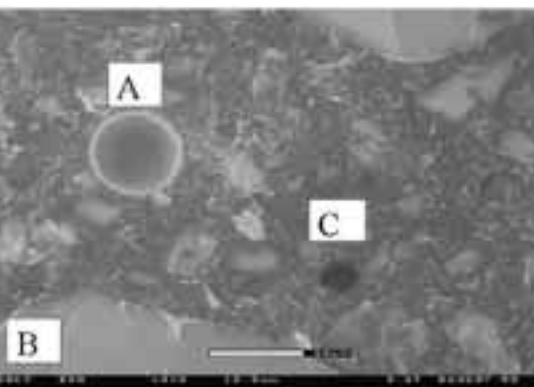
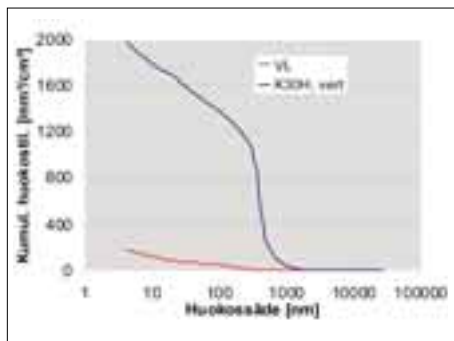


Erikoislujat betonit -tutkimus toteutettiin Teknillisen korkeakoulun rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa vuosina 1999 - 2001. Tutkimuksen rahoitti Suomen Akatemia. Tutkimuksen vastuullinen johtaja oli professori Vesa Penttala ja tutkija oli dipl.ins. Mika Tulimaa, joka teki lisensiaatintyönsä tutkimuksesta. Lisensiaatintyötä tukivat taloudellisesti Kerttu ja Jukka Vuorisén rahasto, Einar Kahelinin rahasto sekä BLT-säätiö.



1



2

1 Erikoislujan betonin mikrorakennetta ESEM-mikroskooppilla kuvattuna. A on ilmahuokonen, B on runkoainepartikkelit ja C on sementtigeeliä. Kuvassa näkyvä valkoinen mittapalkki on 50 mm pituinen.

2 Erikoislujan betonin (VL) sekä huokostetun normaalilujuuksien vertailubetonin kumulatiiviset huokostilavuudet.

INSERTTI

Erikoisluja betoneja alettiin tutkia 1990-luvulla mm. Ranskassa ja Kanadassa, kun uuden sukupolven tehonotkistimet mahdollistivat betonin valmistuksen hyvin pienillä vesi-sideainesuhteilla. Teknillisen korkeakoulun rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa haluttiin hankkia tietotaito erikoislujiin betonien valmistuksesta sekä tutkia suomalaisista lähtökohdista erikoislujiin betonien mekaanisia ominaisuuksia, mikrorakennetta ja säilyvyyttä. Rakennusmateriaalitekniikan laboratorion Erikoislujat betonit -tutkimuksessa selvitettiin erikoislujiin betonien mekaanisia ominaisuuksia, mikrorakennetta ja säilyvyyttä. Betonien valmistuksessa pyrittiin mahdollisimman yksinkertaisiin menetelmiin, jonka vuoksi mm. kuitujen käyttö rajattiin pois ja lämpökäsittely rajattiin alle 100 °C:een. Lisäksi pyrittiin kehittämään em. betonien valmistustekniikkaa. Betonien puristuslujuuksissa ylitettiin tutkimuksessa asetettu tavoite ja parhaimmillaan päästiin 250 MN/m² vertailulujuuteen. Huokosrakenteen havaittiin olevan selvästi poikkeava tavanomaisesta betonista, eikä jatkuva huokosrakennetta havaittu korkeasta ilmapitoisuudesta huolimatta, kts. kuva 1. Tämä tarkoittaa sitä, että erikoislujat betonit ovat hyvin tiiviitä, eikä niihin imeydy yhdisteitä betonin ulkopuolelta. Tästä johtuu mm. erinomainen pakkasenkestävyys.

TUTKIMUSSUUNNITELMA

Tutkimuksen pää tavoitteet olivat:

- saavuttaa mahdollisimman korkea puristuslujuus,
- kehittää menetelmä valmistaa erikoisluja betoneja,
- saavuttaa em. tavoite mahdollisimman yksinkertaisella menetelmällä ja
- selvittää erikoislujiin betonien mekaanisia ominaisuuksia, tutkia mikrorakennetta sekä säilyvyyttä, mm. pakkasenkestävyyttä.

