



Betonin huokostus

Pirjo Tepponen, Semtu Oy

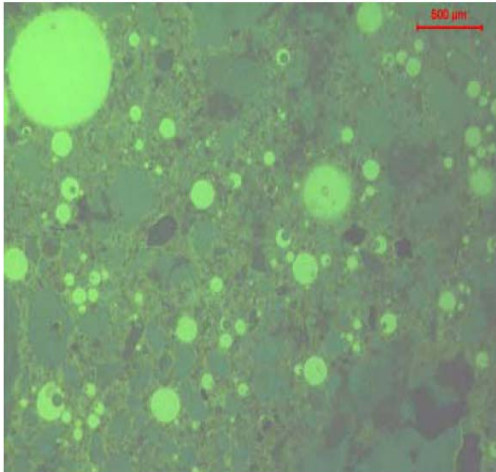
HUOKOSTETUN BETONIN VALMISTUS

Sisällys

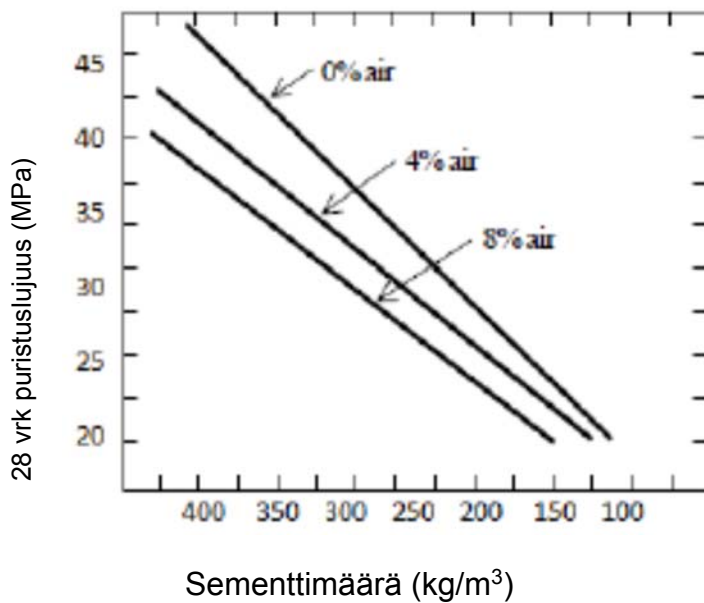
1. Huokostetun betonin valmistus
2. Huokostimien toiminta
3. Huokostetulle betonille asetettavat vaatimukset ja niiden mittausmenetelmät
4. Huokosten muodostumiseen vaikuttavat tekijät
 - 4.1 Sekoitustehokkuus
 - 4.2 Betonin notkeus ja vesimäärä
 - 4.3. Betonin lämpötila
 - 4.4 Huokostimen laatu
 - 4.5 Sementtityyppi
 - 4.6 Huokostimen toiminta notkistimen kanssa
 - 4.6.1 Sementin notkistimet
 - 4.7 Muut lisäaineet
 - 4.8 Betonin seosaineet
 - 4.9 Betonin kiviainekset
 - 4.10 Annosteluajankohta ja -järjestys
 - 4.11 Betonin suhteitus
 - 4.12 Betonin seisonta-aika
 - 4.13 Huokostetun betonin työstäminen
5. Yhteenveto

1. Huokostetun betonin valmistus

Betonirakenteiden pakkasenkestävyyttä parannetaan käyttämällä huokostusaineita betonin valmistuksen yhteydessä. Suomessa huokostimet ovat olleet käytössä vuosikymmeniä - jo 50- luvulla vesivoimaloiden betoneissa käytettiin lisähuokostusta. Varsinainen käyttö alkoi kuitenkin 70-luvulla, kun huokostusaineilla havaittiin olevan kiistaton vaikutus pakkasenkestävyyttä lisäävänä komponenttina.



Huokostettua betonia valmistettaessa on kuitenkin huomioitava, että ilmamäärän lisäys laskee aina lujuutta. 1 % ilmamäärän nosto vastaa noin 5 % lujuuden menetystä. Jotta tavoitelujuus ei heikkenisi, tämä on aina otettava huomioon käyttämällä suurempia sementtimääriä ja /tai pienempiä vesimääriä.



