

Kuitubetonin taivutuskapasiteetti eri kuitutyyppejä käytettäessä – Diplomityö Aalto-yliopistossa

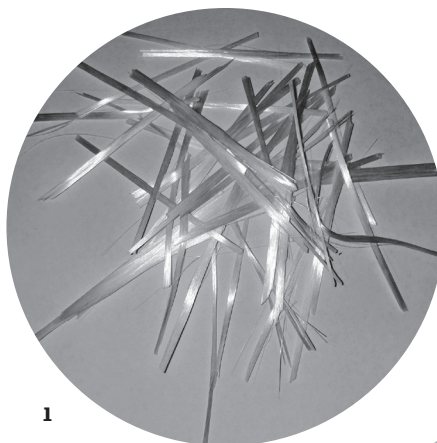
Kirsi Heikkinen

DI, Rakennesuunnittelija
Rakennetekniikka, Kiinteistöt ja
rakentaminen
Ramboll Finland Oy
kirsi.heikkinen@ramboll.fi

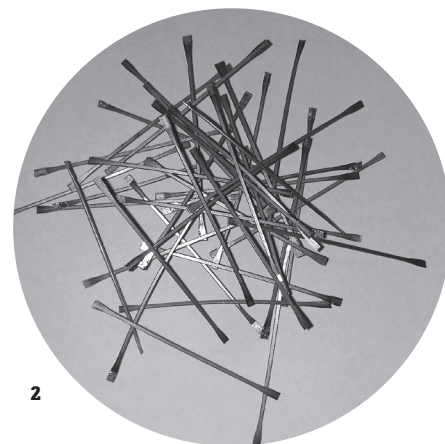
Kuitubetonia on maailmalla käytetty jo pitkään, mutta Suomessa sen hyödyntäminen on vasta vakiintumassa. Suomessa kuitubetonin käytetään erityisesti lattiarakenteissa, mutta teknisesti olisi mahdollista käyttää kuitubetonia myös välipohjissa teräsbetonin sijaan. Kuitubetoni soveltuu erinomaisesti myös ei-kantavien rakenteiden materiaaliksi, kuten arkkitehtonisesti julkisivuelementteihin. Kuitubetonista voidaan valmistaa kevyitä ja harsomaisia rakenteita, joissa voidaan hyvin vapaasti toteuttaa erilaisia rei'ityksiä ja pintakuviointeja.

Aalto-yliopiston rakennustekniikan laitoksella tehtiin diplomityö, jossa tutkittiin kuitubetonin taivutuskapasiteettia. Työssä tutkittiin perinteistä harmaata välipohjabetonia ja valkoista julkisivubetonia käyttäen teräs-, muovi- ja lasikuituja. Työn tavoitteena oli tutkia betonin taivutuskäyttäytymistä eri kuitutyyppejä käytettäessä. Tavoitteena oli lisäksi havainnoida laskennallisesti kuitubetonipoikkileikkauksen taivutuskapasiteettia tekeillä olevan suunnitteluohjeen mukaisesti sekä tarkastella eri kuitutyypin ominaisuuksia ja käyttäytymistä.

Tutkimuksessa valmistettiin yhteensä 66 kuitubetonipalkkia, jotka koestettiin kolmen pisteen taivutusvetokokeella standardin SFS-EN 14651+A1 mukaisesti. Menetelmä määrittää kuitubetonin myötörajan eli pisteen, missä ensimmäinen halkeama syntyy sekä jäännöstaivutusvetolujuuden arvot. Kokeiden tulosten pohjalta saatiin kuormitus-CMOD -kuvaajat, joissa CMOD kertoo halkeaman avautuman



1



2



3

- 1 Lasikuitu Anti-Crack HP 67/36
- 2 Teräskuitu FE 60/36
- 3 Muovikuitu MasterFiber 400

4 Kuitubetoni soveltuu myös ei-kantavien rakenteiden materiaaliksi, kuten arkkitehtonisesti julkisivuelementteihin. Kuvassa Asunto Oy Lontoonkatu 9 Helsingissä, jonka julkisivuissa on käytetty kuitubetonia. Alkalinkestäväällä lasikuidulla vahvistetun betonielementin paksuus on 70 mm. Kohteen on suunnitellut Arkkitehdit Kirsi Korhonen ja Mika Penttinen Oy ja se on valmistunut vuonna 2012.