Tutkimuksessa käytetty valkosementistä valmistetun betonin suhteitus on esitetty taulukossa 1. Kuten suhteituksesta huomataan, ovat sementin ja silikan määrät korkeat verrattuna tavanomaisiin betoneihin. Koska silikan osuus oli suhteituksissa suuri, tutkimuksessa käytettävät sementit olivat sesoineettomia CEM 1 -luokan sementtejä. Suomalaisen sementtien sijasta sementtien kohdalla päädyttiin lopulta tanskalaiseen valkosementtiin sekä ruotsalaiseen Anlängninsementtiin, koska

kokeilla suomalaisilla sementeillä veden tarve massan muodostumisessa oli huomattavasti suurempi kuin ulkomaisilla sementeillä. Runkoaine oli suomalaisen toimittajan tavanomaista suomalaista runkoainetta, jonka maksimi runkoainekoko oli 0,6 mm. Silika oli norjalaista alkuperää. Tavoitteeksi tutkimuksessa kehitettävien betonien puristuslujuudelle asetettiin vähintään 200 MN/m² lujuus.

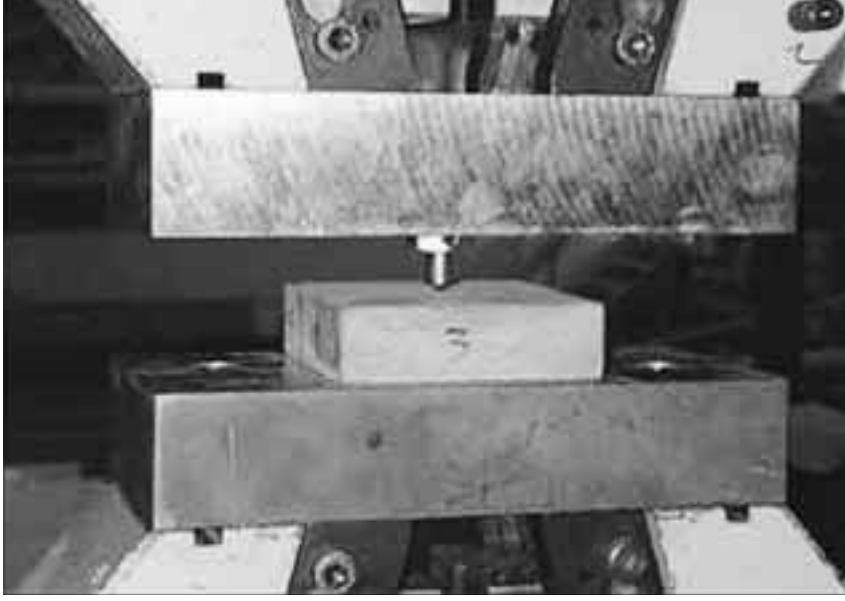
Tutkittavat betonit valmistettiin kahdesta eri mentistä kahdella eri jälkihoidolla. Jälkihoitona oli kaksi vaihtoehtoa: 1. Säilytys kymmenen vuorokautta normaalipaineisessa 95 °C vesihöyrykaapissa, jonka jälkeen jälkihoitoa jatkettiin huonetilassa (20 °C) ja 2. Muotin purkamisen jälkeen jälkihoito ainoastaan huonetilassa. Koebetoneja verrattiin tavanomaiseen korkealujuusbetoniin ja normaalilujuuksiseen betoniin. Tutkimuksessa selvitettiin seuraavat mekaaniset ominaisuudet: puristuslujuus, taivutusvetolujuus, halkaisuvetolujuus, kutistuma, viruma, kimmomoduuli, kovuus, dynaaminen rasituslujuus, iskusitekeys, kulutuskestävyys ja lämpölaajenemiskerroin. Lisäksi selvitettiin mikrorakennetta sekä säilyvyyttä mm. pakkasenkestävyyttä.