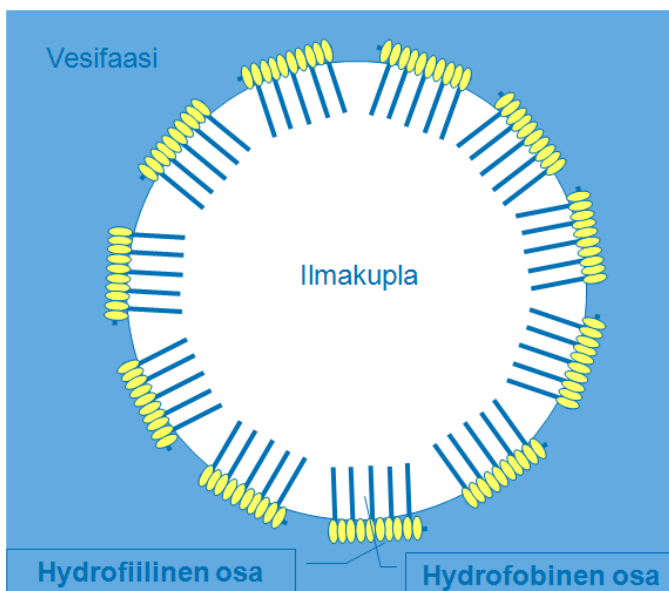
2. Huokostimien toiminta

Huokostimet ovat pinta-aktiivisia aineita, joilla on myös notkistavia vaikutuksia.

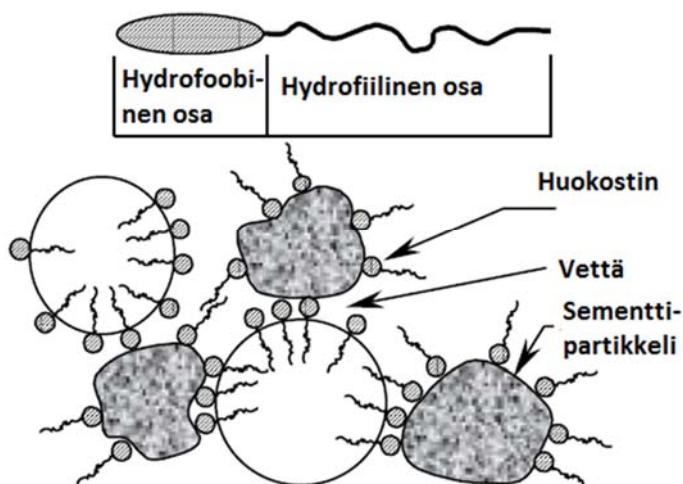
Betoniin aikaansaadaan huokostimien avulla keinotekoisesti ilmahuokosia. Nämä toimivat jäätyvän veden pakotiloina sen tilavuuden kasvaessa.

Huokostimien raaka-aineet ovat molekyyliä, joille luonteenomaista ovat hydrofiiliset (vesihakuiset) ja hydrofobiset (vettähylykivät) molekyyli-ryhmät. Näiden huokostimien periaatteellinen toimintatapa on esitetty kuvissa 1 ja 2. Se perustuu jo edellä mainittuun huokosten muodostumiseen, joka sivuvaikutuksenaan myös parantaa betonin työstettävyyttä ns. kuulalaakerivaikutuksen ansiosta. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi märkäläasteissa.

Kuva 1 Huokostimien käyttäytyminen veden vaikutuksesta



Kuva 2 Ilmahuokosten syntyminen betonissa



3. Huokostetulle betonille asetettavat vaatimukset ja niiden mittausmenetelmät

Suomessa pakkasenkestävyydelle on asetettu uudessa Betoninormi 2016:ssa seuraavat vaatimukset eri käyttöikäalueille.

Käyttöikä 50 v

Jäätymis-sulamisrasitus

v/s > 0,4

Luokka	XF1	XF2	XF3	XF4
Vedellä kyllästyminen	kohtalainen	kohtalainen	suuri	suuri
Suola mukana	ei	kyllä	ei	kyllä
Maksimi v/s	0,6	0,5	0,5	0,45
Minimisementtimäärä	270	330	300	360
F-luku				
P-luku		25		40
Ilmamäärä	4	5	4,0	5,5
Huokosjako	≤0,27	≤0,25	≤0,23	≤0,25
Jäädytys//sulatussykliä	100		300	
Laattakoe/rapauma	≤500	≤650	≤200	≤350