5 Kuitubetonipalkit koestettiin kolmen pisteen taivutusvetokokeella.

5

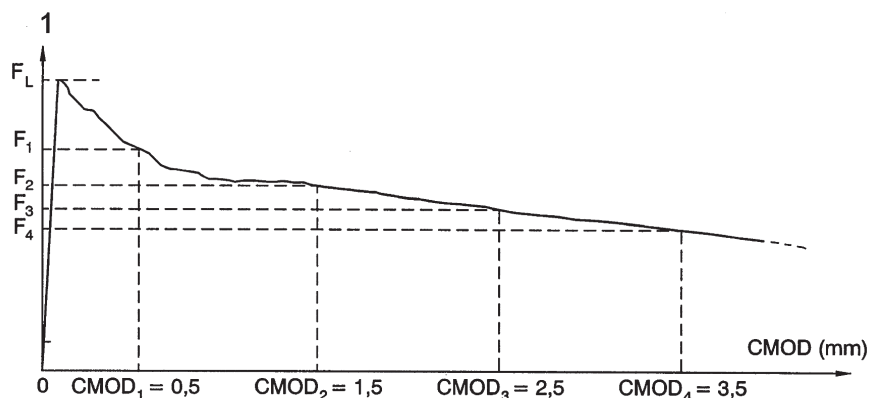
millimetreissä (kuva 6). Näiden kuvaajien pohjalta kuitubetonille laskettiin jäännöslujuudet sekä sitkeysluokat, jotka kertovat kuinka sitkeästi kuitubetoni käyttäytyy ensimmäisen halkeaman jälkeen.

Jotta eri kuitumateriaaleja voitiin vertailla keskenään, niitä käytettiin tilavuudeltaan saman verran (0,637 til-%). Teräskuituja käytettiin lisäksi myös suurempi määrä (0,955 til-%). Kiloina teräskuituja käytettiin 50 kg/m³ ja 75 kg/m³ sekä muovikuituja 8,3 kg/m³ ja lasikuituja 17,1 kg/m³. Betonien lujusluokaksi asetettiin C30/37 ja vesi-sementtisuhteeksi noin 0,50. Työssä käytettiin HE 1/50, HE 75/50 ja FE 60/36 teräskuituja, MasterFiber 400 muovikuitua sekä Anti-Crack HP 67/36 lasikuitua.

