

Ilmahuokosanalyysien vertailutestit

Jouni Punkki

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

Mohammad Hossein Ramadan

Betonitekniikka
Aalto-yliopisto
mohammadhossein.ramadan@aalto.fi

Betonin ilmahuokosanalyysillä tarkoitetaan ohuthie- ja pintahieanalyysia, joilla arvioidaan betonin suojahuokostuksen laatua ja siten betonin pakkasenkestävyyttä. Itse menetelmät ovat vanhoja ja betonialalle ohuthieanalyysi on tullut geologian puolelta, missä kiviaineksen mineraalikoostumuksia määritetään ohuthieestä mikroskopian avulla.

Suomessa ohuthieanalyysit tehdään normaalisti testausohjeen VTT TEST R003-00-2010 mukaisesti. Pintahieitä tehdään VTT TEST R003-00-2010 tai vaihtoehtoisesti standardin SFS-EN 480-11 mukaisesti. Eri menetelmillä saadut tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia. Standardi SFS-EN 480-11 on viiva-analyysi, se huomioi kaikki alle 4,0 mm huokokset, kun taas VTT TEST R003-00-2010 on pisteanalyysi ja siinä huokokset jaetaan suojahuukosiin (0,02...0,8 mm) ja tiivistyshuukosiin (> 0,8 mm). VTT TEST R003-00-2010 on kehitetty ohuthieanalyysia varten ja siten pintahie tehdään hieman ohjeesta poiketen.

Ilmahuokosanalyysillä määritettyä huokosjakoa käytetään betonin pakkasenkestävyyden arvioinnissa. Esimerkiksi Betoninormit BY65:2016 (Taulukko L4.3) antaa rasisutusluokittain raja-arvot pakkasenkestävän betonin huokosjaoille (0,22...0,30 mm). Viime aikoina myös kovettuneen betonin ilmamäärää on arvioitu huokosanalyysien avulla, vaikka tähän tarkoitukseen VTT TEST menetelmän tiedetään soveltuvan huonosti.

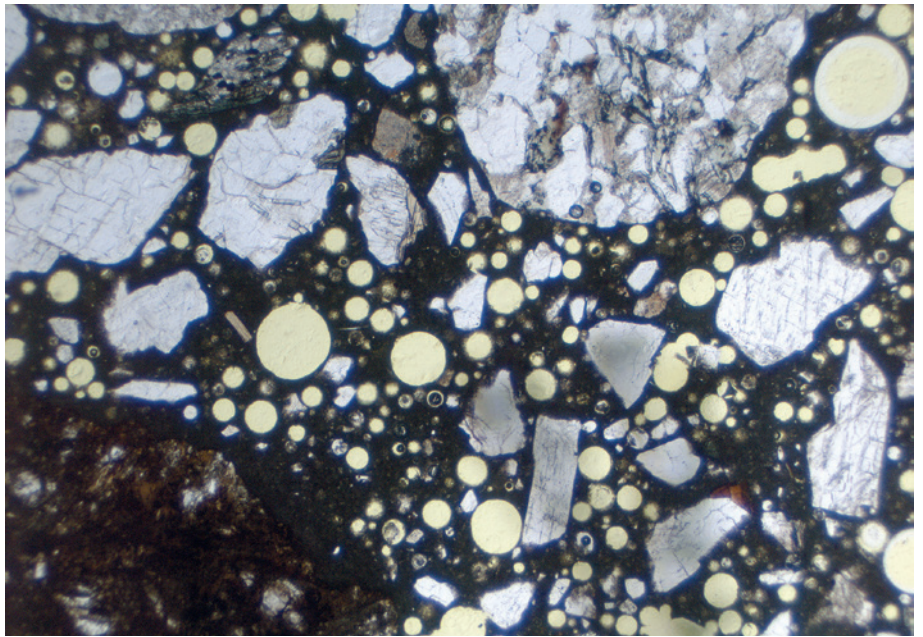
Menetelmien tarkkuudesta erityisesti pakkasenkestävän betonin laadunarvioinnin

yhteydessä on epätietoisuutta, onhan testattava näytemäärä hyvin pieni. Huokosanalyysien tekijät ovat tehneet säännöllisesti rengastestejä, joissa sama betoni on testattu eri laboratorioissa. Rengastestien tuloksia ei kuitenkaan ole julkistettu ja siten tulokset ovat jääneet vain testien osallistujien ja FINAS:in käyttöön. Aalto-yliopisto tarjoutui järjestämään laajemman testisarjan ja ennen kaikkea julkaisemaan testitulokset. Testisarja tehtiin hyvässä yhteistyössä huokosanalyysien tekijöitten kanssa, mukaan ilmoitautui yhteensä 9 laboratoriot. Mukana olevat laboratoriot edustavat hyvin suurta osaa suomalaisista huokosanalyysia tekevästä laboratorioista. Testisarjassa olivat mukana:

