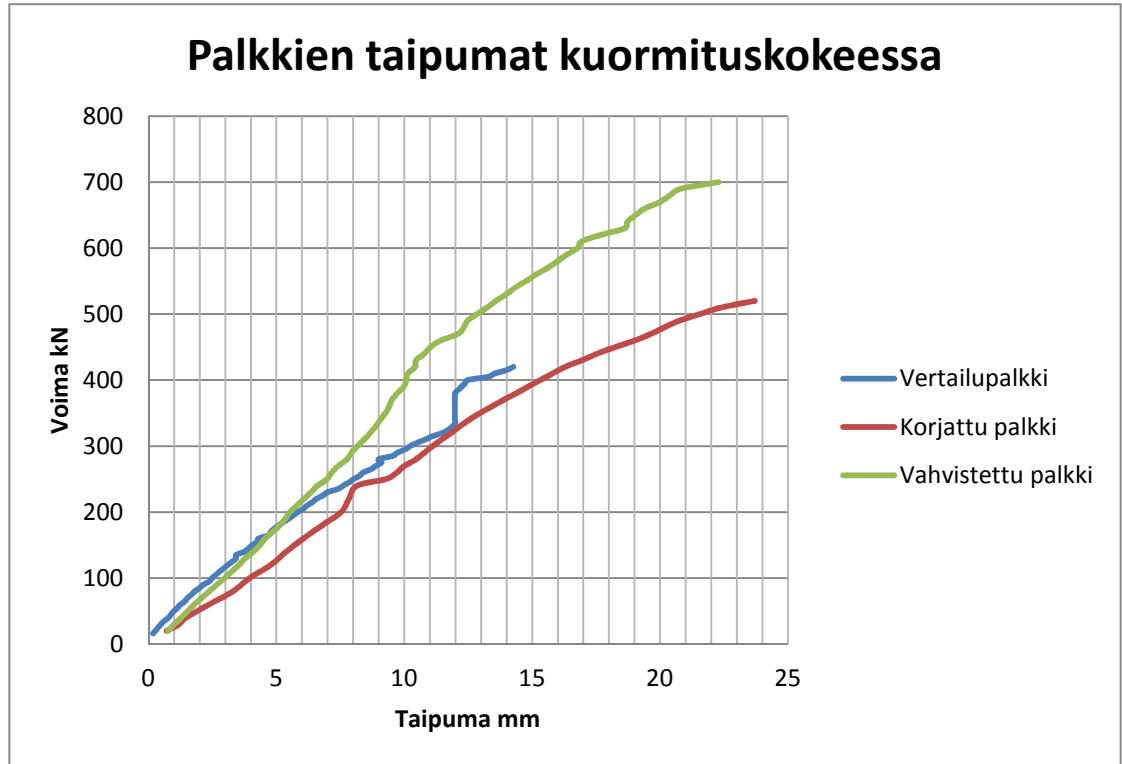
Myös korjatun palkin taipuma oli puristuskokeessa suurempi verrattuna Abaqus-ohjelman laskemaan taipumaan. Vertailupalkin taipuma murtohetkellä on lähes sama kuin korjatussa palkissa, mikä kertoo hiilikuidun soveltuvuudesta rikkoontuneiden palkkien korjaamiseen.



Kuva 40. Betonin maksimijännitykset Abaqus-ohjelmasta

Kuvasta 40 nähdään hiilikuitukankaan puristusvahvistuksen vaikutus palkkiin maksimikuormalla. Palkin puristusjännitykset (pituussuunnassa) ovat suurimmillaan piste-kuorman alla noin 90 MPa, kun betonin puristuskestävyys oli vain 58 MPa betonin

puristuskokeissa. Hiilikuitukangas pitää palkin puristuspinnan koossa estäen siten puristumurron. Kuvasta nähdään hiilikuitukankaan reunassa olevan 52 MPa puristusjännitys. Tässä kohdassa puristuskokeessa oli uutta betonia, jonka kestävyys ei luultavasti ollut näin suuri. Palkin murtuma tapahtui lopulta betonin puristumurtuna hiilikuitukankaan reunasta.



Kuvio 11. Palkkien taipumat

Kuviossa 11 nähdään kaikkien kolmen palkin taipumat voiman funktiona mitattuna digitaalisella mittakellolla. Mittakellolla saatiin tarkemmat taipumat palkeille kuin kuormituslaitteesta, koska kokeen aikana kuormituspöytä antaa hieman periksi ja kasvattaa samalla kokonaistaipumaa. Kuvasta näkee kuinka hiilikuitu jäykistää vahvistettua palkkia pienentäen näin taipumaa, tosin osa pienemmästä taipumasta selittyy sillä, että vahvistettua palkkia kuormitettiin kahdella pistekuormalla, mikä pienensi taivutusmomenttia ja siten myös taipumaa. Vertailupalkkia ja korjattua palkkia kuormitettiin yhdellä keskellä olevalla pistekuormalla. Korjatussa palkissa taipuma on lähes sama, kuin vertailupalkissa kuormituksen samassa vaiheessa.

4.2 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka hyvin hiilikuitukangas sopii teräsbetonipalkin leikkausvahvistamiseen. Opinnäytetyön edetessä päätettiin myös tutkia hiilikuidun käytettävyyttä puristusmurtuman ehkäisemisessä. Asiaa tutkittiin korjatun palkin koestuksessa sekä Abaqus FEA -ohjelmassa.

Hiilikuitukankangas soveltuu tehtyjen kokeiden perusteella erittäin hyvin teräsbetonipalkkien leikkausvahvistamiseen. Suhteellisen pienellä kerrospaksuudella saavutettiin 65 prosentin lisäys leikkauskapasiteettiin. Korjatussa palkissa todistettiin myös se, että kankaalla pystyy vahvistamaan palkkeja, joiden hakateräkset ovat menettäneet kestävyytensä. Kangas toimii palkin ulkoisena hakana, vaikuttaen leikkaushalkeaman muodostumiseen. Kankaan käyttö on helpointa ja tehokkainta silloin, kun se voidaan pyörittää palkin ympärille, jolloin ankkurointi on täydellinen ja koko hiilikuidun vetokapasiteetti saadaan hyödynnettyä. T-poikkileikkauksilla tehdään kolmisivuinen vahvistus, jossa kangas pitää ankkuroida mekaanisesti, esimerkiksi pulttiankkuroinnilla, palkin puristusvyöhykkeelle.

Palkkikokeissa ei saatu palkkeihin täydellistä leikkaushalkeaman suuntaista murtoa, johtuen mahdollisesti palkin lyhyestä jännevälistä ja mataluudesta. Korkeammalla palkilla leikkaushalkeama olisi ollut leveämpi ja teräshakaset olisivat venyneet enemmän ja ehkä katkenneet. Tehdyissä kokeissa hakasissa näkyi pientä kuroutumista kapean leikkaushalkeaman tähden. Myös vahvistetuissa palkeissa lisäkorkeus olisi mahdollistanut hiilikuidun murtumisen. Murtuma tapahtui taiputusleikkausmurtumana, joka on sivun 14 mukaisesti yksi leikkausmurtuman tyypeistä. Tässä halkeamat kasvavat vetovyöhykkeeltä kohti puristusvyöhykettä, jossa lopullinen murtuma tapahtuu betonin murskaantumisena.

Vahvistetuissa palkeissa hiilikuitukangas muutti selvästi leikkaushalkeaman suuntaa. Kun halkeama saavutti kankaan reunan, nousi halkeama ylös useita senttejä reunaa pitkin ja jatkoi sitten kankaan toiselta puolelta kaltevasti kohti seuraavaa vahvistuskaistaa. Sivun 15 mukaisesti halkeaman syntyessä hiilikuidun jännitys kasvaa suuresti ja samalla halkeaman muodostuminen hidastuu kankaan vaikutuksesta. Halkeamaleveys oli selvästi pienempi vahvistetuissa palkeissa kuin vertailupalkissa.

Leikkaushalkeman kulman arvio laskuvaiheessa vaikutti siihen, miksi euronormien mukaisesti lasketut leikkauskestävyydet olivat palkkikokeista saatuihin tuloksiin verrattuna selvästi pienemmät. Laskuissa kulmana käytettiin 35°:ta, mutta koestuksissa kulmaksi muodostui kuitenkin 22°-30°:n kulma. Täljsten ym. (2011) mukaan kulma on 30-60°:n välillä (sivu 13). Leikkausmurtuminen ja sen syntyminen on teorian mukaisesti monimutkainen ilmiö, joka osaksi myös vaikuttaa laskennan epätarkkuuteen.

Hiilikuitukangasta käytettiin korjatun palkin yhteydessä onnistuneesti myös puristusvyöhykkeen vahvistamiseen. Puristusvyöhykettä vahvistettiin kierittämällä kangasta tiukasti palkin ympärille 300 mm pistekuorman molemmin puolin. Tällöin betoni pistekuorman sivuilta ei päässyt paisumaan kankaan pitäessä palkkia tiukasti koossa estäen betonin laajenemisen puristumurtolujuutta lähestyttäessä. Vahvistuksella saavutettiin 24 %:n vahvistus puristumurtoa vastaan, vaikka korjatun palkin betoni oli osin valmiiksi halkeillutta ja korjatusta kohdasta vain 2,5 viikkoa kuivunutta kokeistustiloissa olevien kiireiden vuoksi. Sama vahvistusvaikutus saatiin todistettua myös Abaqus-ohjelmalla. Ohjelmassa betonin puristusjäännitys palkin pituussunnassa kasvoi hiilikuidun alla reilusti betonin puristuslujuutta suuremmaksi kuvan 40 mukaisesti.

Hiilikuitukangas on monipuolinen, kevyt ja helppo keino vahvistaa teräsbetonipalkkeja leikkausmurtoa vastaan ja sen asennus on yksinkertaista. Asennusvaihe pitää suorittaa huolella, jotta saavutetaan luja ja kestävä lopputulos. Kankaan pinta voidaan päällystää vahvistamisen yhteydessä ripottelemalla kvartsihiekkaa tuoreelle liimapinnalle. Tämä lisää vahvistuksen kulutuskestävyyttä ja parantaa jälkeinpäin asennettavan päällysteen tartuntaa. Asennuksessa on otettava huomioon työturvallisuus, koska käsiteltävät aineet ovat terveydelle haitallisia. Asennuksessa on tärkeää käyttää suojakäsineitä ja hengityssuojaimia, koska asennuksen aikana joutuu kosketuksiin liima-aineiden kanssa. Vaikka hiilikuitu on materiaalina kallis, on leikkausvahvistaminen sillä suhteellisen halpa vaihtoehto, koska työaikaa ja materiaalia kuluu vähän, eikä massiivista korjaushanketta vahvistusprosessiin tarvita. Käyttökohteita hiilikuitukankaalla on rajattomasti. Vanhojen rakenteiden, kuten siltojen, korjausvelka kasvaa Suomessa vuosi vuodelta. Nykyaikana myös suurentuneet kuormat siltarakenteille vaativat vahvistustoimenpiteitä, ja tällaisiin kohteisiin hiilikuituvahvistaminen olisi oiva keino.

LÄHTEET

Hollaway, L.C. & Leeming, M.B. 1999. *Strengthening of reinforced concrete structures: Using externally-bonded FRP composites in structural and civil engineering*. 1. painos. Abington Cambridge: Woodhead Publishing.

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

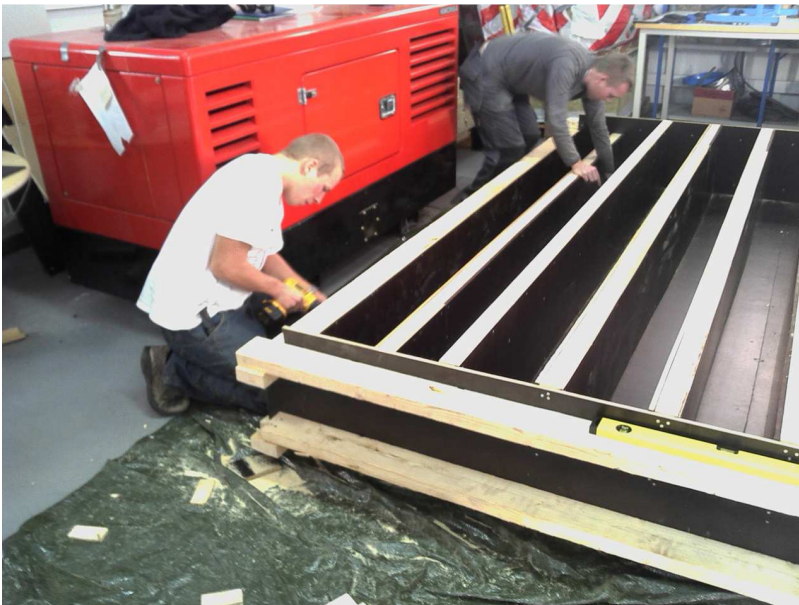
Täljsten, B., Blanksvärd, T. & Sas, G. 2011. *Handbok för dimensionering och utförande i samband med förstärkning av betongkonstruktioner med pålimmade fiberkompositer*. 1. painos. Luleå: Luleå Tekniska Universitet.