Käyttöikä 100v

Jäätymis-sulamisrasitus

v/s > 0,4

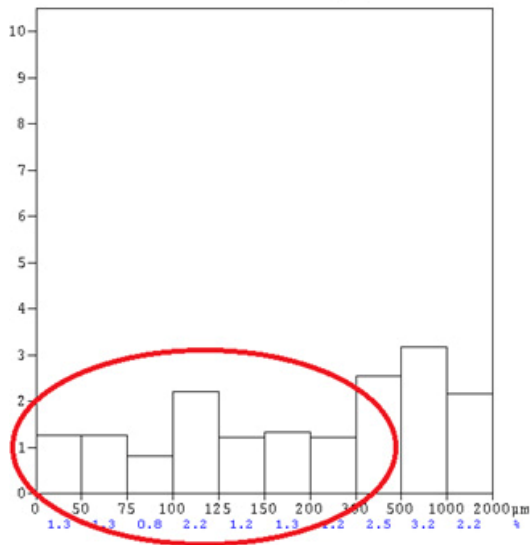
Luokka	XF1	XF2	XF3	XF4
Vedellä kyllästyminen	kohtalainen	kohtalainen	suuri	suuri
Suola mukana	ei	kyllä	ei	kyllä
Maksimi v/s	0,55		0,5	
Minimisementtimäärä	270		300	
F-luku				
P-luku		50		70
Ilmamäärä	5,5		5,5	
Huokosjako	≤0,25	≤0,25	≤0,22	≤0,25
Jäädytys/sulatussykliä	300			
Laattakoe/rapauma	≤200	≤250	≤100	≤150

Kuten edellisistä taulukoista ilmenee, pakkasenkestävyyttä ja ilman muodostumista voidaan mitata usealla eri tavalla. Tuoreesta betonista ohjeellinen ilmamäärä mitataan ilmamäärämittarilla. Määrä tulee kuitenkin tarkistaa säännöllisin väliajoin jo kovettuneesta betonista huokosjakotestin (hieestä), jäädytys-sulatus- tai laattakokeen perusteella.

Pelkkä ilmamääräprosentti ei kerro ilman jakaumasta ja koosta vielä mitään. Huokostuksen onnistumisen varmistamiseen voidaan käyttää AVA (Air Void Analyzer) - ilmanlaatumittaria, jolla voidaan mitata ilmamääräjakauma tuoreesta betonista. Esim. Kööpenhaminan ja Malmön välisen sillan betonien huokosjakauma tarkistettiin säännöllisesti lähes kuormakohtaisesti AVA-mittarilla. AVA-mittarilla saadaan tuloksia, jotka korreloivat kovettuneen betonin hieestä otettuihin huokosjakotuloksiin.

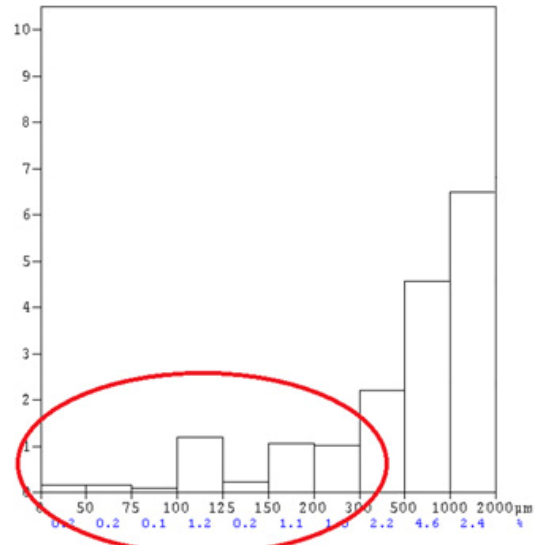
Ilmahuokosten tulee olla kooltaan riittävän pieniä; halkaisijaltaan alle 0,3 mm huokosten osuuden tulee olla suuri. Kokonaisilmamäärä ei ratkaise, vaan ilman tulee olla jakautunut riittävän tiheästi sementtikiven ympärille. Molemmissa seuraavalla sivulla esitetyissä AVA-tuloksissa on sama kokonaisilmapitoisuus, mutta vain vasemmalla onnistunut huokosjakauma.

Ilman jakautuminen sementtipastaan
<2 mm huokokset (%)



Huokospitoisuus 17,2 %

Ilman jakautuminen sementtipastaan
<2 mm huokokset (%)



Huokospitoisuus 13,1 %

Jos AVA-mittaukseen ei ole mahdollisuutta, on omien massojen ohjaamiseen keino, jota voisivat kaikki huokostetun betonin tekijät käyttää. **Nimittäin ämpäritesti!** Sekoittamalla betonimassaa veteen sopivassa suhteessa nähdään syntyvän vaahdon koostumuksesta, onko huokostus onnistunut, eli onko syntynyt ns. sopivaa ilmaa.

4. Huokosten muodostumiseen vaikuttavat tekijät

Ilmahuokosten jakautuminen ja huokostimilla aikaansaatava ilmamäärä ovat riippuvaisia lukuisista osittain limittäisistä vaikutussuureista. Seuraavassa on luettelo pääasiallisista vaikuttavista tekijöistä, joita selvitetään tarkemmin.

