

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto
Rakennusmateriaalitekniikka

MIKA OIKARI

KEVYTSORAHARKKOJEN PAKKASENKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN

*Diplomityö, joka on opinnäytteenä jätetty
tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 15.5.2001*

Valvoja: professori Vesa Penttala
Ohjaaja: DI Mikko Pöysti

Tekijä ja työn nimi:
MIKA OIKARI

KEVYTSORAHARKKOJEN PAKKASENKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN

Päivämäärä: 9.5.2001

Sivumäärä: 82 + 9

Professori: RAK-82 RAKENNUSMATERIAALITEKNIikka

Valvoja: PROFESSORI VESA PENTTALA

Ohjaaja: DIPLOMI-INSINÖÖRI MIKKO PÖYSTI, OPTIROC OY AB

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia mahdollisuutta valmistaa kevytsoraharkkotuotteita käyttäen massanvalmistuksessa vähemmän sementtiä siten, että pakkasenkestävyysominaisuudet eivät huonone ja harkkotuotteille asetetut luokitus- ja ulkonäkökriteerit täytyvät edelleen. Tutkimus toteutettiin muokkaamalla harkkotuotteiden valmistuksessa käytettävää koostumusta niin, että osa sementistä korvautui jollain halvemmalla osa-aineella. Tämä toteutettiin kahdella erilaisella periaatteeltaan erilaisella tavalla; 1) runkoaineen rakeisuutta muutettiin niin, että hienoaineksen määrä lisääntyi ja osan hydratoitumattomasta sementistä voitiin ajatella korvautuvan runkoaineella, ja 2) osa sementistä korvattiin toisella rakeisuudeltaan hienolla aineella.

Kirjallisuustutkimuksessa selvitettiin harvan kevytsorabetonin pakkasenkestävyyden teoriaa ja tutkimusmenetelmiä betonin säilyvyystutkimusten avulla. Samalla pohdittiin yhtymäkohtia ja mahdollisia epävarmuustekijöitä normaalibetonille kehitettyjen teorioiden ja tutkimusmenetelmien soveltamisessa kevytsorabetoniin.

Laboratoriokokeissa kokeiltiin 12 muokattua harkkomassan koostumusta, joista valmistetut koeappaleet koestettiin ilman jäädytys-sulatusrasitusta sekä sen jälkeen. Saatuja tuloksia verrattiin kokeiden toteutusajankohtana tuotantokäytössä olleella koostumuksella valmistetuilla vertailukappaleilla saatuihin tuloksiin. Vertailtavina suureina oli puristus- ja taivutusvetolujuuden lisäksi myös kappaleiden tiheys ja ulkonäkö. Tuloksien tulkinnassa mitatut lujuusarvot suhteutettiin kussakin koostumuksessa käytettyyn sementtimäärään sekä kappaleen tiheyteen.

Laboratoriokokeiden tulosten perusteella huomattiin, että tehtyjen koostumusmuutosten periaate oli oikea. Lähes kaikilla koostumuksilla saavutettiin vähintään vastaavat säilyvyysominaisuudet kuin tuotantokoostumuksella. Parhaimmaksi osoittautuivat koostumukset, joissa runkoaineen hiekka korvattiin kokonaisuudessaan fillerillä. Myös koostumukset, joissa sementtiä korvattiin kevytsorapölyllä, antoivat hyviä tuloksia. Kokonaisuudessaan heikoimmat tulokset saatiin koekoostumuksilla, jotka perustuivat kevytsorarunkoaineen rakeisuuden muuttamiseen eri kevytsoralajikkeiden suhteellista osuutta muuttamalla. Parhaan tuotantoreseptin löytämiseksi tulisi tehdä lisätutkimuksia optimaalisen muutosyhdistelmän ja sille soveltuvien tuotantotekijöiden löytämiseksi.

Author and the name of the thesis:

MIKA OIKARI

IMPROVING THE FROSTRESISTANCE OF LIGHT WEIGHT AGGREGATE CONCRETE BLOCKS

Date: 9.5.2001

Number of pages: 82 + 9

Professorship: RAK-82 BUILDING MATERIALS TECHNOLOGY

Supervisor: PROFESSOR VESA PENTTALA

Instructor: M.SC. MIKKO PÖYSTI, OPTIROC OY AB

The aim of this research was to study the possibilities to manufacture light weight aggregate (LWA) concrete blocks with less cement without decreasing the frostresistance of the products and still maintaining the pre-set qualifying features of these products. The research was carried out by modifying the composition used on manufacturing the LWA-concrete products. The cement in the composition was partly substituted by cheaper constituents with two different types of modifications; 1) the granularity of the aggregate was modified by increasing the amount of the finest aggregates and thus the cement was partly substituted by aggregate, and 2) some of the cement used in the composition was replaced with other fine substance.

In the literature survey the theory of frostresistance of LWA-concrete and research methods was investigated by using studies about those of normal aggregate concrete. Connections and possible factors of uncertainty in applying the theories and methods developed for normal aggregate concrete to LWA-concrete were also considered.

In the laboratory tests the specimens with 12 modified compositions of LWA-concrete were produced and tested with and without freeze-thaw stress. The results were compared to those measured with the specimens manufactured with the composition used in production at the time of the tests. Comparison focused on compressive and flexural tension strengths and also the density and the visual appearance of the specimens. The results were proportioned to the quantity of cement used in the mix and to the density of the specimens.

The principle of performed modifications to the production composition were proven correct based on the laboratory tests. Almost all modified composition achieved at least equal characteristics as the corresponding production composition. The best characteristics were achieved when sand was replaced with filler. Also replacing cement with light weight aggregate dust provided satisfactory results. Not so satisfactory results were measured from the specimens with composition in which the granularity of the aggregate was modified by changing the relative share of different aggregate sorts in the aggregate mix. To find the optimal composition for production, studies about intermixing different modifications and finding the optimal production factors for it, should be accomplished.

ALKUSANAT

Kiitos kärsivällisyydestä, Mikko ja muut optirocilaiset! Ihan näin pitkä toteutusaika ei tainnut alunperin olla tarkoitus – ainakaan minulla ei ollut. Mikolle erityiskiitos neuvoista, vinkeistä, kommenteista ja antoisista keskusteluista aiheen ympärillä.

Kiitos TKK:n betonilabran välle ja koko kellarissa pyöriville henkilökunnalle oppituolista riippumatta rakentavista neuvoista ja elintärkeästä avusta kokeellisen osuuden toteuttamisessa. Tosin jos olisin itse yrittänyt rakentaa vaikkapa korkeapaineisen puristintäryn, olisi kellari ehkä saatu remonttiin jo aikaisemmin... Erityisesti Karri joutui sietämään taas yhden pitkän linjan opiskelijan loputtomia kyselytunteja ja pyyntöjä, mutta kärsivällisyyttä ja ymmärrystä riitti aina, kiitos niistä.

Ja kiitos Marjalle Skanskalla; ilman ystävällistä patistustasi ei tämä olisi varmaan vieläkään kansissa. Rypistys ei silloin vienyt maaliin saakka, mutta se mahdollisti kuitenkin projektin loppuunsaattamisen nyt.

Eniten ymmärrystä ja sympatiaa uhrasi kuitenkin Maarit; nöyrin kiitokseni kaikesta antamastasi tuesta. Osattomia onnelliseen loppuun eivät myöskään ole Etelätien väki, Kartsin porukka ja tukijoukot Nurmossa. Tukenne merkitsi minulle enemmän kuin koskaan taisin sanoakaan.



Mika Oikari
Tuusulassa, 9.5.2001

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	2
ABSTRACT.....	3
ALKUSANAT.....	4
SISÄLLYSLUETTELO.....	5
1. JOHDANTO.....	7
2. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA SISÄLTÖ.....	8
<u>A. KIRJALLISUUSTUTKIMUS</u>	
3. BETONIN PAKKASENKESTÄVYYS.....	10
3.1. Vauriomekanismien teoriaa	10
3.1.1. Vesiliuoksen jäätyminen	10
3.1.2. Hydraulinen paine	13
3.1.3. Mikroskooppisten jäälinssien muodostuminen	14
3.1.4. Osmoottinen paine	15
3.1.5. Suolan vaikutus jäätymiseen	16
3.2. Pakkaskestävyyden tutkimusmenetelmät	17
3.2.1. Yleistä tutkimusmenetelmistä	17
3.2.2. Pakkasrasituskokeet	20
3.2.3. Suolarasituskokeet	21
3.2.4. Huokosrakenteen tutkimusmenetelmät	22
3.2.5. Lujuusominaisuuksien mittaukset	25
3.2.6. Vedenimuun perustuvat menetelmät	25
3.2.7. Dilaatiomittaukset	29
3.2.8. Käyttöikämallinnus	31
3.3. Betonin pakkaskestävyyteen vaikuttavia asioita	32
3.3.1. Ilmamäärä ja huokosrakenne	32
3.3.2. Lujuus ja vesisementtisuhde	36
3.3.3. Suhteellinen kosteuspitoisuus	37
3.3.4. Sideaine	40
3.3.5. Muita betonin pakkaskestävyyteen vaikuttavia asioita	42
4. HARVAN KEVYTSORABETONIN ERITYISPIIRTEITÄ.....	45
4.1. Kevyen runkoaineen vaikutus pakkaskestävyyteen	45
4.2. Betonin tutkimusmenetelmien soveltuvuus harvan ks-betonin testaukseen	48

B. KOKEELLINEN TUTKIMUS

5. KOEJÄRJESTELYT.....	50
5.1. Koekappaleiden valmistuksessa käytetyt reseptit	50
5.2. Koekappaleiden valmistus ja säilytys	56
5.3. Jäädytys-sulatuskoe	58
5.4. Taivutusveto- ja puristuslujuuden määrittäminen	59
5.5. Rakenteen silmämääräinen tarkastelu	61
6. TUTKIMUSTULOKSET.....	62
6.1. Koekappaleiden mitat ja tiheys	62
6.2. Puristuslujuus	64
6.3. Taivutusvetolujuus	64
6.4. Silmämääräiset havainnot rakenteesta	65
7. TULOSTEN TARKASTELU.....	67
7.1. Tiheys ja puristuslujuus	67
7.2. Taivutusvetolujuus	71
7.3. Silmämääräinen rapautuminen ja mikroskooppitarkastelu	74
7.4. Tulosten pohdintaa ja epävarmuustekijöitä	75
8. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	78
9. LÄHTEET	80
LIITTEET	83

1. JOHDANTO

Oy Optiroc Ab:n tärkeä myyntiartikkeli on erilaiset harvasta kevytsorabetonista valmistetut harkkotuotteet. Yrityksen toiminnan kannalta on tietenkin suotavaa, että tällaisten bulkkituotteiden valmistuksen kustannustehokkuus on mahdollisimman hyvä. Kevytsoraharkkojen kaltaisissa tuotteissa tämä tarkoittaa käytännössä haluttujen ominaisuuksien saavuttamista valmiissa tuotteissa mahdollisimman pienin kustannuksin. Toisaalta kuitenkin myös valmistusprosessi itsessään sanelee tuotteen koostumusta ja sitä kautta lopullisia ominaisuuksia. Tarve tämän diplomityön teettämiseen syntyi yrityksessä juuri optimointiajattelun pohjalta, ei niinkään tarpeesta muuttaa itse tuotetta. Koska yrityksen emokonserni toimii laajalti ympäri Eurooppaa, on harkkotuotteita kehitettäessä ollut mahdollisuus vertailla valmistusmenetelmiä ja koostumuksia eri tehtaiden välillä. Tarkasteltavana on erityisesti ollut harkkoihin saatava puristuslujuus suhteessa tiheyteen sekä pakkasenkestävyys. Vaikka lopputuote on kaikkialla hyvin samankaltainen, on valmistuksessa käytettävät koostumukset eronneet toisistaan erityisesti sementin käytön osalta. Koostumusvertailut herättivät yrityksessä mielenkiinnon tutkia, olisiko Suomen ympäristöolosuhteissa riittävä pakkasenkestävyys saavutettavissa käyttämällä harkkomassassa vähemmän sementtiä. Koska sementti on harkkomassan kallein osa-aine, saavutettaisiin jo pienelläkin sementtimäärän vähennyksellä vuositasolla tällaisten massatuotteiden kytseessäollessa merkittävä kustannussäästö. Varsinaisia ongelmia yrityksellä ei harkkotuotteiden ominaisuuksien kanssa siis ole ollut, esimerkiksi reklamaatioiden pohjalta ei paineita harkkomassan muuttamiseen ollut, vaan muutoksia haluttiin etsiä puhtaasti kustannusteknisistä syistä.

Runkoaineen alhaisesta lujuudesta johtuen harvassa kevytsorabetonissa murtuminen tapahtuu yleensä runkoainepartikkelien läpi eikä niiden pintaa pitkin kuten tapahtuu normaalirunkoaineisessa betonissa. Tästä johtuen harkkotuotteen lujuutta ei voida kovinkaan paljon kasvattaa muuttamalla sideaineen määrää. Kun sideainepasta runkoainepartikkeleiden välissä saavuttaa suuremman lujuuden kuin runkoainepartikkelit itsessään, siirtyy murtuminen yhä selkeämmin juuri runkoainepartikkelien läpi kulkeviin murtopintoihin. Yksinkertainen tapa kasvattaa harkon lujuutta on muuttaa runkoaineen koostumusta esimerkiksi lisäämällä joukkoon lujempaa ainesta kuten hiekkaa. Tästä on kuitenkin nopeasti seurauksena myös

valmiin tuotteen tiheyden kasvu, jolloin kevytsoratuotteen luokitteluvaatimuksia ei enää täytetä eli tuoteesta tulee liian painava. Näistä seikoista lähtien haluttiin etsiä mahdollisia vaihtoehtoja nykyiselle koostumukselle.

2. TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA SISÄLTÖ

Tutkimuksen päätavoitteena oli siis selvittää mahdollisuuksia vähentää sementin käyttöä kevytsoraharkkojen valmistuksessa lujuusominaisuuksien ja erityisesti pakkasenkestävyyden kärsimättä. Samalla valmiin tuotteen tiheyden piti pysyä hyväksyttävissä rajoissa. Jo varhaisessa työn suunnittelun vaiheessa tuli selväksi, että erilaisia mahdollisuuksia muuttaa käytössä olevaa koostumusta oli paljon enemmän kuin käytössä olevat resurssit mahdollistivat kokeilla. Rajoittavaksi tekijäksi muodostui käytetyn valmistusmenetelmän ja jäädytys-sulatuskaluston kapasiteetti. Tästä syystä tutkimusta päätettiin rajata siten, että siinä keskityttäisiin pääasiassa harkkomassan runkoaineen hienon osan koostumukseen ja sitä kautta osaltaan sementin korvaamiseen halvemmilla osa-aineilla. Näin voitaisiin selvittää tarkemmin edes yhden osa-alueen vaikutusta harkkomassan ja erityisesti lopputuotteen ominaisuuksiin. Käytännössä tuoreen massan ominaisuuksilla ei ole tehdasvalmistuksessa kovinkaan suurta merkitystä, koska harkkojen valmistusmenetelmä sallii melko suuret vaihtelut massan ominaisuuksissa. Ainoaksi vaatimukseksi muodostuu tuoreen massan riittävä koossapysyvyys, jolloin tuore harkko pysyy tärytyksen jälkeen koossa ilman tukevaa muottia. Tämä tarkoittaa käytännössä riittävän pientä vesimäärää massassa, joka on toisaalta vaatimus myös erottumisen ehkäisemisen takia. Tärytys-/puristuslaitteiden teho riittää hyvin tiivistämään kuivankin massan.

Toisaalta juuri erittäin kuivan massan käyttö harkkojen valmistuksessa antoi ajatuksen yrittää korvata osa sementistä jollain muulla riittävän hienojakoisella aineella. Vesi-sementtisuhteen ollessa alhainen, jää käytetystä sementistä suurempi osa sitoutumatta, jolloin sementtihiukkaset toimivat massassa hienojakoisena runkoaineena. Tällöin voitaisiin lujuuden kärsimättä korvata tuo runkoaineena toimiva osa sementistä jollain toisella aineella, joka vastaavalla tavalla muuttaisi runkoaineen rakeisuuskäyrää. Näin sitoutuneen sideaineen määrä ei muuttuisi, mutta runkoaineosa tulisi lujuuden kannalta toiminnaltaan tehokkaammaksi.

Runkoaineen raekokojakauman muutosta haluttiin kokeilla myös muuttamatta sementtimäärää. Tavoitteena oli nimenomaan tarkastella runkoaineen hienoaineksen määrän merkitystä lopputuotteen pakkasenkestävyyteen. Samalla haluttiin löytää käyttökelpoisia runkoainevaihtoehtoja, jotka ominaisuuksiensa puolesta kelpaisivat korvaamaan massan tiheyttä nopeasti kasvattavaa hiekkaa.

Näiden alkupohdintojen perusteella päädyttiin siihen, että tutkimuksen pääpaino oli erilaisilla koostumuksilla valmistettujen koekappaleiden pakkasenkestävyysominaisuuksien vertailussa sekä keskenään että tuotannossa käytössä olleeseen koostumukseen. Aikaisemmin mainituista resurssirajoitteista johtuen jouduttiin muutokset rajaamaan määrältään alkuperäistä toivetta huomattavasti pienemmäksi, mutta suuntaa-antavan vertailun pohjaksi koekappalemäärä oli vieläkin riittävä. Samalla tutkimuksessa kartoitettiin aihepiiriä käsittelevää kirjallisuutta ja haettiin vertailukohtia normaalirunkoaineisen betonin pakkasenkestävyyteen vaikuttaviin seikkoihin. Käytännössä samankaltaisuudet normaalibetonin ja kevytrunkoaineisen, erityisesti harvan kevytsorabetonin, pakkasenkestävyyteen vaikuttavissa ominaisuuksissa lienevät aika vähäiset, koska materiaalien käyttäytyminen pakkasrasituksen alaisena eroavat perustavalla tavalla. Normaalibetonin pakkasenkestävyyden tunteminen auttaa kuitenkin ymmärtämään sementtikiven käyttäytymistä pakkasrasituksen alaisena myös kevytrunkoaineisessa betonissa.

Tutkimuksen yhteydessä arvioitiin myös nykyisen standardin mukaisen pakkasenkestävyyden testausmenetelmän soveltuvuutta harvoille kevytsorabetonituotteille.

A. KIRJALLISUUSTUTKIMUS

3. BETONIN PAKKASENKESTÄVYYS

Tässä kappaleessa käsitellään pääosin normaalirunkoaineisen betonin pakkasenkestävyydestä tehtyjä teorioita. Kevytsorabetonissa voidaan ajatella sementtikivimatriisin käyttäytyvän kuten normaalibetonissakin. Pakkasrasituskäyttämiseen vaikuttaa lisäksi huokoisen runkoaineen tuomat muutokset erityisesti kosteuden liikkumiseen kovettuneen massan huokosissa.

3.1. Vauriomekanismien teoriaa

Betonin pakkasenkestävyys määräytyy erityisesti huokosissa olevan veden määrän ja olomuodon perusteella. Muita kriittisiä ominaisuuksia ovat jäätyminenopeus ja huokosrakenne. Näiden kolmen tekijän keskinäisen suhteen perusteella määräytyy betoniin syntyvä pakkasvauriomekanismi ja sitä kautta materiaalin pakkasenkestävyys. Koska tuore betoni sisältää suuren määrän jäätyiskykyistä vettä, jonka määrä hydrataation edetessä voimakkaasti vähenee, on myös betonin ikä oleellinen tekijä pakkasenkestävyyttä määriteltäessä. Betonin iän kasvaessa myös kapillaariverkostossa olevan veden jäätymiseen vaadittava lämpötila laskee. (KOMONEN 1999, s. 10) Pakkasvauriot ilmenevät sekä sisäisenä halkeiluna että ulkoisena rapautumisena. Materiaalin rakenteellisen toimivuuden kannalta sisäinen vaurioituminen on yleensä merkittävämpi vauriomuoto, vaikka ulkoinen rapautuminen onkin yleensä helpommin todettavissa. Sisäiset mikrohalkeamat sementtikivessä ja runkoainepartikkeleiden pinnalla heikentävät nopeasti materiaalin lujuusominaisuuksia, jolloin vaurioituminen kiihtyy edelleen.

3.1.1. Vesiliuoksen jäätyminen

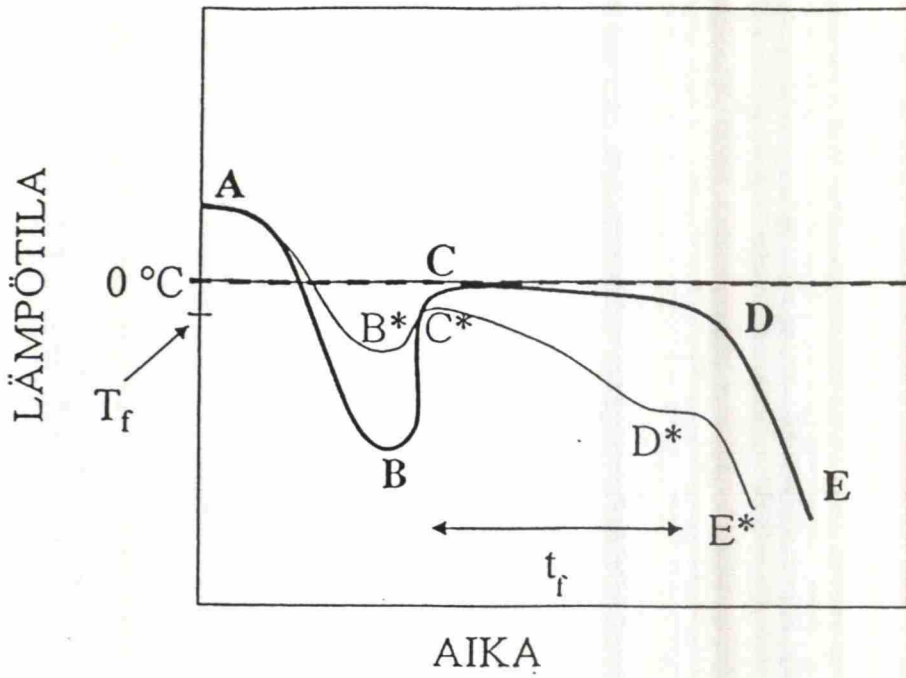
Jäätyessä puhtaassa vedessä muodostuu hyvin järjestyneitä kiteitä, joissa vesimolekyylit ovat tarkasti järjestäytyneitä ja suuntautuneita. Veteen liuenneet muut aineetkaan eivät hitaasti tapahtuvassa jäätymisessä muuta tätä prosessia. Tästä syystä likaisenkin veden jäätyessä syntyvät jääkiteet ovat aluksi hyvin puhtaita ja vasta myöhemmässä vaiheessa epäpuhtauksia sekoittuu jään kiderakenteeseen. Myös kaasut eristyvät jään sisään kupliksi. Betonissa

tapahtuva huokosveden jäätyminen tapahtuu siihen liuenneista aineista johtuen aina puhtaan veden prosessista poikkeavasti.

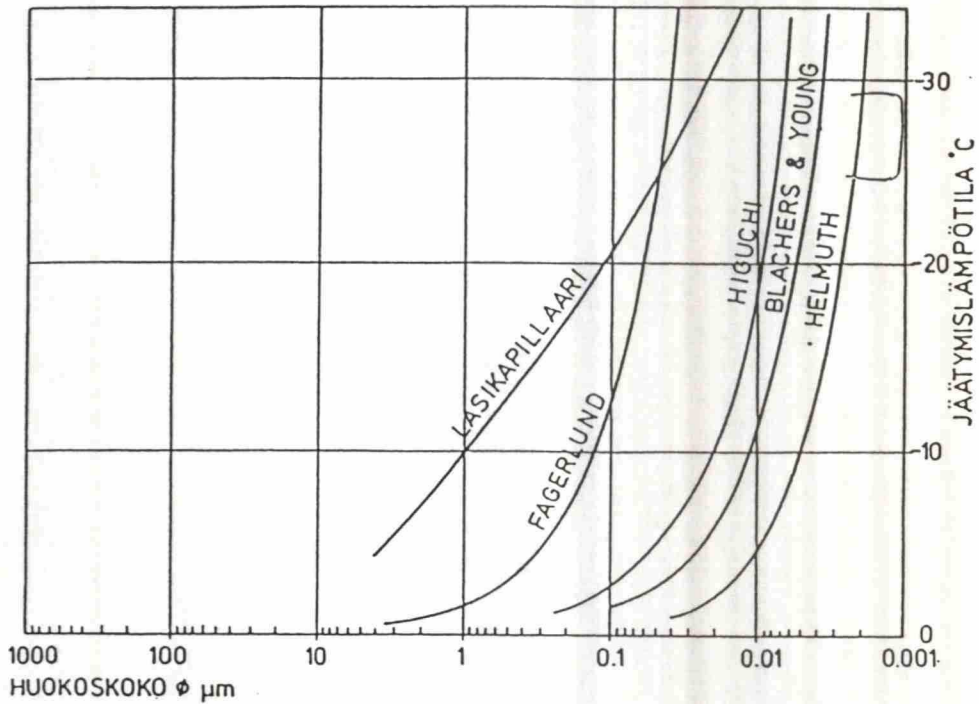
Alijäähtymisellä tarkoitetaan tilannetta, jossa nesteen lämpötila laskee jäätympisteensä alapuolelle ennen kuin kiteiden muodostuminen käynnistyy. Puhdas vesi voi alijäähtyä useita asteita ennen kiteytymisprosessin alkua, kun taas korkeakonsentraatioisilla nesteliuksilla alijäähtymistä voi olla hyvin vaikea todeta. Veteen liuennut aine siis vähentää alijäähtymistä. Kiteytymisen käynnistyttyä liuoksen lämpötila nousee välittömästi jäätymlämpötilaansa, koska kiteiden muodostuessa vapautuva latenttilämpö ei ehdi kokonaisuudessaan johtua ympäristöön.

Kuvassa 1 on kuvattu puhtaan veden ja nesteliuksen aika-lämpötila-yhteys jäätymisprosessissa. Paksumpi viiva ABCDE on puhtaan veden ja ohuempi viiva $AB^*C^*D^*E^*$ nesteliuksen lämpötilakuvaaja. Kiteytyminen alkaa alijäähtymisjakson jälkeen pisteissä B ja B^* , jolloin lämpötila nousee. Latenttilämpö on täydellisesti poistunut vedestä pisteessä D ja lämpötila alkaa jälleen laskea. Nesteliuksessa muodostuu ensin puhtaita jääkiteitä välillä C^*D^* . Pisteessä D^* sula liuos tulee kylläiseksi, jolloin liuennutta ainetta kiteytyy ja lämpötila nousee hieman. Kiteytymisen seurauksena liuoksen konsentraatio laskee ja jäätyminen etenee jälleen. Lopulta riittävän alhaisessa lämpötilassa kaikki liuennut aine on kiteytynyt ja neste jäätyneet.

Huokoisessa materiaalissa veden jäätyminen on lämpötilan ja huokoskoon funktio, johon myös veteen liuenneet suolat vaikuttavat. Lämpötilan laskiessa jääkiteiden muodostuminen käynnistyy ensin suuremmissa huokosissa ja etenee sitten lämpötilan edelleen laskiessa yhä pienempihalkaisijaisiin huokosiin. Huokosen koon pienentyessä, veden sitoutuneisuus kasvaa, jolloin jäätymlämpötila laskee. Eri tutkijat ovat esittäneet hyvinkin erilaisia riippuvuussuhteita veden jäätymlämpötilan ja huokoskoon välille, kuva 2. Erot johtuvat erilaisista määritysmenetelmistä ja materiaalien huokoskokojakauman erilaisuuksista.

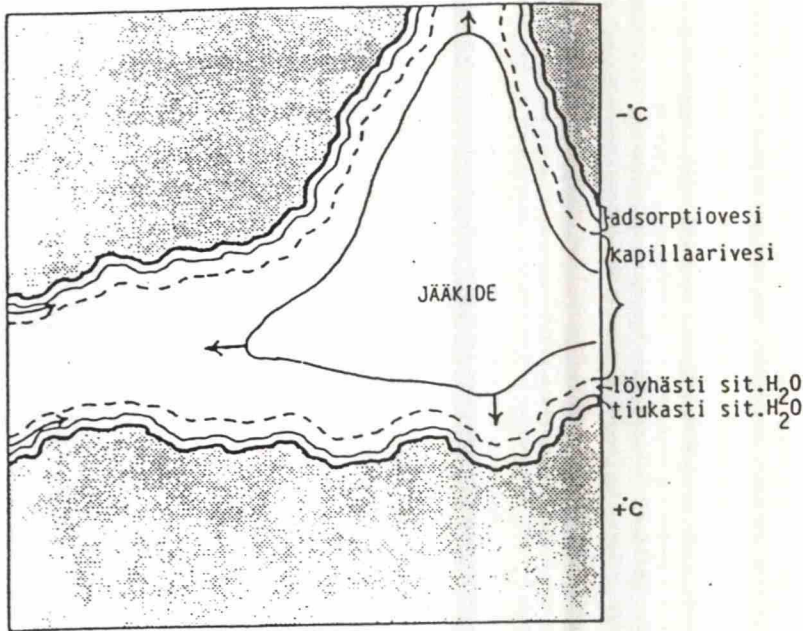


Kuva 1. Puhtaan veden ja liuoksen jäätyminen. (Lähde: KOMONEN 1999, s.14)



Kuva 2. Veden jäätyislämpötilan ja huokoskoon suhde eri tutkijoiden mukaan. (Lähde: KOKKO 1989, s.11)

Huokosveden jäätyminen alkaa huokosen keskeltä ennen reunoja, koska huokosen seinämällä oleva vesi on niin tiukasti sitoutunutta, että sen jäätyislämpötila on huomattavasti alhaisempi. Jäätymätöntä vesikalvoa pitkin lisää vapaata vettä pääsee siirtymään jäätymiskeskukseen. Pintaan adsorpoitunut vesikalvo jakautuu edelleen tiukasti sitoutuneeseen ja löyhemmin sitoutuneeseen kerrokseen, kuva 3.