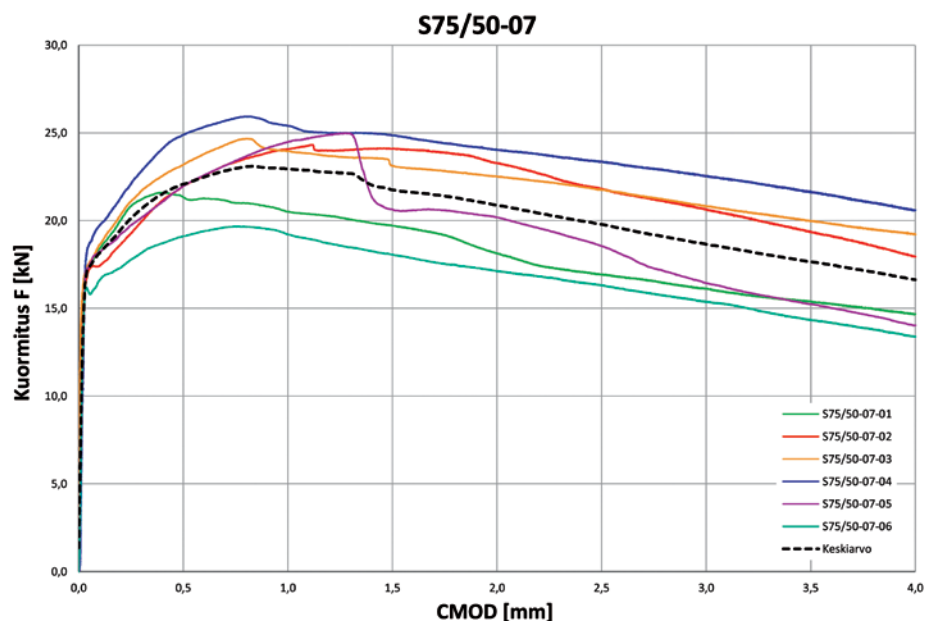
Taivutusvetokokeiden tulokset

Taivutusvetokokeiden kuormitus-CMOD-kuvaajien perusteella parhaimmat tulokset antoivat teräskuidut ja erityisesti silloin, kun kuituja käytettiin 75 kg/m³ (0,955 til-%). Ohuimmat HE 75/50 teräskuidut antoivat erinomaiset tulokset kokeista ja osoittivat sitkeää käyttäytymistä ensimmäisen halkeaman jälkeen (kuva 7). Kun kuitubetonirakenne toimii taivutuksessa sitkeästi, on betonissa riittävästi kuituja ja vetojännitykset siirtyvät halkeamien yli kuitujen ansiosta. Näin poikkileikkaukseen syntyy useampia pieniä halkeamia yhden halkeaman sijaan ja jännitykset levittyvät suuremmalle alueelle.

HE 1/50 teräskuiduilla tuloksissa on runsaasti hajontaa, jopa yli 10 kN ero parhaimman ja heikoimman tuloksen välillä. Yksi syy näin



6 Kuormitus-CMOD -kuvaaja, jossa CMOD kertoo halkeaman avautuman millimetreissä.



7 Kuormitus-CMOD -kuvaaja, harmaa betoni C30/37, teräskuidut HE 75/50, 75 kg/m³ (0,955 til-%)



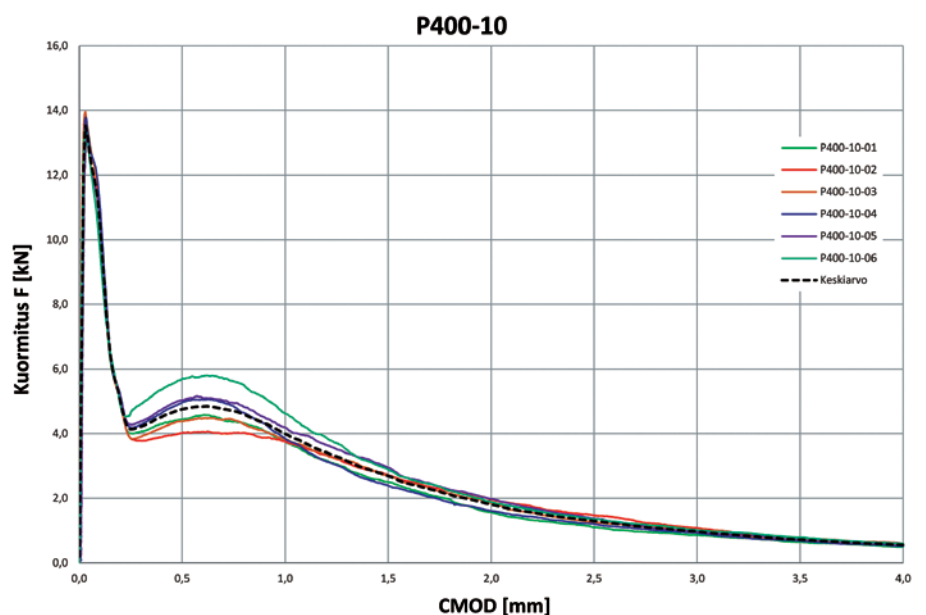
8

suureen vaihteluun voi olla kuitujen suurehko koko, jolloin ne jakaantuvat betonimassaan epätasaisemmin ja kuitujen määrä voi vaihdella poikkileikkauksessa hyvinkin paljon. Myös käytettävät koekappaleet voivat antaa suuremman hajonnan kuin esimerkiksi laatutamainen betonirakenne. HE 1/50 teräskuitua käytetään teollisuudessa paljon, joten on syytä tarkkailla kuitubetonin laatua tuotannon yhteydessä säännöllisesti ja varmistaa, että kuidut sekoittuvat betonimassaan tasaisesti.

