

Diplomityö Aalto-yliopistossa

Vesi-sementtisuhteen määrittäminen betonista

Ammad Tauqir

Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
ammad.tauqir@aalto.fi

Teemu Ojala

Tohtorikoulutettava, Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
teemu.ojala@aalto.fi

Jouni Punkki

Professori (PoP), Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
jouni.punkki@aalto.fi

Tausta

Vesi-sementtisuhte on betonin tärkein laatu-parametri, se vaikuttaa olennaisesti sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Professori *Duff A. Abrams* kehitti vesi-sementtisuhteen jo 100 vuotta sitten, tosin Abrams esitti suhteen tilavuusosuuksina $1/1$. Nykyään vesi-sementtisuhte lasketaan painosuhteena. Vaikka vesi-sementtisuhte on tärkeä laatu-parametri, sen määrittäminen on vaikeaa. Yleensä vesi-sementtisuhte lasketaankin suhteutus- ja punnitustiedoista huomioiden kiviaineksen sisältämä kosteus.

Tunnetusti betonin puristuslujuus korreloi vesi-sementtisuhteen kanssa. Erityisesti mikäli betonin raaka-aineissa ja ilmamäärässä ei tapahdu merkittäviä muutoksia, korrelaatio on voimakas. Tätä korrelaatiota hyödynnetään myös betonin laadunvalvonnassa. Käytännössä betonin laadunvalvonta keskittyy pitkälti betonin puristuslujuuden testaamiseen. Onhan betonin puristuslujuuden määrittäminen selvästi helpompaa kuin vesi-sementtisuhteen. Välillisesti puristuslujuuden avulla seurataan myös vaihteluita betonin vesi-sementtisuhteissa.

Standardin SFS-EN 206 mukaisesti vesi-sementtisuhte voidaan määrittää laskennallisesti tai testaamalla. SFS- tai EN-standardeja vesi-sementtisuhteen määrittämiseen ei kuitenkaan ole julkaistu. Betoninormit by65 esittävät yksittäisen testaustuloksen suurimmaksi sallituksi poikkeamaksi $+0,02$. Tämä tarkoittaa vain noin $5...8 \text{ kg/m}^3$:n vesimäärän ylitystä betoniannok-

sesta. Annosraportista saadaan raaka-aineiden punnitusmäärät, mutta erityisesti hienojen kiviainesten kosteuspitoisuudet eivät välttämättä ole tarkkaan tiedossa. 1% -yksikön virhe hienon kiviaineksen kosteuspitoisuudessa aiheuttaa jo lähes 10 kg/m^3 :n virheen betonin vesimäärän. Osin kiviaineksen kosteuspitoisuuden virheet havaitaan betonin notkeudessa esimerkiksi seuraamalla sekoittimen tehontarvetta. Käytännössä betonin vesi-sementtisuhte ei voida kuitenkaan tietää tarkasti, ja on selkeä tarve menetelmille betonin vesi-sementtisuhteen määrittämiseksi sekä tuoreesta että kovettuneesta betonista.

Työn tarkoitus ja sisältö

Aalto-yliopistossa tehtiin diplomityö, jossa tutkittiin erilaisia mittaamenetelmiä sekä tuoreen että kovettuneen betonin vesi-sementtisuhteen mittaamiseksi. Työn kirjallisuuskatsauksessa kartoitettiin erityisesti tekniikoita, joiden avulla voitaisiin mitata tuoreen betonin kosteuspitoisuutta automaattisesti. Työn kokeellinen osio suoritettiin laboratorio-olosuhteissa, joten betonin raaka-aineiden määrät ja kosteuspitoisuudet tunnettiin tarkkaan. Näitä tietoja hyväksi käyttäen eri testimenetelmiä verrattiin keskenään. Testaamiseen käytettiin

Mitattavan betonin olomuoto	Mittauslaite (mahd. valmistaja)	Toimintaperiaate
Tuore	Hydro-mix (Hydronix)	Resonanssitaajuuden muuttuminen veden määrästä mikroaalloilla luodussa sähkömagneettisessa kentässä
	SONO-WZ (Imko)	Heijastuneen sähköisen impulssin kulkeutumisaajan mittaaminen mittauspäässä (TDR-TRIME)
	Mikroaaltouuni	Betonissa olevan veden massan määrittäminen haihduttamalla
Kovettunut	Kapillaarinen vedenimukoe	Veden imeytymisnopeuden määrittäminen kovettuneen betonin kapillaarihuokosissa

Taulukko 1 Kokeellisessa osiossa tutkitut mittaamenetelmät tuoreelle ja kovettuneelle betonille.