Palkkien valmistus

Muottien valmistus

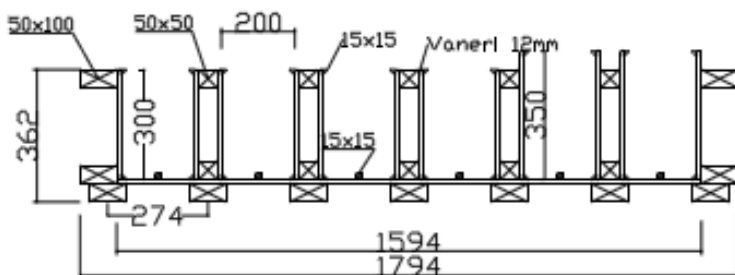
Muotit suunniteltiin ja rakennettiin betonipalkkeja varten koulun laboratoriotiloissa. Samaan aikaan Savonia-ammattikorkeakoulussa tehtävien kahden muun opinnäytetyön vuoksi muotista tehtiin tarpeeksi iso, jotta kaikki palkit mahtuisivat samaan muottiin. Jokaiseen opinnäytetyöhön tarvittiin kaksi teräsbetonipalkkia, joten valumuotit suunniteltiin kuudelle palkille.

Muotin pohjan runko koostui 100*50 puutavarasta. Rungon päälle asetettiin 12 mm:n paksuiset filmipintaiset vanerilevyt. Levyjen päälle ruuvattiin 50*50 runkoiset välilevyt ja ulkokierto tehtiin 50*100 puutavarasta tukemaan sivuttaisia paineita.



Muotin valmistaminen. Kuva Ville Kantola 2011

B-B



Muottipiirustus. Kuva Toni Hyttinen 2011

Raudoitus

Palkkien raudoitus tehtiin erillisenä raudoitushäkinä työtasojen päällä, josta raudoitukset oli helppo nostaa muotteihin. Myös myöhemmässä vaiheessa asennettavat venymäliuskat oli helppo asentaa teräksiin, kun muottirakenteet eivät olleet tiellä.

Raudoittaminen aloitettiin hakaterästen taivutuksella käsikäyttöisellä harjateräksen taivuttimella. Hakaraudoitus koostui 6 ja 8 mm:n haosta. Koska leikkaushalkeama haluttiin ohjata vain palkin toiseen päähän, tuli vahvempaan päähän 8 mm:n haat 100 mm:n välein, kun taas heikommassa päässä 6 mm:n haat sijaitsivat 200 mm:n välein.

12 mm:n puristusteräokset leikattiin oikeaan mittaan ja ne nostettiin ilmaan päistään tuettuina. Seuraavaksi hakateräokset pujotettiin paikalleen. Tämän jälkeen leikattiin 6 kappaletta 20 mm:n pääteräksiä ja pujotettiin ne hakojen sisään. Sen jälkeen teräokset sidottiin toisiinsa oikeille kohdille. Viimeisenä taivutettiin 10 mm:n teräksestä ankkurointilenkit raudoitehäkin molempiin päihin sekä 2 kappaletta nostolenkkejä palkkia kohden.



Raudoitushäkkien valmistus. Kuva Henna Intke 2011

Palkkien valaminen

Ennen palkkien valua valmiit raudoitushäkit nostettiin muotteihin muovisten korokepalojen päälle, jotta teräkset olisivat palkin sisällä oikeassa korossa. Muotti tuettiin päältäpäin muutamilla tukilaudoilla, jotka estivät palkkien välisen muotin rungon liikkeen sivusuunnassa.

Betoni (C28/35) tilattiin valmiina betoniasemalta, ja se tuotiin paikan päälle kouruautolla. Kourusta massa siirrettiin suurilla astioilla kantaen muotteille, koska autoa ei saatu tarpeeksi lähelle muotteja laboratoriotilojen ahtauden vuoksi.

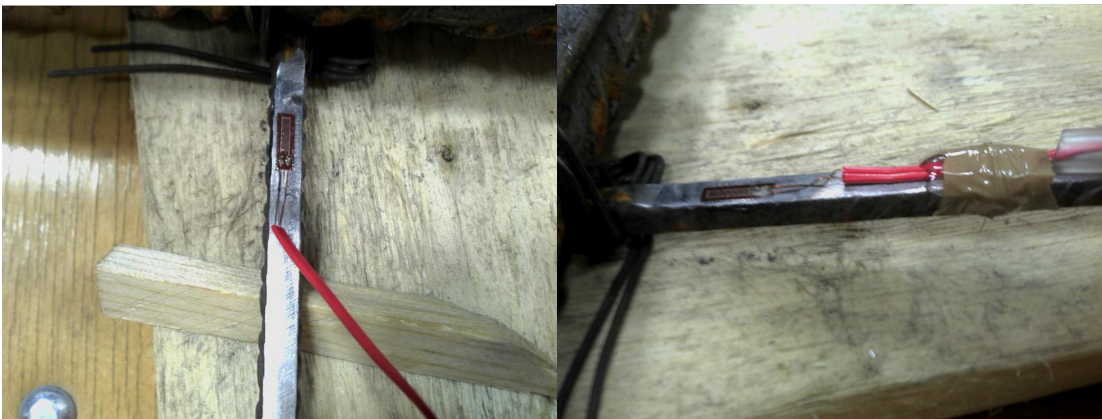


Palkkien valu. Kuva Eemeli Lehmusoksa 2011

Betonin tiivistäminen sauvatäryttimellä aloitettiin heti muottien täytön yhteydessä. Tiivistys tehtiin huolella, koska palkkien pääteräkset sijaitsivat lähellä toisiaan. Huolellisella tiivistyksellä haluttiin varmistaa, että massa menee myös palkkien alareunaan. Valun yhteydessä massaa otettiin myös lieriömuotteihin, jotta saatiin selvitettyä betonin todellinen kuutiolujuus myöhemmin tehtävissä puristustesteissä.

Venymäliuskojen asennus ja kytkentä

Ennen betonointia hakateräksiin asennettiin venymäliuskat. Aluksi teräs, johon liuska asennettiin, hiottiin asennuspinta tasaiseksi. Samalla saatiin mahdollinen ruoste poistettua. Sen jälkeen pinta puhdistettiin alkoholipohjaisella rasvanpoistoaineella kaikkien epäpuhtauksien poistamiseksi. Puhdistuksen jälkeen liuska liimattiin tipalla (0.05 ml) liimaa hakateräksen pintaan. Liuskaa painettiin muovinpalasta apuna käyttäen noin 60 sekunnin ajan, jolla tartunta varmistettiin. Liiman annettiin kuivua yksi tunti ja sen jälkeen liuskan päälle siveltiin rasvaa betonin hankauskitkan estämiseksi. Johtoon tehtiin vedonpoisto kuumaliimaa apuna käyttäen ja sen jälkeen se asetettiin suojaputken sisälle, ettei se vaurioitu betonoinnin aikana. Rasvan päälle levitettiin vielä silikonikerros, joka peitti koko alueen, ettei vesi pääsisi liuskan kanssa kosketuksiin.



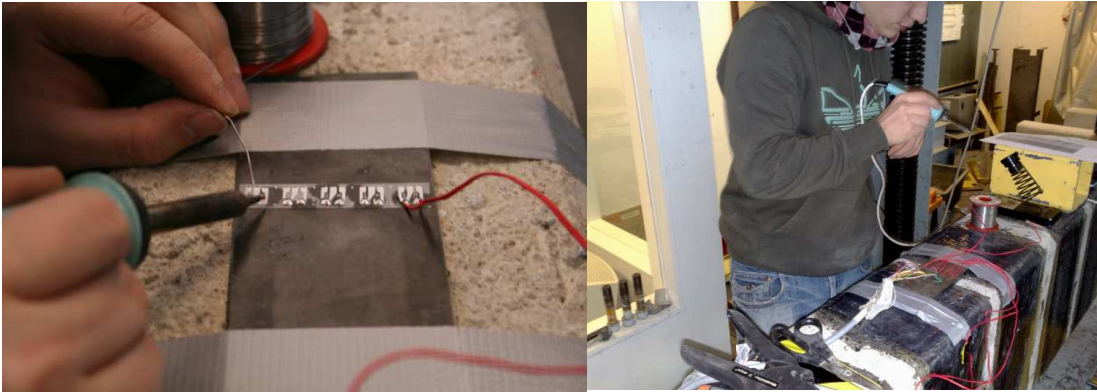
Venymäliuskojen asennus. Kuva Ville Kantola 2011

Venymäliuskojen asennus hiilikuidun ja betonin pintaan tapahtui samoja välivaiheita noudattaen. Liuskan suojaus voitiin jättää pois, koska asennus tapahtui valmiin palkin kylkeen ja siihen ei kohdistunut ulkopuolisia rasituksia, kuten kosteutta. Seuraavassa on kuva liuskasta sekä kokeistamattomassa että kokeistetussa pinnassa.



Venymäliuskat betonin pinnassa. Kuva Ville Kantola 2011

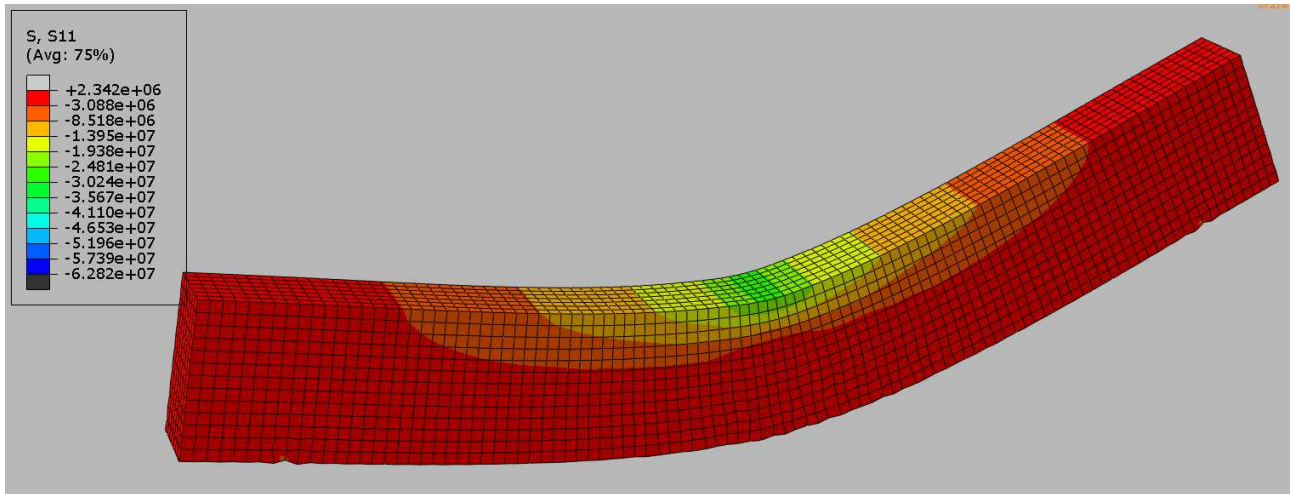
Ennen palkkien puristuskokeita kaikki palkkiin asennetut venymäliuskat kolvattiin kiinni pieneen piirilevyyn. Piirilevy kytkettiin johdoilla tietokoneeseen, johon venymäliuskoilta saatava tieto tallennettiin palkkien puristuskokeissa.



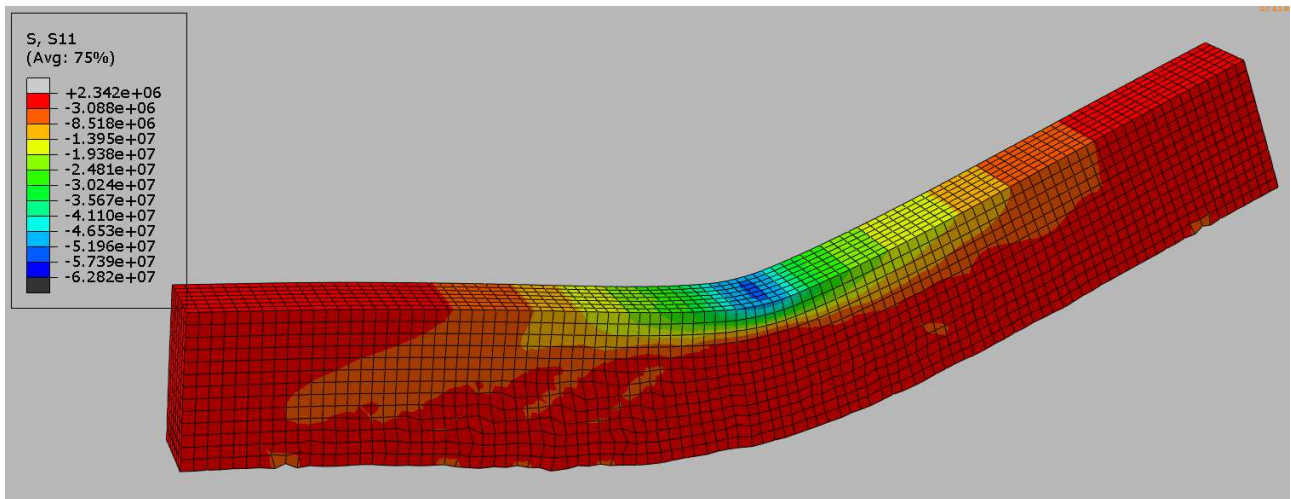
Venymäliuskojen kytkentä piirilevyyn. Kuva Tommi Auvinen 2011