ERIKOISLUJAN BETONIN MÄÄRITELMÄ

Erikoisluja betoneita ovat betonit, joiden lujuus on korkeampi kuin tavallisilla korkealujuusbetoneilla, joiden kohdalla voidaan käytännön tasolla puhua n. 150 MN/m² maksimilujuudesta. Erikoislujiin betonien lujuuksilla tarkoitetaan puristuslujuuksia, jotka ovat selvästi tätä korkeammat. Ulkomaisissa tutkimuksissa on saatu aikaiseksi jopa 800 MN/m² puristuslujuuksia, mutta tällöin betonissa on käytetty kuituja. Tässä tutkimuksessa ei kuituja käytetty.

MIHIN ERIKOISLUJIAN BETONIN LUJUUS PERUSTUU?

Erikoislujiin betonien lujuus perustuu usean tekijän yhteistoimintaan. Näitä ovat sementin ja silikan suhteellisesti korkeat määrät, pieni vesi-sideainesuhde, runkoaineen pieni maksimirakoko ja betonin lämpökäsittely. Tutkimuksen erikoislujiin betoneissa käytetty sementtimäärä oli lähes 1000 kg/m³ ja silikan määrä puolestaan 25 paino-% sementin määrästä. Tällöin sideaineen kokonaismäärä on paino- ja tilavuussuhteissa suurempi kuin runkoaineen määrä, joten betoni poikkeaa jo lähtökohaltaan tavanomaisesta betonista. Betonimassassa käytettävä vesimäärä on niin pieni, että suuri osa

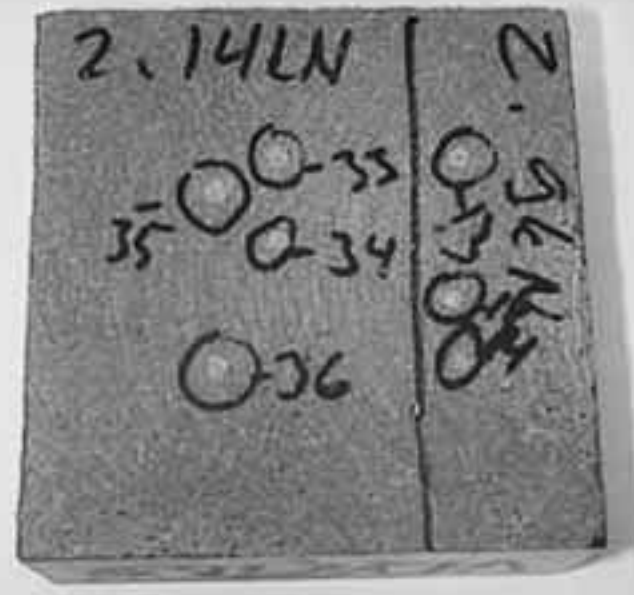


3

sementistä jää hydratoitumatta. Vettä on kuitenkin niin paljon, että betonimassaan saadaan aikaiseksi yhtenäinen sementtigelimatriisi. Koska hydratoitumaton sementti on ominaisuuksiltaan joka tapauksessa lujempaa kuin itse betoni, toimii hydratoitumaton sementti oivallisena runkoaineena betonissa. Runkoaineen pieni maksimiraekoko puolestaan vaikuttaa todennäköisyyssyläkin mukaisesti. Mitä pienempi runkoainepartikkeli on kyseessä, sen pienempi todennäköisyys on, että partikkelissa on satunnainen virhe eli halkeama tai vastaava. Koska virheitä on partikkelissa vähemmän, sen lujuus on keskimäärin suurempi kuin vastaavan materiaalin suuremmalla kappaleella. Näin päästään lähemmäksi materiaalin teoreettista lujuutta. Erikoislujien betonien kohdalla tämä tarkoittaa, että murtumat runkoainepartikkelien kohdalla alkavat vasta korkeammassa lujuuksissa. Pieni maksimiraekoko lisää keskiarvoisesti myös pinta-alaa, johon sementtigelii voi hydratoituessaan tarttua ja tätä kautta saadaan lisättyä lujuutta. Lämpökäsittelyllä saadaan hydrataatioreaktiot tapahtumaan nopeasti ja sementti hydratoitumaan pidemmälle kuin tapahtuisi normaalilämmössä. Lisäksi hydrataatioreaktioissa muodostuva kalsiumhydroksidi saadaan reagoimaan tehokkaasti silikan kanssa ja näin saadaan betoniin lisää lujuutta. Lämpökäsittelyn tehokkuus kemiallisia reaktioita nopeuttavana menetelmänä on tunnettua. Lisäksi lämpökäsittely vaikuttaa vesihöyryn paineeseen kovettuvassa betonissa, siten että geelihuokosissa normaalisti adsorboituneena oleva vesi saadaan osallistumaan hydrataatioreaktioihin. Koska hydrataatioreaktiot ovat lämpökäsittelyssä nopeat ja vesi kuluu reaktioissa loppuun, betoni on lämpökäsittelyn jälkeen "valmista". Tämä tarkoittaa, että lämpökäsittelyssä erikoislujissa betoneissa ei tapahdu enää fysikaalisia muutoksia ilman ulkoista vaikutusta, esimerkiksi lämpökäsittely betoni ei enää kutistu lämpökäsittelyn jälkeen. Lämpökäsittelemättömissä betoneissa hydrataatioreaktiot eivät etene aivan yhtä pitkälle ja yhtä nopeasti kuin lämpökäsittelyssä betoneissa, joten niissä on havaittavissa kutistumista pidemmällä ajanjaksolla.