Betonin osa-aineet [kg/m ³]					
Betoni	Sementti	Vesi	Kiviaines	Teho- notkistin	Huokostin
PL-0,4-2	400	160	1838	4,80	—
PL-0,5-2	320	160	1910	2,88	—
PL-0,6-2	300	180	1877	1,80	—
PL-0,4-5	400	160	1760	3,60	0,016
PL-0,5-5	320	160	1835	1,92	0,011
PL-0,6-5	300	180	1800	0,37	0,009
PL-0,4-10	400	160	1631	2,00	0,200
PL-0,5-10	320	160	1704	0,16	0,160
PL-0,6-10	300	180	1667	0,00	0,162

Taulukko 2 Koesarjan betonien koostumukset. Huokostimen annostus oli normaalia pienempi pitkän sekoitusajan ja tiivistystavan takia.

vesi-sementtisuhteeltaan ja ilmamäärältään erilaisia betoneita. Mittausmenetelmät ovat esitetty taulukossa 1.

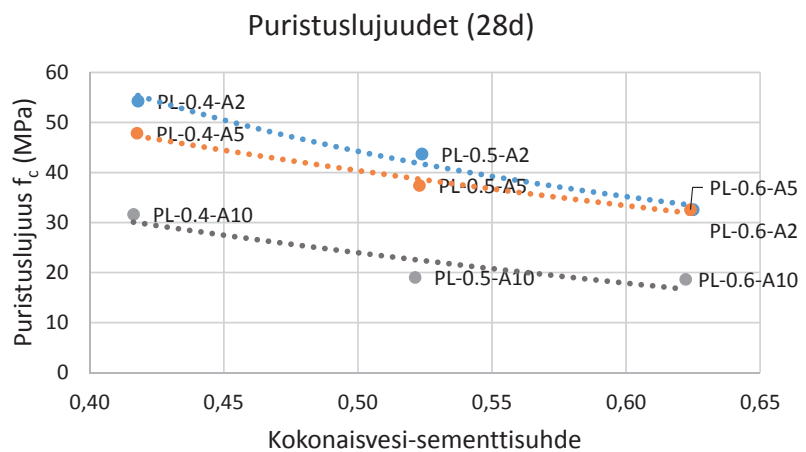
Laboratoriokokeet ja tulosten analysointi

Työn aikana valmistettiin yhdeksän erilaista betonia, joiden teholliset vesi-sementtisuhteet olivat 0,4, 0,5 ja 0,6 sekä tavoitteelliset ilmamäärät 2, 5 ja 10 prosenttia. Sementtinä käytettiin Finnsementti Oy:n valmistamaa Plussementtiä (CEM II/B-M (S-LL) 42, 5 N). Koesarjan betonit merkittiin esimerkiksi "PL-0,4-A2", jossa ensimmäinen osa tarkoittaa Plussementtiä, toinen vesi-sementtisuhdetta ja viimeinen tavoiteilmamäärää. Betonien koostumukset ovat esitetty taulukossa 2. Betoneita sekoitettiin viisi minuuttia, jolloin varmistettiin riittävän stabiilista huokosrakenteesta. Tuoreen betonin ominaisuudet mitattiin välittömästi sekoituksen jälkeen, jotka näkyvät taulukossa 3. Lisäksi kuvaan 1 on merkitty puristuslujuus-testin tulokset 28 vuorokauden iässä kaikista yhdeksästä betonista.

Työn vertailuissa mitattua vesi-sementtisuhdetta verrattiin betonin todelliseen kokonaisvesi-sementtisuhteeseen. Testimenetelmät eivät pysty erottelemaan tehollista ja absorboitunutta vesimäärää toisistaan vaan mittaavat kokonaisvesimäärää. Vesimäärästä laskettiin edelleen testibetonien vesi-sementtisuhteet suhteutetun sementtimäärän avulla. Vesi-sementtisuhteen vaatimukset kohdistuvat kuitenkin teholliseen vesimäärään.

Tuoreen betonin ominaisuudet				
Betoni	Painuma [mm]	Ilmamäärä, painemenetelmä [%]	Tiheys [kg/m ³]	Ilmamäärä, laskennallinen menetelmä [%]
PL-0,4-2	185	2,3	2392	2,4
PL-0,5-2	155	2,1	2401	1,7
PL-0,6-2	165	3,9	2315	3,9
PL-0,4-5	155	5,8	2305	5,8
PL-0,5-5	165	5,3	2293	5,9
PL-0,6-5	185	5,8	2246	6,4
PL-0,4-10	140	9,5	2199	9,7
PL-0,5-10	165	11,5	2132	12,2
PL-0,6-10	225	9,1	2163	9,3

Taulukko 3 Tuoreen betonin ominaisuudet heti sekoituksen jälkeen.



