

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikan yksikkö, Lappeenranta
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Infratekniikan suuntautumisvaihtoehto

Antti Vainikka

Muovikuitujen käyttö ruiskubetonoinnissa

Tiivistelmä

Antti Vainikka

Muovikuitujen käyttö ruiskubetonoinnissa, 55 sivua

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikan yksikkö, Lappeenranta

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Infratekniikan suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2011

Ohjaajat: yliopettaja Tuomo Tahvanainen, Saimaan ammattikorkeakoulu
työpäällikkö Jouni Hyvärinen, YIT Rakennus Oy, Infrapalvelut, IKR

Opinnäytetyössä tutkittiin kahden ennalta valitun eri valmistajan muovikuidun ominaisuuksia ja niiden soveltuvuutta vahvistamaan ruiskubetonia. Työhön liittyvät työmaakokeet toteutettiin YIT Rakennus Oy:n Keilaniemen ja Salmisaaren tunnelinlouhinta- ja lujitustyömailla. Laboratoriokokeet 28 vuorokautta kovettuneelle ruiskubetonille teetettiin Contesta Oy:n laboratoriossa Vantaalla. Työ tehtiin YIT Rakennus Oy:n Infrapalvelut / Kalliorakentaminen - yksikölle.

Tehtävänä oli suunnitella ja toteuttaa rakennusselostuksissa vaaditut ruiskubetonin ennakkokokeet ja koeruiskutukset. Kokeiden tavoitteena oli saada hyväksytty koetulos, joka täyttää Länsimetro Oy:n polymeerikuituvahvisteiselle ruiskubetonille rakennusselostuksessa asettamat vaatimukset ja määräykset.

Työssä käydään läpi kokeiden toteutukseen ja koekappaleiden tekoon ja koetukseen liittyviä standardeja ja määräyksiä, sekä kerrotaan kuinka kokeet käytännössä tehtiin.

Ensimmäisten koesarjojen lopullisten tulosten valmistuttua päätettiin kokeita jatkaa yhden valmistajan kuidulla ja kasvattamalla annosteltua kuitumäärää. Kokonaisuudessaan lopullisia koetuloksia kertyi opinnäytetyöhön kolmesta kokeesta. Yksikään kolmen kokeen lopullinen tulos ei täyttänyt kaikkia rakennusselostuksissa esitettyjä vaatimuksia.

Saatujen tulosten perusteella, hyväksytyt koetulokset saamiseksi pitäisi joko kuituannosta kasvattaa tai vaihtaa kokeiltavaa kuitutyyppejä ja/ tai ruiskubetonimassan reseptiä.

Asiasanat: muovikuitu, ruiskubetoni, EFNARC-laattakoe

Abstract

Antti Vainikka

Using plastic fibres in spray concreting, 55 pages

Saimaa University of Applied Sciences

Technology, Civil and Construction Engineering

Bachelor's Thesis 2011

Instructors: Mr. Tuomo Tahvanainen, principal lecturer, Saimaa University of Applied Sciences

Mr. Jouni Hyvärinen, Project Manager, YIT Construction Ltd, Infrastructure Construction, IKR

This study examined two predetermined plastic fibers produced by two different manufacturers and the fibers' properties and ability to strengthen spray concrete. Worksite tests were carried out on YIT Construction Ltd's Keilaniemi and Salmisaari tunneling and consolidation construction worksites. Laboratory tests were made in Vantaa in Contesta Oy laboratory on 28 days old concrete.

The task was to develop and execute spray concrete preliminary tests and test spraying required in work commentaries. The objective of the experiments was to have an acknowledged test result that meets the requirements and orders in Länsimetro Oy's work commentary for plastic fiber hardened spray concrete.

This thesis reviews how to carry out tests and do test specimens and testing according to standards and requirements. How the tests were actually done is also told in this study.

After the first test series' final results were finished it was decided that the tests continued only with one manufacturer's product and the fiber's measuring was incremented. In this thesis the test results were built up from three exams. None of those results met all the requirements in work commentaries.

The conclusion is that in order to have an acknowledged test result either the fiber portion has to be grown or the fiber type and/ or spray concrete formula has to be changed.

Keywords: plastic fibers, spray concrete, EFNARC plate test

Sisältö

Määritelmät	5
1 Johdanto	6
2 Ruiskubetonin ja muovikuitujen laatuvaatimukset.....	7
2.1 Ruiskubetonimassan laatuvaatimukset.....	7
2.2 Muovikuidun laatuvaatimukset.....	8
3 Ruiskubetonimassalle tehtävät kokeet.....	9
3.1 Tuoreelle massalle tehtävät kokeet	9
3.1.1 Notkeus	9
3.1.2 Painuma	10
3.1.3 Kuitupitoisuus menetelmä B.....	11
3.2 Kovettuneelle massalle tehtävät kokeet.....	11
3.2.1 Koelaattojen valmistus	11
3.2.2 Vesitiiveyskoe	12
3.2.3 Kuitupitoisuus menetelmä A.....	12
3.2.4 Tiheys.....	13
3.2.5 Puristuslujuus.....	13
3.2.6 EFNARC-laattakoe.....	14
4 Muovikuitujen testaus	17
4.1 Yleistä	17
4.2 Kokeet työmaalla	18
4.3 Kokeet laboratoriossa	22
5 Koetulokset.....	24
5.1 Tuoreen ruiskubetonimassan painuma.....	24
5.2 Tuoreen ruiskubetonimassan kuitupitoisuus.....	25
5.3 Kovettuneen ruiskubetonimassan puristuslujuus ja tiheys	26
5.4 Kovettuneen ruiskubetonimassan vedentunkeuma	29
5.5 Kovettuneen ruiskubetonimassan laattakoe	30
6 Tulosten analysointi	47
7 Päätelmät.....	51
Kuvat.....	53
Taulukot.....	53
Lähteet.....	54

Määritelmät

Ruiskubetoni koostuu massasta, jossa on sementtiä, kiviainesta ja vettä, sekä hyvin useasti lisäaineita. Betoni ruiskutetaan lujitettavalle pinnalle suuttimen läpi hyvin suurella nopeudella paineilmaa apuna käyttäen. Ennen ruiskutusta betoniin sekoitettavien kuitujen käyttö on myös yleistä. Ruiskutetun betonin tulisi muodostaa lujitettavalle pinnalle tiivis ja homogeeninen kerros. (1)

Märkäruiskutusmenetelmä on tekniikka, jossa sementti, kiviaines, vesi ja lisäaineet sekoitetaan massaksi betonitehtaalla. Myös ruiskubetoniin mahdollisesti lisättävät kuidut lisätään massaan tehtaalla. Massa pumpataan putkistoa pitkin suuttimelle, jossa siihen lisätään paineilma ja mahdollinen kiihdytinaine.(1)

Kuivaruiskutusmenetelmä on tekniikka, jossa sementti ja kiviaines sekä mahdolliset kuidut sekoitetaan sekä paineistetaan ennen ainesosien johtamista suuttimeen. Suuttimessa kuivaseokseen kohdistetaan vesisuihku ja lisätään tarvittavat lisäaineet. (1)

Lisäaineet ovat materiaalia, jonka avulla ruiskubetonimassan ominaisuuksia muutetaan tuoreena ja/ tai kovettuneena. (2)

Kiihdytinaineella tarkoitetaan lisäainetta, jonka avulla ruiskubetoni kehittää erittäin varhaisen sitoutumisen ja kovettumisen. (2)

Teräskuitu on tavallisesti suora tai muotoiltu kylmävedetystä teräslangasta katkottu tai teräslevystä leikattu kappale. Kuidun tulee olla homogeenisesti sopiva sekoitettavaksi betoniin tai laastiin. (2)

Muovikuitu on tavallisesti polymeerimassasta ruiskupuristettu tai leikattu pinnaltaan suora tai muotoiltu kappale. Kuidussa käytettävän materiaalin tulee kestää betonin emäksisyyttä. (2)

Energianabsorptiokapasiteetti kertoo kuormitettuun koelaattaan sitoutuneen energian määrän jouleina kun laatan keskipistettä taivutetaan alaspäin. (3)

Rusnaus on louhinnan yhteydessä kallion pintaan syntyvän rikkonaisen kiviaineksen irrottamista mekaanisesti tai korkeapaineisen vesisuihkun avulla. (4)

Hukkaroiskeella tarkoitetaan ruiskubetoniruiskun suuttimen läpi kulkeneen materiaalin ja pinnalle jääneen materiaalin välistä erotusta. (4)

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää kahden ennalta valitun rakenteellisen polymeerikuidun soveltuvuutta ja käyttöä maanalaisien kalliotilojen ruiskubetonin vahvistusmateriaalina. Tehtävänä on suunnitella ja toteuttaa rakennusselostuksissa vaaditut ruiskubetonin ennakkokokeet ja koeruiskutukset. Kokeiden tavoitteena on saada hyväksytty koetulos, joka täyttää Länsimetro Oy:n polymeerikuituvahvisteiselle ruiskubetonille rakennusselostuksessa asettamat vaatimukset ja määräykset.

Opinnäytetyö käy läpi kokeiden toteutukseen ja koekappaleiden tekoon ja koetukseen liittyviä standardeja ja määräyksiä sekä kertoo, kuinka kokeet tehtiin työmailla ja laboratoriossa. Opinnäytetyöhön liittyvät työmaakokeet toteutetaan YIT Rakennus Oy:n Keilaniemen ja Salmisaarnen tunnelinlouhinta- ja lujitus työmailla. Kovettuneelle ruiskubetonille tehtävät kokeet tehdään Contesta Oy:n Vantaan laboratoriossa.

Länsimetro on Suomessa ensimmäinen tämän kokoluokan rakennushanke, jossa käytetään rakenteellisella muovikuidulla vahvistettua ruiskubetonia. Osaltaan tähän on syynä hankkeen pitkä 100 vuoden suunnittelukäyttöikä. Myöskään ei ole täyttä varmuutta siitä, kuinka hyvin teräskuitu kestää betoniin tuona aikana syntyneiden pienien halkeamien kautta pääsevän kosteuden aiheuttamaa korroosiota.

2 Ruiskubetonin ja muovikuitujen laatuvaatimukset

Kuituvahvisteinen ruiskubetoni jaotellaan kolmeen eri luokkaan sen energianabsorptiokapasiteetin mukaan. Nämä luokat ovat E500, E700 ja E1000. Tässä tapauksessa, kun kyseessä on liikennetunneli, niin vaadittu energianabsorptioluokka on E1000 eli vähintään 1000 joulea. (5)

Energianabsorptioluokalla tarkoitetaan energiamäärää, jonka EFNARC-laattakokeessa koestettu laatta sitoo itseensä. Mittaustulos ilmoitetaan jouleina siinä kohtaa, kun neliönmuotoisen koelaatan keskipistettä on taivutettu 25 millimetriä alaspäin, tästä tarkemmin kohdassa 4.2.6. (3)

2.1 Ruiskubetonimassan laatuvaatimukset

Länsimetron metrotunneleissa, asemahalleissa ja niihin liittyvissä tiloissa betonirakenteilta vaaditaan 100 vuoden suunnittelukäyttöikä ja lisäksi betonin tulee olla standardin SFS-EN 206-1 mukaista. Tämä asettaa käytettävälle betonimassalle omanlaisia haasteita ja vaatimuksia. (6; 7)

Minimilujuuden ruiskubetonissa tulee olla luokkaa C30/37, jollei piirustuksissa toisin mainita. Luokka C30/37 tarkoittaa betonista otettujen koekappaleiden pienintä puristuslujuutta 28 vuorokauden iässä. Luku 30 merkitsee 150x300 millimetrinen lieriön minimi ominaislujuutta 30 N/mm² ja luku 37 taas 150x150x150 millimetrinen kuution alinta hyväksytyä ominaislujuutta 37 N/mm². Kovettuneen betonin puristuslujuus ei saa poiketa yli 20 %:a vertailussa kiihdytetyn ja kiihdyttämättömän massan välillä. Lisäksi betonin tulee täyttää taulukossa 1 esitettyjen rasitusluokkien XC3 ja XF1 vaatimukset. Sementtiä massassa tulee käyttää yli 300 kg/m³. (6; 7; 8)

Suunnittelukäyttöikä 100 vuotta		
	Rasitusluokat	
Koostumus ja ominaisuudet	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio XC3	Jäätyminen ja sulaminen XF1
Suurin v/s		0,6
Vähimmäislujuusluokka	K40	
Vähimmäissementti määrä [kg/m ³]	250	270
F-luku (vähimmäisarvo)		0,2

Taulukko 1. Betonin rasitusluokat (8)

Edellä mainittujen vaatimusten lisäksi massan notkeus ruiskuttaessa ei saa olla luokkaa S3 notkeampaa, jolla tarkoitetaan painumakokeen painumatulosta 150...100 millimetriä. Ruiskubetonissa käytettävän kiviaineen maksimiraekoko tulee olla 8...12 millimetrin välillä ja kiviaineen tulee täyttää julkaisussa By43/2008 annetut laatuvaatimukset. (6; 7)

2.2 Muovikuidun laatuvaatimukset

Muovikuidut jaotellaan kahteen eri luokkaan kuidun halkaisijan perusteella. Luokkaan I kuuluvan kuidun halkaisija on alle 0,30 millimetriä ja luokan II kuidun halkaisija yli 0,30 millimetriä. Luokan I kuituja kutsutaan mikrokuiduiksi ja luokan II kuituja makrokuiduiksi. Luokan II kuituja voidaan myös kutsua niiden betonia lujittavien ominaisuuksien vuoksi rakenteellisiksi muovikuiduiksi.(9)

Käytettävän muovikuidun tulee siis täyttää standardin SFS-EN 14889-2 määräämät vaatimukset luokan II makrokuidulle, jonka lisäksi rakennusselostuksessa tarkennetaan ja esitetään seuraavia vaatimuksia käytettävälle kuidulle. Kuidun vetolujuuden tulee olla yli 500 MPa, kimmokerroin yli 4,5 GPa ja kuidun hoikkuusluvun 65 ja 120 välillä. Lisäksi mitoitettavan kuituannoksen minimimäärän tulee olla vähintään 7 kg/m³, myös kuidun muodon tulee edesauttaa kuitujen tartuntaa betoniin. Kuidun minimimäärän ja tunnelin seinästä otettavan kuitunäytteen erotus ei saa olla yli 20 %:a. Eli muovikuidun vähimmäismäärä ruiskutetussa rakenteessa pitää olla yli 5,6 kg/m³.(6; 7)

3 Ruiskubetonimassalle tehtävät kokeet

3.1 Tuorelle massalle tehtävät kokeet

3.1.1 Notkeus

Notkeus määritellään tuoreesta kuituvahvisteisesta ruiskubetonista Vebe-kokeella. Tarkoituksena kokeella on arvioida tuoreen betonimassan työstettävyyttä.

Vebe-kokeessa (kuva 1) tuore betonimassa sullotaan tärypöydällä kolmessa eri kerroksessa standardin SFS-EN 12350-3 mukaiseen lieriön muotoiseen painumamuottiin. Jokaisen täytetyn kerroksen välissä muotissa olevaa betonimassaa tiivistetään 25 iskulla sullontasauvaa apuna käyttäen siten, että iskut jakautuvat mahdollisimman tasaisesti koko muotin pinta-alalle. Kun muotti on saatu vaiheittain täytettyä, muotin yläpinta hierretään tasaiseksi esimerkiksi sullontasauvaa apuna käyttäen, jonka jälkeen muotti poistetaan tasaisella nopeudella ylöspäin nostaen. (10)



Kuva 1. Vebe-laite

Näytteen yläpintaa vasten asetetaan kuvassa 1 olevan Vebe-laitteen osana oleva läpinäkyvä muovinen levy. Tämän jälkeen tärypöytä ja sekuntikello käynnistetään samanaikaisesti. Sekuntikello ja tärypöytä sammutetaan, kun näyte koskettaa kokonaan levyn alapintaa. Saatu aika sekunteina kertoo Vebe-ajan, aikaa verrataan taulukon 2 aikoihin. Koe ei sovellu massoille, joiden Vebe-aika on alle 5 sekuntia tai yli 31 sekuntia. Muotin täytön aloittamisesta sekuntikellon pysäyttämiseen ei aikaa saa kulua yli viittä minuuttia. (10)

Luokka	Kuvaus	Vebe-aika [s]
V0	Maakostea	≥31
V1	Maakostea	30...21
V2	Hyvin jäykkä	20...11
V3	Jäykkä	10...6
V4	Plastisesta vetelään	5...3

Taulukko 2. Vebe-luokat. (8)

3.1.2 Painuma

Toinen tuoreen kuituvahvisteisen ruiskubetonimassan työstettävyyttä kuvaava koe on Painuma-koe. Kokeella on helppo todeta ruiskutettavan massan notkeus myös työmaaolosuhteissa.

