

Muovikuitujen vaikutus AKO-Wall välisei- näelementin taivutuslujuuteen

Case: Rakennusbetoni- ja Elementti Oy

Tiivistelmä

Tekijä(t) Lemettinen, Juha	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 41	Valmistumisaika 2020
Työn nimi Muovikuitujen vaikutus AKO-Wall väliseinäelementin taivutuslujuuteen. Case: Rakennusbetoni- ja Elementti Oy		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Ohjaavan opettajan nimi, titteli ja organisaatio Reijo Heikkinen, yliopettaja, LAB-ammattikorkeakoulu		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Teemu Teno, Toimitusjohtaja, Rakennusbetoni- ja Elementti Oy		
Tiivistelmä <p>Työn toimeksiantajana toimi Rakennusbetoni- ja elementti Oy. Tavoitteena oli selvittää, voitaisiinko AKO-wall elementin taivutuslujuutta kasvattaa käyttämällä siinä polymeerikuituja. Tehtävänä oli myös tarkoitus selvittää kuitujen vaikutus tuotteen pinnanlaatuun, tehdä havainnoita prosessista sekä polymeerikuitujen muista vaikutuksista.</p> <p>Teoriaosuudessa käydään läpi tietoa betonista sekä erityyppisistä kuiduista ja niiden ominaisuuksista.</p> <p>Käytännön osuudessa käydään läpi tuotteiden valmistusta, taivutuslujuuden, puristuslujuuden sekä tiheyden määrittystä ja näihin liittyvää havainnointia sekä tuloksia.</p> <p>Lopuksi käydään läpi polymeerikuitujen vaikutuksia, tutkimustuloksiin vaikuttaneita tekijöitä sekä pohdintaa jatkotutkimuksista.</p>		
Asiasanat Betoni, Kevytsorabetoni, Polymeerikuitu, Taivutuslujuus, AKO-Wall elementti		

Abstract

Author(s) Lemettinen, Juha	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2020
	Number of Pages 41	
Title of Publication Enhancing the flexural strength of AKO-Wall element with polymerfibers		
Possible subtitle(s)		
Name of Degree Engineer (UAS)		
Name, title and organization of the supervising teacher Reijo Heikkinen, principal lecturer, LAB University of Applied Sciences		
Name, title and organization of the client Teemu Teno, CEO, Rakennusbetoni- ja Elementti Oy		
Abstract <p>The client was Rakennusbetoni- ja elementti Oy. The objective of this thesis was to study how polymer fibers affect the flexural strength of AKO-Wall element. The other objective was to find out how polymer fibers affect the surface quality of the product, observe the process and other effects of polymer fibers.</p> <p>The theory part of the thesis has information and properties of different types of concrete and different types of fibers used in concrete.</p> <p>In the practical part, there is information about the manufacturing process of the elements, flexural strength testing, compressive testing and defining the density of the test objects. Also, there is observing about the test process and results of the performed tests.</p> <p>In the last part there is effects of the polymer fibers in AKO-Wall element, factors that affected testing results and some thoughts of the further research.</p>		
Keywords Concrete, Lightweight concrete, polymer fiber, flexural strength, AKO-Wall element		

Sisällys

1	Johdanto.....	2
2	Betoni	3
2.1	Perustietoa	3
2.1.1	Sementti	3
2.1.2	Kiviaines	3
2.1.3	Seosaineet	4
2.1.4	Vesi	4
2.1.5	Lisäaineet	4
2.2	Ominaisuudet	5
2.3	Luokittelu tiheyden mukaan	5
3	Kevytbetoni.....	6
3.1	Perustietoa	6
3.2	Käyttökohteet.....	6
3.3	Täyteaineet.....	7
3.3.1	AKO-Wall seinäelementti.....	8
4	Kuidut	9
4.1	Käyttö	9
4.2	Kuitutyypit.....	9
4.2.1	Teräskuidut.....	9
4.2.2	Polymeerikuidut	10
4.2.3	Mikrokuidut	11
4.2.4	Makrokuidut.....	13
5	Koekappaleiden valmistus	15
5.1	Kuitujen valinta	15
5.2	Testikappaleiden valmistus, ensimmäinen päivä	16
5.3	Testikappaleiden valmistus, toinen päivä.....	19
5.4	Esivalmistelu.....	22
5.5	Pohdinta	23
6	Tutkimuksen tulokset	25
6.1	Taivutuslujuus.....	25
6.1.1	Tulosten yhteenveto ja pohdinta	30
6.2	Tiheys.....	31
6.3	Puristuslujuus	35
7	Yhteenveto	40
	Lähteet	41

1 Johdanto

Työn tarkoituksena oli selvittää, voitaisiinko AKO-Wall seinäelementin taivutuslujuutta kasvattaa lisäämällä muovikuitua sen valmistuksessa käytettävään kevytsorabetoniin. Kevytsorabetonista valmistetun elementin suurin ongelma on sen katkeamisherkkyys sekä alhainen taivutuslujuus. Osana työtä oli myös selvittää saatavilla olevia kuitutyyppejä, joista lopuksi valittiin testeissä käytetyt kuidut. Testeihin valittiin kolme toisistaan poikkeavaa muovikuitua ja niistä valmistettiin tuotannossa valmiita AKO-Wall elementtejä, joiden paksuus oli 92 mm. Testauksessa käytettyjä elementtejä valmistettiin erilaisilla kuitupitoisuuksilla. Tämän tarkoitus oli selvittää kuidun määrän vaikutus taivutuslujuuteen, tuotteen ulkonäköön sekä sen valmistettavuuteen tuotannossa.

Koekappaleiden taivutuslujuus mitattiin 3- sekä 4-piste taivutuksella, tarkoituksena selvittää kuinka toisistaan poikkeavia tuloksia nämä kaksi menetelmää antaisivat. Kappaleiden testaus suoritettiin yrityksen omalla puristus- sekä taivutuslujuuden mittaukseen tarkoitettulla laitteella, johon valmistettiin itse osa 4-pistetäivutusta varten koska sellaista ei ollut valmiina. Kappaleille suoritettiin myös tiheyden määrittäminen sekä puristuslujuuden mittaus. Tehtyjen koekappaleiden tuloksia verrattiin ensimmäisenä testauspäivänä valmistettuun kuiduttomaan AKO-Wall seinäelementtiin. Tällä saavutettiin se, että tuotteiden kuivumisaika olisi mahdollisimman lähellä toisiaan ja että betonimassassa olisi mahdollisimman vähän poikkeamaa, joka voisi johtua ulkopuolisesta muuttujasta.

Työn toimeksiantajana toimi Rakennusbetoni- ja Elementti Oy, joka on Hollolassa sijaitseva betonituotteiden valmistukseen erikoistunut perheyrittäjä.

Opinnäytetyön teoriaosuus sisältää tietoa betonista, sen ominaisuuksista, teräs- ja polymeerikuitujen käytöstä betonituotteiden valmistuksessa sekä niiden tuomista eduista sekä erityyppisten kuitujen ominaisuuksista.

2 Betoni

2.1 Perustietoa

Kaikista maailman rakennusmateriaaleista betoni on eniten käytetty. Sitä valmistetaan vuosittain jopa 13 mrd. m³. (<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>) Betonin pääraaka-aineita ovat sementti, vesi ja kiviaines. Valtaosa betonin koostumuksesta on kiviainesta, tämän osuus on normaalisti noin 70 % luokkaa. Betonin sisältämä kiviaines koostuu erikokoisista kivirakeista, joiden koko vaihtelee tyypillisesti 0,02–16 mm välillä. (Betoniteollisuus ry.)

Betonin käyttöikä on normaalisti 50–100 vuotta, mutta joskus voidaan käyttää jopa 200 vuoden käyttöikää. (Betoniteollisuus ry.)

Betoni sisältää monesti lisä- ja seosaineita, näiden tehtävänä on muuttaa betonin ominaisuuksia halutulla tavalla. Aineet voivat vaikuttaa tuoreen betonin työstettävyyteen, betonin tiivyyteen taikka sen lujuuden ja säilyvyysominaisuuksien parantamiseen. Betonin osainneiden valinta ja niiden seossuhteiden määritys eli suhteutus vaikuttaa suuresti betonin ominaisuuksiin. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 31.)

Betonissa käytettäviä osa-aineita ovat: sementti, kiviaines, vesi, lisäaineet, kuidut sekä seosaineet, joihin kuuluvat mineraaliset fillerit ja pigmentit. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016, 28.)

2.1.1 Sementti

Sementin tehtävä betonissa on toimia sideaineena. Kun sementti reagoi veden kanssa syntyy pasta, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden kautta. Sementin koostumus vaikuttaa betonin lopullisiin ominaisuuksiin. Betonissa käytettävän sementin tulee olla CE-merkittyä sekä täyttää sementtistandardin SFS-EN 197-1 vaatimukset. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 39,42.)

2.1.2 Kiviaines

Kiviaines vaikuttaa suuresti betonin ominaisuuksiin. Sen tulee kuitenkin olla rakeista, riittävän lujaa, tiivistä ja se ei saa osallistua betonissa käytetyn sementin reaktioihin eikä huonontaa betonin säilyvyyttä. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 31.)

2.1.3 Seosaineet

Betonissa käytettävät seosaineet luokitellaan 2 eri tyyppiin. Tyypin 1 seosaineet ovat lähes reagoimattomia näihin kuuluvat standardin SFS-EN 12878 mukaiset pigmentit sekä standardin SFS-EN 12620 tai standardiehdotuksen prEN13055 mukainen fillerikiviaines. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016, 29.)

Tyypin 2 seosaineet ovat pozzolaanisia tai piilevästi hydraulisia. Seuraavat seosaineet ovat yleisesti soveltuvia, standardin SFS-EN 450-1 mukainen lentotuhka, standardin SFS-EN 13263-1 mukainen silika ja standardin SFS-EN 15167-1 mukainen jauhettu granuloitu maasuunikuona. (Suomen Betoniyhdistys ry 2016, 29.)

Pozzolaanisella tarkoitetaan sitä, että aine reagoi sementin hydraatiossa syntyvän kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatti-geeliä. (Tikkanen, 4.)

2.1.4 Vesi

Betonissa käytettävän veden tulee olla puhdasta, siinä ei saa käyttää humuspitoista suovettä, teollisuuden taikka asumajätteiden saastuttamaa vettä ilman, että näille on suoritettu tarkempaa tutkimusta. Betonissa käytettävä vesi ei myöskään saa sisältää klorideja enempää kuin 0,03 painoprosenttia. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 62.)

2.1.5 Lisäaineet

Lisäaineiden tarkoituksena on parantaa betonin teknisiä ominaisuuksia sekä sen taloudellista kilpailukykyä, ne vaikuttavat betoniin joko fysikaalisesti taikka kemiallisesti. Lisäaineiden määrä betonissa on pientä verrattuna siinä oleviin muihin osa-aineisiin. Lisäaineiden vaikutus betoniin on monitahoista, jonkun tietyn halutun ominaisuuden tuominen saattaa tuoda myös niin sanottuja ei-toivottuja sivuvaikutuksia, tästä esimerkkinä joidenkin notkistintyyppien sitomisreaktiota hidastava vaikutus kylmissä olosuhteissa. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 63–64.)

Lisäaineiden toimintaan vaikuttavat useat tekijät, näitä ovat sementinlaatu ja -määrä, runkoaineen rakeisuus, annostusjärjestys, lämpötila, betoninsekoittimen teho sekä muut lisäaineet. Lisäaineet voidaan myös luokitella seuraavasti, Notkistavat lisäaineet (notkistin, tehonotkistin, nesteytin), huokostimet, muut pakkasenkestävyyttä parantavat aineet, kiihdyttimet, tiivistysaineet, injektointiaineet, muut lisäaineet. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 63–64.)

2.2 Ominaisuudet

Betonin haluttuja ominaisuuksia voidaan säätää usealla eri tavalla. Pääsääntöisesti se toteutetaan suhteutuksella eli osa-aineiden valinnalla ja seossuhteilla. Lisäaineet ovat toinen tapa vaikuttaa betonin haluttuihin ominaisuuksiin. Lisäaineilla voidaan säädellä myös betonin sitoutumista, kovettumista sekä niillä voidaan myös vaikuttaa kovettuneen betonin ominaisuuksiin. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 63.)