ERIKOISLUJIIEN BETONIIEN MEKAANIISET OMINAISUUDET

Osa mekaanisten ominaisuuksien vertailuarvoista havaittiin olevan selvästi parempia kuin vertailu-



4

Taulukko 1: Valkosementtiä sisältävien erikoislujien betonien ELB suhteitus.

Sementti [kg/m ³]	943	1
Silika [kg/m ³]	236	0,25
Runkoaine [kg/m ³]	1037	1,1
Vesi [kg/m ³]	141	0,15
Notkistin, kuivapaino [kg/m ³]	13,0	0,0138
Ilma (suhteitus) [dm ³ /m ³]	50	
w/c*	0,15	
w/b**	0,12	

*vesi-sementtisuhde

**vesi-sideainesuhde

5

3, 4

Modifioitu kovuuskoe (perustuu standardiin SFS-EN ISO 6506-1, Brinellin kovuuskoe) sekä koestettu koekappale.

5

Taulukko 1: Valkosementtiä sisältävien erikoislujien betonien ELB suhteitus.

Taulukko 3: Lämpökäsittelyn erikoislujan betonin ELB (valkosementti) pakkasenkestävyys.

	Kokeen tulos		Sallittu arvo*	
Pakkas-suolakoe (SFS 5449)	0,1 %,	125 kierrosta	3 %,	25 kierrosta
CIF-koe, rapautuminen	40 g,	35 kierrosta*	XF3, 200 g,	56 kierrosta**
CIF-ultraääni	100,	35 kierrosta*	XF3, > 85,	56 kierrosta**

* Kierrosten lukumäärässä poikettiin Betoninormit 2004 suosituksesta.

** Betoninormit 2004

6

betoneilla, esim. puristuslujuus ja kovuus. Osa mekaanisten ominaisuuksien vertailuarvoista olivat puolestaan samaa suuruusluokkaa tai vähän paremmat verrattuna korkealujuusvertailubetonin kanssa, kuten kimmomoduuli. Iskutitkeyden havaittiin olevan heikompi kuin vertailubetoneilla. Lämpökäsittelyt betonit olivat ominaisuuksiltaan parempia kuin lämpökäsittämättömät betonit. Betonit, jotka olivat 10 vuorokauden ajan +95 °C:ssa, antoivat parhaat lujuusarvot. Parhaaksi vertailulujuudeksi määritettiin 250 MN/m² ja paras yksittäinen koetulos oli 273 MN/m². Koestukset tehtiin 10 cm särmäisille kuutioille, joiden tuloksista tehtiin myös vertailulujuuslaskelmat ilman muunnoksia. Taulukoon 2 on kerätty tärkeimmät mekaaniset ominaisuudet valkosementistä tehdyille betonille, jonka jälkihoitona oli lämpökäsittely. Vertailuarvoina ovat tavanomaisen korkealujuusbetonin vastaavat kirjallisuusarvot. Kokonaisviruma (rasitustaso 38 %) saavutettiin lämpökäsittelyllä betonilla nopeasti eli 26 vuorokaudessa. Lämpökäsittämättömällä betonilla vastaava aika oli 353 vuorokautta. Mekaanisista ominaisuuksista iskutitkeys erosi muista ja oli tutkituilla betoneilla huono.