Abaqus-ohjelman tulokset vertailupalkista

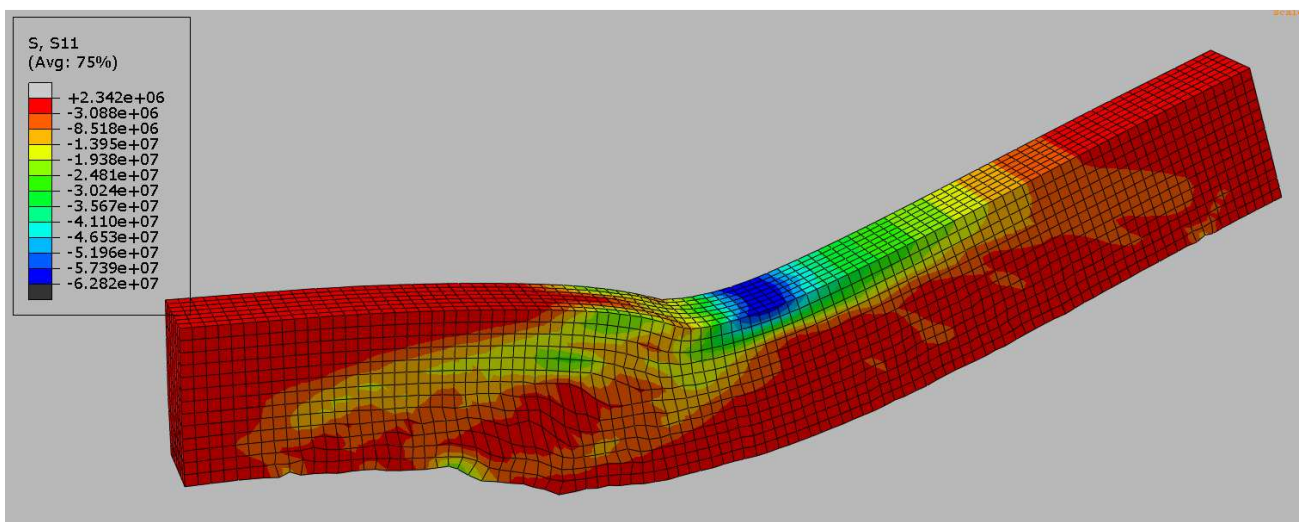
Vertailupalkin murtokuorma oli 422 kN



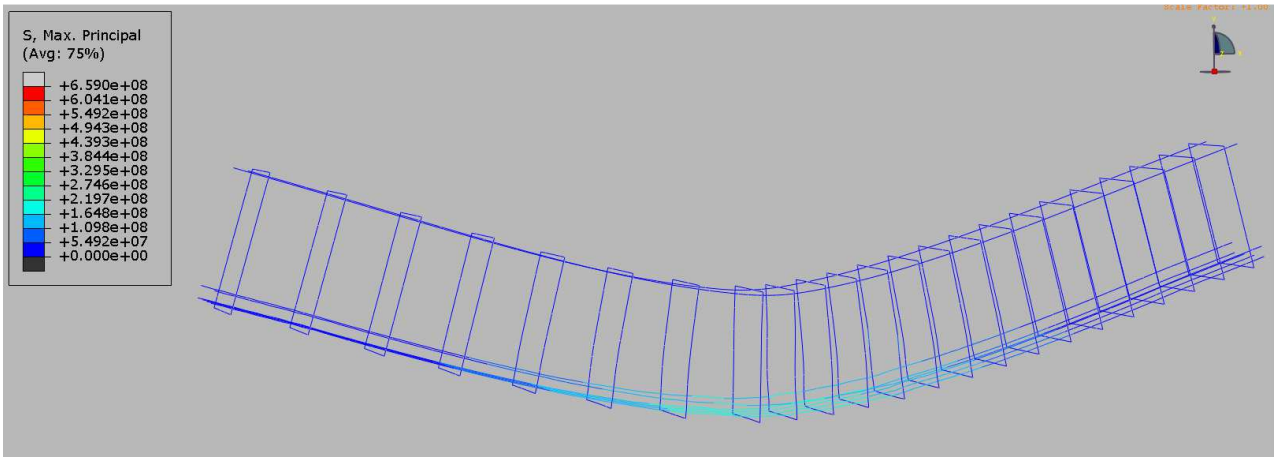
Betonin jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



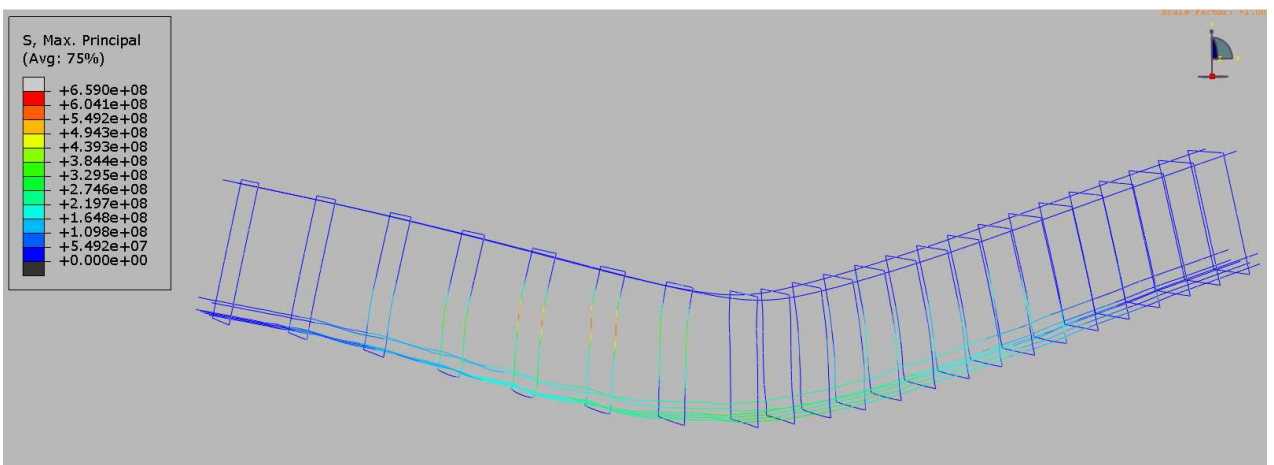
Betonin jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



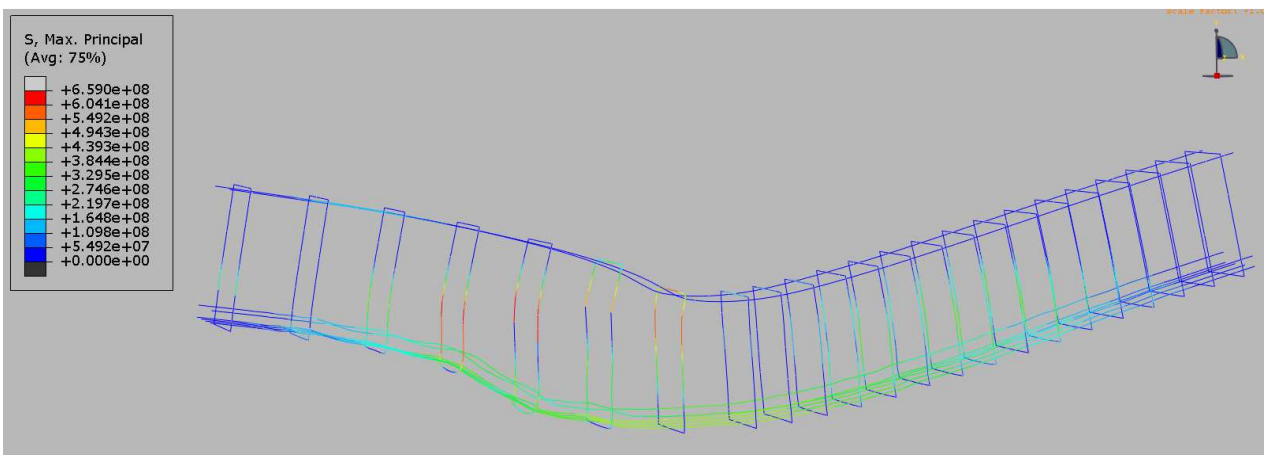
Betonin jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella (murtokuorma)



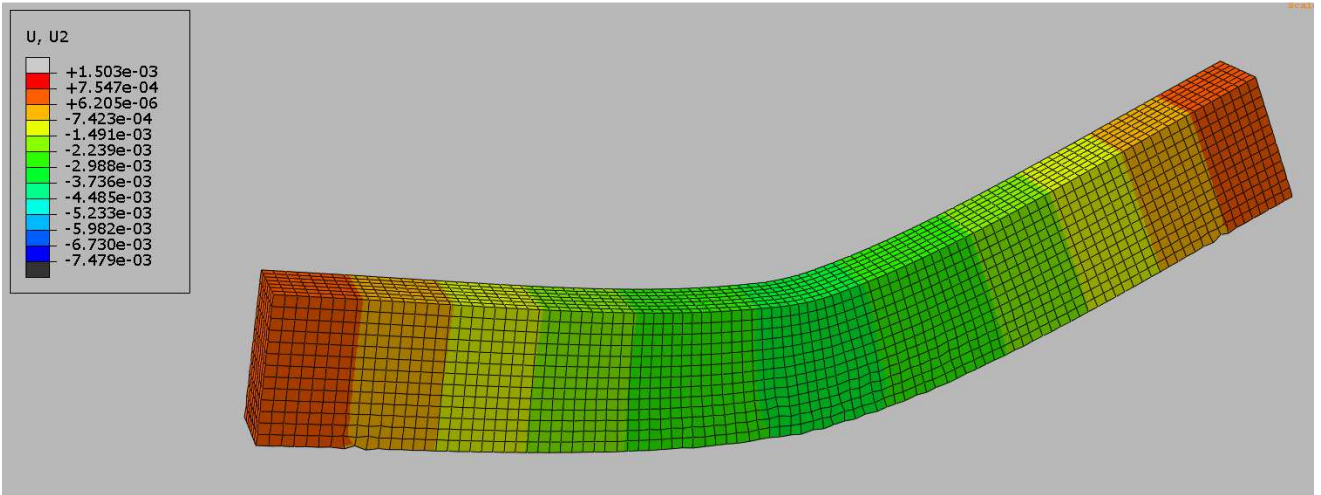
Terästen jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



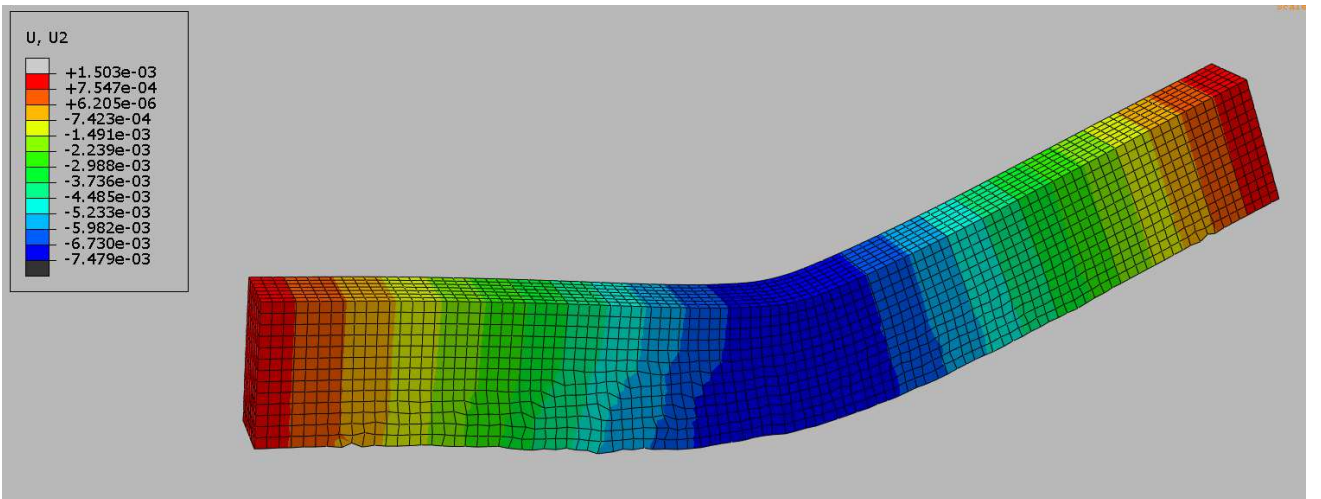
Terästen jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



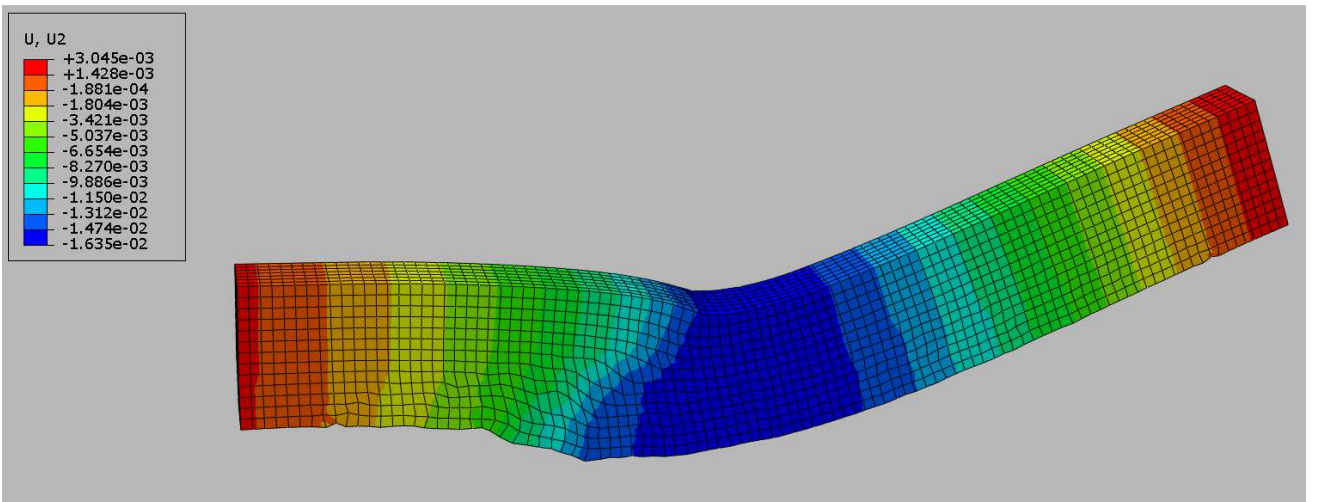
Terästen jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella



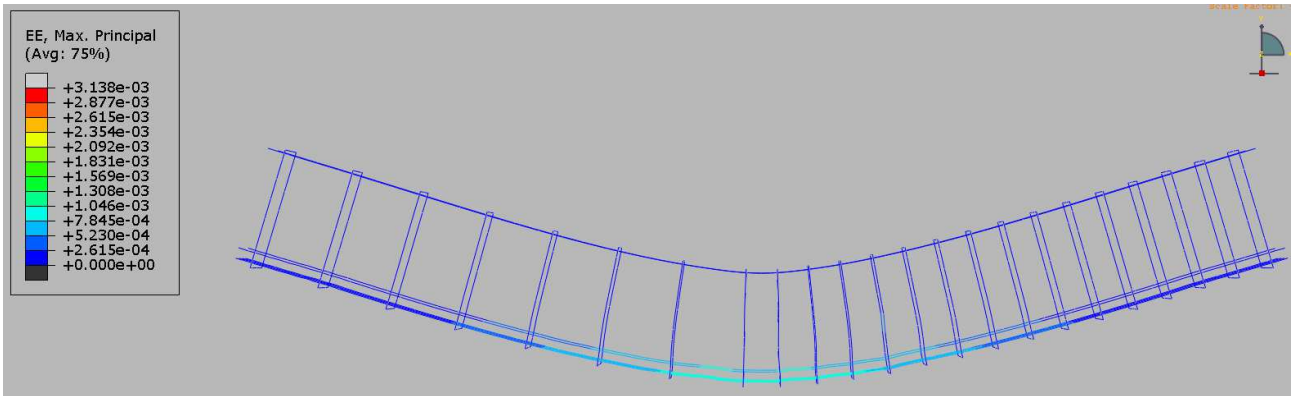
Palkin taipuma (m) 50 % kuormituksella



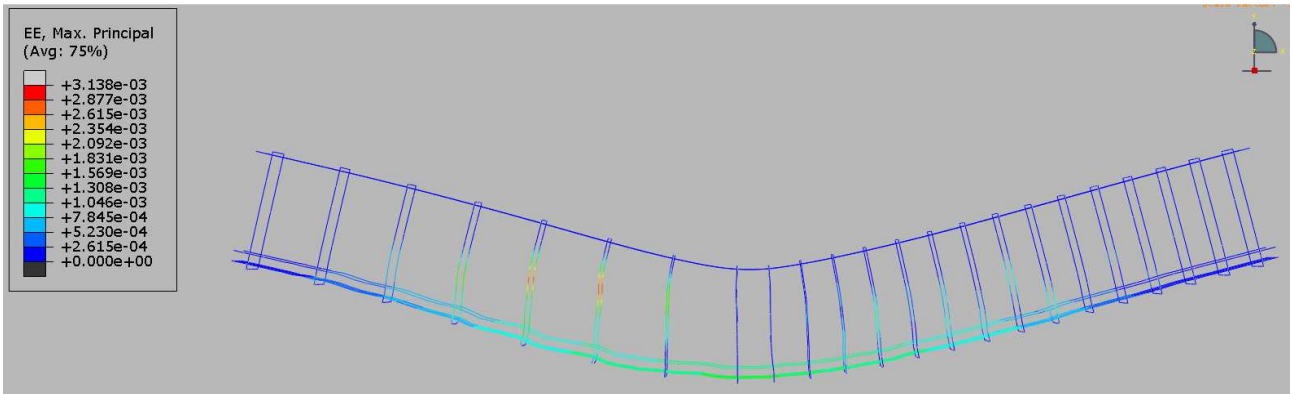
Palkin taipuma (m) 75 % kuormituksella



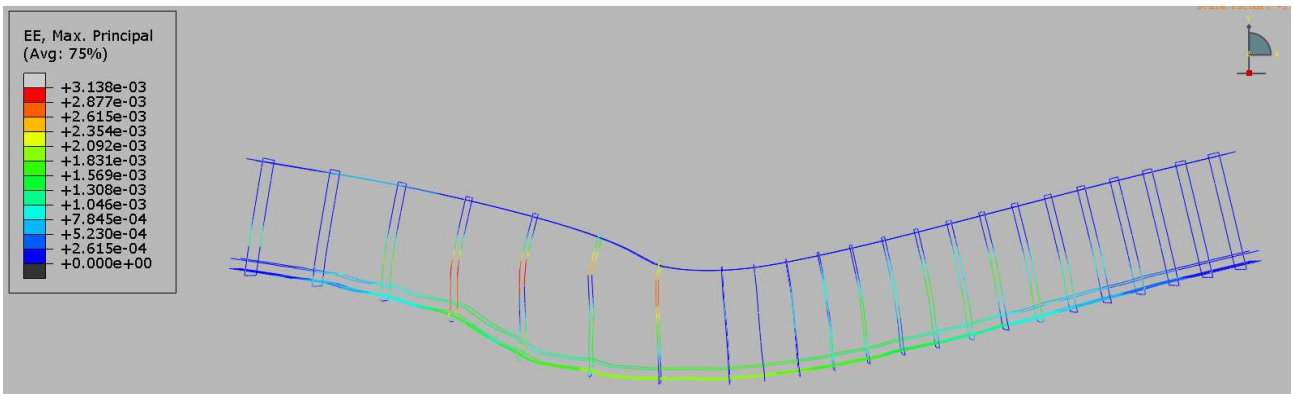
Palkin taipuma (m) 100 % kuormituksella



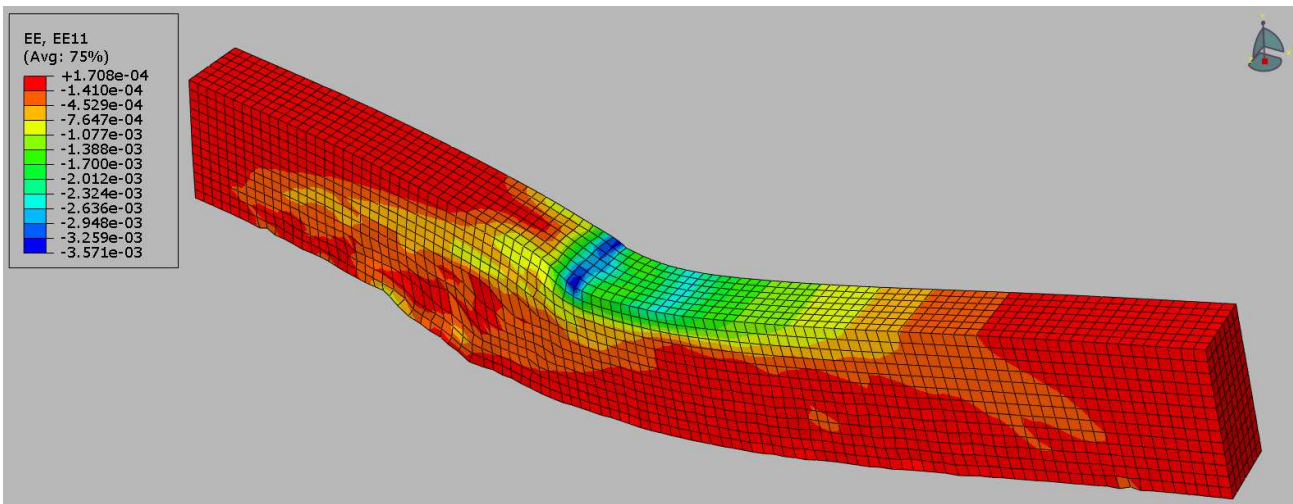
Terästen venymä (m) 50 % kuormituksella



Terästen venymä (m) 75 % kuormituksella



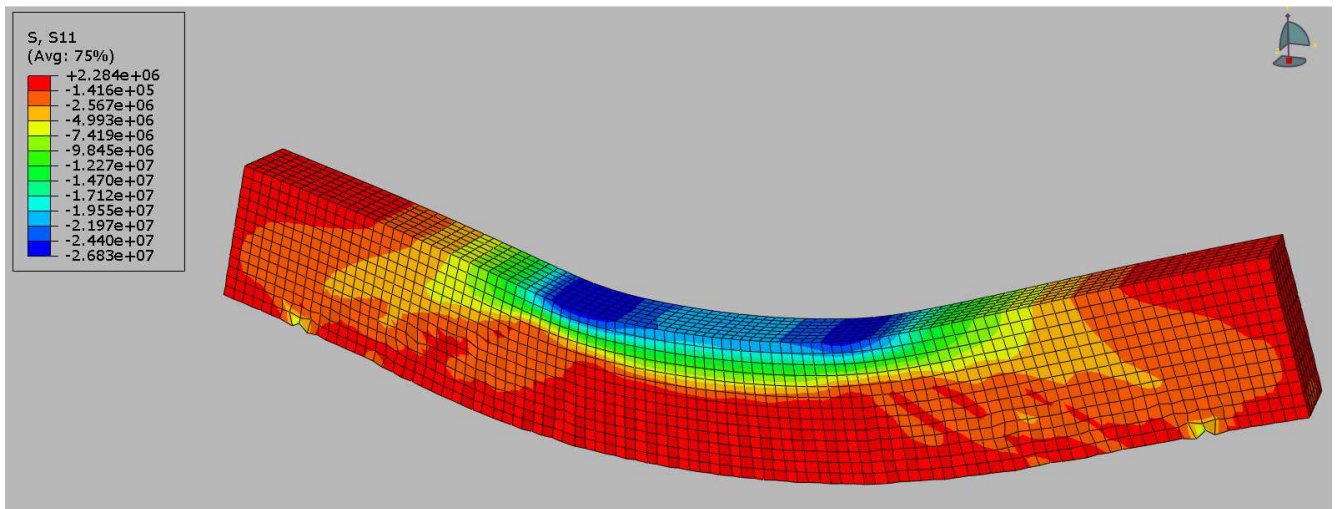
Terästen venymä (m) 100 % kuormituksella



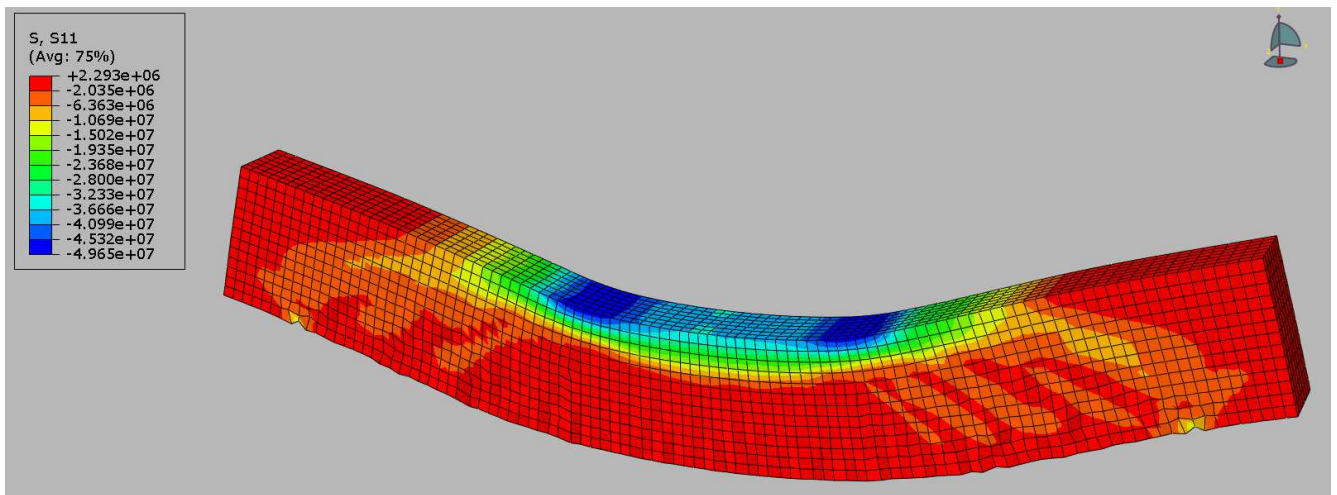
Betonin muodonmuutokset (m) 100 % kuormituksella