Rakenteita suunniteltaessa ovat betonin tärkeimpiä ominaisuuksia sen lujuus sekä säilyvyys erilaisia rasituksia vastaan, esimerkkinä kylmissä olosuhteissa pakkasenkestävyys ja pakkassuolarasituksen kestävyys. Tärkeitä betonin ominaisuuksia ovat myös betonin muodonmuutosominaisuudet, viruminen, kutistuminen, halkeilu ja tiiveys. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 69.)

Suurin betonin fysikaalisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on veden kanssa reagoanut (hydratoitunut) sementti eli sementtikivi. Betonin kokonaistilavuudesta sementtiä on noin 25–30 %. (Leskelä 2008, 28.)

2.3 Luokittelu tiheyden mukaan

Betoni voidaan luokitella tiheydensä mukaan kolmeen eri kategoriaan, jotka ovat raskasbetoni, betoni ja kevytbetoni. Raskasbetonin tiheys on suurempi kuin 2400 kg/m^3 ja sen tiheys voi olla jopa 4000 kg/m^3 . Tavallisella betonilla tiheys on noin 2400 kg/m^3 . (LKAB Minerals Oy 2015, 74.) Kevytbetoniksi luokitellaan betoni, jonka tiheys ei ylitä 2200 kg/m^3 . (The Concrete centre.)

3 Kevytbetoni

3.1 Perustietoa

Kevytbetonia valmistetaan pienentämällä tavallisen betonin tiheyttä. Tämä voidaan saavuttaa usealla tavalla kuten lisäämällä betoniin täyteaineena kevyempää materiaalia. Yleisimpiä kevytbetonissa käytettyjä täyteaineita ovat vulkaaninen hohkakivi, vaahtolasi ja poltettu savi (kevytsora). (Hedjazi 2019.)

Muita vaihtoehtoja ovat betonin vaahdotus tai sen höyrykarkaisu. Betonin vaahdotuksessa siihen sidotaan 20 %-50 % ilmaa. Yleisesti tällaista betonia ei käytetä rakenteellisena betonina vaan esimerkiksi lämmöneristeenä/täyteaineena kuormituksen vähentämiseksi. (Hedjazi 2019.)

Höyrykarkaisussa betoniin lisätään alumiinijauhetta, joka saa aikaan sen huokoisuuden. Betonin lujuus saavutetaan karkaisemalla se korkeassa lämpötilassa ja paineessa. (Bauroc.)

Kevytbetonin ominaisuuksia verrattuna tavalliseen betoniin ovat seuraavat:

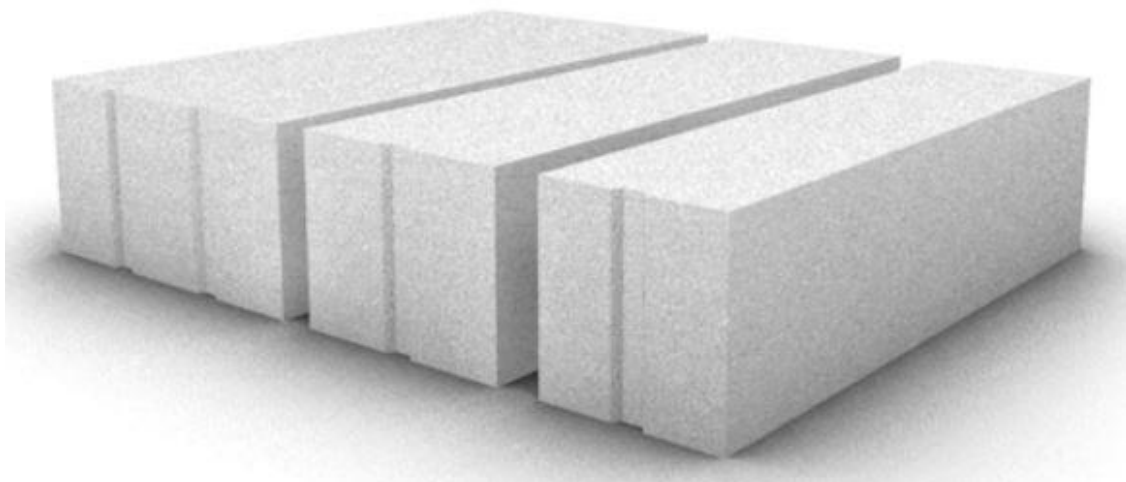
- Samalla lujuudella sen elastinen kerroin on 25–50 % pienempi, joten sen taipumat ovat suurempia.
- Sen vastustuskyky jäätymistä ja sulamista vastaan on suurempi kuin perinteisellä betonilla.
- Palonkestävyys on suurempi
- Helppo työstettävyys (leikkaaminen, poraaminen)
- Samalla puristuslujuudella leikkauslujuus on 15–25 % pienempi ja sitoutumislujuus 20–50 % pienempi.

(Shraddu.)

3.2 Käyttökohteet

Koska kevytbetoni on nimensä mukaan kevyttä, se soveltuu erityisen hyvin rakenteisiin, joiden kokonaismassaa halutaan pienentää. Siksi siitä usein valmistetaan erilaisia valuharkkoja, katto-, lattia- tai seinäpaneeleita. Koska kevytbetoni on huokoista ja sen lämmöneristävyyden on parempi kuin perinteisellä tiilellä tai betonilla. Näin sitä voidaan käyttää myös lämmöneristeenä ulkoseinärakenteissa. (Shraddu.)

Yksi hyvä esimerkki näiden ominaisuuksien yhdistelmästä täysin kevytbetonisessa tuotteessa on Siporex-harkko, joka toimii samanaikaisesti sekä kantavana rakenteena että lämmöneristeenä. (H+H.)



Kuva 1. Siporex harkko (H+H.)

3.3 Täyteaineet

Betonia voidaan keventää useilla eritiheyksisillä materiaaleilla. Materiaali valitaan betonin käyttötarkoituksen mukaan, esimerkiksi tuotteelta voidaan vaatia lämmöneristävyyttä tai rakennelujuutta. Betonin lujuus riippuu siinä käytettävän täyteaineen tiheydestä. Täyteaineet voidaan jaotella kahteen eri ryhmään, luonnossa esiintyviin tai keinotekoisesti valmistettuihin. Materiaalit esitetty taulukossa 1. (Shraddu.)

Luonnossa esiintyvät materiaalit	Keinotekoisesti valmistetut materiaalit
Hohkakivi	Keinotekoinen laavakivi
Diatomiitti (Piimaa)	Koksi
Vulkaaninen kuona	Vaahtolasimurske
Laavakivi	Poltettu savi
Sahanpuru	Sintrattu lentotuhka
Riisinkuori	Perliitti
	EPS-pallot
	Vermikuliitti

Taulukko 1. Täyteainemateriaalit (Shraddu.)

3.3.1 AKO-Wall seinäelementti

AKO-Wall seinäelementti on kevytsorabetonista ekstruusiomenetelmällä valmistettu ontelorakenteinen seinäelementti. Se on nopea pystyttää sekä tarjoaa kiviseinää vastaavat edut. Näitä ovat lujuus, kosteudenkestävyys, palamattomuus, helppo työstettävyys sekä hyvä äänen eristävyys. Sen ontelorakenne mahdollistaa myös talotekniikan kuten sähköjohtojen ja vesiputkien viemisen pystysuunnassa elementin sisällä. AKO-seinäelementtiä valmistetaan usealla eri paksuudella, jotka ovat 68 mm, 92 mm, 120 mm ja 130 mm. (Rakennusbetoni- ja Elementti Oy. 2016, 1-2.)



Kuva 2. AKO-Wall väliseinäelementti (Rakennusbetoni- ja Elementti Oy.)

4 Kuidut

4.1 Käyttö

Kuitujen käyttö betonissa ei ole aivan uusi keksintö. Ensimmäiset patentit koskien kuitujen käyttöä betonissa ovat jo vuodelta 1874, jolloin A. Berard keksi käyttää epäsäännöllisen muotoisia teräksenpaloja betonin vahvistamiseksi. Varsinainen patentti, joka mainitsi muiden kuin teräskuitujen käytön betonissa haettiin vuonna 1918 Ranskassa H. Alfsen nimisen miehen toimesta. Vaikka keksintö oli vanha, kuituja ruvettiin käyttämään laajemmin vasta 1970-luvulla. Suomen rakentamisessa kuitubetonin käyttö alkoi varsinaisesti 1980-luvun lopussa. Suomessa yleisin betonissa käytettävä kuitu on teräskuitu, mutta myös muita kuituja käytetään. Muihin kuitutyyppeihin voidaan luetella lasikuidut, muovikuidut, hiilikuidut sekä keraamiset kuidut. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 534.)

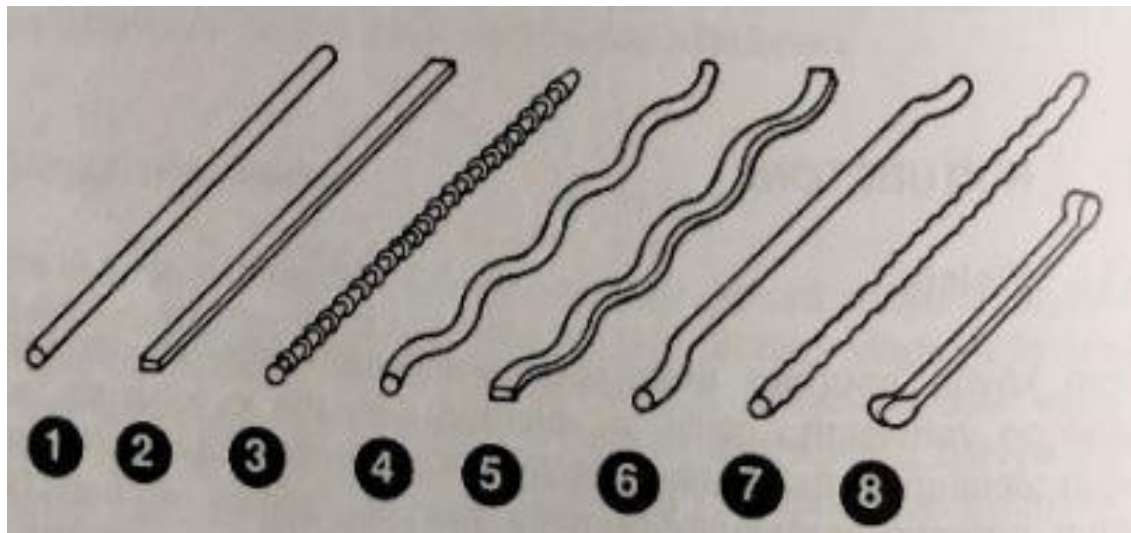
Teräs- ja muovikuituja käytetään betonissa yleisesti veto- ja taivutusvetolujuuden kasvattamiseen sekä betonin kuivamisen aikana tapahtuvan halkeamisen rajoittamiseen, koska kuidut ottavat vastaan kuivamisreaktiossa syntyviä kutistumajännityksiä. Muovikuiduilla voidaan myös vaikuttaa palonkestävyyteen, joka perustuu siihen, että tulipalotilanteessa vesihöyryn paine pääsee purkautumaan sulaneiden muovikuitujen kanaviin. Kuitujen käytöllä voidaan myös vähentää perinteisen tankorautoituksen tarvetta. Yleisin käyttökohde kuitubetonille on rakenteissa, joissa ei ole sortumavaaraa kuten lattiat, mutta kuituja on myös käytetty jonkin verran kantavissa rakenteissa. Näissä käytetyn kuidun määrä on kuitenkin huomattavasti suurempi. Normaalisti sen ollessa 30–40 kg/m³ on kantavassa rakenteessa kuitua 80–100 kg/m³. (Lumme 2008, 73–74.)

