Erikoislujan kuitubetonin kehittäminen
Diplomityö Aalto-yliopistossa

Adnan Syed
Diplomi-insinööri
Rakennesuunnittelija
adnan.syed@sweco.fi

Jouni Punkki
Professori (POP)
Betonitekniikka
Rakennustekniikan laitos, Aalto-yliopisto
jouni.punkki@aalto.fi

Erikoisluja kuitubetoni (*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete* = UHPC tai UHPFRC) on erikoisbetoni, jolla on erittäin korkea puristuslujuus sekä korkea vetolujuus. Puristuslujuus voi ylittää 150 MPa:n lujuuden ja betonista voidaan valmistaa rakenteita ilman perinteistä raudoitusta. Erikoislujan kuitubetonin ominaisuudet perustuvat erittäin alhaiseen vesi-sementtisuhteeseen (jopa < 0,2), pieneen kiviaineksen maksimikokeen (normaalisti < 2 mm) sekä korkeaan kuitumäärään (yleensä > 4%-til). Edellytyksenä erikoislujalle betonille on kiviaines- ja sideainepartikkelien erinomainen pakkautuvuus eli betonin huokoisuus täytyy saada mahdollisimman alhaiseksi. Käytännössä tämä edellyttää myös normaalibetonia selvästi alhaisempaa kiviaineisten raekokoa. Hyvä pakkautuvuus yhdistettynä alhaiseen vesi-sementtisuhteeseen antaa betonille normaalitasoa selvästi paremmat lujuus- ja säilyvyysominaisuudet.

Erikoislujan kuitubetonin materiaalikustannukset ovat huomattavasti perinteisiä betoneita korkeammat ja siten myös käyttökohteet ovat rajalliset. Myös puuttuva standardointi sekä betonin haastavat työstettävyysominaisuudet ovat rajoittaneen betonityypin laajempaa käyttöä.

Maailmalla erikoislujaa kuitubetonia on käytetty muun muassa ohuissa, rei'itetyissä julkisivurakenteissa, ulokeparvekkeissa sekä hoikkarakenteisissa silloissa. Tunnetuimpia kohteita ovat *Rudy Ricciottin* suunnittelema MuCEM museo Marseillen vanhassa satamassa. Kaupallisista erikoislujan kuitubetoneista tunnetuin on ranskalaisen LafargeHolcim-yhtiön valmistama Ductal®.

Diplomityön tavoitteena oli kehittää kustannustehokkaita erikoislujia kuitubetoneita betoniteollisuuden käyttöön. Lähtökohtana oli käyttää pääosin paikallisia raaka-aineita. Kiviainekset olivat suomalaisia, mutta valkosementin, silikan sekä kuitujen osalta suomalaisia vaihtoehtoja ei ole saatavilla. Puristuslujuuden tasolle ei asetettu erityistä minimitasoa, mutta tavoiteltiin yli 120 MPa:n lujuuksia. Myöskään vetolujuudelle ei asetettu erityistä vaatimustasoa. Työstettävyyden osalta betonin tulisi olla sellaista, että sitä voidaan valaa normaaleissa tehdasolosuhteissa. Kokeissa käytettiin sekä harmaata sementtiä että valkosementtiä. Edellinen soveltui parhaiten rakenteelliseen betoniin, kun taas valkobetonia voidaan käyttää erityisesti julkisivurakenteissa.

Diplomityö jakautui kahteen eri vaiheeseen: esikokeissa tavoitteena oli optimoida kiviainesten koostumus hyödyntäen Punkte-testiä. Punkte-testillä haetaan kokeellisesti optimaalinen seossuhde sideaineiden ja fillereiden välille. Lisäksi esikokeissa kehitettiin reseptit erikoislujalle betonille. Loppukokeissa otettiin myös kuidut mukaan ja testattiin kuidutettujen betonimassojen työstettävyys- ja lujuusominaisuuksia.