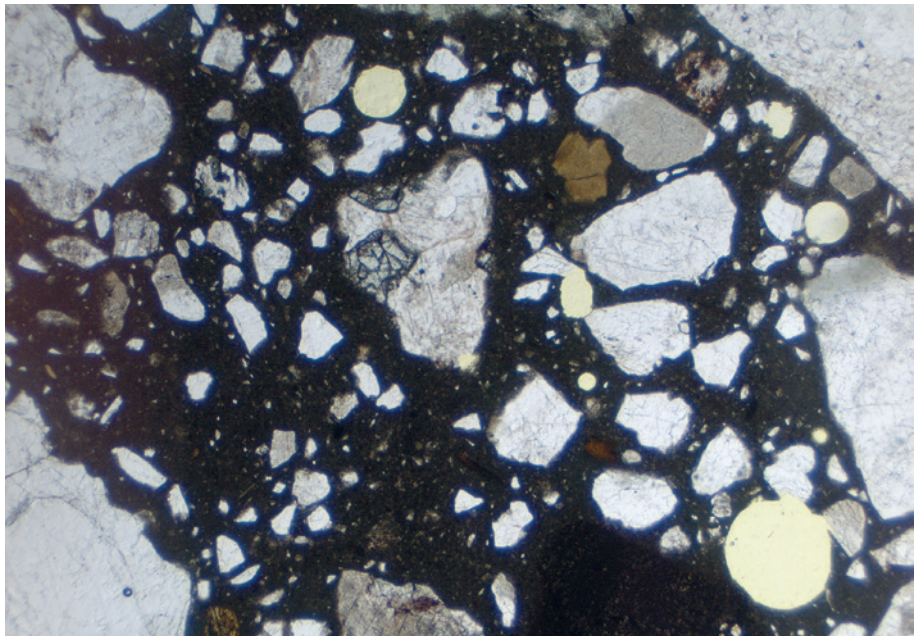
- Betonialan Ohuthiekeskus FCM Oy
- Contesta Oy
- Eurofins Expert Services Oy
- Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy / KymiLabs
- KiwaLab
- Labroc Oy
- Pohjois-Suomen Betoni- ja Maalaboratorio Oy
- Vahnen Rakennusfysiikka Oy
- WSP Finland Oy

Testisarjan tarkoituksena oli selvittää menetelmien hajontaa, ei laboratorioiden keskinäisiä eroja. Siten tulosten analysoinnissa laboratorioita ei ole yksilöity, vaan laboratoriot esitetään formaatissa Lab-a, Lab-b jne. Järjestys ei ole sama kuin ylläolevassa listassa. Kaksi laboratoriot

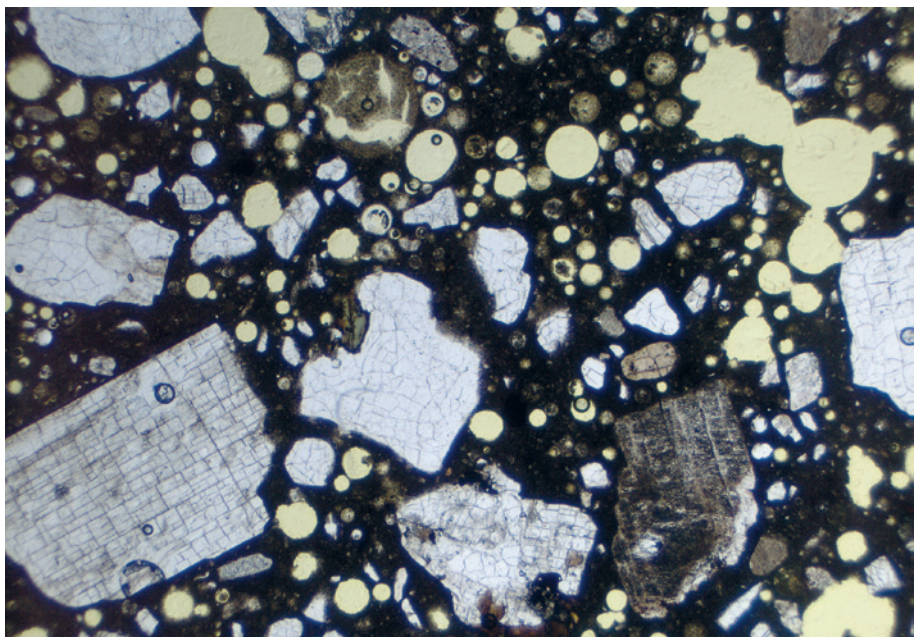
Ohuthiekuva betonista 0.5-10

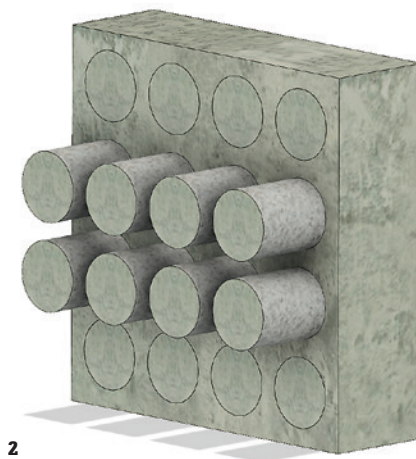
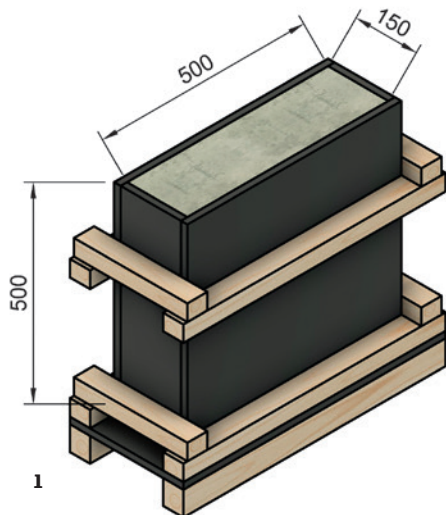


Ohuthiekuva betonista 0.4-5



Ohuthiekuva betonista 0.4-10





Kuva 1. Koerakenne.