Kuva 1 Vesi-sementtisuhteen vaikutus testibetonien puristuslujuuteen.

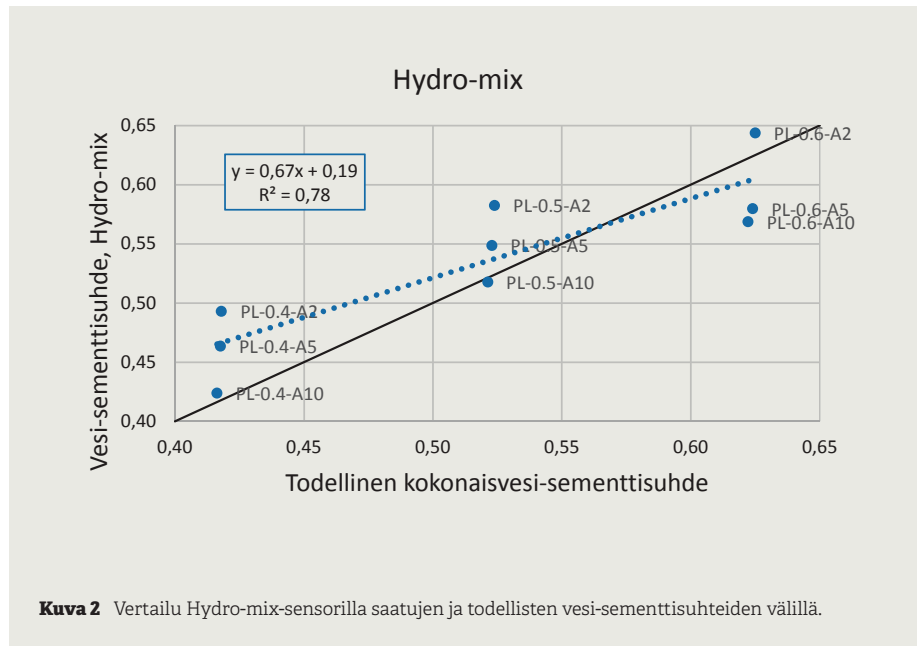
Hydro-mix

Laboratoriosekoittimen pohjaan asennettiin automaattiseen kosteuden mittaukseen tarkoitettu mikroaaltoihin perustuva sensori. Sensori muodostaa heikon sähkömagneettisen kentän anturin päälle. Sensorin mikroaltoresonaattorin ominaistajuus muuttuu betonin vesipitoisuuden mukaan, sillä veden dielektrisyyskerroin on betonin muita raaka-aineita huomattavasti korkeampi.

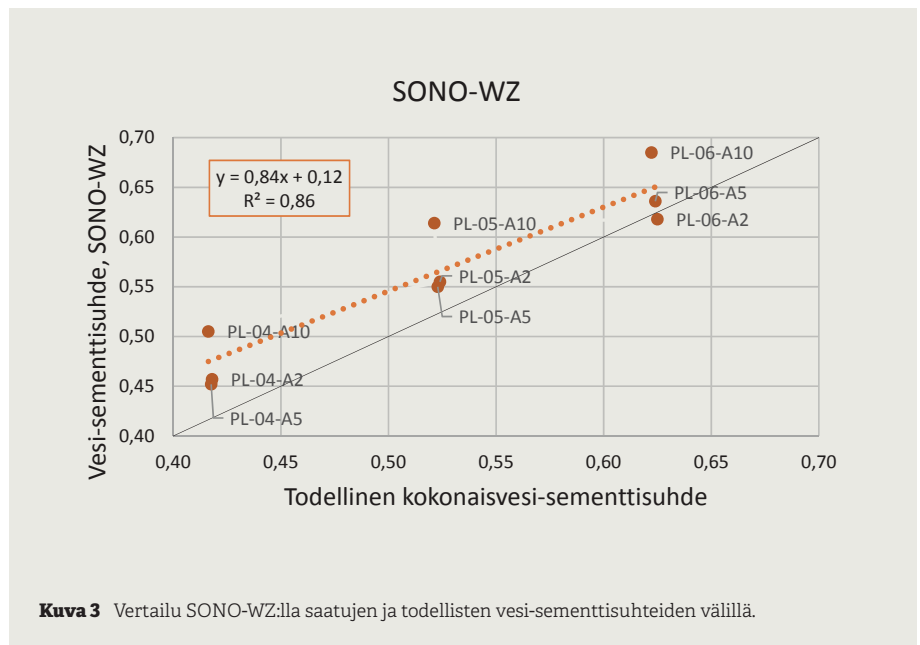
Automaattiset mittaustekniikat mittaavat harvoin suoraan itse mitattavaa parametria. Sen sijaan mittauksessa saatua vastetta joudutaan muuttamaan systemaattisesti vastaamaan haluttua parametria kuten kosteuspitoisuutta. Tämä tapahtuu tietyn kalibrointikäyrän avulla. Vertailua varten tehtiin vain yksi kalibrointi, jonka avulla saatu vaste muutettiin näyttämään betonin reaaliaikaista kosteuspitoisuutta. Yhden kalibroinnin tarkoituksena oli löytää tekijöitä, jotka vaikuttavat menetelmän mittaustarkkuuteen. Sensori kalibroitiin käyttäen huokostamatonta betonia, joka vastasi testibetonia PL-0.5-A2.

