

# Diplomityö Aalto-yliopistossa Kovettuneen betonin ilmamäärän määrittäminen

---

## Mohammad Hossein Ramadan

Betonitekniikka  
Aalto-yliopisto  
ramadan.mdo@gmail.com

## Fahim Al-Neshawy

Staff Scientist, Betonitekniikka  
Aalto-yliopisto  
fahim.al-neshawy@aalto.fi

## Jouni Punkki

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

Betonin ilmamäärä yhdessä vesi-sementti-suhteen kanssa määräävät pitkälti betonin pakkaskestävyyden. Betonin vähimmäisilmamäärälle onkin jo pitkään asetettu vaatimuksia, mutta korkeisiin ilmamääriin on kiinnitetty vähemmän huomiota. Vuonna 2016 tilanne kuitenkin muuttui, kun valmistuneista tai työn alla olevista betonirakenteista mitattiin vaatimustasoja alhaisempia puristuslujuuksia. Lujuuslitusten havaittiin johtuvan betonin kohonneista ilmamääristä. Korkeimmillaan mitattiin jopa 15%:n ilmamääriä ja siten lujuusalenemat olivat huomattavia. Tunnetusti 1%-yksikkö ilmamäärässä vastaa 3...5%:a betonin puristuslujuudessa. Samalla syntyi myös tarve määrittää kovettuneen betonin ilmamäärä. Tähän tarkoitukseen ei kuitenkaan ole tarjolla standardoituja menetelmiä.

Aalto-yliopistossa on tehty diplomityö, jossa on määritetty tuoreen ja kovettuneen betonin ilmamäärää eri testimenetelmillä. Työn on tehnyt Mohammad Hossein Ramadan. Työn tavoitteena oli arvioida eri testimenetelmien toimivuutta kovettuneen betonin ilmamäärän mittaamiseen. Koska betonin todellista ilmamäärää ei voida tietää, eri menetelmien oikeellisuutta ei voida arvioida. Normaalisti betonin ilmamäärä määritetään tuoreesta betonista painekokeella (SFS-EN 12350-7). Tätä pidettiin referenssitasona tutkimuksessa. Diplomityössä mitattiin kovettuneen betonin ilmamäärä seuraavilla menetelmillä:

- laskennallinen menetelmä (perustuen betonin mitattuun tiheyteen)
- painekyllästys
- ilmahuokosanalyysi ohuthieestä.

## Koejärjestelyt

Koesarja koostui yhteensä yhdeksästä eri testibetonista. Sideaineena kaikissa betoneissa oli Finnsementti Oy:n valmistama Plussementti (CEM II/B-M (S-LL) 42, 5 N). Testibetonien vesi-sementtisuhteet olivat 0,4, 0,5 tai 0,6 ja tavoiteilmamäärät 2%, 5% tai 10%. Testibetonit on yksilöity tyyliin "0,4-2", jossa ensimmäinen luku kertoo vesi-sementtisuhteen ja toinen tavoiteilmamäärän. Betonien sekoitus aika oli viisi minuuttia, jonka jälkeen tuoreen betonin ominaisuudet (notkeus, tiheys ja ilmamäärä) määritettiin. Betonin koostumukset on esitetty taulukossa 1 ja tuoreen betonin ominaisuudet taulukossa 2.

Koebetoneista valmistettiin koerakenteet, joiden koko oli 500×500×150 mm<sup>3</sup>. Kaikkien testibetonien kohdalla noudatettiin samaa valu- ja tiivistystapaa. Betonit tiivistettiin Wacker Neusonin tärysauvalla, jonka halkaisija oli 25 mm. Tärytysajan suhteen noudatettiin samaa tärytysaika (s/m<sup>3</sup>), mitä käytettiin myös tuoreen betonin ilmamäärän mittaamisen yhteydessä. Kahdeksan litran ilmamäärän mitausastiaa tärytettiin yhteensä 18 sekuntia ja tilavuudeltaan 37,5 dm<sup>3</sup> kokoista koemuottia tärytettiin yhteensä 84 sekuntia. Koemuotti valettiin neljässä 125 mm:n kerroksessa ja kussakin kerroksessa betonia tärytettiin kolmesta

kohtaa seitsemän sekunnin ajan. Kokonaisu-tärytysajaksi näin ollen sekä koemuotin että ilmamääräastian osalta muodostui 2250 s/m<sup>3</sup>. Edellä mainittu tärytysaika on huomattavan suuri verrattuna normaaleihin tiivistysaikoihin. On kuitenkin huomattava, että koerakenteen tiivistys tehtiin selkeästi alitehoisella tärysausvalla. Pienitehoisen tärytysauvan ja pitkän tärytysajan yhdistelmällä pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman homogeeninen huokosrakenne.