Painuma-kokeessa tuore betonimassa sullotaan pohjalevyn päällä kolmessa eri kerroksessa standardin SFS-EN 12350-2 mukaiseen lieriön muotoiseen painumamuottiin. Jokaisen täytetyn kerroksen välissä muotissa olevaa betonimassaa tiivistetään 25 iskulla sullontasauvaa apuna käyttäen siten, että iskut jakautuvat mahdollisimman tasaisesti koko muotin pinta-alalle. Kun muotti on saatu vaiheittain täytettyä, muotin yläpinta hierretään tasaiseksi esimerkiksi sullontasauvaa apuna käyttäen. Tämän jälkeen pohjalevyn pinta puhdistetaan muotin täytön yhteydessä yli valuneesta massasta ja muotti poistetaan tasaisella nopeudella muottia ylöspäin nostaen. (11)

Välittömästi muotin poiston jälkeen mitataan pohjalevyn päällä olevan näytteen korkeus. Painuma-luokka saadaan vähentämällä kokoon painuneen näytteen

korkeus muotin korkeudesta ja vertaamalla saatua lukua taulukon 3 arvoihin. Koko koe muotin täytön aloittamisesta painuman mittaukseen tulee suorittaa keskeytyksettä 150 sekunnin aikana. (11)

Luokka	Painuma [mm]
S1	10..40
S2	50..90
S3	100..150
S4	160..210
S5	≥220

Taulukko 3. Painumaluokat (8)

3.1.3 Kuitupitoisuus menetelmä B

Kuitupitoisuus voidaan selvittää joko tuoreesta tai kovettuneesta kuituvahvisteisesta ruiskubetonista. Selvitettäessä kuitupitoisuutta tuoreesta ruiskubetonista otetaan kolme näytettä painoltaan yhdestä kahteen kiloon. Näytteet otetaan laastilapiolla joko kallion pintaan ruiskutetusta pinnasta tai koelaatasta. Näytteen koko määritellään vedensyrjäytysmenetelmällä. (12)

Otetuista näytteistä erotellaan kuidut huuhtomalla, jonka jälkeen kuidut kerätään talteen ja punnitaan. Metallikuituja punnittaessa va`an tarkkuus tulee olla 0,1 grammaa ja muovikuituja punnittaessa 0,01 grammaa. Massan kuitupitoisuus lasketaan kohdassa 4.2.3 esitetyn kaavan 1 mukaisesti. (12)

3.2 Kovettuneelle massalle tehtävät kokeet

3.2.1 Koelaattojen valmistus

Koelaattojen tekoon tarvittavat muotit valmistetaan vettä imemättömästä materiaalista esimerkiksi metallista tai vanerista. Metallimuotin vahvuus tulee olla vähintään 4 millimetriä ja vanerista valmistetun muotin vahvuus vähintään 18 millimetriä. Käsini ruiskuttaessa muotin minimi sisämitta on 500*500 millimetriä ja ruiskubetonirobotilla ruiskuttaessa 1000*1000 millimetriä. Koelaattojen paksuus tulee olla vähintään 100 millimetriä. (1)

Koelaattoja ruiskuttaessa muotti asetetaan pystyasentoon esimerkiksi tunnelin seinää vasten. Ruiskutuksen tulee tapahtua samalla laitteistolla, menetelmällä ja rakennepaksuudella kuin lopullisen rakenteen ruiskutus. Myös henkilön, joka koelaatat ruiskuttaa, tulee olla sama kuin varsinaisen rakenteen ruiskuttaja. Ruiskutetut laatat tulee suojata liian nopean kuivumisen ehkäisemiseksi eikä niitä saa siirtää ensimmäisen 18 tunnin aikana. Laattojen jälkihoito tapahtuu samalla, kun varsinaisen rakenteen, ja sen tulee jatkua vähintään seitsemän vuorokauden ajan tai kunnes ruiskutetun laatan muotti puretaan. (1)

Ruiskutetuista koelaatoista kairataan tai sahataan vaadittavat koekappaleet koestuksia varten. Otettujen koekappaleiden minimietäisyys laatan reunoista tulee olla vähintään koelaatan d mitan eli paksuuden verran. Koekappaleen minimietäisyys ei koske palkkikokeessa käytettäviä koekappaleita. Valmiit koekappaleet tai koelaatat tulee suojata testauslaboratorioon kuljettamisen ajaksi mahdollisimman hyvin mekaanisilta vaurioilta ja kosteushäviöltä. (1;13)

3.2.2 Vesitiiveyskoe

Vesitiiveyskokeessa tutkitaan paineellisen veden tunkeumasyvyyttä vähintään 28 vuorokauden ikäisellä koekappaleella. Muodoltaan koestettavan kappaleen tulee olla lieriömäinen, kuutiomainen tai prismamainen. Koestettavan pinnan vähimmäismitta on 150 millimetriä ja paksuutta kappaleella on oltava yli 100 millimetriä. (14)

Kokeessa testattavaan pintaan kohdistetaan kolmen vuorokauden ajan vedenpaine suuruudeltaan 500 ± 50 kPa. Kun kappale on ollut paineellisen veden vaikutuksen alaisena vaaditun ajan, kappale halkaistaan kahtia kohtisuoraa testattavaa pintaa vastaan. Halkaistusta kappaleesta mitataan suurin veden tunkeumasvyys millimetrin tarkkuudella. Valetussa betonissa vesitiiveyden rajana on 100 millimetrin ja ruiskutetussa rakenteessa 50 millimetrin veden tunkeumasvyys. (5;14)

3.2.3 Kuitupitoisuus menetelmä A

Kovettuneesta massasta kuitupitoisuutta selvittäessä, kairataan tai vaihtoehtoisesti leikataan kolme näytettä ruiskutetusta koelaatasta tai kallion pintaan ruis-

kutetusta betonista. Otetun näytteen halkaisijan tulee olla 50 ja 100 millimetrin välillä ja korkeuden 75 ja 150 millimetrin välillä. Jos kallion pintaan ruiskutetun kerroksen paksuus on alle 75 millimetriä, niin näytteen korkeus on silloin ruiskutetun kerroksen paksuinen. Näytteen tilavuus määritellään joko laskennallisesti tai vedensyrjäytysmenetelmällä. (12)

Otettu näyte murskataan ja kuidut erotellaan käsin ja magneettia apuna käyttäen. Kerätyt kuidut tulee puhdistaa huolellisesti. Saatu kuitunäyte punnitaan ja ruiskubetonimassan kuitupitoisuus lasketaan kaavalla 1.

$$C_f = \frac{m_f \times 1000}{V_d} \quad (1)$$

Kaavassa 1 C_f on kuitupitoisuus [kg/m^3], m_f merkitsee näytteen kuitumäärää grammoina ja V_d näytteen tilavuutta [m^3]. (12)

3.2.4 Tiheys

Kovettuneesta betonista tiheyttä määriteltessä koekappaleen tilavuuden tulee olla vähintään 0,785 litraa, kappaleen muodolla ei ole niin suurta merkitystä. Koekappale jaotellaan kolmeen eri ryhmään sen kosteustilan mukaan; vastaanottotila, veden kyllästämä tila tai uunikuivattu. Tiheys voidaan määrittää joko vesipunnituksella tai laskemalla kappaleen tilavuus. Tämän jälkeen, kun tilavuus on selvillä, kappale punnitaan tarkasti. Saaduista tuloksista lasketaan betonin tiheys kaavalla 2

$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

jossa D on kappaleen tiheys [kg/m^3] suhteessa kappaleen kosteustilaan ja tilavuuteen, m merkitsee kappaleen massaa [kg] ja V kappaleen tilavuutta [m^3]. (15)

3.2.5 Puristuslujuus

Puristuslujuutta määrittäessä koekappale on muodoltaan kuutiomainen, lieeriömäinen tai prismamainen. Koekappaleen perusmitan d tulee olla vähintään kolme ja puoli kertaa betonin kiviaineksen nimellisraekoon suuruinen. Puristuslujuuden määrittäminen ruiskubetonista tapahtuu koelaatasta kairattavien lieeri-

öiden avulla. Ennen koekappaleen puristamista on huolehdittava siitä, että testauskoneen kantavat pinnat sekä koekappale ovat puhdistettuja. (16)

Kokeessa kappaleeseen kohdistuvaa kuormaa kasvatetaan tasaisella nopeudella kunnes koestettava kappale murtuu. Tämän jälkeen kirjataan ylös suurin saavutettu kuorma [N]. Koekappaleen koestettavan pinnan ja suurimman saavutetun kuorman avulla lasketaan kaavalla 3 kappaleen puristuslujuus. (17)

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3)$$

Kaavassa f_c tarkoittaa kappaleen puristuslujuutta [N/mm²], F kuvaa kappaleeseen kohdistuvaa kuormitusta [N] ja A_c koestettavan kappaleen poikkileikkuspinta-alaa [mm²]. (17)

3.2.6 EFNARC-laattakoe

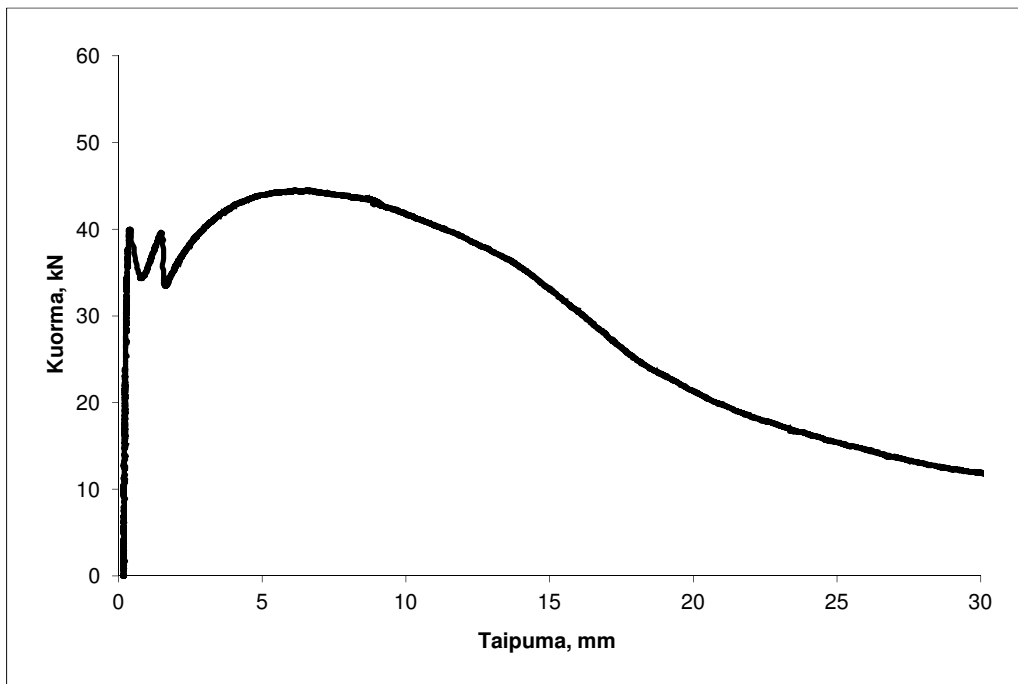
Laattakokeella testataan kovettuneen betonin sitkeys- ja lujuusominaisuuksia, jotka tarkoittavat koelaatan maksimimurtokuormaa ja energianabsorptiokapasiteettia. Kokeessa kohdan 4.2.1 mukaan valmistettu koelaatta sahataan 600x600 millimetrin mittoihin ja laatta hiotaan paksuuteen 100₀⁺⁵ millimetriä. Koe suoritetaan yleensä 28 vuorokauden ikäiselle koekappaleelle. Ennen kokeen aloitusta koestettavia laattoja tulee säilyttää vedessä vähintään kolmen vuorokauden ajan. Koestuksen aikana laatan pintojen tulee pysyä kosteina. (3)

Koestettava laatta asetetaan keskitetysti 500x500 millimetrisen neliönmuotoisen kehikon päälle ja laatan keskipisteeseen asetetaan 100x100 millimetrin teräskappale. Laatan keskipisteessä olevaa teräskappaletta kuormitetaan tasaisella nopeudella maksimissaan 1,5 mm/min, kunnes laatta saavuttaa 30 millimerin taipuman kuten kuvassa 2 on tapahtunut. (1; 3; 5)



Kuva 2. Koestettava laatta on saavuttanut 30 millimetrin taipuman

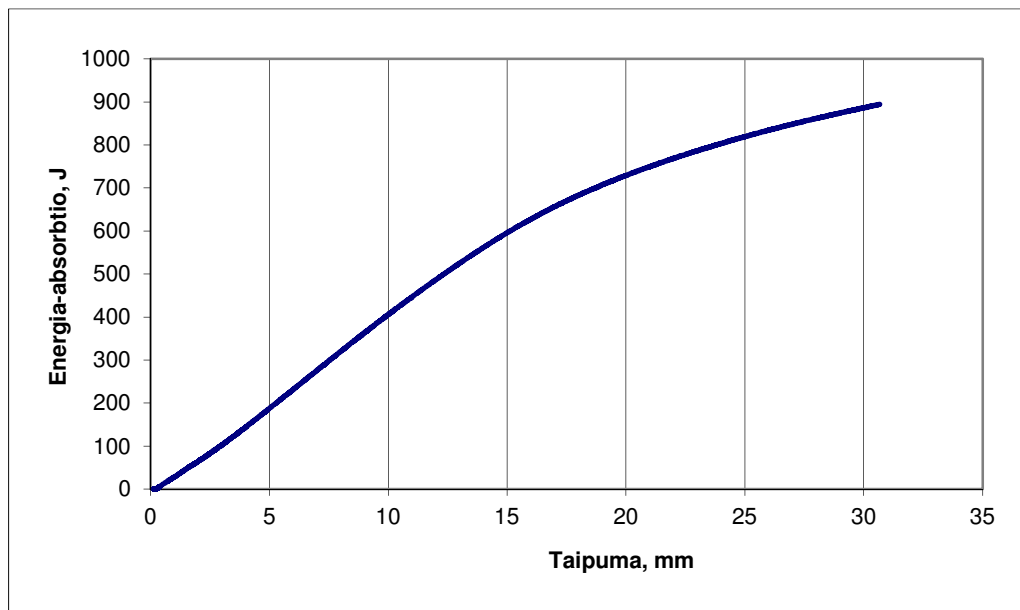
Kokeessa laattaan absorboitunut energiamäärä määritetään taipuman ollessa 25 millimetriä. Energian lisäksi kokeessa tarkastellaan suurinta käytettyä voimaa, jonka laatta ottaa vastaan, ja voimaa, jolla koelaattaan syntyy ensimmäinen halkeama (kuva 3)



Kuva 3. Kuormitus muodonmuutoskäyrä

Kuvaa 3 tulkittaessa kyseisen koelaatan ensimmäinen halkeama on syntynyt noin 40 kN voimalla, taipuman ollessa noin luokkaa 0,4 millimetriä ja laatan maksimikuormaksi on saatu noin 44,5 kN taipuman ollessa noin kuuden millimetrin luokkaa.

Kuvassa 4 on saman koelaatan energianabsorptiokuvaaja, jota tulkitsemalla laattaan varastoituneen energian määrä on noin 822 joulea 25 millimetrin taipuman kohdalla. Saatu joulemäärä kertoo varsin suoraan rakenteen sitkeydestä.



Kuva 4. Absorpoituneen energian kuvaaja

Taulukossa 4 on esitetty kuituvahvisteisen ruiskubetonin energianabsorptioluokat.

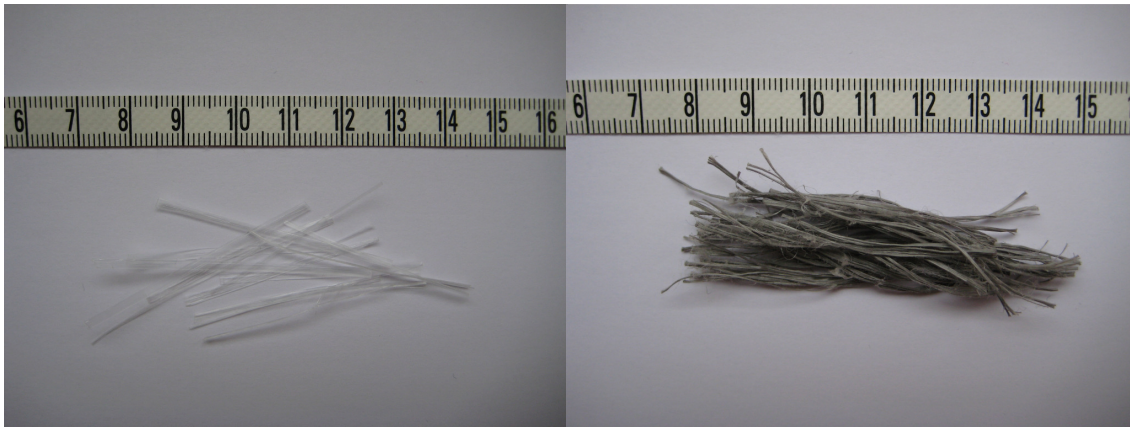
Energianabsorptioluokka	Energianabsorptio [J] 25 mm taipumalla
E500	500
E700	700
E1000	1000

Taulukko 4. Energianabsorptioluokkien määritelmät (5)

4 Muovikuitujen testaus

4.1 Yleistä

Koeruiskubetonointi suoritettiin YIT:n LU10 Salmisaaren ja LU6P Keilaniemen työmailla. Kokeeseen valittiin kahden eri kuitutoimittajan rakenteellinen polymeerikuitu. Kuvassa 5 olevat kuidut on nimetty Kuitu A:ksi ja Kuitu B:ksi. Valitut kuidut poikkeavat toisistaan varsin suuresti rakenteen ja materiaalin osalta. Molemmat kokeissa käytetyt kuidut täyttivät kohdassa 2.2 esitetyt vaatimukset rakenteelliselle polymeerikuidulle. Kuitutyypin valinnassa käytettiin suuntaa antavana apuna Länsimetro Oy:n aiemmin tekemää rakenteellisten polymeerikuitujen vertailukoetta.