4.2 Kuitutyypit

4.2.1 Teräskuidut

Teräskuitujen valmistusmateriaalina on korkealaatuinen teräs ja niiden pituus on 15 mm–60 mm, halkaisijaltaan ne ovat 0,4–1,0 mm. Yleinen annostelu teräskuiduille on 20–80 kg/m³. Tiettyjen kuitumallien muotoilu on tehty niin, että ne tarttuisivat mahdollisimman hyvin niitä ympäröivään betoniin. Kuiduissa käytettävän teräksen myötölujuus on välillä 500–1500 MPa. Hoikkuusluku teräskuiduille (pituus/ekvivalenteetti halkaisijalla) on välillä 15–85. Mitä korkeampi tämä luku on sitä tehokkaampia kuidut ovat, mutta kääntöpuolena niiden sekoittaminen betonimassaan hankaloituu. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 534) Mikäli kuitujen hoikkuusluku on > 55, ne alkavat palloutua sekoitusvaiheessa. Tämän ilmiön takia tietyt

kuidut on liimattu levyiksi, jotka aukeavat veden vaikutuksesta leviten tasaisesti massan joukkoon. (Semtu.)



Kuva 3 Teräskuitu tyyppejä (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 534.)

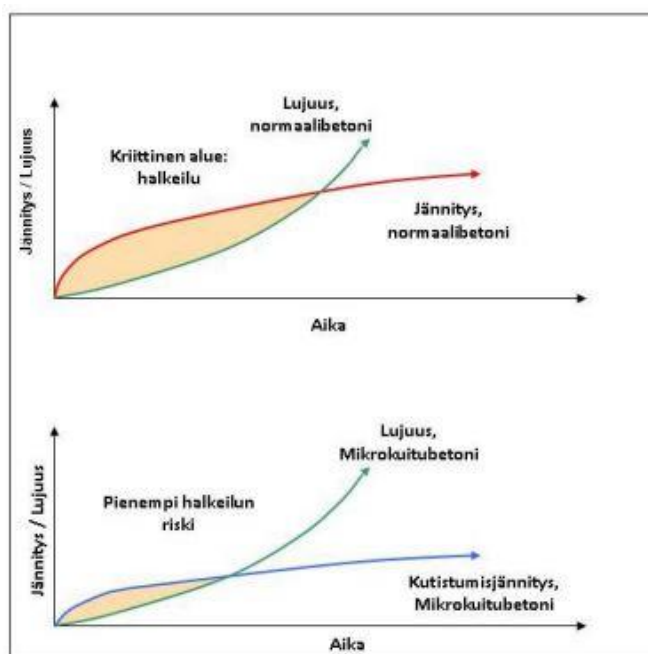
Kuvassa 3 on esiteltynä käytössä olevia teräskuituja. Kuidut vasemmalta oikealle: pyöreä, suorakulmainen, hammastettu, aaltoileva, litistetty aaltoileva, päistä taivutettu, muotoilematon ja päistä muotoiltu. (Suomen Betoniyhdistys ry 2005, 534.)

4.2.2 Polymeerikuidut

Polymeerikuidut kuuluvat standardiin SFS-EN 14889-2. Kuidut luokitellaan kahteen eri luokkaan. Luokka 1, mikrokuidut pitää sisällään monofilamenttimikrokuidut, joiden halkaisija on $< 0,30$ mm ja sekä fibrilloidut mikrokuidut, joiden halkaisija on $< 0,30$ mm. Luokka 2 taas sisältää makrokuidut, joiden halkaisija on $> 0,30$ mm. Kuitujen tulee myös olla CE-merkittyjä ja merkinnöistä tulee ilmetä mihin kuitua käytetään, luokitus, vetolujuus, kimmokerroin, vaikutukset tuoreen betonin ominaisuuksiin sekä luokan 2 kuidulla minimikuitumäärä jolla saavutetaan standardissa SFS-EN 14889-2 määritetty jäännösvetolujuus. Kaikkien betonissa käytettävien kuitujen tulee olla alkaalinkestäviä. (Suomen betoniyhdistys ry 2012, 2–3.)

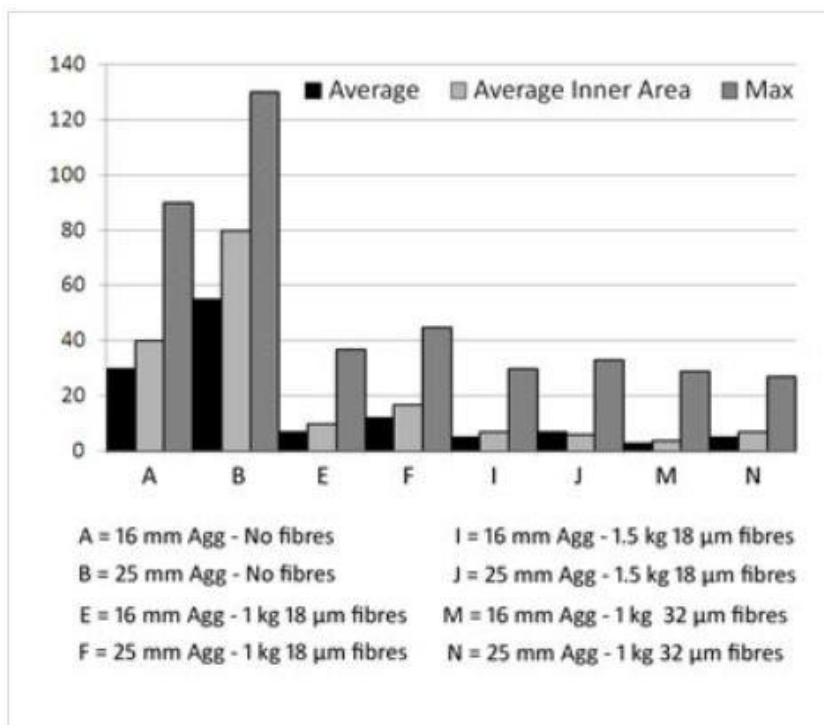
4.2.3 Mikro kuidut

Mikropolymeerikuitujen yleisimpiä valmistus materiaaleja ovat polypropeeni, nailon, polyesteri, akryyli tai lasikuitu. Lasikuidun etuna muihin kuituihin on se, että se ei nouse pintaan yhtä herkästi kuin muut kestumuoveista valmistetut kuidut. Mikro kuidut on suunniteltu niin, että ne vastaavat tuoreen betonin ominaisuuksia. Vetolujuus kuiduilla on noin 300 MPa ja kimmokerroin 2000 MPa. Mikro kuitujen yleisin käyttötarkoitus on vähentää betonin kuivumisvaiheessa syntyvien halkeamien määrää sekä näiden laajenemista. Kuvasta 4 näkee, kuinka halkeamien riski pienenee mikro kuituja käytettäessä. (Suomen betoniyhdistys ry 2012, 3–4.)



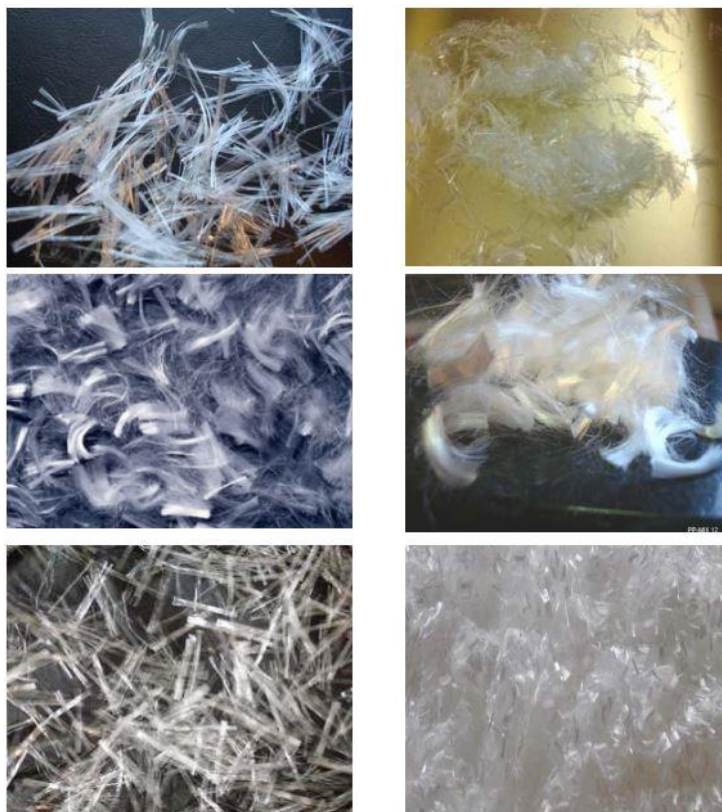
Kuva 4. Plastisen halkeilun riski betonilla ilman kuituja verrattuna mikro kuitubetoniiin. (Suomen betoniyhdistys ry 2012, 5.)

Mikro kuituja voidaan myös käyttää betonin palonkestävyyden lisäämiseen. Lämpötilan noustessa betoni alkaa halkeilemaan sekä murenemaan ja pahimmassa tapauksessa se voi jopa "räjähtää". Polymeerikuidut auttavat vähentämään näitä ilmiöitä. Kuvassa 5 on kuvattu halkeamien syvyyseroa ilman kuitua ja kuitua käytettäessä. (Smith, K. Atkinson, T. 2010.)



Kuva 5. Halkeamien syvyys (mm) suurissa laatoissa 30 minuutin tulelle altistumisen jälkeen RWS menetelmällä testattuna. (Smith, K. Atkinson, T. 2010.)

Kuituja voidaan myös käyttää massan koossa pysyvyyden parantamiseen, ja kuidut mahdollistavat paksumman kerrospaksuuden esimerkiksi ruiskuvalussa. Kuidut myös vähentävät massan vedenerottumista. Kuivassa massassa kuidut voivat parantaa tiiveyttä, iskunkestävyyttä ja kulutuksen kestävyyttä. (Suomen betoniyhdistys ry 2012, 4.) Kuvassa 6 erilaisia käytössä olevia mikropolymeerikuituja.

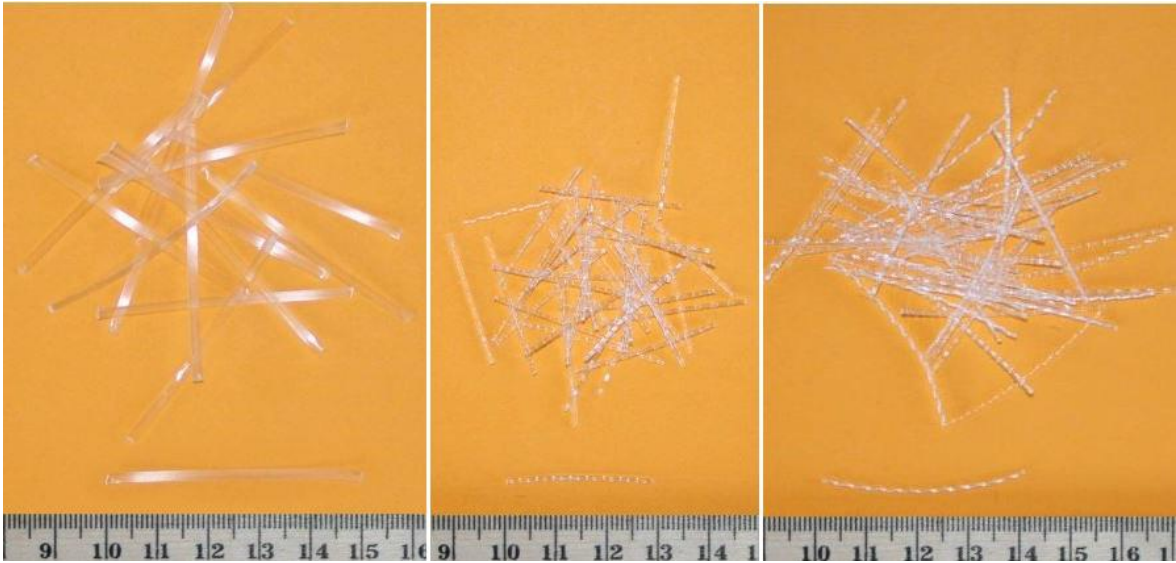


Kuva 6. Erilaisia mikropolymeeri kuituja. Yläriivi multifilamenttikuitu, keskellä monofilamenttikuitu alarivillä fibriloitu kuitu. (Suomen betoniyhdistys ry 2012, 3.)