Menetelmien vertailua varten testibetoneista mitattiin kosteuspitoisuus aivan sekoituksen lopussa vasta, kun betonin kosteuspitoisuuslukema oli täysin tasoittunut. Kuvassa 2 on verrattu Hydro-mix:llä mitattuja vesi-sementtisuhteita betonien todelliseen kokonaisvesi-sementtisuhteeseen.

Tulokset näyttävät, että mitatut vesi-sementtisuhteet osuvat keskimäärin vertailusuoralle. Kuitenkin matalimmilla ilmamäärillä mitataan keskimäärin korkeampia vesi-sementtisuhteita kuin todelliset suhteet olivat. Yksi perustelu tälle lienee se, että ilman erilainen dielektrisyyskerroin on huomattavasti pienempi kuin betonin keskimääräinen kerroin. Vesi-sementtisuhteen 0,6 betoneilla mitatut arvot ovat selvästi pienempiä kuin todellinen suhde. Perimmäistä syytä tähän on kuitenkin vaikea löytää näiden tulosten perusteella. Käytännössä kuitenkin merkittävä osa nykyisistä betoneista on vesi-sementtisuhteeltaan alle



Kuva 2 Vertailu Hydro-mix-sensorilla saatujen ja todellisten vesi-sementtisuhteiden välillä.



Kuva 3 Vertailu SONO-WZ:illa saatujen ja todellisten vesi-sementtisuhteiden välillä.

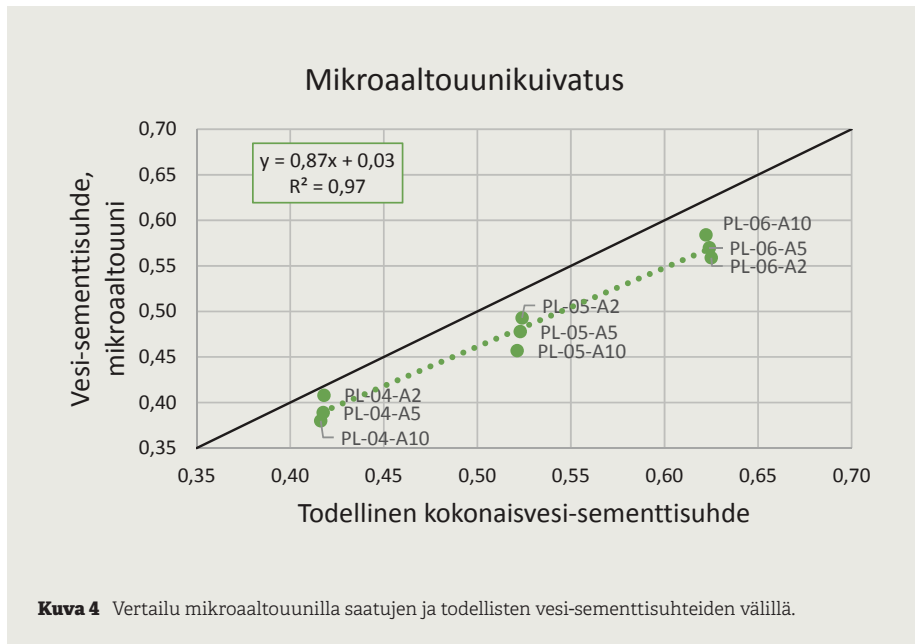
0,6. Ilmamäärän selkeä vaikutus mitattuun arvoon antaa perusteita eri ilmamäärätasojen kalibroinnille. Myös vesi-sementtisuhtekohtainen kalibrointi todennäköisemmin parantaisi menetelmän tarkkuutta, mutta tämä ei ole mahdollista käytännön olosuhteissa.

SONO-WZ

Työssä myös testattiin IMKO:n valmistamaa SONO-WZ-mittauslaitetta, jonka avulla voidaan mitata tuoreen betonin kosteuspitoisuus nopeasti betoninäytteestä. Laitteen toiminta perustuu mittauspäässä heijastuvan sähköisen impulssin kulkeutumisaikaan mittaamiseen. Impulssi muodostaa sähkömagneettisen kentän mittauspäähän, jolloin liikkuvan

impulssin nopeus muuttuu sensorin päällä olevien aineiden dielektrisyyskerroimen mukaisesti. Siten kulkeutumisaika mittauspäässä on kytköksissä mitattavassa materiaalin vesipitoisuuteen.