Kuva 5. Kuitu A ja kuitu B

Koeruisutukset suoritettiin 22.9.–17.11.2011 välisenä aikana Salmisaaren LU10 tunneliperässä ja Keilaniemen LU6P ajotunnelissa ja asemahallissa. Salmisaaren työmaalle ruiskubetonimassa toimitettiin Betoni Centerin Tuupakan betoniasemalta ja Keilaniemeen massa toimitettiin Bet Setin Viikin betoniasemalta. Kummallakin betoniasemalla muovikuidut annosteltiin massan sekaan käsin syöttämällä.

Kummankin betoniaseman massoilla massan tavoitepainumuokka oli S3 (100...150 millimetriä) ja kiviaineksen maksimirakoko kahdeksan millimetriä. Kuituannos vaihteli kokeiden edetessä seitsemästä kilosta kahdeksaan kiloon kuutiolla. Kuormien koko oli 5 m³ yhtä 4,5 m³ kuormaa lukuun ottamatta.

Salmisaareissa ja Keilaniemessä käytettiin eri valmistajan valmistamaa ruisku-betonikalustoa. Ennen koeruiskutuksien aloittamista ruiskutettavat kalliopinnat oli rusnattu ja pesty huolellisesti. Ennen jokaista ruiskutettavaa koe-erää ruisku-betonirobotin sekoittaja ja letkut huuhdeltiin vedellä puhtaaksi.

Tuoreelle ruiskubetonille tehdyt kokeet toteutettiin koeruiskutuksen aikana. Kovettuneelle betonille tehdyt kokeet suoritettiin 28–31 vuorokauden kuluttua ruiskutuksesta Contesta Oy:n Vantaan laboratoriossa. Jokaisen koe-erän tuoreelle ja kovettuneelle ruiskubetonille tehdyt kokeet ja rinnakkaiskoemäärät on esitetty taulukossa 5.

Tuoreelle ruiskubetonille tehdyt kokeet			
	Menetelmä	Määrä (kpl)	Standardi
Märkäseoksen notkeus		1	SFS EN-12350-2
Kuitupitoisuus	B	4–6	SFS EN-14488-7
Laboratorio kokeet 28 vuorokautta kovettuneelle ruiskubetonille			
Puristuslujuus		6	SFS EN-12390-3
Tiheys		6	SFS EN-12390-7
Paineellisen veden tunkeuma		3	SFS EN-12390-8
Energianabsorptiokapasiteetti	Laattakoe	4	SFS EN-14488-5

Taulukko 5. Koe-erille tehdyt kokeet

4.2 Kokeet työmaalla

Tuoreen ruiskubetonin notkeus määriteltiin betoniasemilla heti massan valmistuttua painumakokeen avulla. Ruiskubetonin kuitupitoisuus määriteltiin työmaalla ruiskutuksen aikana. Kahden ensimmäisen koe-erän osalta otettiin kuitunäytteitä suoraan betoniauton purkurännistä ja myös ruiskutetusta tunnelin seinästä. Seuraavilla koekerroilla kuitunäytteet otettiin pelkästään ruiskutetusta tunnelin seinästä. Otetut kuitupitoisuusnäytteet pyrittiin ottamaan purun aloituksen ja lopetuksen välissä mahdollisimman tasaisin väliajoin.

Standardista 14488-7 poiketen kuitupitoisuusnäytteet otettiin 12 litran muovämpäreihin ja näin ollen näytteiden suuresta tilavuudesta johtuen näytteet painoivat 20 kilosta aina 29 kiloon asti. Näytteiden punnituksessa ei käytetty

vedensyrjäytysmenetelmää. Kuvassa 6 on esitetty kuitujen huuhdontaan käytetyt välineet.



Kuva 6. Kuitujen huuhdontaan käytetyt välineet

Otettu näyte kumottiin 100 litran muovisaaviin ja saavi laskettiin puolilleen vettä. Tämän jälkeen saavissa olevaa vesi-betoniseosta sekoitettiin voimakkaasti laastinsekoittajalla. Sekoituksen jälkeen seoksen annettiin tasaantua hetki, jonka jälkeen pinnalle nousseet muovikuidut kerättiin käsin talteen. Tämän jälkeen saavissa oleva seos kaadettiin seulan läpi maahan (kuva 7) ja seulaan jääneet kuidut kerättiin talteen. Nämä työvaiheet toistettiin vähintään kolmesti otettua kuitunäytettä kohti. Huuhtominen lopetettiin, kun saavissa olevassa kiintoaineessa ei silmämääräisesti enää näkynyt kuituja.



Kuva 7. Kuitujen huuhdonta

Massasta huuhdotut kuidut pestiin huolellisesti, jonka jälkeen ne pakattiin muovipusseihin kuivausta ja punnitusta varten. Kuitujen kuivaus ja punnitus tapahtui Saimaan ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa Skinnarilassa. Kuitunäytteitä kuivattiin kuivatusuunissa 16...20 tuntiin, 80 °C:n lämpötilassa. Kuivauksen jälkeen kuidut (kuva 8) siirrettiin erilliselle astialle mahdollisen ylimääräisen kiintoaineen pois saamiseksi. Tämän jälkeen näytteet punnittiin (kuva 9) Kern 470 -mallisella vaa'alla, jonka punnitustarkkuus oli standardista SFS EN-14488-7 poiketen 0,1 grammaa eikä 0,01 grammaa.



Kuva 8. Kuivatut kuitunäytteet



Kuva 9. Kuitujen punnituksessa käytetty vaaka

4.3 Kokeet laboratoriossa

Kahdella ensimmäisellä koekerralla testattavaa kuitua kohden ruiskutettiin viisi koelaattaa ja kolmannella koekerralla kuusi, joista kuudes laatta ilman kiihdytintä. Laatat toimitettiin Contesta Oy:n Vantaan laboratoriolle, kun ruiskutuksesta oli kulunut aikaa 7...14 vuorokautta. EFNARC-laattakoetta varten neljä koelaattaa sahattiin kuvan 10 timanttisahalla 600x600x100 millimetrin mittoihin (kuva 11)

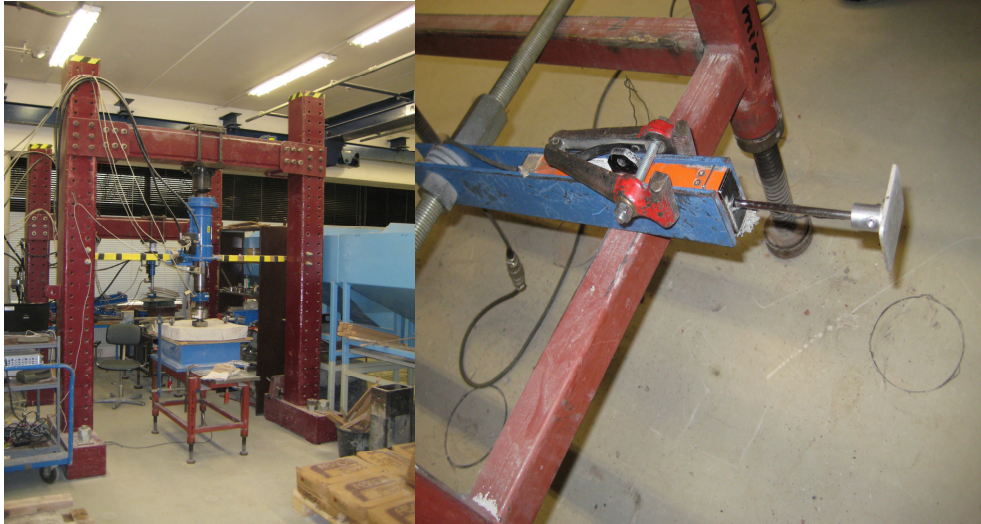


Kuva 10. Koelaattojen sahaamiseen käytetty timanttisaha ja sahatut koelaatat



Kuva 11. Sahatut EFNARC-laatat

Contestan laboratoriolla EFNARC-laattakoe tehtiin kuvassa 12 olevalla kuormituskehän 200 kN tunkilla. Koestettavan laatan keskipisteen siirtymä mitattiin SDP-100C -mallisella siirtymäanturilla.



Kuva 12. Kuormituskehä ja siirtymäanturi

Viidennestä koelaatasta porattiin kuusi näytekappaletta puristuslujuuden ja samalla tiheyden määrittämiseen ja kolme näytettä paineellisen veden tunkeumasyvyyden määrittämiseen. Ilman kiihdytintä ruiskutetusta koelaatasta porattiin kuusi koekappaletta vertailupuristuslujuuden määrittämistä varten. Kahdella ensimmäisellä koekerralla koekappaleet vertailupuristuslujuuden määrittämistä varten valettiin betoniasemalla. Kuvassa on 13 koekappaleiden puristukseen käytetty tunkki ja poratut koekappaleet veden tunkeumakokeessa.



Kuva 13. Puristuslujuuden ja vedentunkeuman määrittäminen

5 Koetulokset

Koekertoja polymeerikuiduille kertyi kaiken kaikkiaan seitsemän. Taulukosta 6 selviää kokeen numero, kokeiden ajankohta ja kokeiltava kuitu ja työmaa, missä koeruiskutus toteutettiin.

Koe numero	Päivämäärä	Testattava kuitu	Työmaa	Onnistuiko
1	22.9.2011	Kuitu A	Keilaniemi	Ei
2	23.9.2011	Kuitu B	Salmisaari	Kyllä
3	23.9.2011	Kuitu A	Salmisaari	Kyllä
4	7.10.2011	Kuitu A	Keilaniemi	½ kyllä
5	14.10.2011	Kuitu B	Keilaniemi	Ei
6	28.10.2011	Kuitu A	Salmisaari	Kyllä
7	17.11.2011	Kuitu A	Keilaniemi	Kyllä

Taulukko 6. Koekerrat ja kokeiden ajankohta

Kokeet numero 1 ja 5 epäonnistuvat ruiskubetonimassan vääränlaisen koostumuksen takia. Kokeessa numero 1 betonimassa oli liian notkeaa ruiskutettavaksi ja kokeessa numero 5 betonimassa oli liian jäykkää ruiskutettavaksi. Kokeesta numero 4 saatiin tuloksia ainoastaan kuitupitoisuuden ja massan notkeuden osalta. Kyseisessä kokeessa ruiskutettujen koelaattojen paksuus jäi alle vaaditun 100 millimetrin rajan, mistä johtuen laattoja ei toimitettu Contestalle jatkokutkimuksiin. Kokeen numero 7 koelaattojen laboratorikokeiden tulokset valmistuvat vasta 15.12.2011, joten kyseisestä kokeesta tässä työssä on mukana ainoastaan massan painuma- ja kuitupitoisuustulokset.

5.1 Tuoreen ruiskubetonimassan painuma

Taulukossa 7 esitetyt ruiskubetonimassan painumat on mitattu massan valmistuksen jälkeen betoniasemilla. Kaikilla massoilla betoniasemasta riippumatta tavoitepainumana oli painumaluokka S3 (100...150 millimetriä).

Koe numero	Kuitu	Päivämäärä	Betoniasema	Painuma [mm]	Painumaluokka
1.	A	22.9.2011	Bet Set		S4
2.	B	23.9.2011	Betoni Center	180	S4
3.	A	23.9.2011	Betoni Center	140	S3
4.	A	7.10.2011	Bet Set		S3
5	B	14.10.2011	Bet Set	120	S3
6	A	27.10.2011	Betoni Center	185	S4
7	A	17.11.2011	Bet Set	165	S4

Taulukko 7. Betoniasemalla tehtyjen painumakokeiden tulokset

5.2 Tuoreen ruiskubetonimassan kuitupitoisuus

Pestyjen ja kuivattujen polymeerikuitujen punnitustulosten keskiarvot ja hukka-prosentit on esitetty taulukossa 8. Kokeissa 2 ja 3 näytteitä otettiin myös suoraan betoniautosta, niiden tulokset on kerrottu taulukossa 9. Kuitujen punnitus suoritettiin vaa'alla, gramman kymmenesosan tarkkuudella. Kuitujen hukkaprosentilla tarkoitetaan seinänäytteen ja massaan lisätyn kuitumäärän prosentuaalista erotusta.

Koe numero	Kuitu	Annos [kg/m ³]	Työmaa	Seinä KA [kg/m ³]	Kuidunhukkaprosentti [%]
2	B	7,00	LU10	4,129	41,0
3	A	7,00	LU10	5,169	26,2
4	A	8,00	LU6P	6,449	19,3
6	A	7,56	LU10	6,476	14,3
7	A	8,00	LU6P	7,279	9,0

Taulukko 8. Seinänäytteiden kuitupitoisuudet ja kuitujen hukkaprosentit

Koe numero	Kuitu	Annos [kg/m ³]	Työmaa	Auto KA [kg/m ³]
2	B	7,00	LU10	7,813
3	A	7,00	LU10	6,531

Taulukko 9. Betoniautosta otettujen näytteiden kuitupitoisuus

Kaikki kuitupitoisuuskokeista saadut tulokset eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Kokeissa 2 ja 3 kuidun suurta hukkaprosenttia selittää osaltaan osittain vääränlainen näytteenottotekniikka. Seuraavissa kokeissa näytteenottomenetelmää parannettiin, joten kolme viimeisintä koetulosta ovat keskenään vertailukelpoisia.

5.3 Kovettuneen ruiskubetonimassan puristuslujuus ja tiheys

Betonin puristuslujuus- ja tiheyskokeet tehtiin 28 vuorokauden ikäiselle betonille. Kokeisiin vaaditut koekappaleet porattiin standardin SFS EN-12504-1 mukaan kuormittamattomasta koelaatasta. Koekappaleiden pituuden ja halkaisijan suhde oli 1:1, pituus 100 millimetriä ja halkaisija 100 millimetriä. Porattujen koekappaleiden päät tasoitettiin rikittämällä ennen kappaleen puristusta. Taulukoissa 10–15 esitetyt arvot on muutettu vastaamaan 150x150x150 millimetrin koekuution puristutuloksia. Lisäksi kokeille numero 2 ja 3 valettiin betoniasemalla vertailupuristuslujuuden selvittämiseksi, kullekin kaksi 150x150x150 millimetrin koekuutiota ilman kiihdytintä. Koe numero 6:ssa puristuslujuuden vertailuarvon selvittämiseksi ruiskutettiin yksi koelaatta ilman kiihdytintä. Taulukkoon 10 on kerätty ja laskettu taulukoista 11–16 puristuslujuuden keskiarvot ja keskihajonta. Taulukoissa 11–16 on esitetty puristuslujuus- ja tiheyskokeiden tulokset kokeista 2, 3 ja 6.