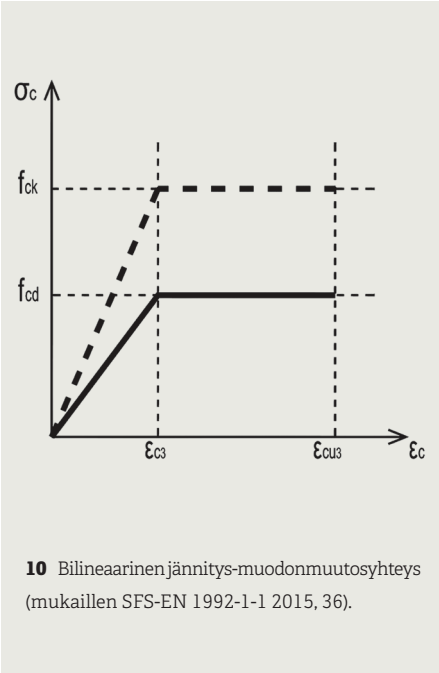
Kuitubetonipalkkien poikkileikkauksia tutkittaessa voitiin todeta, että erityisesti pienet ja ohuet kuidut, kuten muovi- ja lasikuidut, olivat sekoittuneet betonimassaan hyvin ja niiden kuormituskokeiden tulokset olivat hyvin tasaisia. Muovi- ja lasikuitujen sitkeys on kuitenkin varsin heikkoa ensimmäisen halkeaman jälkeen ja lujuus lähtee jyrkkään laskuun (kuva 9). Muovi- ja lasikuidut soveltuvatkin parhaiten ei-kantavien rakenteiden, kuten julkisivuelementtien raudoitteeksi yhdessä perinteisen tankoraudoitteen kanssa.

Diplomityön perusteella havaittiin, kuinka eri kuidut käyttäytyivät taivutuksessa ja mitkä kuidut osoittivat hyviä tuloksia. Aineiston pohjalta potentiaalisin vaihtoehto kantavien rakenteiden mitoittamiseen on HE 75/50 teräskuitu, joka osoitti sitkeää käyttäytymistä ensimmäisen halkeaman jälkeen ja toimi myötölujittuvasti kuormitus-CMOD-kuvaajien perusteella. Teräskuidulla on optimaalinen koko, jonka ansiosta se jakaantuu betonimatriisiin tasaisesti ja sen

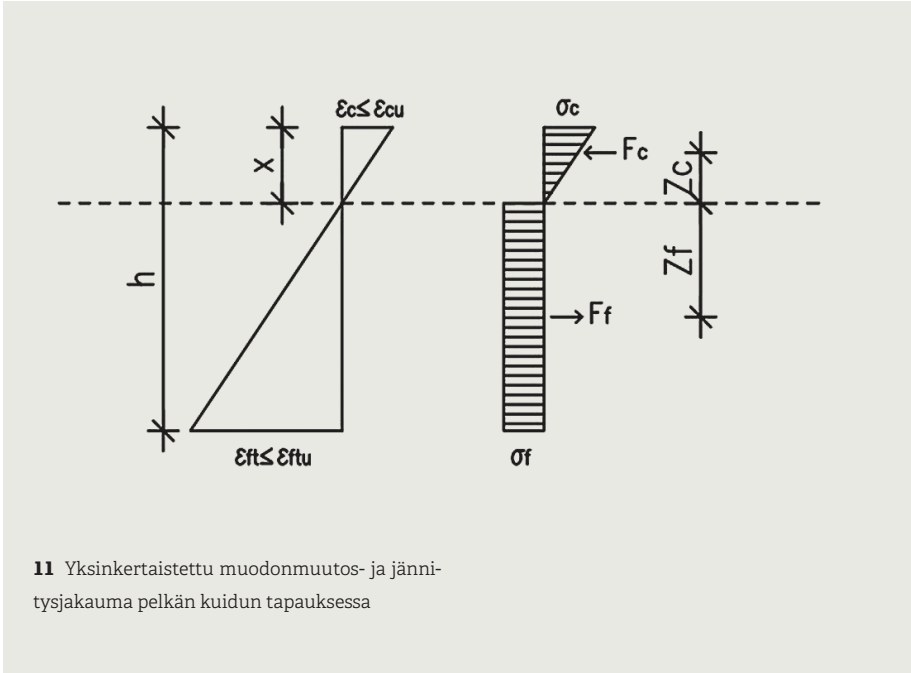
8 Tutkimuksessa koestettiin kuitubetonipalkit kolmen pisteen taivutusvetokokeella standardin SFS-EN 14651+A1 mukaisesti. Menetelmä määrittää kuitubetonin myötörajan eli pisteen, missä ensimmäinen halkeama syntyy sekä jäännöstaivutusvetolujuuden arvot.