Kuva 2. Koerakenteesta porattavat näytteet. Huokosanalyysiä varten käytettiin kahden keskimäisen porausrivin kappaleita.

analysoi betonit sekä ohut- että pintahiehellä. Pintahietulokset on esitetty omina laboratorioina eikä yksittäisen laboratorion ohut- ja pintahieiden tuloksia ole vertailtu. Pintahieiden tekijöistä toinen laboratorio analysoi pintahieet VTT TEST R003-00-2010 mukaisesti, kun taas toinen standardin SFS-EN 480-11 mukaisesti. Jälkimmäisiä tuloksia ei ole otettu mukaan tulosten tarkempiin analyysintietoihin, koska analyysintapa on poikkeava ja siten myös tulokset poikkeavat selvästi VTT TEST R003-00-2010 mukaisista tuloksista.

Testisarjassa havaittava tulosten hajonta pitää sisällään huokosanalyysin hajonnan, mutta myöskin betonin sisältämän vaihtelun. Jos haluttaisiin tutkia pelkästään huokosanalyysin hajontaa, tulisi testaukset tehdä samasta betoninäytteestä tai samasta hiehestä.

Testisarja on osa Mohammad Hossein Ramadanin diplomityötä Aalto-yliopistossa. Työssä tutkitaan eri menetelmiä kovettuneen betonin ilmamäärän määrittämiseen ja ilmahuokosanalyysi on yksi tutkittavista menetelmistä.

Testibetonit ja koerakenteiden valmistus

Testisarjaa varten valettiin yhteensä kuusi eri betonia. Betonien vesi-sementtisuhteet olivat 0,4, 0,5 tai 0,6 sekä tavoiteilmamäärät 5% tai 10%. Betonilaadut on merkitty tapaan "0.5-5", jossa ensimmäinen luku kertoo vesi-sementtisuhteen ja toinen tavoiteilmamäärän. Testibetonien koostumukset on esitetty taulukossa 1. Tuoreen betonin koetulokset on esitetty taulukossa 2.

Betoneista valettiin kuvan 1 mukaisia koerakenteita. Koerakenteen mitat olivat 500×500×150 mm³. Koerakenne valettiin kolmessa kerroksessa ja tiivistettiin kerroksittain kolmesta kohtaa. Yhden kohdan tiivistysaika oli 7 s ja siten kokonaistiivistysaika oli 84 s (= 2240 s/m³). Tärysauvana käytettiin Wacker Neuson sauvatäryntä, jonka halkaisija oli 25 mm. Tärysauva on liian pieni kyseiselle rakenteelle, mutta pientehoisen sauvan ja pitkän täryntäajan yhdistel-

Taulukko 1. Testibetonien koostumukset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Sementti (kg/m ³)	400	320	300	400	320	300
Plus-sementti						
Kiviaines (kg/m ³)	1761	1833	1801	1631	1704	1668
Vesi, tehollinen (kg/m ³)	160	160	180	160	160	180
Tehonotkistin (kg/m ³)						
VB-Parmix	3,60	1,92	0,38	2,00	0,16	0,00
Huokostin (kg/m ³)						
Ilma-Parmix	0,016	0,011	0,009	0,200	0,160	0,162
Vesi-sementtisuhte						
Tehollinen	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60

Taulukko 2. Tuoreen betonin testitulokset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Painuma (mm)	155	165	185	140	165	225
Betonin ilmamäärä (%)	5,8	5,3	5,8	9,5	11,5	9,1
Tiheys (kg/m ³)	2305	2293	2246	2199	2132	2163
Betonin ilmamäärä (%)						
Laskennallinen	5,8	5,9	6,4	9,7	12,2	9,3

Taulukko 3. Testibetonien ja koerakenteiden betonien puristuslujuudet 28 vrk ikäisinä.

Puristuslujuudet on määritetty kolmella koekappaleella / poralieriöllä ja ljuudet on muutettu vastaamaan 150 mm kuutioljuuksia. Laboratorio- ja porakoe-kappaleiden puristuslujuudet eivät ole suoraan vertailukelpoisia. Tiheysarvot ovat 16 porakappaleen arvoja. Kovettuneen betonin ilmamäärä on laskettu porakappaleiden keskimääräisen tiheyden ja suhteustietojen avulla.