Huokosten muodostumiseen pääasiallisesti vaikuttavat tekijät:

Sekoitustehokkuus	Sekoittimen laatu, sekoitusaika
Betonin notkeus	Vesimäärä, lisäaineet
Betonin lämpötila	
Huokostimen laatu	Raaka-ainepitoisuus (konsentraatio)
Sementtityyppi	
Betonin lisä- ja sideaineet	
Huokostimen annostelu	Annosteluajankohta ja -tapa
Betonin suhteitus	Hienoainespitoisuus Lähtöseoksen ilmamäärä Kiviaineksen laatu
Betonin seisonta-aika	
Betonin työstäminen	Tiivistystapa
Jälkihoito	

4.1 Sekoitustehokkuus

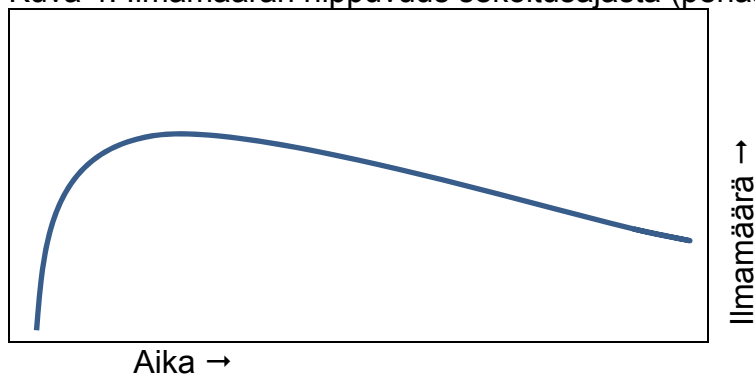
Sekoitin

Huokostetun massan valmistuksessa suositellaan käytettäväksi pakkosekoitinta; sekä taso- että kaksoisakselisekoittimilla saadaan riittävän homogeenista betonia. Vapaapudotussekoittimia käytettäessä on massan sekoittuminen ja myös syntyvä huokosjako varmistettava. Tärkeää on sekoittimen kulutusosien (kaapimien, pohjalevyjen jne.) säännöllinen uusiminen, jotta koko annos sekoittuu eikä synny alueita, jotka jäävät osittain tai kokonaan sekoittumatta. Tehokkaan sekoituksen on havaittu pienentävän huokosten kokoa.

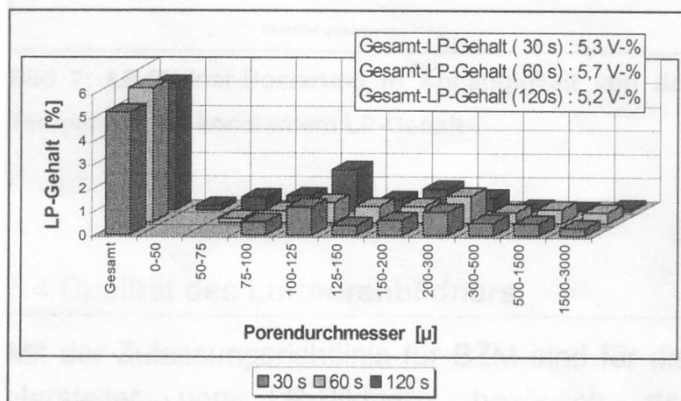
Sekoitusaika

Sekoitusajalla on olennainen vaikutus sekoitustulokseen. Jos sekoitusaika on liian lyhyt, ei parhaimmillakaan sekoittimilla saada huokostinta jakautumaan massaan riittävän tasaisesti. Suositeltavat sekoitusajat ovat vähintään 45 s huokostimen lisäämisestä. Jos taas sekoitusaika on liian pitkä, huokosmäärä voi vähentyä. Polykarboksylaattipohjaisilla notkistimilla suositellaan pidempää sekoitusaikaa ilmamäärän stabiloimiseksi.

Kuva 4: Ilmamäärän riippuvuus sekoitusajasta (periaate)



Kuvassa 5 on esitetty myös ilmamäärän ja sekoitusajan riippuvuus, mutta nyt tarkastelun kohteeksi on otettu ilmajakauman muutokset. Huokosten jakautuma muuttuu sekoitusajan kasvaessa. Huokosrakenne on pidemmän sekoitusajan myötä parantunut. Huokosten ominaisarvot on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5: huokosjakauman riippuvuus sekoitusajasta.