Puristuskokeiden keskiarvot ja keskihajonta				
Koe numero	Koestusikä [d]	Puristuslujuus [N/mm ²]	Koetulostenhajonta [N/mm ²]	Tiheys [kg/m ³]
2	28	33,3	0,7	2160
3	28	39,5	1,9	2217
6	28	46,1	1,3	2248
6, ilman kiihdytintä	28	54,9	3,1	2265

Taulukko 10. Puristuskokeiden keskiarvot ja keskihajonta

Puristuslujuus ja tiheys, koe numero 2, kuitu B, annostus 7,00kg/m ³				
Koekappale	Koestusikä [d]	Murtovoima [kN]	Puristuslujuus [N/mm ²]	Tiheys [kg/m ³]
1	28	243,0	33,1	2160
2	28	248,7	33,9	2180
3	28	233,8	31,9	2160
4	28	251,6	33,4	2150
5	28	248,2	33,9	2130
6	28	244,8	33,4	2180
Keskiarvo	28	245,0	33,3	2160

Taulukko 11. Koe numero 2, puristuslujuus ja tiheys

Puristuslujuus, koe numero 2, kuitu B, annostus 7,00kg/m ³ , ilman kiihdytintä		
Koekappale	Koestusikä [d]	Puristuslujuus [N/mm ²]
1	28	45,0
2	28	46,8
Keskiarvo	28	45,9

Taulukko 12. Koe numero 2, puristuslujuus, ilman kiihdytintä

Puristuslujuus ja tiheys, koe numero 3, kuitu A, annostus 7,00kg/m ³				
Koekappale	Koestusikä [d]	Murtovoima [kN]	Puristuslujuus [N/mm ²]	Tiheys [kg/m ³]
1	28	287,2	39,2	2220
2	28	287,0	39,1	2220
3	28	291,2	39,7	2220
4	28	269,4	36,8	2200
5	28	315,9	43,1	2210
6	28	286,6	39,1	2230
Keskiarvo	28	289,6	39,5	2217

Taulukko 13. Koe numero 3, puristuslujuus ja tiheys

Puristuslujuus, koe numero 3, kuitu A, annostus 7,00kg/m ³ , ilman kiihdytintä		
Koekappale	Koestusikä [d]	Puristuslujuus [N/mm ²]
1	28	43,5
2	28	44,4
Keskiarvo	28	44,0

Taulukko 14. Koe numero 3, puristuslujuus, ilman kiihdytintä

Puristuslujuus ja tiheys, koe numero 6, kuitu A, annostus 7,56kg/m ³				
Koekappale	Koestusikä [d]	Murtovoima [kN]	Puristuslujuus [N/mm ²]	Tiheys [kg/m ³]
1	28	322,9	44,1	2250
2	28	341,5	46,7	2260
3	28	346,6	47,4	2230
4	28	347,7	47,5	2240
5	28	328,1	44,9	2250
6	28	337,9	46,2	2260
Keskiarvo	28	337,5	46,1	2248

Taulukko 15. Koe numero 6, puristuslujuus ja tiheys

Puristuslujuus ja tiheys, koe numero 6, kuitu A, annostus 7,56kg/m ³ , ilman kiihdytintä				
Koekappale	Koestusikä [d]	Murtovoima [kN]	Puristuslujuus [N/mm ²]	Tiheys [kg/m ³]
1	28	403,2	55,1	2270
2	28	353,1	48,3	2230
3	28	415,2	56,8	2280
4	28	422,8	57,8	2280
5	28	402,0	55,0	2260
6	28	412,4	56,4	2270
Keskiarvo	28	401,5	54,9	2265

Taulukko 16. Koe numero 6, puristuslujuus ja tiheys, ilman kiihdytintä

Kokeesta numero 5 valettiin betoniasemalla kuusi koekuutiota kiihdyttämättömän massan puristuslujuuden selvittämiseksi. Massan ruiskutuksen epäonnis-

tumisen jälkeen koekuutiot päätettiin kuitenkin säilyttää ja puristaa kaksi koekuutiota 7 vuorokauden ikäisinä ja loput neljä 28 vuorokauden ikäisenä. Puristuslujuuskokeen tulokset on esitetty taulukoissa 17 ja 18.

Koe numero 5, puristuslujuus 7 vuorokautta		
Koekappale	Koestusikä [d]	Puristuslujuus [N/mm ²]
1	7	47,0
2	7	46,5
Keskiarvo	28	46,8

Taulukko 17. Koe numero 5, puristuslujuus 7 vuorokautta

Koe numero 5, puristuslujuus 28 vuorokautta		
Koekappale	Koestusikä [d]	Puristuslujuus [N/mm ²]
3	28	55,5
4	28	57,0
5	28	55,0
6	28	55,5
Keskiarvo	28	55,8

Taulukko 18. Koe numero 5, puristuslujuus 28 vuorokautta

5.4 Kovettuneen ruiskubetonimassan vedentunkeuma

Paineellisen veden tunkeumasyyvyyttä testattiin kolmen rinnakkaiskappaleen avulla. Kokeeseen tarvittavat koekappaleet porattiin samasta koelaatasta, josta porattiin myös koekappaleet puristuslujuuden ja tiheyden määrittämistä varten. Koestuksen alussa betonin ikä oli 28 vuorokautta. Vedenpaine kohdistettiin ruiskutussuuntaan nähden koekappaleen vastakkaiselle puolelle. Ennen koestusta koekappaleen koestettava pinta sahattiin tasaiseksi. Vedentunkeumakokeiden tulokset ja tulosten keskiarvot on esitetty taulukoissa 19, 20 ja 21.

Koe numero 2, vedentunkeuma			
Koekappale	Koestusikä [d]	Vedentunkeuma [mm]	Tiheys [kg/m ³]
1	31	18	2210
2	31	40	2210
3	31	50	2140
Keskiarvo	31	36	2187

Taulukko 19. Koe numero 2, vedentunkeuma

Koe numero 3, vedentunkeuma			
Koekappale	Koestusikä [d]	Vedentunkeuma [mm]	Tiheys [kg/m ³]
1	31	12	2240
2	31	10	2260
3	31	15	2230
Keskiarvo	31	12	2243

Taulukko 20. Koe numero 3, vedentunkeuma

Koe numero 6, vedentunkeuma			
Koekappale	Koestusikä [d]	Vedentunkeuma [mm]	Tiheys [kg/m ³]
1	31	10	2240
2	31	8	2230
3	31	8	2240
Keskiarvo	31	9	2237

Taulukko 21. Koe numero 6, vedentunkeuma

5.5 Kovettuneen ruiskubetonimassan laattakoe

Laattakokeessa koetettavat koelaatat olivat iältään 28 vuorokautta. Koelaattojen testaukset suoritettiin Contestan laboratorion kuormituskehän 200 kN:n tunkilla. Testauksen suorituksessa noudatettiin standardia SFS-EN 14488-5. Laatat kuormitettiin tasaisella kuormitusnopeudella $1,0 \pm 0,1$ mm/min. Laattojen alapinnan keskipisteen taipuma mitattiin SDP-100C -mallisella siirtymäanturilla.

Taulukossa 22 on esitetty kokeiden 2, 3, ja 6 laattakokeessa koestettujen koelaattojen tulosten keskiarvot.

Koe numero	Kuitu	Murto-kuorma [kN]	Maksimi-kuorma [kN]	Energianabsorptio 25 mm taipumaan [J]	SFS-EN 14487-1 luokka
2	B	26,5	38,9	803	E700
3	A	35,9	46,4	912	E700
6	A	39,3	49,6	895	E700

Taulukko 22. Laattakokeiden tulosten keskiarvot

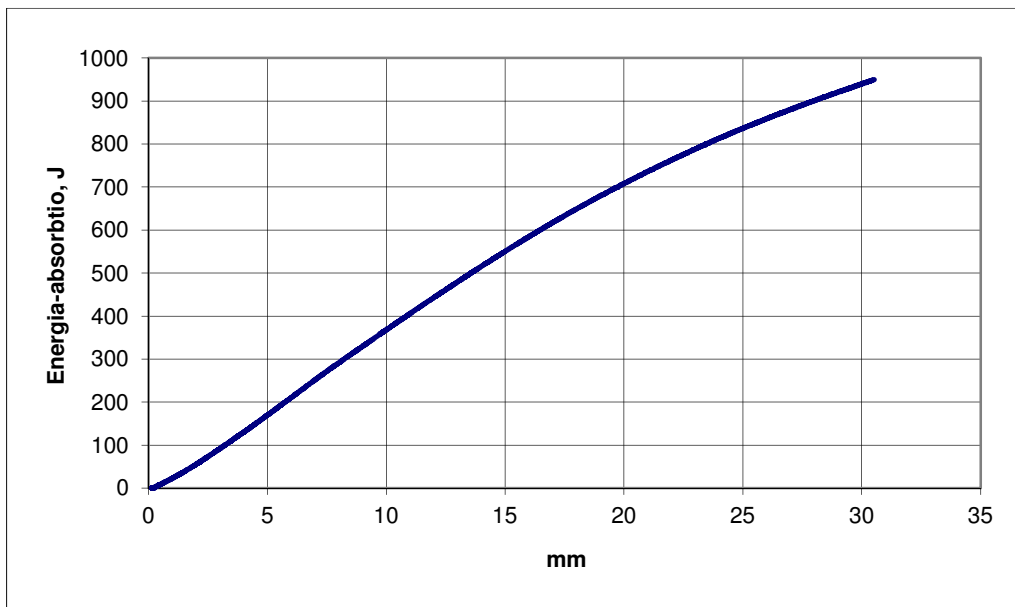
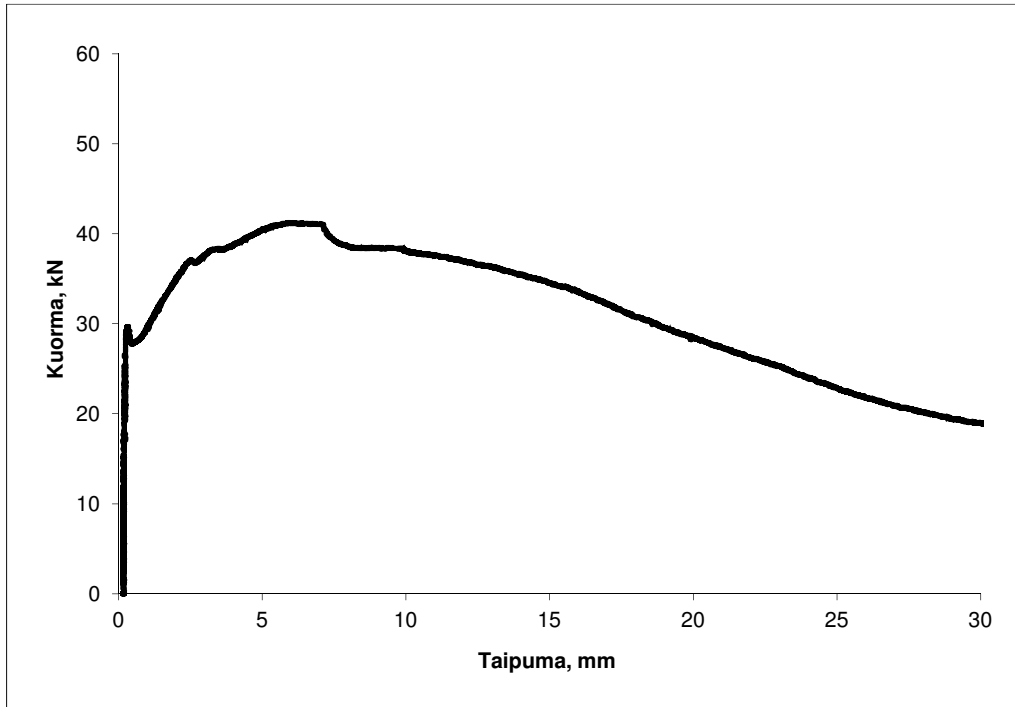
Kuvissa 14–25 on esitetty koestettujen koelaattojen kuormitusmuodonmuutoskäyrät ja energianabsorptiokuvaajat. Näiden kuvien yhteenveto on kerätty taulukkoon 23. Osassa kuvista 14–25 kuormitusmuodonmuutoskäyrän poikkeava paksuus johtuu painuma-anturin lähettämästä häiriösignaalista. Häiriöllä ei ole vaikutusta koetulosten luotettavuuteen.

	Murtokuorma [kN]			Maksimikuorma [kN]			Energianabsorptio 25 mm taipumaan [J]		
	Koe numero			Koe numero			Koe numero		
Laatta	2	3	6	2	3	6	2	3	6
1	29,6	40,0	39,7	41,2	44,5	52,3	841	822	940
2	29,2	31,3	24,2	43,5	49,0	40,1	896	966	760
3	22,6	40,3	39,8	37,8	50,3	52,3	804	1020	950
4	24,4	31,8	53,4	33,3	41,9	53,6	670	839	930

Taulukko 23. Laattakokeiden tulokset

Näyte: Nro B1
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu B
Kuitumäärä: 7 kg/m³

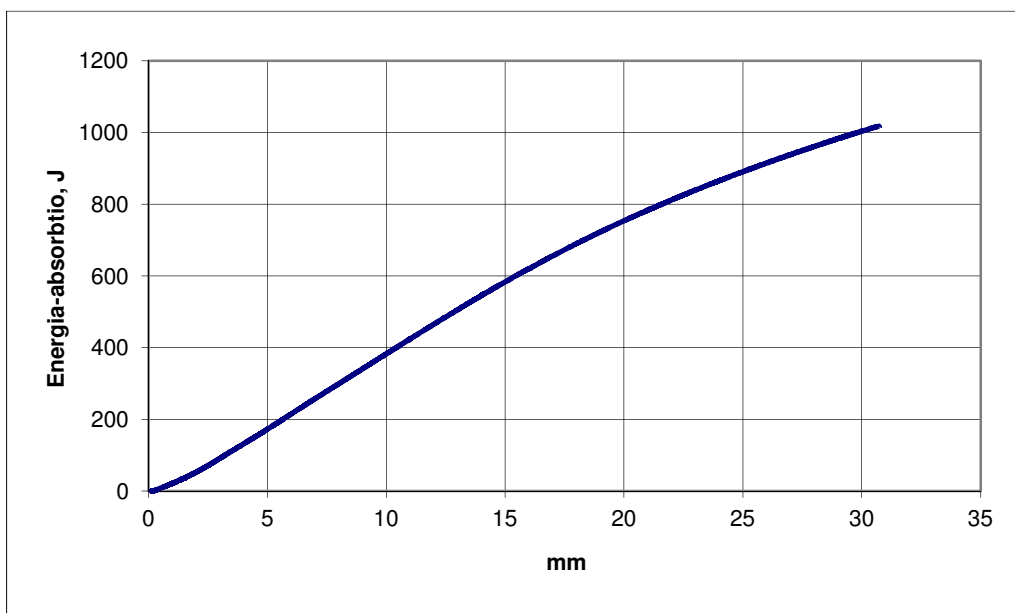
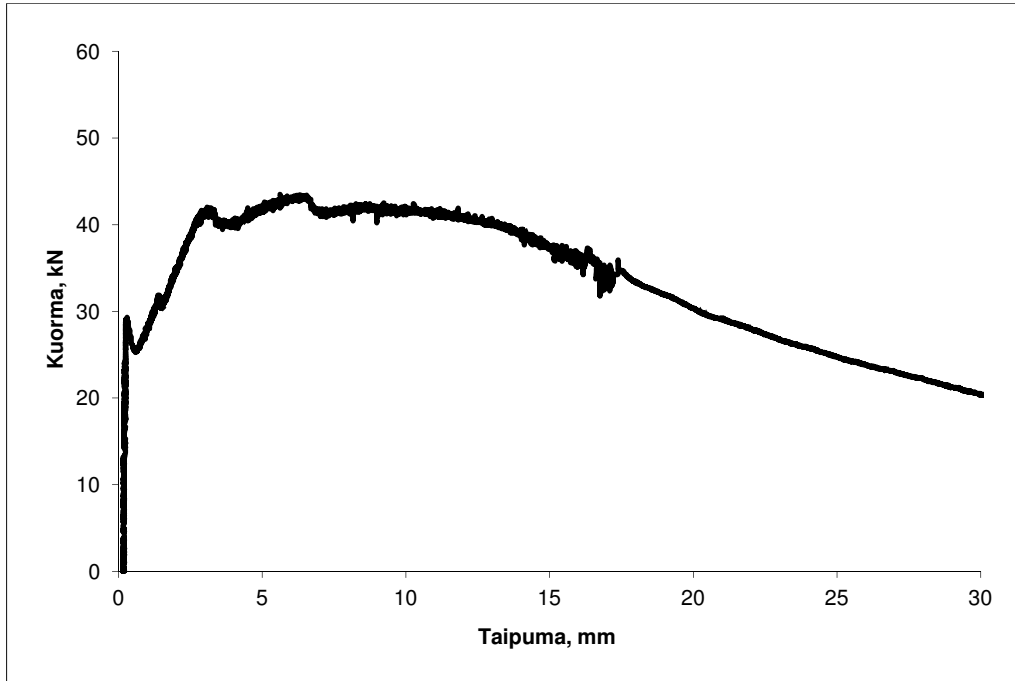


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	598*598*101
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	29,6
<i>Suurin voima (kN)</i>	41,2
<i>Energia-absorbtio 25 mm kohdalla (J)</i>	841

Kuva 14. Koe numero 2, kuitu B, laatta 1

Näyte: Nro B2
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu B
Kuitumäärä: 7 kg/m³