Mittauksissa käytettiin laitteen oletusasetuksia virhetekijöiden tunnistamiseksi. Tuoreen betonin tiheys ja kiviaineksen rakeisuusikäyrä asetettiin laitteeseen kuitenkin ennen mittauksia. Koebetoneiden kosteuspitoisuus mitattiin betoninäytteestä viiden eri kohdan keskiarvona noin viisi minuuttia sekoituksen jälkeen. Laite pystyy käytännössä mittaamaan betonissa olevan vapaan veden sekä yhden kolmasosan kiviainekseen imeytyneestä vedestä. Tästä syystä mitattua vesipitoisuutta korjattiin



Kuva 4 Vertailu mikroaaltouunilla saatujen ja todellisten vesi-sementtisuhteiden välillä.

ennen vesi-sementtisuhteen laskemista. Korjatuista arvoista laskettiin jälkepäin koebetonien kokonaisvesi-sementtisuhte. Tulokset on esitetty kuvassa 3.

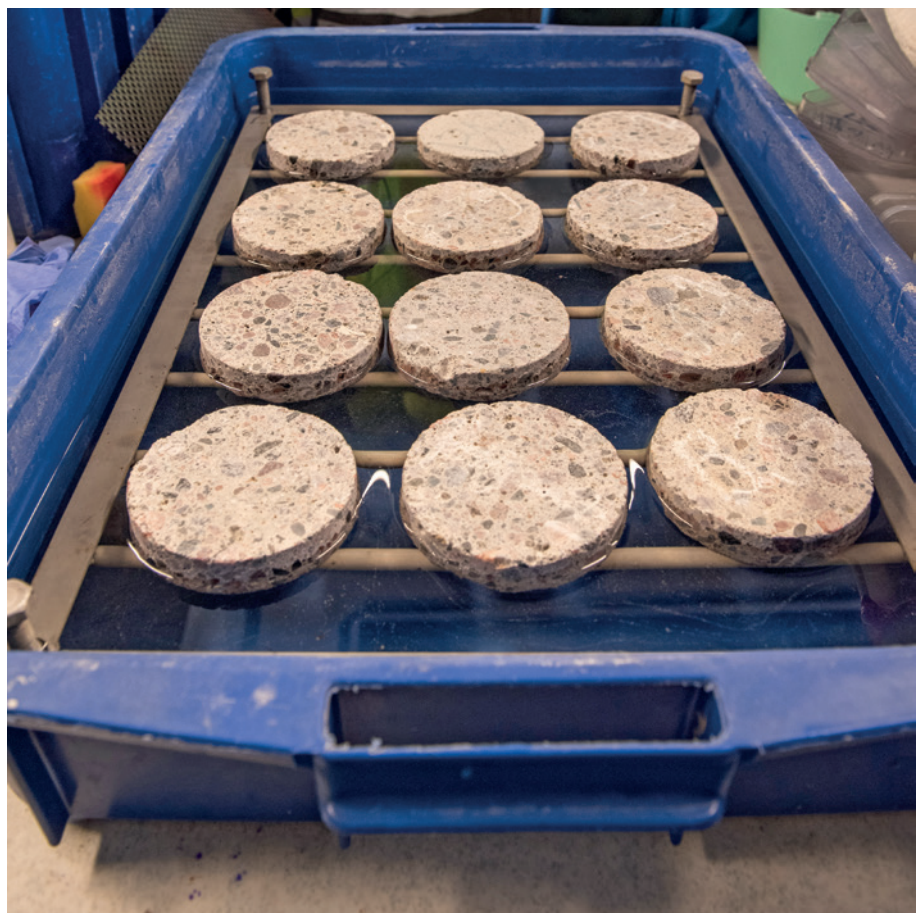
Kuvasta huomataan että, tulokset asettuvat vertailusuoran yläpuolelle eli ilman muita korjaustoimenpiteitä SONO-WZ näyttää aina hieman suurempia kosteuspitoisuuksia. Ilmamäärätasoilla A2 ja A5 tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, mikä näyttäisi olevan saattaa osittain johtua ennakkoon asetetusta tiheyskorjauksesta. Kuitenkin ylikorkeat ilmamäärät (A10) näyttävät aiheuttavan merkittävää vesi-sementtisuhteiden yliarviointia. Tämä johtuu todennäköisesti aikaisempaan tapaan ilman reilusti pienemmästä dielektrisyysvakiosta. Kuvasta on myös huomattavissa, että mittausmenetelmä saattaa antaa muita alempia kosteuspitoisuuksia suurilla vesi-sementtisuhteilla. Sen sijaan vesi-sementtisuhteella ei vaikuta olevan merkitystä tulosten hajontaan. Normaaleilla ilmamäärillä menetelmä antaa varsin hyvän arvion betonin vesi-sementtisuhteesta.