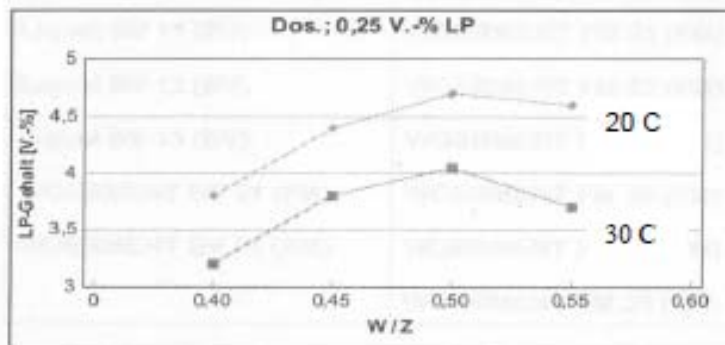
Sekoitus aika	L ₃₀₀ -% - kok.ilmamäärästä	Huokosjako (mm)
30 min	74	0,14
60 min	73	0,14
120 min	94	0,10

Taulukko 5: Mitatut huokosten ominaisarvot suhteessa sekoitusaikaan.
L₃₀₀ = alle 300µm huokosten osuus.

4.2 Betonin notkeus ja vesimäärä

Kuten kohdassa Huokostimien toiminta on mainittu, tarvitaan ilmahuokosrakenteen muodostumiseen ehdottomasti riittävä määrä vettä. Jos vesimäärä on kuitenkin niin suuri, että kiintoaineshiukkasten väliin pääsee syntymään varsinaisia vesikalvoja, voivat ilmahuokokset päästä suhteellisen helposti vapautumaan itsestään betonista. Vesimäärän vaikutus ilmamäärään on esitetty kuvassa 6. Kullekin betonille on löydettävissä oma optimaalinen koostumuksensa ilmamäärän suhteen.

Kuva 6: Ilmamäärien riippuvuus v/s-suhteesta ja lämpötilasta

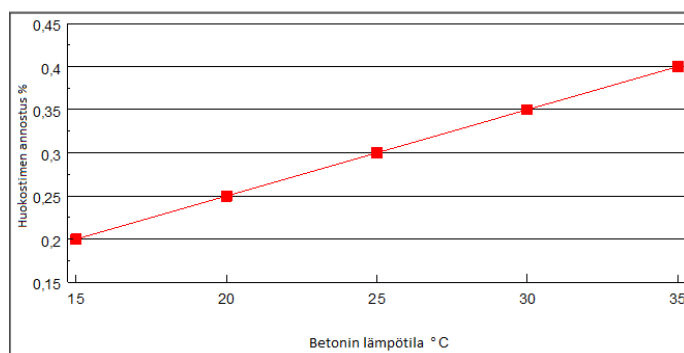


Notkeisiin massoihin tulee aina enemmän ilmaa kuin jäykkiin. Kun massasta tehdään notkeampaa veden avulla, ilmapitoisuus kasvaa, mutta usein myös huokoskoko.

4.3. Betonin lämpötila

Betonin lämpötilan ja ilmamäärän välillä on lähes lineaarinen riippuvuussuhde. Betonin lämpötilan kohotessa ilmamäärä alenee, ts. kuten kuvassa 7 on esitetty, lämpötilan nousu vaatii suurempaa huokostinannostusta, jotta päästään samaan kokonaisilmamäärään.

Kuva 7: Huokostinannostus suhteessa lämpötilaan ilmamäärän pysyessä samana.



Alhaisten lämpötilojen on havaittu myös suurentavan huokosten kokoa.

4.4 Huokostimen laatu ja määrä

Nykyisin käytettävät huokostimet voidaan jakaa kahteen pääryhmään, vinsolhartsipohjaisiin sekä tensideihin. Vinsolhartsipohjaisten raaka-aineena on kantopihka, josta lopputuote valmistetaan kemiallisesti ja synteettisesti. Tensidit sitä vastoin ovat täysin kemiallisia aineita.

Aineiden kemiallisen koostumuksen takia niiden pintakemialliset ominaisuudet ovat hieman erilaiset. Molempien huokostintyyppien kanssa on mahdollista saada aikaan pysyviä oikean kokoisia huokosia. Monet ovat löytäneet oikean aineyhdistelmän omien raaka-aineidensa kanssa vasta erehtymisen ja onnistumisen kautta. Annostelumäärä joudutaan hakemaan omalle kiviainekselle yleensä ennakkokokeiden avulla. Usein sääntönä voidaan pitää, että kun betoniin saadaan tarvittava määrä ilmaa normaalilla annostelulla, hyvä huokosjakokin saavutetaan. Jos pienempää huokostinannostelua käytettäessä ilmamäärä on riittävä, se usein kielii väärän kokoisesta ilmasta: suurta ilmaa on liikaa. Asia korjaantuu vain suhteitusta muuttamalla: runkoaineen hienoainesmäärän ja /tai sementtimäärän lisäyksellä ja sen myötä huokostinannostelun palauttamisella normaalitasolle.