Koerakenteista porattiin yhteensä 16 testilieriötä (Ø = 98 mm, l = 150 mm). Poraamisen jälkeen testilieriöt säilytettiin vedessä (20 ± 2 °C).

## Testit kovettuneelle betonille

### Kovettuneen betonin tiheys

Kovettuneen betonin tiheys määritettiin standardin SFS-EN 12390-7:2009 mukaisesti. Koelieriöt jaettiin jatkotesteihin mitattujen tiheyksien perusteella. Esimerkiksi ohuthieanalyysiin valittiin näytteet kahdesta keskimmaisesta vaakarivistä ja niistä edelleen valittiin viisi lieriötä, joiden tiheydet olivat mahdollisimman lähellä koerakenteen keskimääräistä tiheyttä. Esimerkki yhden koerakenteen tiheysmittauksista on esitetty kuvassa 3. Kunkin koelieriön tiheysero verrattuna tuoreen betonin tiheyteen on esitetty numeroarvona sekä värikartana. Värikartan skaalaus (tiheysero, kg/m<sup>3</sup>) on esitetty kuvan oikeassa reunassa. Tummempi väri kertoo koerakenteen alhaisemmasta tiheydestä

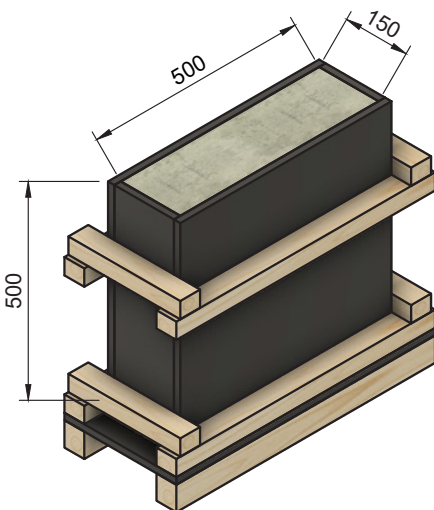
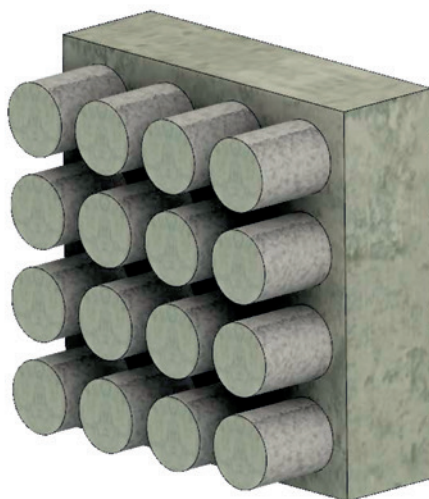
Betonin osa-aineet [kg/m<sup>3</sup>]

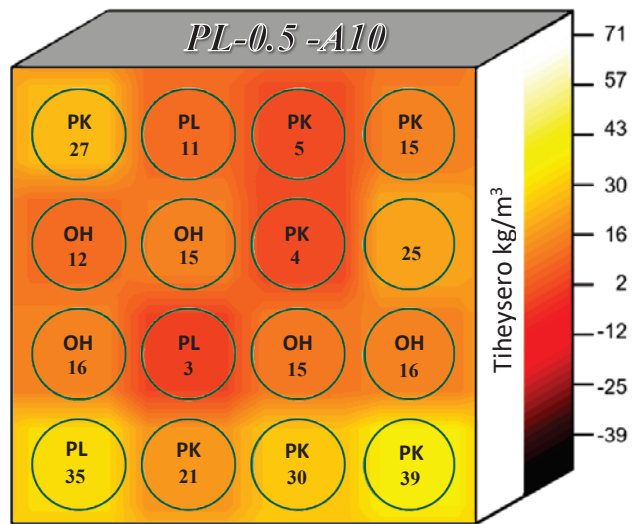
| Betoni | Sementti | Vesi | Kiviaines | Teho-<br>notkistin | Huo-<br>kostin |
|--------|----------|------|-----------|--------------------|----------------|
| 0,4-2  | 400      | 160  | 1838      | 4,80               | 0,000          |
| 0,5-2  | 320      | 160  | 1910      | 2,88               | 0,000          |
| 0,6-2  | 300      | 180  | 1877      | 1,80               | 0,000          |
| 0,4-5  | 400      | 160  | 1760      | 3,60               | 0,016          |
| 0,5-5  | 320      | 160  | 1835      | 1,92               | 0,011          |
| 0,6-5  | 300      | 180  | 1800      | 0,37               | 0,009          |
| 0,4-10 | 400      | 160  | 1631      | 2,00               | 0,200          |
| 0,5-10 | 320      | 160  | 1704      | 0,16               | 0,160          |
| 0,6-10 | 300      | 180  | 1667      | 0,00               | 0,162          |