4.2.4 Makrokuidut

Makrokuidut ovat mikrokuituja suurempia kuituja, joiden pääsääntöinen tarkoitus betonissa on antaa sille rakenteellista lujuutta. Standardi SFS-EN 14889-2 mukaan rakenteellinen käyttö on sellaista, jossa kuidulla on tarkoitus lisätä betonirakenteen kuormankantokykyä. CE-merkintä kertoo kuinka paljon kuitua tulisi käyttää, jotta betoni täyttää standardin SFS-EN 14889-2 mukaisen jäännösvetolujuuden. Makrokuitujen ominaisuudet ovat yleensä seuraavanlaiset vetolujuus 350–700 MPa, kimmokerroin 3000-10000MPa, sulamispiste 150–160°C, tiheys 900 kg/m³, ekvivalentti kuitupaksuus 0,5–1,0 mm, pituus 40–60 mm ja hoikkusuulu 70–110.

Sen lisäksi, että makrokuiduilla voidaan korvata erityisesti maanvaraisten laattojen raudoitusta, ne myös vähentävät betonissa tapahtuvaa kuivumishalkeilua, lisäävät sen iskunkestävyyttä ja kulutuksen kestävyyttä. (Suomen betoniyhdistys ry 2012, 2,6.)



Kuva 7. Makrokuituja vasemmalta oikealle BASF MasterFiber 151, MasterFiber 236 ja MasterFiber 246. (mukailtu Basf 2017)

5 Koekappaleiden valmistus

5.1 Kuitujen valinta

Työn ensimmäisessä vaiheessa kartoitettiin Suomesta saatavilla olevia kuituja, sekä niiden ominaisuuksia. Kuituja kartoitettiin kolmen kuitutoimittajan kautta, jotka auttoivat kuitujen valitsemisessa. Osa kuitutoimittajista antoi myös tietoa referenssikohteista, sekä suosituksia kokeissa käytettävistä kuitumääristä. Kaikista lupaavimmiksi kuiduiksi valikoituivat eri mittaiset makrokuidut, joilla oletettiin olevan parantavaa vaikutusta tuotteen taivutuslujuuteen. Kartoitus vaiheen jälkeen potentiaalisia testikuituja oli jäljellä kahdeksan sekä niiden joukossa yksi nestemäinen polymeeridispersio. Lista kuiduista taulukossa 2.

Malli	Kuidun pituus	Halkaisija	Materiaali	Murtovetolujuus
Makrokuitu, Mikro- kuitu yhdistelmä	Makrokuitu 45 mm	Makro- kuitu 0,83 mm	Polypropeeni	Ei ilmoitettu
Makrokuitu 1	50 mm	0,5 mm	Polypropeeni	590 N/mm ²
Makrokuitu 2	35 mm	0,5 mm	Polypropeeni	590 N/mm ²
Makrokuitu 3	38 mm	0,042 mm	Polyolefiini	400 N/mm ²
Makrokuitu 4	40 mm	0,75 mm	Polypropeeni	448 N/mm ²
Makrokuitu 5	29 mm	0,75 mm	Polypropeeni	469 N/mm ²
Mikrokuitu 1	18 mm	0,2 mm	Polyvinyylialkoholi	750 N/mm ²
Mikrokuitu 2	12 mm	0,014 mm	Lasikuitu	1700 N/mm ²
Kopolymeeri dispersio				

Taulukko 2. Alustavat kuitumallit

Testauksessa käytettävät kuidut valittiin yhdessä Rakennusbetonin tuotannon henkilöstön kanssa, jotta kuidut täyttäsivät halutut vaatimukset. Koska testausta oli tarkoitus tehdä useammalla eri kuitumäärällä, päätettiin testattavaksi valikoida yhteensä kolme erityyppistä kuitua. Testeihin valittiin taulukon 1 kuiduista makrokuitu 3, makrokuitu 5 ja mikrokuitu 1. Kopolymeeri dispersio vaikutti myös erittäin mielenkiintoiselta vaihtoehdolta, mutta sen käyttäminen ei olisi ollut taloudellisesti kannattavaa tuotannossa, joten se jätettiin pois.

5.2 Testikappaleiden valmistus, ensimmäinen päivä

Testeistä laadittiin suunnitelma, joka käytiin yhdessä läpi tuotannon työntekijöiden kanssa ennen varsinaisten testien aloitusta. Valmistettavaksi elementin tyyppiä valittiin paksuudeltaan 92 mm oleva AKO-Wall seinäelementti, koska tuotteen taivutuslujuutta haluttiin parantaa. Koekappaleiden valmistus suoritettiin peräkkäisinä päivinä ja yhden testierän massamääräksi päätettiin 0,5 m³. Koekappaleiden lisäksi ensimmäisen päivän aikana valmistettiin kuiduttomat referenssikappaleet. Tällä menetelmällä kappaleiden kuivumisajassa ei olisi suurta eroa, joka saattaisi vaikuttaa koetuloksiin, myös muut muuttujat kevytsorabetonin valmistuksessa saatiin minimoitua. Ensimmäisen päivän aikana koekappaleet valmistettiin makrokuitu 3:lla. Aluksi oli tarkoituksena myös säätää ekstruuderin ajoparametreja kuiduille paremmin sopiviksi. Ensimmäisen päivän testierät sekä niiden huomiot on esitetty taulukossa 3.

Erä Nro	Kuitumäärä	Massamäärä	Sekoitusaika kuivana	Huomioita
1	1 kg	0,5 m ³	1min	Hylätty koska massa liian kosteaa.
2	1 kg	0,5 m ³	1min	Koneen asetusten säätöä.
3	1 kg	0,5 m ³	2min	Pientä luhistumaa paneelissa.
4	1 kg	0,7 m ³	2min	Laatu parempi.
5	1 kg	1 m ³	2min	Ajonopeus pienempi. Paras laatu

Taulukko 3. Ensimmäisen päivän testierät

Ensimmäinen testi suoritettiin kuitutoimittajan suositusmäärällä. Kuidut annosteltiin manuaalisesti kiviaineskuljettimelle, josta ne menivät vaaka-astian kautta betonisekoittimeen. Sekoituksen jälkeen betonimassalle tehtiin silmämääräinen arviointi kuitujen sekoittumisesta. Ensimmäinen huomio oli kuitujen staattisuus, joka aiheutti helposti kuitujen paakkuuntumista. Paakut johtuivat liian lyhyestä kuivasekoitusajasta sekä kuitujen kaatamisesta suoraan pussista ilman niiden manuaalista erotusta toisistaan. Kuvassa 8 näkyy paakkuuntuneita kuituja sekoitetun betonimassan joukossa.

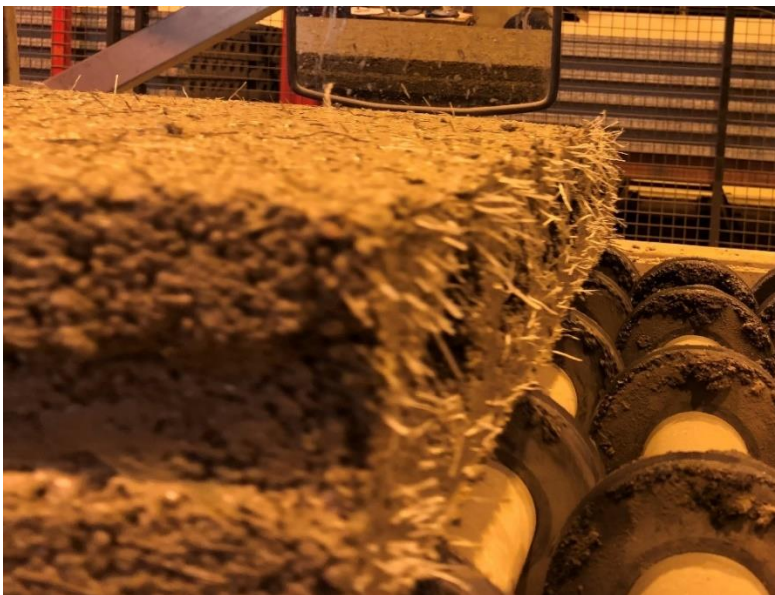


Kuva 8. Kuitupaakkuja ja pieni vesivuoto betoninsekoittimessa.

Testierän 1 betonimassan vesimäärä oli liian iso, joka aiheutti elementissä olevien onteloiden luhistumisen. Yksi osatekijä liialliseen vesimäärään oli betoninsekoittimesta löytynyt pieni vesivuoto. Toinen ongelma ilmeni linjaston seulaverkon kanssa, jonka massassa olleet kuidut tukkivat. Verkon tarkoituksena on estää massassa esiintyvien ylisuurten kiviainekappaleiden sekä betoninsekoittimesta irronneiden kuivuneiden betoninkappaleiden pääseminen ekstruusiolinjastolle. Koska betonimassa kulki ekstruuderiin painovoimaisesti kapenevan suppilon kautta aiheutti kuitujen jäykistämä betoni sinne tukoksia. Ensimmäisestä erästä ei valmistunut yhtään laatukriteereitä täyttävää elementtiä.

Testierässä 2 betonimassan vesimäärää laskettiin mutta kuitumäärä pidettiin samana. Kuidut myös eroteltiin ämpäreihin, jotta suurimmilta paakuilta vältyttäisiin. Massan valuminen suppilossa oli edelleen heikkoa ja aiheutti vajaita kohtia elementin reunoissa. Ratkaisuksi tähän pinnantason tunnistinta nostettiin, jotta suppiloon saatiin enemmän massaa sekä linjaston ajoparametrejä säädettiin siten, että ajonopeutta laskettiin ja ekstruderin ruuvien pyörintänopeutta kasvatettiin. Näillä toimenpiteillä valmistui muutama laatukriteerit täyttävä elementti.

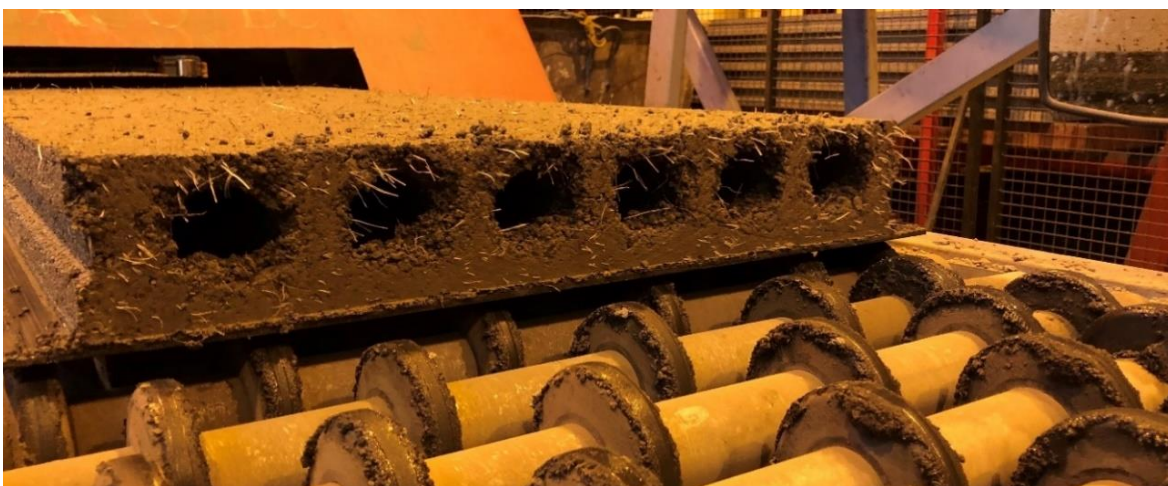
Testierässä 3 vesimäärää hienosäädettiin ja sekoitusaikaa pidennettiin, koska edellisessä erässä oli vielä havaittavissa hienoista paakkuuntumista. Kuitenkin elementtien laatu oli jo huomattavasti parempaa. Elementin poikkileikkausta katsottaessa kuituja näytti kuitenkin olevan paljon ja niiden määrää päätettiin laskea seuraaviin testieriin. Kuvassa 9 voi hyvin nähdä kuitujen määrän poikkileikkauksessa.



Kuva 9. Kuitujen määrä poikkileikkauksessa.