4.5 Sementtityyppi ja -määrä

Saksassa on havaittu sementtityypin vaikutuksen syntyvään huokosrakenteeseen olevan kiistaton. Eri tehtaiden sementit käyttäytyvät eri tavalla lisäaineiden ja huokostimien kanssa. Jos käytetty sementtilaatu vaihtelee, on huokostus syytä tarkistaa. Huokostus on pääsääntöisesti onnistunut hyvin, kun oikea kombinaatio on löytynyt.

Huokostinannostelu lasketaan käytetystä sementtimäärästä. Jos sementtimäärä nousee, nousee myös huokostimen käyttömäärä. Hienojakoisten sementtien kanssa huokostimen annostelu kasvaa.

4.6 Huokostimien toiminta notkistimien kanssa

Huokostetussa betonissa käytetään usein notkistimia veden vähentämiseen. On havaittu, että notkistetulla betonilla ilma karkaa helpommin ja huokokset yhdistyvät herkemmin tärytyksen aikana. Oikeiden notkistin-huokostin-yhdistelmien löytäminen onkin erittäin tärkeää. Valittaessa käytettävää notkistin-huokostinparia ennakkokokeet ovat aina välttämättömiä.

Nykyisin eniten käytetty notkistintyyppi on polykarboksylaattieetteri. Polykarboksylaattien käyttö yleistyi 2000-luvun alussa ja nyt ne ovat lähes täysin syrjäyttäneet vanhat lignosulfonaatti-, melamiini- ja naftaleenipohjaiset notkistimet.

Tehokkaampien notkistimien yleistyessä huomattiin myös, että huokostaminen vaikeutui. Notkistimet ovat tehokkaampia, massoista tulee helpommin jopa yli-notkeita, jolloin sopivan ilmamäärän saaminen on vaikeaa. Samoin ilmeni myös, että polykarboksylaattilisäaineiden valmistuksessa tuotteeseen lisätään aina pieniä määriä ilmantappajaa estämään tuotteen vaahtoamista.

Vaahdonestoaine ei itse asiassa estä vaahdon syntymistä, vaan sen kemiallinen funktio on rikkoa jo syntyneitä ilmakuplia. Ilmanpoistoaine hakeutuu veden ja ilman rajapinnalle ja murtaa pinta-aktiivisen aineen muodostaman stabiilin rakenteen.

Kun tämän jälkeen kaksi ilmakuplaa törmäävät toisiinsa, ne sulautuvat yhdeksi isoksi kuplaksi.

Ilmantappajan funktio onkin päinvastainen huokostimen toimintaan nähden. Siksi on ollut haastavaa löytää oikeat parit, jotka toimivat käytettävän sementin ja kiviaineen kanssa. Ainoa keino on ollut etsiä käytetyille notkistimelle sopiva huokostin ennakkokokeilla. Selvää sääntöä ei ole olemassa mitkä huokostintyypit toimivat eri markkinoilla olevien polykarboksylaattien ja sementtien kanssa; aina on kokeiltava.

4.6.1 Sementin notkistimet ja huokostimet

Notkistimet	Pohja	Ilmantappaja	Mahdollisuus huokostaa
Sem [®] Flow MC	Polymeeri	kyllä	kyllä
Sem [®] Flow ELE	Polymeeri	kyllä	kyllä
Sem [®] Flow ELE-S	Polymeeri	kyllä	kyllä
Sem [®] Flow ELE-ST	Polymeeri	kyllä	kyllä
AdvaFlow 484	Polymeeri	kyllä	kyllä
WRDA 90	Lignosulfonaatti	kyllä	kyllä
Daracem F	Melamiini	ei	kyllä
Structuro 200	Polymeeri	kyllä	kyllä
Structuro 111 X	Polymeeri	kyllä	kyllä
Huokostimet	Pohja		
Masterair 71	Vinsolhartsit		
Masterair102	Tensidi		

4.7 Muut lisäaineet huokostimien kanssa

Sitoutumista hidastavien lisäaineiden käyttöä yhdessä huokostimien kanssa ei suositella, koska pidemmän työaajan kuluessa on vaara, että osa ilmamäärästä pinnan lähellä häviää kosteuden poistumisen (kuivumisen) myötä, jolloin juuri pakkas-suolarasitukselle kriittisin alue betonista vaurioituu.

4.8 Betonin seosaineet

Seosaineita, varsinkin kivihiililentotuhkaa, ei suositella käytettäväksi huokostetun betonin valmistuksessa. Lentotuhkan palamaton hiili ”sammuttaa” huokostimen tehon.

Saksassa tehdyissä tutkimuksissa korkeiden kuonapitoisuuksien on havaittu aikaansaavan vaihtelua huokostuksen onnistumisessa. Syynä voi tutkimusten mukaan olla sama ilmiö kuin hidastimia käytettäessä.