**Taulukko 1** Testibetonien koostumukset.

Tuoreen betonin ominaisuudet

| Betoni | Painuma<br>[mm] | Ilmamäärä,<br>Painemene-<br>telmä [%] | Tiheys<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Ilmamäärä,<br>Laskennallinen<br>menetelmä [%] |
|--------|-----------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| 0,4-2  | 185             | 2,3                                   | 2392                           | 2,4   |
| 0,5-2  | 155             | 2,1                                   | 2401                           | 1,7   |
| 0,6-2  | 165             | 3,9                                   | 2315                           | 3,9   |
| 0,4-5  | 155             | 5,8                                   | 2305                           | 5,8   |
| 0,5-5  | 165             | 5,3                                   | 2293                           | 5,9   |
| 0,6-5  | 185             | 5,8                                   | 2246                           | 6,4   |
| 0,4-10 | 140             | 9,5                                   | 2199                           | 9,7   |
| 0,5-10 | 165             | 11,5                                  | 2132                           | 12,2  |
| 0,6-10 | 225             | 9,1                                   | 2163                           | 9,3   |

**Taulukko 2** Tuoreen betonin testitulokset.

**1** Havainnekuva koerakenteen muotista.

**2** Porakappaleiden porauspaikat koerakenteessa.



ja vaaleampi väri vastaavasti korkeammasta tiheydestä. Käytännössä korkeampi tiheys voi johtua alhaisemmasta betonin ilmamäärästä tai betonin erottumisesta. Kuvassa 3 on esitetty myös, mitkä testilieriöt käytettiin eri testeihin. Valinta vaihteli hieman betonien välillä riippuen tiheystuloksista. Tavoitteena oli käyttää tiheydeltään mahdollisimman samanlaisia koekappaleita eri testeihin.

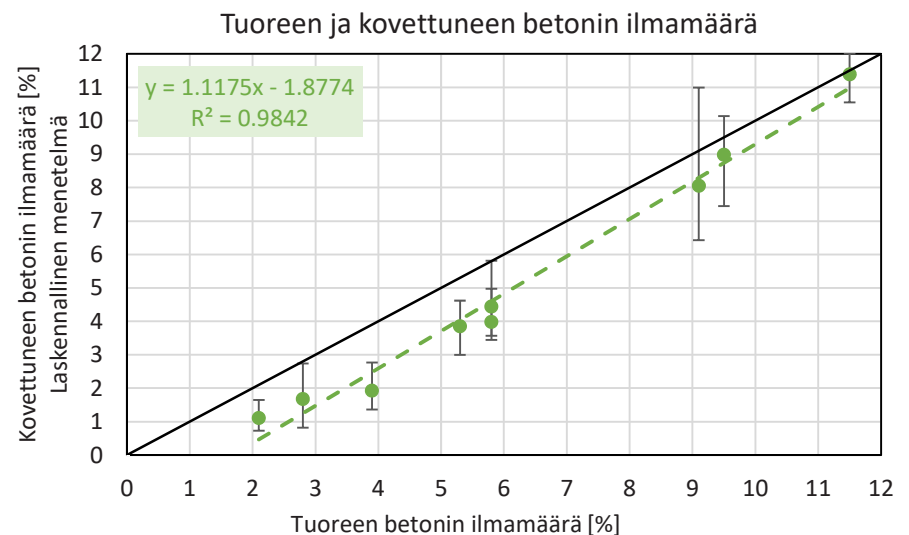
**Laskennallinen menetelmä**

“Laskennallinen menetelmä” tarkoittaa tässä yhteydessä ilmamäärän laskennallista määrittämistä betonin mitatun tiheyden avulla. Määrittely voidaan tehdä niin tuoreelle kuin kovettuneellekin betonille. Betonin tiheys reagoi herkästi ilmamäärän muutoksiin betonissa, yhden 1%-yksikön muutos betonin ilmamäärässä vaikuttaa noin 24 kg/m³ betonin tiheyteen. Laskennallisen menetelmän käyttö kuitenkin edellyttää, että betonin teoreettinen (suhteutuksen mukainen) tiheys tunnetaan, eikä betoni saa olla erottunutta. Kovettuneen betonin osalta huomiota on kiinnitettävä myös betonin kosteustilaan. Jotta tiheys olisi vertailukelpoinen suhteutuksen mukaisen tai tuoreen betonin tiheyden kanssa, betonin tulisi olla vedellä kyllästynyt.