Testierä 4 ajettiin kuitumäärää vähentämällä. Koska kuidut olivat erittäin kevyitä ja valmiiksi pakattuja 1 kg pusseihin eikä vaaka ollut kovin tarkka, päädyttiin siihen, että kuitujen määrä pidettiin samana mutta annoskokoa kasvatettiin 40 %. Kuitumäärän pienentäminen helpotti ekstruusio prosessia, koska massasta tuli notkeampaa ja se valui herkemmin suppilon läpi ekstruuderiiin.

Testierä 5 ajettiin 50 % pienemmällä kuitumäärällä kuin kuitutoimittaja oli suositellut, tämän lisäksi linjaston ajonopeutta pienennettiin. Suurin osa elementeistä onnistui erittäin hyvin ja vastasivat täysin myyntikelpoista tuotetta. Kuvassa 10 on poikkileikkaus pienemmällä kuitumäärällä.



Kuva 10. Poikkileikkaus pienemmällä kuitumäärä

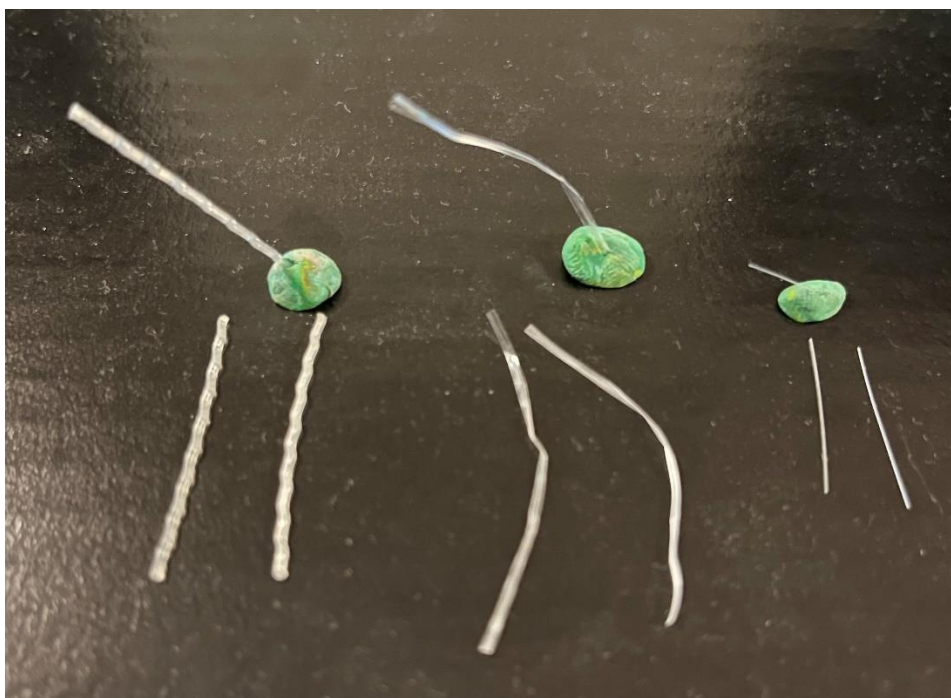
5.3 Testikappaleiden valmistus, toinen päivä

Toisena päivänä testiajot suoritettiin yhdessä kuitutoimittajan edustajan kanssa, joka oli mukana antamassa ohjeistusta kuitujen oikeaoppiseen käyttöön. Toisen päivän testierät sekä niiden huomiot esitetty taulukossa 4.

Erä Nro	Kuitumäärä	Massamäärä	Sekoitus aika kuivana	Huomioita
1	2 kg	0,5 m ³	1min	Ajettavuus hyvä
2	3 kg	0,5 m ³	1min	Laatu heikkeni
3	2,5 kg	0,5 m ³	2min	Massa aavistuksen liian kuivaa
4	2,5 kg	0,7 m ³	2min	Erittäin "karvainen" pinta

Taulukko 4. Toisen päivän testierät

Tällä kertaa kuitumalli oli myös rakenteeltaan erilainen. Ensimmäisenä päivänä käytetyt kuidut olivat kalvomaisia ja elastisia. Toisena päivänä erissä 1–3 käytetyt kuidut olivat jäykkiä ja profiililtaan vahvasti teksturoituja. Viimeisessä erässä oli kokeilussa mikrokuituja, joiden vaikutusta haluttiin kokeilla. Yleisesti mikrokuiduilla ei ole rakenteelliseen lujuuteen vaikutusta. Kuvassa 11 testeissä käytetyt kuidut vasemmalta oikealle: makrokuitu 5, makrokuitu 3 ja mikrokuitu 1.



Kuva 11. Testikuidut

Testierä 1 ajettiin kuitutoimittajan edustajan ehdottamalla minimimäärällä, jossa kuitua oli 2 kg/0,5 m³. Tämä oli hänen mielestään pienin määrä, jolla voitaisiin saavuttaa rakenteellista lujuutta. Sekoitusaika sekä ajoparametrit pidettiin samana kuin edellispäivän onnistuneissa testeissä. Kuidut sekoittuivat rakenteensa takia erittäin hyvin massaan, eikä niissä ollut havaittavissa samanlaista staattisesta sähköstä johtuvaa paakkuuntumista kuin aiemmassa kuitutyypissä. Tuotteen valmistus onnistui kuiduilla paremmin ja kuitujen jäykkyyden takia ne eivät jääneet ”törröttämään” elementin pinnalle, joka käy ilmi kuvasta 11.



Kuva 11. Hyvä pinnanlaatu

Testierä 2 valmistettiin kuitutoimittajan edustajan ohjeistamalla kuidun maksimimäärällä 3 kg/0,5 m³, koska ensimmäinen erä onnistui hyvin. Kuitumäärän lisääminen 50 % kuitenkin aiheutti sen, että massa pyrki jatkuvasti tukkimaan ekstruuderin syöttösuppilon. Tämä vaikutti suoraan kappaleiden pinnanlaatuun sekä siihen, että elementteihin tuli vajaita täyttöjä ja ne eivät täyttäneet laatuvaatimuksia. Kuva 12.



Kuva 12. Reunan vajaa täyttö.

Testierä 3 valmistettiin pienentämällä kuidunmäärää 16,67 %. Massan vesimäärä oli silmämääräisesti katsottuna hieman liian pieni, mutta kuitenkin kuidun vähentäminen vaikutti siihen, että elementtien reunat täytyivät paremmin kuin testierä 2:ssa.

Testierä 4 oli poikkeuksellinen siten, että käytössä oli PVA:sta valmistettu mikrokuitu. Tuotteen valmistus kuidun kanssa onnistui ongelmitta, mutta aiheutti elementtiin erittäin ”karvaisen” pinnan. Tällä on merkitystä etenkin pinnoitusvaiheessa ja voisi aiheuttaa ongelmia seinien viimeistelyssä työmaalla.



Kuva 13. PVA-kuitua elementin pinnassa.

5.4 Esivalmistelu

Kun kappaleet olivat kuivuneet varastossa 24 päivää, niistä sahattiin taivutuslujuuden, tiheyden sekä puristuslujuuden määrittämiseen sopivat kappaleet. Kuivuneiden elementtien tarkastelusta kävi ilmi, että kuidut olivat painuneet kasaan. Kasaan painuminen johtui siitä, että kuivamisen aikana elementit varastoitettiin päällekkäin. Kuitubetonin syötössä ilmenneiden ongelmien takia niistä löytyi myös harvoja kohtia sekä luhistumia. Näiden syiden takia sahattavat kappaleet jouduttiin valikoimaan tarkasti. Kuvissa 14 ja 15 kuitubetonin syötöstä johtuvia virheitä tuotteissa.



Kuva 14. Luhistumaa



Kuva 15. Reunan vajaata täyttöä

5.5 Pohdinta

Jotta kuituja voitaisiin järkevästi annostella joutuisi yritys investoimaan annostelulaitteeseen, koska polymeerikuitujen levittäminen käsin ei ole järkevää. Elastiset kalvomaiset kuidut voivat staattisuutensa sekä rakenteensa takia vaatia erikoisannostelijan, siksi, että niiden erottaminen jo manuaalisesti osoittautui työlääksi. Jäykät kuidut olivat huomattavasti helpompia käsitellä ja ne sekoittuivat tasaisemmin kevytsorabetoniin.

Ekstruusiolinjan suppilo aiheutti selkeitä haasteita kuitubetonin käytölle tuotteessa. Kuitubetoni tukki helposti suppilon kapenevan osuuden ja aiheutti sinne tukoksen. Tämä ilmeni siten, että tuote ei täyttynyt tasaisesti joka kohdasta. Ratkaisuksi tähän voisi pohtia suppilon kartiomaisen alaspäin kapenevan muodon muuttamista tai sen painovoimaan perustuvan syöttöjärjestelmän uusimista niin, että kuitubetonin syöttö toimisi mekaanisesti tai massan valumista edistettäisiin suppilon rungossa olevilla täryttimillä. Jotta tuotetta voitaisiin valmistaa tasalaatuisesti tuotannossa olisi suppiloon tehtävä muutos pakollinen.

Kuitujen 1 ja 3 ikävänä ominaisuutena oli se, että ne nousivat ”törröttämään” elementin pintaan. Näiden kuitujen poistamiseen tulisi myös keksiä ratkaisu koska ne todennäköisesti aiheuttaisivat ongelmia viimeistelyvaiheessa työmaalla. Yksi ratkaisu tähän voisi olla niiden polttaminen/sulattaminen pois jossain vaiheessa ennen lopullista pakkausta.

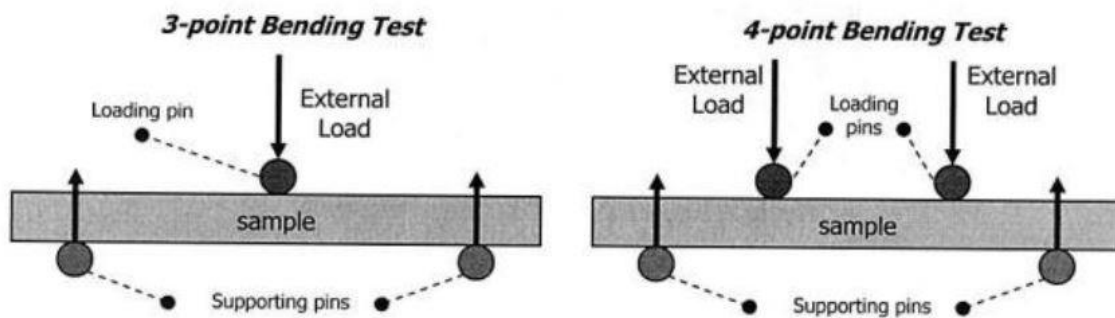
Betonimassan tasalaatuisuutta tulisi myös pyrkiä parantamaan, koska vesimäärän vaihtelut olivat välillä liian suuria. Tähän vaikutti osaksi betonisekoittimessa ollut pieni vesivuoto koehetkellä. Tuotannossa olleet koneiden käyttäjät myös epäilivät muovikuitujen vaikuttavan hieman kosteusanturin toimintaan. Kuitutoimittajan edustaja myös esitti massan tiivistymistä edistävän lisäaineen kokeilua osana prosessisia, koska tuotteen tiheys vaikuttaa olennaisesti kuidun tartuntaan lopullisessa tuotteessa.

Jotta kuituja voitaisiin tehokkaasti testata tuotteessa, tulisi ensisijaisesti saada linjaston syöttö muutetuksi kuiduille sopivaksi. Tämän jälkeen tuotteen valmistukseen liittyvien parametrien säätäminen olisi todennäköisesti helpompaa ja kuitubetonia sisältävät elementit tiiviimpiä sekä tasalaatuisempia. Tämä vaatisi tietysti yritykseltä investointia muutostyöhön, mutta toisaalta se voisi myös vaikuttaa kuiduttoman tuotteen tasalaatuisuuteen.

6 Tutkimuksen tulokset

6.1 Taivutuslujuus

AKO-Wall elementtien taivutuslujuuden määrittäminen suoritettiin tekemällä niille 3-piste ja 4-piste taivutuslujuustesti yrityksen omistamalla Form-test Delta 4–200 / Digimaxx C20 laitteella. Samalla haluttiin verrata kuinka poikkeavia tuloksia kaksi toisistaan hieman eroavaa menetelmää antaisivat. Menetelmät näkyvät kuvassa 14.



Kuva 14. 3- ja 4-pistetaivutus kuvattuna (Nagler, J. 2019.)