Testiohjelma

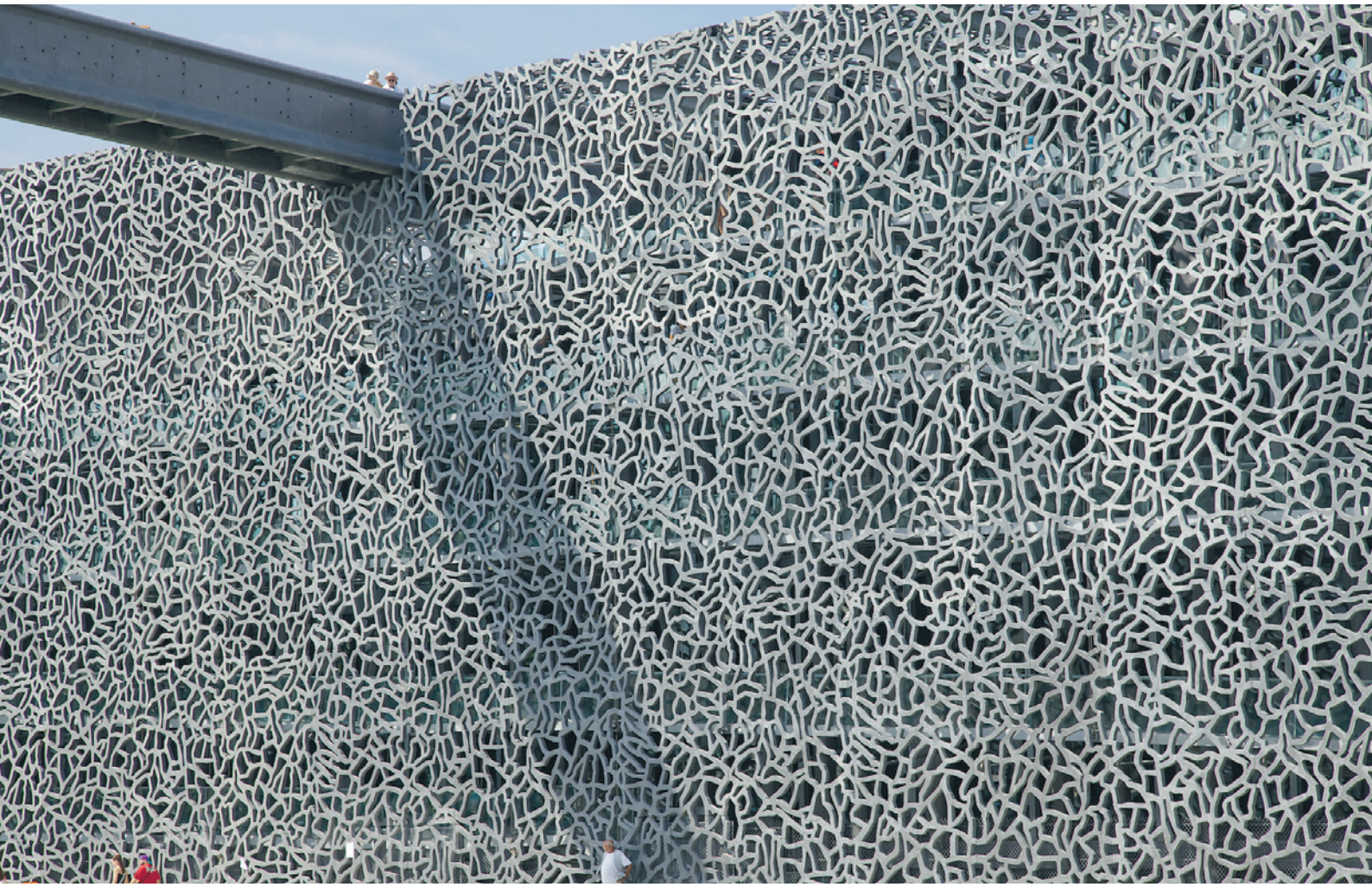
Kuitubetonit valmistettiin käyttäen Aalto-yliopiston Eirich-sekoitinta, jonka maksimitilavuus on 75 litraa. Erikoislujan kuitubetonin