Kuvassa 4 on vertailtu kovettuneen betonin laskennallista ilmamäärää tuoreen betonin ilmamäärään. Tuoreen betonin ilmamäärä mitattiin normaalilla painekokeella, kun taas kovettuneen betonin ilmamäärä määritettiin koerakenteesta porattujen 16 koekappaleiden tiheystuloksista. Menetelmiä vertailtaessa on huomattava, että menetelmät eivät mittaa aivan samaa asiaa. Betonin ilmamäärä voi jossain määrin muuttua betonin tiivistyksen aikana ja siten tuoreen ja kovettuneen betonin ilmamäärät eivät välttämättä ole samat.

Kokeissa laskennallisesti määritetty kovettuneen betonin ilmamäärä oli kautta linjan hieman (1...2%-yksikköä) alhaisempi kuin vastaava tuoreen betonin ilmamäärä. Mittaustu-

3 Kovettuneen ja tuoreen betonin tiheysero, jonka yksikkö on kg/m³. Poraliieriöiden nimet ovat nimetty kuvassa testimenetelmien mukaan (PK = painekyllästystesti, OH = ohuthieanalyysi ja PL = puristuslujuustesti).

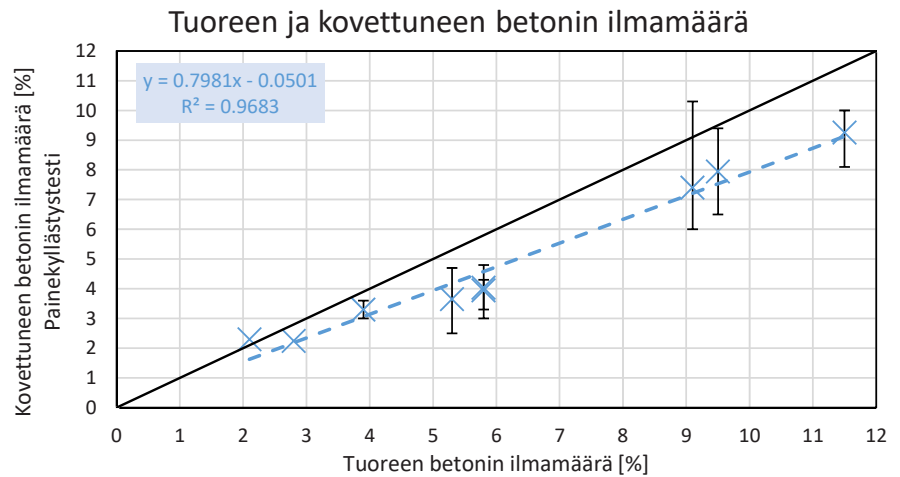


4 Laskennallisella menetelmällä määritetyn kovettuneen betonin ilmamäärään riippuvuus tuoreen betonin ilmamäärästä. Laskennallinen menetelmä perustuu betonin mitattuun tiheyteen.

| Kovettuneen betonin ilmamäärä [%] |              |             |            |               |                   |
|-----------------------------------|--------------|-------------|------------|---------------|-------------------|
| Laskennallinen menetelmä          |              |             |            |               |                   |
| Betoni                            | Maksimi-arvo | Minimi-arvo | Keski-arvo | Keskiahajonta | Variaatio-kerroin |
| 0,4-2                             | 2,7          | 0,8         | 1,7        | 0,5           | 31%               |
| 0,5-2                             | 1,6          | 0,7         | 1,1        | 0,3           | 24%               |
| 0,6-2                             | 2,8          | 1,4         | 1,9        | 0,5           | 24%               |
| 0,4-5                             | 5,0          | 3,4         | 4,0        | 0,5           | 12%               |
| 0,5-5                             | 4,6          | 3,0         | 3,9        | 0,5           | 13%               |
| 0,6-5                             | 5,8          | 3,6         | 4,4        | 0,6           | 15%               |
| 0,4-10                            | 10,1         | 7,4         | 9,0        | 0,8           | 9%                |
| 0,5-10                            | 12,0         | 10,5        | 11,4       | 0,4           | 4%                |
| 0,6-10                            | 11,0         | 6,4         | 8,1        | 1,4           | 17%               |

**Taulukko 3** Kovettuneen betonin ilmamäärä tiheyden avulla laskettuna (laskennallinen menetelmä).

5 Paineekyllästystestillä määritetyn kovettuneen betonin ilmamäärään riippuvuus tuoreen betonin ilmamäärästä.



lostojen hajonta oli varsin pientä. Keskihajonta oli yleensä noin 0,5%, mutta korkeammilla ilmamäärillä hajonta kasvoi hieman suuremmaksi. Vesi-sementtisuhteen tasolla ei havaittu olevan vaikutusta eroon menetelmien välillä tai tulosten hajontaan.