3-pistetaivutuslujuuden määrittämiseen käytettiin yhtälöä

$$f_{cf} = \frac{3Fl}{2xd_1xd_2^2}$$

4-pistetaivutuslujuuden määrittämiseen käytettiin yhtälöä

$$f_{cf} = \frac{Fl}{d_1xd_2^2}$$

missä

f_{cf} on taivutuslujuus MPa (N/mm²)

F suurin kuorma, N

l kuormitustukien välimatka, mm

d_1 ja d_2 ovat koekappaleen sivujen mitat, mm.

SFS-EN 12390-5 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 5: Koekappaleiden taivutuslujuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Taivutuslujuuden määrittämisessä käytettyjen kappaleiden mitat olivat:

l= 600 mm d_1 = 600 mm d_2 = 92 mm

Koneen nopeus taivutuslujuuden määrittämisessä oli 0.05 N/mm²/s

Ennen varsinaisen taivutuslujuuden määrittämistä koekappaleet punnittiin, jotta voitiin arvioida niiden tiheyseron vaikutusta lopullisiin tuloksiin sekä tasalaatuisuutta. Kokeiden aikana pyrittiin myös tekemään arvioita halkeamisilmiöstä sekä kuidun toiminnasta tuotteessa.

Kuiduttomien referenssikappaleiden painossa ei ollut suurta vaihtelua. 12 kappaleen painon keskiarvo oli 33,18 Kg ja keskihajonta 0,72. Taivutuksessa kappaleiden katkeaminen tapahtui odottamatta. Taivutuslujuudessa ilmeni yllättävän suuria eroavaisuuksia vaikka kappaleiden oletettiin olevan tasalaatuisia niiden painovaihteluiden ollessa pieniä. Ero pienimmän ja suurimman tuloksen välillä 3-pistetaivutuksessa oli 0,94 N/mm² taivutuslujuuden keskiarvon ollessa 2,17 N/mm². 4-pistetaivutuksessa suurin ero oli 1 N/mm² ja keskiarvo 1,81 N/mm². Tämä kertoo sen, että taivutuksessa käytetyllä menetelmällä on vaikutusta lopullisiin tuloksiin. Kuiduttomat elementit myös katkesivat aina niihin kohdistuneen voiman suunnassa kuva 15.



Kuva 15. Kuiduttoman referenssin katkeaminen

Makrokuitu 3:n testikappaleiden painoissa oli selkeitä valmistuseräkohtaisia heittoja, nämä johtuivat todennäköisesti siitä, että ekstruusiovaiheessa olleet kuitubetonin syöttöongelmat tekivät suuria vaihteluita tiheyteen. Eroa painoltaan suurimman ja pienimmän erän keskiarvolla oli jopa 2,68 Kg. Painolla vaikutti myös olevan yhteys taivutuslujuuteen, koska paras keskiarvo saavutettiin painavimmassa erässä. 3-pistetaivutuksessa tämän erän taivutuslujuuden keskiarvo oli 1,88 N/mm², kun taas 4-pistetaivutuksessa se oli 1,75 N/mm². Kuidun vaikutus elementin katkeamiseen näkyi selkeästi. Elementit katkesivat rauhallisesti

kuorman vaikutuksesta. Kuitujen tartunnassa oli selkeitä eräkohtaisia eroavaisuuksia. Joissain kappaleissa lähes kaikki kuidut tulivat ehjinä ulos vastakkaisista kappaleista, kun taas toisissa osa kuiduista katkesi. Kuvassa 16 vertailua 2 kappaleen välillä.



Kuva 16. Eroa tartunnassa

Selkeä ominaisuus joka makrokuitu 3:ssa näkyi, oli sen kyky pitää kappaleet tiukasti yhdessä halkeamisen jälkeen. Mitä korkeampi kappaleiden tiheys oli sen paremmin kuidut vastustivat halkeaman kasvua. Joissain tapauksissa kappaleiden erottamiseen toisistaan sai käyttää suuren määrän voimaa sekä sen rakennetta jouduttiin rikkomaan vasaralla. Kappaleet kestivät myös hyvin niiden siirtämistä katkeamisen jälkeen kuva 17.



Kuva 17. Kuidut pitävät kappaleet yhdessä.

Erona kuiduttomaan kevytsorabetoniin halkeamista tapahtui välillä myös pitkittäissuuntaan, josta pystyi päättelemään sen, että kuidut myös jakoivat kappaleeseen kohdistuvaa voimaa suuremmalle pinta-alalle. Kuvassa 18 näkee hyvin, kuinka voima on jakautunut kappaleessa halkaisten sen useampaan kuin kahteen osaan.



Kuva 18. oletettua voiman jakautumisesta johtuvaa halkeamaa.

Kappaleita tutkiessa voitiin todeta, että vaikka ne oli valmistettu ekstruusiomenetelmällä kuidut eivät olleet asettuneen lineaarisesti yhteen suuntaan vaan niitä oli pysty-, vaaka- sekä sivuttaissuunnassa. (Kuva 19)



Kuva 19. Kuitujen sijoittumista elementin rakenteeseen.

Makrokuitu 5:n painojakauma oli tasaisempaa kuin se oli 3:lla. Tämä selittyy osaksi sillä, että kuitu aiheutti vähemmän ongelmia ekstruusiossa, poikkeuksena toinen erä, jossa kuitumäärä oli suurin. Toisen erän kappaleiden paino olikin kyseisellä kuidulla testatuista pienin sen ollessa 29,45 Kg. Kuidun pito kevytsorabetonissa katkeamistilanteessa oli huonoa, joka ilmeisesti johtui sen jäykästä rakenteesta. Kappaleet sai myös helposti erotettua toisistaan ilman, että niissä olleet kuidut katkesivat. Kuidulla saavutetut taivutuslujuustulokset eivät myöskään olleet kovin hyviä. 3-pistetäivutuksessa taivutuslujuuden keskiarvo oli parhaimmassa erässä 1,53 N/mm², 4-pistetäivutuksessa sen ollessa 1,36 N/mm². Matalat tulokset voivat osittain selittyä sillä, että kyseisen mallinen kuitu vaatisi tiheämmän betonin toimiakseen paremmin.



Kuva 20. Kuidut irtosivat ehjinä.

Mikrokuitu 1:n painojakauma oli tasainen, kuitenkin kappaleiden paino oli yllättävän alhainen keskiarvon ollessa vain 29,44 kg. Kuidun tarttuvuus kevytsorabetoniin oli huonoa, joka johtui todennäköisesti kuidun profiilista sekä sen pituudesta. Taivutuslujuus oli myös alhainen sen ollessa 3-pistetaivutuksessa keskiarvoltaan 1,39 N/mm² ja 4-pistetaivutuksessa 1,28 N/mm².

6.1.1 Tulosten yhteenveto ja pohdinta

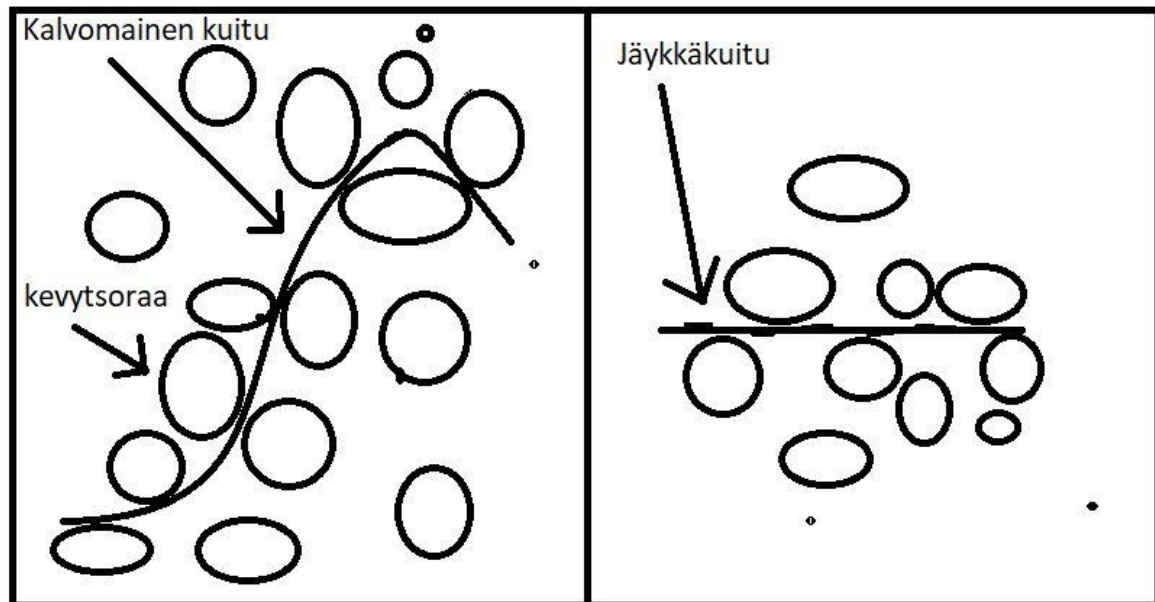
Taivutuslujuuden määryksestä saadut tulokset olivat yllättäviä. Niiden perusteella polymerikuiduilla ei olisi vaikutusta kevytbetonisen elementin taivutuslujuuteen, vaan ne jopa huononsivat sitä. Tulosten keskiarvot esitetty taulukossa 5.

Kuitu	Erä Nro.	Kuitumäärä / 1 m ³	Keskiarvo 3-piste	Keskiarvo 4-piste	Keskiarvo paino
Referenssi		0 Kg	2,17 MPa (N/mm ²)	1,81 MPa (N/mm ²)	33,18 Kg
Makrokuitu 3	2	2 Kg	1,88 MPa (N/mm ²)	1,75 MPa (N/mm ²)	33,09 Kg
Makrokuitu 3	3	2 Kg	1,73 MPa (N/mm ²)	1 MPa (N/mm ²)	30,41 Kg
Makrokuitu 3	4	1,43 Kg	1,82 MPa (N/mm ²)	1,32 MPa (N/mm ²)	31,22 Kg
Makrokuitu 3	5	1 Kg	1,45 MPa (N/mm ²)	1,1 MPa (N/mm ²)	30,41 Kg
Makrokuitu 5	1	4 Kg	1,53 MPa (N/mm ²)	1,36 MPa (N/mm ²)	30,83 Kg
Makrokuitu 5	2	6 Kg	1,2 MPa (N/mm ²)	0,90 MPa (N/mm ²)	29,45 Kg
Makrokuitu 5	3	5 Kg	1,39 MPa (N/mm ²)	1,28 MPa (N/mm ²)	30,44 Kg
Mikrokuitu 1	4	5 Kg	1,25 MPa (N/mm ²)	1,07 MPa (N/mm ²)	29,44 Kg

Taulukko 5. Tuloksia

Kuitenkin tulee huomioida se, että käytössä ollut laitteisto ei aivan soveltunut kuitubetonisen elementin valmistukseen. Suuret heitot painoissa viittaavat siihen, etteivät tuotteet olleet tasalaatuisia. Vaikuttavia tekijöitä tähän on useita, massan kulku suppilosta ekstruuderiin, ajoparametrien vaikutus massan tiivistykseen sekä massan koostumus. Painoeroa voi hie-man myös selittää se, että käytössä ollut Leca-sora ilmoittaa sen tiheysheitoksi $\pm 15\%$. (Leca)

Kuidun rakenteella oli myös suuri merkitys sen toimivuuteen kevytsorabetonissa. Jäykällä kuidulla oli selkeästi huonompi tartunta kuin kalvomaisilla ohuilla kuiduilla. Teoriassa voikin pohtia kiillautuvatko kalvomaiset kuidut Leca-sorapalojen väliin tiiviimmin kuin jäykät kuidut, esimerkkinä kuva 21.



Kuva 21. Kuidun teoreettinen kiillautuminen

Jotta muovikuitujen vaikutuksista kevytsorabetonin taivutuslujuuteen saataisiin varmaa tietoa, tulisi ensiksi pystyä valmistamaan hyvin tasalaatuisia elementtejä. Kuitujen positiivisena vaikutuksena on kiistämättä se, että ne katkeamisen jälkeisen lujuuden ansiosta voivat vaikuttaa elementtien turvallisuuteen sekä uudelleen käytettävyyteen niiden halkeamisen jälkeen.