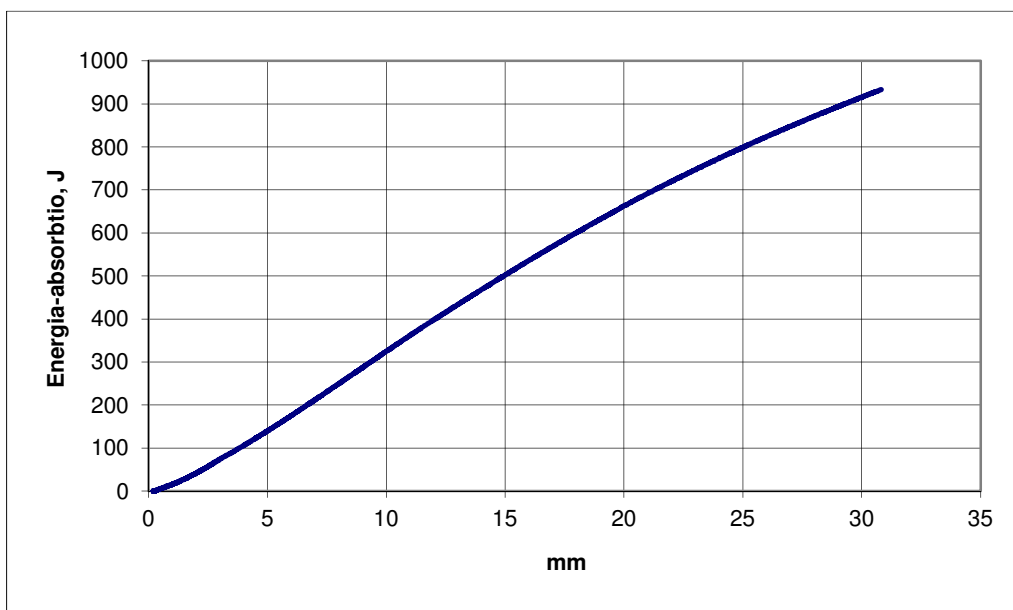
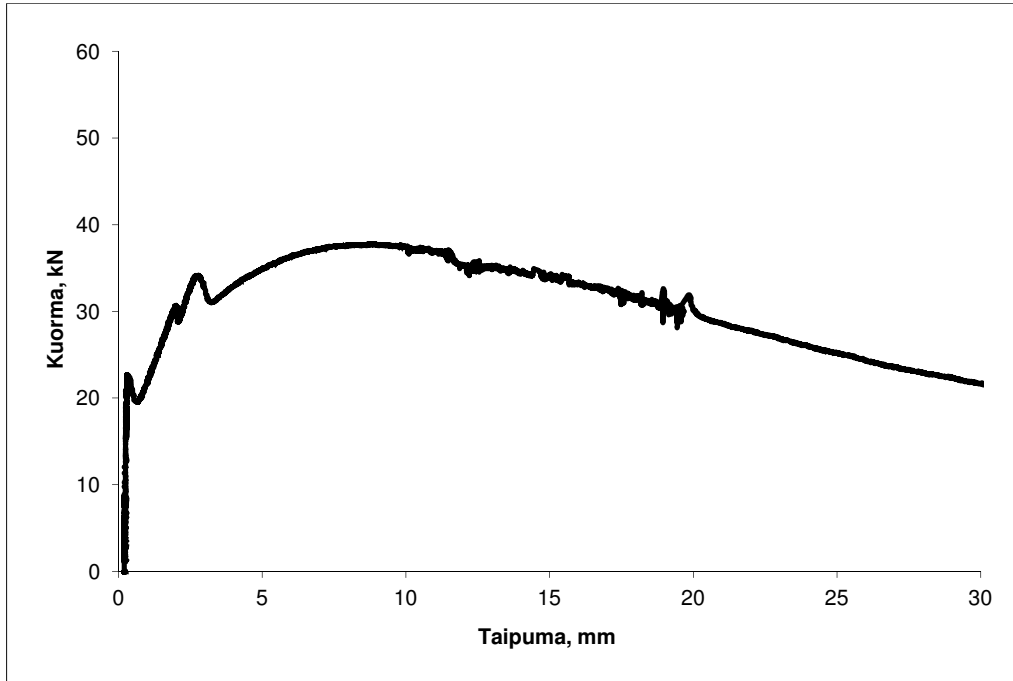


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	600*596*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	29,2
<i>Suurin voima (kN)</i>	43,5
<i>Energia-absorbtio 25 mm kohdalla (J)</i>	896

Kuva 15. Koe numero 2, kuitu B, laatta 2

Näyte: Nro B3
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu B
Kuitumäärä: 7 kg/m³

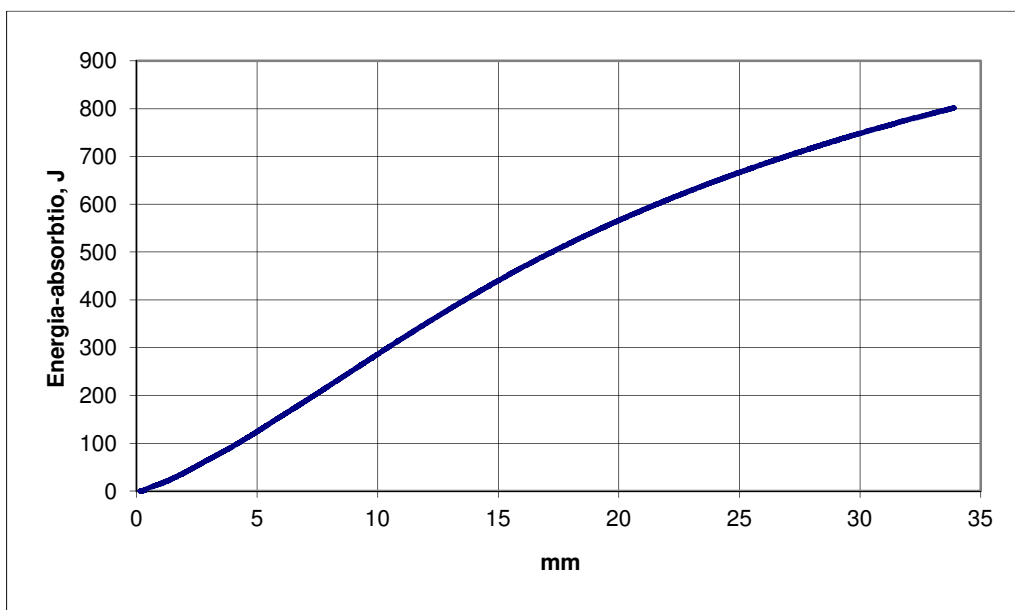
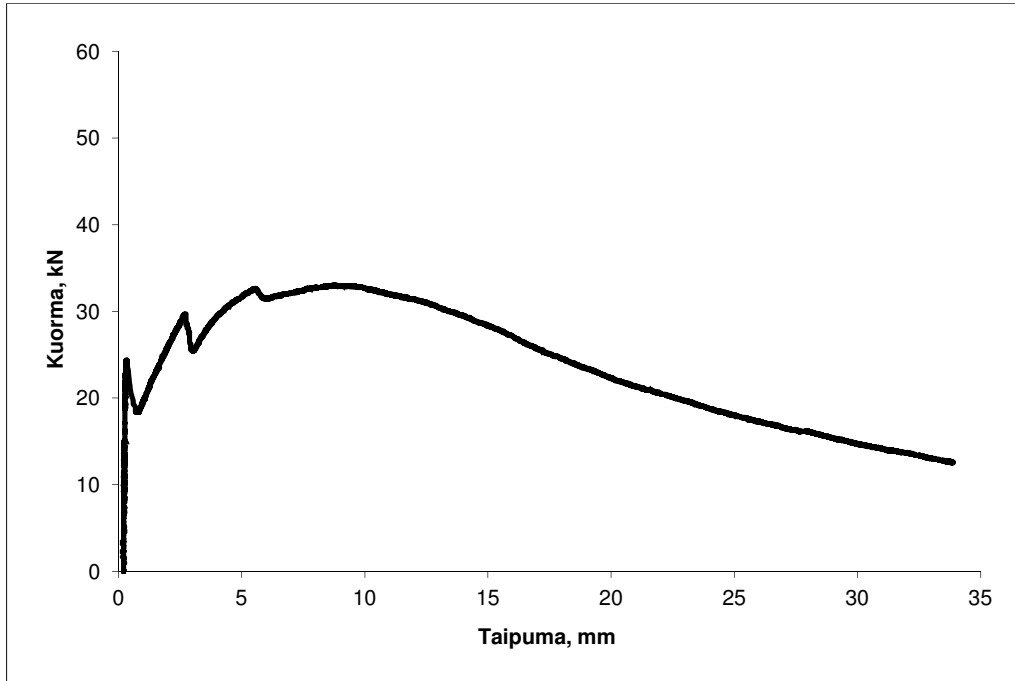


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	598*598*101
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	22,6
<i>Suurin voima (kN)</i>	37,8
<i>Energia-absorbtio 25 mm kohdalla (J)</i>	804

Kuva 16. Koe numero 2, kuitu B, laatta 3

Näyte: Nro B4
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu B
Kuitumäärä: 7 kg/m³

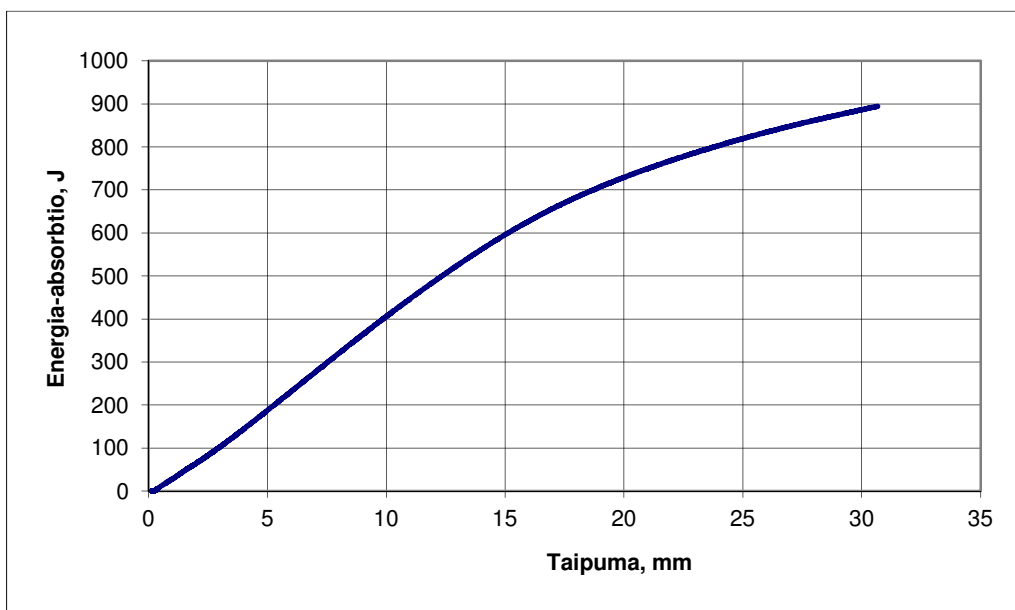
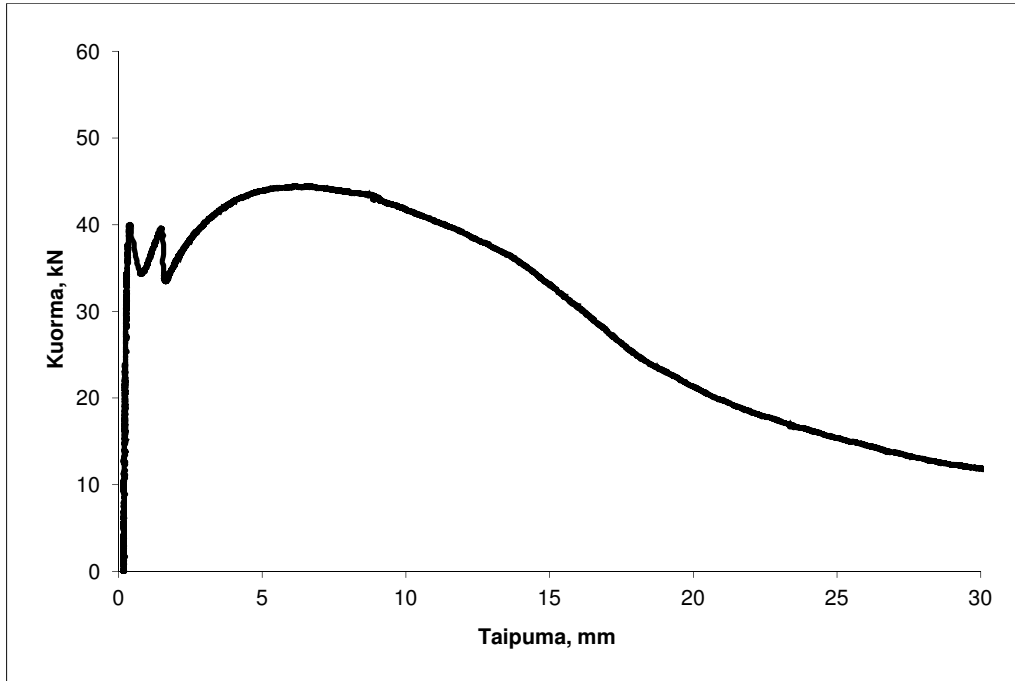


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	599*599*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	24,4
<i>Suurin voima (kN)</i>	33,0
<i>Energia-absorbtiio 25 mm kohdalla (J)</i>	670

Kuva 17. Koe numero 2, kuitu B, laatta 4

Näyte: Nro A1
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7 kg/m³

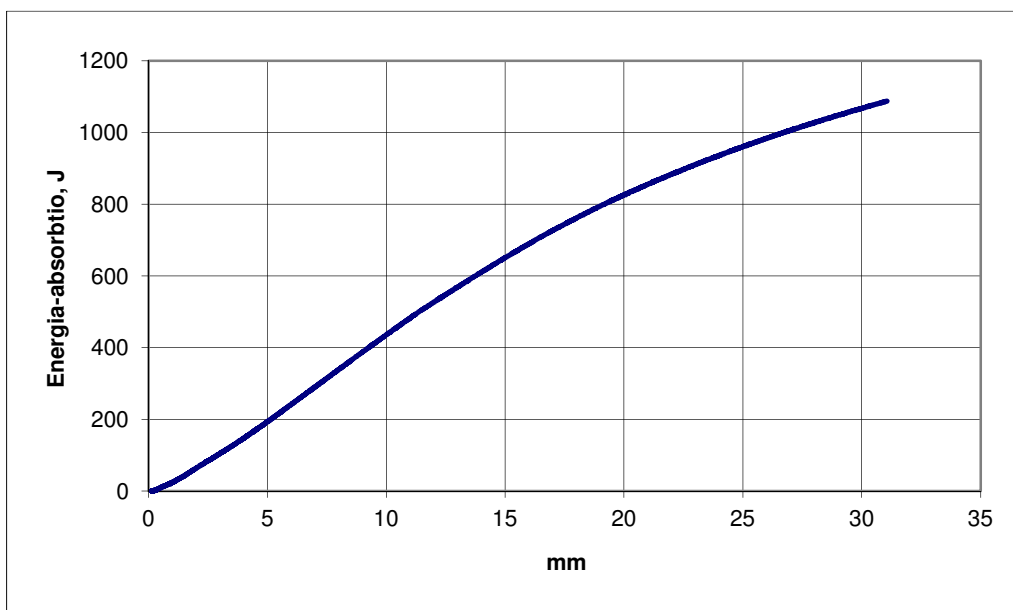
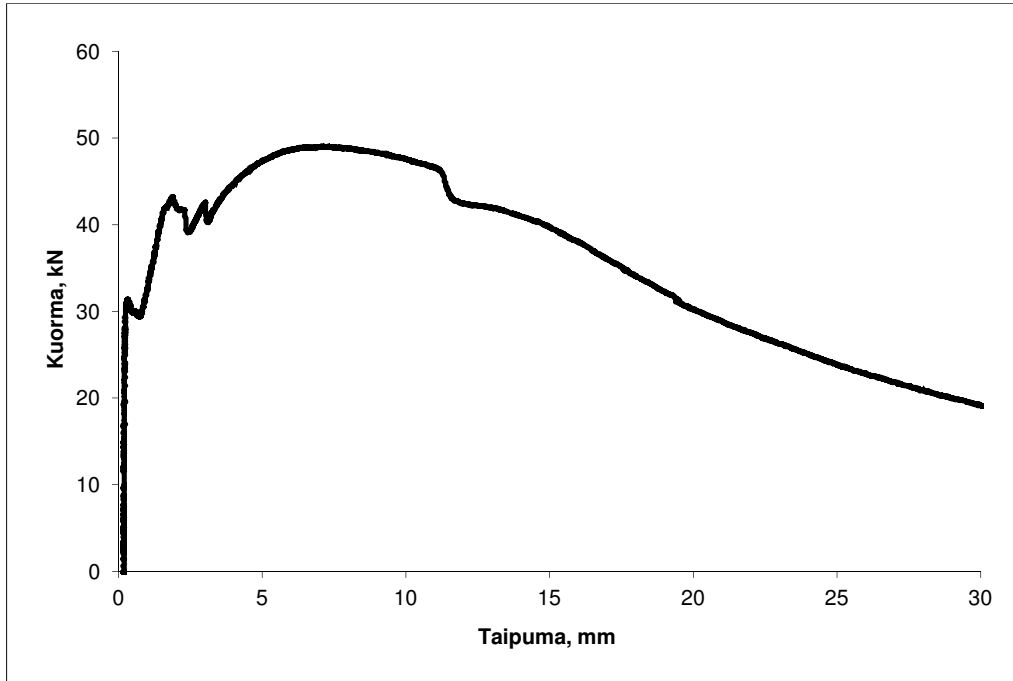