Kuva 3. Huokoseen muodostunut jääkide ja veden sitoutuminen huokosen pintaan. (Lähde: KOKKO 1989, s. 12)

3.1.2. Hydraulinen paine

Hydraulisen paineen teoria on ollut pakkasvaurion selittämisessä suosittu teoria selväpiirtisyytensä ja yksinkertaisuutensa takia. Teoria on yksi vanhimmista, sen esitti Powers 1945, ja siinä betonin ilmahuokosilla on keskeinen merkitys. Pohjimmiltaan se perustuu siihen, että vesi jäätyessään laajenee noin 9 %. Powers oletti jäätyminen etenevän kappaleen pinnalta sisällepäin. Jäätyessään täydessä kapillaarissa, laajeneva vesi työntää jäätymätöntä vettä edellään kapillaarissa. Tämän virtauksen vastustuksesta aiheutuu huokosseinämiin hydraulinen paine, joka pyrkii purkautumaan ajamalla vettä ilmatäytteisiin huokosiin. Jos hydraulinen paine kasvaa paikallisesti suuremmaksi kuin sementtipastan vetojäännitys, syntyy halkeamia. Paine kasvaa liian suureksi, jos matka, jonka vesi joutuu siirtymään päästäkseen ilmahuokoseen, on liian pitkä, tai kappaleen jäätymisnopeus on liian suuri, jolloin vesi ei ehdi

poistumaan etenevän jäätymsrintaman edeltä. Ilmahuokosilla on teoriassa siis suuri merkitys. Powers määritteli maksimiarvon huokosjaolle eli matkalle, jonka veden täytyy kulkea päästäkseen ilmahuokoseen. Jos sementtipastan läpäisevyys on suuri, on syntyvä jäätymisessä syntyvä hydraulinen paine pieni ja maksimietäisyys L_{\max} voi olla suurempi. (PIGEON 1995, s.12-13)

Powersin teoria pätee vain massoille, joissa kaikki ilmahuokokset ovat samankokoisia ja ne ovat pastassa tasaisesti jakautuneina. Todellisilla massoilla L_{\max} tulee käsittää minimiarvoksi, jota ei tulisi ylittää. Teoria kuvaa kuitenkin hyvin sisäisten paineiden synnyn ja selittää jäätymisasteen ja huokosjaon välisen yhteyden. Huokosjakoa L voidaan pitää pakkasenkestävyyden kannalta erittäin tärkeänä suureena ja saatuja tuloksia oikean suuntaisina. Powers itsekin oli kuitenkin sitä mieltä, että teoria on epätarkka, koska veden on todettu ennemminkin siirtyvän huokosissa kohti jäätyiskohtaa kuin pois päin siitä. Näin teorian koko perusmekanismi on epämääräinen eikä teoria yksinään riitä selittämään jäätymisvaurion syntyä. (PIGEON 1995, s.14)

3.1.3. Mikroskooppisten jäälinsien muodostuminen

Teoriaa kutsutaan myös ”kapillaarisen jääkiteiden kasvun teoriaksi”. Sen synty on seurausta Powersin ja Helmuthin suorittamista jäätymislaajenematutkimuksista, jotka julkaistiin melko pian sen jälkeen, kun Powers oli kehittänyt hydraulisen paineen teoriansa. Tutkimuksissa todettiin, että sementtipasta voi jäätyessään sekä laajentua että kutistua riippuen siitä, millaisia sen ilmahuokostilavuus ja huokoisuus ovat. Tutkijat totesivat, että vesi siirtyy huokosissa kohti pistettä, jossa jäätyminen tapahtuu. Tämä aiheuttaa pastassa kutistumista. Lisäksi tutkijat totesivat, että kapillaarihuokosissa muodostuvan jään määrä on pienempi kuin termodynamiikan perusyhtälöiden perusteella voitiin olettaa. Näiden huomioiden perusteella he päätyivät esittämään hydraulisen paineen teoriasta eroavan uuden jäätymisvaurioteorian. (PIGEON 1995, s.15)

Keskeinen ero hydraulisen paineen teoriaan on oletus, että jäätyvätön vesi kulkeutuu pienistä huokosista kohti kapillaareissa muodostuvaa jäätä eikä siitä pois päin. Jäätyminen tapahtuu kapillaarihuokosen koon edellyttämässä lämpötilassa. Syntyvä jääkide pyrkii lämpötilan

laskiessa kasvamaan imemällä itseensä lisää vettä ympäröivästä sementtipastasta. Pastan kutistuminen aiheutuu veden poistumisesta. Kasvavan jääkiteen aiheuttama laajeneminen on kuitenkin yleensä kutistumista voimakkaampaa. Kiteen kasvu synnyttää painetta jäätymättömään vesikalvoon jään ja huokosseinämän välillä. Kun paine kasvaa paikallisesti liian suureksi, syntyy pysyvä vaurio. (PIGEON 1995, s.15)

Teoriasta on kaksi hieman erilaista versiota. Powersin mukaan kosteus siirtyy huokosissa nesteenä, mutta Litvan väitti siirtymisen tapahtuvan höyrynä. Nesteenä siirtyminen olisi seurausta kemiallisesta potentiaalierosta muodostuvan jään ja ympäröivän veden välillä, höyrynä liikkeen aiheuttaisi höyrynpaine-ero. Koska höyrynpaine-erot kuitenkin ovat seurausta kemiallisista potentiaalieroista, ei teorian kannalta siirtymistavalla ole merkitystä.

Kapillaarien seinän muodostavien geelipartikkeleiden pinnalle on absorboitunut muutaman molekyylin paksuinen vesikerros, joka erottaa geelipartikkelit jäästä. Lämpötilan laskiessa jäätymispisteen alle, jääkide pystyy kiinnittämään itseensä yhä enemmän vesikalvon molekyyleistä. Kalvon ohentuessa syntyy sen ja geeliveden välille kemiallinen potentiaaliero. Kun kosteuden siirtyminen oletetaan tapahtuvan nesteenä, kulkeutuu potentiaalieron tasoittamiseksi geelipartikkelien pintoja pitkin lisää vettä kapillaarin vesikalvoon. Paine huokosessa kasvaa kunnes jään potentiaalienergia on kasvanut yhtä suureksi kuin ympäröivän geeliveden.

3.1.4. Osmoottinen paine

Osmoottisen paineen teoria on Powersin ja Helmuthin jäälinsien muodostumisteoriasta edelleen kehittämä siten, että myös huokosvedessä olevat alalit otetaan huomioon. Jäälinsien muodostumisessa huokosveden oletettiin olevan puhdasta.

Teoria perustuu oletukseen, että geeli- ja kapillaarivedellä konsentraatiot liuenneiden aineiden, kuten suolojen, suhteen ovat erilaiset. Koska konsentraatierot pyrkivät tasoittumaan, siirtyy kapillaariveteen liuenneita suoloja konsentraatioltaan laimeampaan geeliveteen ja vastaavasti geelivettä diffusoituu huokosseinämän läpi kapillaarihuokosiin. Huokosseinämä toimii siis puoliläpäisevänä kalvona, jonka yli syntyy osmoottinen paine-ero. Konsentraatiero

syntyy, kun kapillaarihuokosessa syntyvä jääkide nostaa ympäröivän veden konsentraatiota. Jääkiteen kasvu pysähtyy, kun ympäröivän väkevöityneen liuoksen sulamispiste vastaa huokosessa vallitsevaa lämpötilaa eli tasapaino liuoksen ja jään välillä on saavutettu. Jäätyminen alkaa siis suuremmista huokosista, joihin sitten kulkeutuu osmoottisesti lisää vettä geelihuokosista. Tällöin jäätyttömän kapillaariveden konsentraatio jälleen laskee ja jäätyminen etenee. Lämpötilan laskiessa jäätyminen pystyy käynnistymään yhä pienemmissä huokosissa. (PIGEON 1995, s. 15-17)

3.1.5. Suolan vaikutus jäätymiseen

Suola vaikuttaa nesteen jäätymiseen ~~jäätymiseen~~ kuten muutkin epäpuhtaudet eli jäätyislämpötila laskee. Betonin jäätymiskestävyyyteen suolan vaikutuksella onkin suuri merkitys. Suolaliuoksessa jokainen varautunut ioni on vesimolekyylien ympäröimä. Tämä vaikeuttaa veden kiteytymistä, koska jäätyessään vesimolekyylien on irtauduttava suoiaioneista. Tämän seurauksena lämpötilan pitää laskea huomattavasti alemmaksi kuin puhtaan veden jäätyessä, että kiteytyminen etenisi. Muodostuva jää on lähes puhdasta, jolloin jäljelle jäävän veden konsentraatio kasvaa jatkuvasti ja kiteytyminen vaikeutuu edelleen. (KOMONEN 1999, s.16)

Huokoisessa materiaalissa, kuten betonissa, suolalla on dramaattinen vaikutus jäätyminen aiheuttamiin vaurioihin. Vaikutusmekanismista ei ole vielä yhtenäistä teoriaa, mutta ilmeisesti kyseessä on usean vaikutusmekanismin tuhoisa yhteisvaikutus, jossa suolojen osuus on osittain välillinen. Vaikka laskennallisesti 3 prosenttia natriumkloridia veteen liuenneena laskee liuoksen jäätympistettä vain 1,9 °C, on vaikutus vaurioitumiseen huomattavasti suurempi. Kokeissaan Penttala sai vaikutukseksi 2,8 - 3,9 °C (PENTTALA 1999, s. 14). Suolat huokosvedessä muuttavat siis vaurioitumismekanismeja. Suolat tehostavat veden tunkeutumista huokosiin, jolloin betoni kastuu tehokkaammin. Suolan läsnäolo kasvattaa myös suhteellista kosteutta huokosissa eli betoni pysyy sisäisesti kosteampana. Syklisessä jäätymisrasituksessa ensimmäinen jäätyiskerta saa veden ja suolat tunkeutumaan jäätymisrintaman edellä kohti betonirakenteen sisäosia ja materiaalissa oleviin ilmahuokosiin. Lyhyen sulamisjakson aikana betoni ehtii sulaa vain pintaosistaan, jolloin syvemmällä oleva jäätynyt osa vetää itseensä yhä lisää vettä. Suola rakenteen pinnassa aiheuttaa sen, että pinta ei

jäädy heti lämpötilan laskiessa pakkaselle, jolloin yhä enemmän vettä voi siirtyä syvemmällä olevaan jäätyneeseen osaan yhä matalammassa lämpötilassa. Suolakonsentraatioiden tasoittuessa sulana pysyvän pintakerroksen paksuus kasvaa ja suolat ja vesi tunkeutuvat yhä syvemmälle betoniin. Kun lämpötila sitten laskee riittävän alas, että suolainen pintakerroskin alkaa jäätyä, ajaa etenevä jäätymisrintama suolaliuosta edelleen syvemmälle betoniin. Suurilla konsentraatioeroilla betonissa oleva kosteus voi siirtyä myös kohti pintaosia. Tällöin pintakerros tulee märimmäksi ja lämpötilan laskiessa pintaosan huokosiin syntyy lohkeiluun johtava paine.

3.2. Pakkaskestävyyden tutkimusmenetelmät

3.2.1 Yleistä tutkimusmenetelmistä

Luonnollisessa jäätymisprosessissa betoniin kohdistuvat jäädytyskulat ovat ainutkertaisia eikä samanlaisia olosuhteita esiinny kahta kertaa. Jäätymiseen vaikuttavat tekijät, kuten vedelläkylästyssaste, jäätymis- ja sulamisjaksojen pituudet, lämpötilan muutosnopeus sekä aika jäätyispisteen alapuolella muuttuvat jatkuvasti ja voivat luoda hyvinkin erilaiset olosuhteet jopa saman rakenteen eri osissa. Laboratoriossa voidaan näistä olosuhteista jäljitellä vain joitain eikä kokeet näin ollen välttämättä anna oikeaa kuvaa todellisen rakenteen pakkaskestävyydestä. (KOMONEN 1999, s. 9)

Betonin pakkaskestävyyden arvioimiseen käytettävät tutkimusmenetelmät voidaan karkeasti jakaa kolmeen erilaiseen ryhmään: suoriin ja epäsuoriin menetelmiin sekä käytännön kenttähavaintoihin. Suorissa menetelmissä tutkittava materiaali altistetaan laboratorioolosuhteissa keinotekoiselle pakkasrasitukselle, jonka jälkeen rasituksen vaikutuksia arvioidaan visuaalisesti ja haluttuja materiaaliominaisuuksia mittaamalla. Jäädytyskokeilla saatujen tulosten luotettava tulkinta edellyttää koeolosuhteissa ja luonnonrasituksessa syntyvän vauriomekanismin vertailtavuuden tuntemista. Epäsuorissa menetelmissä materiaalista mitataan tai havainnoidaan jotain suoraan pakkaskestävyyden kannalta oleellista ominaisuutta tai jotain mitattavissa olevaa suuretta, jonka korrelaatio pakkaskestävyyden kanssa tunnetaan. Epäsuoria pakkaskestävyyden tutkimusmenetelmiä ovat esimerkiksi materiaalin huokosrakenteeseen ja vedenimukykyyn liittyvät mittaukset. Tällaisten mittausten etuna suoriin jäädytysmenetelmiin verrattuna on nopea suoritettavuus ja

parempi toistettavuus. Kenttäkokeissa koekappaleet altistuvat luonnolliselle pakkasrasitukselle. Rasituksen vaikutuksia voidaan arvioida eri tavoilla kuten laboratoriossa toteutettavissa suorissa pakkasenkestävyyden tutkimusmenetelmissä. Kenttäkokeilla saadaan oletettavasti luotettavinta tietoa materiaalin pakkasenkestävyydestä koska rasitusolosuhteet vastaavat parhaiten materiaalin todellisia käyttöolosuhteita. Menetelmän haittana on kokeiden pitkä kesto. (KOKKO 1989, s. 17-19) Eri koejärjestelyjä keskenään vertailtaessa tulee huomata, että eri menetelmät vaurioittavat koekappaletta eri tavoilla, jolloin saatavat tulokset ovat riippuvaisia kulloinkin käytetystä koestustavasta.

Laboratio-olosuhteissa toteutetut kokeet ja mittaukset eivät aina anna totuudenmukaista kuvaa materiaalin ominaisuuksista. Varsinkin kiihdytetyillä rasituskokeilla, kuten syklistä jäädytys-sulatuskokeilla, saatuihin tuloksiin tulee suhtautua terveen kriittisesti. Standardoitujen kokeiden osalta tällaista arviointia ei välttämättä jouduta tekemään, vaan materiaalin kelpoisuus määräytyy suoraan kokeella saadun tuloksen ja ennalta määrättyjen raja-arvojen perusteella. Tällöin ei yleensä ole pyrittykään hakemaan suoraa vertailtavuutta luonnonrasitukseen vaan vertailututkimusten avulla on etsitty ko. kokeella saatavalle suurelle vaatimusten kannalta hyväksyttävät arvot. Tavallisimpia syitä kiihdytetyillä rasituskokeella saadun tuloksen vertailukelvottomuuteen luonnonrasituksen kanssa ovat: (PENTTI 1988, s. 11-12)

- 1) Koekappaleiden valmistus ja säilytys aiheuttavat eroja materiaaliominaisuuksiin verrattaessa koekappaleita rakenteessa olevaa materiaalikappaleeseen.
- 2) Rasitusolosuhteet poikkeavat merkittävästi luonnonrasituksesta.
- 3) Olosuhteiden muutosnopeus on suurempi kuin luonnonolosuhteissa.
- 4) Olosuhteiden erilaisuudesta johtuen myös vaurioitumismekanismit ovat erilaisia ja niiden yhteisvaikutus sekä lopputuotteet voivat olla erilaisia kuin luonnonrasituksessa.
- 5) Koestusaika on lyhyt, jolloin kaikkia turmeltumisilmiöitä ei laboratoriossa välttämättä tapahdu ollenkaan.
- 6) Koeolosuhteissa ei voida ottaa huomioon suunnittelu- ja työvirheiden sekä puutteellisen tai kokonaan puuttuvan huollon vaikutusta.

Em. seikoista johtuen luotettavan tutkimustiedon keräämiseksi tarvitaan useita rinnakkaisia, vertailukelpoisia koestuksia.

Pakkasenkestävyyttä voidaan tutkia materiaaliominaisuutena puhtaista materiaalikoe-kappaleista tai sitä voidaan tarkkailla suurempana kokonaisuutena osana kokonaisen rakenteen toimintaa. Materiaalikoe-kappaleiden etuna on helpompi käsiteltävyys ja halutun rasituksen järjestämisen yksinkertaisuus. Materiaalikokeissa tuloksiin vaikuttavia muuttujia on vähemmän, jolloin johtopäätösten tekeminen haluttujen suureiden osalta on luotettavampaa. Selkeä epäkohta pelkistetyissä materiaalikokeissa on, että todellisessa rakenteessa esiintyvien monimutkaisempien rasitustekijöiden vaikutuksesta tutkittava materiaali ei välttämättä toimikaan samalla tavalla todellisessa rakenteessa kuin yksinkertaistettujen materiaalikokeiden perusteella olisi odotettavissa. Rakennekoe-kappalekokeissa rasitus pyritään järjestämään enemmän luonnonrasitusta vastaavaksi. Testattavat koe-kappaleet voivat koelaitteistosta riippuen olla pinta-alaltaan jopa toistakymmentä neliometriä. Oleellisena osana testilaitteistoihin kuuluvat monipuoliset mittaus- ja säätölaitteistot, joilla sekä testattavan rakenteen että koelaitteistossa vallitsevan ilmaston ratkaisevia suureita voidaan seurata ja säätää. Täysmittakaavaisen rakennekoe-kappaleen käytöllä saavutetaan materiaalikoe-kappaleiden testaukseen verrattuna seuraavia etuja (KOKKO 1989, s.41):

- 1) Testattava kappale vastaa käytännön rakennetta.
- 2) Pakkasrasituksen lisäksi rakennetta rasittavat myös ympäristöolosuhteista aiheutuvat pakkovoimat.
- 3) Rasituksen taso ja laatu ovat hyvin seurattavissa ja kontrolloitavissa.
- 4) Rakennetyiskohtien sekä asennustoleranssien ja -virheiden vaikutukset pystytään huomioimaan.
- 5) Rakenteen todelliset vauriomekanismit pystytään havainnoimaan paremmin.
- 6) Samanaikaisesti voidaan vertailla erilaisten rakennevariaatioiden ominaisuuksia saman rasituksen alaisina.

Täysikokoisten rakennekoe-kappaleiden testauksen haittapuolena on hitaus, kalleus ja vaadittavan laitteiston monimutkaisuus. Lisäksi koetulosten tulkinta edellyttää testattavan

rakenteen rakennusfysikaalisen toiminnan ymmärtämistä kokonaisuutena. Suomessa suurien rakennekoekappaleiden testaukseen soveltuvia säälaitteistoja on ainakin teknillisissä korkeakouluissa Espoossa ja Tampereella sekä Valtion Teknillisellä Tutkimuskeskuksella.

3.2.2. Pakkasrasituskokeet

Pakkasrasituskokeet jakautuvat vaikutusperiaatteeltaan kolmeen erilaiseen tyyppiin: toispuolisiin ja jokapuolisiin jäädytys-sulatuskokeisiin sekä nollarajamenetelmiin. Lisäksi menetelmiin voidaan yhdistää suolarasitus, jolloin puhutaan pakkas-suolakokeista. Pakkasrasituskokeisiin voidaan tietyllä tapaa lukea myös luonnonrasitukselle altistavat kenttäkokeet.

Toispuolisissa jäädytys-sulatuskokeissa koekappaleeseen kohdistuu toistuva pakkasrasitus vain yhden pinnan kautta. Tällöin materiaalissa oleva kosteus pääsee siirtymään jäätymisrintaman edellä ja jäätymisprosessi vastaa melko hyvin normaalia luonnonrasituksessa syntyvää tilannetta ja vaurioituminen tapahtuu luonnonrasitukseen verrattavalla tavalla. Koejärjestely voidaan toteuttaa käyttäen soveltuvan kokoisia materiaalikoekappaleita, jolloin jäädytysrasitus on järjestettävissä kohtalaisen yksinkertaisellakin koelaitteistolla, tai suurempia rakennekoekappaleita, jolloin koestuksessa käytetään yleensä erityyppisiä säärasituslaitteistoja.

Tällä hetkellä luotettavuudeltaan ja toistettavuudeltaan käyttökelpoisimpana pidetään erityisesti kahta yhden pinnan kautta vaikuttavaa jäädytys-sulatuskoemenetelmää, ns. Borås-koetta eli **Slab testiä** sekä **CDF/CIF-kokeita**. Slab testissä 150x150x50 mm³:n koekappaleet kyljet ja toinen suurista tahkoista tiivistetään liimaamalla niihin kumieriste. Ennen jäädytys-sulatussykliä aloittamista koekappaleen annetaan esikostua 3 vuorokautta. Tämän jälkeen testattavalle avoimelle pinnalle kaadetaan jäädytettävä neste, joko vesi tai suolaliuos. Nesteen haihtuminen pinnalta estetään ja koekappale altistetaan toistuvalla jäädytys-sulatusrasitukselle ennalta määritellyn lämpötilamuutosyklin mukaisesti. Seurattavina suureina käytetään dilaatiota, engl. *residual dilation*, ja ultraäänen etenemisnopeutta koekappaleessa, engl. *ultrasonic pulse velocity*, tai ominaistaajuudenmittausta, engl. *fundamental frequency*. (LUPING 2000) CDF- ja CIF-kokeet ovat luonteeltaan hyvin Slab testin kaltaisia, mutta niissä

819
7

koekappaleiden kastuminen tapahtuu kapillaarisesti ylöspäin, kun Slab testissä testattava pinta on nestekerroksen peittämä ja kastuminen tapahtuu alaspäin. Koejärjestelyssä koekappaleen kyljet tiivistetään liimaamalla niihin kumieriste, mutta molemmat suuret tahkot jätetään auki. Näistä toinen on siis testattava pinta. Esikostumista testattavan pinna kautta annetaan tapahtua 7 vuorokautta ennen jäädytys-sulatussykliä aloittamista. CDF- ja CIF-kokeissa koekappaleen jäädytys ennalta määrätyn lämpötilamuutosyklin mukaisesti tapahtuu erityisessä jäädytysainekylvyssä. Seurattavat suureet ovat pinnan vaurioituminen (irtoavan aineksen määrä), koekappaleen vedenimu sekä sisäinen vaurioituminen (ultraäänien etenemisnopeus, engl. *ultrasonic transit time*, ja ominaisvärähtelytaajuus, engl. *fundamental transverse frequencies*, tai pituudenmuutos). Ennen mittauksia testipinta puhdistetaan ultraäänellä helposti irtoavasta aineksestä. (RILEM 1998)

Molempiin edellä kuvattuihin koemenetelmiin voidaan sisällyttää siis myös suolarasitus, joten ne voidaan lukea kuuluvaksi myös myöhemmin esiteltäviin pakkassuolakokeisiin.

Jokapuoliset jäädytys-sulatuskokeet eroavat toispuolisista nimensä mukaisesti siinä, että niissä koekappaleisiin kohdistuu pakkasrasitus kaikkien pintojen kautta, jolloin jäätymisrintama etenee kohti kappaleen ydintä. Usein esitetyn teorian mukaan rintaman edellä kulkeva vesi ei tällöin pääse purkautumaan kappaleesta ja koekappaleen sisäosiin muodostuu suuri hydraulinen paine, joka aiheuttaa betonin vaurioitumisen. Nykytietämyksen mukaan jäätymisrintamaan muualta huokosista kulkeutuva vesi aiheuttaa huokosiin kuitenkin alipaineen, kun lämpötila on -30°C:n yläpuolella (PENTTALA 1998, s. 18). Betonille käytettävissä jokapuolisissa jäädytys-sulatuskokeissa koekappaleen jäädytys tapahtuu yleensä ilmassa ja sulatus vedessä, jolloin päästään suurimpaan testausnopeuteen. Testeissä käytettävä syklimäärä, lämpötilat ja syklinopeus vaihtelevat käytettävissä olevan koelaitteiston jäädytyskapasiteetin, testattavien koekappaleiden koon ja testauksessa mahdollisesti noudatettavan standardin mukaan.

3.2.3. Suolarasituskokeet

Suolarasituskokeissa koekappaleet altistetaan suolaliuoksen kiteytymispaineelle. Rasitusta voidaan tehostaa yhdistämällä suolarasitukseen myös kappaleen jäätyminen. Luonnossa

tällaista yhdistettyä suola-jäätymisrasitusta esiintyy mm. siltojen reunapalkeissa. Yleisemmin suolan vaikutusta jäätymisprosessiin käsiteltiin jo aikaisemmin vaurioiteorioiden yhteydessä.

Suolarapaumakokeessa koekappale altistetaan laajenevalle suolalle, kuten natriumsulfaatille. Kiteytymispaineteorian mukaan kiteytyvä suola on tilavuudeltaan suurempi kuin vastaava vesiliuos, jolloin materiaalin huokosiin aiheutuu jäätyvän veden synnyttämää hydrostaattista painetta muistuttava painetila. Kokeessa kappaleen huokosiin imeytetään suolaliosta, jonka jälkeen sen annetaan jälleen kuivaa. Tällöin vesi poistuu, mutta suola kiteytyy huokosiin. Kun sykliä toistetaan, kasvaa huokosiin kiteytyvän suolan määrä jatkuvasti ja sisäinen paine kasvaa. Kappaleen vaurioitumista voidaan seurata punnitsemalla kussakin syklissä irtoavan materiaalin määrä. Ensimmäisten syklien aikana koekappaleen paino yleensä kohoaa, koska huokosiin kiteytyvän suolan määrä on suurempi kuin rapautumisen irrottaman materiaalin määrä. (KOKKO 1989, s.35-36)

Pakkasuolakokeissa jäätyminen tapahtuu kloridisuoloja sisältävässä liuoksessa. Ne voidaan luokitella kolmeen erilaiseen ryhmään: liuos-, pinta- ja upotusjäädetykskokeisiin. Liuosjäädetykskokeissa koekappaleiden jäätyminen ja sulaminen tapahtuvat hitaasti ja melko runsaassa liuosmäärässä. Tästä johtuen kokeiden kesto on yleensä pitkä. Vaurioituminen ei aina tapahdu pakkasrasituskokeille tyypillisesti pintojen rarautumisena vaan kappaleet saattavat säilyä täysin ehjinä tai sitten jo muutaman syklin aikana tuhoutua täysin. Pintajäädetykskokeissa kloridisuolaliuokselle altistetaan vain yksi koekappaleiden pinnoista. Näin jäätyminen tapahtuu nopeasti. Kokeessa rapautuminen pinnan reunoilla on yleensä suurempaa kuin keskellä. Upotusjäädetykskokeissa jäätyminen tapahtuu kylläisessä suolaliuoksessa ja sulatus puhtaassa huoneenlämpöisessä vedessä. Jäätyminen on nopeaa, jolloin koekappaleiden rapautuminen on tasaista. (KOKKO 1989, s.36-38)

3.2.4. Huokosrakenteen tutkimusmenetelmät

Millään huokoisuuden tutkimusmenetelmällä ei pystytä tutkimaan materiaalin huokoisuuden koko skaalaa vaan tarvittaessa eri menetelmien tuloksia on yhdisteltävä. Tulokset mittausalueiden rajakohdissa eivät yleensä kuitenkaan ole yhteneviä, jolloin yhdistämiseen

sisältyy suuria epävarmuuksia. Lichtnerin ja Hundtin mukaan eri mittausmenetelmien huokossäteenmittausalueet ovat likimain seuraavat: (SILVENNOINEN 1988, s.12)

- vedenimuun perustuvat menetelmät $> 0,1 \mu\text{m}$
- elohopeaporosimetria $75 \text{ nm} - 7,5 \mu\text{m}$.
- permeabiliteettiin perustuvat menetelmät $> 0,1 \mu\text{m}$
- diffuusiomenetelmät $> 1 \text{ nm}$
- sorptiomenetelmät $1 - 20 \text{ nm}$

Käytännössä elohopeaporosimetrian käyttökelpoinen huokoskokoalue on laajempi, $4 \text{ nm} - 30 \mu\text{m}$.

Täydellinen huokosanalyysi ei kuitenkaan useimmiten ole tarpeen, koska kiinnostuksen kohteena olevat materiaaliominaisuudet määräytyvät yleensä selkeästi tietyn kokoluokan huokoisuudesta.

Betonitekniikassa hyvin yleisesti käytetty huokosrakenteen tutkimusmenetelmä on **elohopeaporosimetria**. Menetelmä perustuu siihen, että elohopean kontaktikulma useimpia kiinteitä aineita vastaan on $> 90^\circ$, jolloin se saadaan tunkeutumaan tutkittavan tyhjiöidyn näytteen kapillaareihin vain käyttämällä painetta. Mitä pienempiin huokosiin elohopean halutaan tunkeutuvan, sitä suurempaa painetta joudutaan käyttämään. Betonin huokosrakennetta tutkittaessa käytettävä maksimipaine on noin 150 Mpa . Tätä suurempaa painetta käytettäessä tulosten tulkinta tulee yhä epävarmemmaksi, koska sekä elohopea itsessään että myös tutkittava näyte alkavat puristua kokoon. Suuri osa näytteen huokoisuudesta saadaan kuitenkin menetelmällä havainnoitua. Varsinaisen mittauksen suoritus on varsin nopeaa ja helppoa, mutta tarvittavan laitteiston hankinta ja ylläpito on kallista. (KELLOMÄKI, s.10)

Ongelman tulosten tulkinnassa muodostavat ns. mustepullohuokokset, jotka ovat muodoltaan ahdassuisia, mutta tilavuudeltaan kuitenkin suuria. Tällöin kokeessa ko. huokokset tulkitaan kooltaan pienemmiksi kuin ne todellisuudessa ovatkaan. (KELLOMÄKI, s. 11-12) Pakkaskestävyyttä arvioitaessa betonin kohdalla tulkintaa vaikeuttavat lisäksi jatkuvan hydratoitumisen sekä karbonatisoitumisen aiheuttamat muutokset huokosrakenteessa.

Huokoisuutta voidaan tutkia myös **kaasun adsorption** avulla. Menetelmässä hyödynnetään huokosissa tapahtuvaa kaasun tiivistymistä nesteeksi. Mesohuokoisuus (2-50 nm) paljastuu usein jo adsorptio- ja desorptiokäyrien erosta eli hystereesistä, koska tiivistyneellä nesteellä täyttyneet huokokset eivät tyhjene reversiibelisti.