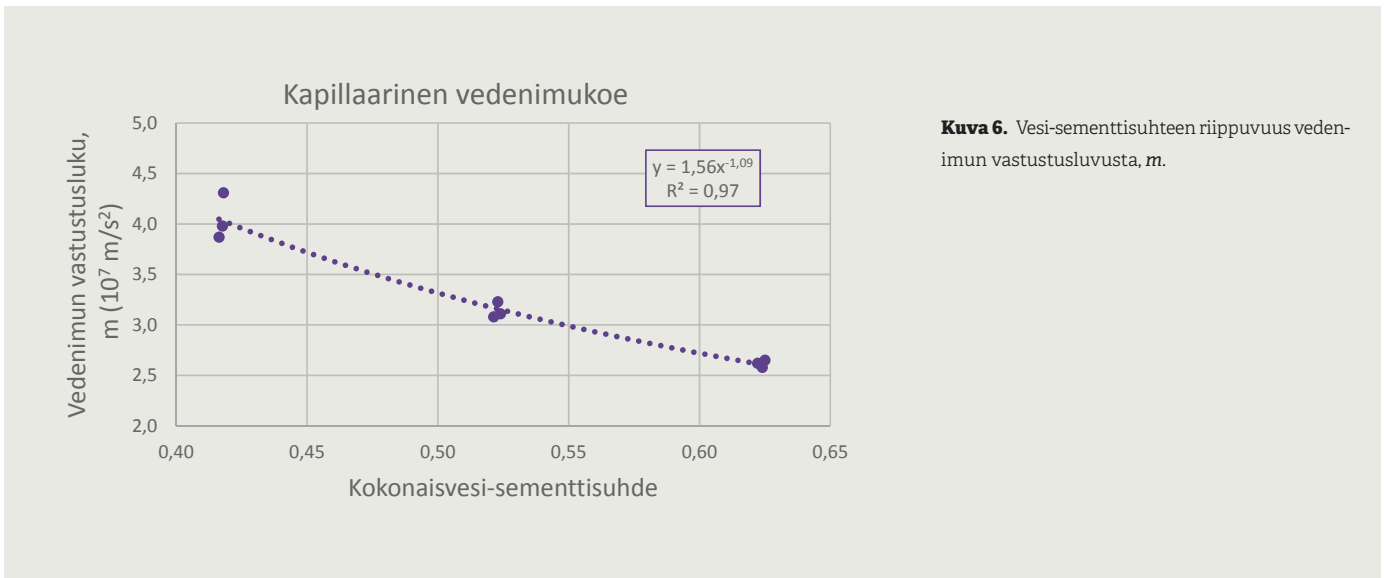
Mikroaaltouunikuivatus

Suomessa ei ole olemassa virallista standardia vesi-sementtisuhteen määrittämiselle mikroaaltouunikuivatuksella. Menetelmää kuitenkin käytetään varsin yleisesti. Kirjallisuustutkimuksen tuloksena koesarjan betoneita lämmitettiin mikroaaltouunissa aikaisemmista ohjeistuksista poiketen 15 minuuttia, jotta varmistuttiin paremmin betonissa olevan kosteuden haihtumisesta. Tehoksi valittiin 850 wattia ja näytteiden massaksi noin 600 grammaa. Mittaustulokset ovat esitetty kuvassa 4.

Muista mittausmenetelmistä poiketen mitatut vesi-sementtisuhteet olivat pienempiä kuin todelliset arvot. Vaikka kokeessa käytettiin verrattain pitkää lämmitysaikaa, suhteiden aliarviointia voidaan selittää sillä, että ihan kaikkea kosteutta ei voi saada pois kuumentamalla näytettä. Vesi-sementtisuhdetta laskettaessa ei käytetty sementtilaatukohtaisia kertoimia, joiden

Kuva 5 Veden annettiin imeytyä koekappaleisiin kapillaarisessa vedenimukokeessa. Kappaleiden massan muutosta seurattiin punnitsemalla ne useaan kertaan.