Koska kovettuneen betonin todellista ilmamäärää ei voida tietää, on edellä esitetty laskennallinen ilmamäärä hyvä vertailukohta muille testimenetelmille tuoreen betonin ilmamäärän ohella. Menetelmä on kuitenkin toimiva lähinnä vain laboratorio-olosuhteissa, koska betonin suhteutuksen mukainen tiheys tulee olla tunnettu ja lisäksi betoni ei saa olla erotunutta. Myös betonin osa-ainesten tiheydet on tunnettava tarkkaan.

### Paineekyllästystesti

Vanha suomalainen testimenetelmä (SFS-4475:1988) hyödynsi painekyllästystä betonin suojahuokossuhteen määrittämisessä. Standardi poistettiin kuitenkin käytöstä vuonna 2009 johtuen lähinnä menetelmän antamista virheellisistä tuloksista tiiviimmillä betonilaaduilla. Menetelmässä käytettiin normaaleja testilieriöitä ja niiden suuren koon vuoksi betonia ei saatu täysin kyllästettyä testin aikana, ja tästä aiheutui virheellisiä koetuloksia. Menetelmä on kuitenkin edelleen käyttökelpoinen, kunhan koekappaleet ovat riittävän pieniä niin, että betonin voidaan saada täysin kyllästettyä paineen avulla.

Testeissä käytettiin poralieriöistä sahattuja koekappaleita ( $\varnothing = 98$  mm,  $h = 20$  mm). Koe aloitettiin 28 vuorokauden iässä ja koekappaleet esikuivattiin 105 °C lämpötilassa. Kuivatuksen jälkeen koekappaleet kyllästettiin vedellä normaalipaineessa testiproseduurin mukaisesti. Olettamuksena on, että kyllästyksen jälkeen geeli- ja kapillaarihuokokset ovat vedellä täyttyneitä, mutta ilmahuokokset eivät täyty vedellä. Lopuksi koekappaleet painekyllästettiin paineastiassa 15 MPa:n paineessa 24 tunnin ajan. Paineekyllästyksen tarkoituksena on täyttää

myös ilmahuokokset vedellä. Mittaamalla koekappaleiden tiheyksiä kokeen eri vaiheissa saadaan määritettyä betonin kokonaishuokoisuus, geeli- ja kapillaarihuokoisuus sekä ilmahuokoisuus. Näistä juuri ilmahuokoisuus kuvaa kovettuneen betonin ilmamäärää.

Kuten kuvasta 5 voidaan havaita, painekyllästystesti antaa hieman alhaisempia ilmamäärän arvoja verrattuna tuoreen betonin ilmamäärään. Normaaleilla ilmamäärillä (4...6%) poikkeama oli noin 1%-yksikköä ja korkeilla ilmamäärillä (n. 10%) poikkeama oli luokkaa 2%-yksikköä. Vastaavasti myös laskennallinen menetelmä antoi kovettuneen betonin ilmamäärälle alhaisempia arvoja verrattuna tuoreen betonin ilmamäärään (kuva 4). Kuvassa 7 on vertailtu kovettuneen betonin ilmamäärän mittaamenetelmiä keskenään. Eri menetelmät antava keskimäärän hyvin saman kaltaisia tuloksia, sillä poikkeamat näissä ovat tyypillisesti alle  $\pm 1\%$ -yksikköä.

Paineekyllästystestin yksittäisten testitulosten väliset hajonnat ovat varsin kohtuulliset, tavanomaisilla ilmamäärillä keskihajonnat olivat välillä 0,4...0,7%. Ilmamäärän kasvaessa myös hajonnat kasvoivat. Koetulosten hajonan vuoksi kokeet tulee tehdä vähintään kolmella, mielellään kuudella rinnakkaisella koekappaleella ( $\varnothing = n. 100$  mm,  $h = 20$  mm).

### Ohuthieanalyysi

Ohuthieanalyysi on tarkoitettu lähinnä ilmahuokosten laatuparametrien (esim. huokosjaon) arviointiin, mutta menetelmää on käytetty viime aikoina myös kovettuneen betonin ilmamäärän määrittämiseen. Tähän tarkoitukseen Suomessa käytössä olevan testiproseduurin (VTT TEST R003-00-2010) tiedetään soveltuvan varsin huonosti. Tästäkin huolimatta menetelmää on käytetty, koska muita menetelmiä kovettuneelle betonille ei ole ollut tarjolla. Pintahieanalyysit soveltuisivat paremmin kovettuneen betonin ilmamäärän määrittämiseen.