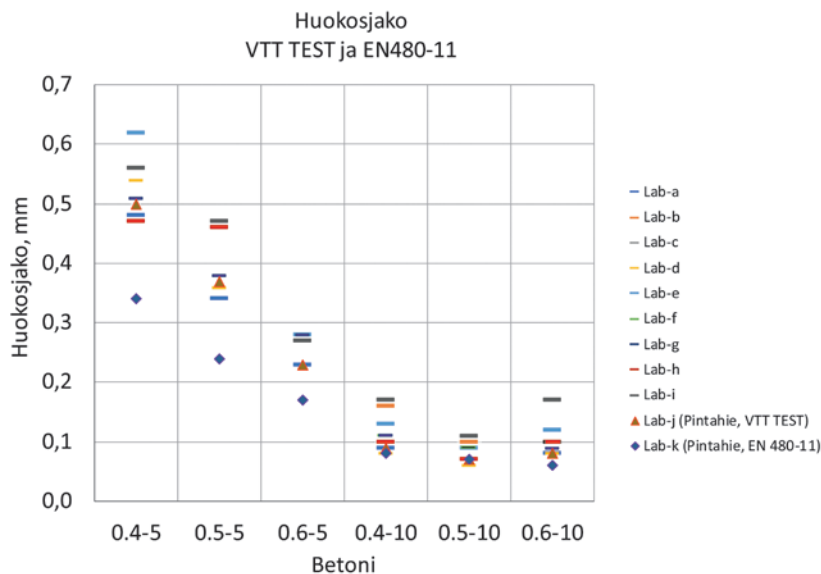
	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Puristuslujuus (MPa)						
Laboratoriokoe-kappaleet	47,9	37,5	32,6	31,7	19,0	18,6
Puristuslujuus (MPa)						
Porakappaleet	54,4	44,5	35,9	38,1	21,7	24,7
Tiheys (kg/m ³)						
Porakappaleet, keskiarvo	2349	2343	2294	2218	2150	2194
Tiheys (kg/m ³)						
Porakappaleet, keskihajonta	11	13	16	20	11	33
Betonin ilmamäärä (%)						
Laskennallinen	4,0	3,9	4,4	9,0	11,4	8,1

Taulukko 4. Huokosanalyysilla määritetyt testibetonien huokosjaot (mm).

Taulukko sisältää VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Keskiarvo	0,53	0,41	0,26	0,12	0,08	0,10
Minimi	0,47	0,34	0,23	0,08	0,06	0,08
Maksimi	0,62	0,47	0,28	0,17	0,11	0,17
Keskihajonta	0,052	0,055	0,022	0,031	0,018	0,033
Lukumäärä	7	7	7	10	10	7
Variaatiokerroin	10 %	14 %	8 %	26 %	22 %	32 %

Kuva 3. Huokosanalyysilla määritetyt testibetonien huokosjaot (mm). Lab-a...i ovat VTT TEST mukaisesti tehtyjä ohuthieanalyysia. Pintahieet on tehty joko VTT TEST:in (Lab-j) tai standardin EN480-11 (Lab-k) mukaisesti.



mällä pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman homogeeninen huokosrakenne.

Koerakenteista porattiin yhteensä 16 kpl halkaisijaltaan noin 98 mm:n poralieriöitä huokosanalyysia sekä diplomityön muita koestuksia varten (kuva 2). Huokosanalyysia varten porakappaleet otettiin koerakenteen kahdesta keskimmäisestä porausrivistä. Poralieriöiden tiheydet määritettiin ja huokosanalyysiin valittiin kahdeksasta lieriöstä viisi, joiden tiheydet olivat lähimpänä keskiarvoa. Poralieriöt sahattiin kahteen osaan ja näin saatiin yhteensä 10 testikappaletta ($\phi = 98$ mm, $l = 75$ mm). Koebetonien puristuslujuudet sekä koerakenteista porattujen koekappaleiden puristuslujuudet on esitetty taulukossa 3.

Korkealla ilmamäärällä (tavoiteilmamäärä: 10%) puristuslujuuksissa oli epäjohtomukaisuutta erityisesti betonin 0.5-10 osalta. Korkean ilmamäärän vaikutus puristuslujuuteen on niin suuri, että vesi-sementtisuhteen merkitys jää jo osin sekundääriseksi. Taulukosta 3 havaitaan myös, että matalammalla ilmamäärällä (5%) porakappaleiden tiheys oli selvästi korkeampi (n. 50 kg/m³) verrattuna tuoreen beto-

nin tiheyteen. Siten myös kovettuneen betonin ilmamäärät ovat kyseisten betonien osalta alle tavoitetasen. Kokonaisuutena porakappaleiden tiheyden keskihajonta oli alhainen. Tämän perusteella voitaisiin olettaa koekappaleiden välisen hajonnan olevan vähäistä.

Laboratorioille toimitettiin koodatut poralieriöt. Siten laboratoriot eivät tietäneet tutkitavan betonin vesi-sementtisuhtetta tai ilmamäärää. Laboratoriot suorittivat analyysin VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti. Poikkeuksena kuitenkin toinen pintahieanalyysia käyttänyt laboratorio, joka teki analyysin standardin SFS-EN 480-11 mukaisesti. Toimittuista poralieriöistä valmistettiin vähintään 2 kpl osanäytteitä, jotka molemmat analysoitiin. Ilmoitettu tulos on osanäytteiden keskiarvo.

Koetulokset

Laboratorioille annettiin mahdollisuus testata kaikki 6 testibetonia tai vaihtoehtoisesti 2 tai 4 testibetonia. Kuusi laboratoriota testasi kaikki betonit ja kolme laboratoriota testasi 2 betonia. Lisäksi kaksi laboratoriota teki analyysit sekä ohut- että pintahieillä. Kaikkiaan testituloksia

tuli näin 54 kappaletta. Kahdesta betonilaadusta saatiin 11 rinnakkaista tulosta ja lopuista neljästä 8 rinnakkaista tulosta. Aineisto on siten varsin kattava ja varmaankin laajin mitä Suomessa on tähän mennessä tehty. Seuraavissa taulukoissa on esitetty vain VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset. Taulukot eivät siten sisällä standardin SFS-EN 480-11 mukaisen pintahieanalyysin tuloksia (Lab-k). Kuvissa on kuitenkin esitetty kaikki tulokset.