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	598*600*101
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	40,0
<i>Suurin voima (kN)</i>	44,5
<i>Energia-absorbtiio 25 mm kohdalla (J)</i>	822

Kuva 18. Koe numero 3, kuitu A, laatta 1

Näyte: Nro A2
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7 kg/m³

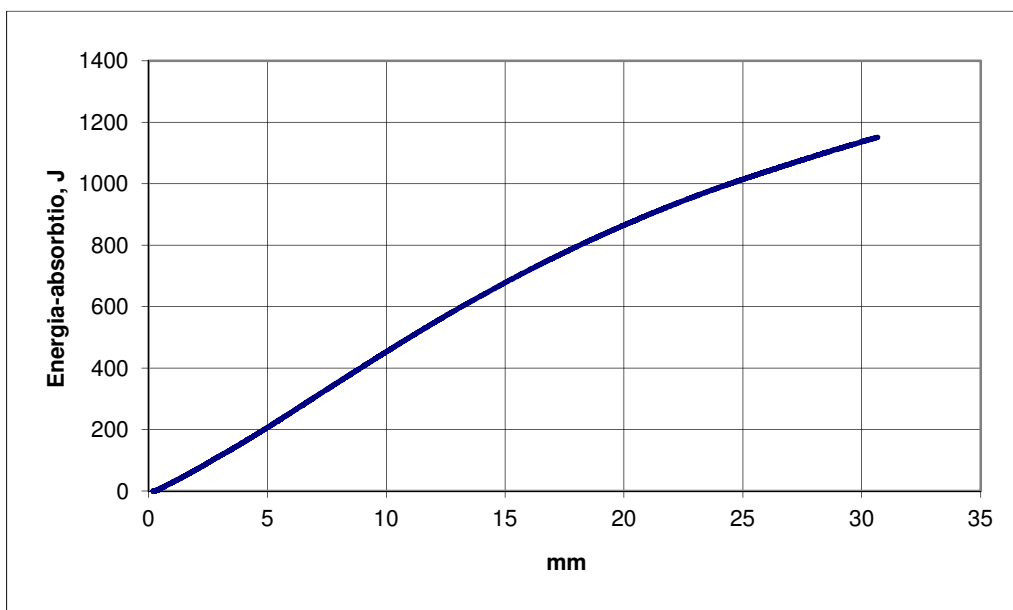
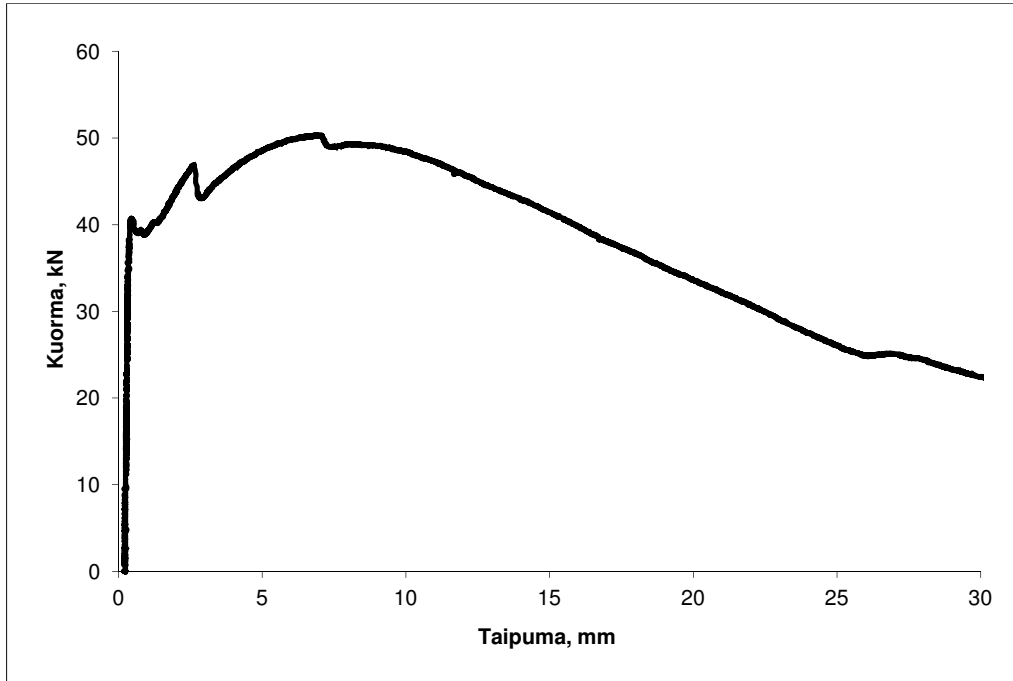


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	599*600*99
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	31,3
<i>Suurin voima (kN)</i>	49,0
<i>Energia-absorbtiio 25 mm kohdalla (J)</i>	966

Kuva 19. Koe numero 3, kuitu A, laatta 2

Näyte: Nro A3
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7 kg/m³

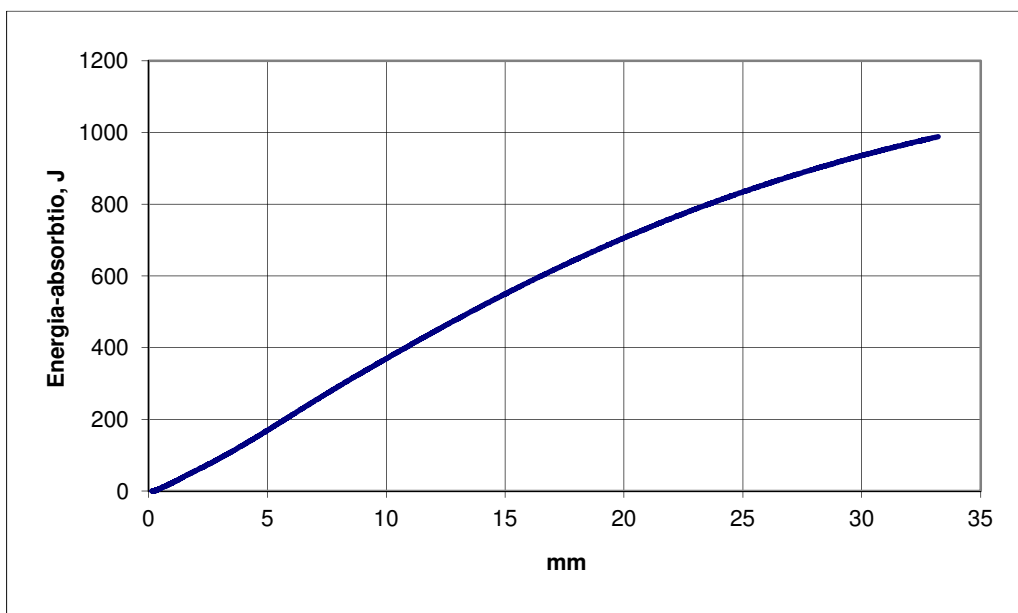
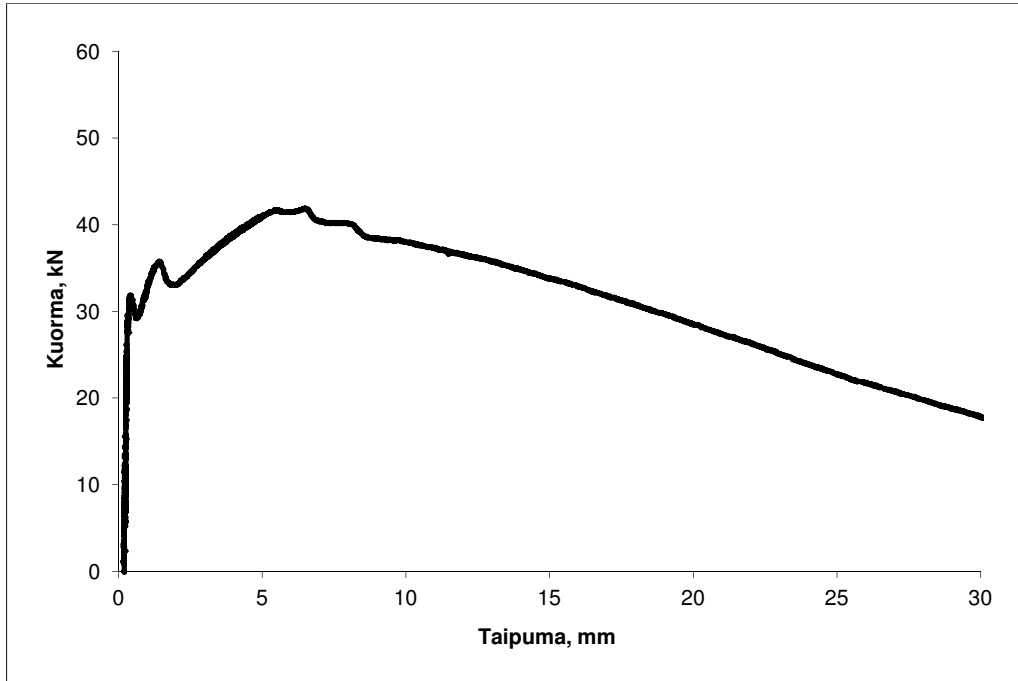


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	601*598*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	40,4
<i>Suurin voima (kN)</i>	50,3
<i>Energia-absorbtiio 25 mm kohdalla (J)</i>	1020

Kuva 20. Koe numero 3, kuitu A, laatta 3

Näyte: Nro A4
Päiväys: 21.10.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 23.9.2011
Testausikä: 28 vrk
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7 kg/m³

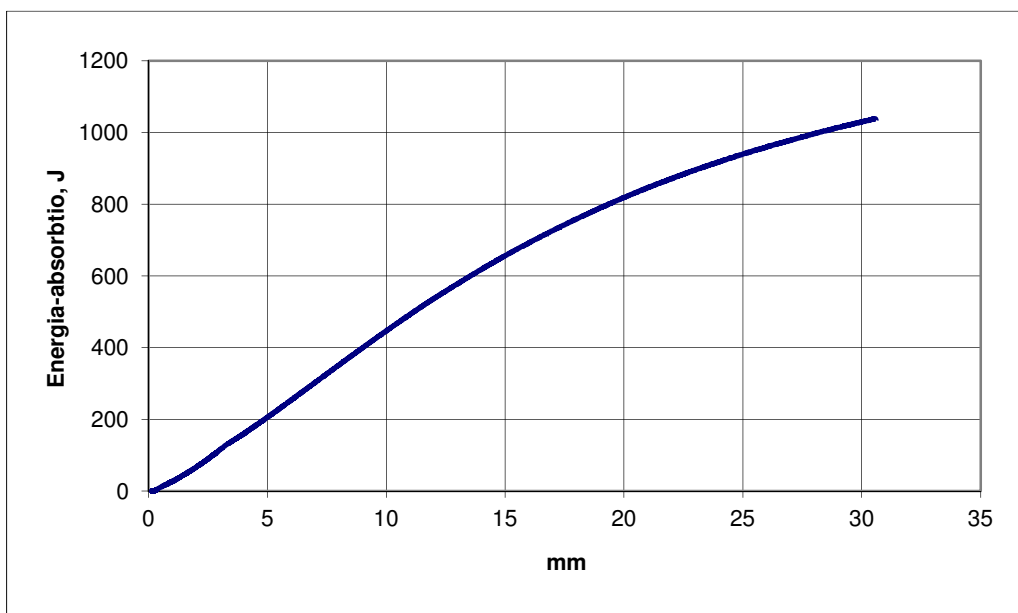
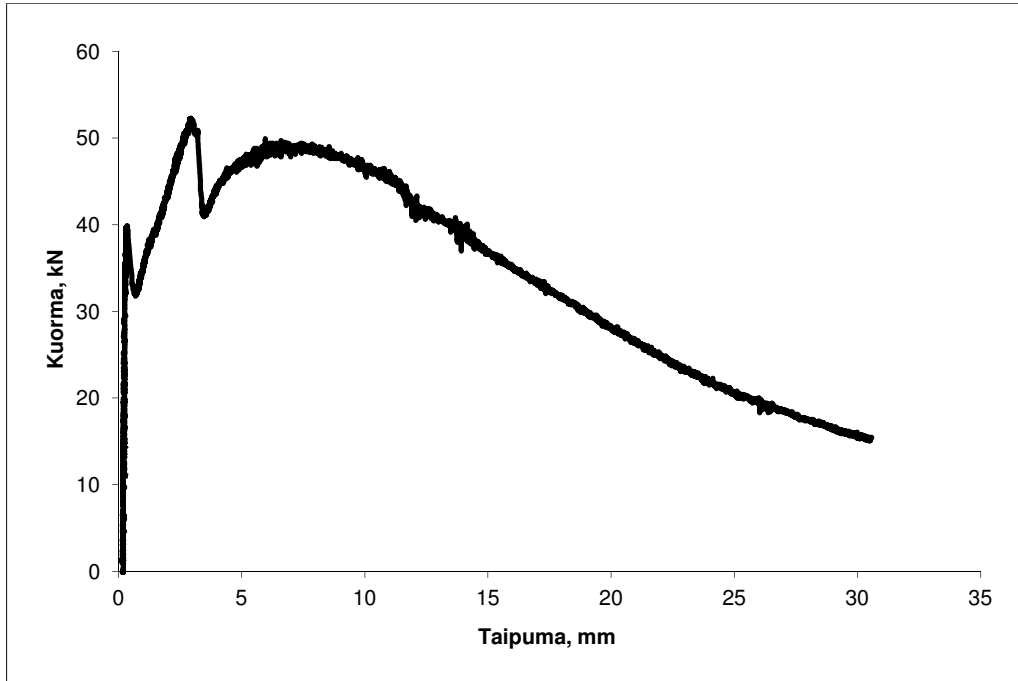


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	601*599*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	31,8
<i>Suurin voima (kN)</i>	41,9
<i>Energia-absorbtio 25 mm kohdalla (J)</i>	839

Kuva 21. Koe numero 3, kuitu A, laatta 4

Näyte: Nro 2A1
Päiväys: 25.11.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 28.10.2011
Testausikä: 28 vrk.
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7.56 kg/m³

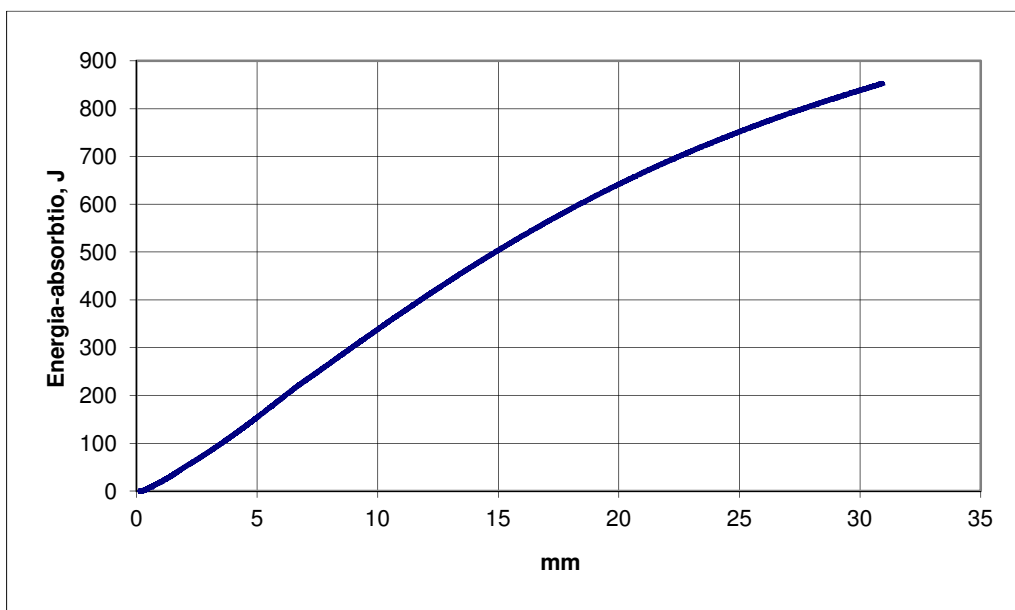
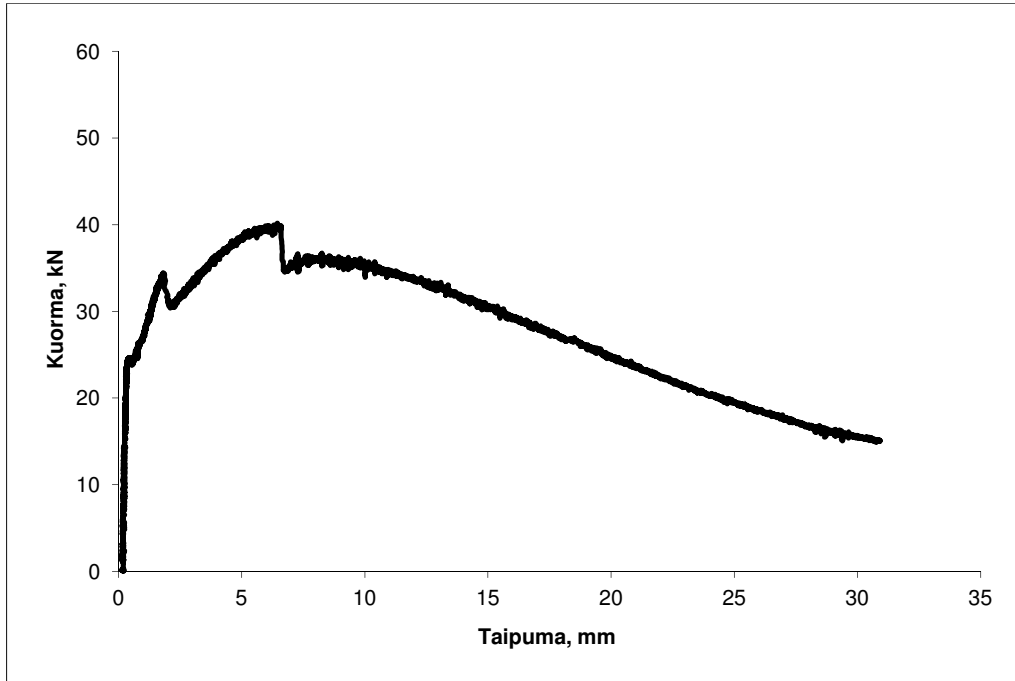