Uusimpia sovelluksia betonin huokoisuuden tutkimisessa on kaasun permeabiliteetin määrittämiseen perustuvat menetelmät. Tunkeutuvana kaasuna käytetään ainakin heliumia. Tuloksien tulkinta perustuu Fickin lakiin pohjautuvaan laskentamalliin. (KELLOMÄKI, s.14) Vastaavalla tavalla voidaan käyttää myös erilaisia nesteitä korkean paineen avulla. Läpäisyn lisäksi voidaan hyvin tiiviillä betonilla mitata esim. veden tunkeutumaa tietyn ajan kuluessa. (CONCRETE SOCIETY 1985, s.28-35) Myös röntgensäteiden sirontaan perustuvalla menetelmällä on saatu elohopeaporosimetrian kanssa vastaavia tuloksia. (SILVENNOINEN 1988, s.13) Hyvin tiiviiden kiviaineksien läpäisevyyden tutkintaan on käytetty iskuaaltomenetelmää, jossa tutkittavan kappaleen toiseen päähän kohdistetaan voimakas painepulssi ja läpimenoaika ja paineenmuutos mitataan toisesta päästä. Koska betoni tiiviys on samaaluokkaa kuin tällaisen kiviaineksen, voidaan menetelmää soveltaa myös betonitutkimuksessa. (CONCRETE SOCIETY 1985, s.45)

Huokoisuutta voidaan määrittää visuaalisesti käyttämällä tutkittavasta materiaalista valmistettuja näytteitä, joita sitten tutkitaan erilaisilla mikroskoopeilla. Analysoinnissa voidaan käyttää optisia, kuten stereo- tai polarisaatiomikroskooppia, tai erilaisia elektronimikroskooppeja. Tulkintaa voidaan helpottaa impregnoimalla näyte haluttuja ominaisuuksia sisältävällä aineella tai värjäämällä näytteen pinta, jolloin huokosrakenteen vaihtelu saadaan paremmin esiin. Tällainen menetelmä on mm. betonin sisäisen rakenteen tutkimuksessa yleisesti käytetty ohuthietutkimus, jossa 20 - 30 µm:n paksuinen näyte impregnoidaan esim. fluoresoivalla hartsilla. Tulkinnat tehdään mikroskooppien avulla otetuista kuvista joko silmämääräisesti tai kuva-analyysiä varten kehitettyjä tietokoneohjelmia hyväksi käyttäen. Optisesti määritetään mm. betonin ilmahuokosten suojavaikutusta kuvaava huokosjako eli keskimääräinen betonissa olevien huokosten välisen etäisyyden puolikas. Mikroskooppimenetelmät vaativat kuitenkin melko paljon työtä luotettavuuden takaamiseksi ja näytteiden edustavuudella on hyvin suuri merkitys tuloksiin.

Soveltavasta betonin huokoisuuden arvioimisesta on kysymys myös erilaisten vedenimukokeiden kohdalla. Näitä vedenimuun perustuvia pakkasenkestävyyden arviointikeinoja kuvataan myöhemmin tarkemmin kappaleessa ”3.2.4. Vedenimuun perustuvat menetelmät”.

3.2.5. Lujuusominaisuuksien mittaukset

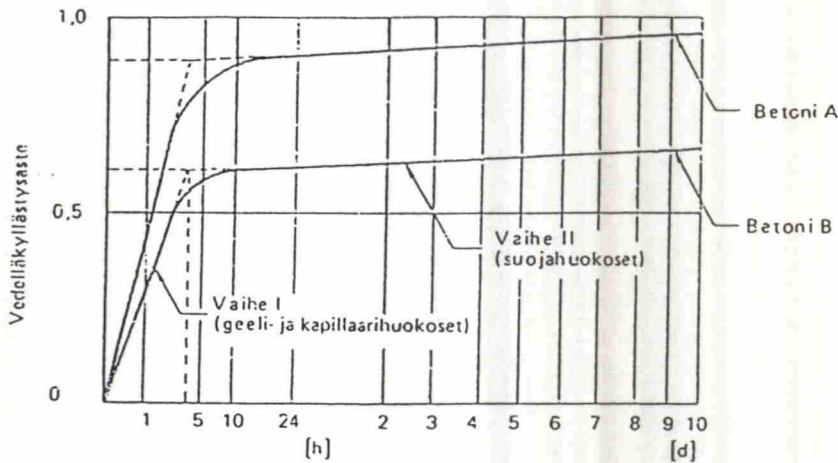
Varsinkin vanhemmassa kirjallisuudessa käytetään usein betonin puristuslujuutta myös pakkasenkestävyyttä kuvaavana suurena. Tällaista yksinkertaistusta ei kuitenkaan voida tehdä. Betonin pakkasenkestävyys on aina hyvin usean toisiinsa vaikuttavan asian summa, jota voidaan huonosti arvioida vain yhtä ominaisuutta mittaamalla eikä puristuslujuus ole edes paras mahdollinen pakkasenkestävyyteen korreloiva suure. Hyvin korkean lujuuden omaavia betoneita voida kuitenkin normaaleissa käyttöolosuhteissa pitää yleensä varsin hyvin pakkasenkestävinä.

Lujuusominaisuuksista pakkasenkestävyyteen korreloi paremmin betonin taivutusvetolujuus. Jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen koekappaleissa tapahtunut sisäinen vaurioituminen näkyy selkeämmin juuri taivutusvetolujuustuloksissa, puristuslujuuden arvot heikkenevät yleensä vasta, kun kappaleiden vauriot ovat jo silmin nähtävissä. Betonikoekappaleilla taivutusvetolujuus määritetään yleensä palkkikoekappaleista, jolloin tukipisteiden väli koestettaessa on 300 mm ja keskipisteeseen nähden symmetrisesti sijaitsevien pisteuormien väli palkin yläpinnalla on 100 mm. Määrittäminen tehdään vertailemalla materiaalin taivutusvetolujuuden arvoja ennen pakkasrasitusta ja pakkasrasituksen jälkeen. Betonille kriteerinä on esitetty, että 200 jäädytys-sulatussyklin jälkeen lujuuden tulee olla vähintään 2/3 lähtötasosta, että betonia voidaan pitää pakkasenkestävänä. Taivutusvetolujuusmittausten yhteydessä voidaan samalla määrittää materiaalin maksimideformaatio ennen murtoa. Tätä tietoa voidaan käyttää vertailukohtana jäätymislaajenemamittausten tulosten tulkinnassa.

3.2.6. Vedenimuun perustuvat menetelmät

Pakkasenkestävyyden kannalta materiaalin pieni vedenimukyky ja alhainen vedellätytymisaste ovat suotavia, koska suureilla kuvataan materiaalin huokoisuutta ja

vedellä täyttymätöntä huokostilaa, joka toimii jäätyvän veden laajenemisreservinä. Tarkasteltaessa veden imeytymistä huokoiseen materiaaliin on oleellista muistaa, että imeytymisprosessi on kaksivaiheinen. Ensin täyttyvät nopeasti kaikki kapillaarihuokokset eli huokokset, joihin vesi imeytyy suoraan kapillaarisen imun vaikutuksesta. Tämän jälkeen seuraa huomattavan hidask vaihe, jonka aikana täyttyvät kapillaarisen imun aikana syntyneet ilmataskut. Vaihe edellyttää, että huokosiin jäänyt ilma liukenee huokosveteen ja diffundoituu sitä kautta pois. Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 4. (KOKKO 1989, s.26)



Kuva 4. Vedelläkylästyssasteen kasvu huokoistamattomassa betonissa A ja huokoistetussa betonissa B. (Lähde: BY 32 1989, s.27)

Kapillaarisen imeytymisen jälkeen yksittäisen ilmahuokoksen täyttymiseen vaadittava aika voidaan laskea Fagerlundin mukaan seuraavasti: (Vesikari 1998)

$$t = 9,35 \cdot 10^6 \cdot \frac{r^3}{\delta_1}, \quad (1)$$

missä r = huokosen säde [m]

δ_1 = ilman diffuusiokerroin sementtikivessä [m^2/s] (Fagerlund: 10^{-11} - 10^{-12})

Vedenimukykyä määritettäessä mitataan vedenimeytymisen ensimmäisen vaiheen kosteuspitoisuuksia. Kokeessa koekappale upotetaan huoneenlämpöiseen veteen vaiheittain, jolloin kapillaarinen imu pääsee täyttämään kaikki soveltuvan kokoiset huokokset ja suurempiin huokosiin muodostuvien ilmasulkeutumien määrä jää pienemmäksi kuin esim.

kertaupotuksella. Tulos saadaan imeytyneen vesimäärän ja kappaleen kuivapainon suhteena. Mittauksella oletetaan yleensä saatavan vedenimukyvyyn arvo, joka on hyvin lähellä normaaleissa käyttöolosuhteissa saavutettavaa maksimivedenimukykyä. (KOKKO 1989, s.27)

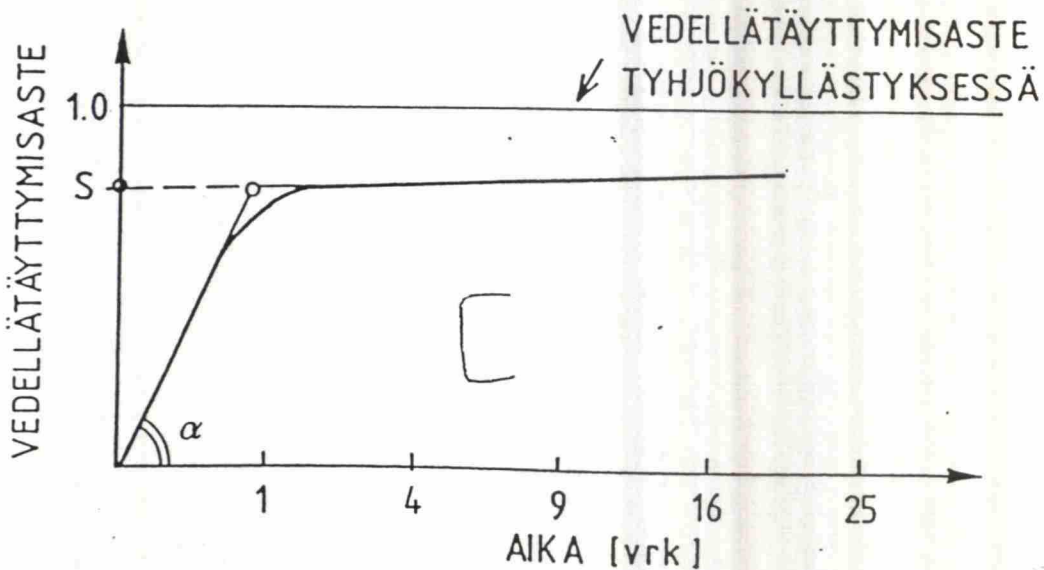
Kapillaarisen vedenimukyvyyn määrittäminen tapahtuu kuten vedenimukyvyinkin, mutta koekappale on upotettuna veteen vain osittain, esim. 1/10 korkeudestaan, ja imeytynttä vesimäärää seurataan ajan funktiona. Imeytyneen vesimäärän suhde tyhjiökyllästyksellä imeytettyyn määrään piirretään ajan neliöjuuren funktiona, jolloin käyrälle piirrettyjen suorien leikkauspisteen sekä alkuimeytymisen kulmakertoimen avulla lasketaan GC-arvo, ks. kuva 5:

$$GC = -14,5 - 0,31 * \alpha + 0,205 * S, \quad (2)$$

missä α = alkuimeytymisen kaltevuus

S = vedellätyttymisaste taitekohdassa

Materiaali ei ole pakkasenkestävää, jos GC-arvo on suurempi tai yhtäsuuri kuin nolla.



Kuva 5. Pakkaskestävyysarvon GC muuttujien määrittäminen. (Lähde: KOKKO s.34)

Vedellätyttymisaste eroaa vedenimukyvyistä siten, että määrittämisessä pyritään täyttämään vedellä koko kappaleen huokostila, jolloin siis vedellätyttymisen toinenkin vaihe olisi kokonaisuudessaan tapahtunut. Vesiupotuksessa toinen vaihe tapahtuu täydellisesti hyvin hitaasti, joten prosessia nopeutetaan ulkoisilla pakkokeinoilla, kuten korkealla vedenpaineella

tai huokosilman poistolla imemällä koekappalekammioon tyhjiö. Betonin suojahuokossuhdetta (standardin mukainen määrittely, SFS 4475) määrittäessä käytetään 15 MPa:n vedenpainetta 24 tunnin ajan. Koekappale peitetään vedellä alipaineen vallitessa ja kun normaali ilmanpaine palautetaan, tunkeutuu vesi huokosrakenteeseen. Suojahuokossuhde P_r lasketaan kaavalla:

$$P_r = \frac{P_a}{P_w + P_a}, \quad (3)$$

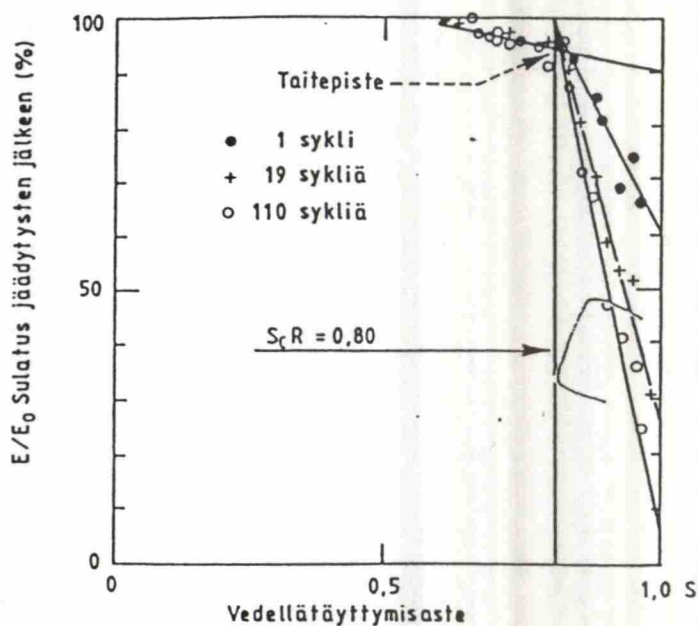
missä P_a = painekäsittelyssä imeytynyt vesimäärä

P_w = normaalipaineessa imeytynyt vesimäärä

Suojahuokossuhteella on asetettu erilaisia vähimmäisvaatimuksia riippuen rasitusolosuhteista, joihin rakenne joutuu.

Vedellääytymisaste yksinään ei kuvaa kovinkaan tarkasti materiaalin pakkasenkestävyyttä, mutta yhdessä vedenimukyvyn ja lujuuden kanssa saadaan jo parempi arvio pakkasenkestävyydestä. (KOKKO 1989, s.28-29)

Fagerlundin kriittisen vedellääytymisasteen määrittäminen perustuu ajatukseen, että huokoisella rakennusmateriaalilla on olemassa vedellääytymisen arvo, jota suuremmilla vesipitoisuuksilla materiaali ei ole enää pakkasenkestävää. Täysin vedellä kyllästettynä useimmat materiaalit eivät kestäisi yhtään jäädytys-sulatussykliä. Näin ollen materiaali on käyttökohteessaan pakkasenkestävää, jos todellinen vedellääytymisaste, S_{act} , on aina pienempi kuin kriittinen arvo, S_{cr} . Menetelmässä käytetään koekappalesarjaa, jossa vedellääytymisasteet vaihtelevat esim. välillä 0,6-1,0. Kappaleet altistetaan halutulle jäädytys-sulatusrasitukselle, jonka jälkeen määritetään materiaalin lujuus, kimmokerroin tai dilaatio sekä havainnoidaan silmämääräisesti näkyvät vauriot. Eri kyllästysasteista määritetään ko. rasitusohjelmalle kriittinen kyllästysaste, ks. kuva 6, joka näkyy mitatun suureen kuvaajan taitepisteinä. Menetelmän etuna on se, että mitattavia suureita voi olla yhtä aikaa useita ja kokeet ovat varsin yksinkertaisia toteuttaa.

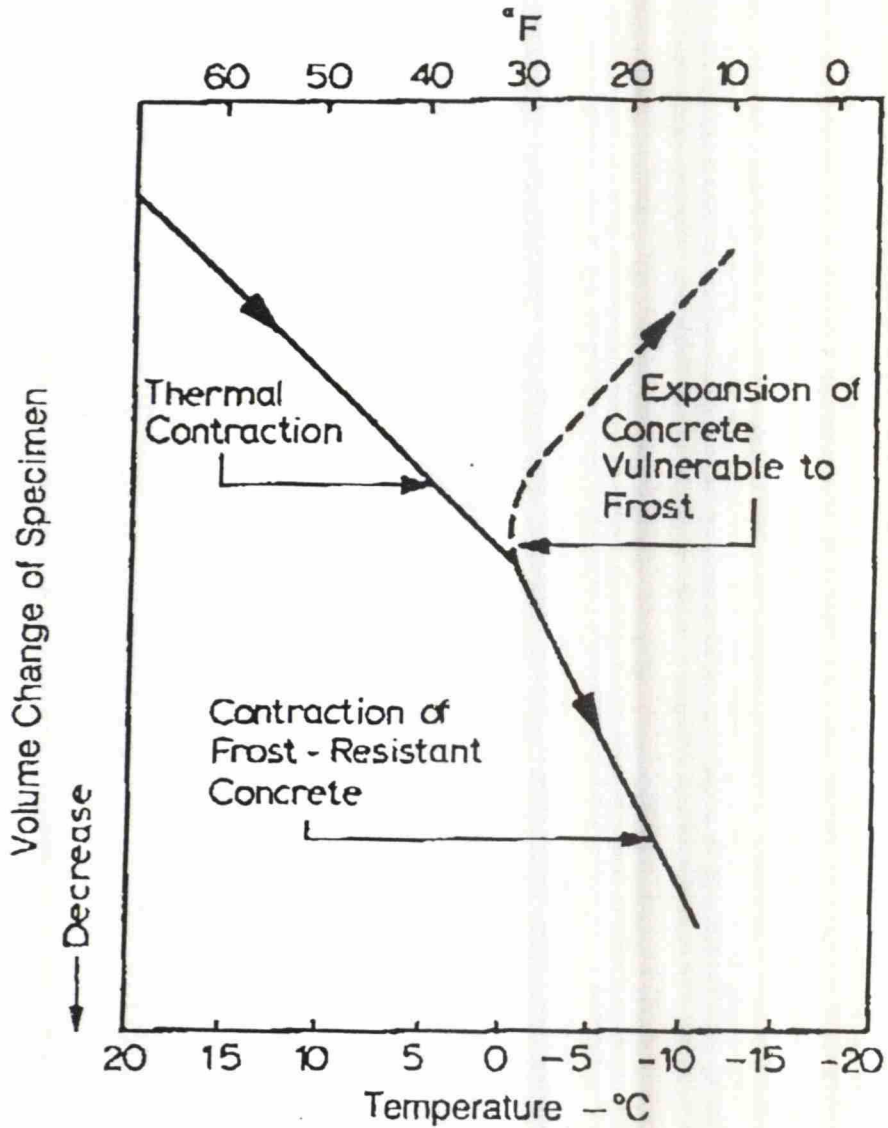


Kuva 6. Kriittisen vedellätytymisasteen määrittäminen luonnon kalkkikivellä. S_{cr} löydetään kimmokertoimen taitepisteestä. (Lähde: KOKKO s.30)

3.2.7. Dilaatiomittaukset

Jäätymislaajenema- eli dilaatiomittauksissa mitataan tietyssä kosteustilassa olevan koekappaleen ulkomittojen muutosta jäätymisprosessin aikana tai jälkeen. Mittojen, yleensä koekappaleen pituuden, muutosta voidaan seurata käytetystä menetelmästä riippuen joko jatkuvasti lämpötilan laskiessa tai vertaamalla pituudenmuutosta eri lämpötila-alueilla. Mittauksia voidaan tehdä myös toistuvien jäädytys-sulatussyklien jälkeen. Tulosten tulkinnassa kappaleen dilaatiota voidaan verrata esimerkiksi materiaalin maksimaaliseen taivutuskokeella määritettyyn deformaatioon. Syklisessä jäädytys-sulatusrasituksessa kappaleeseen jäävä pysyvä muodonmuutos on merkki pakkasvauriosta. Suomessa käytetään betonille jäätymislaajeneman mittausmenetelmää, standardi SFS 5448, jossa dilaatio mitataan yhdellä jäädytyskerralla. (KOKKO 1989, s. 31-33)

Kuvassa 7 on esitetty pakkasenkestävän ja vaurioituvan betonin tilavuudenmuutos lämpötilan funktiona.



Kuva 7. Pakkasenkestävän ja vaurioituvan betonin tilavuudenmuutos jäähdtyksen aikana. (Lähde: NEVILLE 1995, s.543)

3.2.8. Käyttöikämallinnus

Viime vuosina betonirakenteiden vaurioitumistutkimus on keskittynyt yhä enemmän erilaisten käyttöikämallien kehittämiseen. Käyttöikällä tarkoitetaan aikaa, jonka kokonainen rakennusosa tai rakenne pysyy tarkoitukseensa soveltuvana ja kestää asianmukaisella luotettavuudella kaikki todennäköiset siihen kohdistuvat rasitukset. Yksittäisistä vaurioitumismalleista pyritään siis yhdistämään kattava malli tai kaava, jonka avulla vaurioitumisen etenemisen rajoittama rakenteen käyttöikä voidaan riittävällä tarkkuudella arvioida. Tällainen mallinnus sisältää suuren määrän erilaisia olosuhde- ja materiaalimuuttujia, joiden kaikkien huomioiminen laskennassa on hyvin vaikeaa. Useimmiten käyttöikämallit ovatkin olleet laskennallisista syistä voimakkaasti yksinkertaistettuja, jolloin niiden avulla on voitu tarkastella vain muutaman valitun muuttujan vaikutusta säilyvyyteen. Myös ympäristöolosuhteita on kuvattu yleensä korkeintaan muutamalla vakiotermillä, jolloin tulosten luotettavuus on kärsinyt. Pohjoismaissa betonin käyttöikämallinnusta ovat kehittäneet mm. ruotsalaiset Göran Fagerlund ja Kyösti Tuutti sekä Suomessa Sven Pihlajavaara ja Seppo Matala. Lisäksi Kim Jolkkonen on tutkinut pinnoitteiden vaikutusta betonirakenteen säilyvyyteen lisensiaatintyössään 2001.

Nykyaikainen tietokonetekniikka mahdollistaa kuitenkin yhä monipuolisempien käyttöikämallien laskennan kohtuullisessa ajassa. Ensimmäisen suomalaisen betonirakenteen käyttöikälaskentaan tarkoitettun simulaatio-ohjelman julkaisi Erkki Vesikari (VESIKARI 1998). Ohjelman avulla pystytään tarkastelemaan yksiulotteisesti betonirakenteen käyttäytymistä 150 vuoden laskenta-ajanjaksolla vaikkapa tunnin välein. Mallinnuksen kohteina ovat olleet säätekijöiden ja materiaalin lisäksi myös rakenteen lämpötila ja kosteusjakaumat sekä turmeltuminen. Jos käyttäjän antamat lähtötiedot ja reunaehdot ovat riittävän tarkkoja, ohjelma huomioi laskennassa hyvin suuren määrän erilaisia säilymiseen vaikuttavia tekijöitä. Ohjelman ensimmäisen version suurimmat puutteet ovat halkeamakorroosiomallinnuksen puuttuminen sekä laskennan nopeuttamiseksi valitun puoli-implisiittisen laskentamenetelmän asettamat rajoitukset laskettavan rakenteen dimensioille.

3.3. Betonin pakkasenkestävyyteen vaikuttavia asioita

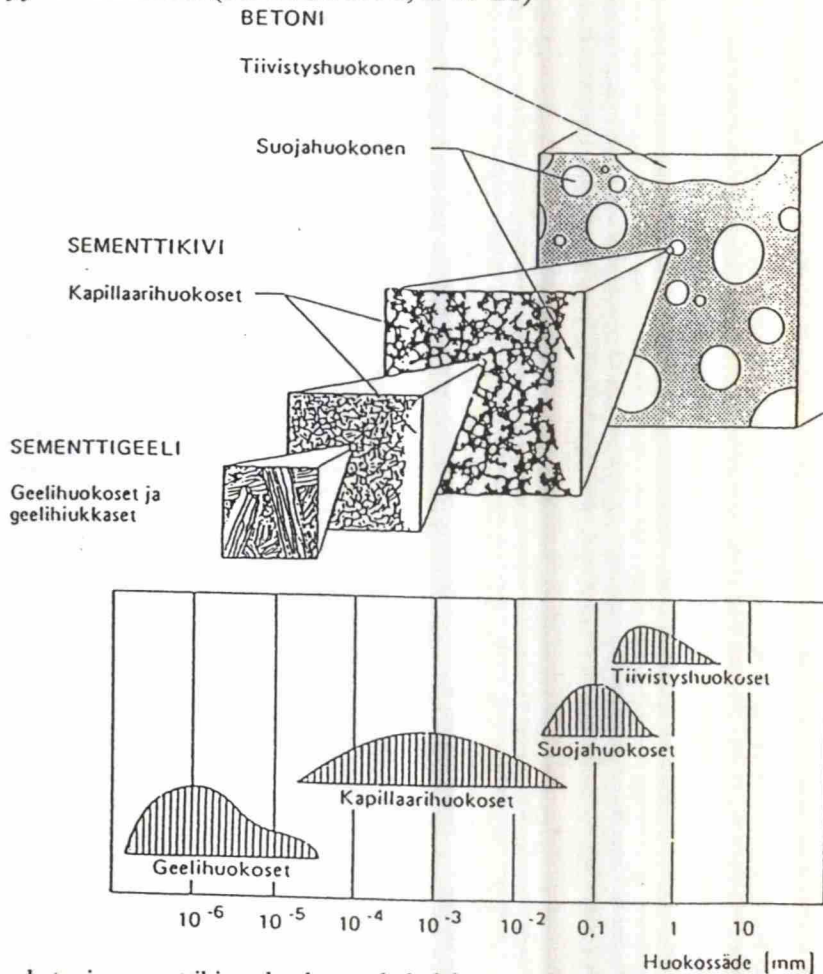
3.3.1. Ilmamäärä ja huokosrakenne

Betonin pakkasenkestävyyteen vaikuttaa lukuisat erilaiset raaka-aineisiin, koostumukseen, valmistukseen, jälkihoitoon ja käyttöolosuhteisiin liittyvät asiat. Yksittäisen ominaisuuden määrittäminen ja sen vaikutuksen arviointi ei vielä anna kovinkaan luotettavaa kuvaa lopullisen rakenteen todellisesta pakkasenkestävyydestä, vaan kaikkien osatekijöiden yhteisvaikutus määrää materiaalin ominaisuudet. Useimmat betonin ominaisuuksista vaikuttavat toinen toisiinsa, esim. tuoreen betonimassan sisältämän ilmamäärän lisäys vaikuttaa parantavasti kovettuneen betonin pakkasenkestävyyteen, mutta toisaalta lissääntyvä sementtikiven huokoisuus alentaa betonin lujuusominaisuuksia. Näin ollen hyvä pakkasenkestävyys onkin betonin eri ominaisuuksien optimoitu kompromissi, joka saavutetaan kulloinkin kyseessä olevien olosuhteiden määräämällä tavalla.

Tärkein yksittäinen betonin pakkasenkestävyyteen vaikuttava seikka on kovettuneen betonin huokosrakenne. Tapauksesta riippuen huokoisuuden kokonaismäärä vaihtelee kovettuneessa betonissa välillä 12-18 prosenttia ja suurin osa tämän huokostilavuuden sisältämästä vedestä on jäätymsykyistä. Tämän huokosrakenteen säätely on paras tapa vaikuttaa betonin pakkasenkestävyyteen. (MATALA 1991, s. 21) Kuvassa 8 on esitetty eräs mahdollinen sementtikiven huokosten kokojakauma.

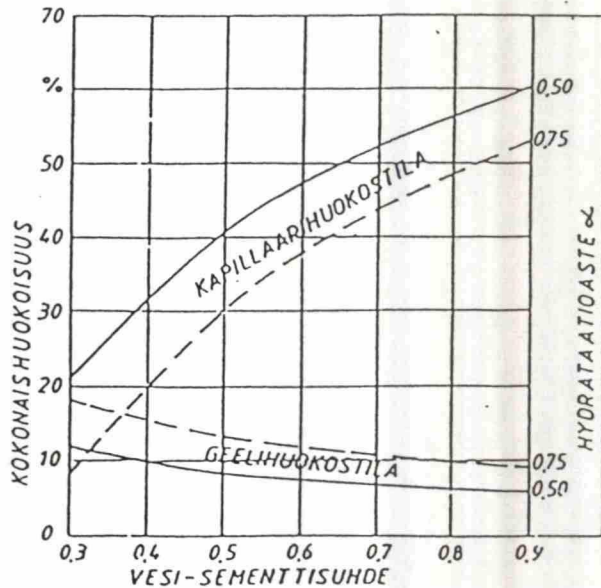
Pakkasenkestävyyden kannalta sementtikiven kapillaarihuokokset ovat ongelmallisia. Ne ovat sementin hydrataation yhteydessä syntyviä huokosia, joiden koko vaihtelee alueella 5 nm - 5µm ja jotka kykenevät täyttymään kapillaarisesti vedellä. Tätä pienemmät huokokset, geelihuokokset, ovat käytännössä aina veden täyttämiä, mutta ne eivät ole pakkasenkestävyyden kannalta oleellisia, koska niissä oleva vesi ei huokoskoon pienuudesta johtuen jäädy normaaliolosuhteissa. Kapillaarihuokosia suuremmat huokokset, suojahuokokset, eivät enää täyty kapillaarisesti, jolloin ne toimivat tyhjänä tilana, johon kapillaarihuokosissa jäätyvän veden aiheuttama paine voi purkaantua. Kapillaarihuokosten muodostuminen on riippuvainen betonissa käytetystä vesi-sementtisuhteesta. Syntyvien huokosten osuus sementtikiven kokonaistilavuudesta on sitä suurempi mitä suurempaa vesi-sementtisuhdetta on käytetty ja mitä alhaisempi on sementin hydrataatioaste, ks. kuva 9. Kun suhde ylittää

arvon 0,60-0,65, muodostuu kapillaariverkostosta lisäksi yhtenäinen yli rakenteen, jolloin betonin lujuus alenee merkittävästi ja läpäisevyys kasvaa. Hyvää pakkasenkestävyyttä tavoiteltaessa on siis oleellista kiinnittää huomiota betonin vesi-sementtisuhteeseen, jotta kapillaarihuokoisuus jäisi mahdollisimman pieneksi, sekä jälkihoitoon, jotta hydrataatioaste saataisiin mahdollisimman suureksi. Valun yhteydessä betoniin jäävillä tiivistyshuokosilla ei suuren kokonsa ja pitkien keskinäisten etäisyyksien vuoksi ole merkitystä pakkasenkestävyyden kannalta. (MATALA 1991, s. 17-21)



Kuva 8. Huokostetun betonin sementtikiven huokosten kokojakauma. (Lähde: BY 32 1989, s.14)

Täydellinen teorettinen sementin hydrataatio vaatii noin vesi-sementtisuhdetta 0,4. Tätä suuremmalla suhteella betoniin jää aina ylimääräistä vettä. Käytännössä hydrataatio ei koskaan tapahdu täydellisesti, joten hydrataatiossa sitoutumatonta vettä jää betoniin jo pienemmälläkin vesi-sementtisuhteella.