Huokosjako

Huokosjako on huokosanalyysin olennaisin parametri ja sen perusteella arvioidaan suojahuokosten laatua ja siten epäsuorasti myös betonin pakkasenkestävyyttä. Taulukossa 4 on esitetty VTT TEST-R003-00-2010 mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset ja kuvassa 3 kaikki tulokset.

Kahdella betonilla (0.4-5 ja 0.5-5) huokos- tus epäonnistui ja huokosjako ylitti osin arvon 0,40 mm. VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaan 0,40 mm:n ylittäviä huokosjakotuloksia ei ilmoiteta lukuarvona, vaan muodossa >

0,40 mm. Näin useimmat laboratoriot olivat tehneetkin. Todelliset arvot pyydettiin kuitenkin erikseen, jotta keskiarvo ja keskihajonta voitaisiin laskea. Kuvassa 3 on esitetty todelliset arvot. Tällaiset arvot ovat kuitenkin menetelmän luotettavan mitta-alueen ulkopuolella ja siten tuloksiin tulee suhtautua varauksin.

Myös betonin 0.6-5 yhdessä tuloksessa oli testaajan ilmoituksen mukaan normaalia suurempaa epävarmuutta. Toisen osanäytteen huokosjako oli 0,22 mm ja toisen 0,32 mm.

Huokosjaon keskihajonta vaihteli alueella 0,018...0,055 mm. Keskihajonta ei riippunut juurikaan huokosjaon tai ilmamäärän tasosta, ainoastaan huonosti huokostetuilla betoneilla (0.4-5 ja 0.5-5) hajonta oli suurempi. Toisaalta kyseiset tulokset ovat menetelmän luotettavan mitta-alueen ulkopuolella. Hyvin huokostetuilla betoneilla huokosjaon hajonta oli luokkaa 0,02...0,03 mm. Hajonta on samaa luokkaa kuin mitä yleisesti on arvioitu. On esitetty, että hajonta olisi yleensä alle 0,03 mm edellyttäen, että analyysin tekee yksi kokenut analyysoija. Tässä tapauksessa analyysoijia oli useita ja myös näytteiden välillä voi olla eroja.

Standardin SFS-EN 480-11 mukainen pintahieanalyysi näyttäisi antavan hieman alhaisempia huokosjaon arvoja kuin VTT TEST:in mukaiset analyysit erityisesti suuremmilla huokosjaon arvoilla. VTT TEST:in mukaisten ohut- ja pintahieiden välillä ei näyttäisi olevan merkittävää eroa, tosin käytössä on vain yhden pintahietulokset.

Ominaispinta-ala

Suojahuokosten ominaispinta-ala on huokosjaon ohella parametri, joka kuvaa suojahuokostuksen laatua. Nykyisellään vaatimukset suojahuokostuksen laadulle (esim. BY65) esitetään kuitenkin vain huokosjakona. Taulukossa 5 on esitetty VTT TEST-R003-00-2010 mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset ja kuvassa 4 kaikki tulokset.

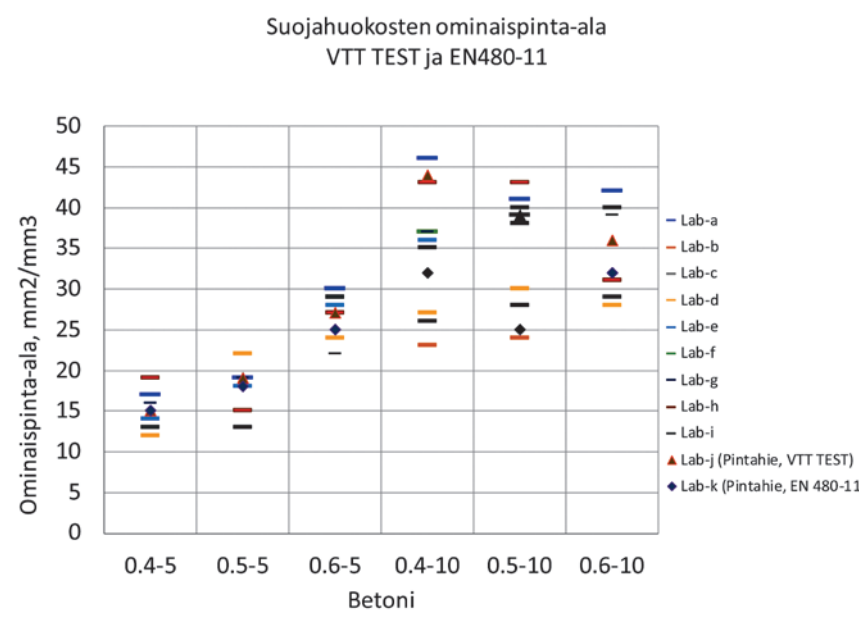
Taulukko 5. Huokosanalyysillä määritetyt suojahuokosten ominaispinta-alat (mm²/mm³).

Taulukko sisältää VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Keskiarvo	15,1	17,9	26,7	35,4	36,5	35,0
Minimi	12	13	22	23	24	28
Maksimi	19	22	30	46	43	42
Keskihajonta	2,4	3,0	2,8	7,9	6,7	5,7
Lukumäärä	7	7	7	10	10	7
Variaatiokerroin	16 %	17 %	11 %	22 %	18 %	16 %

Kuva 4. Huokosanalyysillä määritetyt suojahuokosten ominaispinta-alat (mm²/mm³).

Lab-a...i ovat VTT TEST mukaisesti tehtyjä ohuthieanalyysseja. Pintahieet on tehty joko VTT TEST:in (Lab-j) tai standardin EN480-11 (Lab-k) mukaisesti.