Abaqus-ohjelman tulokset vahvistetusta palkista

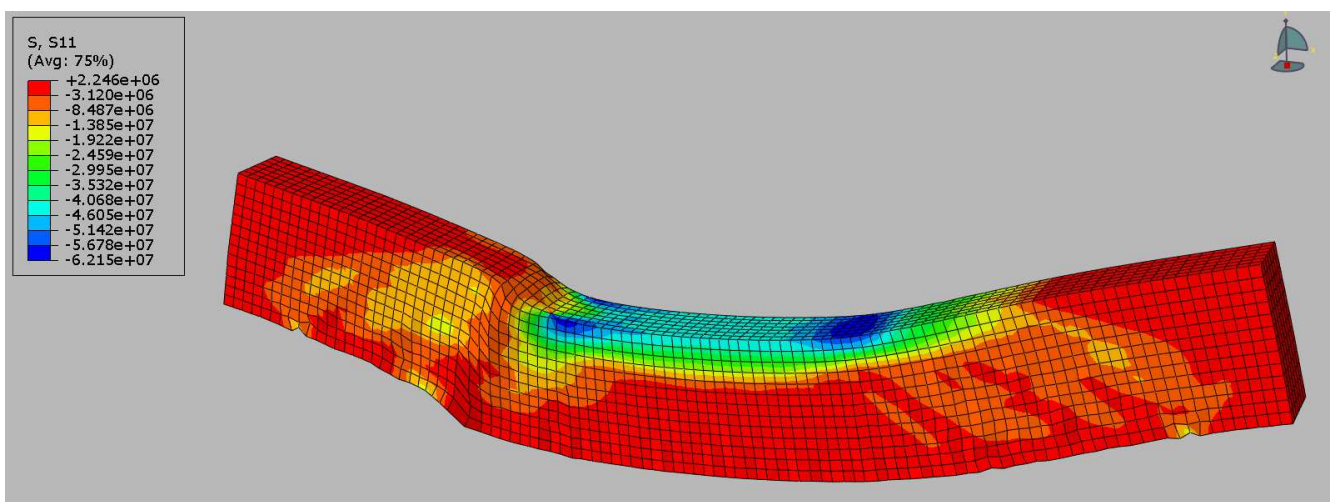
Vahvistetun palkin murtokuorma oli 700 kN



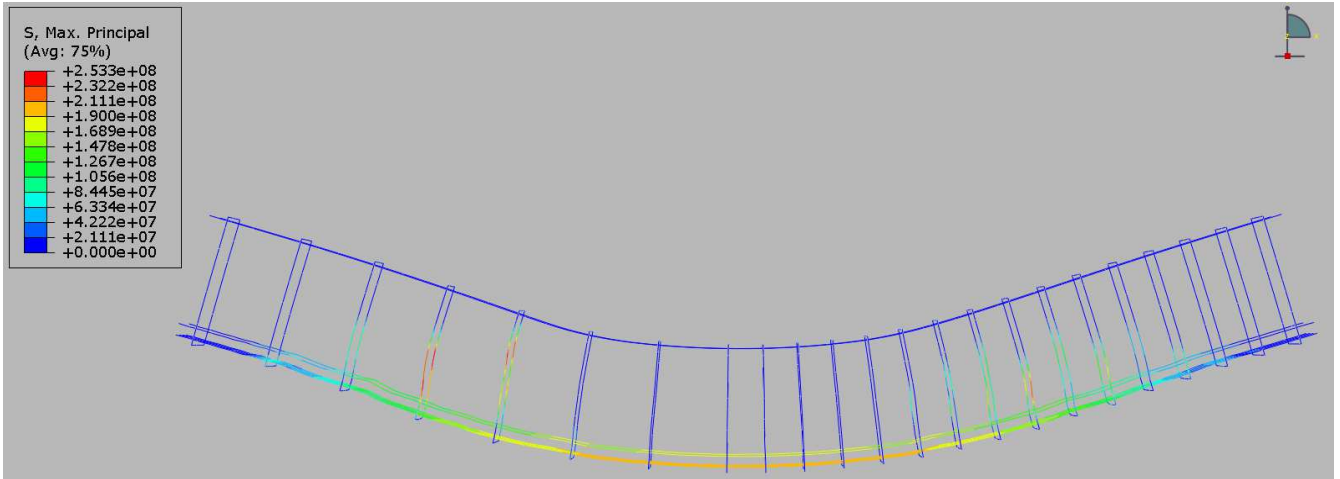
Betonin jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



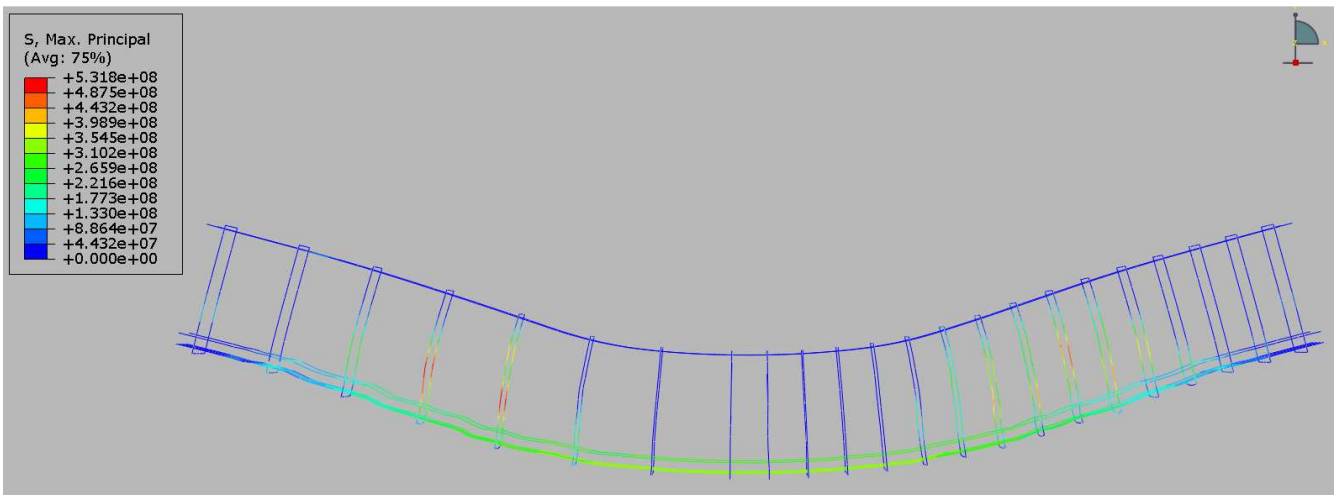
Betonin jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



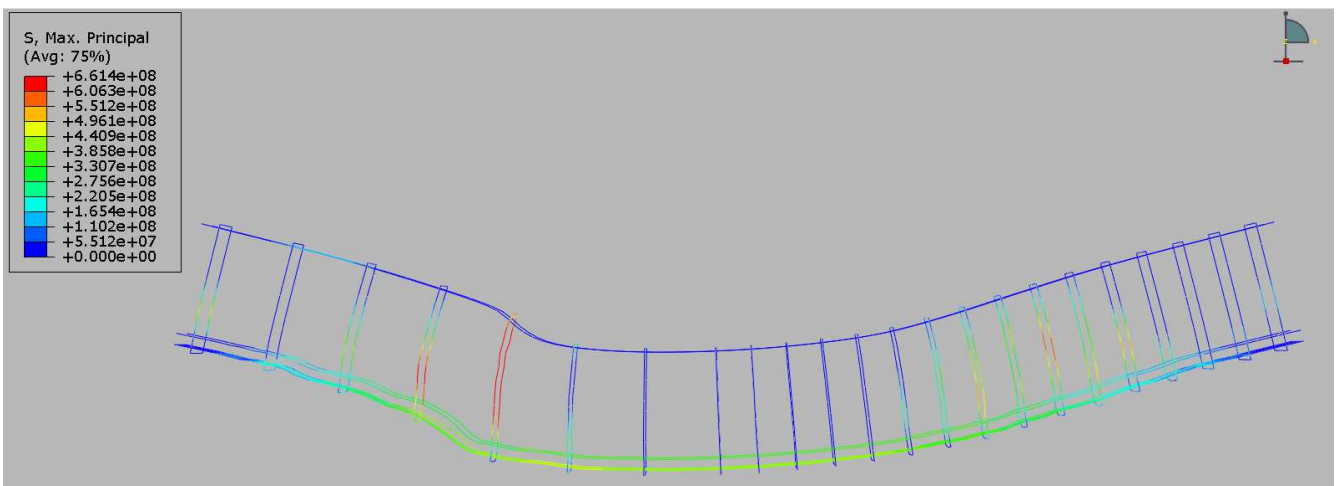
Betonin jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella.



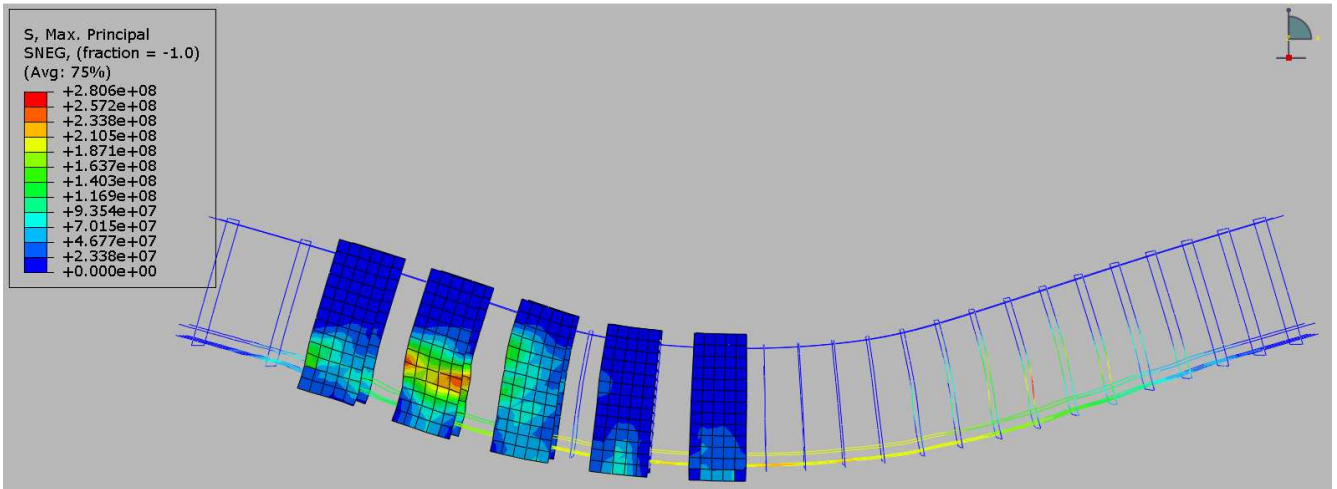
Terästen jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



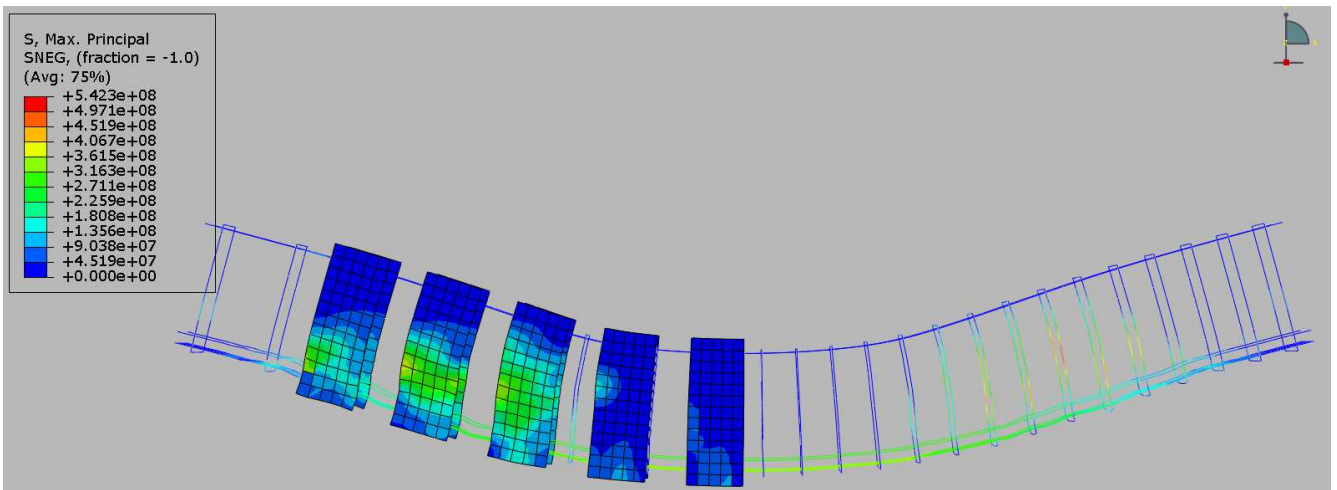
Terästen jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



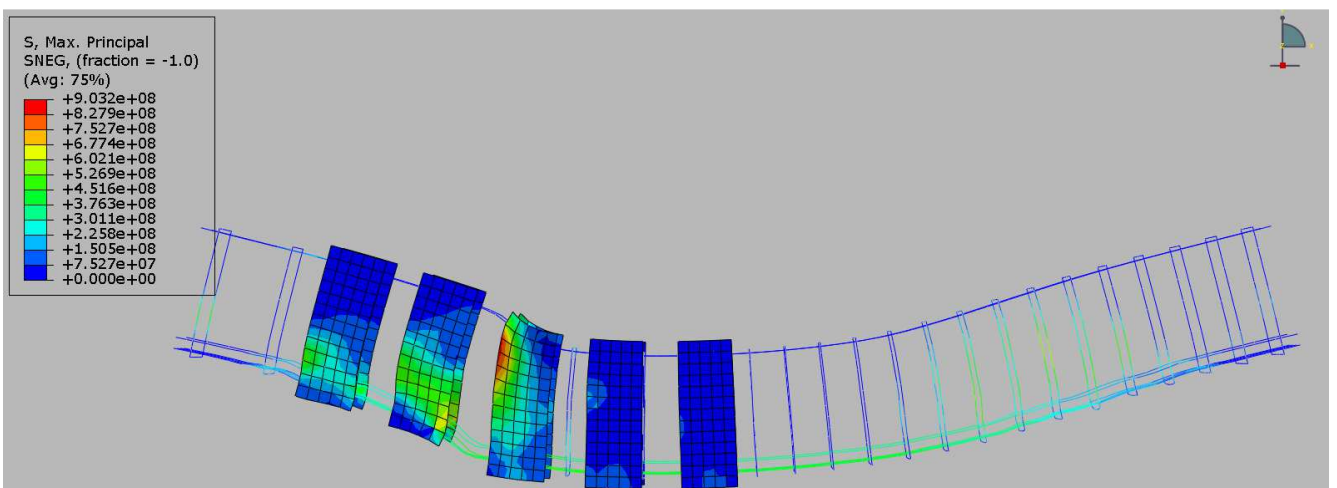
Terästen jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella.