Kuva 9. Kapillaari- ja geelihuokostilojen osuus sementtikiven kokonaishuokostlavuudesta vesi-sementtisuhteen ja hydrataatioasteen funktiona. (Lähde: MATALA 1991, s.17)

Pakkasenkestävyyttä voidaan siis parantaa sopivan kokoisella suojahuokoistuksella. Ilmahuokosia syntyy betoniin luonnostaan sekoituksen ja tiivistyksen yhteydessä, mutta niiden koko ja jakautuminen ei yleensä yksinään riitä varmistamaan betonin pakkasenkestävyyttä. Tällainen huokoisuus ei myöskään ole tasaisesti betonimassaan jakautunutta. Huokoistavilla lisäaineilla sementtikiveen tuoreeseen betonimassaan synnytetään riittäväällä tiheydellä halkaisijaltaan 0,01-0,5 mm:n huokosia, jotka toimivat pakkasvaurioilta suojaavana tyhjätilana. Ilmamäärän tavoitearvot riippuvat tällöin muun huokoisuuden rakenteesta ja sen vaikutuksesta pakkasenkestävyyteen. Jos kapillaarihuokoisuuden määrä on pieni, on myös jäätyvän veden määrä betonissa pieni, jolloin suojahuokoistuksen tarve on vähäisempi. Taulukossa 1 esitetty ilmamäärän vähimmäisarvot Tielaitoksen julkaisemien sillanrakennuksen yleisien työohjeiden mukaan, kun massan maksimirakko on vähintään 16 mm. (MATALA 1991, s.21-22)

Tärkeä betonissa olevan ilman pakkasuojavaikutusta kuvaava parametri on huokosjako eli etäisyystekijä. Suuri ilmamäärä ei takaa betonin pakkasenkestävyyttä, jos ilmahuukokset ovat epäedullisesti betoniin jakautuneina. Huokosjako tarkoittaa ilmahuukosten keskimääräisen etäisyyden puolikasta eli kuinka pitkän matkan maksimissaan huukosissa jäätyvän veden aiheuttama paine joutuu siirtymään purkautuakseen lähimpään ilmahuukokseen. Fagerlund

antaa pakkasenkestävyyden kannalta kriittisiksi arvoiksi huokosjaolle $< 0,25$ mm ja ilmamäärälle $> 3,5$ %. (FAGERLUND 1987)

Taulukko 1. Betonimassan vähimmäisilmamäärävaatimukset

Vesi-sideaine- suhde	Ilmamäärän vähimmäisarvo eri pakkasenkest.luokissa			
	P20	P30	P50	P70
$> 0,50$	3%	4%	-	-
0,45	2%	3%	5%	(7%)
0,35	ei vaat.	2%	2%	3%
$< 0,35$	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.	ei vaat.

Toinen huokoisuuden suojavaikutuksen arvioinnissa käytettävä suure on suojuhuokossuhde, joka kertoo sen huokostilavuuden osuuden, joka ei täyty vedenimeytymiskokeessa. Käytännössä parametrin arvo määritetään normaaliolosuhteissa tapahtuvan vedenimun ja korkea paineen avulla vedellä täyttyvien huokosten tilavuussuhteena. Julkisivubetoneille suojuhuokossuhteen suurin sallittu minimiarvo on 0,15 - 0,20. (PENTTI 1988, s.30)

Betonin huokosrakenne muuttuu ikääntymisen vaikutuksesta. Pääasialliset vaikutukset ovat geeli- ja kapillaarihuokosjakauman muutokset sekä sementtikiven säröily. Tärkein muutoksia aiheuttava tekijä on betonin karbonatisoituminen ilman hiilidioksidin vaikutuksesta. Karbonatisoituminen aiheuttaa huokosrakenteen muutosten ohessa myös sementtikiven kutistumista ja betonin kosteustilan muuttumisen. Näitä muutoksia tapahtuu kaikissa betoneissa sideaineen laadusta riippumatta. (MATALA 1991 s. 22) Sideaineessa tapahtuvia ikääntymismuutoksia käsitellään tarkemmin kappaleessa ”3.3.5. Sideaine”.

Huokosrakenteen muodostumiseen vaikuttavat osaltaan myös betonimassan notkeus sekä valmistuksessa käytetty sekoitusaika ja tiivistys. Jäykässä massassa erottuminen on vähäisempää ja betonin luonnollinen ilmapitoisuus jää suhteessa suuremmaksi. Myös liian voimallinen tiivistys lisää erottumista ja suojaavia ilmahuokosia poistuu tarpeettomasti betonista. Vastaavasti pidempi sekoitusaika lisää massaan sekoittuvan ilman määrää ja jakaa ilmahuokokset tasaisemmin betonimassaan.

3.3.2. Lujuus ja vesisementtisuhte

Puristuslujuutta käytetään usein suoraan kuvaamaan betonin pakkasenkestävyyttä, mutta merkittävämpi kovettuneen betonin ominaisuus pakkasenkestävyyden arvioinnin kannalta on betonin vetolujuus. Puristus- ja vetolujuuden välillä vallitsee normaalibetonien kyseessä ollessa kuitenkin melko kiinteä yhteys, jonka vuoksi mittausteknisesti helpommin määritettävää puristuslujuutta käytetään usein riittävällä tarkkuudella kuvaamaan myös ko. massan vetolujuusominaisuuksia. Tilanne tietenkin muuttuu oleellisesti, jos massanvalmistuksessa käytetään esim. polymeeripohjaisia lisäaineita tai muita merkittävästi normaalia puristus-vetolujuus -suhdetta muuttavaa menettelyjä tai jos massan koostumus poikkeaa suuresti normaalista (esim. korkealujuusbetonit). Kuitenkin normaalilujuuksisen betonin pakkasenkestävyyssominaisuuksien luotettava arviointi pelkästään puristuslujuuden pohjalta tehtyjen päätelmien pohjalta on hyvin epävarmaa, mm. lisähuokostuksen vaikutus puristuslujuuteen ja pakkasenkestävyyteen on juuri päinvastainen. Keskilujuuksisissa betoneissa yhden prosentin lisäys ilmamäärässä laskee lujuutta noin viisi prosenttia.

Riittävän suuren puristuslujuuden, 80-100 MPa, omaavaa betonia pidetään yleensä pakkasenkestävänä ilman lisähuokoistustakin. Tällaisen korkealujuuksisen betonin sideaine ei kuitenkaan saa sisältää silikaa yli 6 % eikä lentotuhkaa yli 25 % ja vesi-sideainesuhteen tulisi olla alle 0,35. Normaalin lujuustason betoneilla lisähuokoistus pakkasenkestävyyden varmistamiseksi on aina tarpeen. Normaalin lujuusluokan betoneilla vesi-sideainesuhde on aina niin korkea, että pakkasenkestävyyttä säätelevä makrohuokosalueen kapillaarihuokoisuus jää suureksi ja näin myös jäänymiskykyistä vettä on betonissa paljon. Lujuutta ei saisi kuitenkaan pitää suoraan pakkasenkestävyyden mittarina, koska varsinkin lujempien betonien parempi pakkasenkestävyys on yleensä seurausta matalamman vesi-sementtisuhteen tai sivutuotteiden käytön seurauksena parantuneesta huokosrakenteesta. Parempi huokosrakenne on siis myös kasvattanut betonin lujuutta. Jos lujuutta käytetään pakkasenkestävyyttä mittaavana suureena, tulisi myös määritellä lujuuden synty tapa. (MATALA 1991, s.24-26)

Vesi-sementtisuhteen vaikutus betonin pakkasenkestävyyssominaisuuksiin on hyvä esimerkki siitä yhteisvaikutusten monimutkaisuudesta, jolla betonin ominaisuudet riippuvat toinen toisistaan. Vesi-sementtisuhteen muuttaminen saa aikaa monenlaisia muutoksia eri betonin

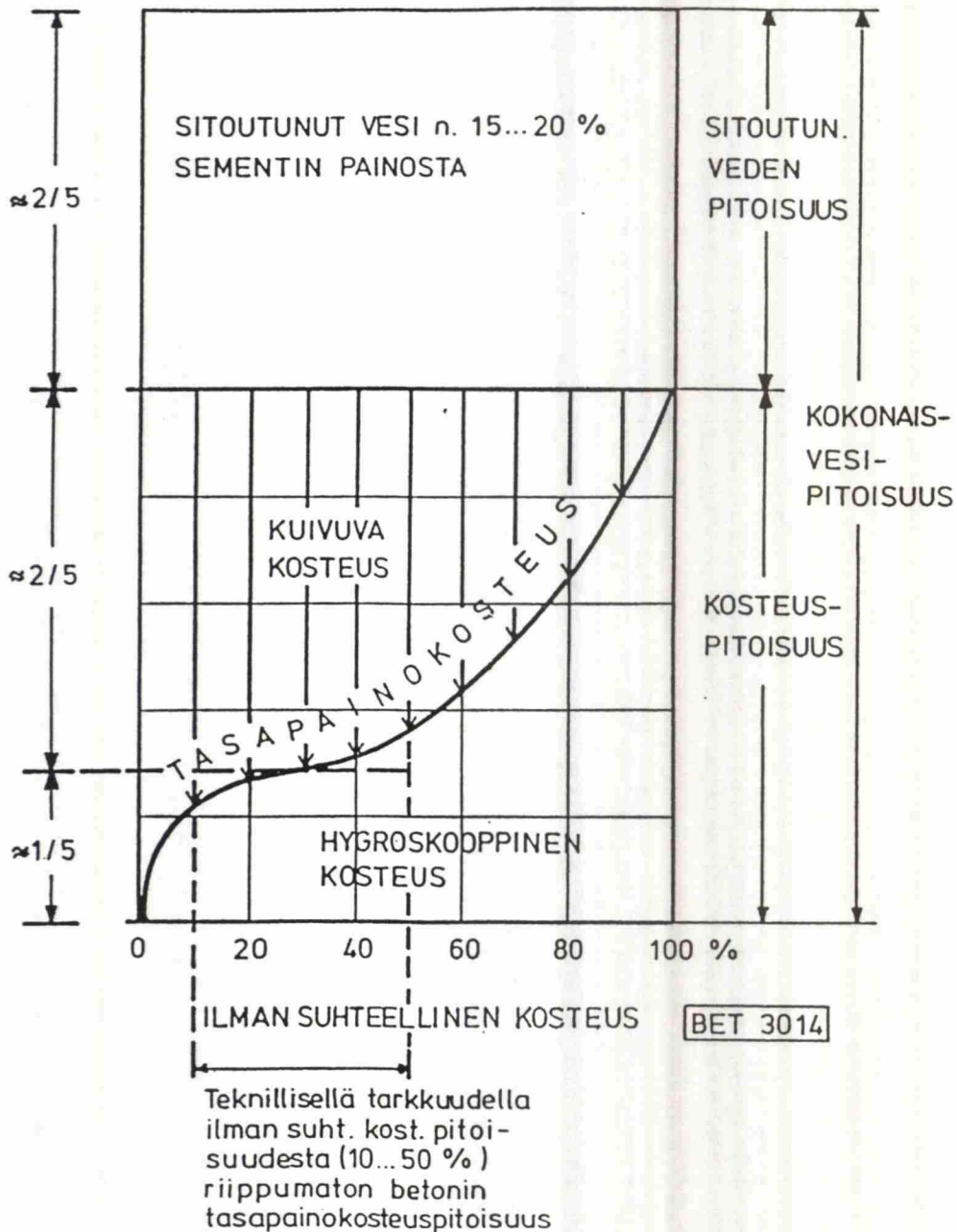
ominaisuuksissa. Pääsääntöisesti voidaan kuitenkin sanoa, että ko. suhteen pienentäminen parantaa pakkasenkestävyyttä. Pienemmän vesisementtisuhteen omaavasta betonista tulee tiiviimpää, jolloin sen vedenimu on vähäisempää ja jäätymskykyisen veden määrä huokosissa on pienempi. Myös huokosrakenne muotoutuu kokojakaumaltaan ja jaoltaan edullisemmaksi pienemmällä vesi-sementtisuhteella, kuten aikaisemmin jo esitettiin. Alhaisen vesi-sementtisuhteen mukanaan tuomat ongelmat liittyvät erityisesti tuoreen massan työstettävyyteen ja käsiteltävyyteen.

3.3.3. Suhteellinen kosteuspitoisuus

Huokoinen materiaali pyrkii aina tasapainoon ympäristössä vallitsevien kosteusolosuhteiden kanssa. Tasapainostilassa materiaali sisältää sitä enemmän vettä, mitä korkeampi on ympäristön suhteellinen kosteus. Ympäristön kosteuspitoisuudesta riippuen vettä voi esiintyä useassa erilaisessa muodossa. Sementin hydraataatiossa vesimolekyylit sitoutuvat muihin sementtikiven yhdisteisiin ja muodostavat ns. kidevettä, jonka poistamiseen tarvitaan hyvin korkea lämpötila ja joka samalla johtaa koko kiderakenteen tuhoutumiseen. Tällä kemiallisesti sitoutuneella rakenteellisella vedellä ei luonnollisestikaan ole mitään tekemistä betonin pakkasvaurioiden syntymisen kanssa vaan se on osa sementtikiven rakennetta. Betonin sisältämän veden määrää ja jakautumista on havainnollistettu kuvassa 10.

Kun ympäristön suhteellinen kosteus kasvaa huokosissa vallitsevaa kosteutta suuremmaksi, siirtyy niihin vesihöyryn diffuusion vaikutuksesta lisää vesimolekyylejä, jotka adsorboituvat huokosten pintaan. Alhaisessa suhteellisessa kosteudessa (alle 40-45 %) betoni sisältää kideveden lisäksi vain tällaisia huokosrakenteen pintaan fysikaalisten pintavoimien vaikutuksesta sitoutuneita vesimolekyylejä, jotka voidaan irrottaa huokosista 105°C:n kuivatuksella. Adsorboituva vesimolekyylikerros on aluksi vain yhden molekyylin paksuinen, mutta kosteuspitoisuuden kasvaessa ja diffuusion jatkuessa kerroksen paksuus kasvaa. Samalla molekyylien järjestyneisyys ja kiinnipitävät sidosvoimat pienenevät. Molekyylikerroksen kasvaessa riittävän paksuksi, alkavat pienimmissä huokosissa seinämien vesivaipat yhdistyä kaareviksi vesipinnoiksi. Tällaisen vesipinnan läheisyydessä vesihöyryn osapaine laskee riittävän alhaiseksi, että tiivistymistä voi tapahtua. Ilmiötä kutsutaan kapillaariseksi kondensaatioksi. Huokosen vesimäärän kasvaessa vesipinta siirtyy suurempaan huokoseen, jolloin sen kaarevuus loivenee, osapaineen aleneminen pienenee ja tiivistyminen

pysähtyy. Materiaali on tällöin tasapainokosteudessa ympäristönsä kanssa. Huokoisella materiaalilla kapillaarinen kondensaatio on pääasiallinen tasapainokosteuden määräävä tekijä suhteellisen kosteuden ollessa alueella 40 %:sta lähes 100 %:iin. (KOKKO 1989, s.8)



Kuva 10. Periaatekuva betonin vesi- ja kosteuspitoisuudesta. (Lähde: JOKELA 1980, s.63)

Kun huokosilman suhteellinen kosteus nousee lähelle 100 %:a, ovat kaikki pienet huokokset kokonaan veden täyttämiä ja suurempien huokosten pinnalla on multimolekyläärinen vesivaippa. Tällöin suurissa huokosissa vesivaipan liikkuvuus kasvaa ja, jos huokonen on yhteydessä vapaaseen veteen, vesi etenee kaarevan vesipinnan suuntaan. Siirtopotentiaalina toimii huokosissa vallitseva huokosalipaine. Tällaisen veden kapillaarisen siirtymisen nousukorkeus ja virtausnopeus huokosissa riippuvat erityisesti huokoshalkaisijasta. Mineraalisessa huokoisessa materiaalissa vesi on voimakkaasti sitoutunutta ja siksi kapillaarinen liike on suhteellisen hidasta. Kokonaan ilman kosteuden vaikutuksesta täyttyvien huokosten halkaisija on enimmillään n. 0,2 μm , joten tätä suuremmissa huokosissa veden liike on luonteeltaan kapillaarista. Joidenkin tutkijoiden mukaan kapillaarinen kosteuden siirtyminen olisi merkittävää vasta tätäkin suuremmissa, jopa yli 1 μm :n huokosissa. Huokoskoon kasvaessa edelleen kapillaarinen nousukorkeus pienenee nopeasti ja veden liikkeeseen alkavat osaltaan vaikuttaa gravitaatiovoimien lisäksi mm. ilmanpaine-erot materiaalin ylitse. (KOKKO 1989, s.8-10)

Eri kosteudensiirtomuotojen välillä ei ole jyrkkiä rajakohtia vaan eri ilmiöt tapahtuvat samanaikaisesti huokoskoosta ja paikallisesta kosteuspitoisuudesta riippuen. Materiaalin kriittisellä kosteuspitoisuudella huokosverkoston pinnalla on yhtenäinen liikkuva vesikalvo, jonka avulla kosteus pääsee siirtymään kapillaarisesti.

Kuiva sementtikivi ei tietenkään vaurioidu pakkasen vaikutuksesta. Pakkasenkestävyyden kannalta on siis hyvin oleellista, millainen kosteustila materiaalin huokosrakenteessa vallitsee lämpötilan laskiessa jäätymisrajan alapuolelle. Useimmille huokoisille materiaaleille voidaan eri tilanteissa määrittää kriittinen vedelläkyllästysaste S_{cr} , joka kertoo, kuinka suuri osuus kokonaishuokostilavuudesta voi olla vedellä täyttynyt ilman, että pakkasvaurioitumista tapahtuu. Materiaalin kriittinen vedelläkyllästysaste riippuu lujuus-, muodonmuutos- ja huokosominaisuuksista ja lisäksi todellisessa rakenteessa arvoon vaikuttavat myös kosteusrasituksen luonne sekä aineen ja rakenteen kosteudensiirto-ominaisuudet. Myös materiaalin kosteushistorialla on merkitystä, koska tasapainokosteuteen vaikuttaa voimakkaasti hystereesi. Rakenteen pakkasenkestävyyden edellytyksenä on, ettei todellinen vedelläkyllästysaste ylitä missään kohdassa kriittistä arvoa. Tavallisilla betoneilla kriittinen vedelläkyllästysaste on yleensä välillä 0,80 - 0,90. (PENTTI 1988, s.29-30)

Jäätyvän veden määrä on riippuvainen materiaalin huokosrakenteen koostumuksesta. Mitä hienompi on huokoskokojakauma, sitä enemmän materiaali voi sisältää yhä matalammassa lämpötilassa jäätymättömänä pysyvää vettä. Betonin huokosrakenne riippuu pitkälti valmistuksessa käytetystä vesi-sementtisuhteesta. Pienemmän vesi-sementtisuhteen omaava betoni on tiiviimpää ja huokoskoko on pienempi, jolloin sen sisältämän jäätyiskykyisen veden määrä on pienempi. Lisäksi tulee huomata, että tiivis betoni kuivuu sisäosistaan myös veteen upotettuna edelleen etenevän hydrataation sitoessa vapaata vettä.

Kuten kappaleessa 3.1.5. kerrottiin, betonin suhteelliseen kosteuteen vaikuttaa oleellisesti myös huokosveden suolapitoisuus.

3.3.4. Sideaine

Sideaineen ominaisuudet määräävät käytännössä merkittävässä määrin betonin pakkasenkestävyyden, koska sementtikiven lujuus ja huokosrakenne määräytyvät pääasiassa sideaineen laadun mukaan. Yleisimpiä betonissa sementin ohessa käytettäviä sideaineita ovat teollisuuden sivutuotteina syntyvät lentotuhka, masuunikuona ja silika, joilla on sementin kaltaisia kemiallisia ominaisuuksia. Niitä voidaan käyttää joko sementin seosaineena tai betonin valmistuksen yhteydessä mineraalisena seosaineena.

Lentotuhka on hiili- ja turvevoimalaitoksissa syntyvää palojätettä. Se erotetaan savukaasuvirrasta sähköisten suodattimien avulla ennen ilmakehään pääsyä. Lentotuhkapartikkelit ovat muodoltaan pallomaisia ja pääasiassa kooltaan n. 1µm - 45µm. Lentotuhka pystyy reagoimaan sementin hydrataatiossa vapautuvan kalsiumhydroksidin kanssa ja muodostamaan sementtikiven kaltaisia kovettumistuotteita. Lentotuhkan käyttö betonissa muuttaa tuoreen massan ominaisuuksia ja betonin lujuudenkehitystä. Tuhkan seassa oleva epätäydellisesti palanut hiili kasvattaa tuoreen massan vedentarvetta. Tällöin vesi-sideainesuhde kasvaa ja huokosrakenne muuttuu pakkasenkestävyyden kannalta epäedullisemmaksi. Lujuuden kehittyminen on lentotuhkaa sisältävällä betonilla hitaampaa kuin puhtaalla portlandsementtibetonilla. Edullisissa olosuhteissa saavutettava loppulujuus on kuitenkin suurempi, mutta hidas lujuudenkehitys tekee lentotuhkabetonista normaalibetonia herkemman kovettumisajn häiriöille. Tämän vuoksi lentotuhkaa sisältävän betonin

jälkihoitoon on kiinnitettävä erityistä huomiota. Pääasiassa tutkimuksissa on päädytty siihen, että lentotuhka ei heikennä betonin pakkasenkestävyyttä, jos massan lujuus ja ilmapitoisuus pysyvän vakiona. Ilmamäärän osalta on kuitenkin huomattava, että lentotuhkan sisältämä hiili häiritsee useimpien käytettävien lisähuokostimien toimintaa. Jonkin verran vaikutusta voidaan kompensoida kasvattamalla huokostimen annostusta, mutta jos lentotuhkan heikutushäviö on suuri eli se sisältää paljon palamatonta hiiltä, jää lisähuokostuksen teho riittämättömäksi.

Masuunikuonaa syntyy raudan valmistuksen sivutuotteena. Rauta pelkistetään masuunissa kokosin avulla metalliseksi raudaksi ja prosessin säätelymiseksi mukaan lisätään kalkkia. Muodostuva kuona on pääasiassa kalsiumin, piin, alumiinin ja magnesiumin oksideja. Masuunikuonan raekoko, kemiallinen koostumus ja lasimaisuusaste vaihtelevat synty- ja jäähdytysprosessin mukaan. Sen käyttö betonin seosaineena perustuu sementin sisältämien hydroksidi-ionien jauhetun masuunikuonan hydrauliset ominaisuudet herättävään vaikutukseen. Pääasialliset muutokset betonin ominaisuuksissa ovat hitaampi lujuudenkehitys ja hyvä korroosionkestävyys. Myös huokosrakenne muuttuu hieman. Useimpien tutkimusten mukaan masuunikuonan käyttö seosaineena ei merkittävästi muuta betonin pakkasenkestävyyttä, jos lujuus ja ilmamäärä pysyvät vakiona. Hienojakoisuutensa vuoksi jauhetulla masuunikuonalla on kuitenkin samanlaisia vaikutuksia lisäaineiden, mm. huokostimien, annosteluun kuin lentotuhkallakin.

Suolarasitetuilla, karbonatisoituneilla betoneilla masuunikuonalla on voimakas säilyvyyttä huonontava vaikutus. Ainakin osaksi tämän oletetaan johtuvan kapillaarihuokoisuuden suhteellisen osuuden huomattavasta kasvusta masuunikuonabetonin karbonatisoitueessa, jolloin yli -20°C :n lämpötiloissa jäätyiskykyisen veden määrä betonin huokosissa kasvaa. (MATALA 1995, s.140-147)

Silika on piin ja piirautalejeeringin valmistuksen yhteydessä syntyvä sivutuote. Se on koostumukseltaan hyvin hienojakoista ja muodostuu pääasiassa amorfisista piipartikkeleista. Suuren ominaispinta-alansa ja sisältämiensä piipartikkeleiden vuoksi silika on erittäin reaktiivinen. Käytettäessä yhdessä sementin kanssa silika reagoi kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kalsiumsilikaattihydraatteja. Reaktio on kuitenkin sementin hydrataatioreaktiota hitaampi, mutta saavutettava loppulujuus on huomattavasti korkeampi. Silikan käyttö lisää

tuoreen massan vedentarvetta ja parantaa massan koossapysyvyyttä. Kasvaneen vedentarpeen vuoksi silikabetonissa joudutaan yleensä käyttämään notkistavia ja nesteyttäviä lisäaineita. Lisäaineiden annosteluun silikalla on samanlainen vaikutus kuin muillakin seosaineilla. Pakkaskestävyyden varmistamiseksi myös silikabetoni tulee lisähuokoistaa. Massan hyvä koossapysyvyys auttaa ilman säilymistä massassa. Säilyvyysominaisuuksiin on suurin vaikutus silikabetonin muuttuneella huokosrakenteella. Silika tiivistää betonin huokosrakennetta siten, että suurten huokosten osuus ja läpäisevyys pienenevät. Silika kuitenkin lisää betonin kutistumista ja tätä kautta kutistumishalkeamien riskiä, jonka vuoksi huolellinen jälkihoito on hyvien säilyvyysominaisuuksien varmistamiseksi tärkeää. Suurina määrinä (20-30 % sementin painosta) käytettynä silika heikentää betonin pakkaskestävyyttä.

3.3.5. Muita betonin pakkaskestävyyteen vaikuttavia asioita

Huolellinen **jälkihoito** parantaa yksiselitteisesti betonin pakkaskestävyyttä. Näin tapahtuu kaikilla betoneilla sideaineen koostumuksesta riippumatta, tosin runsaasti polymeerejä sisältävien betoneiden osalta jälkihoito eroaa muiden betonien jälkihoidosta. Jälkihoitoajan pidentämisen pakkaskestävyyttä parantava vaikutus selittyy korkeamman hydrataatioasteen kautta pienentyneellä kapillaarihuokoisuudella. Suhteellisen parannuksen suuruus on riippuvainen sideaineen laadusta. Silika- ja lentotuhkabetoneilla vaikutus on selvästi suurempi kuin portlandsementti- ja kuonabetoneilla. Jälkihoitoajan vaikutusta pakkaskestävyyteen voidaan arvioida kaavalla: (MATALA 1991, s.28-29)

$$k_{jh} = 0,85 + 0,17 \cdot \log_{10}(t), \quad (4)$$

missä t = jälkihoitoaika [vrk]

k_{jh} = t vuorokautta jälkihoidetun betonin pakkaskestävyys verrattuna 7 vuorokautta jälkihoidettuun

Toinen merkittävä pakkaskestävyyteen vaikuttava seikka on sementtikiven **ikäntyminen** ja sen mukanaan tuomat muutokset huokosrakenteessa. Voidaankin todeta, että sideaineen koostumuksesta riippumatta ikäntymisen, erityisesti hiilidioksidin vaikutuksesta tapahtuvan karbonatisoitumisen, vaikutus betonin säilyvyysominaisuuksiin ja pakkaskestävyyteen on yleensä kaksitahoinen. Toisaalta ajan kuluessa etenevä hydrataatio kasvattaa betonin lujuutta

ja karbonatisoituminen parantaa tiiviyttä, jolloin mm. veden kulkeutuminen huokosiin vaikeutuu ja säilyvyysominaisuudet tältä osin paranevat. Toisaalta kuitenkin karbonatisoitumisen aiheuttamat muutokset huokosrakenteessa ovat sellaisia, että pakkasrasitukselta suojaavien huokosten osuus kokonaishuokoisuudesta pienenee, jolloin pakkasenkestävyys heikkenee. Yhteenvedona voidaan sanoa, että ikääntymisen vaikutus pakkasenkestävyyteen on portlandsementtibetonilla yleensä parantava, lentotuhkabetonilla melkoisen yhdentekevä ja silika- ja masuunikuonabetoneilla heikentävä. Yleisesti karbonatisoitumisen etenemistä betonissa kuvataan yhtälöllä

$$x = k * t^{1/2}, \quad (5)$$

missä k = materiaali- ja ympäristötekijöistä riippuva vakio

t = aika

Etenemisen nopeus riippuu mm. lämpötilasta, kosteus- ja hiilidioksidipitoisuudesta, betonin tiiviyydestä sekä sementin määrästä ja laadusta.