Täydellinen listaus taivutuslujuuden testauksessa saaduista tuloksista löytyy liitteestä 1.

6.2 Tiheys

Tiheyden määrittämistä varten AKO-Wall elementeistä sahattiin 6 kappaletta kuution muotoisia koekappaleita jokaisesta testierästä. Koekappaleiden mitat kirjattiin ylös erilliseen pöytäkirjaan, kirjattavia mittoja olivat leveys, paksuus, korkeus sekä reiän halkaisija. Kappaleiden leveys oli noin 125 mm, paksuus 92 mm, korkeus 100 mm ja reiän halkaisija 60 mm. Tärkeintä kappaleiden valmistuksessa oli se, että elementissä oleva ontelon reikä olisi sijoittunut mahdollisimman keskelle, koska kappaleita käytettiin myöhemmin myös puristuslujuuden määrittämisessä. Tiheys määritettiin uunikuiville ja ilman kuivausta oleville kappaleille.

Uunikuivia kappaleita kuivattiin uunissa yhden vuorokauden ajan, uunin lämpötilan ollessa 100 °C. Lopuksi kappaleet punnittiin ja niiden paino kirjattiin ylös.



Kuva 22. Punnitus

Lopullinen tiheys määriteltiin yhtälöllä $\frac{m}{V} * 1000$

missä

m on kappaleen massa g

V Kappaleen nettotilavuus cm³

Tiheysmittauksen tulokset esitetty alla olevissa taulukoissa 6,7 ja 8.

Makrokuitu 3 erä 2			Makrokuitu 3 erä 3		
Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta	Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta
1	1279 kg/m ³		1	1197 kg/m ³	
2	1256 kg/m ³		2	1190 kg/m ³	
3	1182 kg/m ³		3	1170 kg/m ³	
4		1278 kg/m ³	4		1240 kg/m ³
5		1353 kg/m ³	5		1306 kg/m ³
6		1346 kg/m ³	6		1249 kg/m ³
Keskiarvo: 1282.2		Hajonta: 57.3	Keskiarvo: 1225.6		Hajonta: 45.5
Makrokuitu 3 erä 4			Makrokuitu 3 erä 5		
Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta	Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta
1	1215 kg/m ³		1	1222 kg/m ³	
2	1143 kg/m ³		2	1235 kg/m ³	
3	1169 kg/m ³		3	1111 kg/m ³	
4		1203 kg/m ³	4		1212 kg/m ³
5		1290 kg/m ³	5		1208 kg/m ³
6		1261 kg/m ³	6		1244 kg/m ³
Keskiarvo: 1213.6		Hajonta: 50.4	Keskiarvo: 1205.1		Hajonta: 44.0

Taulukko 6. Tiheys

Makrokuitu 5 erä 1			Makrokuitu 5 erä 2		
Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta	Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta
1	1278 kg/m ³		1	1193 kg/m ³	
2	1227 kg/m ³		2	1168 kg/m ³	
3	1152 kg/m ³		3	1110 kg/m ³	
4		1203 kg/m ³	4		1149 kg/m ³
5		1274 kg/m ³	5		1210 kg/m ³
6		1302 kg/m ³	6		1222 kg/m ³
Keskiarvo: 1239.3		Hajonta: 51.3	Keskiarvo: 1175.2		Hajonta: 38.3
Makrokuitu 5 erä 3			Mikrokuitu 1		
Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta	Koe-kappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kiuvausta
1	1243 kg/m ³		1	1187 kg/m ³	
2	1201 kg/m ³		2	1134 kg/m ³	
3	1139 kg/m ³		3	1087 kg/m ³	
4		1200 kg/m ³	4		1134 kg/m ³
5		1209 kg/m ³	5		1187 kg/m ³
6		1237 kg/m ³	6		1190 kg/m ³
Keskiarvo: 1204.9		Hajonta: 33.9	Keskiarvo: 1153.3		Hajonta: 38.2

Taulukko 7. Tiheys

Referenssi		
Koekappale	Tiheys uunikuiva	Tiheys ilman kuivausta
1	1232 kg/m ³	
2	1176 kg/m ³	
3	1182 kg/m ³	
4		1332 kg/m ³
5		1309 kg/m ³
6		1308 kg/m ³
Keskiarvo: 1257.5		Hajonta: 61.5

Taulukko 8. Tiheys

Tiheyden vaihteluita saman erän tuloksissa voidaan selittää sillä, että ekstruuderin ruuvit pyörivät reunoilla eri tavalla kuin keskellä. Tämä tarkoittaa sitä, että betonimassa myös tiivistyy eri tavalla elementin reunoilla.

Kun verrataan tiheyden määrittämisessä tulleita tuloksia taivutuslujuuden tuloksiin, voidaan huomata, että erät, joissa tiheys oli suurin, olivat myös taivutuslujuudeltaan parhaita. Tämä vahvistaa teoriaa siitä, että polymeerikuidut vaativat kevytsorabetonilta suurta tiheyttä toimiakseen oletetulla tavalla.

6.3 Puristuslujuus

Puristuslujuuden määrittäminen tehtiin koekappaleista, joita käytettiin myös tiheyden määrittämisessä. Kappale asetettiin alustalle kahden levyn väliin kuvan 23 tavalla. Tämän jälkeen sille tehtiin puristuslujuuden määrittäminen ja tulokset kirjattiin ylös. Lopullinen puristuslujuus määritettiin yhtälöllä.

$$\frac{F \cdot 1000}{A}$$

missä

F suurin kuorma KN

A tehollinen pinta-ala mm²



Kuva 23. Puristuslujuuden määrittäminen

Taulukoissa 9, 10 ja 11 Puristuslujuuden määrittämisestä saadut tulokset.

Makrokuitu 3 erä 2			Makrokuitu 3 erä 3		
Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta	Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta
1	11.5 MN/m ²		1	6.5 MN/m ²	
2	11.1 MN/m ²		2	7.0 MN/m ²	
3	9.9 MN/m ²		3	7.3 MN/m ²	
4		8.3 MN/m ²	4		7.1 MN/m ²
5		11.6 MN/m ²	5		7.9 MN/m ²
6		9.2 MN/m ²	6		5.4 MN/m ²
Keskiarvo: 10.3		Hajonta: 1.2	Keskiarvo: 6.9		Hajonta: 0.8

Taulukko 9. Puristuslujuus

Makrokuitu 3 erä 4			Makrokuitu 3 erä 5		
Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta	Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta
1	9.2 MN/m ²		1	7.6 MN/m ²	
2	6.7 MN/m ²		2	9.0 MN/m ²	
3	6.0 MN/m ²		3	4.9 MN/m ²	
4		4.8 MN/m ²	4		5.7 MN/m ²
5		8.9 MN/m ²	5		6.2 MN/m ²
6		5.8 MN/m ²	6		7.2 MN/m ²
Keskiarvo: 6.9		Hajonta: 1.6	Keskiarvo: 6.8		Hajonta: 1.4
Makrokuitu 5 erä 1			Makrokuitu 5 erä 2		
Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta	Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta
1	12.0 MN/m ²		1	8.1 MN/m ²	
2	9.2 MN/m ²		2	5.9 MN/m ²	
3	7.2 MN/m ²		3	5.3 MN/m ²	
4		7.2 MN/m ²	4		13.6 MN/m ²
5		7.2 MN/m ²	5		7.5 MN/m ²
6		7.9 MN/m ²	6		5.8 MN/m ²
Keskiarvo: 8.5		Hajonta: 1.7	Keskiarvo: 7.7		Hajonta: 2.8

Taulukko 10. Puristuslujuus

Makrokuitu 5 erä 3			Mikrokuitu 1		
Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus ilman kui- vausta	Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus il- man kuivausta
1	8.3 MN/m ²		1	8.3 MN/m ²	
2	7.0 MN/m ²		2	5.8 MN/m ²	
3	4.6 MN/m ²		3	4.3 MN/m ²	
4		5.7 MN/m ²	4		3.5 MN/m ²
5		5.5 MN/m ²	5		6.6 MN/m ²
6		5.8 MN/m ²	6		4.7 MN/m ²
Keskiarvo: 6.1		Hajonta: 1.2	Keskiarvo: 5.5		Hajonta: 1.6
Referenssi					
Koe- kap- pale	Puristuslujuus uunikuiva	Puristuslujuus ilman kui- vausta			
1	10.6 MN/m ²				
2	9.8 MN/m ²				
3	10.2 MN/m ²				
4		9.2 MN/m ²			
5		6.7 MN/m ²			
6		6.0 MN/m ²			
Keskiarvo: 8.3		Hajonta: 1.7			

Taulukko 11. Puristuslujuus

Puristuslujuuden tuloksista voi huomata kuinka tiheydellä on pääsääntöisesti yhteys siihen kuinka paljon puristusta kappale kestä. Makrokuitu 3:n tulokset noudattavat kaavaa: mitä suurempi tiheys sen suurempi lujuus, mutta muissa kuiduissa oli poikkeuksia. Mielenkiintoista tuloksissa oli kuitenkin se, miten makrokuitu 3:n erä 2 antoi referenssikappaleita parempia tuloksia. Tästä voisi päätellä, että kun kuitubetonilla saavutetaan tarpeeksi korkea tiheys, polymeerikuidut vaikuttavat positiivisesti puristuslujuuteen.

7 Yhteenveto

Toimeksiannon tarkoituksena oli selvittää millaisia vaikutuksia polymeerikuiduilla olisi yrityksen AKO-Wall seinäelementtiin ja voitaisiinko niillä kasvattaa sen taivutuslujuutta. Tavoitteena oli valita tarkoitukseen sopivia polymeerikuituja sekä tehdä havaintoja, kuinka kuidut vaikuttaisivat tuotteen pinnanlaatuun, puristuslujuuteen ja valmistettavuuteen ekstruusiolinjastolla. Valmistetuille koekappaleille suoritettiin myös tiheyden määrittäminen osana ominaisuuksien testausprosessia.

Testeihin valitusta 92 mm paksusta AKO-Wall elementistä valmistettiin koekappaleita kahden päivän ajan. Testeihin valikoitui 3 eri kuitumallia, joiden annostelu suoritettiin pääsääntöisesti kuitutoimittajan edustajan suositusten mukaan. Polymeerikuitujen määrää myös vaihdeltiin, jotta saatiin selville eroavaisuuksia niiden vaikutuksesta tuotteeseen, sen ominaisuuksiin sekä valmistettavuuteen.

Työn ensimmäisessä vaiheessa, joka koski tuotteen valmistettavuutta saatiin selville se, että nykyinen laitteisto ei aivan soveltunut kuituvahvistetulle kevytsorabetonille. Suurimmat ongelmat koskivat ekstruusiolinjaston syöttösuppiloa, joka oli liian ahdas ja pyrki tukkiutumaan valmistusprosessin aikana. Tämä aiheutti sen, että valmistetut kappaleet eivät olleet mielestäni tasalaatuisia mikä vaikutti testeissä saatuihin tuloksiin. Kuitujen annostelu puolestaan vaatisi sille suunnitellun laitteiston, jos niiden käyttöön päädyttäisiin, koska niiden manuaalinen annostelu on huomattavan työlästä. Tietynlaiset kuidut myös tekivät sen, että ne pyrkivät nousemaan pystyyn elementin pinnassa. Se vaikeuttaisi todennäköisesti elementin viimeistelyä työmaalla.

Polymeerikuitujen vaikutus AKO-Wall elementissä käytettävän kevytsorabetonin ominaisuuksiin olivat taivutuslujuuden kannalta vähäisiä. Kuidut eivät lisänneet taivutuslujuutta mutta elementti pysyi kasassa katkeamisen jälkeen. Tällä voisi olla merkitystä tuotteen turvallisuuden kannalta, koska joskus halkeamaa voi olla vaikea nähdä ja asennusvaiheessa tippuva pala voi aiheuttaa vakavan vaaratilanteen.