MIKRORAKENNE JA SÄILYVYYS

Mikrorakennetta tutkittiin yksinkertaisella kaksi vuotta kestäneessä vedessä säilytys -kokeella, kapillaarinen vedellä imeytys -kokeella, karbonatisoitumismittauksilla, liukenemismittauksilla, elohopeaporosimetrimittauksilla sekä visuaalisilla havainnoilla elektronimikroskoopilla (ESEM) otetuista kuvista. Erikoislujien betonien mikrorakenne todettiin erittäin tiheäksi. Karbonatisoitumista saati liukenemistä ei havaittu. Betoniin imeytynyt vesimäärä oli kapillaarikokeessa sekä vesisäilytyksessä lähes mitätöntä. Elohopeaporosimetrikokeiden perusteella erikoislujien betonien kokonaishuokoisuus oli kymmenesosa normaalilujuuksisen vertailubetonin huokoisuudesta. Erikoislujien betonien kokonaisilmapitoisuus oli suuri eli noin 5 % ja se muodostui lähinnä makrohuokosista, jotka eivät olleet yhteydessä toisiinsa. Makrohuokokset syntyivät sekoitusvaiheessa ja pysyivät massassa sekoituksen jälkeenkin massan ominaisuuksista johtuen. Pakkaskestävyyttä tutkittiin suomalaisella pakkas-suolakokeella (SFS 5449) sekä saksalaisella CIF-kokeella, joka on yhtenä pakkasenkestävyyskokeena mukana Betoninormeissa 2004. Pakkas-

kestävyyskokeiden tulokset olivat erinomaiset. Pakkaskestävyyskokeet lämpökäsittelylle Valkosementistä valmistetulle betonille on esitetty taulukossa 3. CIF-kokeessa tehtiin vain 35 jäädytys-sulatuskierrosta, joten tämän kokeen tulos on vain suuntaa antava. Kokonaisuutena tutkimuksessa määritetyt tulokset vastasivat hyvin kirjallisuudessa mainittuja vastaavia arvoja.

LOPPUPÄÄTELMÄT

Erikoislujilla betoneilla saavutettiin selvästi korkeampi lujuustaso kuin aikaisemmin on normaalime-netelmillä saavutettu. Lisäksi lämpökäsittelyn havaittiin tuovan selvästi lisää lujuutta lämpökäsittämättömään betoniin verrattuna. Yleisesti voidaan todeta, että puristuslujuuden kasvaessa myös muiden mekaanisten ominaisuuksien lukuarvot kasvoivat, tosin eivät lineaarisesti. Lisäksi havaittiin, että betonissa ei tapahdu enää muodonmuutoksia, kuten kutistumista, lämpökäsittelyn jälkeen. Erikoislujien betonien todettiin olevan rakenteeltaan hyvin tiiviitä, mikä osaltaan vaikuttaa betonien hyvään säilyvyyteen. Tiiviys voi toisaalta aiheuttaa ongelmia palonkestävyyden suhteen.

Tämä tutkimus oli ensimmäinen laaja erikoislujia betoneja koskeva kokeellinen tutkimus TKK:lla ja sen vuoksi jatkotutkimuksen tarve on suuri. Seuraavien ominaisuuksien tutkimiseen pitäisi erityisesti perehtyä jatkotutkimuksissa:

- kutistuma
- iskutitkeys
- lämpölaajeneminen
- mikrorakennetutkimukset
- pakkasenkestävyys
- palonkestävyys
- rakenteellinen mitoitus
- valettavuus ja valutekniikka

Tässä tutkimuksessa monet erikoislujien betonien ominaisuudet tutkittiin ensimmäistä kertaa, joten mitatut lukuarvot on varmistettava. Myös rakenteellisten mitoituskäyttöjen soveltuvuus betonille on tutkittava. Tällä hetkellä betoninormit sallivat 100 MN/m² suunnittelulujuuden (K100) käytön rakenteissa, joten erikoislujien betonien lujuustaso on vielä huomattavan kaukana käytännöstä. Sen sijaan mikään ei estä ei-rakenteellisessa betonituoteteollisuudessa betonin käyttöönottoa. Betoni-massan valettavuutta ja valutekniikkaa on tosin ke-

6

Taulukko 3: Lämpökäsittelyn erikoislujan betonin ELB (Valkosementti) pakkasenkestävyys.