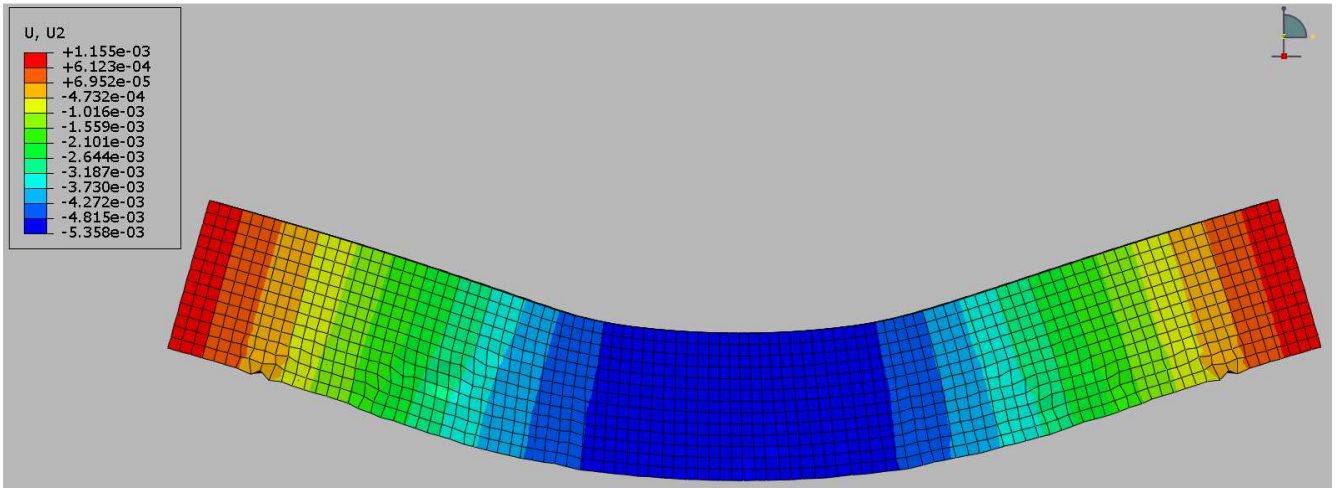
Hiilikuidun jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



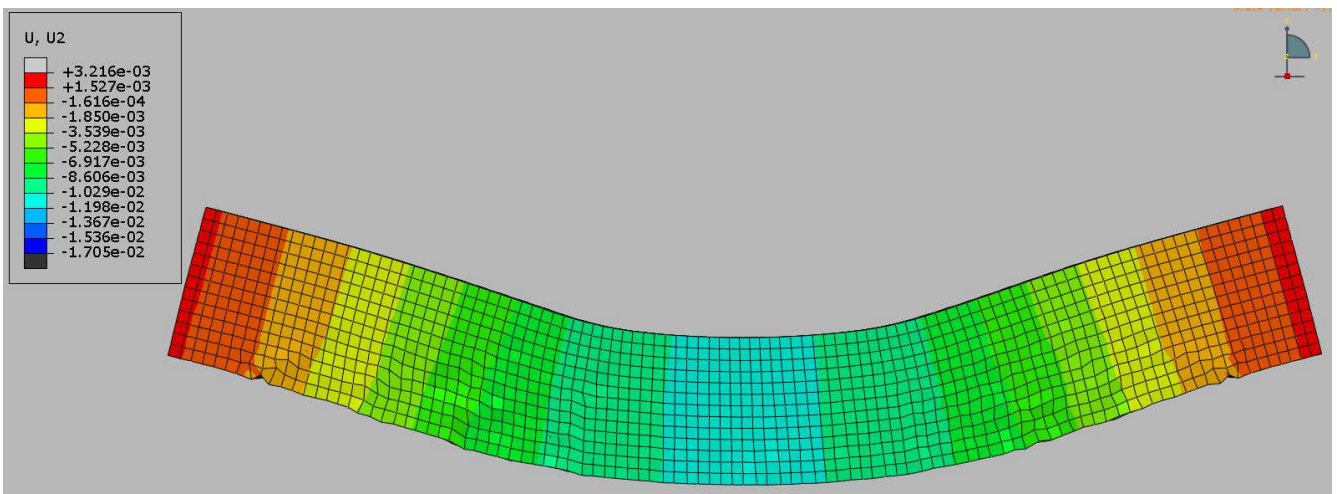
Hiilikuidun jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



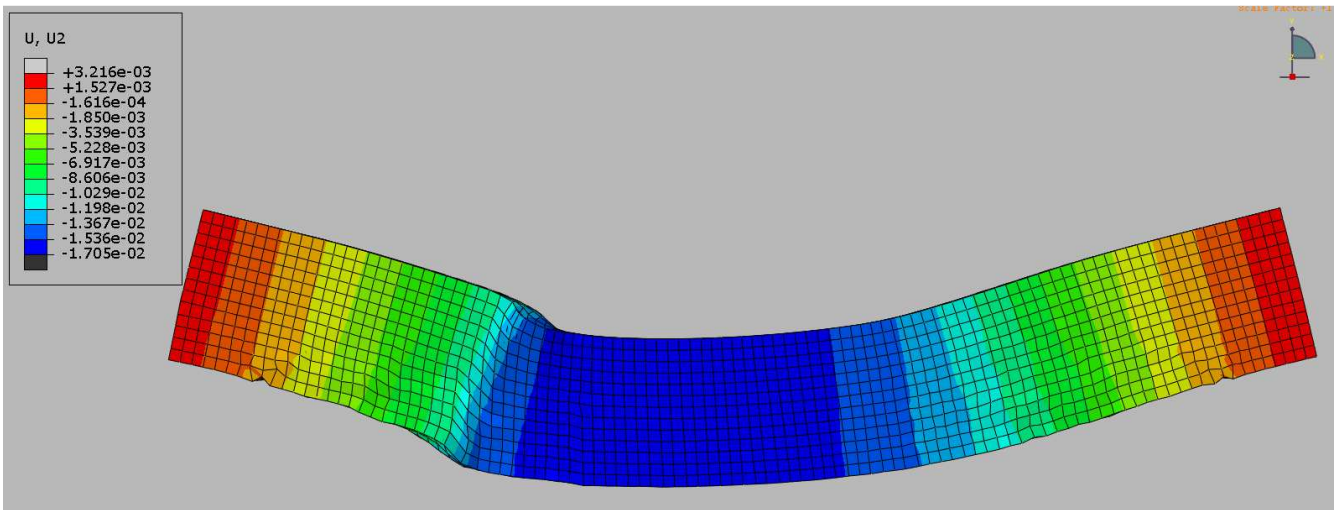
Hiilikuidun jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella



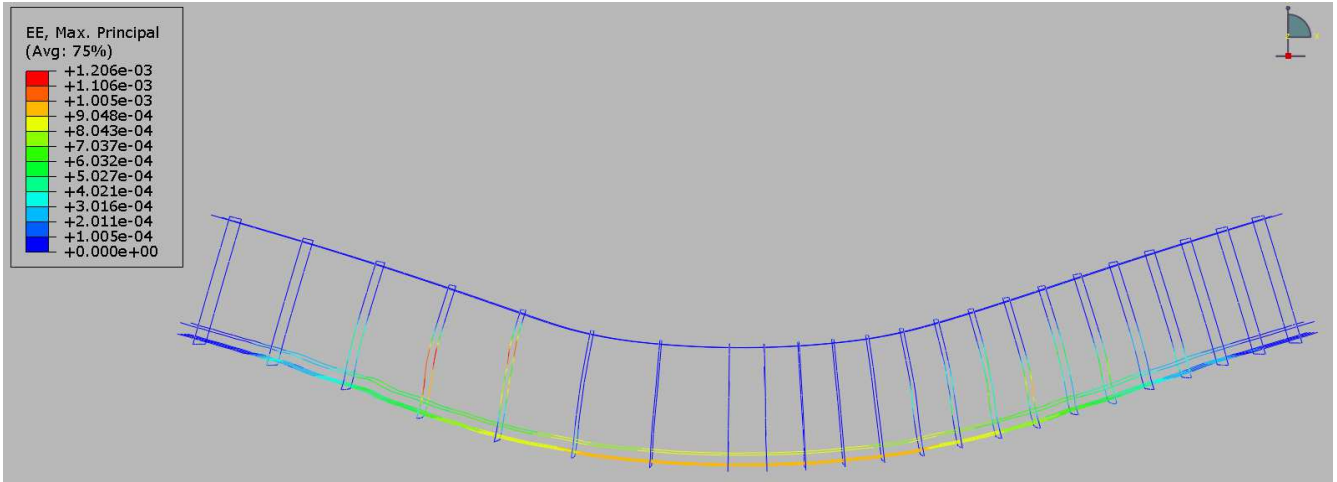
Palkin taipuma (m) 50 % kuormituksella



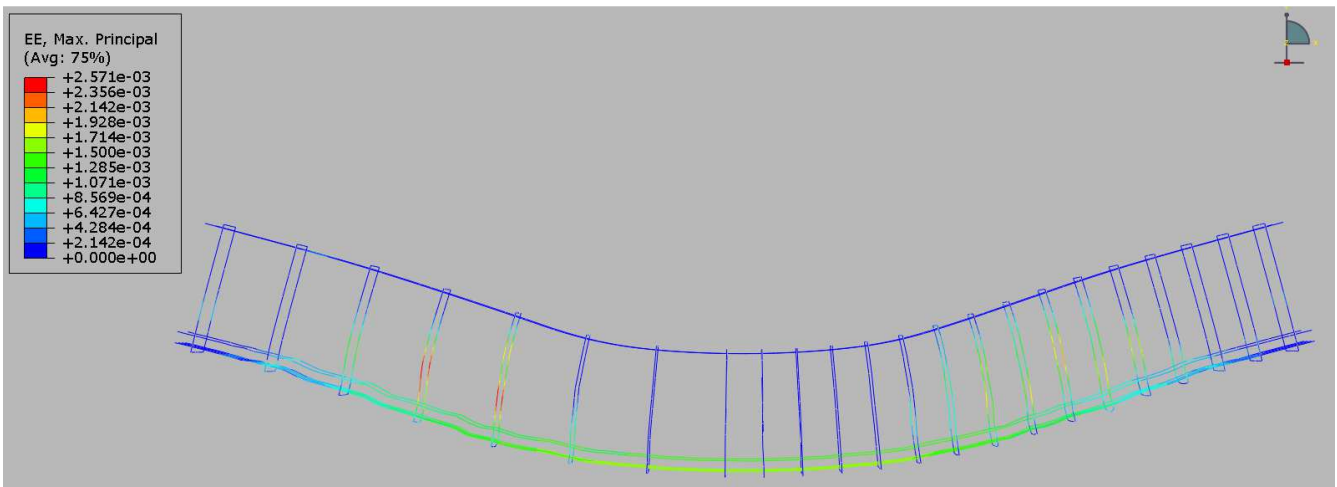
Palkin taipuma (m) 75 % kuormituksella



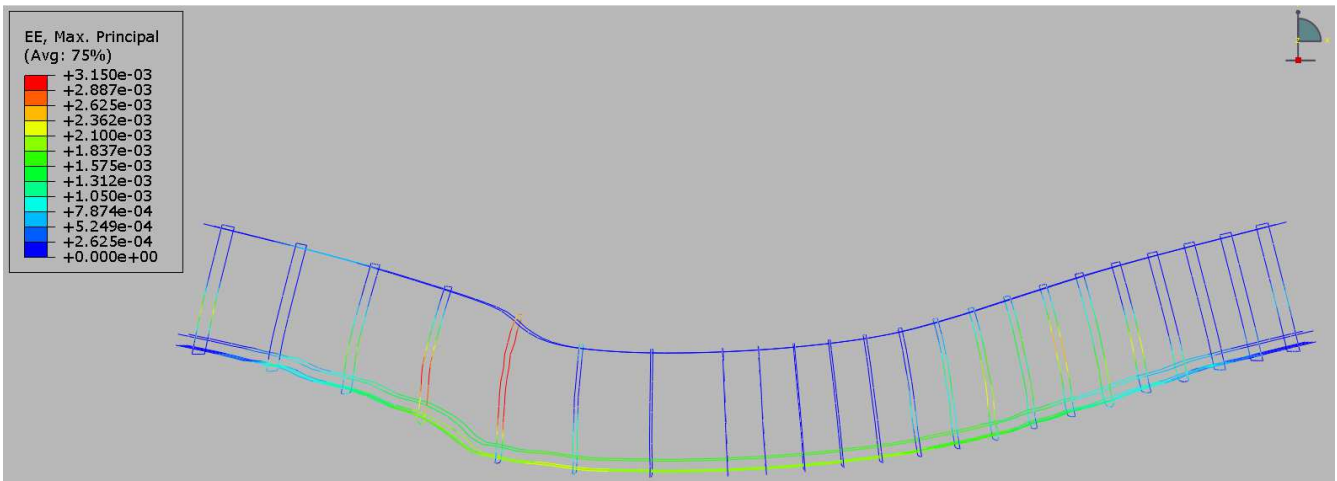
Palkin taipuma (m) 100 % kuormituksella



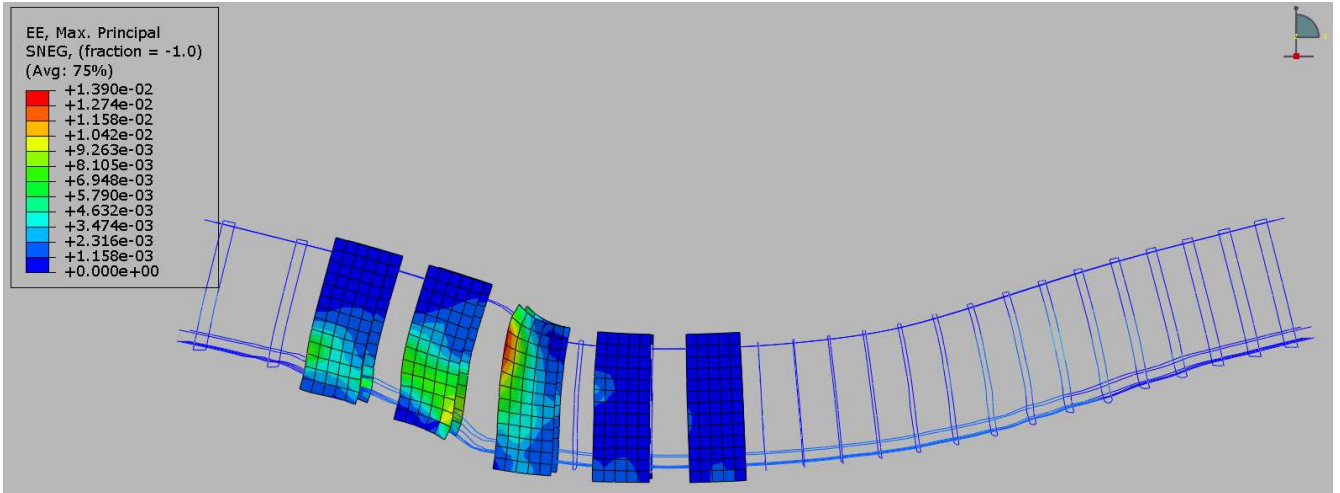
Terästen venymä (m) 50 % kuormituksella



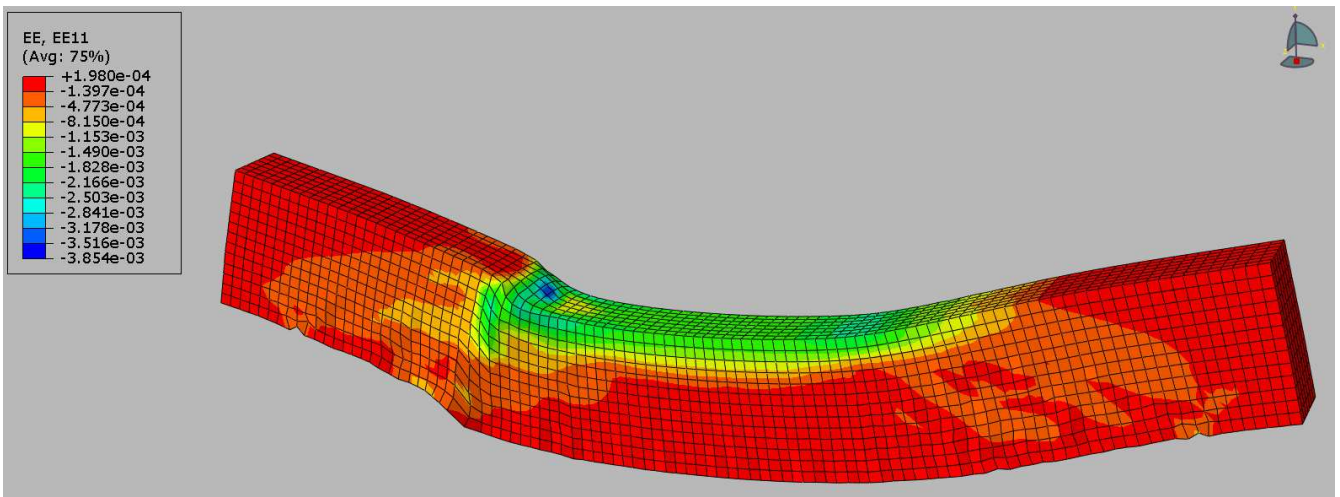
Terästen venymä (m) 75 % kuormituksella



Terästen venymä (m) 100 % kuormituksella



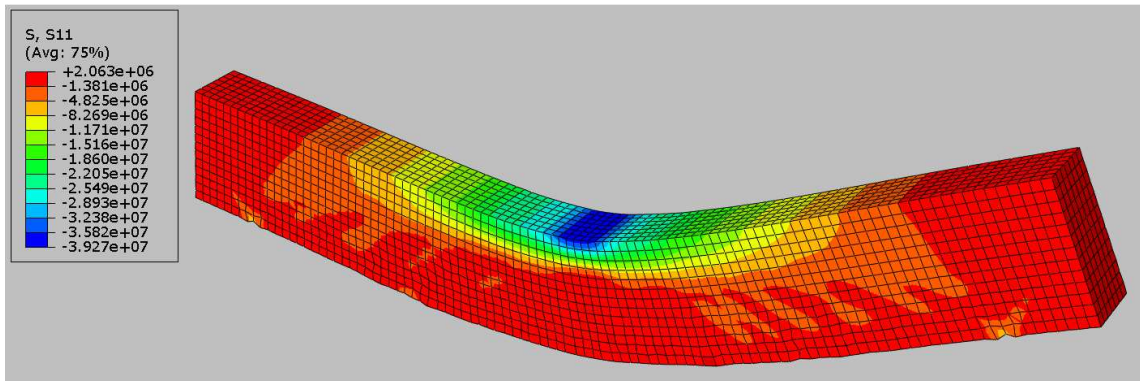
Hiilikuidun venymä (m) 100 % kuormituksella



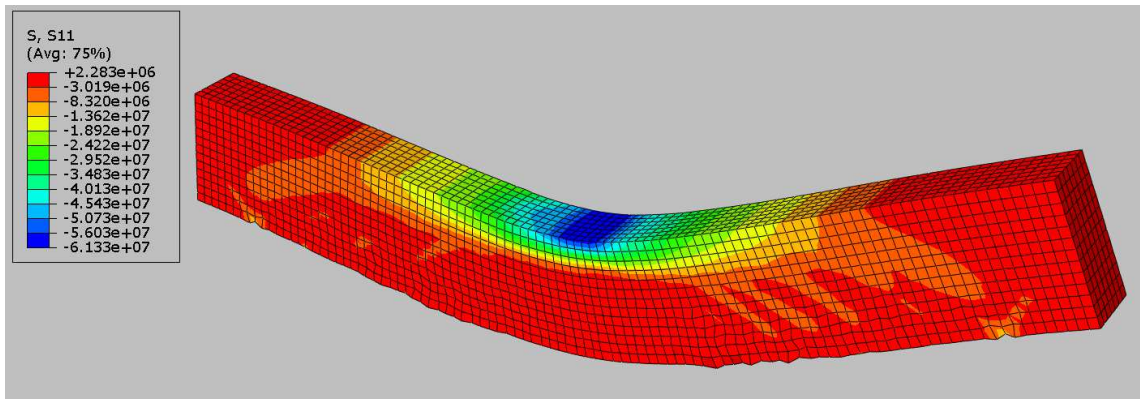
Betonin muodonmuutokset (m) 100 % kuormituksella.

Abaqus-ohjelman tulokset korjatusta palkista

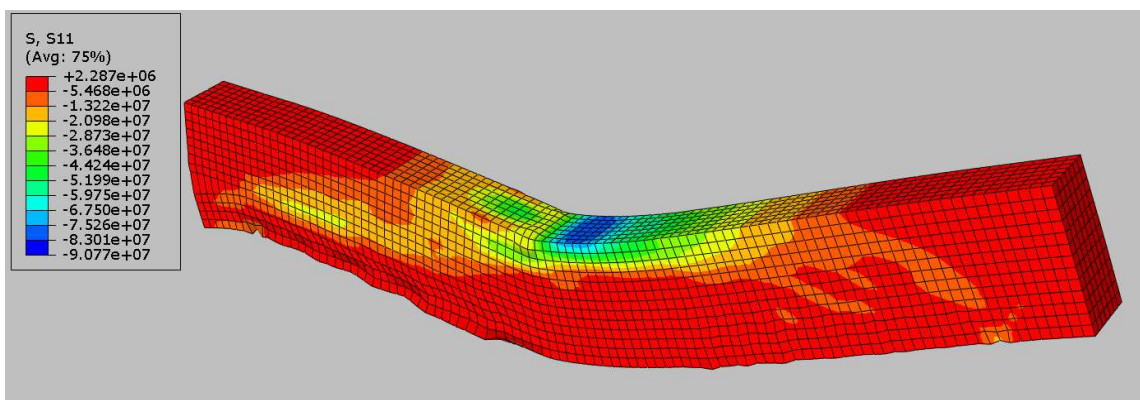
Korjatun palkin murtokuorma oli 525 kN.



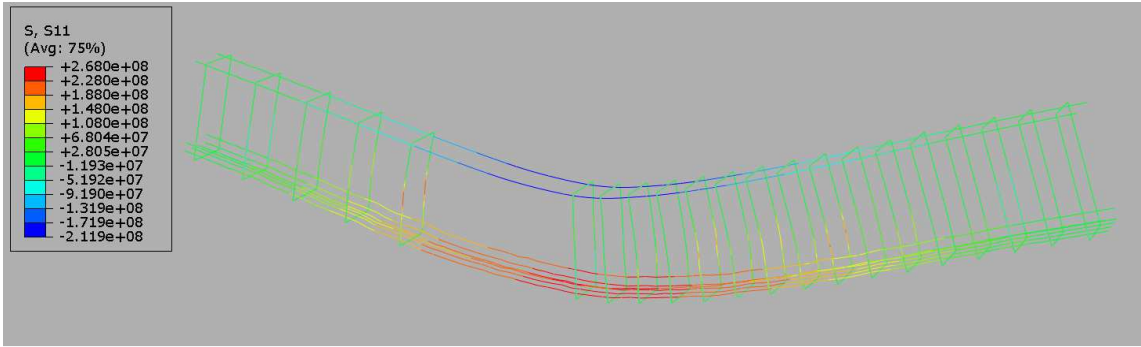
Betonin jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



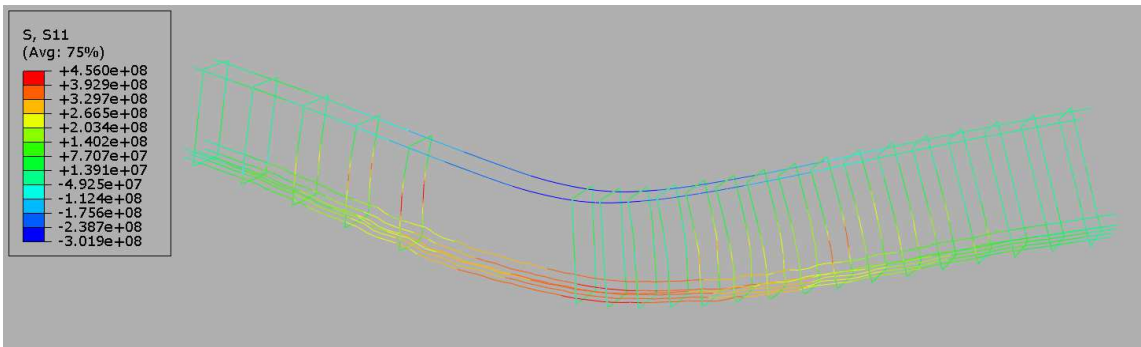
Betonin jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



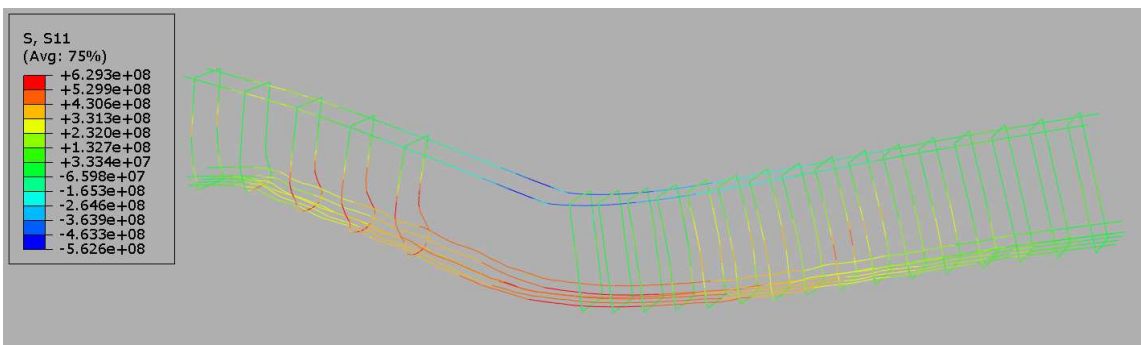
Betonin jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella



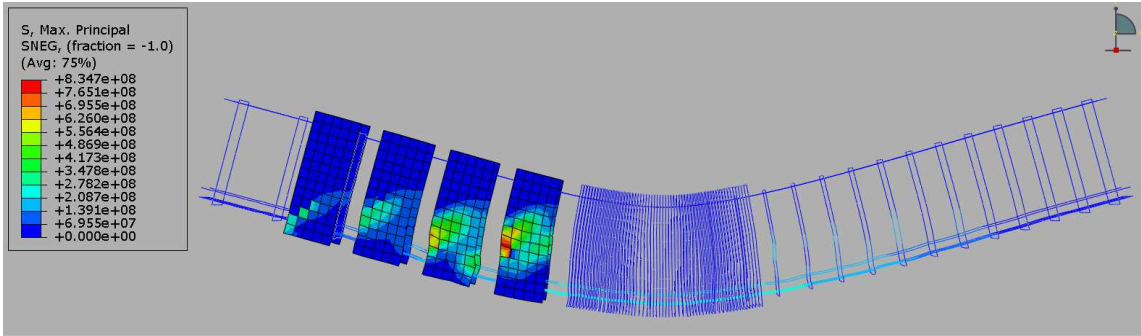
Terästen jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



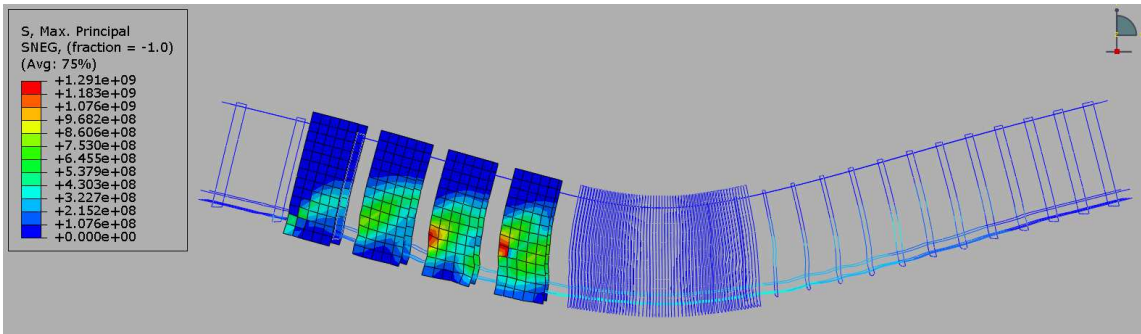
Terästen jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



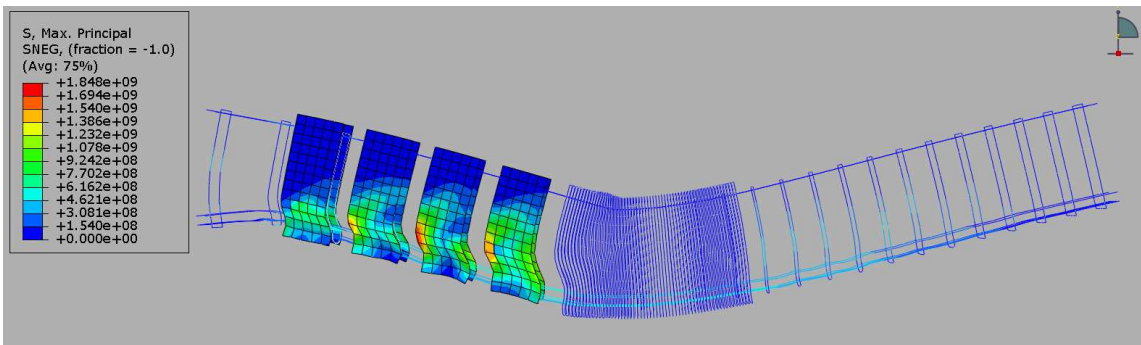
Terästen jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella



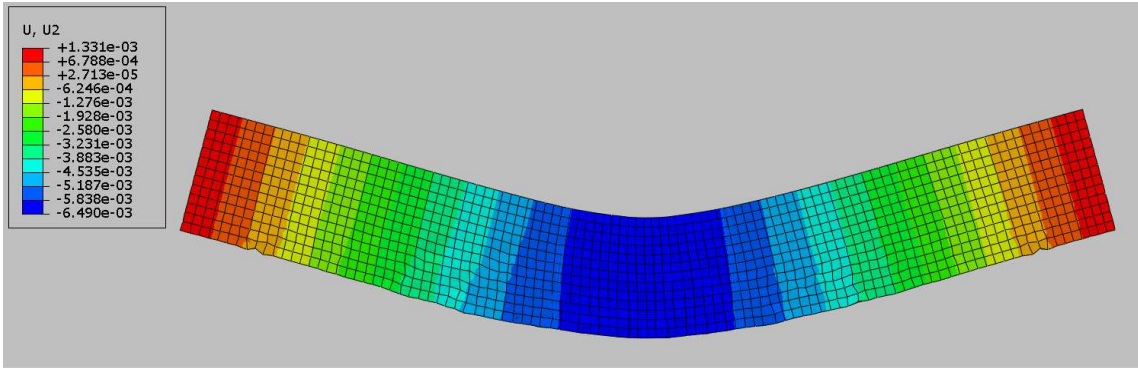
Hiilikuidun jännitykset (Pa) 50 % kuormituksella



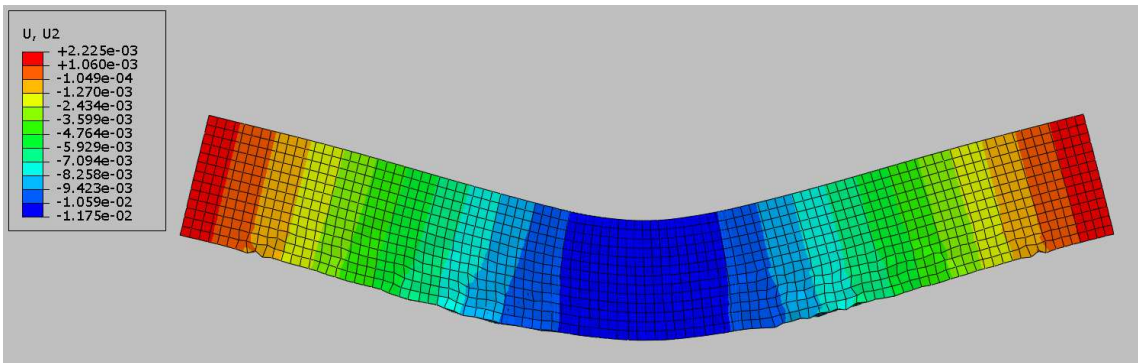
Hiilikuidun jännitykset (Pa) 75 % kuormituksella



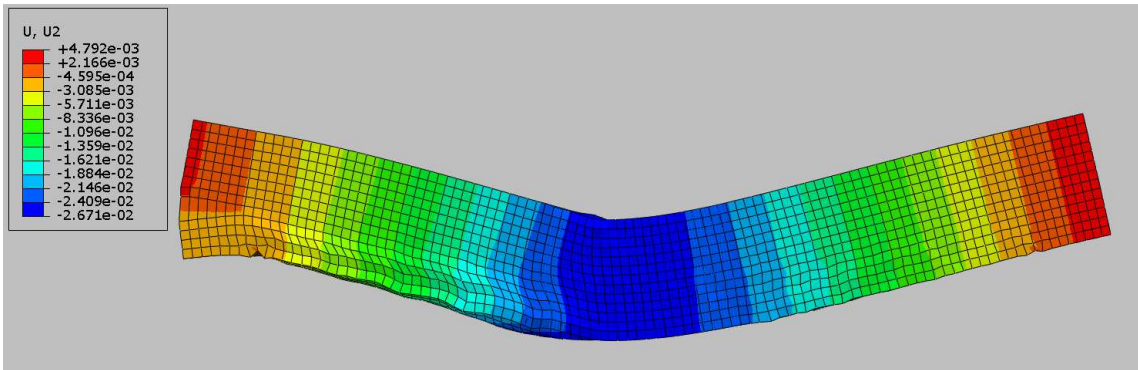
Hiilikuidun jännitykset (Pa) 100 % kuormituksella



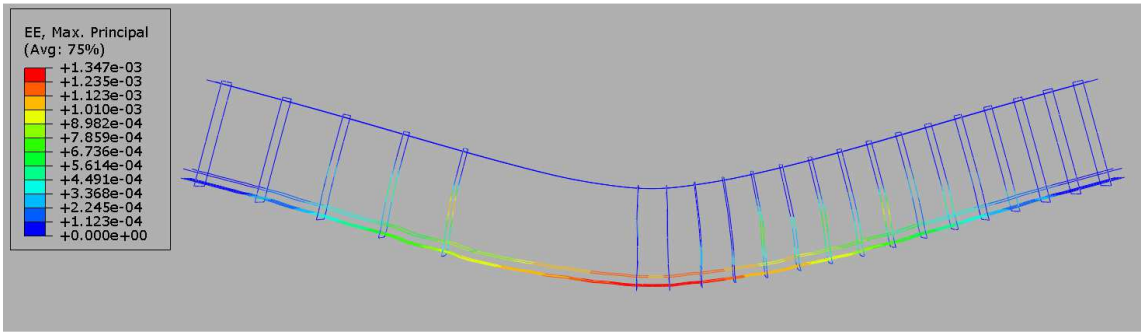
Palkin taipuma (m) 50 % kuormituksella



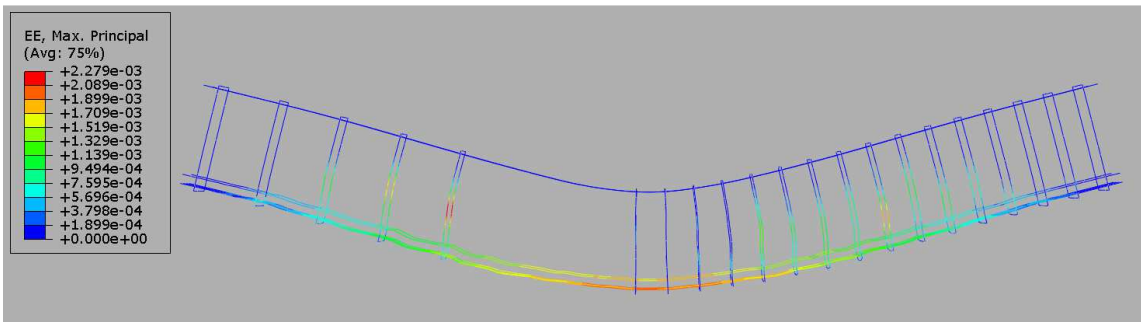
Palkin taipuma (m) 75 % kuormituksella



Palkin taipuma (m) 100 % kuormituksella



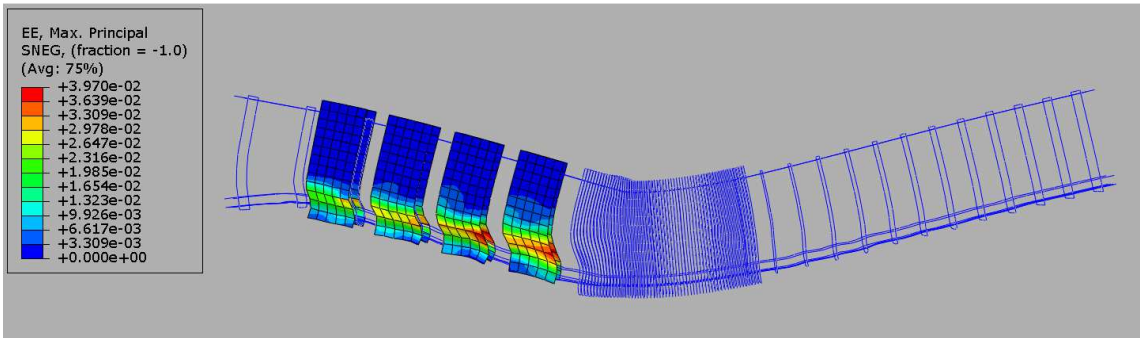
Terästen venymät (m) 50 % kuormituksella



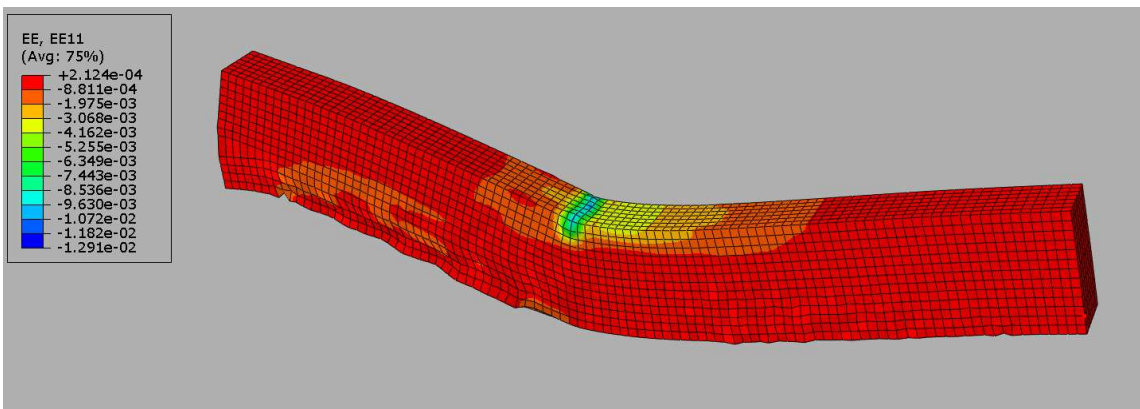
Terästen venymät (m) 75 % kuormituksella



Terästen venymät (m) 100 % kuormituksella



Hiilikuitujen venymät (m) 100 % kuormituksella



Betonin muodonmuutokset (m) 100 % kuormituksella