4.9 Betonin kiviainekset

Kiviaineksilla on selvä vaikutus syntyvään ilmajakaumaan hienoainesosuutensa kautta. Mitä enemmän hienoainesta, esim. pölyä meillä on, sitä suurempaa huokostinannostelua joudumme käyttämään.

Raekooltaan <2mm osuudella on suurin merkitys huokostuksen onnistumiseen. Jos hienoainesta on liian vähän, betoniin ei saada ilmaa; jos liikaa, ilmasta tulee epästabiliia: Suojahuokokset alkavat yhdistyä.

Myös raemuodolla on selvä vaikutus ilman muodostumiseen. Murskatun kiviaineksen kanssa huokostus on usein vaikeampaa; ilmamäärä on alhaisempi ja huokokset pienempiä. Huokostinannostelua joudutaan näin usein nostamaan. Luonnon kiviaineksilla huokostaminen on helpompaa.

Joskus murskeen sopivalla lisäyksellä hienopäähän voidaan huokoskokoa pyrkiä pienentämään, jolloin huokosjako paranee; murske toimii ns. silppurina.

Rapautuneet kiviainekset vaativat myös korkeamman huokostinannostelun.

Huokostusongelmia on myös esiintynyt joidenkin tavallisesta poikkeavien erikoiskivilajien kanssa. Tämä on tullut esille mm. joidenkin rouhemassojen valmistuksessa. Esim. jos kiviaines sisältää paljon talkkia, sen on havaittu sammuttavan huokostimen tehon.

4.10 Annosteluajankohta ja -järjestys

Huokostimen oikea annosteluajankohta on erittäin tärkeä. Huokostin tulisi annostella aina vasta muiden ainesosien kostumisen jälkeen. Jos huokostin annostellaan heti sekoitusveden kanssa, on suuri vaara, että se adsorboituu hiukkasten pinnalle ja inaktivoituu (muuttuu tehottomaksi). Paras tapa olisi sekoittaa betonia ensin jonkin aikaa 2/3 annosveden kanssa ja lisätä huokostin loppuveden mukana. Vaihtoehtoisesti huokostin voidaan annostella myös sekoittamisen lopuksi tai veden annostelun jälkeen. Käytettäessä useita lisäaineita samanaikaisesti on syytä noudattaa seuraavaa järjestystä:

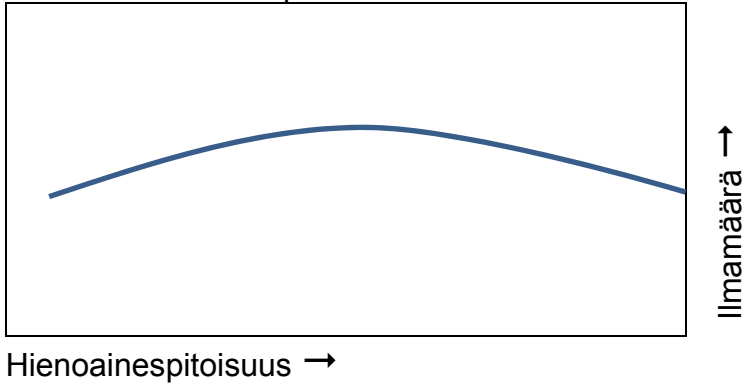
Jos käytetään hidastinta (ei suositeltavaa) se tulisi annostella **ennen** huokostinta.

Jos käytetään nesteyttimiä/notkistimia, ne tulisi annostella vasta huokostimen **jälkeen** ja - mikäli mahdollista - niin että annosta sekoitetaan ensin jonkin aikaa vain huokostimen kanssa.

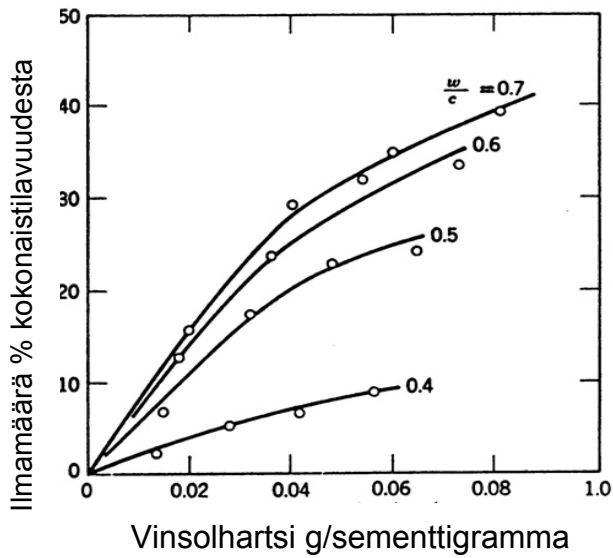
4.11 Betonin suhteitus

Huokostetun betonin valmistuksessa sopiva suhteitus, jossa on riittävä määrä hienoaineksia (raekoko <0,125 mm) ja vettä, on välttämätön, jotta näiden hienoainesten joukkoon saadaan 40 - 60 l/m³ ilmakuplia. Kuvassa 8 on esitetty tämä ilmamäärän ja hienoainesten keskinäinen riippuvuus. Jos hienoaineksen osuus on liian alhainen, massa ei ole mahdollista saada mahtumaan riittävää ilmamäärää. Jos taas osuus on liian suuri, massasta tulee epästabili, mikä puolestaan voi johtaa ilman poistumiseen.