Kuva 6. Vesi-sementtisuhteen riippuvuus vedenimun vastustusluvusta, *m*.

avulla tätä virhettä voitaisiin korjata. Mittauksien välinen hajonta on selvästi pienempää kuin aikaisemmissa mittausten menetelmissä. Myös betonin ilmamäärällä ei näytä olevan selvää vaikutusta mitattuun kosteuspitoisuuteen. On kuitenkin huomioimisen arvoista, että korkean vesi-sementtisuhteen betoneissa kuumennuksen aikana on tapahduttava paljon enemmän haihtumista, jolloin välttämättä edes pidemmät lämmitysajat eivät ole riittäviä. Tämä johtaa vesi-sementtisuhteen aliarviointiin, kun betonimassan kosteuspitoisuus kasvaa. Verrattuna edellisiin menetelmiin mikroaltonuikuivatus on manuaalinen ja työläs testimenetelmä. Siten se ei täytä tulevaisuuden tarpeita automaattisen mittauksen osalta.

Kapillaarinen vedenimukoe

Työssä tutkittiin myös vesi-sementtisuhteen määrittämistä kovettuneesta betonista käyttäen kapillaarista vedenimukoetta. Tämäkään menetelmä ei ole standardoitu menetelmä, mutta sitä on käytetty hieman eri variaatioissa tutkimustarkoituksiin. Menetelmä kertoo betonin kapillaari- ja geelihuokoisuuden määrästä sekä laadusta. Tuloksia voidaan verrata empiirisesti muodostettuun vesi-sementtisuhteesta riippuvaan vertailukäyrään. Testiä varten valmistettiin neljä rinnakkaista koekappaletta, joiden korkeudet olivat 20 ± 2 mm ja halkaisijat 100 ± 2 mm. Ennen vedenimukoetta koekappaleet kuivattiin uunissa 105 °C:n lämpötilassa. Vedenimukokeen järjestelyt ovat esitetty kuvassa 5. Vedenimun mittaustietojen perusteella voidaan määrittää kapillaarisuusluku *k* sekä vedenimun vastusluku *m*. Näistä jälkimmäinen riippuu betonin vesi-sementtisuhteesta sekä sideaineen laadusta, mutta ei ole riippuvainen esimerkiksi sementtimäärästä. Vertaamalla tätä arvoa vastaavalla sideaineella valmistettuun referens-

siaineistoon voitaisiin arvioida kovettuneen betonin vesi-sementtisuhdetta. Kuvassa 6 on esitetty yhdellä sideaineella valmistettujen testibetonien vedenimun vastusluvun riippuvuus betonin vesi-sementtisuhteesta.

Tuloksien perusteella laskettu eksponentiaalinen käyrä noudattaa aikaisempia kirjallisuudessa muodostettuja riippuvuuskaivoja. Käyrän perusteella vastustusluku nousee pienillä vesi-sementtisuhteilla ja alenee, mitä suuremmaksi vesi-sementtisuhte kasvaa. Koska koesarja oli kuitenkin hyvin rajallinen, tarkemman käyrän piirtämiseksi vaadittaisiin kattavampi koesarja, joka sisältäisi kokeita useammalla vesi-sementtisuhteella. Lisäksi kokeita tulisi tehdä eri sideaineyhdistelmillä. Kuvasta 6 havaitaan, että betonin ilmamäärällä on vain hyvin pieni vaikutus mitattuun vastuslukuun. Betonien puristuslujuudet vaihtelivat voimakkaasti riippuen betonin ilmamäärästä (kuva 1). Kapillaarihuokoisuuteen ja siten vedenimun vastuslukuun ilmamäärällä ei kuitenkaan ollut juurikaan vaikutusta.

Testimenetelmän alussa tapahtuva kuivatus saattaa aiheuttaa koekappaleisiin mikrohalkeamia, jotka saattavat vaikuttaa imuvastustuskyvyn heikkenemiseen. Siten riippuvuussuhteet ovat riippuvaisia kuivatuslämpötilasta.

Johtopäätökset

Vesi-sementtisuhte on betonin tärkein ominaisuus, mutta tämä suhte saattaa vaihdella valmistuksen aikana monista eri syistä. Eriytyisesti hienon kiviaineksen virheellinen kosteuspitoisuus aiheuttaa muutoksia vesi-sementtisuhteessa. Nykyisellään toteutunut vesi-sementtisuhte arvioidaan punnittujen raaka-aineiden avulla sekä lisäksi kiviaineksen mukana tulleesta keskimääräisestä arviosta. Tämä arvio saattaa olla epätarkka, koska esi-

merkiksi hiekan kosteusprosentti saattaa vaihdella. Automaattisten mittaustekniikoiden avulla voidaan mitata reaaliaikaisesti ja jatkuvasti esimerkiksi kiviaineksen kosteuspitoisuutta, jolloin tiedetään tarkkaan sekoittimeen menevän veden määrä.