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	600*601*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	39,7
<i>Suurin voima (kN)</i>	52,3
<i>Energia-absorbtio 25 mm kohdalla (J)</i>	940

Kuva 22. Koe numero 6, kuitu A, laatta 1

Näyte: Nro 2A2
Päiväys: 25.11.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 28.10.2011
Testausikä: 28 vrk.
Kuitutyypä: Kuitu A
Kuitumäärä: 7.56 kg/m³

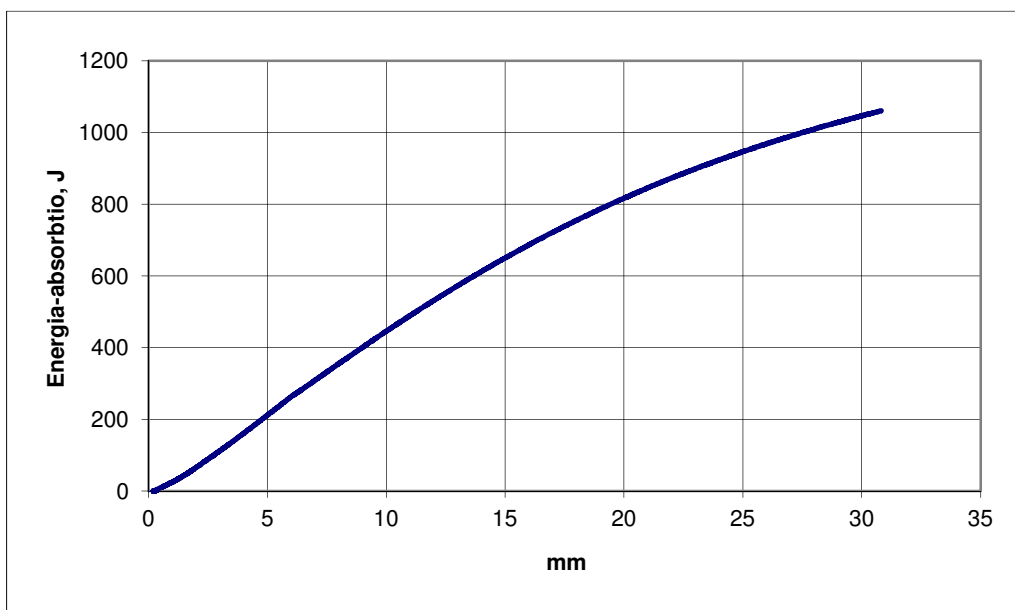
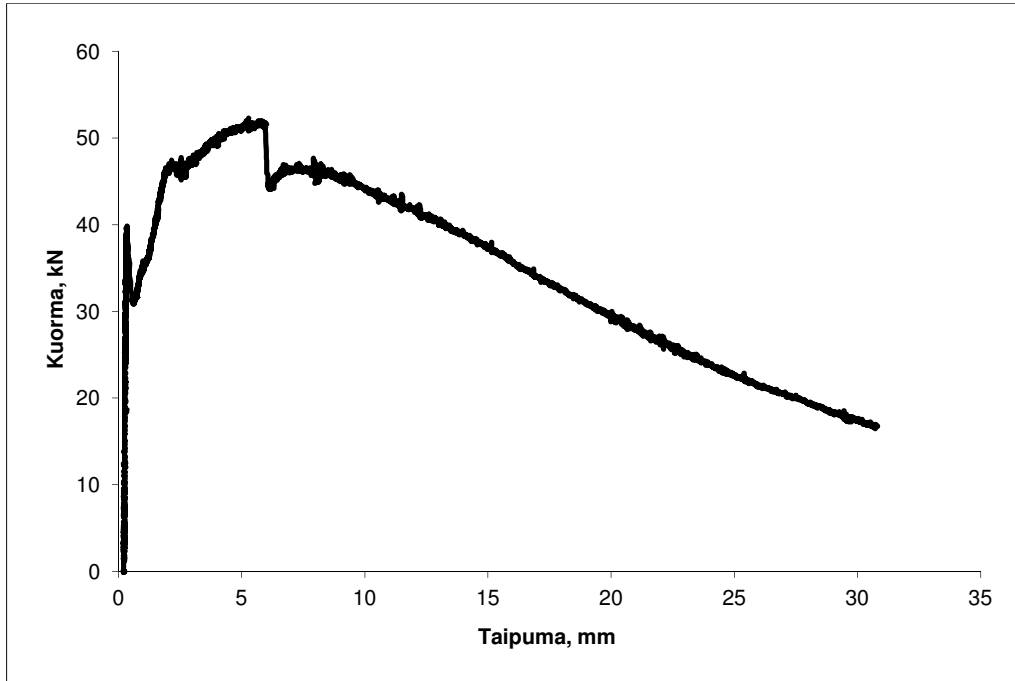


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	600*600*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	24,2
<i>Suurin voima (kN)</i>	40,1
<i>Energia-absorbtiio 25 mm kohdalla (J)</i>	760

Kuva 23. Koe numero 6,kuitu A, laatta 2

Näyte: Nro 2A3
Päiväys: 25.11.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 28.10.2011
Testausikä: 28 vrk.
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7.56 kg/m³

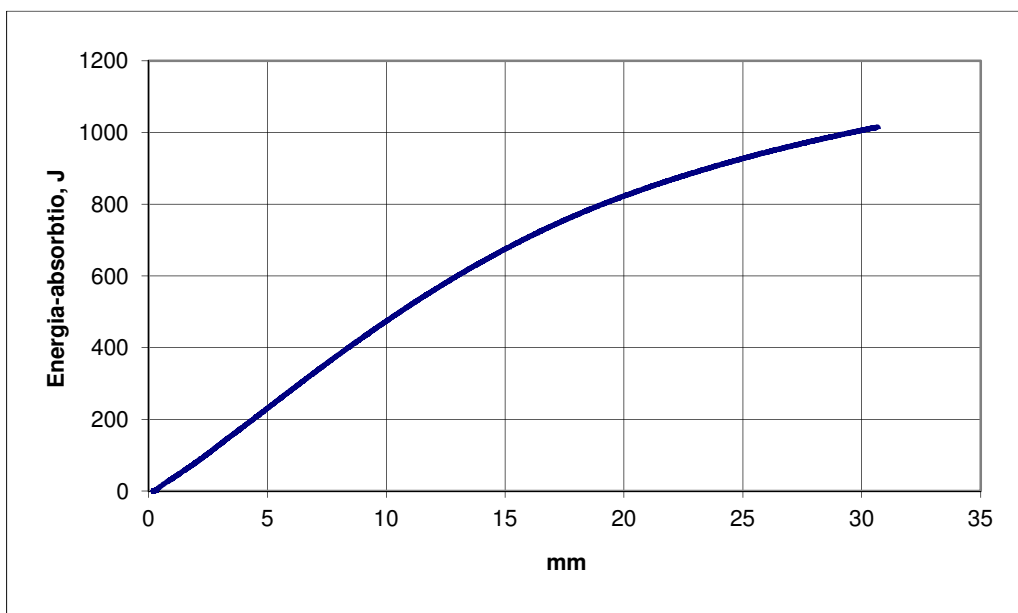
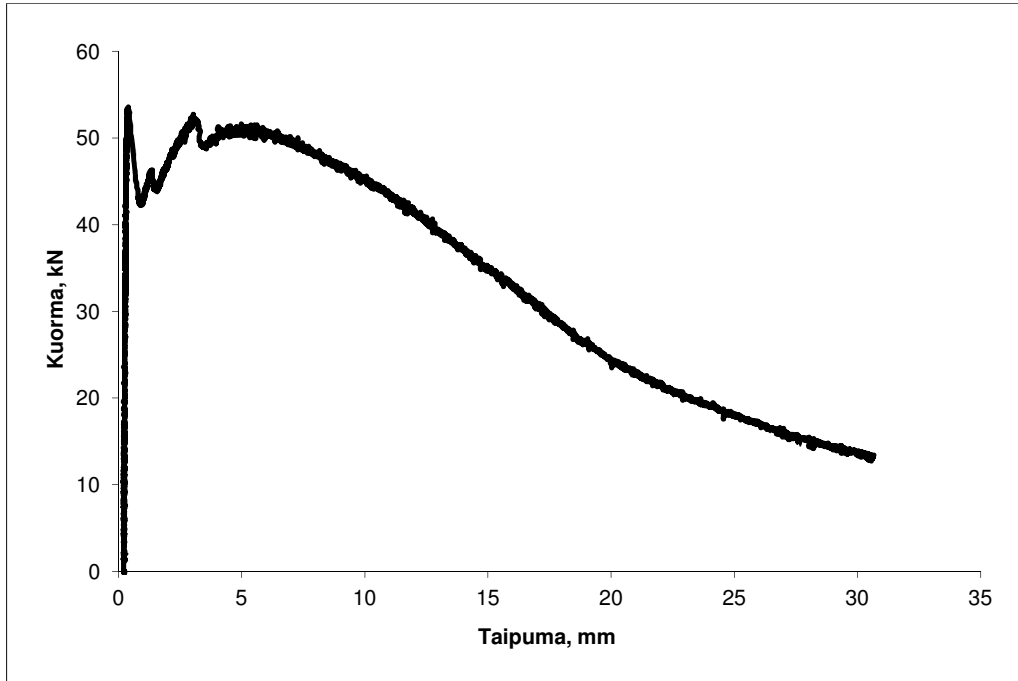


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	602*601*101
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	39,8
<i>Suurin voima (kN)</i>	52,3
<i>Energia-absorbtio 25 mm kohdalla (J)</i>	950

Kuva 24. Koe numero 6, kuitu A, laatta 3

Näyte: Nro 2A4
Päiväys: 25.11.2011
Suorittaja: Harri Virta

Valm.pvm.: 28.10.2011
Testausikä: 28 vrk.
Kuitutyyppi: Kuitu A
Kuitumäärä: 7.56 kg/m³

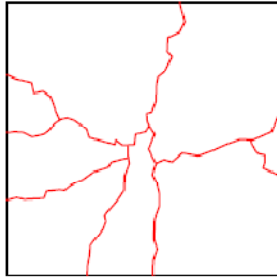


<i>Kappaleen mitat (Sivu1*sivu2*paksuus, mm)</i>	600*601*100
<i>Siirtymän nopeus (mm/min)</i>	1,0
<i>Ensimmäinen halkeama (kN)</i>	53,4
<i>Suurin voima (kN)</i>	53,6
<i>Energia-absorbtiio 25 mm kohdalla (J)</i>	930

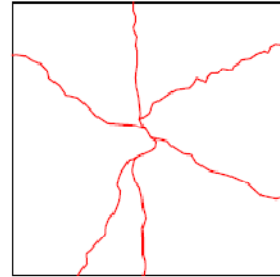
Kuva 25. Koe numero 6, kuitu A, laatta 4

Kuvissa 26, 27 ja 28 on mallinnettu kokeiden numero 2, 3 ja 6 laattakokeessa koestettujen koelaattojen murtokuvioita. Kuviot on piirretty Auto-Cad-ohjelmalla laatoista otettujen valokuvien perusteella.

B1



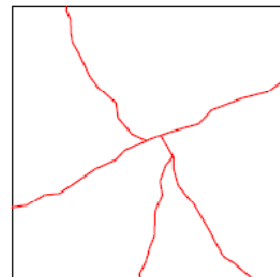
B2



B3



B4

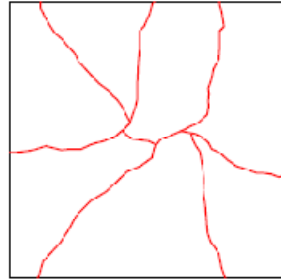


Kuva 26. Koe numero 2 laattojen murtokuviot

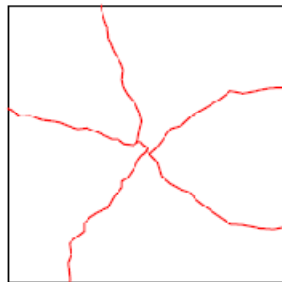
A1



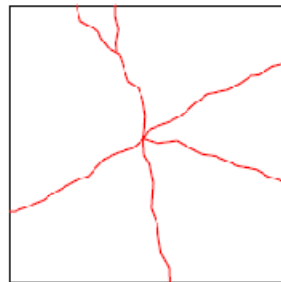
A2



A3



A4



Kuva 27. Koe numero 3 laattojen murtokuviot

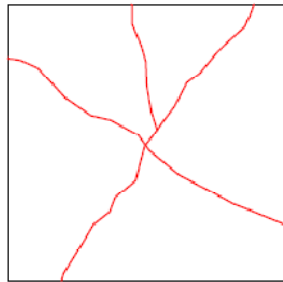
2A1



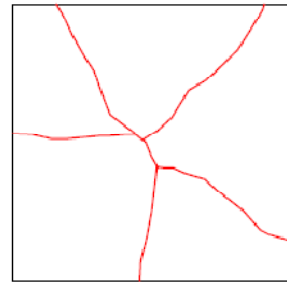
2A2



2A3



2A4



Kuva 28. Koe numero 6 laattojen murtokuviot

6 Tulosten analysointi

Jotta polymeerikuituvahvistettua ruiskubetonia voidaan käyttää osana kallionlujista, tulee sen täyttää seuraavat rakennusselostuksessa esitetyt määräykset ja vaatimukset.

- Ruiskuttaessa massan notkeus ei saa olla notkeusluokkaa S3 notkeampaa.
- Kuitupitoisuus ruiskutetussa rakenteessa on oltava $\geq 5,6 \text{ kg/m}^3$.
- Kiihdyttimen puristuslujuutta alentavan vaikutuksen takia puristuslujuus ei saa pudota yli 20 %:a verrattuna kiihdytetyn ja kiihdyttämättömän massan välillä.
- Betonin 28 vuorokauden puristuslujuuden tulee olla $\geq 40 \text{ N/mm}^2$.
- Paineellisen veden sallittu tunkeumasyvyyys on $\leq 50 \text{ mm}$.
- Ruiskubetonin energianabsorptioluokka polymeerikuidulla vahvistetussa ruiskubetonissa on oltava luokkaa E1000.
- EFNARC-laattakokeessa kuormituksen maksimikuorman on oltava $\geq 50 \text{ kN}$.

Kokeista saatujen kuitupitoisuustuloksien perusteella rakenteessa vaadittu $5,6 \text{ kg/m}^3$ kuitumäärä ylittyi kokeissa 4, 6 ja 7. Kokeista 2 ja 3 saadut kuitupitoisuudet alittivat vaaditun rajan. Osaltaan syynä siihen oli kuitujen pieni mitoitusmäärä, puutteellinen näytteenottotekniikka ja ruiskutettavan massan liian suuri pumppausnopeus.

Hukkaprosenttia laskiessa ei ole otettu huomioon kokeiden 2 ja 3 seinänäytteiden tuloksia. Kokeista 4, 6 ja 7 saadut tulokset antavat todellisemman kuvan kuidunhukasta. Näiden kokeiden perusteella kuitu A:n hukkaprosentiksi saadaan noin luokkaa $14 \% \pm 3$ prosenttiyksikköä. Edellä mainittujen kokeiden 4, 6 ja 7 tulosten vaihtelua selittää osaltaan kokeissa käytetty eri ruiskutuskalusto, ruiskutettavan massan pumppausnopeus ja eri ruiskuttaja.