MuCEM

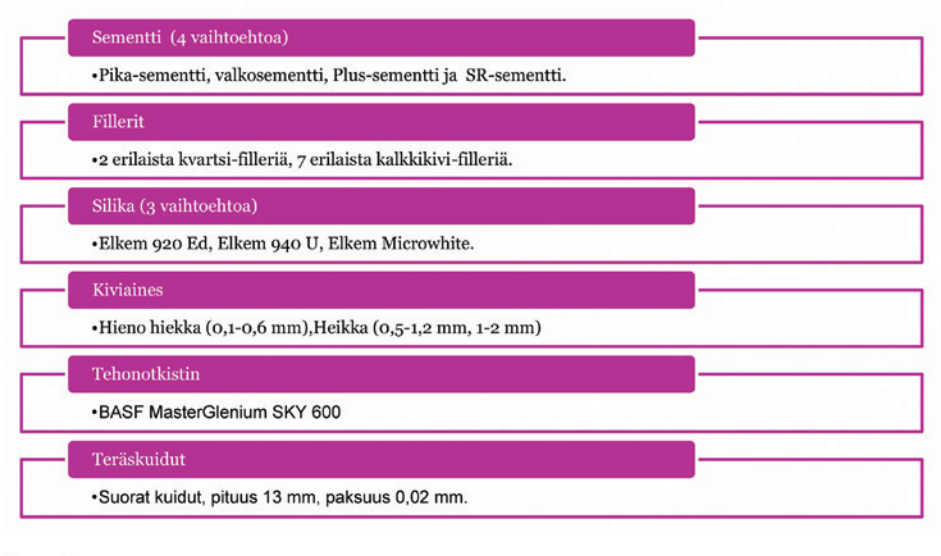
Jouni Punkki

1,2 MuCEM on Välimeren alueen kulttuuria esittelevä museo. Arkkitehti Rudy Ricciottin suunnittelema museo sijaitsee Marseillen vanhassa satamassa Fort Saint-Jeanin linnoituksen vieressä. Museo valmistui vuonna 2013. Kävelysilta yhdistää museon vanhaan linnoitukseen. Sekä silta että pitsimäinen julkisivu on tehty erikoislujasta kuitubetonista Ductalista.

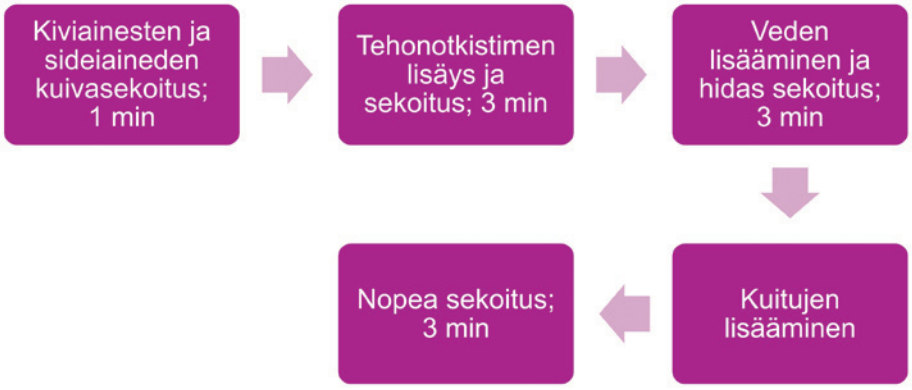
1



2



Kuva 1 Diplomityössä käytetyt materiaalit.



Kuva 2 Loppukokeissa käytetty sekoitusjärjestys.

valmistaminen edellyttää erittäin tehokasta betonisekoitinta. Testivaluissa annoskoko oli 30 dm³. Kokeissa käytettävät materiaalit sekä sekoitusjärjestys on esitetty kuvissa 1 ja 2.

Kaikkiaan valmistettiin 12 betonia, joista kuudessa käytettiin harmaata sementtiä ja kuudessa valkosementtiä. Kuitujen määrä vaihteli 0...20% sementin painosta. Betonien koostumukset on esitetty taulukoissa 1 ja 2.

Koetulokset

Harmaalla betonilla saavutettiin 140 MPa:n puristuslujuus ja 28 MPa:n taivutusvetolujuus. Betonissa käytettiin Pika-sementtiä, vesi-sementtisuhde oli 0,25 ja teräskuitujen määrä oli 163 kg/m³. Betonin leviämä laastikokeella (Mini flow) oli 210 mm ja normaali leviämäarvo 580 mm.

Valkobetonilla saavutettiin vastaavasti 155 MPa:n puristuslujuus ja 24,5 MPa:n taivutusvetolujuus. Betonin vesi-sementtisuhde oli 0,22 ja teräskuitujen määrä oli 167 kg/m³.

Teräskuitujen vaikutus puristuslujuuteen oli selvästi suurempi valkobetonilla kuin harmaalla betonilla. Esimerkiksi betoneilla W11 ja W13 puristuslujuus nousi arvosta 131 MPa arvoon 155 MPa kuitujen vaikutuksesta.