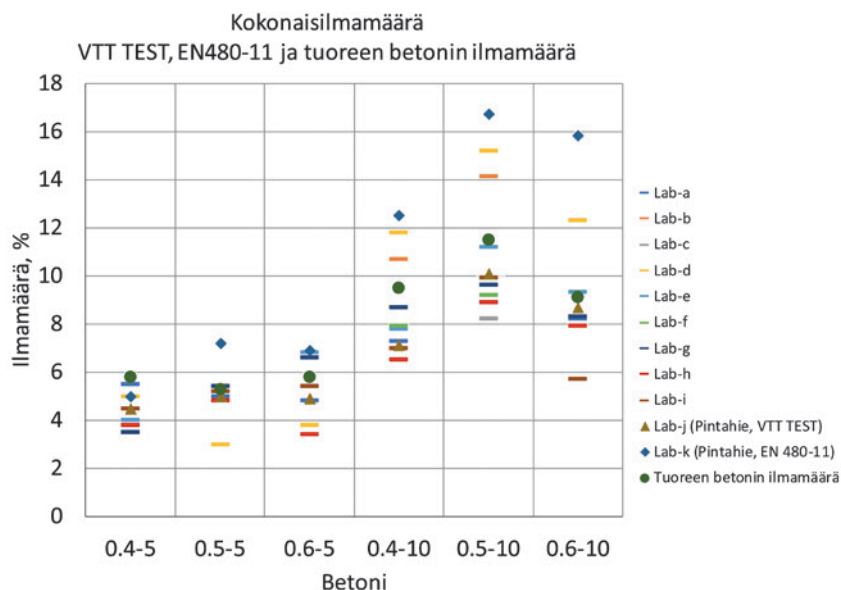
Taulukko 6. Huokosanalyysilla määritetyt testibetonien kokonaisilmamäärät.

Taulukko sisältää VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Keskiarvo	4,4	4,7	5,1	8,2	10,6	8,6
Minimi	3,5	3,0	3,4	6,5	8,2	5,7
Maksimi	5,5	5,4	6,8	11,8	15,2	12,3
Keskihajonta	0,70	0,80	1,29	1,75	2,28	1,97
Lukumäärä	7	7	7	10	10	7
Variaatiokerroin	16 %	17 %	25 %	21 %	21 %	23 %

Kuva 5. Testibetonien kokonaisilmamäärät.

Lab-a...i ovat VTT TEST mukaisesti tehtyjä ohuthieanalyysieja. Pintahieet on tehty joko VTT TEST:in (Lab-j) tai standardin EN480-11 (Lab-k) mukaisesti. Vertailuna on esitetty myös tuoreen betonin ilmamäärä.



Kokonaisilmamäärä

Kuten jo aikaisemminkin todettiin, VTT TEST-menetelmää ei ole tarkoitettu kovetuneen ilmamäärän arvioimiseen. Kuitenkin menetelmää on käytetty yleisesti kyseiseen tarkoitukseen ja siten tässäkin yhteydessä analysoitiin myös kokonaisilmamäärä. Taulukossa 6 on esitetty testibetonien kokonaisilmamäärät. Kuvassa 5 on esitetty kaikki tulokset graafisesti. Kuvassa on myös vertailuna myös tuoreen betonin ilmamäärä.

VTT TEST:in mukaisissa analyyseissa kokonaisilmamäärän keskihajonta oli normaaleilla ilmamäärillä noin 1%-yks. ja suuremmilla ilmamäärillä noin 2%-yksikköä. Standardin SFS-EN 480-11 mukainen pintahieanalyysi näyttäisi antavan hieman korkeampia ilmamääriä kuin VTT TEST:in mukaiset analyyssit.

Kuvassa 6 on esitetty huokosanalyysilla (VTT TEST) määritetty kokonaisilmamäärä suhteessa tuoreen betonin ilmamäärään. Keskimäärin huokosanalyysi antaa hyvin saman tasoisia arvoja verrattuna tuoreen betonin ilmamäärään, mutta ongelmana on huokosanalyysitulosten suuri hajonta erityisesti suuremmilla ilmamäärillä.

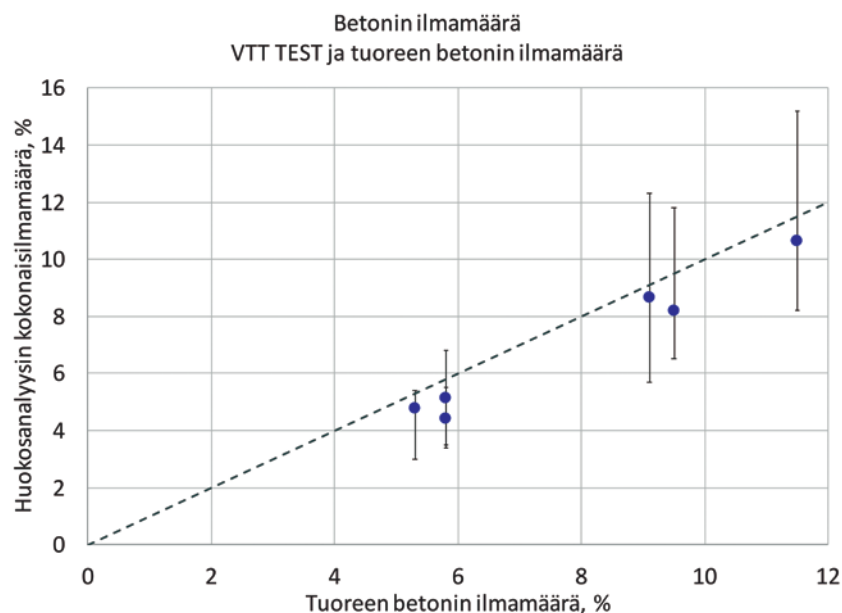
Suoja- ja tiivistyshuokosten tilavuusosuudet

VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisessa analyysissa erotellaan suoja- ja tiivistyshuokokset. Suojahuokosiksi lasketaan huokokset, joiden halkaisija < 0,8 mm. Jako perustuu pelkästään huokosten kokoon, ei esimerkiksi huokosten syntymekanismiin. Suoja- ja tiivistyshuokosten tilavuusosuudet on esitetty taulukoissa 7 ja 8.

Taulukosta 8 voidaan havaita huomattavaa hajontaa tiivistyshuokosten tilavuusosuuksissa eri laboratorioiden kesken. Samoin betoneilla 0.4-5, 0.5-5 ja 0.6-5 tiivistyshuokosten osuus on suuri, yli 50% kokonaisilmamäärästä.

Kuva 6. Huokosanalyysillä määritetty kokonaisilmamäärä suhteessa tuoreen betonin ilmamäärään.

Kuva sisältää VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset. Huokosanalyysien osalta on esitetty keskimääräiset tulokset sekä vaihteluvälit.



Tulosten analysointia

Osin tarkoituksellisesti, osin sattumalta, testisarja koostui pääosin betoneista, joiden suoja-huokostus ei ollut aivan tyypillinen. Kahdella betonilla huokostus oli huono, yhdellä normaali ja kolmen betonin ilmamäärä oli normaalitasoa korkeampi. Testisarjan avulla pystytään siten arvioimaan huokosanalyysien toimintaa varsin laajalla alueella. Toisaalta olisi ollut hyödyllistä, jos normaalitasoisia huokostuksia olisi ollut useampia.

Huokosanalyysillä pystyttiin erottelemaan hyvin testisarjan betonien eritasoiset huokostukset. Huokosanalyysin vahvuus tuleekin hyvin esille betonien 0.4-5 ja 0.5-5 kohdalla. Kyseisten betonien suoja-huokostus epäonnistui. Tätä epäonnistumista ei kuitenkaan havaittu tuoreen betonin ilmamäärässä. Epäonnistuminen havaitaan kuitenkin selkeästi huokosanalyysissa. On toki myös muistettava, että betonien 0.4-5 ja 0.5-5 todellisesta pakka-senkestävyydestä meillä ei ole tietoa.

Huokosanalyysien selkeänä ongelmana on tulosten verrattain suuri hajonta. Tämä tekee numeraalisten raja-arvojen asettamisen haasteelliseksi. Tässä testisarjassa tulosten hajonta sisältää sekä huokosanalyysin sekä myös itse betonin sisältämän hajonnan. Tämä kuitenkin vastaa normaalia tilannetta, jossa tutkitaan olemassa olevaa rakennetta.

Olettaen huokosjaon keskihajonnaksi 0,03 mm, puhtaasti tilastollisesti arvioiden yksittäiset mittaustulokset voivat 80%:n luotettavuus-tasolla vaihdella noin $\pm 0,038$ mm todellisesta arvosta. Siten betonista, jonka keskimääräinen huokosjako olisi 0,27 mm, voidaan saada yksittäisiä mittaustuloksia alueella 0,23...0,31 mm. Ilmamäärässä vastaava vaihteluväli on normaaleilla ilmamäärillä noin $\pm 1,5\%$ -yks. ja suuremmilla ilmamäärillä noin $\pm 2,5\%$ -yksiköä. Tekemällä useampia rinnakkaisia testejä hajonnan vaikutusta voidaan pienentää.

Pintahieanalyysien määrä testisarjassa oli liian pieni, jotta voitaisiin arvioida pintahieanalyysin tarkkuutta suhteessa ohuthieanalyysiin.

Taulukko 7. Huokosanalyysillä määritetyt testibetonien suoja-huokosten tilavuusosuudet (%).

Taulukko sisältää VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Keskiarvo	1,8	1,9	2,4	7,3	9,2	7,4
Minimi	1,3	1,3	1,7	5,6	8,0	4,6
Maksimi	2,7	2,4	3,2	10,9	12,3	9,8
Keskihajonta	0,47	0,42	0,53	1,61	1,20	1,82
Lukumäärä	7	7	7	10	10	7
Variaatiokerroin	26 %	22 %	22 %	22 %	13 %	25 %

Taulukko 8. Huokosanalyysillä määritetyt testibetonien tiivistyshuokosten tilavuusosuudet (%).

Taulukko sisältää VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän mukaisesti tehtyjen analyysien tulokset.

	BETONI					
	0.4-5	0.5-5	0.6-5	0.4-10	0.5-10	0.6-10
Keskiarvo	2,6	2,8	2,7	0,9	1,5	1,2
Minimi	1,8	1,4	1,2	0,2	0,1	0,1
Maksimi	3,9	3,5	4,9	2,2	4,6	4,7
Keskihajonta	0,64	0,69	1,34	0,75	1,49	1,73
Lukumäärä	7	7	7	10	10	7
Variaatiokerroin	25 %	25 %	49 %	83 %	101 %	140 %

Lisäksi pintahieanalyysit tehtiin noudattaen kahta eri testausmenetelmää. Standardin SFS-EN 480-11 mukaisesti tehty analyysi vaikuttaisi antavat hieman erilaisia tuloksia kuin VTT TEST-R003-00-2010 menetelmän tehdyt analyysit. Menetelmien erojen tarkempi arviointi edellyttäisi kuitenkin enemmän testejä molemmilla menetelmillä.