Diplomityössä tutkittiin kahta automaattista mittaustekniikkaa, jotka voidaan asentaa betoniasemalle joko mittaamaan raaka-aineiden kosteuspitoisuutta liukuhihnalla sekä annostelijassa tai betonin kosteuspitoisuutta jopa suoraan betonisekoittimessa. Lisäksi työssä havaittiin myös optisten kosteusmittareiden tuomat edut, sillä betoni on yksi pintoja kuluttavimmista materiaaleista. Nykyiset mittausten menetelmät perustuvat sähkömagneettisen kentän luomiseen antureiden avulla, jotka ovat tuoreeseen betoniin suorassa kontaktissa. Mitattavan materiaalin kosteuspitoisuuden muutokset muuttavat herkästi tämän kentän avulla mitattua vastetta.

Työssä pyrittiin analysoimaan testimenetelmien herkkyyttä eri tekijöille. Siten mittaustekniikoiden kalibrointi tehtiin vain yhdelle betonilaadulle eikä niissä asetettu ennakoon lukemien korjauksia. Mittaustulokset osoittivat, että vaikka testattujen menetelmien hajonta oli suurempaa kuin esimerkiksi mikroaltonuikuivatusta käyttäessä, niin tekniikoiden automatisoinnin edut ovat varmasti häiritsevää suuremmat. Suurimmat virheet huomattiin olevan korkeilla ilmamäärillä. Kyseiset ilmamäärät olivat normaalitasoa selvästi korkeampia. Pienten koesarjojen vuoksi on kuitenkin mahdollista arvioida tarkkaan mittaustekniikoiden mittaustarkkuutta. Riittävällä tiheällä kalibroinnilla ja mittaustekniikoiden huollolla vaikuttaisi olevan mahdollista päästä tästä huolimatta sellaiseen tarkkuuteen, jolla voitai-

siin pienentää merkittävästi betonissa olevaa hajontaa.

Työn johtopäätelmänä voidaan esittää, että raaka-aineiden kosteudenmittaus automaattisesti ennen sekoittamista mahdollistaa tarkimman arvion betonin todellisesta vesi-sementtisuhteesta. Jos betonin notkeudessa havaitaan merkittäviä muutoksia, olisi syytä mitata betonin vesi-sementtisuhte uudelleen työssä kokeiltuja testausmenetelmiä käyttäen. Sekoittimeen asennettavilla kosteusantureilla voidaan lisäksi muun muassa optimoida betonin sekoitusaikaa. Huokostettua betonia tehdessä on kuitenkin tuotava riittävä määrä energiaa stabiiliin huokosrakenteen takaamiseksi. Yhdistämällä muista automaattisista mittaustulotteista syntyvää dataa voitaisiin myös pienentää betonituotannossa luonnostaan olevaa hajontaa. Kontrolliohjauksen avulla jo sekoittimessa voitaisiin tehdä tarvittavat muutokset, jotta asetettuihin tavoitteisiin päästäisiin mahdollisimman usein tai ainakin mahdollisimman lähelle.

Kirjallisuus:

1. Punkki, J. & Ojala, T. Vesi-sementtisuhte 100 vuotta. *Betoni* 1/2018. s. 78–83.

Abstract

Water-cement ratio (w/c ratio) is an important factor affecting quality of the concrete, which has motivated engineers to do research on determining the w/c-ratio. The traditional way to estimate the w/c-ratio is to determine cement and water contents from mix design and batch report. The estimated water amounts from weighing can be inaccurate since other factors affect the realized water content such as moisture in the aggregates. In this thesis other methods are investigated to determine the w/c-ratio of fresh and hardened concrete.

Three methods were exploited to determine w/c ratio of fresh concrete and one method for the hardened concrete. The methods utilized in the fresh concrete were Hydro-mix, SONO-WZ and drying in microwave oven. Capillary suction method is used for the hardened concrete. Based on the result, Hydro-mix shows moisture content in the real-mixing time and it shows good results with higher air content. SONO-WZ is a portable measuring device it shows good results with higher w/c-ratio and concrete with the air content in the range of 2 to 7 percent. SONO-WZ is not a suitable device for higher air contents because the air gaps in the high air content concrete affect the flow of dielectric current. Drying in microwave oven shows reliable results. The results are slightly smaller than the actual w/c-ratio because there is still some moisture left in the sample.

Digitalization measurement system plays an important role in modernizing the quality control of concrete. It is beneficial to measure the workability, moisture content and air content of concrete in all phases of concrete production. These measurement technologies measure the properties of concrete in real-time with minimal effort and less supervision.



About the author:

Ammad Tauqir is civil engineer, born in Pakistan. He got his bachelors from Kaunas University of technology in Civil engineering. He is now a master student in Aalto University in Building Technology program.

Contact Information:

Email: ammad.tauqir@aalto.fi

Phone: +358469501674