9 Kuormitus-CMOD -kuvaaja, valkobetoni C30/37, muovikuidut MasterFiber 400, 8,3 kg/m³ (0,637 til-%).



10 Bilineaarinen jännitys-muodonmuutosyhteys (mukaillen SFS-EN 1992-1-1 2015, 36).



11 Yksinkertaistettu muodonmuutos- ja jännitys jakauma pelkän kuidun tapauksessa

koukkupäiden ansiosta kuitu ei irtoa betoni-matriisista helposti kuormituksen aikana.

Taivutuskapasiteetin laskentamenetelmät

Kuitubetonipoikkileikkauksen taivutuskapasiteetti laskettiin teräskuitubetonirakenteiden suunnitteluohjeen luonnosversion (2017) laskentamenetelmien mukaisesti. Diplomityön esimerkkilaskelmissa mitoitettiin kantavan pilarilaatan poikkileikkaus kentän alueella niin kuitujen kanssa kuin perinteisten raudoitteen ja kuitujen yhdistelmänä. Mitoituksessa ei otettu kantaa rakenteen pitouteen tai leveyteen, eikä rakenteeseen vaikuttavia kuormituksia.

Rakenneanalyysistä ja edellytetystä tarkkuudesta riippuen rakenteen suunnittelussa on mahdollista soveltaa eri jännitys-venymäsuhdetta, kun kyseessä on tavanomaiselle kuormitukselle altistuva poikkileikkaus. Murtorajatil-analyysissä sovelletaan kahta erilaista diagrammia, jotka ovat joko vakioarvoinen jäännösveto-lujuus tai lineaarisesti muuttuva vetojännitys. Vakioarvoisen vetojännityksen mitoituksessa käytetään jäännösvetolujuuden mitoitussarvoa $f_{td,R3}$, joka perustuu yksinkertaistettuun murtorajatil-analyysin suunnittelumenetelmään. Pelkän kuidun tapauksessa käytetään yksinkertaistettua jännitys-muodonmuutosyhteyttä kuvan 10 mukaisesti.

Taivutuskestävyyttä mitoittaessa murtorajatilassa on huomioitava kuitubetonin tapauksessa mitoituksijäännösvetolujuudet sekä vetojännitykset jännitys-muodonmuutosyhteyksistä. Pelkän kuidun tapauksessa muodon-