Kuiduilla kuitenkin vaikutti olevan vaikutusta puristuslujuuteen, koska parhaimmat tulokset saatiin polymeerikuitua sisältävällä betonilla. Jotta polymeerikuitujen hyödyistä AKO-Wall elementissä saataisiin varmuus, se vaatisi sen, että elementin valmistuksessa käytettävää laitteistoa muokattaisiin paremmin kuiduille sopivaksi. Testikappaleiden tasalaatuisuus on ensisijaisen tärkeää luotettavan tutkimustuloksen saamiseksi. Tuloksista kävi myös ilmi se, että niin taivutus- kuin puristuslujuudella oli yhteys kappaleen tiheyteen.

Lähteet

Suomen Betoniyhdistys ry 2005. Betonitekniikan oppikirja 2004. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Suomen Betoniyhdistys ry 2016. Betoninormit 2016. Vaasa: Oy Fram Ab.

Leskelä, M.V. 2008. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2008. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Betoniteollisuus ry. Betoni rakennusmateriaalina. Viitattu 10.8.2020. Saatavissa <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>

Betoniteollisuus ry. Betonin valmistus. Viitattu 10.8.2020. Saatavissa <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>

Betoniteollisuus ry. Betonin käyttöikä. Viitattu 10.8.2020. Saatavissa <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-kayttoika/>

Tikkanen, J. Seosaineet. Betoniyhdistys ry. Kurssimateriaali. Viitattu 10.11.2020. Saatavissa <http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/betonilaborantti-ja-myllari-2020/1.-jakso/7.1.2020-seosaineet.pdf>

LKAB Minerals Oy. 2015. Raskasta asiaa betonista – Raskasbetoni. Betoni-lehti. Nro 2/2015. Viitattu 13.10.2020. Saatavissa https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/08/BET1502_74-77.pdf

The Concrete centre. Lightweight concrete. Viitattu 13.10.2020. Saatavissa [https://www.concretecentre.com/Performance-Sustainability-\(1\)/Special-Concrete/lightweight-concrete.aspx](https://www.concretecentre.com/Performance-Sustainability-(1)/Special-Concrete/lightweight-concrete.aspx)

Hedjazi, S. 2019. Compressive Strength of Lightweight Concrete. Viitattu 18.10.2020. Saatavissa <https://www.intechopen.com/books/compressive-strength-of-concrete/compressive-strength-of-lightweight-concrete>

Bauroc. Kevytbetonilla on ainutlaatuiset ominaisuudet. Viitattu 20.10.2020. Saatavissa <https://bauroc.fi/kevytbetoni/>

Shraddu, S. Light Weight Concrete: Types and Applications. Engineering Notes. Viitattu 20.10.2020. Saatavissa <https://www.engineeringenotes.com/concrete-technology/light-weight-concrete/light-weight-concrete-types-and-applications-concrete-technology/31840>

H+H. Siporex harkko. Viitattu 20.10.2020. Saatavissa

<http://www.hplush.fi/fi/siporexharkko>

2016. Kevytsorabetoninen seinäelementti AKO. RT kortti. RT tuotetieto. Viitattu

2.11.2020. Saatavissa [RT 38768 Kevytsorabetoninen seinäelementti AKO](#)

[Rakennusbetoni- ja Elementti Oy](#)

Rakennusbetoni- ja Elementti Oy. Viitattu 2.11.2020. Saatavissa [AKO Wall väliseinä](#)

[kevytsorabetonista \(rakennusbetoni.fi\)](#)

Lumme, P. 2008. Kuitubetonien käyttö lisääntyy rakenteissa- jopa kantavissa rakenteissa.

Betoni-lehti. Nro 3/2008. Viitattu 10.11.2020. Saatavissa [https://betoni.com/wp-](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0803-s-72-77.pdf)

[content/uploads/2015/10/BET0803-s-72-77.pdf](https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0803-s-72-77.pdf)

Semtu. Teräskuidut. Viitattu 10.11.2020. Saatavissa

<https://www.semtu.fi/fi/tuotteet/kuidut/teraskuidut>

Suomen betoniyhdistys ry. 2012. Polymeerikuidut betonissa. Ohje. Suomen

betoniyhdistys ry. Viitattu 12.11.2020. Saatavissa

<http://www.betoniyhdistys.fi/media/julkaisut/by-13-polymeerikuidut-betonissa.pdf>

Smith, K. Atkinson, T. 2010. PP fibers to resist fire-induced concrete spalling. TunnelTalk.

Viitattu 12.11.2020. Saatavissa [https://www.tunneltalk.com/Polypropylene-fibres-Nov10-](https://www.tunneltalk.com/Polypropylene-fibres-Nov10-Resistance-to-concrete-spalling-under-fire.php)

[Resistance-to-concrete-spalling-under-fire.php](https://www.tunneltalk.com/Polypropylene-fibres-Nov10-Resistance-to-concrete-spalling-under-fire.php)

Basf. 2017. MasterFiber kokonaisratkaisuja kuituvahvisteiseen betoniin. Esite. Viitattu

15.11.2020. Saatavissa [https://assets.master-builders-solutions.com/fi-fi/masterfiber-](https://assets.master-builders-solutions.com/fi-fi/masterfiber-booklet-fin-web.pdf)

[booklet-fin-web.pdf](https://assets.master-builders-solutions.com/fi-fi/masterfiber-booklet-fin-web.pdf)

SFS-EN 12390-5 2009. Kovettuneen betonin testaus. Osa 5: Koekappaleiden taivutuslu-

juus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

Nagler, J. 2019. Schematic of flexure tests (3-point and 4-point bending test). Viitattu

22.11.2020. Saatavissa [Schematic of flexure tests \(3-point and 4-point bending test\) \[36\]. |](#)

[Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)

Leca. Kevytsoran materiaaliominaisuudet. Viitattu 26.11.2020. Saatavissa [https://leca.fi/rat-](https://leca.fi/ratkaisut/geotekniikka/kevytsoran-materiaaliominaisuudet/)

[kaisut/geotekniikka/kevytsoran-materiaaliominaisuudet/](https://leca.fi/ratkaisut/geotekniikka/kevytsoran-materiaaliominaisuudet/)

Liite 1. Taivutuslujuuden tulokset

			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus		
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)
5	1Kg	Makrokuitu 3	8820	1.56	30.64	10130	1.20	30.92
5	1Kg	Makrokuitu 3	9950	1.76	30.346	9190	1.09	30.622
5	1Kg	Makrokuitu 3	7130	1.26	29.834	9100	1.08	30.452
5	1Kg	Makrokuitu 3	8680	1.54	30.292	8030	0.95	29.975
5	1Kg	Makrokuitu 3	6280	1.11	31.024	10200	1.21	29.959
		Keskiarvo	8172.00	1.45	30.43	9330.00	1.10	30.39
		Keskihajonta	1458.14	0.26	0.44	888.74	0.11	0.42
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus		
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)
4	1.43Kg	Makrokuitu 3	11380	2.02	33.305	10980	1.30	30.259
4	1.43Kg	Makrokuitu 3	10330	1.83	32.055	10490	1.24	30.347
4	1.43Kg	Makrokuitu 3	12400	2.20	31.694	10760	1.27	30.418
4	1.43Kg	Makrokuitu 3	9070	1.61	31.226	11600	1.37	32.145
4	1.43Kg	Makrokuitu 3	8210	1.45	29.849	12240	1.45	30.851
		Keskiarvo	10278.00	1.82	31.63	11214.00	1.32	30.80
		Keskihajonta	1692.33	0.30	1.26	704.76	0.08	0.78
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus		
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)
3	2Kg	Makrokuitu 3	10940	1.94	31.999	8350	0.99	30.027
3	2Kg	Makrokuitu 3	9260	1.64	29.564	9260	1.09	29.562
3	2Kg	Makrokuitu 3	9070	1.61	31.374	8700	1.03	30.24
3	2Kg	Makrokuitu 3				7400	0.87	29.505
3	2Kg	Makrokuitu 3						
		Keskiarvo	9756.67	1.73	30.98	8427.50	1.00	29.83
		Keskihajonta	1029.19	0.18	1.26	780.83	0.09	0.36
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus		
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)
2	2Kg	Makrokuitu 3	9620	1.70	33.264	13540	1.60	33.028
2	2Kg	Makrokuitu 3	9820	1.74	33.516	14250	1.68	32.859
2	2Kg	Makrokuitu 3	9680	1.72	33.221	16340	1.93	32.809
2	2Kg	Makrokuitu 3	12340	2.19	33.305	16480	1.95	33.061
2	2Kg	Makrokuitu 3	11700	2.07	33.04	16340	1.93	32.922
2	2Kg	Makrokuitu 3				12160	1.44	32.758
		Keskiarvo	10632.00	1.88	33.27	14851.67	1.75	32.91
		Keskihajonta	1289.15	0.23	0.17	1811.59	0.21	0.12
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus		
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)
Referenssi		Ei kuitua	11070	1.96	32.46	18120	2.14	33.493
Referenssi		Ei kuitua	9910	1.76	32.268	15090	1.78	33.517
Referenssi		Ei kuitua	15210	2.70	33.417	15080	1.78	33.473
Referenssi		Ei kuitua	14070	2.49	33.665	15700	1.85	33.507
Referenssi		Ei kuitua	11630	2.06	33.219	9680	1.14	32.209
Referenssi		Ei kuitua	11670	2.07	33.605	18120	2.14	33.283
		Keskiarvo	12260.00	2.17	33.11	15298.33	1.81	33.25
		Keskihajonta	1983.04	0.35	0.60	3090.04	0.37	0.52

			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus			
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	
4	5Kg	Mikrokuitu 1	7280	1.29	29.211	9410	1.11	29.266	
4	5Kg	Mikrokuitu 1	6190	1.10	29.705	10070	1.19	29.443	
4	5Kg	Mikrokuitu 1	7910	1.40	29.524	8490	1.00	28.64	
4	5Kg	Mikrokuitu 1	6790	1.20	29.522	8100	0.96	30	
4	5Kg	Mikrokuitu 1				9090	1.07	29.598	
		Keskiarvo	7042.50		1.25	29.49	9032.00	1.07	29.39
		Keskihajonta	730.18		0.13	0.21	772.35	0.09	0.50
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus			
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	
3	5Kg	Makrokuitu 5	8370	1.48	30.392	11000	1.30	30.843	
3	5Kg	Makrokuitu 5	7620	1.35	30.026	9830	1.16	30.621	
3	5Kg	Makrokuitu 5	7560	1.34	29.957	11350	1.34	30.584	
3	5Kg	Makrokuitu 5	7410	1.31	29.919	10730	1.27	30.864	
3	5Kg	Makrokuitu 5	8310	1.47	30.739	11100	1.31	30.451	
		Keskiarvo	7854.00		1.39	30.21	10802.00	1.28	30.67
		Keskihajonta	450.70		0.08	0.35	587.00	0.07	0.18
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus			
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	
2	6Kg	Makrokuitu 5	8000	1.42	30.18	8110	0.96	29.078	
2	6Kg	Makrokuitu 5	6710	1.19	29.248	7160	0.85	29.35	
2	6Kg	Makrokuitu 5	6150	1.09	29.943	9080	1.07	29.414	
2	6Kg	Makrokuitu 5	6200	1.10	29.098	5410	0.64	29.15	
2	6Kg	Makrokuitu 5	6900	1.22	30.242	8370	0.99	28.773	
		Keskiarvo	6792.00		1.20	29.74	7626.00	0.90	29.15
		Keskihajonta	748.38		0.13	0.53	1416.84	0.17	0.25
			3-pistetaivutus			4-pistetaivutus			
Erä	Kuitumäärä /1m ³	Kuitu	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	Suurin kuorma (N)	Taivutuslujuus Mpa (N/mm ²)	Paino (Kg)	
1	4Kg	Makrokuitu 5	7220	1.28	30.27	12880	1.52	31.095	
1	4Kg	Makrokuitu 5	9590	1.70	31.33	11270	1.33	30.845	
1	4Kg	Makrokuitu 5	7570	1.34	30.749	10160	1.20	30.638	
1	4Kg	Makrokuitu 5	9300	1.65	30.728	11290	1.33	30.368	
1	4Kg	Makrokuitu 5	9540	1.69	31.441	12100	1.43	30.859	
		Keskiarvo	8644.00		1.53	30.90	11540.00	1.36	30.76
		Keskihajonta	1152.10		0.20	0.48	1018.45	0.12	0.27