Portlandsementillä huokosrakenteen tiivistyminen ilman hiilidioksidin vaikutuksesta johtuu liukenevan ja huokoisen kalsiumhydroksidin muuttumisesta liukenemattomaksi ja tiiviimmäksi kalsiumkarbonaatiksi. Sama prosessi tapahtuu tietenkin myös seosainebetoneilla niiden sisältämän vapaan kalsiumhydroksidin osalta. Lentotuhkan ja silikan toiminta perustuu siihen, että ne reagoivat hydraataatiossa kalsiumsilikaattihydraattigeelin syntyvaiheessa vapautuvan kalsiumhydroksidin kanssa. Tästä syystä vapaan kalsiumhydroksidin määrä jää näillä betoneilla pienemmäksi ja karbonatisoitumisen aiheuttama huokosrakenteen tiivistyminen on vähäisempää. Sivutuotebetoneilla merkittävä karbonatisoitumismuoto edellä mainitun kalsiumhydroksidin ja huokosveteen liunneen hiilidioksidin reaktion lisäksi on hiilidioksidin reaktio kalsiumsilikaattihydraattigeelin kanssa. Reaktio muuttaa betonin huokoisuutta siten, että pakkasenkestävyyden kannalta epäedullinen suurten kapillaarihuokosten suhteellinen osuus kasvaa. Lentotuhkabetonilla muutos on oletettavasti vähäisempi kuin silika- ja masuunikuonabetoneilla. Suurten kapillaarihuokosten osuuden kasvaessa betonin keskimääräinen jäätymispiste nousee, jolloin pakkasrasitus lisääntyy. (MATALA 1991, s.22-23)

Muita pakkasenkestävyyteen vaikuttavia betonin ominaisuuksia ovat mm. tuoreen betonimassan **notkeus**, **runkoaineen raemuoto** ja **rakeisuusjakauma**. Useimmat betonin sisäisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät muuttavat pakkasenkestävyyssominaisuuksia lähinnä välillisesti vaikuttamalla johonkin toiseen pakkasenkestävyyden kannalta keskeiseen ominaisuuteen. Useimpien sisäisten muutosten vaikutus pakkaenkestävyyteen voidaan selittää joko huokosrakenteen tai betonin kosteuspitoisuuden muutoksilla. Kuten aikaisemmin jo mainittiin, betonin ominaisuudet ovat paljolti riippuvaisia toinen toisistaan, jolloin yhden tekijän muuttaminen vaikuttaa useaan hyvinkin erilaiseen ominaisuuteen. Tuoreen betonimassan tavoiteltu notkeus, käytetyn runkoaineen raemuoto ja runkoaineen rakeisuusjakauma vaikuttavat seokseen tarvittavaan veden määrään ja muuttavat sitä kautta siis vesi-sementtisuhdetta, joka on pakkasenkestävyyden kannalta keskeisiä betonin ominaisuuksia. Särmikäs, raemuodoltaan pitkulainen, murskattu kiviaines vaatii tyydyttävien työstettävyyssominaisuuksien saavuttamiseksi huomattavasti suuremman vesimäärän kuin pyöreämuotoinen luonnonkiviaines. Runkoaineen rakeisuuskäyrälle voidaan määrittää tavoiteltava ihannemuoto, jolloin runkoaineen pakkautuminen on mahdollisimman tehokasta ja sitä kautta tarvittava sementti- ja vesimäärä on mahdollisimman pieni. Raemuodon vaikutus täytyy kuitenkin huomioida erikseen. Runkoaineen hienoaineksen suhteellisen osuuden kasvattaminen lisää myös tarvittavan veden määrää, mistä johtuen perinteisessä betonin suhteituksessa on pyritty välttämään suuria hienoainesmääriä. Hienoaineksen raekokojakauma on oletettavasti ollut virheellinen, koska huolellisella hyvin hienojakoisen ($<0,125\text{mm}$) runkoaineksen suhteituksella, ns. mikrosuhteituksella, voidaan hienoainesmäärää kasvattaa vesi- ja sementtimäärän kuitenkin samalla pienentyessä. Käytännössä tämä tarkoittaa kustannussäästöä pienentyneen sementintarpeen ansiosta betonin ominaisuuksien samalla parantuessa. Tavoitteena on tällöin runkoaineen optimaalinen pakkautuminen, jolloin runkoainepartikkeleiden väliin ei jää tarpeettomasti tilaa, jonka täyttämiseen tarvitaan sementtipartikkeleita ja vettä. Tällaisen mikrosuhteitetun betonin työstettävyys tehdään aina käyttämällä notkistavia lisäaineita. Tehokkaasti pakkautuvasta runkoaineesta valmistetun betonin säilyvyysominaisuudet ovat hyvät, koska inertin runkoaineksen suhteellinen osuus massasta on suuri, betoni on tiivistä ja ylimääräisen kapillaarihuokoisuutta aiheuttavan seosveden määrä on pieni. (HEIKKINEN 1992, s. 14-15)

4. HARVAN KEVYTSORABETONIN ERITYISPIIRTEITÄ

4.1. Kevyen runkoaineen vaikutus pakkasenkestävyyteen

Käytettäessä normaalia suomalaista kiviainesta betonin runkoaineena, muodostuu betonin pakkasenkestävyys käytännössä kokonaan sementtikiven ominaisuuksien perusteella. Luja ja tiivis kiviaines vaikuttaa pakkasenkestävyyteen ainoastaan sementtikiven ja runkoainepartikkelien rajapinnan osalta, mutta muuten esimerkiksi runkoaineen vedenimuominaisuudet voidaan jättää merkityksettöminä huomioimatta. Normaalirunkoaineista betonia voidaankin pakkasenkestävyyden osalta käsitellä kaksifaasisena materiaalina, jonka molemmilla faaseilla on periaatteessa oma pakkasenkestävyytensä ja siihen liittyvät ominaisuutensa ja jonka kokonaispakkasenkestävyys muodostuu näiden summana. Koska kiviaines kuitenkin on sementtikiveen verrattuna pakkasenkestävyyden kannalta huomattavasti kestävämpää, muodostuu kokonaispakkasenkestävyys käytännössä yksinomaan sementtikiven perusteella. Pakkaskestävyysvaatimuksena voidaan siis käyttää ehtoa, että sekä sementtikivi että kiviaines ovat molemmat erikseen pakkasenkestäviä. Käytettäessä runkoaineena kevytsoraa on tilanne kuitenkin toisenlainen. Huokoisena ja melko hauraana aineena kevytsoralla on omat vedenimu- ja pakkasenkestävyysominaisuutensa, joilla on vaikutusta myös komposiittimateriaalin, siis kevytsorabetonin, ominaisuuksiin. Lisäksi kevytsorarakheet toimivat yhteisvaikutuksessa sementtimatriisin kanssa, jolloin mm. vesi pääsee siirtymään kevytsorapartikkeleista sementtikiveen ja toisinpäin. Kevytsorabetonin pakkasenkestävyys on siis huomattavasti monimutkaisempi kahden faasin ominaisuuksista ja niiden yhteisvaikutuksesta riippuva suure kuin normaalitiheyksistä runkoainetta käytettäessä. Sementtikiven osalta pätevät aikaisemmin betonin pakkasenkestävyyden yhteydessä kuvatut asiat, mutta lisäksi tulevat siis sekä kevytsorapartikkeleiden sisäiset ominaisuudet että kevytsoran ja sementtikiven yhteisvaikutuksen merkitys. Toisaalta runkoainepartikkelien ja sementtikiven rajapinnan merkitys pakkasenkestävyyteen on kevytsorabetonilla huomattavasti merkityksettömämpi kuin normaalibetonilla. Hyvin harvan kevytsorabetonin kohdalla joudutaan pakkasenkestävyyden osalta pohdintaan ottamaan vielä yksi tekijä lisää. Normaalin kaltaisessa betonissahan, runkoaineen tiheydestä riippumatta, pyritään siihen, että runkoainepartikkelit pakkautuvat mahdollisimman tiiviisti, jolloin välien täyttämiseen

tarvittavan sementtikiven määrä on jää pieneksi. Tällöin materiaalista tulee pelkistetysti ajatellen kahden erilaisen faasin tasainen yhdistelmäateriaali, jonka ominaisuuksia voidaan kuvata eri osa-aineiden ominaisuuksien perusteella määräytyvillä keskimääräisillä arvoilla. Näin ei kuitenkaan tilanne ole harvan kevytsorabetonin kohdalla. Esim. kevytsoraharkkomassa valmistetaan siten, että sementtiliima yhdistää suurta osaa runkoainepartikkeleista ainoastaan kapeiden kosketuspintojen kohdalla ja materiaalin sisään jää paljon tyhjää. Erityisesti tällä tyhjätilalla on oletettavasti merkitystä veden liikkumisen ja jäätymisessä syntyvien pakkovoimien jakautumisen kannalta. Tällaisen materiaalin kastuminen ja kuivuminen tapahtuvat nopeasti verrattuna normaaliin betoniin ja suuren huokoisuuden ansiosta pakkovoimat pääsevät helposti purkautumaan. Toisaalta hentojen sidosten seurauksena jo pienet sisäiset pakkasvauriot aiheuttavat merkittävää lujuusominaisuuksien heikkenemistä.

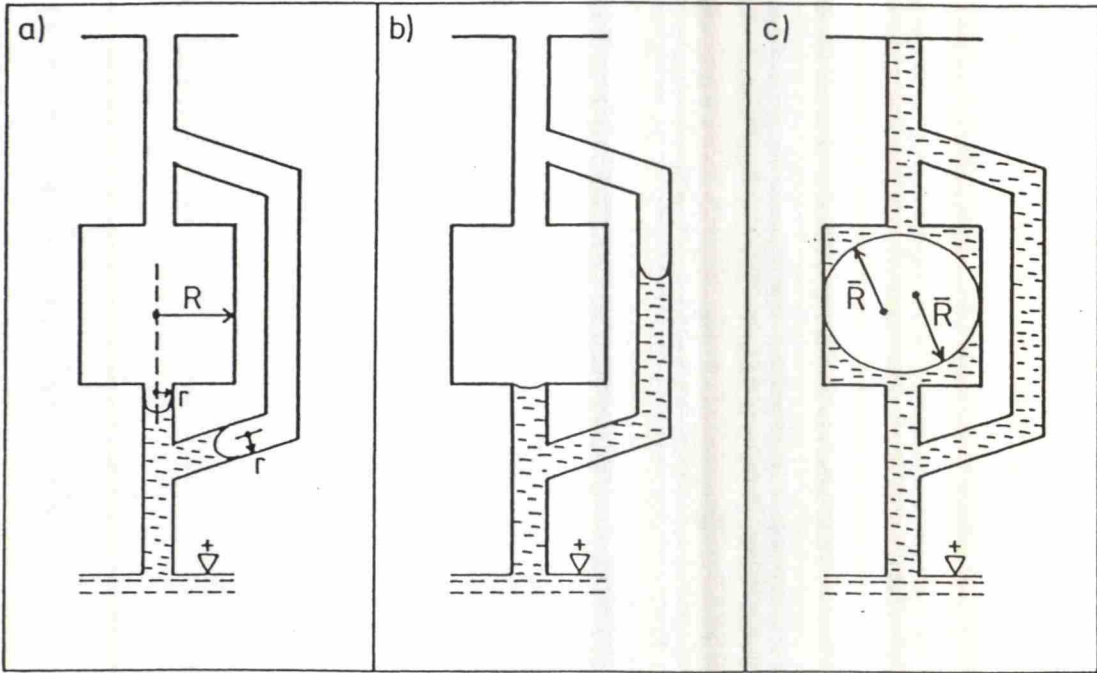
Sekä sementtipastalle että huokoiselle runkoaineelle voidaan molemmille erikseen määrittää kriittinen vedelläkyllästysaste (S_{CR}), jonka alapuolella niitä voidaan pitää pakkasenketävinä. Kun faasit yhdistetään, ei kummankaan osalta voida kuitenkaan olettaa, että S_{CR} ja S_{CAP} (kapillaarisesti täyttyvä huokoisuus) olisivat yhdistetyssä materiaalissa samat kuin erikseen mitattuina. Tähän on kaksi syytä: (FAGERLUND 1978, s.43-44)

1) Sementtimatriisin ympäröimänä kevytsorapartikkeli voi sisältää enemmän vettä kuin vastaava vapaa runkoainepartikkeli ilman että vaurioitumista jäätyksen seurauksena tapahtuu. Kriittinen kosteuspitoisuus saavutetaan vasta, kun partikkelissa tapahtuvasta jäätymisprosessista ympäröivää sementtipastaan aiheutuvat voimat ovat niin suuret, että pasta vaurioituu tai runkoainepartikkeli itsessään rikkoutuu.

2) Sementtipastan ympäröimän kevytsorapartikkelin absorptiokyky on erilainen kuin vapaan ks-partikkelin. Koska sementtipastan on huokoisuus on hienojakoisempaa kuin kevytsorarakkeen, lisääntyy absorptio verrattuna vapaaseen partikkeliin.

Viimeksi mainitulla syyllä on oletettavasti tärkeä vaikutus mekanismiin, jolla lisää vettä kulkeutuu kevytsorarakeseen ja huokosrakenteeseen jää suuria ilmakuplia. Mekanismia on havainnollistettu kuvassa 11.

Huokosrakenteeltaan hienojakoisempi sementtikivi muodostaa kevytsorarakkeen ympärille kapillaariverkoston, jota pitkin vesi siirtyy runkoaineeseen. Vesipinta etenee pienissä kapillaareissa kunnes kohtaa suuremman runkoaineen huokosen. Tällöin eteneminen kapillaarissa pysähtyy ja vesipinta etenee muita pieniä kapillaareja pitkin. Lopulta tämä johtaa tilanteeseen, että kaikki suureen huokoseen johtavat kapillaarit ovat kokonaan täyttyneet vedellä ja suuressa huokosessa edelleen oleva ilma ei pääse enää purkautumaan mihinkään suuntaan. Ilma voi poistua vähitellen vain liukenemalla huokosvedeen. Tosin ilmanpaine huokosessa saattaa ympäröivän vesikyllästeisen huokossysteemin vaikutuksesta nousta huomattavan suureksi, jolloin myös liukeneminen tapahtuu nopeammin. Näin huokosrakenteeseen voi kuitenkin jäädä ilmatäytteisiä huokosia, vaikka ympäröivä kapillaariverkosto on veden kyllästävä.



Kuva 11. Kaaviokuva mekanismista, jolla suurempaan kapillaarihuokoseen jää "vangiksi" ilmaa pienempien huokosten täytyessä vedellä. (Lähde: FAGERLUND 1978, s.113)

Kun huokoinen runkoainepartikkeli on kokonaan vedellä kyllästynyt tai sen todellinen vedelläkyllästymisaste ylittää 0,917, täytyy jäätymisessä syntyvien voimien purkautua rakeesta ulospäin ympäröivään sementtimatriisiin. Tällöin rakeen koosta riippuu, ehtiikö paine purkautua ympäröivään matriisiin vai rikkoutuuko runkoainepartikkeli sisäisten voimien

vaikutuksesta. Tällaista rajakokoa kutsutaan materiaalin kriittiseksi kooksi. Kevytsoralla kriittinen koko on yleensä niin pieni, että huomattava osa runkoainepartikkeleista on suurempia eli jäätyminen voi niitä vaurioittaa. Toisaalta tulee huomata, että vaikka jäätymisvoimat pääsisivätkin purkautumaan sementtimatriisiin, saattavat rasitukset kasvaa sementtikivelle liian suuriksi ja vaurioituminen tapahtuukin runkoainepartikkelin ulkopuolella.

4.2. Betonin tutkimusmenetelmien soveltuvuus harvan ks-betonin testaukseen

Kuten edellisessä kappaleessa kerrottiin, poikkeavat normaalirunkoaineinen betoni ja harva kevytsorabetoni oleellisesti toisistaan niissä mekanismeissa, joiden perusteella kovettuneen massan ominaisuudet muodostuvat. Näistä periaatteellisista eroista johtuen, normaalibetonille kehitettyjen testausmenetelmien suora soveltaminen kevytsorabetoniin on melko epävarmaa. Erityisesti menetelmät, joilla saatava tulos perustuu normaalibetonilla saatujen tuloksien pohjalta kehitettyihin teorioihin ja oletuksiin, saattavat ks-betonia tutkittaessa antaa hyvinkin harhaanjohtavia tuloksia. Tällaisia menetelmiä ovat erityisesti betonin huokosrakenteen tutkimiseen kehitetyt menetelmät, kuten elohopeaporosimetria. Näiden menetelmien käyttö harvan kevytsorabetonin tutkimukseen vaatisi ainakin laajaa sovelluskehitystyötä ja suurta vertailukoetulosten määrää, että vastaavat luotettavat tulkintateoriat saataisiin syntymään myös kevytsorabetonille.

Sitä vastoin mekaanisiin mittauksiin perustuvien menetelmien voidaan olettaa toimivan samalla tavalla koekappaleen koostumuksesta riippumatta, kunhan tuloksia tulkittaessa muistetaan, ettei raja-arvoina tai vertailukohtina käytetä normaalibetonille määriteltyjä arvoja. Esimerkiksi lujuusominaisuuksien muutoksia voidaan määrittää samanlaisilla menetelmillä molemmille betoneille. Pakkaskestävyyden määrittäminen tulosten perusteella vaatii kuitenkin materiaalin erityispiirteiden huomioimista.

Mekaanisiin mittauksiin liittyvät myös erilaiset pakkasrasituskokeet. Niidenkin soveltuvuus sellaisenaan kevytsorabetonille on melko kyseenalaista. Pelkkä vaatimusrajojen laskeminen ei yksinään paranna menetelmän soveltuvuutta. Mekanismi, jolla vaurioituminen ko. kokeissa tapahtuu, saattaa olla luonteeltaan sellainen, että luonnollisissa rasitusolosuhteissa

vaurioitumista ei koskaan tapahdu, vaikka pakkasrasituskokeen tuloksen perusteella materiaali voi näyttää hyvinkin vaurioaltilta. Tällainen tilanne on myös Suomessa käytettävän standardikokeen kohdalla. Rasitusolosuhteet kokeessa ovat kevytsorabetonille hyvin kovat eivätkä tuotteet luonnollisissa käyttöolosuhteissa joudu yhtä kovaan rasitukseen käytännössä koskaan. Kevytsorabetonin kohdalla tällä on merkitystä, koska kovissa testiolosuhteissa kosteuden liikkuminen materiaalissa ja sitä kautta jäätymis- ja vaurioitumisprosessit saattavat olla hyvinkin erilaisia verrattuna luonnollisten käyttöoloshteiden aiheuttamiin. Näin ollen pakkasrasituskokeella selvittävä pakkasenkestävyys ei välttämättä korreloikaan pakkasenkestävyyteen todellisissa olosuhteissa.

B. KOKEELLINEN TUTKIMUS

5. KOEJÄRJESTELYT

5.1. Koekappaleiden valmistuksessa käytetyt koostumukset

Koekappaleiden koostumukset yritettiin muokata siten, että kulloinkin muutoksen kohteena olisi vain yksi tekijä, jolloin eri koostumuksia vertailtaessa olisi helpompaa päätellä mahdollisten erojen syyt. Koska erilaisia muutoksia, joita haluttiin kokeilla, oli kuitenkin niin paljon, jouduttiin periaatteesta hieman joustamaan. Samanaikaisesti tehdyt muutokset yritettiin kuitenkin rajata siten, että vertailtavuus eri koostumusten välillä säilyisi. Jokaisesta vertailukoostumukseen tehdystä muutoksesta muokattiin niin monta eri versiota, että yksiselitteinen muutos, suuntaan tai toiseen, ainakin jollain versiolla varmasti saataisiin selvästi näkyviin. Erilaisia koostumuksia ja niiden versioita olisi haluttu - ja kattavien tulosten saamiseksi olisi pitänytkin - tehdä huomattavasti suurempi määrä, mutta rajoittavaksi tekijäksi muodostui koekappaleiden valmistusaikataulu sekä käytetyn pakkasarkun kapasiteetti. Samasta syystä valmistettavien koekappaleiden määrä kustakin versiosta jouduttiin rajaamaan kuuteen.

Käytetyt reseptit jakautuivat pääperiaatteiltaan kahteen ryhmään. Toisessa ryhmässä korvattiin sementtiä jolloin muulla, halvemmallalla aineella ja toisessa ryhmässä painavaa hienoa runkoainetta eli hiekkaa korvattiin kevyemmällä vaihtoehdolla, jolloin koekappaleen tiheyttä saatiin alennettua.

Kaikki koostumukset on ilmoitettu laskettuna yhden kuutiometrin annokseksi.

1. vertailukoostumus:

(tunnukset: vert1 - 12)

Vertailukohtana käytettiin diplomityön käynnistymisen aikoihin Optirocin Oitin kevytsoraharkkotehtaalla käytössä ollutta koostumusta. Muutokset koostumuksessa saattavat kauden aikana olla suuriakin johtuen aineosien koostumuksen muutoksista, joten vertailuun

valittiin eräänlainen keskiarvoresepti. Valinnalla haettiin luotettavaa vertailukohtaa kokeiltaville muutoksille. Vertailureseptillä saadut koetulokset eivät ole suoraan siirrettävissä tehdasolosuhteissa tapahtuvaan valmistukseen, mutta kun kaikki versiot valmistettiin samalla tavalla, saatiin koostumusten erot näkyviin. Vesimäärää vertailukoostumuksessa jouduttiin laboratorion valmistusteknisistä syistä kasvattamaan hieman, mutta sama muutos tehtiin tietenkin kaikkiin versioihin. Vesimäärä tehdaskäytössä oli kyseisenä ajanjaksona noin 60 l/m³. Käytetyksi vertailukoostumukseksi muodostui:

sementti	130 kg
lentotuhka	30 kg
hiekkä (0-3)	240 kg
KS04	0,192 m ³ (20 %)
KS310	0,768 m ³ (80 %)
vesi	70 l

Aineluettelossa tunnus KS04 tarkoittaa raekooltaan pienempää kevytsoralatua, joka koostuu kolmesta eri lajitteesta; 10% on lajitetta 0 - 2 mm, 70% 2 - 4 mm ja loput 20% murskattua lajitetta 0 - 3 mm. Suurempirakeinen laatu KS310 koostuu vastaavasti kolmesta lajitteesta; 65% 4 - 8 mm, 15% 8 - 10 mm ja murskattua lajitetta 3 - 8 mm 20%. Sementtinä käytettiin Finnsementin Rapidia CEM II A 42,5 R, joka oli käytössä harkkotehtaallakin. Hiekan rakeisuuskäyrä esitetään kuvassa 12.

2. Osa sementistä korvataan kevytsorapölyllä, hiekan määrä vakio 240 kg/m³:

(tunnukset: kspöly11 - 112 ja kspöly21 - 212)

Perusajatuksena tässä muutoksessa oli korvata kallista osa-ainetta, sementtiä, edullisemmalla kevytsorapölyllä. Ks-pöly on erittäin hienojakoista, jolloin voidaan ajatella sen pystyvän korvaamaan osan hydratoitumattomista sementtihiukkasista. Toiveena oli, ettei muutos näkyisi valmiin harkon lujuusominaisuuksissa, koska osa sementistä jää aina sitoutumatta ja ks-pöly korvaisi juuri näitä sitoutumatta jääviä sementtihiukkasia. Muutoksesta tehtiin kaksi erilaista versiota, joista toisessa sementin määrä on laskettu jo lähes puoleen alkuperäisestä eli jonkinlainen muutos olisi pakko näkyä. Koostumuksesta tulee huomata, että myös sementin ja

kevytsorapölyn yhteismäärä pieneni molemmissa versioissa verrattuna alkuperäiseen sementtimäärään 130 kg/m^3 .

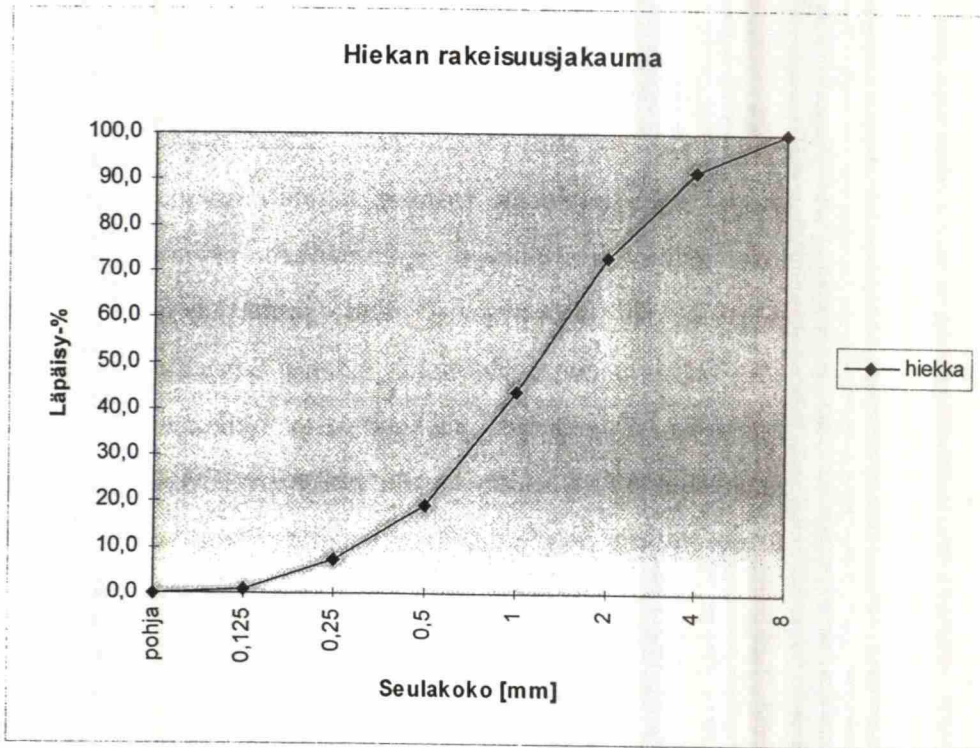
versio 1: sementti 100 kg

ks-pöly 10 kg

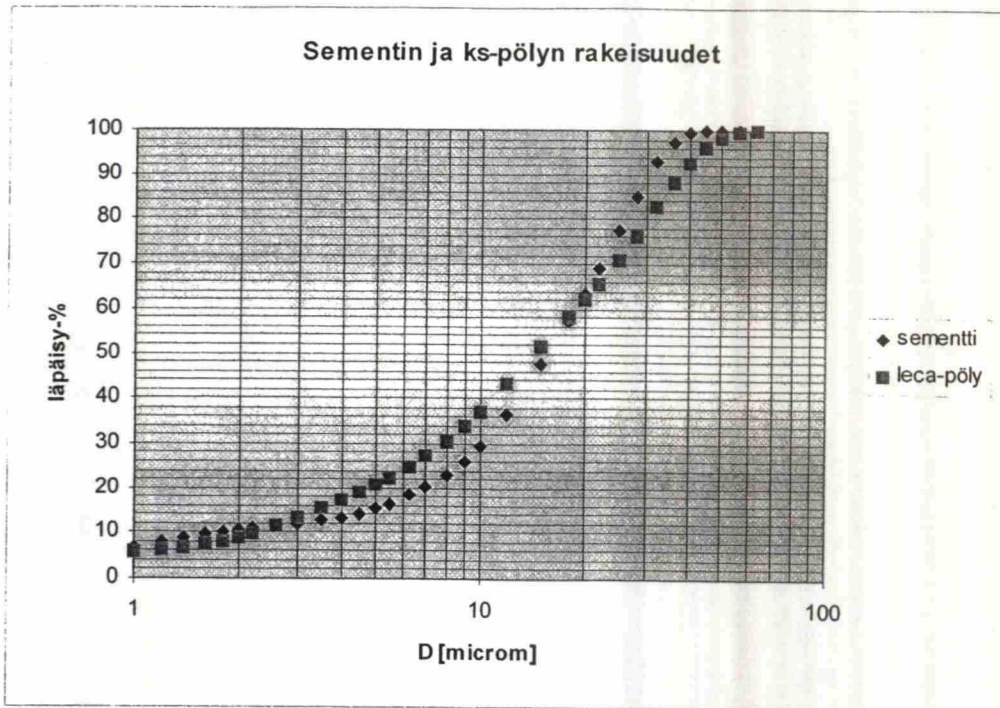
versio 2: sementti 70 kg

ks-pöly 20 kg

Granulometrillä määritetyt sementin ja kevytsorapölyn (Leca-pölyn) rakeisuudet on esitetty kuvassa 13.



Kuva 12. Hiekan rakeisuusjakauma.



Kuva 13. Granulometrillä määritetyt sementin ja kevytsorapölyn rakeisuusjakaumat.

3. Osa sementistä korvataan kevytsoramurskeella 0 - 3 mm:

(tunnukset: ksm11 - 112 ja ksm21 - 212)

Toiveena oli, että murskattu kevytsora toimisi samalla tavalla sementin korvikkeena kuin ks-pölynkin ajateltiin toimivan. Optimaalisen määrän määrittäminen ei sitten olekaan niin yksinkertaista. Tässä tutkimuksessa mittarina käytettiin korvattavan sementin tilavuutta, jolloin annoksen koko pysyi muuttumattomana.

versio 1: hiekka 190 kg
 KSM(0-3) 50 kg * 280/2670 = 5,2 kg

versio 2: hiekka 160 kg
 KSM(0-3) 80 kg * 280/2670 = 8,4 kg

4. Hiekka korvataan fillerillä, sementtimäärä vakio 100 kg/m³:

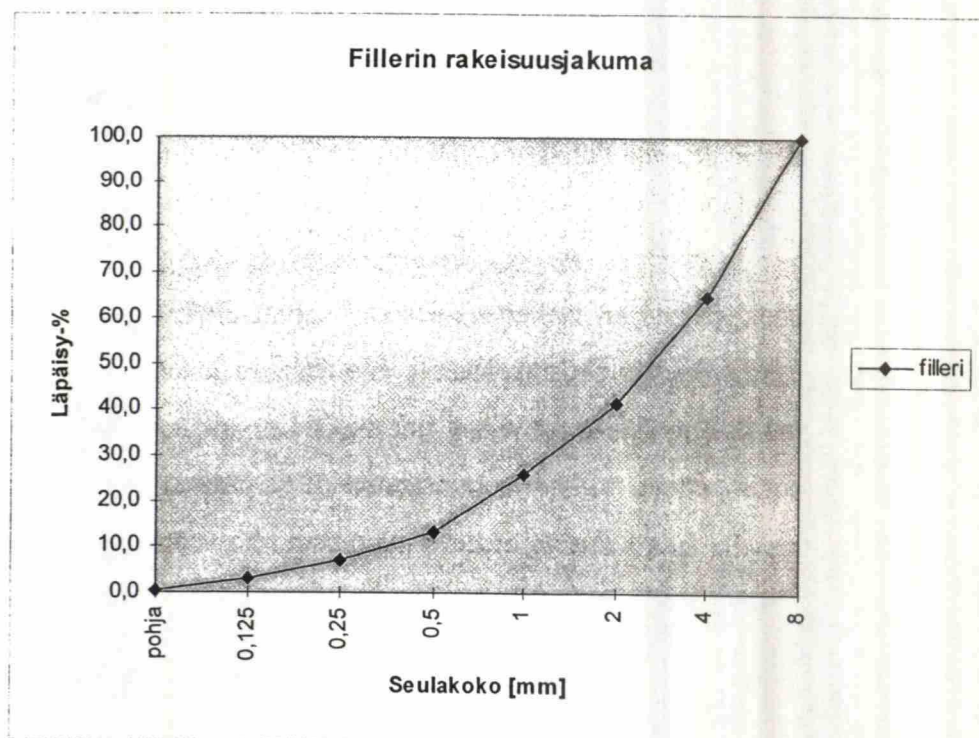
(tunnukset: filleri11 - 112, filleri21 - 212 ja filleri31 - 312)

Tässä muutoksessa ajatuksena oli muuttaa raskaan runkoaineen raekokojakaumaa siten, että hienoaineksen osuutta massassa saadaan kasvatettua. Samanaikaisesti vähennettiin sementin määrää, jolloin sitoutumattoman sementin rooli hienojakoisena runkoaineena jäi vähäisemmäksi ja mahdolliset myönteiset lujuustulokset olisivat selkeämmin runkoainemuutoksesta johtuvia. Fillerin rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 14.

versio 1: filleri 240 kg

versio 2: filleri 190 kg

versio 3: filleri 160 kg



Kuva 14. Fillerin rakeisuuskäyrä.