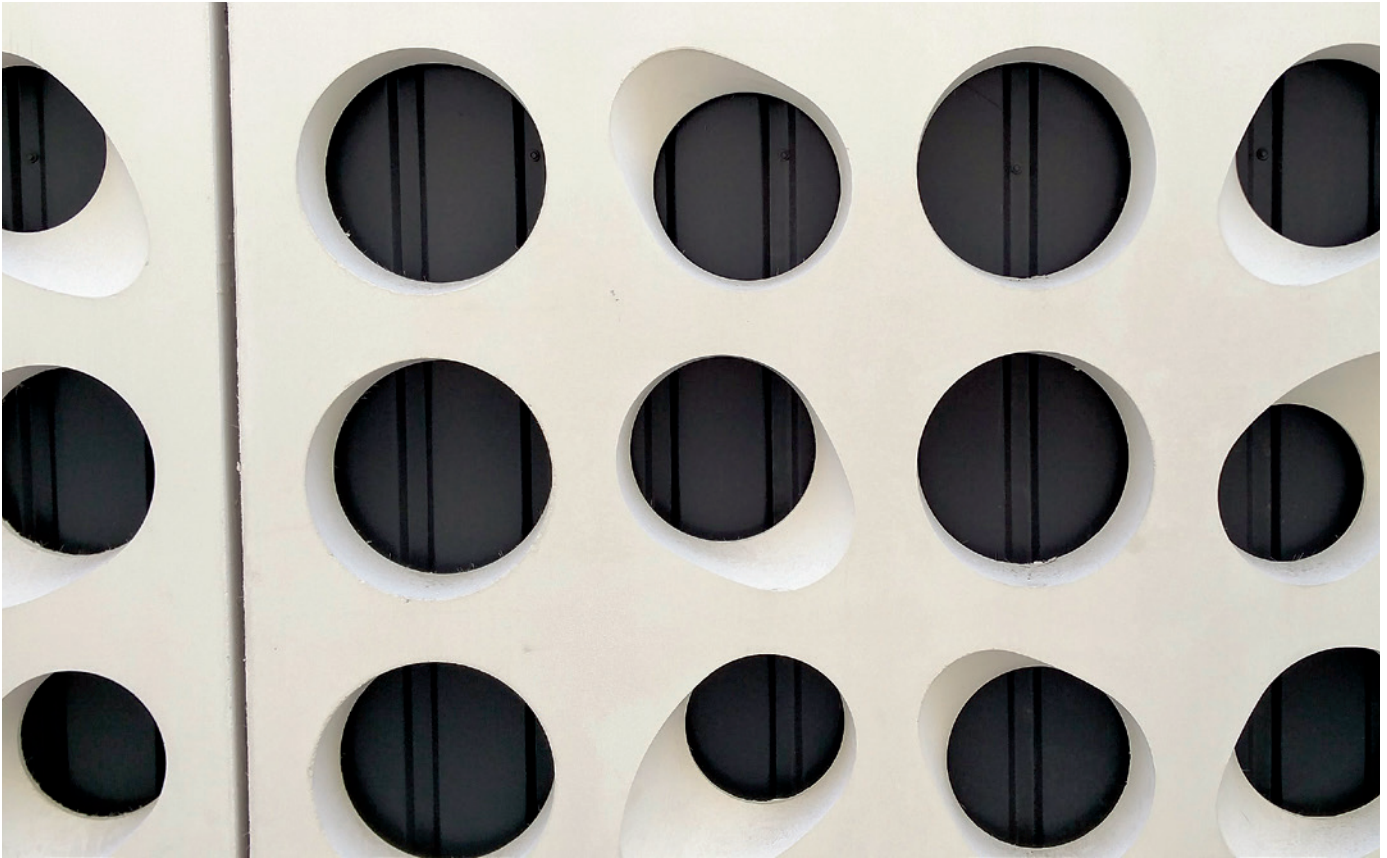
muutos- ja jännitys jakauma yksinkertaistetaan kuvan 11 mukaisesti. Neutraaliakselin etäisyys yläpinnasta ratkaistaan veto- ja puristusresul-tantin yhtäsuuruudesta, kun betonin puristus-jännitys on tiedossa.