Aalto-yliopisto järjesti osana tätäkin tutkimusta vertailutestit ilmahuokosanalyysille (ohuthieet ja pintahieet). Vertailutestien tulokset on esitetty kokonaisuudessaan Betoni-lehdessä 3/2018. Vertailutestihin osallistui yhdeksän testilaboratoriota. Osana vertailutestejä määritettiin myös kovettuneen betonin kokonaisilmamäärä. Tässä diplomityössä hyödynnettiin vain ohuthieanalyysien tuloksia, koska pintahieiden testausmenetelmät poikkeavat ohuthieiden testausmenetelmistä ja eri menetelmillä saadaan eritasoisia tuloksia. Ohuthieanalyysit tehtiin vain huokostetuille betoneille (tavoiteilmamäärä 5% tai 10%). Testien lukumäärä vaihteli betoneittain, mutta jokainen testibetoni analysoitiin vähintään kuudessa eri testauslaboratoriossa.

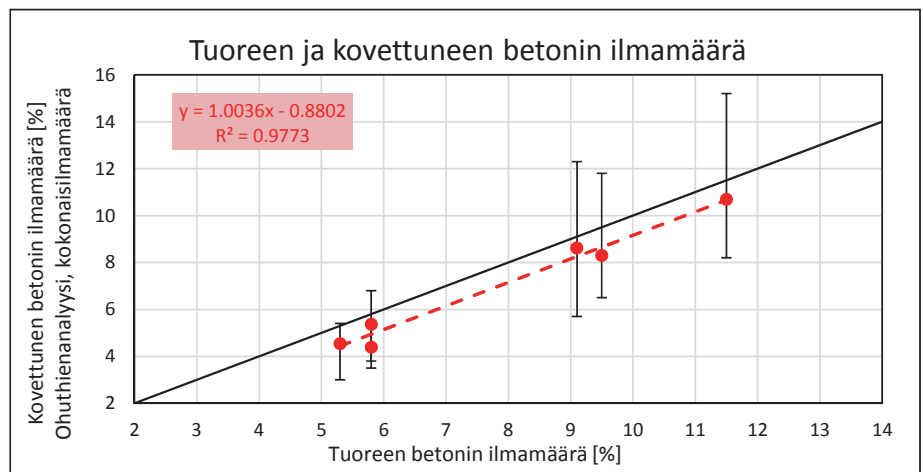
Kuvassa 6 on esitetty ohuthieanalyysilla määritetty kovettuneen betonin ilmamäärä suhteessa tuoreen betonin ilmamäärään. Kuten kuvasta havaitaan, ohuthieanalyysi antaa keskimäärin hyvin saman tasoisia ilmamääriä verrattuna tuoreen betonin ilmamäärään. Arvot ovat hieman tuoreen betonin ilmamääriä pienempiä ja poikkeama on yleensä alle 1%-yksikköä. Menetelmän selkeänä heikkoutena on kuitenkin tulosten suuri hajonta. Suurimmillaan tulosten keskihajonta oli 2,4% ja yksittäiset mittaustulokset vaihtelivat suurimmillaan 7%-yksikköä (esim. 8,2...15,2%). On myös huomattava, että kyseessä on laboratoriodien välinen hajonta ja yksittäinen testitulos on jo vähintään kahden kokeen keskiarvo. Näin suuri hajonta tekee menetelmästä epäluotettavan kovettuneen betonin ilmamäärän arvioimiseen. Erityisesti korkeammilla ilmamäärillä testituloksia tarvittaisiin vähintään 3 kappaletta, jotta betonin ilmamäärä voitaisiin arvioida luotettavasti. Edellä mainitut kriteerit pätevät nimenomaan ohuthieellä määritetyille kokonaisilmamäärälle, muiden huokosparametrien luotettavuutta ei tässä arvioida.