7

hitettävä, mutta yhä kehittyvät tehonotkistimet tuovat osaltaan ratkaisun tähän. Tämän tutkimuksen tekoaikaan käytössä olleet tehonotkistimet eivät olleet vielä tarpeeksi tehokkaita, jotta valmistusmenetelmää olisi voitu kehittää. Itse asiassa tutkimuksen betonit olivat erittäin hankalasti valettavia. Rakennusmateriaalitekniikan laboratoriossa onkin parhaillaan käynnissä tutkimus, jossa keskitytään mm. erikoislujien betonien valettavuuteen.

Erikoislujat betonit -tutkimus osoitti, että ne käyttäytyvät muiden betonien tapaan ja niitä voidaan käyttää soveltuviissa kohteissa, kunhan niiden erityispiirteet otetaan huomioon. Kun edellä mainitut lisätutkimusta vaativat kohdat varmistetaan, erikoislujista betoneista saadaan toimiva materiaali rakennusalalle.

8

Taulukko 2: Lämpökäsitellyn erikoislujan betonin ELB (valkosementti) mekaaniset ominaisuudet. Vertailubetonin arvot ovat tyypillisiä kirjallisuusarvoja tavanomaiselle korkealujuusbetonille.

	ELB	Vertailu
Puristuslujuus [MN/m ²]	250	70 - 150
Taivutusvetolujuus [MN/m ²]	13,8	7 - 8
Halkaisuvetolujuus [MN/m ²]	8,1	4 - 5
Kimmokerroin [GN/m ²]	58	47
Kutistuma [mm/m]	0,6	0,4
Viruma [mm/m]	0,32	1,0
Virumaluku	0,18	1,0
Kovuus [HB]	130	-
Iskusitkeys [J] 0,15	0,15	-
Dynaaminen rasitus	65 % rasitustaso, 2 milj. toistoa	-
Kulutuksenkestävyys* [mm ³]	295	-
Lämpölaajenemiskerroin	1,2 x 10 ⁻⁵	1,0 x 10 ^{-5**}

* ASTM G65

** Betoninormit 2004

9

HIGH STRENGTH CONCRETE GRADES

The Laboratory of Building Materials Technology at the University of Technology conducted a research project on high strength concrete grades in 1999 - 2001. The project was funded by the Academy of Finland, with Professor Vesa Penttala as the responsible Project Manager. Mika Tulimaa, M.Sc., conducted the actual research and also made his Licentiate's Thesis of this project.

Studies on high strength concrete grades were started in e.g. France and Canada in the 1990s when new-generation plasticizers made extremely low water-binder ratios possible. The objective of the Laboratory of Building Materials Technology at the University of Technology was to acquire know-how in the manufacture of high strength concrete and to study the mechanical properties, microstructure and durability of high strength concrete grades from Finnish starting points.

The Laboratory's research project on high strength concrete grades focused on investigating the mechanical properties, microstructure and durability of high strength concrete grades. In terms of manufacture, the objective

was to study as simple manufacturing methods as possible, and for this reason the use of fibres, for example, was excluded from the study, and heat treatment was restricted to below 100 °C. Another objective was to develop the manufacturing technology for these concrete grades. The requirement specified for the compression strength of the concrete grades was exceeded, with an up to 250 MN/m² reference strength obtained. The pore structure was found to differ significantly from conventional concrete, and no continuous pore structure was detected despite the high air content, cf. Figure 1. This means that high strength concrete is extremely dense and will not absorb any compounds from outside the concrete. This results in excellent frost resistance, for example.

For more information, please contact:

Mika Tulimaa
tel. +358 (0)20 447 4217
mob. +358 (0)50 581 5016
mika.tulimaa@abetoni.fi

7

Koekappaleita pakkas-suolakokeen (SFS 5449) jälkeen. Koekappaleet ovat altistuneet 125 jäädytys-sulatuskierrokselle.

8

EL-betonin puristuslujuuden määrittäminen 10 cm:n kuutiolla.

9

Taulukko 2: Lämpökäsitellyn erikoislujan betonin ELB (Valkosementti) mekaaniset ominaisuudet. Vertailubetonin arvot ovat tyypillisiä kirjallisuusarvoja tavanomaiselle korkealujuusbetonille.