Parhaimman taivutuskapasiteetin kuitube-tonille antoivat HE 75/50 ja FE 60/36 teräskuidut, kun kuitumäärä oli molemmissa 75 kg/m³ (0,955 til-%), mikä on havaittavissa taulukosta 1. Kapa-siteeteissa oli eroa vain hyvin vähän, mutta HE 1/50 teräskuiduilla mitoitettu kapasiteetti antoi jopa 30 kNm heikomman tuloksen ja on siten epävarmemmassa roolissa kuitujen valinnassa

kantavien rakenteiden raudoitukseksi. HE 75/50 ja FE 60/36 teräskuitujen taivutuskapasiteetit vastaavat T20 k300 raudoituksen kapasiteettia ja niillä on eroa vain 2–5 kNm. Tämän perus-teella voidaan todeta, että pelkkä teräskuitu voi riittää kantavan rakenteen raudoitteeksi, kun kuituja on käytetty 75 kg/m³. Muovi- ja lasikui-tujen kohdalla rakenteen raudoitteeksi valittiin T20 k300, koska kuitujen taivutusvetolujuudet olivat heikkoja. Tuloksista nähtiin, että Master-Fiber 400 muovikuitu toi kapasiteettiin lisää vain 7–11 kNm ja Anti-Crack HP 67/36 lasikuidun tapauksessa kapasiteetin lisäys oli alle 2 kNm.

Taulukko 1 Yhteenveto teräskuitujen taivutuskapasiteeteista

Kuitutyyppi	Taivutuskapasiteetti [kNm]
Teräskuitu HE 1/50, 50 kg/m3 (0,637 til-%)	65,03
Teräskuitu HE 75/50, 50 kg/m3 (0,637 til-%)	85,20
Teräskuitu FE 60/36, 50 kg/m3 (0,637 til-%)	66,89
Teräskuitu HE 1/50, 75 kg/m3 (0,955 til-%)	81,57
Teräskuitu HE 75/50, 75 kg/m3 (0,955 til-%)	117,18
Teräskuitu FE 60/36, 75 kg/m3 (0,955 til-%)	110,17
Rauditus T20 k300	115,43



12



Tämä artikkeli aloittaa sarjan, jossa esitellään uusia diplomitoita sekä Aalto-yliopistosta että Tampereen TTY:ltä.

Tekijä: Kirsi Heikkinen
Yhteystiedot: kirsi.heikkinen@ramboll.fi

D-työn nimi: Kuitubetonin taivutuskapasiteetti eri kuitutyypppejä käytettäessä
Koulutusohjelma: Aalto-yliopisto,
Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka
Valvoja: Professori Jouni Punkki Aalto-yliopisto
Ohjaaja: Professori Jouni Punkki
Lisätietoja: <https://aaltodoc.aalto.fi/>

Loading capacity of fiber-reinforced concrete with different fiber materials

Fiber-reinforced concrete has been manufactured in the world for decades but in Finland the use is limited to certain applications. In structural solutions, the conventional reinforcement can be partly or totally replaced by fibers like steel or polymer fibers. Due to the plastic properties of the fiber-reinforced concrete, it can be cast into almost any shape and it is heavy, durable and seamless material.

The goal of this thesis was to study the bending behaviour of the fiber-reinforced concrete with different fiber materials using the flexural tensile strength test. In the study, three types of fibers and two types of concrete were used. The aim was also to observe computationally the loading capacity of fiber-reinforced concrete based on the results of the experiments and analyses characteristics and behaviours of different fibers.

Totally 66 fiber-reinforced concrete beams were produced. The beams were tested using flexural tensile strength test according to the standard SFS-EN 14651 + A1. Typical grey floor concrete with steel and polymer fibers and white façade concrete with polymer and glass fibers were used. Three different types of steel fibres and one type of plastic and glass fibers were used.

Based on the results, it was found that steel fibers give good flexural tensile strength when the amount of fibers were enough high and the aspect ratio of fiber was optimal. Thinner and shorter steel fibers gave more constant results compared to thicker fibers. In the case of polymer and glass fibers, the results showed that those kinds of fibers are more suitable for non-load-bearing structures such as façade elements.

12 Espoossa Länsimetron Tapiolan aseman julkisivuissa on käytetty 80 mm paksuisia kuitubetonielementtejä. Kohteen on suunnitellut Arkkitehdit APRT Oy ja elementit on valmistanut Parma Oy.