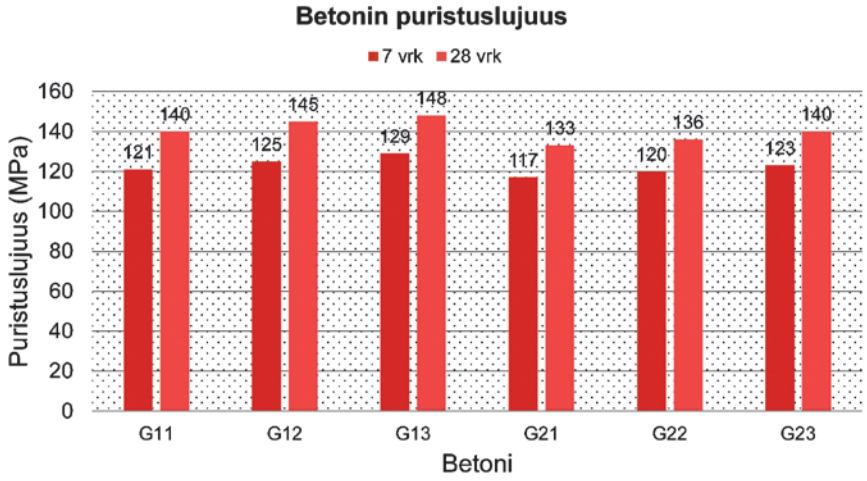
Tavoitteena oli saavuttaa mahdollisimman hyvät työstettävyysominaisuudet. On kuitenkin selvää, että tällainen betoni on aina selvästi kittimäisempää kuin normaalit betonit, sillä onhan vesi-sementtisuhde huomattavan alhainen ja myös kuitujen määrä on erittäin suuri. Betonien työstettävyyttä arvioitiin normaalien työstettävyyskokeiden lisäksi myös erityisellä U-muotoisella koemuotilla (kuva 7). Muotissa on etupuolella plexi-levy, joka mahdollistaa betonin liikkeiden tarkkailun. Silmämääräisen tarkkailun lisäksi kovettuneesta betonista otettiin näytteet, joiden tiheyksiä analysoitiin.

Taulukko 1 Testibetonien koostumukset käytettäessä harmaata sementtiä. Koostumukset on esitetty paino-osuuksina suhteessa sementin määrään.

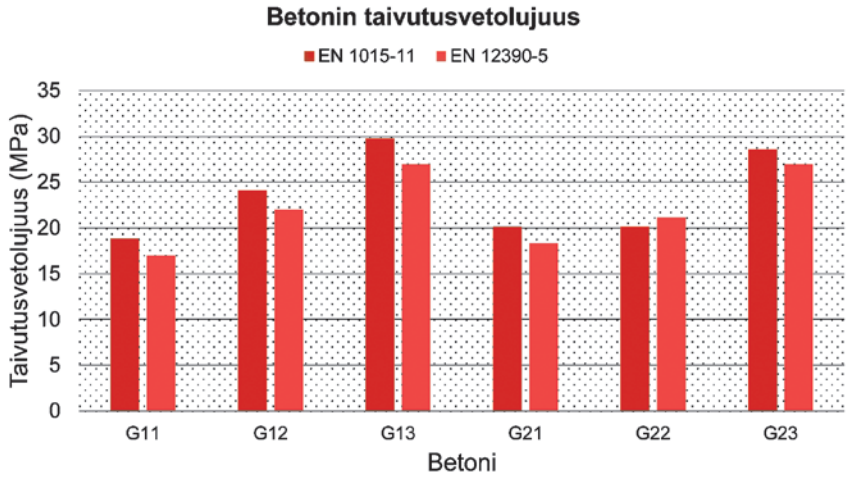
Materiaali	Betoni					
	W11	W12	W13	W21	W22	W23
Sementti	1	1	1	1	1	1
Vesi	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Silika	0,20	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15
Hiekka	0,875	0,875	0,875	1	1	1
FFq 45 filleri	0,375	0,375	0,375	0,2	0,2	0,2
Nilsiä filleri	–	–	–	0,05	0,05	0,05
Tehonotkistin	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Teräskuidut	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2

Taulukko 2 Testibetonien koostumukset käytettäessä valkosementtiä. Koostumukset on esitetty paino-osuuksina suhteessa sementin määrään.

Materiaali	Betoni					
	W11	W12	W13	W21	W22	W23
Sementti	1	1	1	1	1	1
Vesi	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Silika	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Hiekka	1	1	1	1	1	1
Tytyri 63 filleri	0,25	0,25	0,25	–	–	–
Parfill 80 filleri	–	–	–	0,05	0,05	0,05
Calcite C2 filleri	–	–	–	0,20	0,20	0,20
Tehonotkistin	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Teräskuidut	0	0,1	0,2	0	0,1	0,2



Kuva 3 Testibetonien puristuslujuudet käytettäessä harmaata sementtiä. Kaikkien betonien vesi-sementtisuhde oli 0,25.