| Kovettuneen betonin ilmamäärä [%]<br>Paineekyllästystesti |              |             |            |               |                          |                  |
|---|--------------|-------------|------------|---------------|--------------------------|------------------|
| Betoni  | Maksimi-arvo | Minimi-arvo | Keski-arvo | Keski-hajonta | Koekappaleiden lukumäärä | Variaatiokerroin |
| 0,4-2   | 2,3          | 2,2         | 2,3        | 0,1           | 2                        | 3%               |
| 0,5-2   | 2,3          | 2,3         | 2,3        | 0,0           | 2                        | 0%               |
| 0,6-2   | 3,6          | 3,0         | 3,3        | 0,4           | 2                        | 13%              |
| 0,4-5   | 4,3          | 3,3         | 3,9        | 0,4           | 9                        | 9%               |
| 0,5-5   | 4,7          | 2,5         | 3,7        | 0,7           | 10                       | 19%              |
| 0,6-5   | 4,8          | 3,0         | 4,0        | 0,7           | 8                        | 16%              |
| 0,4-10  | 9,4          | 6,5         | 7,9        | 1,1           | 7                        | 14%              |
| 0,5-10  | 10,0         | 8,1         | 9,3        | 0,6           | 7                        | 7%               |
| 0,6-10  | 10,3         | 6,0         | 7,4        | 1,2           | 9                        | 17%              |

**Taulukko 4** Kovettuneen betonin ilmamäärä painekyllästystestillä määritettynä. Taulukossa esitetään myös yksittäisten koekappaleiden vaihteluvälit ja hajonnat.

### Koemenetelmien vertailua

Kuvassa 7 esitetään kovettuneen betonin ilmamäärä eri testimenetelmillä määritettyinä. Vertailuarvona (x-akseli) on kovettuneen betonin laskennallinen ilmamäärä ja y-akselilla koetulokset painekyllästystestillä sekä ohuthieanalyysillä. Kuten havaitaan, menetelmät antavat hyvin saman tasoisia ilmamääriä. Suurimmat poikkeamat nähdään huokostamattomilla betoneilla sekä korkeilla ilmamäärillä. Tavanomaisilla huokostetun betonin ilmamäärillä kaikki menetelmät antavat keskimäärin hyvin samalaisia arvoja. Poikkeamia voivat aiheuttaa myös tutkittujen menetelmien poikkeavat mittaamenetelmät. Esimerkiksi ohuthieanalyysi ei pysty tunnistamaan aivan pienempiä ilmahuokosia. Samoin on mahdollista, että painekyllästystestissä aivan kaikkia ilmahuokosia ei saada pysyvästi kyllästettyä vedellä. Kokonaisuutena kokeet osoittavat, että kovettuneen betonin ilmamäärän mittaaminen on mahdollista, kunhan vain menetelmien hajonnat hallitaan.



**6** Ohuthieanalyysillä määritetyn kovettuneen betonin ilmamäärään riippuvuus tuoreen betonin ilmamäärästä.

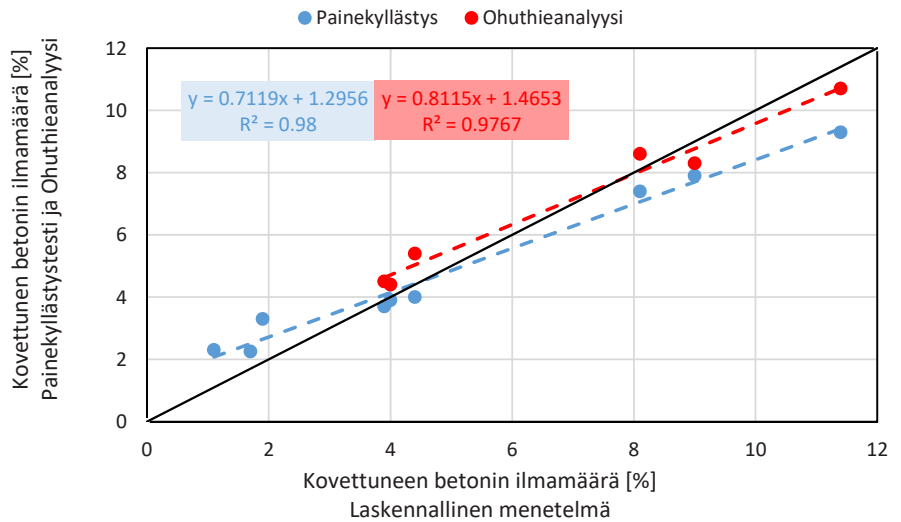
### Johtopäätökset

1. Kovettuneen betonin ilmamäärä voidaan määrittää käyttäen eri menetelmiä. Diplomityössä käytettiin kolmea menetelmää: laskennallisista menetelmää, painekyllästystestiä sekä ohuthieanalyysia. Kaikki menetelmät antoivat hieman alhaisempia ilmamäärän arvoja verrattuna painekokeella määritettyyn tuoreen betonin ilmamäärään. Syynä voi kuitenkin olla myös muutokset betonin ilmamäärässä valun ja tiivistyksen aikana.
2. Laskennallinen menetelmä edellyttää, että betonin teoreettinen (suhteutuksen mukainen) tiheys tunnetaan. Siten mene-