Kokeiden 2 ja 3 seinänäytteiden kuitupitoisuustulosten perusteella, vaikka tulokset olivatkin lähinnä suuntaa antavia, massaansa lisättävää kuituannosta päätettiin nostaa. Kuitu A:lla kuituannoksen kasvattaminen ei suuresti vaikuttanut betonimassan työstettävyyteen toisin kuin kuitu B:llä. Koe numero 5 tehtiin kuitu

B:llä annoksena 8kg/m^3 . Kuidun lisäys teki massasta niin sitkeää ja jäykkää, ettei ruiskubetonimassa mennyt enää ruiskurobotin linjastosta läpi. Kokeiden 2 ja 3 laboratoriotulosten valmistuttua ja kokeen numero 5 epäonnistumisen jälkeen päätettiin kokeita jatkaa pelkästään kuitu A:lla. Huomioitavaa oli kokeissa 2 ja 3 suoraan betoniautosta otettujen näytteiden kuitupitoisuuksien tulokset (sivu 25, taulukko 9). Tulosten perusteella kuitu B sekoittui massan sekaan huomattavasti kuitu A:ta heikommin.

Kokeista saatuja ruiskubetonin puristuslujuustuloksien vaatimustenmukaisuutta on arvioitu standardissa SFS-EN 14887-1 kohdassa 7.5.1.2 olevan taulukon 13 perusteella. Koesarjoissa käytetyn ruiskubetonin minimilujuusluokka on rakennuslainsäädännössä määrätty C30/37:ksi, mutta rasitusluokka XC3 nostaa vaaditun K arvon 40 N/mm^2 . Edellä mainitun standardin taulukkoa 13 tulkittaessa puristuslujuuksien minimiarvoksi saadaan, että kokeen koekappaleiden keskiarvon tulee olla $\geq 44\text{ N/mm}^2$ ja yksittäisen koekappaleen tuloksen $\geq 36\text{ N/mm}^2$. Kokeista saatujen puristuslujuustuloksien sarjassa yksittäisen koekappaleen puristuslujuus ei saa poiketa tulosten keskiarvosta enemmän kuin $\pm 20\%$:a. (5)

Puristuslujuustuloksia tarkastellessa kokeiden 2 ja 3 puristuslujuuksien keskiarvot jäivät alle vaaditun 44 N/mm^2 tuloksen. Muutenkin edellä mainittujen kokeiden tulokset poikkesivat toisistaan varsin paljon vaikka kokeista betoniasemalla otettujen koekappaleiden puristuslujuudet olivat päinvastaisia. Niissä kokeen 2 koekappaleet saavuttivat suuremman puristuslujuuden kuin kokeen 3.

Vaikka kokeessa 6 tuoreenmassan painuma oli asemalla mitattuna 185 millimetriä, niin kaikkien koekappaleiden puristuslujuuksien keskiarvo ylitti vaaditun 44 N/mm^2 :n rajan, myös kokeen yksittäiset koekappaleet ylittivät vaaditun 36 N/mm^2 tuloksen. Suurin yksittäisen tuloksen poikkeama tulosten keskiarvosta oli kiihdyttämättömällä ruiskubetonilla 14% :a ja kiihdyttimellä ruiskuttaessa luokkaa 4% :a. Myös vaatimus kiihdyttämättömän ja kiihdytetyn betonin puristuslujuuksien prosentuaalisesta erotuksesta täyttyi. Erotus oli keskiarvoista lasketuna luokkaa $14,7\%$. Myöskään kuitumäärän nostaminen ei vaikuttanut koetulosten perusteella betonin lopulliseen puristuslujuuteen.

Standardissa SFS-EN 14887-1 kohdassa 7.5.1.3 vedentunkeuman maksimiarvoksi ilmoitetaan ruiskubetonirakenteessa ≤ 50 millimetriä. Vaatimusten mukaisuus täyttyy, kun koe-erän, joka käsittää vähintään 3 koekappaletta, vedentunkeuman keskiarvo alittaa kyseisen maksimiarvon. (5)

Paineellisen veden tunkeumasyyvyyskokeissa kaikki kokeiden 2, 3 ja 6 koekappaleiden keskiarvot jäivät huomattavasti alle sallitun 50 millimetrin tunkeuman. Kokeessa 2 yksi koekappale oli aivan sallitun rajalla ja tunkeuma oli tasan 50 millimetriä. Tässäkin kokeessa kokeiden 3 ja 6 tuloksissa oli huomattavia eroavaisuuksia kokeen 2 tuloksiin.

EFNARC-laattakokeista saatu energianabsorptiokapasiteettitulos on standardin SFS-EN 14887-1 kohdan 7.5.2.5 vaatimustenmukainen, kun koestetuista koe-laatoista vähintään kaksi kolmesta ylittää vaaditun energianabsorptioluokan. (5)

Mikään kokeista 2, 3 tai 6 ei yltänyt EFNARC-laattakokeessa rakennusselostuksen määräämään standardin SFS EN 14487-1 energianabsorptioluokkaan E1000. Kaikki edellä mainitut kokeet saavuttivat energianabsorptioluokan E700. Myös vaaditun 50 kN:n maksimikuorman rajan rikkoi kokeesta 3 ainoastaan yksi laatta ja kokeesta 6 kolme laattaa.

Laattakokeesta saatuja kuormitus-muodonmuutoskäyriä tarkastellessa, kokeen 6 laattaa 4 lukuun ottamatta, kaikkien koelaattojen käyrät olivat samanmallisia. Laattoja kuormittaessa betoni antaa periksi noin 0,3 millimetrin taipumalla, jonka jälkeen kuidut alkavat ottaa vaiheittain rasitusta vastaan. Muista poiketen kokeen 6 laatan 4 ensimmäisen halkeaman ja maksimikuorman arvot olivat lähes samoja, 53,4 kN ja 53,6 kN. Muissa laatoissa ensimmäisen halkeaman kuorma oli maksimikuormaa huomattavasti pienempi.

Kokeiden numero 2 ja 3 laattakokeiden maksimikuormat on saavutettu kokeessa 2 taipuman ollessa 6,2–8,5 millimetriä ja kokeessa 3 taipuman ollessa 5,8–6,7 millimetriä. Kokeessa 6, kun kuituannosta nostettiin 7,56 kg/m³:lta, niin koelaattojen 1, 3 ja 4 maksimikuormat saavutettiin jo 0,4–5,3 millimetrin taipuman välillä. Tosin koelaatan 2, jonka tulos oli koesarjan heikoin, maksimikuorma saavutettiin 6,5 millimetrin taipumalla. Laattojen taipumat on luettu Contestalta saaduista laattakokeiden raakadatoista.

Laattakokeiden tuloksia kokeista numero 3 ja 6 verrattaessa, kokeen 6 kuituanoksen nostamisella ei ollut toivottua vaikutusta. Kokeessa maksimikuorma kasvoi halutulle tasolle lähes kaikissa laatoissa, mutta energianabsorptiossa jäätiin jopa kokeen 3 alle.

Yhteenvetona saaduista koetuloksista on, ettei mikään kokeista 2, 3 tai 6 täyttänyt kaikkia rakennusselostuksessa esitettyjä vaatimuksia polymeerikuidulla vahvistetulle ruiskubetonille. Näin ollen joko kuitutyyppiä tai ruiskubetonimassan reseptiä tulee muuttaa, jotta kaikki rakennusselostuksessa vaaditut vaatimukset täyttyvät.

7 Päätelmät

Kokeisiin valittiin kokeiltavaksi kaksi toisistaan poikkeavaa rakenteellista polymeerikuitua. Kokeiden edetessä kuitujen erot niin massan valmistusvaiheessa, ruiskutuksessa kuin koekappaleiden tuloksissakin osoittautuivat mielestäni varsin suuriksi.

Betoniasemilta saamani palautteen perusteella polymeerikuiduilla vahvistetun ruiskubetonimassan valmistus on haasteellisempaa kuin metallikuiduilla vahvistetun massan. Osaltaan syynä tähän on varmasti rakenteellisen polymeerikuidun tähänastinen vähäinen käyttö ja siitä saadut kokemukset.

Polymeerikuidulla vahvistettua ruiskubetonia valmistessa massan sekoitusajalla on suuri vaikutus kuitujen tasaiseen sekoittumiseen massassa. Myös työmaalla pitää huolehtia siitä, että betoniautonkuljettaja sekoittaa massaa jonkin aikaa voimakkaammin ennen ruiskutuksen aloitusta, koska vettä kevyempänä kuidut erottuvat herkästi massan pinnalle kuljetuksen aikana.

Kokeiden onnistumisen kannalta ruiskubetonimassan oikeanlainen koostumus ja notkeus ovat ensiarvoisen tärkeitä. Myös työmaalla käytössä olevalla kalustolla, kaluston kunnolla ja henkilökunnalla on suuri vaikutus koetuloksiin ja kokeiden onnistumiseen. Mielestäni kokeet tulisi suorittaa samalla kalustolla ja henkilökunnalla, joilla itse rakenteen lopullinen ruiskutuskin tapahtuu.

Kun ruiskutetaan polymeerikuidulla vahvistettua ruiskubetonimassaa, ruiskubetonirobotin pumppausnopeus tulisi pitää 12...17 m³/h välillä, koska yksittäiset kuidut ovat hyvin kevyitä ja suuremmalla pumppausnopeudella kuidunhukka-prosentti nousee huomattavasti. Verrattaessa esimerkiksi kokeiden 4 ja 6 seinästä otettujen kuitupitoisuusnäytteiden tuloksia kokeessa 4 kuidun annostus oli 8 kg/m³ ja kokeessa 6 annostus oli 7,56 kg/m³. Kokeen 4 suuremmasta kuituannostuksesta huolimatta kokeen 6 kuitupitoisuus oli koetta 4 hieman suurempi.

Massan ruiskutettavuudessa valituilla kuitutyypeillä oli huomattavia eroja. Kuitu A:lla vaikka annosta nostettiin, niin massa säilyi ruiskutuskelpoisena, toisin kuin kuitu B:llä joka teki massasta hyvin jäykkää ja sitkeää. Tämän havaitsi hyvin myös kokeiden 2 ja 3 ruiskutuksen aikana. Kokeessa 2 massaa joutui autta-

maan käsin ruiskubetonirobotin purkusuppilon ritilän läpi, kun taas kokeessa 3 massan purku onnistui ongelmitta vaikka massa oli valmistusvaiheessa kokeen 2 massaa jäykempää.

Vaikka mikään kokeista 2, 3 tai 6 ei täyttänyt kaikkia rakennusselostuksessa esitettyjä vaatimuksia eikä näin ollen saavuttanut hyväksytyä koetulosta, niin kasvattamalla kuituannosta tai kuitutyyppejä ja/ tai ruiskubetonimassan reseptiä muuttamalla hyväksyty tulos olisi varmasti mahdollinen. Myös itse koeruiskutuksessa tulisi ottaa huomioon ruiskubetonirobotin kunto ja toimintavarmuus sekä ruiskuttajan ammattitaito.

Kuvat

- Kuva 1. Vebe-laite, s. 9
Kuva 2. Koestettava laatta on saavuttanut 30 millimetrin taipuman, s. 15
Kuva 3. Kuormitus muodonmuutuskäyrä, s. 15
Kuva 4. Absorpoituneen energian kuvaaja, s. 16
Kuva 5. Kuitu A ja kuitu B, s. 17
Kuva 6. Kuitujen huuhdontaan käytetyt välineet, s. 19
Kuva 7. Kuitujen huuhdonta, s. 20
Kuva 8. Kuivatut kuitunäytteet, s. 21
Kuva 9. Kuitujen punnituksessa käytetty vaaka, s. 21
Kuva 10. Koelaattojen sahaamiseen käytetty timanttisaha ja sahatut koelaatat, s. 22
Kuva 11. Sahatut EFNARC-laatat, s. 22
Kuva 12. Kuormituskehä ja siirtymäanturi, s. 23
Kuva 13. Puristuslujuuden ja vedentunkeuman määrittäminen, s. 23
Kuva 14. Koe numero 2, kuitu B, laatta 1, s. 32
Kuva 15. Koe numero 2, kuitu B, laatta 2, s. 33
Kuva 16. Koe numero 2, kuitu B, laatta 3, s. 34
Kuva 17. Koe numero 2, kuitu B, laatta 4, s. 35
Kuva 18. Koe numero 3, kuitu A, laatta 1, s. 36
Kuva 19. Koe numero 3, kuitu A, laatta 2, s. 37
Kuva 20. Koe numero 3, kuitu A, laatta 3, s. 38
Kuva 21. Koe numero 3, kuitu A, laatta 4, s. 39
Kuva 22. Koe numero 6, kuitu A, laatta 1, s. 40
Kuva 23. Koe numero 6, kuitu A, laatta 2, s. 41
Kuva 24. Koe numero 6, kuitu A, laatta 3, s. 42
Kuva 25. Koe numero 6, kuitu A, laatta 4, s. 43
Kuva 26. Koe numero 2 laattojen murtokuviot, s. 44
Kuva 27. Koe numero 3 laattojen murtokuviot, s. 45
Kuva 28. Koe numero 6 laattojen murtokuviot, s. 46

Taulukot

- Taulukko 1. Betonin rasitusluokat (8), s. 8
Taulukko 2. Vebe-luokat (8), s. 10
Taulukko 3. Painumaluokat (8), s. 11
Taulukko 4. Energianabsorptioluokkien määritelmät (5), s. 16
Taulukko 5. Koe-erille tehdyt kokeet, s. 18
Taulukko 6. Koekerrat ja kokeiden ajankohta, s. 24
Taulukko 7. Betoniasemalla tehtyjen painumakokeiden tulokset, s. 25
Taulukko 8. Seinänäytteiden kuitupitoisuudet ja kuitujen hukkaprocentit, s. 25
Taulukko 9. Betoniautosta otettujen näytteiden kuitupitoisuus, s. 25
Taulukko 10. Puristuskokeiden keskiarvot ja keskihajonta, s. 26
Taulukko 11. Koe numero 2, puristuslujuus ja tiheys, s. 27
Taulukko 12. Koe numero 2, puristuslujuus, ilman kiihdytintä, s. 27
Taulukko 13. Koe numero 3, puristuslujuus ja tiheys, s. 27
Taulukko 14. Koe numero 3, puristuslujuus, ilman kiihdytintä, s. 28

- Taulukko 15. Koe numero 6, puristuslujuus ja tiheys, s. 28
 Taulukko 16. Koe numero 6, puristuslujuus ja tiheys, ilman kiihdytintä, s. 28
 Taulukko 17. Koe numero 5, puristuslujuus, 7 vuorokautta, s. 29
 Taulukko 18. Koe numero 5, puristuslujuus 28 vuorokautta, s. 29
 Taulukko 19. Koe numero 2, vedentunkeuma, s. 30
 Taulukko 20. Koe numero 3, vedentunkeuma, s. 30
 Taulukko 21. Koe numero 6, vedentunkeuma, s. 30
 Taulukko 22. Laattakokeiden tulosten keskiarvot, s. 31
 Taulukko 23. Laattakokeiden tulokset, s. 31

Lähteet

1. European specification for sprayed concrete. Englanti, EFNARC. 1996. <http://www.efnarc.org/pdf/EuroConcreteSpecEng.pdf>. Luettu 3.10.2011
2. SFS-EN 14487-1 RUISKUBETONI. OSA 1: MÄÄRITELMÄT, VAATIMUKSET JA VAATIMUSTENMUKAISUUS. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2006.
3. SFS-EN 14488-5 Testing sprayed concrete. Part 5: Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2007.
4. Vuorimiesyhdistys r.y. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirja. 1982. Hango. Hangon Kirjapaino Oy
5. SFS-EN 14487-1 Ruiskubetoni. Määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2006.
6. RAKENNUSSELOSTUS LU10 LAUTTASAARENSALMEN RATATUNNELI
7. RAKENNUSSELOSTUS LU6P KEILANIEMEN RATATUNNELI JA ASEMA
8. Suomen Betoniyhdistys r.y. BY50 Betoninormit 2004. Jyväskylä, Suomi: Gummerus Kirjapaino Oy, 2005
9. SFS-EN 14889-2 BETONIIN KÄYTETTÄVÄT KUIDUT. OSA 2: POLYMEERIKUIDUT. MÄÄRITELMÄT, VAATIMUKSET JA VAATIMUKSEN MUKAISUUS. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2006.
10. SFS-EN 12350-3 TUOREEN BETONIN TESTAUS. OSA 3: VEBE. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto
11. SFS-EN 12350-2 TUOREEN BETONIN TESTAUS. OSA 2: PAINUMA. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto
12. SFS-EN 14488-7 Testing sprayed concrete. Part 7: Fibre content of fibre reinforced concrete. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2007

13. SFS-EN 14488-1 Tuoreen ja kovettuneen betonin näytteenotto. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2005.
14. SFS-EN 12390-8 KOVETTUNEEN BETONIN TESTAUS. OSA 8: PAINEELLISEN VEDEN TUNKEUMASYVYYS. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.
15. SFS-EN 12390-7 KOVETTUNEEN BETONIN TESTAUS. OSA 7: KOVETTUNEEN BETONIN TIHEYS. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009
16. SFS-EN 12390-1 Kovettuneen betonin testaus. Osa 1: Muoto, mitat ja muut koekappaleiden ja muottien vaatimukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2004.
17. SFS-EN 12390-3 Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto, 2009.