Kuva 4 Testibetonien taivutusvetolujuudet käytettäessä harmaata sementtiä. Kaikkien betonien vesi-sementtisuhde oli 0,25.

Taulukko 3
Testimuotilla valetun betonikappaleen tiheys eri kohdissa, katso kuva 8. Betoni: W13.

Tunnus	Tiheys (kg/
H1	2424
H2	2424
V1	2435
V2	2434

Mahdollinen kuitujen erottuminen näkyy helposti betonin tiheyseroina. Kuvassa 8 on esitetty testikappale muotin purun jälkeen ja siitä sahattavat tiheyskoekappaleet. Tiheystulokset on esitetty taulukossa 3.

Kittimäisyydestään huolimatta testatut betonit täyttivät testimuotin täydellisesti ja betonin pintalaatu oli erinomainen. Myös muotin eri kohdissa betonin tiheyden olivat hyvin samanlaiset ja siten on oletettavaa, etteivät teräskuidut ole merkittävästi erottuneet betonissa. Betonit olivatkin työstettävyydeltään lähes itsetiivistyviä, valkobetonien työstettävyydet olivat hieman harmaita betoneita parempia.

Tarkemmin analysoitaessa havaitaan työstettävyysominaisuuksien riippuvan voimakkaasti silikasta ja kvartsifilleristä. Edellämainittujen komponenttien määrän kasvattaminen vaikutti negatiivisesti betonin työstettävyyteen. Luonnollisesti myös kuitumäärällä oli merkittävä vaikutus betonin työstettävyyteen. Kahden eri fillerin yhdistelmällä saatiin paremmat työstettävyysominaisuudet kuin vain yhtä filleriä käytettäessä.

Puristuslujuuteen silikalla oli merkittävä positiivinen vaikutus. Optimaalinen fillerikoostumus antoi parhaiden työstettävyysominaisuuksien lisäksi myös korkeimmat puristuslujuudet. Kuitumäärällä oli pienehkö vaikutus betonin puristuslujuuteen, mutta merkittävä vaikutus betonin taivutuslujuuteen. Kuitujen vaikutus oli kuitenkin hieman erilainen valkobetonilla ja harmaalla betonilla. Kuidut myös merkittävästi lisäsivät betonien sitkeyttä taivutuskokeessa.

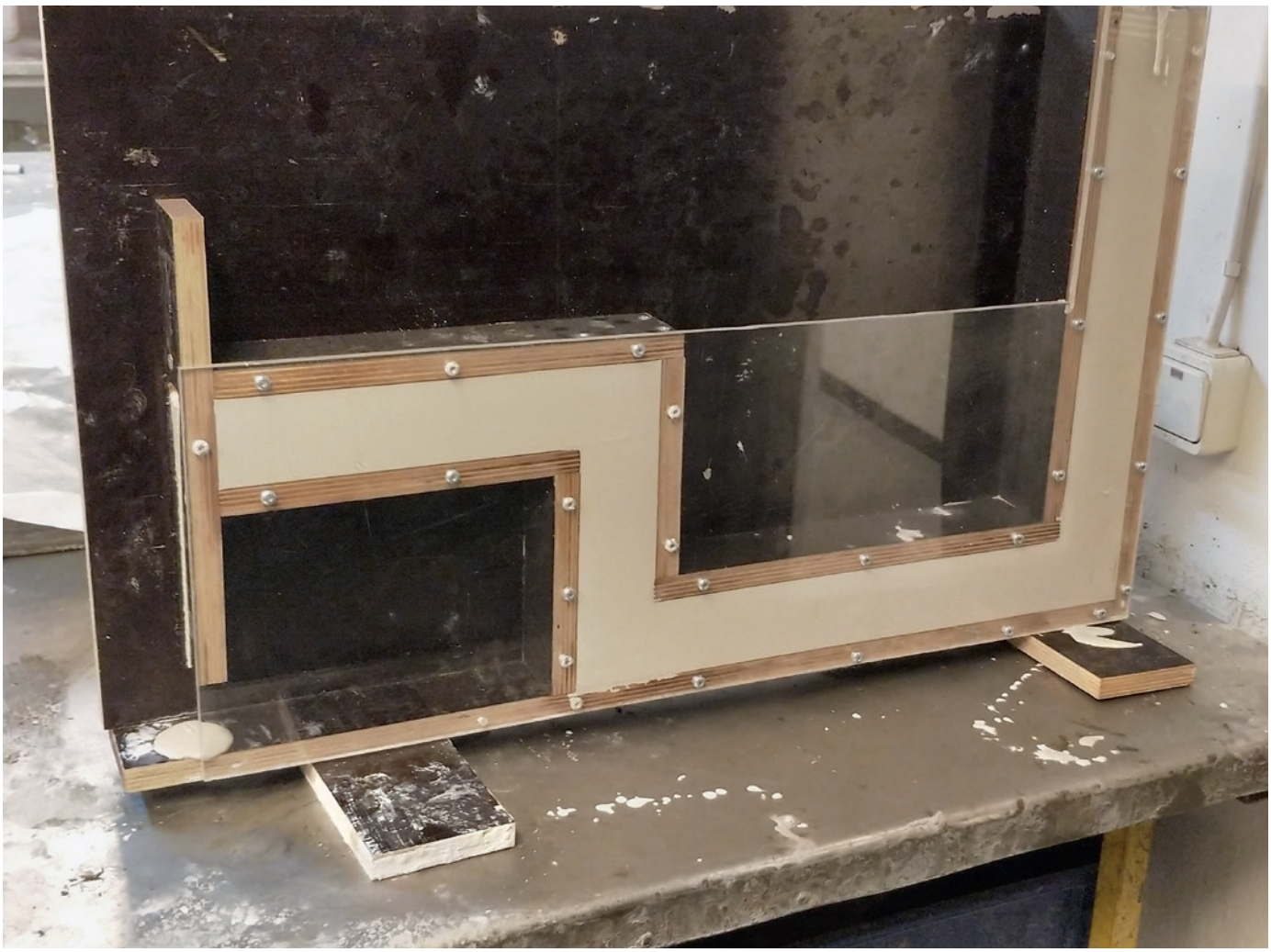
Johtopäätökset ja erikoislujan kuitubetonin potentiaaliset käyttökohteet