| Kovettuneen betonin ilmamäärä [%]<br>Ohuthieanalyysi, kokonaisilmamäärä |         |        |            |               |           |                  |
|---|---------|--------|------------|---------------|-----------|------------------|
| Betoni  | Maksimi | Minimi | Keski-arvo | Keski-hajonta | Lukumäärä | Variaatiokerroin |
| 0,4-5   | 5,5     | 3,5    | 4,4        | 0,8           | 6         | 17%              |
| 0,5-5   | 5,4     | 3,0    | 4,5        | 0,9           | 6         | 21%              |
| 0,6-5   | 6,8     | 3,8    | 5,4        | 1,2           | 6         | 22%              |
| 0,4-10  | 11,8    | 6,5    | 8,3        | 1,8           | 9         | 22%              |
| 0,5-10  | 15,2    | 8,2    | 10,7       | 2,4           | 9         | 23%              |
| 0,6-10  | 12,3    | 5,7    | 8,6        | 2,2           | 6         | 25%              |

**Taulukko 5** Kovettuneen betonin kokonaisilmamäärä ohuthieanalyysillä (VTT TEST-R003-00-2010) määritettynä. Taulukossa esitetään eri laboratorioiden koetulosten analyysit.

7 Kovettuneen betonin ilmamäärä eri testimenetelmillä määritettynä.



telmä soveltuu käytännössä vain laboratorio-olosuhteisiin tutkittaessa betonia, jonka koostumus tunnetaan tarkkaan. Lisäksi menetelmä on herkkä betonin erottumiselle, erottuneesta betonista voidaan menetelmällä saada selvästi virheellisiä ilmamäärän arvoja.

3. Paineekyllästystesti osoittautui käyttökelpoisimmaksi testimenetelmäksi kovettuneen betonin ilmamäärän määrittämiseen. Testi täytyy tehdä riittävän pienillä koekappaleilla (esim.  $\varnothing = 100$  mm,  $h = 20$  mm) ja rinnakkaisten koekappaleiden lukumäärä on oltava riittävä (mielellään 6 kpl). Testimenetelmä antoi hieman alhaisempia ilmamäärän arvoja verrattuna tuoreen betonin ilmamäärään, mutta hyvin saman tasoisia arvoja verrattuna muihin kovettuneen betonin testimenetelmiin. Koetulosten hajonta on samalla tasolla kuin laskennallisen menetelmän.

4. Testausohjeen VTT TEST R003-00-2010:n mukainen ohuthieanalyysi antoi keskimäärin hyvin saman tasoisia arvoja kovettuneen betonin ilmamäärälle verrattuna muihin käytettyihin testimenetelmiin. Ongelmana on kuitenkin tulosten suuri hajonta, yksittäiset testitulokset voivat vaihdella merkittävästi. Siten menetelmää tulisi käyttää kovettuneen betonin ilmamäärän arvioimiseen ainoastaan, mikäli rinnakkaisia testituloksia on useampia. Yhdellä ohuthieanalyysin tuloksella ei voida luotettavasti arvioida kovettuneen betonin ilmamäärää.

### Abstract

Lately, increased air content has been reported from drilled samples in Finland. Elevated air contents have resulted in inadequate compressive strength in various structures. However, test methods for measuring the air content in hardened concrete are not standardized. The present master's thesis analyses different methods for determination of air content of hardened concrete. The aim of this study was to draw a correlation between the available methods and evaluate the performance of each method compared to the standardized method (air pressure meter for fresh concrete).

The study investigated the performance of three different methods: calculation method based on the measured density, pressure saturation method, and thin section method. Nine different concretes were tested; the water-cement ratios were 0.4, 0.5 or 0.6 and the target air contents were 2%, 5% or 10%.

Based on the analyses, all the investigated test methods can be used for determination of air content of hardened concrete. All the test methods gave slightly smaller air contents compared to the air content of fresh concrete measured using air pressure meter. This may also be possible due to the changes in air content during the casting and compaction. Pressure saturation test is the most potential test method for determination of air concrete of hardened concrete. The calculation method is also useful, but the method requires that the theoretical density of concrete is known and concrete has no segregation. Thin section analysis gave on the average very similar test results compared to the other test methods, but the variation of the test results was high. Therefore, thin section analysis is not recommended for determination of air content of hardened unless there are several parallel test results.



### About the author:

Mohammad Ramadan is a Civil Engineer born in Iran. He acquired a BSc degree in Structural Engineering at the Budapest University of Technology and Economics and a MSc degree at Aalto University relating to Concrete Technology.

Contact Information:  
Email: Ramadan.mho@gmail.com