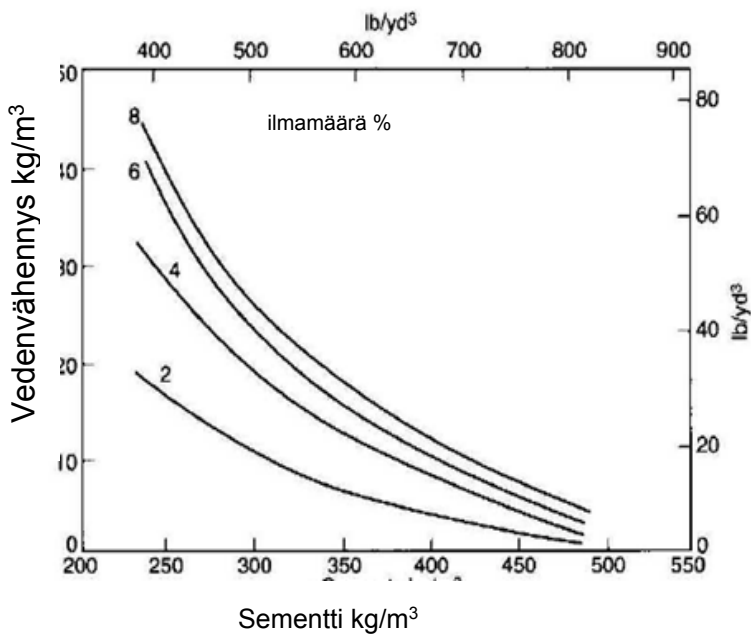
Kuva 8: Hienoainespitoisuuden vaikutus ilmamäärään (periaate).



Vesisementtisuhteen vaikutus annosteluun



Ilmamäärän ja veden suhde: 1 % ilmaa = 1 % hienoainesta = 3 % vettä



3.12 Betonin seisonta-aika

Samoin kuin hidastimien käyttö ei ole suositeltavaa, ei valmiin betonin tulisi ennen sen työstämistä antaa seisoa yhtään kauempaa kuin välttämätöntä. Missään tapauksessa seisonta-aika ei saa ylittää 60 minuuttia.

Kokonaisilmamäärä alenee yleensä betonin odottaessa työstämistä. Huokosten ominaisarvot eivät kuitenkaan laske hyvässä huokosrakenteessa samassa suhteessa.

Ilmamäärän aleneminen ajan funktiona on syytä ottaa myös huomioon tehtäessä ilmamittauksia. Jos halutaan mahdollisimman vertailukelpoiset tulokset, on syytä käyttää samaa ajankohtaa näytteenotossa ja mittauksessa, jotta saatavat arvot ovat mahdollisimman vertailukelpoiset.

3.13 Huokostetun betonin työstäminen

Betonin valun aikana ja sen jälkeen betonia tiivistetään tai sitä tasoitetaan muottiin erilaisten tiivistyslaitteiden avulla. Työmaalla käytetään ensisijaisesti sauvatäryttimiä. Liian tehokas ja varsinkin epätasaisesti suoritettu tärytys voi vaikuttaa erittäin haitallisesti huokosrakenteeseen. On syytä muistaa, että tärytyksen tarkoituksena on poistaa ilmaa betonista, minkä vuoksi huokostetun betonin tärytyksessä on syytä olla erityisen maltillinen. Sama pätee myös elementtitehtaissa yleisimmin käytettäviin pintatäryttimiin.

4. Yhteenveto

Huokostetut betonit asettavat edelleen suurimmat vaatimukset betoniteknologeille. Muodostuvaan huokosrakenteeseen vaikuttavien suureiden lukuisuus ja vastakkaiset vaikutukset vaikeuttavat ennalta varmaan lopputulokseen pääsemistä.

Tässä esitettyjen vaikuttavien suureiden tuntemus ja niiden huomioon ottaminen mahdollistavat kuitenkin huokostettujen betoneiden suunnitelman mukaisen ja tavoitehakuisen valmistuksen. AVA-laitteen-käyttö ennakkokokeissa antaa erinomaisia mahdollisuuksia betonimassan optimointiin.