Diplomityössä kehitetiin erikoislujia kuitubetoneita käyttäen pääosin paikallallisia raaka-aineita. Puristuslujuuden osalta saavutettiin 148 MPa harmaalla betonilla ja 155 MPa valkobetonilla. Betonien työstettävyyteen kiinnitettiin runsaasti huomiota ja betonien osalta saavutettiin kohtuulliset hyvät työstettävyysominaisuudet. Betonin mekaanisia ominaisuuksia analysoitiin vain alustavasti. Tarkoituksena onkin, että erikoislujan kuitubetonin mekaanisista ominaisuuksista tehdään vielä erillinen diplomityö.

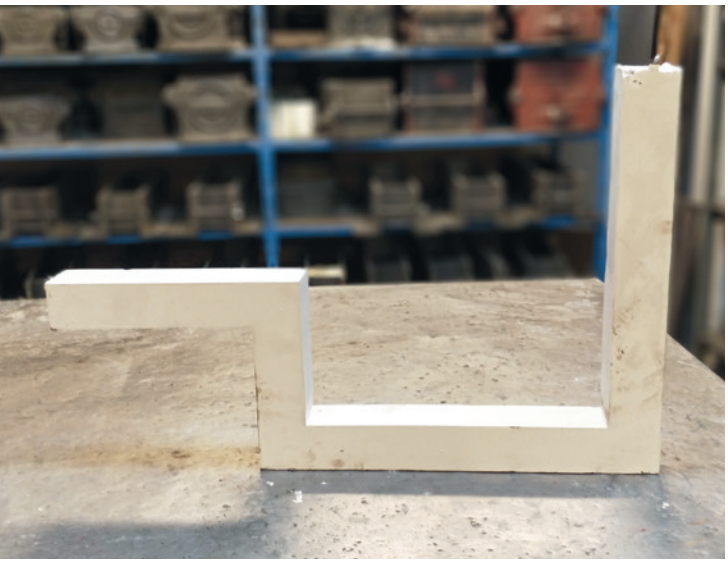
Erikoislujan kuitubetonin erinomaiset lujuus- ja säilyvyysominaisuudet mahdollistaisivat betonin käyttämisen erilaisissa käyttökohteissa. Kuitenkin on huomattava, että kyseessä on erikoisbetoni mitä suurimmassa määrin ja siten kovin laajaa käyttöä tällainen betoni ei tule saamaan. Erikoislujan kuitubetonin merkittävimpänä etuna korkean lujuuden ohella on mahdollisuus korvata perinteinen raudoitus kuidutuksella. Näin voitaisiin valmistaa hyvin ohuita rakenteita samoin kuin runsaasti rei'itettyjä ja/tai kaarevia rakenteita. Rakenteittain käyttökohteita voisivat olla:

Sillat: Kuitubetonielementtien käyttäminen palkeissa ja kansirakenteissa, joilloin voitaisiin vähentää sillan omaa painoa ja voitaisiin valmistaa hoikempia siltarakenteita. Myös reunapalkkien kuoret voitaisiin valmistaa erikoislujasta kuitubetonista, jolloin saavutettaisiin erinomaiset säilyvyysominaisuudet, teräskorroosio voitaisiin eliminoida kokonaan.