5. Hiekka korvataan kivituhkalla 0 - 3 mm, sementti vakio 100 kg/m³:

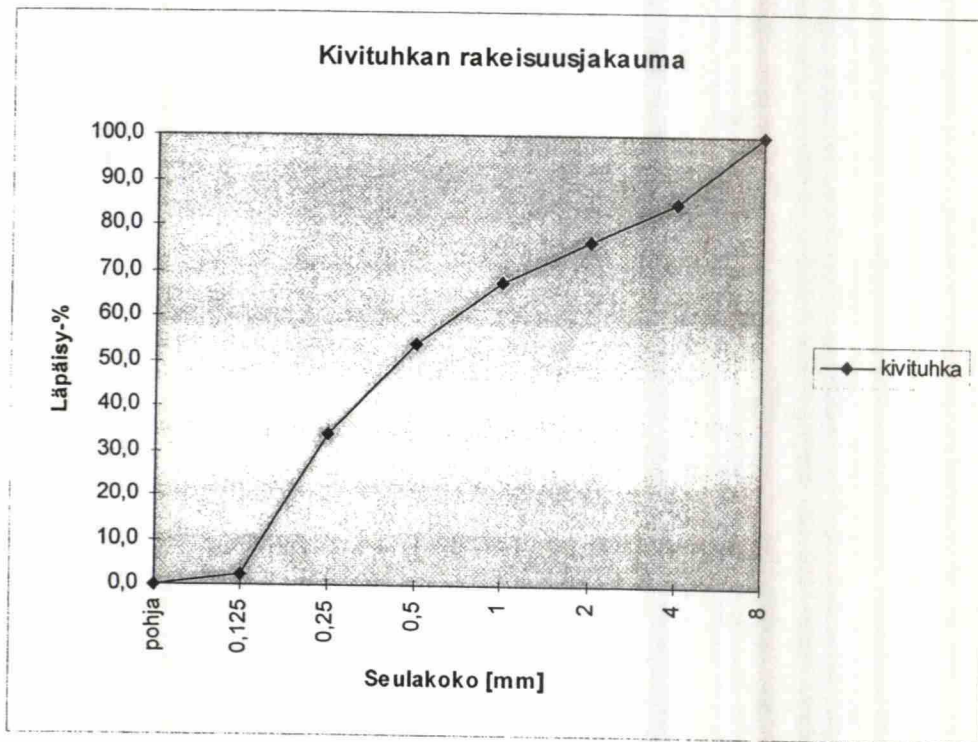
(*tunnukset: kivit11 - 112, kivit21 - 212 ja kivit31 - 312*)

Tavoite tässä muutoksessa oli samankaltainen kuin koostumuksessa numero kolmekin. Kivituhkan rakeisuusjakauma, kuva 15, on kuitenkin hieman erilainen verrattuna filleriin.

versio 1: kivituhka 240 kg

versio 2: kivituhka 190 kg

versio 3: kivituhka 160 kg



Kuva 15. Kivituhkan rakeisuusjakauma.

6. Kevytsorarakoaineen rakeisuusjakaumaa muutetaan:

(tunnukset: rakeisuus11 - 112 ja rakeisuus21 - 212)

Tässä muutoksessa yritettiin etsiä parannusta harkkojen lujuusominaisuuksiin puuttumatta kuitenkaan sideaineen määrään tai laatuun. Jos tulos olisi toivottu, voitaisiin myöhemmin sideaineen määrää seoksessa pienentää säilyvyysominaisuuksien kuitenkin heikkenemättä nykyisestä tasosta. Koostumuksessa kevytsorarakoaineen rakeisuusjakaumaa muutettiin vertailukohtaan nähden siten, että hienon aineksen suhteellinen osuus runkoaineessa kasvoi.

versio 1: KS04 40 %
 KS310 60 %

versio 2: KS04ED 20 % (2-4 mm 50 %; 0-3 mm, M 20 %; 0-2 mm 30 %)
 KS310 80 %

Myöhemmin esitettävien tulosten lukemisen helpottamiseksi tiivistelmä koekappaleiden merkitsemisessä käytetyistä tunnuksista on esitetty liitteessä 1.

5.2. Koekappaleiden valmistus ja säilytys

Koekappaleet valmistettiin Teknillisen Korkeakoulun Betoniteknikan (nyk. Rakennusmateriaalitekniikka) laboratorion tiloissa Otaniemessä. Materiaaleina käytettiin Oy Optiroc Ab:n kevytsoraharkkotehtaaltaan Oitista toimittamia raaka-aineita, jotka oli otettu suoraan valmistuksessa käytettävistä materiaalivarastoista. Raaka-aineet säilytettiin tiiviisti suljetuissa muovipusseissa, jolloin mm. niiden kosteustila vastasi mahdollisimman hyvin tehdasympäristössä vallitsevia olosuhteita. Samalla varmistettiin kosteustilan muuttumattomuus koemassojen valmistusajanjakson aikana. Käytännössä tämä tietenkin aiheuttaa omalta osaltaan hajontaa ja epävarmuutta koetuloksiin, koska kosteuspitoisuuksien muuttumattomuutta raaka-aineiden pitkän säilytysjakson aikana ei täysin voida varmistaa. Ennen koemassojen valmistusta raaka-aineista tutkittiin hiekan, fillerin ja kivituhkan rakeisuusjakaumat seulomalla sekä sementin ja kevytsorapölyn rakeisuudet granulometrillä.

Koemassat valmistettiin Metos-Karhu -vispiläsekoittimella n. 40 litran kerta-annoksina. Käytettävissä olleiden muottien määrä rajoitti päivittäin valmistettavien annoksien määrän kolmeen eli päivässä voitiin valmistaa 18 koekappaletta. Muotteina käytettiin kevyesti öljytyjä 100x100x500 -palkkimuotteja, joiden sisämitta oli muottivaneristen muutospalojen avulla lyhennetty 400 mm:iin. Koepalkkien pituuden muutos tehtiin kahdesta syystä; kulloinkin valmistettavan kerta-annoksen koko saatiin kutistettua sellaiseksi, että käytettävällä sekoitinkalustolla saatiin valmistettua kerralla haluttu määrä (6 kpl) koekappaleita ja lisäksi pienentämällä koekappaleen pinta-alaa varmistettiin tärytys-puristuskaluston tehon riittävyys. Suurikapasiteettisempia tasosekoittajia ei massojen valmistuksessa haluttu käyttää, koska aikaisempien kokemusten perusteella niillä olisi ollut suurempi kevytsorarakeita rikkova vaikutus ja lisäksi homogeenisen massan valmistaminen olisi ollut käytännössä mahdotonta, mikä ko. pienillä annoksilla oli erittäin oleellista. Kevyet runkoaineet annosteltiin tilavuusmitallisina sekoittimeen raekokojärjestyksessä siten, että suurirakeisin lajite tuli alimmaiseksi ja pienin päällimmäiseksi. Tällä pyrittiin osaltaan vähentämään suurien kevytsorarakeiden erottumista massan pinnalle sekoitettaessa. Kevyitä runkoaineita sekoitettiin 30 sekuntia ennen painomitallisten hiekan, fillerin, kivituhkan ja sementin lisäämistä. Kuivaa massaa sekoitettiin taas 30 sekuntia ennen veden lisäämistä. Kuivan massan liiallista sekoittamista haluttiin välttää, koska osa-ainesten suurista tiheyseroista johtuen massassa tapahtuu nopeasti hyvinkin voimakasta erottumista suurien kevytsorapartikkeleiden noustessa kohti pintaa ja raskaampien runkoaineosasten vajotessa sekoitusastian pohjalle. Veden annostelun jälkeen massaa sekoitettiin vielä kaksi minuuttia. Kaikille koemassoille käytettiin samanlaista valmistuskäytäntöä.

Sekoituksen jälkeen tuore massa annosteltiin muotteihin kolmessa erässä siten, että kutakin kerrosta puritus-tärytettiin 30 sekuntia. Viimeinen kerros pyrittiin annostelemaan siten, että tiivistyksen jälkeen muotti olisi täynnä, jolloin palkin poikkileikkausmitoiksi saatiin haluttu 100 mm x 100 mm. Käytetty tiivistyslaitteisto koostui sähkömoottorilla toimivasta epäkeskotärypöydästä, jonka päälle oli asennettu erillinen paineilmatoiminen puristin. Täryä ja puristusta säädeltiin erikseen siten, että puristus oli aina päällä, kun täry käynnistettiin tai sammutettiin, jolloin jo tiivistynyt massa ei päässyt täryn vaikutuksesta uudelleen löyhtymään. Laboratorion paineilmaverkostossa vallitsee jatkuvasti n. 6,5 bar:in paine, joka välittyi puristimen työmäntään ilman kuristinta, ja puristin toimi aina täydellä teholla. Valmiit

koekappaleet siirrettiin välittömästi tiiviin muovin alle pinnalta tapahtuvan haihtumisen minimoimiseksi. Muovilla peitettynä kappaleita säilytettiin seuraavaan päivään saakka, jolloin muotit purettiin ja koekappaleet siirrettiin kosteushuoneeseen, jossa ilman suhteellinen kosteus on jatkuvasti 95 % ja lämpötila $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Kosteushuonesäilytyksessä koekappaleet olivat 21 vuorokautta, jonka jälkeen ne siirrettiin normaaliin huoneilmastoon kuivumaan ja odottamaan koestuksia. Huoneilmastossa säilytys kesti niin kauan, että koekappaleet ehtivät saavuttaa tasapainotilan ympäristön kosteuden kanssa.

5.3. Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskokeessa koekappaleet altistettiin toistuvalla märkänä tapahtuvalle jäätymiselle ja lämpimässä vedessä tapahtuvalle sulamiselle. Koestuksessa käytettiin Pakkaskone Oy:n valmistamaa jäädytys-sulatusarkkua, jossa jäähdytykseen, sulatukseen ja kuivamiseen käytetyt ajat ovat erikseen säädettävissä. Tässä kokeessa käytettiin kahdeksan tunnin pituista toistuvaa sykliä, joka muodostui kolmesta jaksosta; ensin kappaleet jäättyivät viisi tuntia kestäneen jäädytysjakson aikana, jolloin niiden lämpötila laski -20°C :een, sitten seurasi 2,5 tuntia kestänyt sulatusjakso, jonka aikana koestuksessa käytetty arkku oli täyttyneenä lämpimällä vedellä, ja lopuksi seurasi 30 minuuttia kestänyt kuivamisjakso, jonka aikana arkku tyhjenti vedestä ja koekappaleista valui suuri osa irtovedestä pois ennen uuden syklin käynnistymistä ja jäähdytyksen alkamista. Näin vuorokaudessa ehdittiin toteuttaa kolme kokonaista sykliä. Tavoitesyklimääräksi asetettiin SFS 4529:n mukainen 50, mutta lopulta kokeessa toteutettiin 70 täyttä sykliä. Näin haluttiin varmistaa, että koekappaleiden välille saadaan riittävästi eroavaisuuksia. Toisaalta haluttiin kuitenkin välttää ylipitkää rasiuskoetta, jolloin vaarana olisi ollut kaikkien koekappaleiden lujuus- ja ulkonäköominaisuuksien radikaali heikkeneminen.

Standardissa SFS 4529 pakkasenkestävyyden kelpoisuusvaatimuksena esitetään, että 50:n jäädytys-sulatussyklin jälkeen koekappaleiden puristus- ja taivutusvetolujuuksien keskiarvot ovat vähintään 2/3 vertailukoekappaleiden vastaavista arvoista eikä koekappaleissa saa esiintyä silmännähtäviä vaurioita jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen.

Koekappaleet koestettiin kahdessa erässä, jolloin molemmissa erissä kappaleita oli arkussa pinottuna kolmeen kerrokseen. Alin kerros oli teräsritilän päällä ja muiden kerrosten välissä oli nelikulmaiset teräspuutket. Päälimmäisen kerroksen paikallaan pysyminen varmistettiin painoksi asetettujen teräsprofiilin palojen avulla. Huolellisesta asennuksesta huolimatta kappaleet pääsivät kuitenkin jonkin verran liikkumaan arkun toistuvan vedellä täyttymisen ja tyhjentymisen vaikutuksesta. Varsinkin tyhjennysjakson aikana veden liike arkussa oli varsin voimakasta tehokkaan tyhjennyspumpun takia. Todettavia vaurioita kappaleiden liike kokeen aikana ei kuitenkaan koekappaleisiin aiheuttanut eikä sellaista pakkautumista, jolla olisi ollut merkitystä esimerkiksi kappaleiden jäätymiseen tai sulamiseen, myöskään tapahtunut.

Kokeen vaikutusta koekappaleisiin arvioitiin pääasiassa jälkeinpäin suoritettujen puristus- ja taivutuslujuuskoestusten pohjalta. Käytetty syklimäärä oli sellainen, että ulkoista rapautumista ei juurikaan ollut kappaleissa vielä nähtävissä, siis siinä määrin, että merkittäviä rapautumiseroja eri reseptien välillä voitaisiin osoittaa, mutta kasvaneesta syklin aikana irronneen materiaalin määrästä ja erityisesti koekappaleiden kulmien selvästi heikentyneestä käsittelykestävyydestä voitiin kuitenkin päätellä rasituksen tehneen tehtävänsä. Kappaleiden voimakasta tuhoutumista haluttiin kokeessa välttää, mutta erot eri koostumusten välillä toivottiin saatavan näkyviin lujuudenmuutosvertailuilla.

5.4. Taivutusveto- ja puristuslujuuden määrittäminen

Kustakin koostumuksessa valmistetuista kappaleista määritettiin taivutusveto- ja puristuslujuus ennen jäädytys-sulatusrasitusta ja sen jälkeen. Jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen lujuudet määritettiin sekä rasitetuista koekappaleista että huoneilmastossa säilytetyistä vastaavan ikäisistä rasittamattomista koekappaleista. Ennen koestusta kaikki koekappaleet saivat kuivua huoneilmastoa vastaavaan kosteuteen.

Lujuuksien määrittämisessä käytettiin Roell+Korthaus -hydraulista puristuslaitteistoa. Määrittäminen tehtiin siten, että kullekin koostumukselle saatiin jokaisessa vaiheessa kuusi keskenään vertailukelpoista koetulosta. Palkkien taivutusvetolujuuksia määritettäessä tukipisteiden välimatka alapinnalla oli 300 mm ja puristus tapahtui yläpinnalta symmetrisesti

palkin keskikohtaan nähden kahdesta kohdasta, joiden välinen etäisyys oli 100 mm. Alapinnan tukipisteet sallivat palkin päiden keskenään mahdollisesti erilaisen liikkeen sekä alapinnan pituudenmuutoksen taivutuksen aikana. Yläpinnan puristuspisteiden alla käytettiin ohuita kumityynyjä tasaamassa pintaan kohdistuvia paikallisia kuormituspiikkejä. Puristuslujuus määritettiin taivutusvetolujuus-kokeessa katkenneiden palkkien toisesta päästä käyttäen 100 mm x 100 mm puristuspainimia. Metallisten painimien ja koekappaleen välissä käytettiin huokoisesta tuulensuojalevystä sahattuja 100 mm x 100 mm paloja tasaamaan kuormitusta koko koestettavalle pinnalle. Kappale asetettiin koestukseen siten, että puristus tapahtui aina suunnilleen käytetyn palkinkappaleen keskikohdalta. Sekä taivutus että puristus tapahtui aina palkin valupintaa vasten kohtisuorassa suunnassa, jolloin kerroksittain tapahtuneen tiivistyksen aiheutuman epähomogeenisuuden vaikutus oli mahdollisimman pieni.

Koestus tapahtui siten, että kuormitusta kasvatettiin ensin käyttäen siirtymäohjausta (puristimen leukojen siirtymä / aikayksikkö = vakio) kunnes 10 % ennalta-asetetusta maksimivoimatasosta oli saavutettu, jolloin laitteisto siirtyi automaattisesti voimaohjaukseen (puristusvoiman kasvu / aikayksikkö = vakio) ja koestus jatkui kappaleen murtoon saakka. Voiman kasvunopeus oli standardin SFS 4529 mukaisesti puristuslujuustestissä 0,1 N/mm²s ja taivutusvetolujuustestissä 0,06 N/mm²s. Tarvittu maksimivoima tallentui laitteiston muistiin. Tuloksista laskettiin puristuslujuus kaavalla

$$f_t = \frac{F_u}{A_e}, \quad (5)$$

missä

F_u = puristusmurtokuorma

A_e = tehokas puristuspinta-ala

ja taivutusvetolujuus kaavalla

$$f_t = \frac{P_u L}{bh^2}, \quad (6)$$

missä

P_u = koepalkin taivutusmurtokuorma, kun viivakuorma jänteen kolmannespisteissä $p_n P_u/2$

L = koepalkin jänneväli

b = palkin leveys

h = palkin korkeus

Tulokset ilmoitetaan standardin mukaisesti puristuslujuuden osalta tarkkuudella $0,1 \text{ MN/m}^2$ ja taivutusvetolujuuden osalta $0,05 \text{ MN/m}^2$ tarkkuudella.

5.5. Rakenteen silmämääräinen tarkastelu

Mikroskoopin avulla suoritettua silmämääräistä tarkastelua varten jokaisen koostumusversion (13 kpl) kumpaakin rasisuusvaihtoehtoa edustavista koekappaleista kolmesta (koekappaleet numero 1-3 sekä 7-9) sahattiin valupintaa vasten kohtisuorasti noin kolmen senttimetrin paksuiset siivut. Sahaus tehtiin timanttiterällä märkäsahauksena ja sahauspinnat huuhdeltiin välittömästi sahauksen jälkeen pintaan kertyneen sahauslietteen poistamiseksi. Tämän jälkeen kappaleet saivat jälleen kuivua huoneilmastoa vastaavaan kosteustilaan ennen tarkastelua. Mikroskooppitarkastelu suoritettiin käyttämällä Wild M5A -stereomikroskooppia, jonka maksimisuurennus oli n. 94-kertainen. Muut käytettävissä olevat suurennukset olivat noin 11-, 22- ja 46-kertaiset. Tarkastelu suoritettiin vertailemalla saman reseptin eri rasisuushistorian omaavia kappaleita keskenään sekä eri reseptien välillä saman rasisuushistorian omaavien kappaleiden kesken. Kappalemäärä kustakin vaihtoehdosta pudotettiin kuudesta kolmeen, että eri reseptien ja koekappaleiden nopea, arvioijan muistikuviiin perustuva, vertailu olisi helpompaa. Lisäksi havainnoista yritettiin löytää kullekin muutostyypille ominaisia piirteitä. Arvioinnissa kiinnitettiin erityisesti huomiota mahdollisiin näkyviin rakeisuusrakenteen eroihin, sementtiliiman jakautumiseen, rakenteen ”tyhjätilan” määrään ja jakaumaan sekä massan homogeenisuuteen. Tärkeintä oli arvioijan saama yleisvaikutelma rakenteiden eroista, ei niinkään yksittäiset irralliset rakenteen yksityiskohdat. Tehtyjä havaintoja yritettiin suhteuttaa lujuskoestuksissa saatuihin tuloksiin siten, että koekappaleen sisäisen rakenteen visuaalisilla piirteillä voitaisiin suuntaa-antavasti arvioida kappaleen fysikaalisia ominaisuuksia.

6. TUTKIMUSTULOKSET

6.1. Koekappaleiden mitat ja tiheys

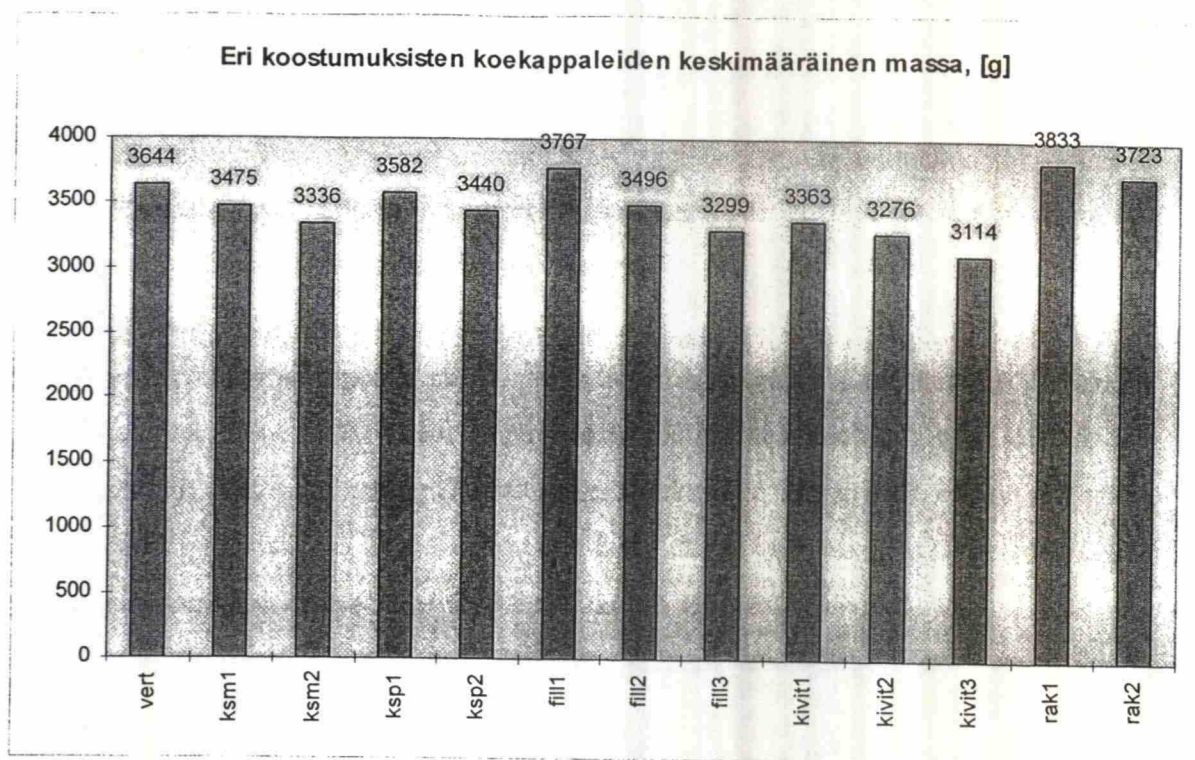
Koekappaleiden ulkomitat mitattiin millimetrijakoisella rullamitalla ja tulokseksi merkittiin kolmesta, toisistaan mahdollisimman etäällä olevasta mittauspisteestä mitattujen arvojen keskiarvo. Näin saaduilla mitoilla laskettiin kappaleiden tilavuudet ja laskennallinen poikkileikkauksen pinta-ala oli käyttökelpoinen myöhemmin laskettaessa taivutusvetokokeessa murtopinnassa vallinnutta maksimijännitystä, koska murtokohdalla kappaleen poikkileikkaus on likimain päätyjen pinta-alojen keskiarvo.

Tiheys määritettiin tehdasolosuhteita vastaavasti koekappaleiden ollessa ”huonekuivia”. Suhteellinen kosteuspitoisuus laboratoriossa vaihteli mittausajankohtina välillä 70 - 80 %. Halutulla tarkkuustasolla suhteellisen kosteuden lievällä vaihtelulla ei ole merkitystä tuloksiin. Punnitseminen suoritettiin kymmenen gramman tarkkuudella.

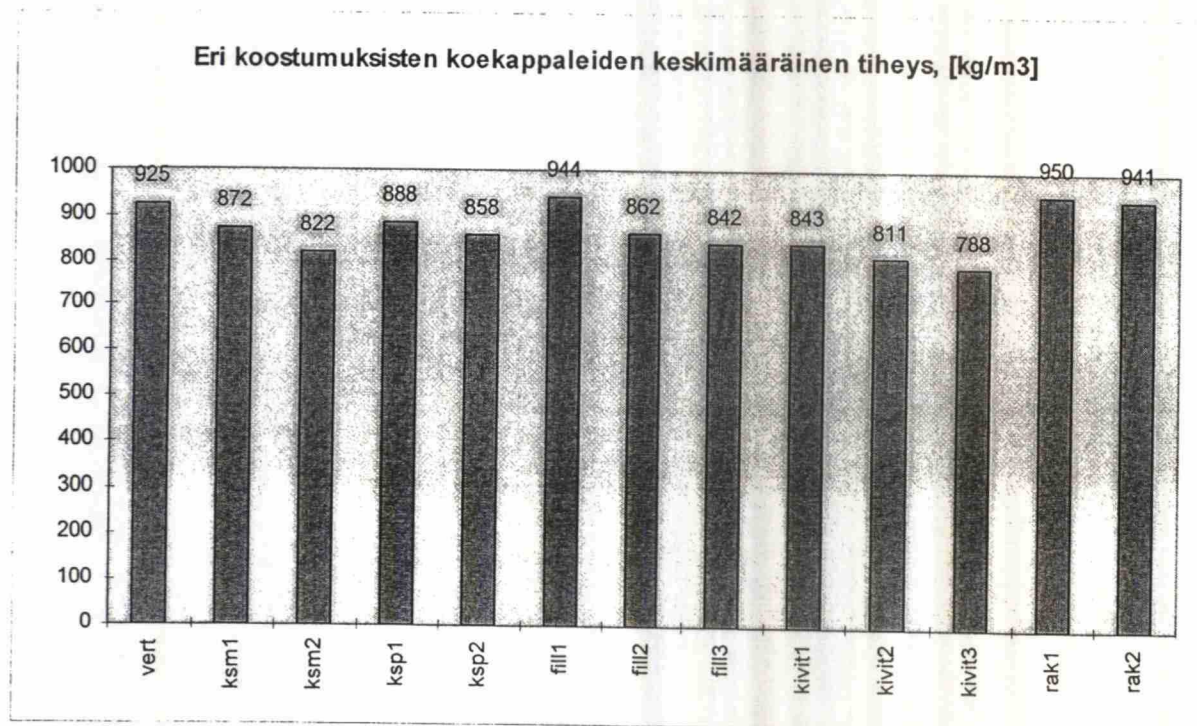
Eri koostumuksisten koekappaleiden keskimääräiset massat on esitetty kuvassa 16. Laskennassa on jätetty pois fillerikoekappaleiden valmistuksessa syntyneet selvästi poikkeavat, ulkomitoiltaan vajaat koekappaleet.

Koekappaleista lasketut keskimääräiset tiheydet on esitetty kuvassa 17. Tiheyden laskennassa on huomioitu kaikki valmistetut koekappaleet.

Koekappaleiden mitat, massa sekä niistä laskettu puristuspinta-ala, poikkileikkauksala ja tiheys on esitetty taulukkona liitteessä 2.



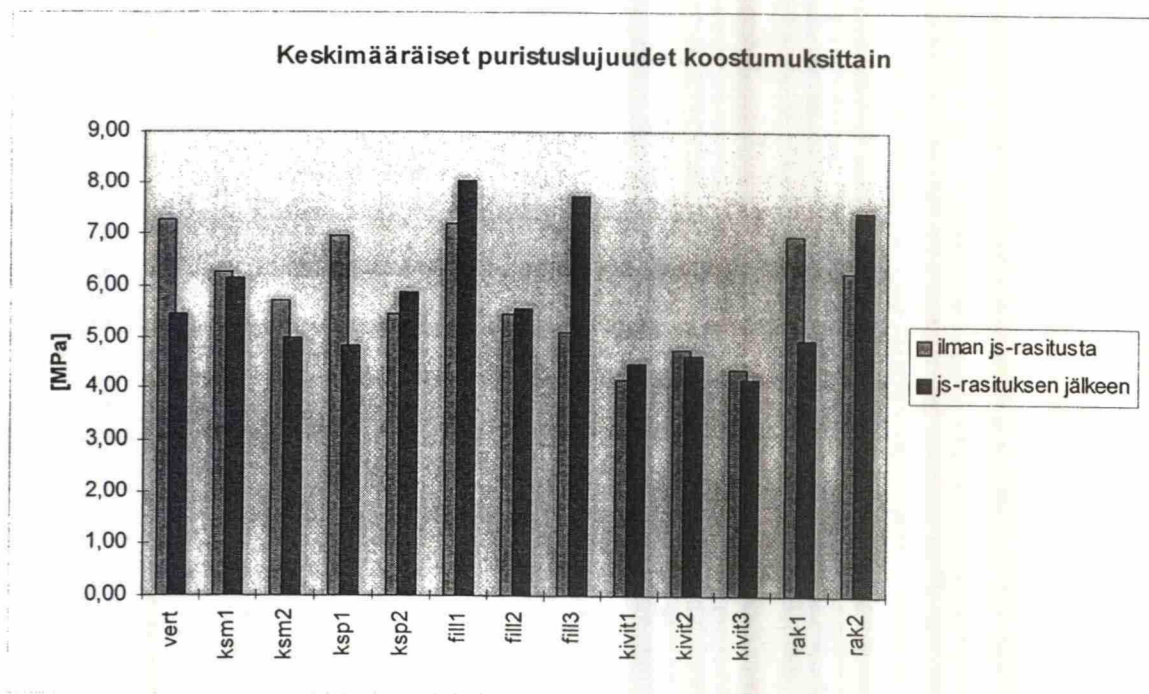
Kuva 16. Eri resepteillä valmistettujen koekappaleiden keskimääräinen massa koostumuksittain esitettynä.



Kuva 17. Koekappaleiden keskimääräinen tiheys koostumuksittain.

6.2. Puristuslujuus

Keskiarvopuristuslujuudet koostumuksittain on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Keskimääräiset puristuslujuudet koostumuksittain ilman jäädytys-sulatusrasitusta sekä rasituksen jälkeen.