Suositukses

Menetelmien hajonnasta johtuen numeraalisten raja-arvojen käyttö betonin suojahuokostuksen laadunarvioinnissa aiheuttaa ongelmia. Numeraalisten raja-arvojen sijaan betonit voitaisiin erotella neljään luokkaan suojahuokostuksen laadun perusteella:

- I Ei suojahuokostusta
- II Huono suojahuokostus, korkea huokosjako
- III Normaali suojahuokostus
- IV Vaahtomainen betoni, alhainen huokosjako, korkea ilmamäärä

Luokan valinta olisi subjektiivista, mutta se perustuisi huokosanalyysin tuloksiin (huokosjako, ominaispinta-ala, suojahuokosten määrä sekä visuaalinen arviointi). Luokan valintaan tarvittaisiin ohjeistus ja laboratorio tarvitsisi tiedon betonin rasitusluokasta sekä suunnittelukäyttöästä. Mikäli betonin suojahuokostus todettaisiin huonoksi (II), tarvittaisiin lisäselvityksiä liittyen betonin pakkasenkestävyyteen (huokosanalyysit tai suorat pakkaskokeet). Vastaavasti vaahtomaisella betonilla (IV), tarvittaisiin lisäselvityksiä liittyen betonin puristuslujuuteen. Nykyisellään myös alhaisiin huokosjakoihin liittyy riskejä. Käytännössä alhainen huokosjako tarkoittaa usein korkeaa ilmamäärää ja sitä kautta alhaisempaa lujuustasoa.

Tässä testisarjassa tutkitut betonit olisivat olleet luokissa II – IV, kaksi betonia luokassa II, yksi betoni luokassa III ja kolme betonia luokassa IV. Kaikista testauksista (54 kpl) ehkä

yksi tai kaksi mittaustulosta olisi voitu arvioida väärin yllä esitetyllä luokituksella.

Kovettuneen betonin ilmamäärän arviointiin huokosanalyysijä tulee käyttää erittäin harkiten. VTT TEST:in osalta tiedetään, että menetelmä soveltuu siihen huonosti, mutta kuitenkin arvioita tehdään. Huokosanalyysin raporttiin tulisi selkeämmin kirjata, että betonin ilmamäärä on vain viitteellinen ja tulosta ei tule käyttää kovettuneen betonin ilmamäärän arviointiin. Ainoastaan kun tehdään useita rinnakkaisia testauksia, kokonaisilmamäärä luotettavuus voi olla riittävän hyvä. Tällöinkin tulisi antaa arvio ilmamäärän vaihtelutasosta.

Harkittavaksi jää kannattaako ylipäänsä raportoida tiivistyshuokosten tilavuusosuuksia. Tuloksissa on niin paljon hajontaa, että tietoja ei voida pitää luotettavina. Runsaaasti hajontaa sisältävät tulokset voivat helposti johtaa väärin johtopäätöksiin.

Pintahieanalyysissa menetelmien VTT TEST-R003-00-2010 ja SFS-EN 480-11 välisiä eroja tulisi tutkia lisää. Tällä hetkellä Betoninormit BY65 antavat huokosjaolle samat raja-arvot molemmilla menetelmillä. Tämän testisarjan perusteella voitaisiin arvioida, että tuloksissa voi olla merkittävää eroa.

Hyödyllistä olisi selvittää myös itse huokosanalyysin hajontaa. Tässä koesarjassa hajonta sisältää sekä huokosanalyysin että betonin sisäisen hajonnan. Huokosanalyysien hajontaa voidaan selvittää kierrättämällä ohut-/pintahieitä laboratorioden kesken.

Comparison tests for thin section and polished slab analyses

Aalto University organised comparison test series for thin section and polished slab analyses of concrete pore structure. Totally nine Finnish laboratories participated in the test series. All of them carried out the thin section analysis according to VTT TEST R003-00-2010. In addition, two laboratories made polished slab analyses, one using VTT TEST method and another using the standard EN480-11.

Six different concretes were tested, the water-cement ratios were 0.4, 0.5 or 0.6 and the target air contents were 5% or 10%. Air-entraining of two test concretes was poor and therefore the protective pore structure was worse compared with the level needed for the frost resistance concrete in Finland.

The average spacing factors varied between 0.08 and 0.53 mm, the standard deviations were in the area of 0.02...0.03 mm except with the concretes with poor air-entraining. Thin section analysis is commonly used for estimating the total air content of hardened concrete even though the method VTT TEST is not suitable for the task. On the average the thin section analysis gave rather similar air content compared with the air content of fresh concrete, but the variation was large.

Thin section and polished slab analyses are effective tool for analysing the quality of the pore structure. However, large variation of the test results makes setting the numerical limit values challenging. Therefore, a category based classification is proposed. Also, thin section analysis should not be used for determination of air content of hardened concrete. Standard EN480-11 appears to give smaller values for the spacing factors and larger values for the total air concrete. The differences between EN480-11 and VTT TEST are needed to further investigate.