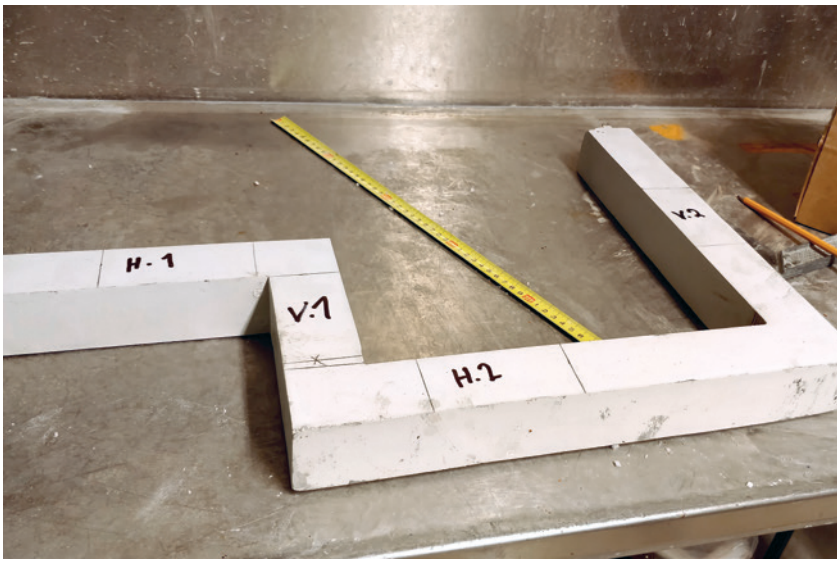
Talonrakennus: Erikoislujaa kuitubetonia voitaisiin käyttää rakenteissa kuten julkisivut, pilarit ja portaat. MuCEM on erinomainen esi-