Puristuslujuuden osalta kaikki testatut koostumukset täyttivät standardissa asetetun kelpoisuusvaatimuksen eli 2/3 rasittamattomasta vertailupuristuslujuudesta, vaikka käytetty syklimäärä olikin standardissa esitettyä suurempi (tässä kokeessa 70, standardissa 50).

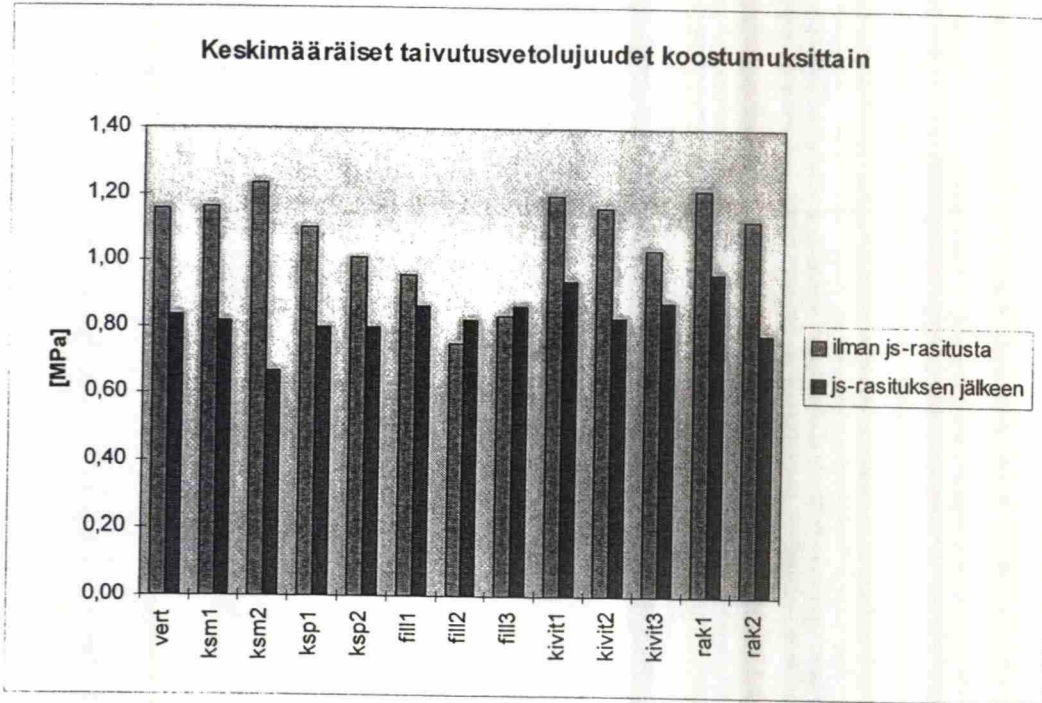
Yksittäisten koekappaleiden puristuslujuustulokset on esitetty liitteessä 3.

6.3. Taivutusvetolujuus

Keskiarvotaivutusvetolujuudet resepteittäin on esitetty kuvassa 19.

Taivutusvetolujuuden osalta kevytsoramurskaa sisältävä koostumus ksm2 ei täyttänyt standardin kelpoisuusvaatimusta eli 2/3 rasittamattomasta vertailutaivutusvetolujuudesta.

Muiden testettujen koostumusten kohdalla vaatimus täyttyi käytetystä poikkeavan suuresta syklimäärästä riippumatta.



Kuva 19. Keskimääräiset puristuslujuudet koostumuksittain ilman jäädytys-sulatusrasitusta sekä rasituksen jälkeen.

Yksittäisten koekappaleiden taivutusvetolujuustulokset on esitetty liitteessä 4.

6.4. Silmämääräiset havainnot rakenteesta

Seuraavassa esitetään koostumuksittain pestyiltä sahapinnoilta silmämääräisen tarkastelun perusteella tehdyt havainnot. Mainitut piirteet esiintyivät samankaltaisina kaikissa ko. koostumusversion kappaleissa ja selkeästi vain satunnaisesti esiintyvät poikkeavat havainnot jätettiin yleistävässä kuvauksessa huomioimatta.

VERT: Sementtikivi ei ollut kovin tasaisesti jakautunutta. Näkyvä huokoisuus oli kooltaan melko pientä, tasakokoista ja tasaisesti jakautunutta. Runkoainejakaumasta näytti puuttuvan kokonaan keskikokoinen runkoaines,

jolloin materiaali muodostuu selkeästi kahdesta eri mittakaavaisesta osasta: hienojakoisesta sementtikivestä ja suurista ks-runkoainepartikkeleista.

- KIVIT1: Hieno sementtiliimakerros peitti vain ks-rakeiden pintaa, suurien rakeiden välistä puuttui kokonaan pienemmistä fraktioista koostuva sementtikivi. Muodostunut sementtikivi sisälsi paljon suuria huokosia ja näytti ”hiekkaiselta” ja kiteiseltä eli sementtiliiman lisäksi sementtikivessä oli paljon tasakokoisia, mineraalisia rakeita. Hienon runkoaineoksen keskialue näytti puuttuvan.
- KIVIT2: Kuten edellä, mutta sementtikivi yhtenäisempää ja vähemmän hiekkaista.
- KIVIT3: Kuten edellä, mutta sementtikivi edelleen yhtenäisempää ja paremmin kevytsorarakkeiden välejä täyttävää. Raekokojakauma edelleen liian epäyhtenäinen tehokkaan tiivistymisen kannalta.
- RAK1: Sementtikivi hyvin huokoista, huokoisuus tasaisesti jakutunutta. Sementtikivi näytti kiteiseltä.
- RAK2: Sementtikivi näytti hiekkaiselta, muodostaa kuitenkin siistin, tasaisen kerroksen suurempien runkoainepartikkeleiden ympärille. Materiaalissa poikkeuksellisen paljon tyhjätillaa eli suuret rakeet olivat kiinnittyneet toisiinsa hyvin hienolla sementtikivellä vain kosketuskohdistaan.
- KSM1: Materiaalin raekokojakauma näytti tasaiselta, selkeää epäjatkuvuuskohtaa ei nähtävissä. Sementtikivi yhtenäistä ja koostumukseltaan tasaista. Huokoisuus tasakokoista ja tasaisesti jakautunutta.
- KSM2: Hyvin samanlainen ulkonäöllisesti kuin edellinen.
- KSP1: Runkoainerakeiden pakkautuminen oli tapahtunut tehokkaasti ja rakeita peittävä hieno sementtikivi näytti tasaiselta. Huokoisuus tasaista.

- KSP2: Runkoainejakauma näytti oikein hyvältä, epäjatkuvuuskohtaa ei havaittavissa. Sementtikivi näytti hyvin tasaiselta ja tiiviiltä.
- FILL1: Sementtikivi näytti tiiviiltä ja kiteiseltä. Runkoainejakauma melko hyvä.
- FILL2: Sementtikivi edellistä hieman vähemmän kiteistä, runkoainejakauma kokonaisuudessaan ei kuitenkaan yhtä hyvän näköinen.
- FILL3: Sementtikivi näytti hyvin hienolta ja tiiviiltä. Runkoainejakaumassa näytti olevan liian vähän pienehköä, suuruusluokaltaan hieman filleriä suurempaa, runkoainesta.

7. TULOSTEN TARKASTELU

7.1. Tiheys ja puristuslujuus

Eri koostumuksilla saavutetut lujuustulokset eivät sellaisenaan vielä kerro riittävästi. Kevytsoraharkon puristuslujuutta on helppo kasvattaa esim. lisäämällä hiekan osuutta reseptissä. Koska tiheys on kuitenkin keskeinen harkkojen luokittelusuure, ei hiekan määrää voida määrättömästi lisätä. Tästä johtuen mitatut tulokset pitää suhteuttaa käytetyllä koostumuksella saavutettuun tiheyteen. Tiheyteen suhteutetut puristuslujuudet on esitetty taulukossa 2. Vertailukohtana käytetyn tuotantokoostumuksen arvo on 1 ennen jäädytys-sulatusrasitusta.

Esitetty suhdeluku kuvaa kutakin koostumusta siis siten, että vertailukohtana on vertailukoostumuksella ennen jäädytys-sulatusrasitusta saatu tulos. Alle yhden oleva suhdeluku kertoo, että ko. koostumuksella saavutettu suhteellinen tulos oli huonompi kuin vertailukoostumuksella ennen jäädytys-sulatusrasitusta. Vertailemalla suhdelukuja tilanteessa ennen ja jälkeen saadaan käsitys siitä, kuinka erilaisilla koostumuksen omaavat koekappaleet keskimäärin käyttäytyivät verrattuna vertailukoostumukseen.

Taulukko 2. Eri koostumuksilla saavutetut keskimääräiset puristuslujuudet suhteessa tiheyteen ja vertailukoostumukseen.

	pur/tih ennen	jälkeen
vert	1	0,751
ksm1	0,913	0,896
ksm2	0,885	0,768
ksp1	0,995	0,693
ksp2	0,809	0,869
fill1	0,970	1,084
fill2	0,803	0,823
fill3	0,772	1,166
kivit1	0,632	0,678
kivit2	0,748	0,730
kivit3	0,705	0,677
rak1	0,933	0,663
rak2	0,846	1,001

Merkillepantavaa on joidenkin koostumusten kohdalla tapahtunut ominaisuuksien parantuminen jäädytys-sulatusrasituksessa. Näin tapahtui esimerkiksi kaikkien filleriin perustuvien koostumusten kohdalla. Yksi mahdollinen selitys ilmiölle on, että käytetty seosveden määrä ko. seoksissa oli liian pieni, jolloin hydrataatio eteni edelleen huomattavasti jäädytys-sulatusrasituksen aikana koestuksessa käytetyn veden vaikutuksesta. Tällöin jatkohydrataatioissa kehittynyt lisälujuus riitti kompensoimaan rasituksen aiheuttaman lujuuskadon ja nostamaan kappaleiden lujuudet jopa reilusti yli lähtötason. Toinen mahdollisuus on jomman kumman valuerän valmistuksessa tapahtunut huomattava systemaattinen virhe, jonka vaikutuksesta erän ominaisuudet olivat oleellisesti erilaiset. Todennäköisyys sille, että sama virhe olisi tapahtunut kaikkien kolmen valmistetun version kohdalla, on kuitenkin häviävän pieni.

Odottamatonta oli, että kaikkien koekoostumusten tiheyteen suhteutettu puristuslujuus ennen js-rasitusta oli vertailukoostumusta heikompi. Tilanne rasituksen jälkeen oli kuitenkin paljon parempi eli useimmat kokeillut koostumukset näyttivät kestävästi toistuvaa jäädytys-sulatusrasitusta vertailukoostumusta paremmin. Tässä on ehkä nähtävissä, että koostumuksen

muokkauksessa tärkeänä arvostelukriteerinä on ollut nimenomaan saavutettu puristuslujuus ottamatta erityisesti huomioon harkkojen pakkasenkestävyyttä.

Toinen merkittävä koostumuksen muokkauksessa huomioitava seikka on käytetyllä sementtimäärällä saavutetut ominaisuudet. Taulukossa 3 on esitetty puristuslujuuden ja sementtimäärän suhde. Vertailukoostumuksella arvo on 1 ennen jäädytys-sulatusrasitusta.

Suorittamalla aikaisemmin tiheyden suhteen tehty vertailu käyttämällä vertailukohtana eri koostumuksissa käytettyä sementtimäärää saadaan paremmin näkyviin kussakin koostumuksessa sementillä saavutettu hyöty. Erityisesti huomionarvoista näissä tuloksissa on koostumuksen ksp2 tulokset. Aikaisemmin käytettäessä vertailukohtana tiheyttä eivät tulokset tasoltaan juurikaan eronneet muista koostumuksista, mutta kun lujuus suhteutetaan käytettyyn sementtimäärään, ksp2-resepti nousee aivan omaan luokkaansa, koska siinä käytetty sementtimäärä on vain 70 kg/m^3 vertailukoostumuksen 130 kg/m^3 sijasta! Samasta syystä myös filleriin perustuvien koostumusten tulokset näyttävät paremmalta.

Taulukko 3. Koekoostumuksilla saavutetut keskimääräiset puristuslujuudet suhteessa käytettyyn sementtimäärään ja vertailukoostumukseen.

	pur/sem	
	ennen	jälkeen
vert	1	0,751
ksm1	0,861	0,845
ksm2	0,786	0,683
ksp1	1,242	0,865
ksp2	1,395	1,498
fill1	1,287	1,439
fill2	0,973	0,998
fill3	0,913	1,379
kivit1	0,748	0,803
kivit2	0,852	0,832
kivit3	0,781	0,749
rak1	0,958	0,680
rak2	0,860	1,018

Ennen-jälkeen -vertailu antaa hyvin samansuuntaisia tuloksia kuin aikaisemmin nähtiin puristuslujuuden kohdalla. Ennen js-rasitusta tulos on vain kolmen muutetun koostumuksen

osalta parempi kuin vertailukoostumuksella, mutta rasiuksen jälkeen määrä on kasvanut yhdeksään. Siis vain kolmen koostumuksen tulos rasiuksen jälkeen on vertailukoostumusta huonompi ja niistäkin yhden tulos on käytännössä samaa tasoa.

Yhdistettynä tuloksena voidaan edellä lasketuista suhdeluvuista esittää suhdelukujen tulo. Tällöin saadaan havainnollistettua kunkin koostumuksen kokonaistehokkuutta verrattuna vertailukoostumukseen. Tarkastelun painotusta voidaan tarvittaessa helposti muokata asettamalla puristuslujuus/tiheys- ja puristuslujuus/sementtimäärä -tuloksille erikseen halutut painokertoimet ominaisuuden merkittävyyttä vastaavasti. Tässä laskenta on suoritettu käyttäen oletuksena, että molempien tulosten painoarvo on sama. Tarkastelu on tehty erikseen ilman jäädytys-sulatusrasitusta saaduille tuloksille ja rasiuksen jälkeisille arvoille. Tulokset nähdään taulukossa 4.

Taulukko 4. Koekoostumuksien puristuslujuuksista laskettujen suhdelukujen tulo.

	tulo	
	ennen	jälkeen
vert	1	0,564
ksm1	0,787	0,757
ksm2	0,696	0,524
ksp1	1,237	0,599
ksp2	1,129	1,302
fill1	1,249	1,560
fill2	0,782	0,822
fill3	0,705	1,609
kivit1	0,473	0,545
kivit2	0,638	0,608
kivit3	0,551	0,507
rak1	0,894	0,451
rak2	0,727	1,020

Yhdistetyissä tuloksissa erottuvat edelleen edukseen erityisesti koostumukset fill1 ja ksp2. Verrattuna vertailukoostumukseen parempi tulos sekä ennen että jälkeen rasiuksen saavutettiin lisäksi koostumuksella ksp1. Huomattavaa on myös, että suhteellisesti vertailukoostumusta parempien tulosten määrä on js-rasiuksen jälkeen suurempi kuin ennen rasiusta. Tämä voidaan tulkita siten, että usea kokeiltu koostumus kesti toistuvan jäädytys-

sulatusrasituksen puristuslujuuden avulla määritettynä paremmin kuin vertailukohtana käytetty tuotantokoostumus.

7.2. Taivutusvetolujuus

Taivutusvetolujuuden osalta pätee koostumuksenmuokkauksessa pitkälti samat periaatteet kuin aikaisemmin kerrottiin puristuslujuuden kohdalla. Taivutusvetolujuus ei kuitenkaan parane yhtä hyvin pelkästään lujaa runkoainetta lisäämällä, joten hallitulla rakeisuuden muutoksella voitaisiin saada näkyviin parempia tuloksia kuin puristuslujuuden avulla mitattaessa.

Koska tiheys on kuitenkin tärkeä luokittelusuure, täytyy reseptinmuokkauksessa ottaa koko ajan huomioon muutokset kovettuneen massan tiheydessä. Määritetyt taivutusvetolujuudet suhteessa eri koostumusten keskimääräiseen tiheyteen on esitetty taulukossa 5. Vertailukoostumuksella arvo on 1 ennen jäädytys-sulatusrasitusta.

Taulukko 5. Koekoostumuksilla saavutetut keskimääräiset taivutusvetolujuudet suhteessa tiheyteen ja vertailukoostumukseen.

	taiv/tih ennen	jälkeen
vert	1	0,723
ksm1	1,069	0,751
ksm2	1,200	0,651
ksp1	0,993	0,720
ksp2	0,948	0,748
fill1	0,813	0,732
fill2	0,698	0,767
fill3	0,797	0,825
kivit1	1,137	0,894
kivit2	1,148	0,816
kivit3	1,057	0,894
rak1	1,025	0,814
rak2	0,960	0,666

Taivutusvetolujuuksien osalta kiinnittyy huomio siihen, että vain kolmen muokatun koekoostumuksen kohdalla tiheyteen suhteutettu tulos js-rasituksen jälkeen on huonompi kuin vertailukoostumuksella, vaikka ennen rasitusta määrä oli kuusi. Mainituista kolmesta kaksi, ksp1 ja rak2, oli jo lähtötasoltaan vertailukoostumusta heikompia. Poikkeavan suuri romahdus tulostasossa rasituksen seurauksena tapahtuu koostumuksen ksm2 kohdalla. Jos taivutusvetolujuutta pidetään puristuslujuutta parempana pakkasenkestävyyden mittarina, näyttäisi kuitenkin siltä, että useimmat kokeillut reseptit kestivät toistuvan rasituksen vertailukoostumusta paremmin. Kun lisäksi eri koostumuksilla saatu keskimääräinen tiheys oli kaikkien, paitsi fill1:n ja rak2:n, kohdalla vertailukoostumusta pienempi, voidaan tuloksia pitää tältä osin erittäin lupaavina.

Tilanne näyttää yhtä hyvältä, kun taivutusvetolujuudet suhteutetaan käytettyihin sementtimääriin. Nämä suhdeluvut on esitetty taulukossa 6. Vertailukoostumuksella on jälleen asetettu arvo 1 ennen jäädytys-sulatusrasitusta.

Taulukko 6. Koekoostumuksilla saavutetut keskimääräiset taivutusvetolujuudet suhteessa käytettyyn sementtimäärään ja vertailukoostumukseen.

	taiv/sem	
	ennen	jälkeen
vert	1	0,723
ksm1	1,008	0,708
ksm2	1,067	0,579
ksp1	1,240	0,899
ksp2	1,634	1,289
fill1	1,078	0,970
fill2	0,846	0,929
fill3	0,942	0,976
kivit1	1,347	1,059
kivit2	1,308	0,929
kivit3	1,169	0,989
rak1	1,052	0,836
rak2	0,976	0,677

Lähes kaikki kokeillut koostumukset näyttävät kestäneen js-rasituksen erittäin hyvin. Vain kevytsoramurskeen lisäämiseen perustuvat koekoostumukset ksm1 ja ksm2 kohdalla taivutusvetolujuuksien suhteuttamien sementtimäärään ei anna toivottua tulosta. Myös

radikaalin rakeisuusmuutoksen rak2 seuraus oli negatiivinen. Merkillepantavan positiivista on jälleen kevytsorapölyn käyttöön perustuvien koostumusten ksp1 ja ksp2, erityisesti sementtimäärältään hyvin laiha ksp2:n, hyvä tulos. Riippumatta huomattavan pienestä sementtimäärästä, oli tällä koostumuksella saavutettu tulos huomattavasti vertailukoostumusta parempi sekä ennen että jälkeen js-rasituksen eikä tulostason heikkeneminen rasituksen seurauksenaan ollut hälyttävä. Samankaltainen positiivinen tulos nähdään molempien kivituhkan käyttöön perustuvien koostumusten kivit1 ja kivit2 kohdalla. Sekä em. ksp2:n ja kivit1:n tulos rasituksen jälkeenkin oli edelleen parempi kuin vertailukoostumuksella saavutettiin edes ennen rasitusta.

Yhdistettynä tuloksena voidaan taivutusvetolujuudenkin kohdalla esittää edellä esiteltyjen suhdelukujen tulo. Nämä tulokset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Koekoostumusten taivutusvetolujuuksista laskettujen suhdelukujen tulo.

	tulo	
	ennen	jälkeen
vert	1	0,522
ksm1	1,077	0,532
ksm2	1,280	0,377
ksp1	1,231	0,647
ksp2	1,549	0,965
fill1	0,876	0,710
fill2	0,591	0,712
fill3	0,751	0,804
kivit1	1,532	0,947
kivit2	1,501	0,758
kivit3	1,235	0,884
rak1	1,079	0,681
rak2	0,937	0,451

Yhdistetyistä tuloksista erottuvat samat aikaisemminkin lupaavia tuloksia antaneet koostumukset. Erityisesti ksp2:n sekä kivituhkan perustuvien koekoostumusten kivit1 ja kivit2 tulostaso verrattuna vertailukoostumukseen on huomattavasti parempi. Poikkeavan suuri tulostason romahdus jäädytys-sulatusrasituksen seurauksena aiheutui koostumuksella ksp2. Fillerin käyttöön perustuvilla koostumuksilla fill1, fill2 ja fill3 tuloksissa näkyy

samankaltainen paraneminen rasituksen seurauksena kuin oli nähtävissä puristuslujuuden osaltakin.

Verrattaessa taivutusvetolujuustuloksia aikaisemmin esiteltyihin vastaaviin puristuslujuustuloksiin, voidaan tehdä muutama mielenkiintoinen havainto. Mukana on monta koostumusta, joiden puristuslujuustuloksissa ei tapahtunut rasituksen seurauksena kovinkaan merkittävää heikkenemistä, mutta taivutusvetolujuustuloksissa näkyy suoranaisten romahdus. Tällaisia ovat erityisesti kokeillut kevytsoramurskeeseen perustuvat koekoostumukset ksm1 ja ksm2. Jos kelpoisuuskriteerinä käytettäisiin yksinomaan puristuskoetuloksia, olisi tulkinta näiden reseptien osalta aivan toisenlainen. Nyt näyttäisi siltä, että ko. koostumuksen omaavien koekappaleiden pakkasenkestävyysominaisuudet heikkenevät nopeasti. Ksm2:han ei täyttänyt standardin kelpoisuusvaatimustakaan taivutusvetolujuuden osalta käytetyllä syklimäärällä. Päinvastainen havainto voidaan tehdä filleri- ja kivituhkakoostumusten kohdalla. Niiden puristuslujuustulokset olivat vertailukoostumukseen verrattuna vaatimattomia, mutta taivutusvetolujuudet olivat yllättävän hyviä. Erityisesti suhteutettuna käytettyyn sementtimäärään tuloksia voidaan pitää hyvin myönteisinä.

7.3. Silmämääräinen rapautuminen ja mikroskooppitarkastelu

Standardin mukaan tutkittaessa kevytsoraharkkojen kelpoisuutta pakkasenkestävyyden osalta, ei toistuva jäädytys-sulatusrasitus saa aiheuttaa näkyviä vaurioita koekappaleisiin. Vaikka tässä työssä käytetyssä koejärjestelyssä jäädytys-sulatusrasitus olikin standardin vaatimukseen nähden merkittävästi pidempi (50 syklin sijasta 70 sykliä), säilyivät kappaleet kuitenkin ulkoisesti moitteettomina. Veden liikkeen aiheuttama koekappaleiden liikkuminen yhdistettynä jäädytys-sulatussykliin rasitukseen sai aikaan vain vähäisessä määrin materiaalin irtoamista, joka näkyi lähinnä hienojakoisen aineksen kertymisinä pakkasrasituslaitteiston pohjalle. Silmämääräisesti oli kuitenkin täysin mahdotonta sanoa, mistä kappaleista irtoamista oli eniten tapahtunut eli tältä osin standardin vaatimus täyttyi kaikkien koostumusten kohdalla.

Yritettäessä yhdistää silmämääräiset havainnot aikaisemmin esitettyihin puristus- ja taivutusvetolujuustuloksien tulkintoihin havaittiin selkeästi tehtävän vaikeus. Rakenteesta

havainnoidut piirteet eivät mitenkään yksiselitteisesti näyttäneet korreloivan mitattuihin lujuusominaisuuksiin. Hyvät taivutusvetolujuustulokset saavuttaneelle koostumukselle ominainen piirre saattoi toisesta, aivan yhtä hyvät tulokset saavuttaneesta koostumuksesta näyttää puuttuvan kokonaan. Muutama yleistävä havainto tarkastelun perusteella voidaan kuitenkin tehdä.

Useassa kokeilussa koostumuksessa näytti runkoainejakauman hienossa päässä olevan selkeä epäjatkuvuuskohta. Useimmiten katkos oli kaikkein hienoimman, sementtipartikkelien suuruusluokkaa olevan runkoaineksen ja selkeästi suuremman, suuruusluokaltaan hiekan kaltaisen runkoaineosan välissä. Katkos näkyi silmämääräisesti suurempia kevytsoraraketeita ympäröivän sementtikiven ”hiekkaisuutena” eli sementtikivi ei ulospäin näyttänyt rakenteeltaan tasaiselta. Tällaisilla resepteillä saavutetut puristuslujuustulokset olivat yleensä varsin hyviä. Hiekaiselta näyttävä sementtikivi tarkoitti kuitenkin myös suurta lujuusominaisuuksien heikkenemistä jäädytys-sulatusrasituksen seurauksena. Taivutusvetolujuuteen näytti vastaavasti liittyvän samainen sementtikiven tasaisuus siten, että niillä resepteillä, joissa hienon runkoaineksen jakauma oli silmämääräisesti selkeästi yhtenäisempi eli sementtikivi näytti tasaisemmalta, saavutettiin hyviä taivutusvetolujuuden arvoja. Erityisesti tulostason muutos jäädytys-sulatusrasituksen seurauksena oli näillä koostumuksilla pieni.

7.4. Tulosten pohdintaa ja epävarmuustekijöitä

Laskettaessa yhteen eri koostumusten saavuttamia tuloksia käyttäen vertailukohtana tuotannossa käytössä olevaa vertailukoostumusta, voidaan todeta, että kokeilluista koostumuksista puolet olivat mitattujen ominaisuuksien osalta oleellisesti vertailukohtaa parempia. Erityisen onnistuneita muutokset näyttivät olevan koostumuksissa ksp2 ja fill1. Hyviä tuloksia saavutettiin myös koostumuksilla ksm1 sekä kivit1 ja kivit2. Jotain tulosten yllätyksellisyydestä kertoo sekin, että kunkin koostumuksen kohdalla kakkosversio yritettiin etukäteen miettiä mahdollisimman radikaaliksi, jolloin mahdollinen myönteinen tulos olisi ollut nähtävissä jo versiossa 1 ja versio 2 olisi ns. ”mennyt yli” eli tulos olisi jälleen heikentynyt. Nyt näin ei käynyt vaan kakkosversiotkin saavuttivat myönteisiä tuloksia.

Yksi tulosten tarkastelun yhteydessä herännyt kysymys liittyy jäädytys-sulatusrasituksen aikana tapahtuneen hydrataation etenemisen vaikutuksiin. Varsinkin puristuslujuustuloksissa herätti ihmetystä, että kolmestatoista kokeillusta koostumuksesta kuuden kohdalla keskimääräinen puristuslujuus parani rasituksen aikana. Näin tapahtui mm. kaikille filleriin perustuville koostumuksilla, mistä seurasikin päätelmä, että ainakin ko. koostumuksissa käytetty seosveden määrä on ollut hydrataation kannalta liian pieni, jolloin lujoudenmuodostus on jatkunut voimakkaasti edelleen koekappaleiden kastuttua js-rasituksen aikana. Fillerikoekappaleissa rasituksella oli vähäisin vaikutus myös taivutusvetolujuustuloksiin - yhden kohdalla tulos jopa parani - mikä osaltaan tukee tehtyä päätelmää.

Toinen jo aikaisemminkin esiin tullut epävarmuustekijä liittyy yksittäiselle koekappaleelle vallinneisiin olosuhteisiin jäädytys-sulatusrasituksen aikana. Koska syklissä veden poistumiseen varattu aika oli varsin lyhyt, herää kysymys, kuinka erilaisissa olosuhteissa eri kerroksissa sijainneet koekappaleet olivat verrattuna toisiinsa? Vaikka vesi poistuihin koelaitteiston arkusta varsin nopeasti, ehtivät ylempänä olleet kappaleet kuitenkin kuivua hieman enemmän, koska niistä valuva vesi piti alempana olleet koekappaleet koko ajan täysin märkinä. Asian merkitystä tuloksiin voi vain arvailla, mutta tasapuolisuuden vuoksi kappaleiden sijaintia koelaitteistossa tulisi vastaisuudessa tämän kaltaisessa koejärjestelyssä vaihdella koestuksen aikana. Suuremmassa kosteustilassa oleviin koekappaleisiin kohdistuu kuitenkin toistuvassa js-rasituksessa suurempi rasitus, jolla jossain tapauksessa saattaa olla vaikutusta tulosten vertailtavuuteen. Samalla tavalla koekappaleen sijainti arkussa näytti vaikuttavan siihen, kuinka paljon kappale liikkui syklin aikana. Kuten jo aikaisemmin todettiin, koekappaleiden liikkuminen koestuksen aikana ei ollut kuitenkaan niin voimakasta, että sillä olisi voinut ollut merkittävää vaikutusta tuloksiin. Kappaleiden paikoillaanpysymiseen tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota, koska kelluvina kappaleina kevytsoraharkot ovat alttiita veden liikkeille.

Kokonaan toinen pohtimisen arvoinen seikka sitten onkin, kuinka tarkoituksenmukainen tällainen koejärjestely yleensäkin on testattaessa harvasta kevytsorabetonista valmistettuja harkkoja. Todellisissa käyttöolosuhteissa tällaiset tuotteet tuskin koskaan altistuvat jäätymiselle näin rankoissa kosteusolosuhteissa, jolloin saadut pakkasenkestävyytulokset

eivät kuitenkaan kerro ominaisuuksista todellisissa rasitusolosuhteissa. Kevytsorabetonin sisäinen rakenne on niin avoin, että jäätyksen vaikutuksen sisäisiin jännityksiin muuttuvat oleellisesti, kun rakenne pidetään keinotekoisesti vedellä kyllästyneenä. Tietenkin standardin mukainen koestus mahdollistaa eri tuotteiden luotettavan vertailun, mutta ks-tuotteille tulisi ehkä sittenkin muokata oma, luonteeltaan hieman erilainen pakkasenkestävyyskokeensa.

Silmämääräisessä tarkastelussa käytetty koekappaleiden valmistelumenetelmä toi mukanaan epävarmuutta tulkintoihin. Koekappaleiden sahaus suoritettiin kookkaalla betonikappaleiden sahauskoneeseen tarkoitettulla timanttisahalla, jonka käyttö edellyttää melko runsasta vedenkäyttöä sahauspinnassa. Tämän lisäksi sahauspinnat pestiin juoksevan veden alla välittömästi sahauskoneen jälkeen muodostuneen sahauslietteen poistamiseksi. Yhdessä näillä toimenpiteillä saattoi olla merkittäviäkin vaikutuksia sahauspintojen rakenteeseen. Varsinkin hieno, heikosti kiinnittynyt runkoaines ja sementtikiven osat saattoivat käsittelyssä irrota, jolloin suoritettussa silmämääräisessä tarkastelussa ei välttämättä saatu sisäisestä rakenteesta täysin oikeaa kuvaa. Samaan ongelmaan törmätään yleisemminkin hauraita, huokoisia materiaaleja tarkasteltaessa. Tässä tapauksessa merkitys oli todennäköisesti pieni, koska tarkastelussa voitiin hyödyntää rakenteen huokoisuutta ja sen ”onkaloita”, joiden pinnat eivät oletettavasti häiriintyneet sahauskäsittelystä.

Merkittävä epävarmuustekijä, joka tässä tutkimuksessa jätettiin huomioimatta, on koostumuksen vaikutus massan valmistukseen. Käytännössä tämä tarkoittaa lähinnä massan koostumuksen mukaan muuttuvia sekoitusaikoja ja -järjestyksiä. Kokeillut aineosat ovat luonteeltaan keskenään niin erilaisia, että massan valmistusprosessi pitäisi optimoida kunkin kohdalla erikseen. Nyt aineiden sekoitusjärjestys, käytetyt sekoitusajat ja seosveden määrä siirrettiin suoraan vertailukoostumuksen valmistuksesta. Massan todellinen seosvedentarve vaihtelee runkoaineesta riippuen hyvinkin paljon. Käytettäessä vakiovesimäärää massan todellinen vesisementtisuhte vaihtelee riippuen mm. runkoaineseoksen vedenpidätyskyvystä. Oletettavasti merkittävä vaikutus tuoreen massan työstettävyyteen ja tiivistymiseen on myös seosveden lisäämisen ajankohdalla. Erilaisia runkoaineita kokeiltaessa tulisikin löytää kullekin aineelle myös sopiva vedenlisäystavan ja sekoitusaikojen yhdistelmä.

8. YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Koekappaleiden valmistuksessa ja koestuksessa yritettiin mahdollisuuksien mukaan ennakoida mahdollisia ongelmia ja epävarmuustekijöitä muokkaamalla valmistus- ja koestusproseduureja sellaisiksi, että vertailtavuus erilaisten koostumuksien välillä kärsisi mahdollisimman vähän niissä syntyvistä virhelähteistä. Jälkikäteen on kuitenkin helppo todeta sellaisia mahdollisesti tuloksiin vaikuttavia seikkoja, joita ei edes ennakkokokeiden yhteydessä tullut ajatelleeksi.

Käytetty valumassojen tiivistystapa ei loppujen lopuksi sittenkään kuvannut riittävän hyvin tehdasvalmistuksessa käytettyä menettelyä, mikä osaltaan nosti koekappaleiden tiheydet liian suuriksi. Ennakkokokeiden perusteella, siis pienemmillä kerta-annoksilla ja pienemmällä sekoittimella, tiheyden kasvun ei havaittu olevan haittaavan voimakasta, mutta kuitenkin lopullisissa koekappaleissa tiheydet nousivat halutusta tasosta niin paljon, että tulosten soveltaminen tehdasmittakaavaiseen valmistukseen vaatii ehdottomasti tarkentavia lisäkokeita ennenkuin täysin luotettavia johtopäätöksiä voidaan tehdä.

Kokonaisuudessaan parhaat tulokset saatiin fillerin käyttöön perustuvilla koostumusmuutoksilla. Näillä koostumuksilla valmistetut koekappaleet säilyttivät lujuusominaisuutensa erittäin hyvin jäädytys-sulatusrasituksessa. Kolmesta kokeillusta versiosta parhaimpana voidaan pitää alkupohdintojen vastaisesti versiota fill3. Huonoin näistä kolmesta oli fill1, jossa filleriä käytettiin alkuperäisen koostumuksen hiekkaa vastaava määrä. Taloudellisestikin filleri on hyvä vaihtoehto, koska vaikka se onkin jonkin verran tavallista hiekkaa kalliimpaa, sen avulla voidaan pienentää massan sementtimäärää ja lisäksi näyttäisi, että filleriä itsessään tarvitaan massaan vähemmän kuin hiekkaa, jolloin kappaleiden tiheys pienenee.

Toinen onnistunut koostumusryhmä oli kevytsorapölyyn pohjautuvia muutoksia sisältävät koekoostumukset. Kokeilluista versioista erityisesti versio ksp2 yllätti hyvillä tuloksilla, olihan siinä käytetty sementtimäärä huomattavan pieni vertailukoostumukseen nähden.

Vähäinen sementin määrä laski myös kappaleiden tiheyttä alle vertailukoostumuksella valmistettujen. Kevytsorapöly on siis hyvä lisä kevytsorabetonin runkoaineisiin, jos tuotantoa varten riittävä saatavuus pystytään turvaamaan.

Kivituhkaa sisältävillä koostumuksilla valmistettujen koekappaleiden tulokset olivat muuten hyviä, mutta jäädytys-sulatusrasitus heikensi taivutusvetolujuuksia aiemmin mainittuja koostumuksia enemmän. Samoin kävi kevytsoramurskeen käyttöön perustuvilla koostumuksilla.

Kokeilluista koostumuksista heikoimmat olivat kevytsorarunkoaineen rakeisuuden muutokseen perustuvat koekoostumukset. Näiden ongelma oli lähinnä liian suuri tiheys ja täysin epäonnistunut ulkonäkö. Kaikkein heikoin koostumuksista oli rak1.

Lisätutkimustarvetta on selvästi myös erilaisten muutosten optimaalisessa yhdistämisessä yhdeksi muokatuksi koostumukseksi. Käytännössä saattaa olla niin, että tässä tutkimuksessa epäonnistuneelta näyttänyt muutos koostumuksessa toimisi yhdessä jonkin toisen muutoksen kanssa huomattavasti paremmin. Erityisesti runkoaineen yhdistäminen useasta kokeissa käytetystä materiaalista saattaisi antaa hyviä tuloksia. Runkoaineen koostumuksen optimointiin tulisi kuitenkin yhdistää myös käytettävän seosveden määrän optimointi, sekoitusajan muokauttaminen massan koostumukseen sekä osa-aineiden oikean sekoitusjärjestyksen etsiminen.

Tehdyillä koostumusmuutoksilla saavutetut tulokset ovat kuitenkin kokonaisuudessaan lupaavia. Kärjistetysti voidaan sanoa, että pelkästään lujuuskokeiden perusteella mikään toteutettu muutos ei oleellisesti heikentänyt kovettuneen massan ominaisuuksia verrattuna tuotantokoostumukseen. Voidaankin olettaa, että kokeiltujen muutosten periaate oli oikea eli sementtimäärää voidaan massassa todellakin pienentää, kun runkoaineen rakeisuudeltaan erittäin hienon osan määrää samanaikaisesti kasvatetaan. Kokonaisuudessaan asia ei tietenkään ole näin yksinkertainen, koska esimerkiksi jotkut kokeilluista muutoksista kyllä täyttivät asetetut lujuusodotukset, mutta kovettuneiden kappaleiden ulkonäkö oli kaikkea muuta kuin hyväksyttävä. Valmistusprosessissa kokonaisuudessaan siis selvästi kuitenkin on

potentiaalia merkittävään tekniseen kehitykseen ja sitä kautta on mahdollista saavuttaa merkittäviäkin kustannussäästöjä.

9. LÄHTEET

Concrete Society Technical Report, Report of Concrete Society Working Group, Final draft. Paper for Conference in London, 12 Dec. 1985. Permeability of Concrete and its control. The Concrete Society. London 1985. 68 p.

Fagerlund, Göran, Betongkonstruktioners beständighet. Cementa AB. Uppsala 1987.

Fagerlund, Göran, Frost resistance of concrete with porous aggregate. Cement- och betonginstitutet (CBI), Research 2:78. Stockholm 1978. 189 s.

Heikkinen, Aino, von Konow, Thorborg. 1992. Betonin mikrosuhteitus, by 301. Suomen Betonitieto Oy. Gummerus Kirjapaino, Jyväskylä. 64 + 71 s.

Jokela, Jukka, Kukko, Heikki, Metso, Jukka, Pihlajavaara, Sven, Sarja, Asko, Vesikari, Erkki, Virtanen, Jorma. 1980. Kovettuneen betonin perusominaisuudet. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Betoni- ja silikaattitekniiikan laboratorio, Tiedonanto 74. VTT Offsetpaino. Espoo. 101 s.

Kellomäki, Aarre, Huokoisuus ja ominaispinta-ala. AEL / Insko-seminaari 1998. Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, Kemian laitos. Tampere 1998. 17 s.

Kokko, Pekka, Seinärakenteiden pitkäaikaiskestävyydestä. Diplomityö, Tampereen Teknillinen Korkeakoulu. Tampere 1989.

Kukko, Heikki, Frost effects on the microstructure of high strength concrete, and methods for their analysis. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 126. Espoo 1993. 133 + 44 p.

- Komonen, Juha, Betonin pakkasenkestävyydestien kriittinen vertailu. Teknillinen Korkeakoulu, Rakennusmateriaalitekniikka, Julkaisu 12. Espoo 1999. 72 + 6 s.
- Kuosa, Hannele, Vesikari, Erkki, Betonin vanhentuminen ja sen vaikutukset säilyvyyteen arktisissa meriolosuhteissa. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Betoni- ja silikaattitekniikan laboratorio, Tutkimuksia 628. Espoo 1989. 46 s.
- Luping, Tang, Petersson, Per-Erik, Slab Test - Freeze/Thaw Resistance of Concrete-Internal deterioration. SP, Borås, April 2000. 12 p.
- Matala, Seppo, Betonin rakenne ja vaurioituminen. Seminaariesitelmä teoksessa RIL K145-1991 Betonirakenteiden säilyvyys, vauriot ja korjaaminen. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto (RIL). Helsinki 1991. 30 s. (165 s.)
- Matala, Seppo, Effects of carbonation on the pore structure of granulated blast furnace slag concrete. Helsinki University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Surveying, Concrete Technology. Report 6. Espoo 1995. 161 p.
- Neville, A. M., Properties of concrete, 4th and final edition. Longman Group Limited. Longman House, Burnt Mill, Harlow, Essex. England 1995. 844 p.
- Penttala, Vesa, Freezing-Induced Strains and Pressures in Wet Porous Materials and Especially in Concrete Mortars. Elsevier Science Ltd. New York 1998. 7 p.
- Penttala, Vesa, Strains and pressures induced by freezing mortars exposed in sodium chloride solution. Concrete Science and Engineering, Vol. 1, March 1999. pp. 2-14.
- Pentti, Matti, Ulkoseinärakenteiden pitkäaikaiskestävyys, Betonirakenteiset, muuratut ja puujulkisivut. Tampereen Teknillinen korkeakoulu, Talonrakennustekniikka, Raportti 33. Tampere 1988. 254 s.
- Pigeon, M, Pleau, R, Durability of concrete in cold climates. 1995.

RILEM Technical Committee IDC "Internal Damage of Concrete", CIF-Test Test method of frost resistance of concrete. RILEM TC 176 IDC, remark by the Chairman Max J. Setzer. 1998. 26 p.

Setzer, Max J., Basis of testing the freeze-thaw resistance: surface and internal deterioration. RILEM, Proceedings 34, Frost Resistance of Concrete. Proceedings of the International RILEM Workshop on Resistance of Concrete to Freezing and Thawing With or Without De-icing Chemicals, University of Essen, September 1997. Edited by Max Josef Setzer. Chapman&Hall, London, 1997. Pp. 157-173.

Silvennoinen, Kari, Betoni- ja muurauksmateriaalien huokoisuustutkimuksia. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Betoni- ja silikaattitekniikan laboratorio, Tiedotteita 857. Espoo 1988. 58 s.

Suomen Standardoimisliitto. SFS 4529 Kevytsoraharkot. Näytteenotto, testaus ja hyväksymissäännöt. 1986. 7 s.

Suomen Standardoimisliitto. SFS 5444 Betoni. Taivutusvetolujuus. 1988. 3 s.

Vesikari, Erkki, Betonin pakkasenkestävyys ja käyttöikä. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), Rakennusmateriaalilaboratorio, Tutkimuksia 749. Espoo 1991. 56 s.

Vesikari, Erkki, Betonirakenteiden käyttöiän arviointi tietokonesimuloinnilla. Lisensiaatintyö, Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto. Espoo 1998. 131 s.

KÄYTETTYJEN KOEKAPPALETUNNUKSIEN SELVENNYKSET

Kaikki tunnukset ovat muotoa:

koostumuksen lyhenne + version numero (jos useita erilaisia) + koekpl:een numero (1-12)

Kussakin koostumusversiossa koekappaleet 1-6 olivat jäädytys-sulatusrasituksessa ja numerot 7-12 toimivat niiden vertailukoekappaleina.

lyhenne	kuvaus (suluissa muutos vertailukoostumukseen / m ³)
<i>vert</i>	Vertailukoostumus, Optirocilla käytössä ollut tuotantokoostumus.
<i>kspöly 1 ja 2</i>	Osa sementistä korvattu kevytsorapölyllä. Versiossa 1 sementtimäärä pienennetty 100 kg:aan (-30kg), ks-pölyä 10 kg (+10 kg); versiossa 2 sementtiä vain 70 kg (-60 kg), ks-pölyä 20 kg (+20 kg).
<i>ksm 1 ja 2</i>	Hiekan määrää pienennetty, lisätty vastaava tilavuusosa kevytsoramursketta. Versiossa 1 hiekkaa 190 kg (-50 kg), ks-mursketta 5,2 kg (+5,2 kg); versiossa 2 hiekkaa 160 kg (-90kg), ks-mursketta 8,4 kg (+8,4 kg).
<i>filleri 1, 2 ja 3</i>	Hiekka korvattu kokonaisuudessaan fillerillä, sementtimäärä vakio 100 kg (-30 kg). Versiossa 1 fillerä 240 kg (=hiekkaa vertailureseptissä), versiossa 2 190 kg (-50 kg) ja versiossa 3 160 kg (- 80 kg).
<i>kivit 1, 2 ja 3</i>	Hiekka korvattu kokonaisuudessaan kivituhkalla, sementtimäärä vakio 100 kg (-30 kg). Versiossa 1 kivituhkaa 240 kg, versiossa 2 190 kg ja versiossa 3 160 kg. (Vert. edellinen koekoostumus.)

rakeisuus 1 ja 2

Kevytsorarakoaineen rakeisuusjakaumaa muutettu. Versiossa 1 pienempiraekokoisen laadun osuus runkoaineesta on 40 % (+20 %); versiossa 2 osuudet ovat muuttumattomat, mutta pienempiraekokoisen laadun koostumusta muutettiin siten, että hienon aineksen osuus kasvoi.

Koekappaleiden mitat ja massat

tunnus	massa [g]	pit. [mm]	lev. [mm]	kork. [mm]	tiheys [kg/m ³]
vert1	3560	404	100	99	890
2	3610	403	100	100	896
3	3780	403	100	100	938
4	3760	401	100	104	902
5	3670	402	100	99	922
6	3880	402	100	100	965
7	3680	400	97	100	948
8	3360	400	97	97	893
9	3560	400	97	98	936
10	3520	400	97	98	926
11	3670	401	97	99	953
12	3680	399	97	102	932
ka.	3644				925
ksm11	3420	400	100	101	847
12	3480	400	100	101	861
13	3490	403	100	101	857
14	3570	403	100	100	886
15	3570	401	100	100	890
16	3470	402	100	98	881
17	3310	400	97	102	836
18	3270	398	97	100	847
19	3430	400	97	102	867
110	3510	400	97	100	905
111	3600	400	97	103	901
112	3580	400	97	104	887
ka.	3475				872
ksm21	3170	400	100	100	793
22	3080	400	100	100	770
23	3230	400	100	100	808
24	3390	400	100	100	848
25	3230	399	100	100	810
26	3390	400	100	98	865
27	3320	403	100	104	792
28	3390	403	100	105	801
29	3500	402	100	102	854
210	3410	403	100	103	822
211	3360	401	100	100	838
212	3560	401	100	102	870
ka.	3336				822
ksp11	3510	401	100	100	875
12	3520	402	100	102	858
13	3490	403	100	100	866
14	3540	402	100	100	881
15	3500	400	100	101	866
16	3670	404	100	97	937
17	3490	400	100	101	864
18	3670	403	100	102	893
19	3640	402	100	101	897
110	3610	400	100	100	903
111	3650	402	100	101	899
112	3690	400	100	100	923
ka.	3582				888
ksp21	3380	400	100	100	845
22	3270	398	100	100	822

23	3530	400	100	101	874
24	3380	400	100	101	837
25	3460	399	100	100	867
26	3610	400	100	101	894
27	3250	399	97	100	840
28	3280	400	97	100	845
29	3390	402	100	100	843
210	3470	403	100	102	844
211	3610	401	100	102	883
212	3650	402	100	100	908
ka.	3440				858
fill11	3680	401	100	100	918
12	3880	401	100	100	968
13	4010	401	100	102	980
14	3950	402	100	100	983
15	3990	401	100	103	966
(vajaa)16	3660	402	100	90	1012
17	3600	402	100	101	887
18	3670	401	100	101	906
19	3690	402	100	101	909
110	3640	403	100	99	912
111	3620	400	97	100	933
112	3710	400	97	100	956
ka.	3758				944
fill21	3550	403	100	101	872
22	3580	400	100	103	869
23	3780	401	100	103	915
24	3680	402	100	103	889
25	3630	401	100	100	905
(vajaa)26	3280	402	100	90	907
27	3210	400	100	101	795
28	3350	402	100	102	817
29	3360	402	100	102	819
210	3540	403	100	100	878
211	3330	400	100	101	824
212	3450	403	100	100	856
ka.	3478				862
fill31	3430	400	97	100	884
32	3440	400	97	97	914
33	3590	400	97	98	944
34	3710	400	97	100	956
35	3780	399	97	100	977
(yksin)36	2910	400	100	100	728
37	3080	401	97	102	776
38	3020	400	97	100	778
39	3090	400	97	100	796
310	3090	400	97	101	789
311	3130	401	97	100	805
312	2930	400	97	100	755
ka.	3267				842
kivit11	3240	400	97	101	827
12	3240	400	97	101	827
13	3360	400	97	100	866
14	3350	400	97	101	855
15	3410	400	97	100	879
16	3440	400	97	101	878
17	3230	402	100	103	780
18	3330	401	100	102	814

19	3360	404	100	102	815
110	3400	402	100	101	837
111	3470	401	100	101	857
112	3530	400	100	100	883
ka.	3363				843
kivit21	3140	400	100	103	762
22	3250	401	100	102	795
23	3360	402	100	101	828
24	3340	400	100	100	835
25	3370	400	100	100	843
26	3570	400	100	100	893
27	3060	402	100	102	746
28	3150	401	100	101	778
29	3260	404	100	102	791
210	3180	400	97	102	804
211	3320	400	97	101	847
212	3310	404	100	101	811
ka.	3276				811
kivit31	3010	400	97	102	761
32	3010	400	97	100	776
33	3190	401	100	102	780
34	3260	401	100	101	805
35	3230	400	100	101	800
36	3470	400	100	100	868
37	2840	400	97	102	718
38	2920	399	97	100	754
39	3050	400	97	101	778
310	2960	400	97	100	763
311	3160	400	97	101	806
312	3270	400	97	100	843
ka.	3114				788
rak11	3720	401	100	97	956
12	3850	400	100	100	963
13	3900	400	100	101	965
14	4030	400	100	101	998
15	3930	400	100	103	954
16	4030	403	100	100	1000
17	3690	403	100	98	934
18	3630	401	100	101	896
19	3860	401	100	102	944
110	3720	403	100	100	923
111	3740	400	100	99	944
112	3890	404	100	105	917
ka.	3833				950
rak21	3530	400	97	100	910
22	3700	398	97	100	958
23	3750	399	97	100	969
24	3670	399	97	99	958
25	3850	400	97	103	963
26	3840	398	97	101	985
27	3690	403	100	101	907
28	3800	402	100	100	945
29	3770	403	100	100	935
210	3820	401	100	102	934
211	3600	400	100	102	882
212	3660	400	97	100	943
ka.	3723				941

Koekappaleiden puristuslujuudet ilman jäädytys-sulatusrasitusta, [MPa]

koost.	koekappale						ka.(i)	kesk.haj.
	7	8	9	10	11	12		
vert	9,50	6,20	7,08	7,40	7,27	6,17	7,27	1,11
ksm1	6,27	5,93	6,24	6,48	7,08	5,56	6,26	0,47
ksm2	5,61	5,96	6,84	4,60	5,40	5,89	5,72	0,67
ksp1	6,45	7,21	7,15	7,88	6,23	6,77	6,95	0,54
ksp2	5,85	5,94	5,29	5,08	5,57	5,04	5,46	0,35
fill1	6,61	6,44	6,81	6,90	7,22	9,21	7,20	0,93
fill2	4,86	6,13	4,41	6,15	5,38	5,72	5,44	0,64
fill3	4,65	5,57	5,02	5,31	5,52	4,58	5,11	0,39
kivit1	3,75	5,04	4,39	3,69	4,00	4,24	4,19	0,46
kivit2	4,58	4,43	5,58	4,33	5,18	4,50	4,77	0,46
kivit3	3,74	4,45	3,81	4,54	4,47	5,16	4,36	0,48
rak1	7,50	7,64	7,76	6,58	6,53	5,78	6,96	0,72
rak2	6,39	6,75	6,13	6,97	4,82	6,44	6,25	0,69

Koekappaleiden puristuslujuudet jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen, [MPa]

koost.	koekappale						ka.(j)	kesk.haj.
	1	2	3	4	5	6		
vert	6,32	5,82	5,34	4,55	5,92	4,79	5,46	0,63
ksm1	7,35	6,47	4,62	6,68	6,36	5,38	6,14	0,89
ksm2	6,82	3,67	4,30	5,89	3,58	5,53	4,96	1,20
ksp1	5,92	4,65	4,86	4,25	4,31	5,03	4,84	0,56
ksp2	5,81	5,02	6,33	5,89	6,07	6,05	5,86	0,41
fill1	6,89	6,87	8,38	8,55	9,29	8,27	8,04	0,88
fill2	5,78	4,46	5,45	5,50	6,28	6,02	5,58	0,58
fill3	6,60	8,67	8,97	9,92	8,16	3,96	7,71	1,95
kivit1	4,21	4,24	4,72	4,72	4,94	4,11	4,49	0,31
kivit2	3,98	4,67	4,88	4,77	4,60	5,02	4,65	0,33
kivit3	5,00	4,03	3,70	3,93	3,92	4,55	4,19	0,45
rak1	5,68	5,88	4,69	4,84	4,68	3,89	4,94	0,67
rak2	6,80	7,54	7,54	7,79	7,72	7,02	7,40	0,37

Koekappaleiden puristuslujuudet ilman jäädytys-sulatusrasitusta, [MPa]
(suurin ja pienin arvo poistettu)

koost.	Koekappale						korj.ka.(i) kesk.haj.	
	7	8	9	10	11	12		
vert		6,20	7,08	7,40	7,27		6,99	0,47
ksm1	6,27	5,93	6,24	6,48			6,23	0,20
ksm2	5,61	5,96			5,40	5,89	5,72	0,22
ksp1	6,45	7,21	7,15			6,77	6,90	0,31
ksp2	5,85		5,29	5,08	5,57		5,45	0,29
fill1	6,61		6,81	7,11	7,22		6,94	0,24
fill2	4,86	6,13			5,38	5,72	5,52	0,47
fill3	4,65		5,02	5,31	5,52		5,12	0,33
kivit1			4,39	3,69	4,00	4,24	4,08	0,26
kivit2	4,58	4,43			5,18	4,50	4,67	0,30
kivit3		4,45	3,81	4,54	4,47		4,32	0,29
rak1	7,50	7,64		6,58	6,53		7,06	0,51
rak2	6,39	6,75	6,13			6,44	6,43	0,22

Koekappaleiden puristuslujuudet jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen, [MPa]
(suurin ja pienin arvo poistettu)

koost.	koekappale						korj.ka.(j) kesk.haj.	
	1	2	3	4	5	6		
vert		5,82	5,34		5,92	4,79	5,47	0,45
ksm1		6,47		6,68	6,36	5,38	6,22	0,50
ksm2		3,67	4,30	5,89		5,53	4,85	0,90
ksp1		4,65	4,86		4,31	5,03	4,71	0,27
ksp2	5,81			5,89	6,07	6,05	5,96	0,11
fill1	6,89		8,38	8,55		8,27	8,03	0,66
fill2	5,78		5,45	5,50		6,02	5,68	0,23
fill3	6,60	8,67	8,97		8,16		8,10	0,91
kivit1	4,21	4,24	4,72	4,72			4,47	0,25
kivit2		4,67	4,88	4,77	4,60		4,73	0,11
kivit3		4,03		3,93	3,92	4,55	4,11	0,26
rak1	5,68		4,69	4,84	4,68		4,97	0,41
rak2		7,54	7,54		7,72	7,02	7,46	0,26

Koekappaleiden todelliset taivutusvetolujuudet ilman jäädytys-sulatus-rasitusta, [MPa]

koost.	koekappale						ka. (i)	kesk.haj.
	7	8	9	10	11	12		
vert	1,14	1,20	1,26	1,24	1,00	1,09	1,15	0,09
ksm1	1,22	1,40	1,19	1,16	1,00	1,01	1,16	0,13
ksm2	0,99	1,15	1,27	1,30	1,35	1,33	1,23	0,12
ksp1	1,09	1,08	1,22	1,21	0,98	1,03	1,10	0,09
ksp2	1,01	0,88	0,97	0,94	1,17	1,12	1,02	0,10
fill1	1,01	0,89	0,94	1,00	0,98	0,93	0,96	0,04
fill2	0,61	0,87	0,87	0,80	0,68	0,69	0,75	0,10
fill3	0,68	0,74	0,81	0,93	0,88	0,96	0,84	0,10
kivit1	1,15	1,04	1,18	1,11	1,33	1,36	1,20	0,11
kivit2	1,18	1,19	1,25	1,30	1,05	1,00	1,16	0,11
kivit3	0,97	1,06	0,99	1,14	1,06	1,01	1,04	0,06
rak1	1,42	1,29	1,11	1,24	1,13	1,09	1,21	0,12
rak2	1,06	1,12	1,06	1,25	1,25	1,01	1,13	0,09

Koekappaleiden todelliset taivutusvetolujuudet jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen, [MPa]

koost.	koekappale						ka. (j)	kesk.haj.
	1	2	3	4	5	6		
vert	0,83	0,77	1,02	0,69	0,81	0,89	0,83	0,10
ksm1	0,69	0,72	0,70	0,93	0,99	0,87	0,82	0,12
ksm2	0,77	0,53	0,73	0,74	0,64	0,59	0,67	0,09
ksp1	0,85	0,73	0,84	0,79	0,74	0,84	0,80	0,05
ksp2	0,82	0,70	0,74	0,61	0,98	0,96	0,80	0,14
fill1	0,83	0,65	0,87	1,01	0,80	1,00	0,86	0,12
fill2	0,75	0,81	0,86	0,85	0,71	0,97	0,82	0,08
fill3	0,53	0,81	1,17	0,90	0,98	0,81	0,87	0,19
kivit1	0,87	0,85	1,01	1,05	1,03	0,84	0,94	0,09
kivit2	0,83	0,83	0,85	0,89	0,77	0,78	0,83	0,04
kivit3	0,96	0,86	0,87	0,92	0,82	0,85	0,88	0,05
rak1	1,07	1,01	0,94	1,02	0,90	0,84	0,96	0,08
rak2	0,76	0,80	0,76	0,86	0,68	0,84	0,78	0,06

Koekappaleiden todelliset taivutusvetolujuudet ilman jäädytys-sulatus-rasitusta, [MPa] (suurin ja pienin arvo poistettu)

koost.	koekappale						korj.ka.(i)	kesk.haj.
	7	8	9	10	11	12		
vert	1,14	1,20		1,24		1,09	0,78	0,06
ksm1	1,22		1,19	1,16		1,01	0,76	0,08
ksm2		1,15	1,27	1,30		1,33	0,84	0,07
ksp1	1,09	1,08		1,21		1,03	0,73	0,06
ksp2	1,01		0,97	0,94		1,12	0,67	0,07
fill1			0,94	1,00	0,98	0,93	0,64	0,03
fill2			0,87	0,80	0,68	0,69	0,51	0,08
fill3		0,74	0,81	0,93	0,88		0,56	0,07
kivit1	1,15		1,18	1,11	1,33		0,80	0,08
kivit2	1,18	1,19	1,25		1,05		0,78	0,07
kivit3		1,06	0,99		1,06	1,01	0,69	0,03
rak1		1,29	1,11	1,24	1,13		0,80	0,07
rak2	1,06	1,12	1,06	1,25			0,75	0,07

Koekappaleiden todelliset taivutusvetolujuudet jäädytys-sulatusrasituksen jälkeen, [MPa] (suurin ja pienin arvo poistettu)

koost.	koekappale						korj.ka.(j)	kesk.haj.
	1	2	3	4	5	6		
vert	0,83	0,77			0,81	0,89	0,55	0,04
ksm1		0,72	0,70	0,93		0,87	0,54	0,10
ksm2			0,73	0,74	0,64	0,59	0,45	0,06
ksp1			0,84	0,79	0,74	0,84	0,53	0,04
ksp2	0,82	0,70	0,74			0,96	0,54	0,10
fill1	0,83		0,87		0,80	1,00	0,58	0,07
fill2	0,75	0,81	0,86	0,85			0,54	0,04
fill3		0,81		0,90	0,98	0,81	0,58	0,07
kivit1	0,87	0,85	1,01		1,03		0,63	0,08
kivit2	0,83	0,83	0,85			0,78	0,55	0,03
kivit3		0,86	0,87	0,92		0,85	0,58	0,03
rak1		1,01	0,94	1,02	0,90		0,65	0,05
rak2	0,76	0,80	0,76			0,84	0,53	0,03

Vespa Penttala