7



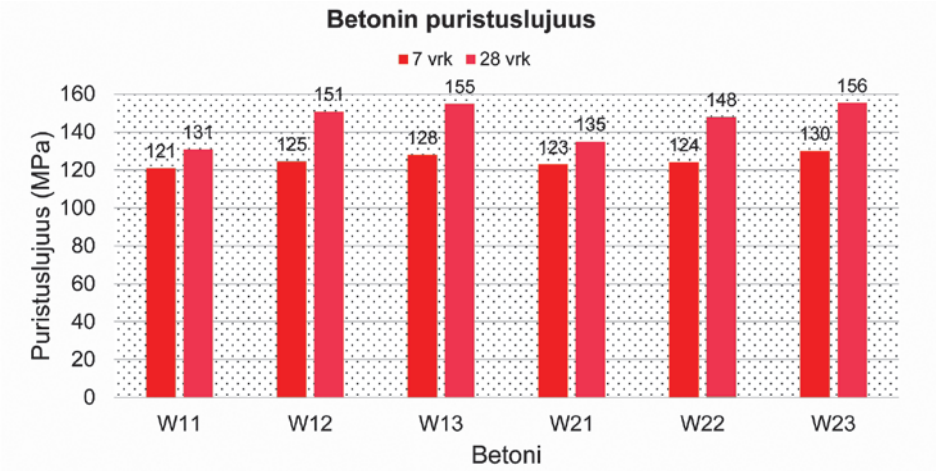
8a



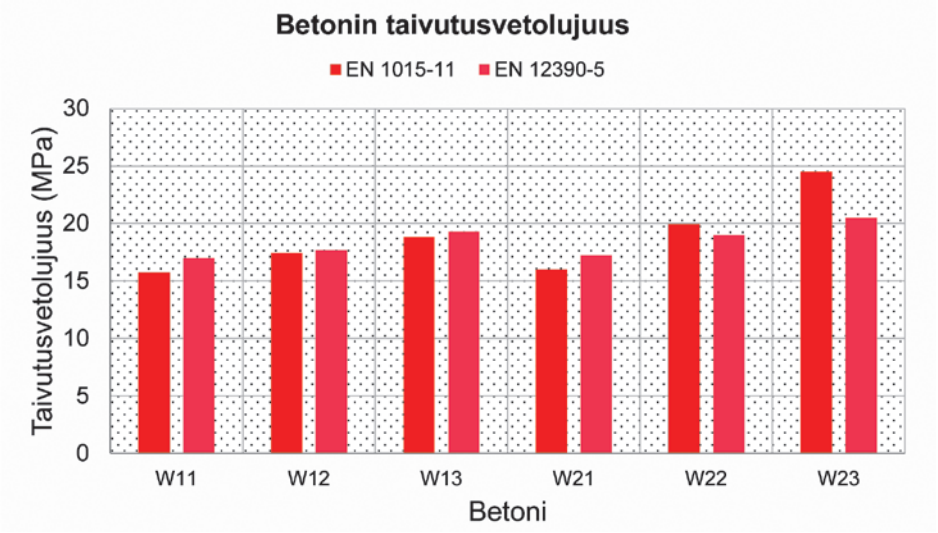
8b

7 Testimuotti betonin työstettävyyden arviointiin.

8a, 8b Testimuotilla valmistettu betonikappale ja siitä sahattavat tiheyskappaleet.



Kuva 5 Testibetonien puristuslujuudet käytettäessä valkosementtiä. Kaikkien betonien vesi-sementtisuhde oli 0,22.



Kuva 6 Testibetonien taivutusvetolujuudet käytettäessä valkosementtiä. Kaikkien betonien vesi-sementtisuhde oli 0,22.

merkki erikoislujan kuitubetonin erilaisista käyttökohteista.

Korjausrakentaminen: Erikoislujaa kuitubetonia voitaisiin käyttää sekä teräsbetoni- että jännebetonirakenteiden korjaamisessa, koska betonilla on huomattavan suuri vetolujuus normaaliin betoniin verrattuna. Erikoislujia kuitubetoni mahdollistaisi ohuiden betonikerrosten käyttämisen, samoin liitosalueita voitaisiin merkittävästi pienentää.

Merkittävänä haasteena erikoislujan kuitubetonin käytössä on standardoinnin puute sekä rakenteiden suunnittelun että valmistuksen osalta. Ensimmäiset kohteet joudutaan tekemään koerakenne-statuksella ja rakenteiden toimivuus on osoitettava kokeellisesti. Erikoislujan kuitubetonin käyttö kuitenkin kasvaa maailmalla koko ajan ja siten on oletettavaa, että myös standardointi kehittyy. Myös valmistus asettaa omat haasteensa. Betonin valmistus vaati erityistä kalustoa ja siten valmistus keskittynee muutamalle tehtaalle. Valmisbetonina erikoislujia kuitubetoni on vielä astetta haasteellisempi kuin elementtitehtaalla. Tosin kyllä tällaista betonia valmisbetoninakin valmistetaan.

Jouni Punkki

9 MuCEMin kevyen liikenteen silta on valmistettu Ductal:ista.

Jouni Punkki

10 MuCEMin julkisivut ja pilari-palkkirakenteet on valmistettu Ductal:ista.

Tekijä: Adnan Syed
Yhteystiedot: adnan.syed@sweco.fi
D-työn nimi: Development of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete
Koulutusohjelma: Aalto-yliopisto, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka
Valvoja: Professori Jouni Punkki, Aalto-yliopisto
Ohjaaja: Professori Jouni Punkki, Aalto-yliopisto

English abstract

The use of ultra-high strength concrete with high compressive and flexural strength is increasing in modern day construction. The use of locally available materials for producing Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) can significantly reduce the cost gap that is one of the main obstacles to the production of such concrete. The Master's thesis aims at the development of UHPFRC using locally available materials in Finland, characterized by high compressive and flexural strength properties. The study is focused on producing both white and grey UHPFRC.

Water demand tests by Puntke method were carried out to optimize the filler content and type. A large series of preliminary tests were carried out to evaluate the effect of different mixture proportions and material contents on the flow and compression properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). The fresh and hardened properties of the UHPC and UHPFRC were studied such as flowability of the mix, compression and flexure strength. Compressive strength of 148 MPa with grey UHPFRC and 155 MPa with white UHPFRC were achieved. Significantly high flexural strength value of 28 MPa was achieved with grey UHPFRC. It was observed that the addition of fibers have a significant effect on the compression strength of white UHPFRC and flexure properties of grey and white UHPFRC. The flowability of the mixture was slightly reduced by the addition of fibers but was still capable of producing self-compacting UHPFRC. Pika cement was found out to be the best cement for production of grey UHPFRC. Results obtained shows that it is possible to produce both white and grey UHPFRC under standard curing conditions by carefully selecting the local materials available and proportioning them in the right amount.