

Betonin pakkasenkestävyys – vesi-sideainesuhteen, ilmamäärän ja sementtityypin vaikutus

Mian Ammar Shafqat, DI

Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos
mian.shafqat@aalto.fi

Teemu Ojala, TkT, staff scientist

Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos
teemu.ojala@aalto.fi

Jouni Punkki, TkT, professori (POP)

Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos
jouni.punkki@aalto.fi

Seosaineita sisältävien sideaineiden yleistyminen on herättänyt kysymyksiä siitä, kuinka hyvin laattakoe kertoo suola-pakkaskestävyydestä eri betonin koostumuksilla. Mian Ammar Shafqat tarkasteli diplomityössään betonipinnan rapautumisen ja sisäisen vaurioitumisen samanaikaista kehittymistä jäätymis-sulatusrasituksessa. Tutkimuksessa varioitiin sementtityyppejä, vesi-sideainesuhdetta ja betonin ilmamäärää. Työssä tarkastellaan myös rapautumisen nopeutta laattakokeen aikana. Tutkimuksessa huokostus osoittautui tärkeimmäksi yksittäiseksi tekijäksi sekä pintarapautumisen että sisäisen vaurioitumisen hallinnassa. Lisäksi työ osoittaa, että infrabetonien P-luvun laskenta vastaa varsin hyvin mitattua laattakokeen rapautumista.

Tausta

Pakkasrasitus erityisesti jäänsulatusaineiden yhteydessä on edelleen yksi tärkeimmistä betonin kestävyysaasteista pohjoismaisissa olosuhteissa [1]. Vauriot ilmenevät tyypillisesti betonipinnan rapautumisena sekä joissakin tapauksissa myös sisäisinä vaurioina. Riittävä suola-pakkaskestävyys saavutetaan käyttämällä riittävän alhaista vesi-sideainesuhdetta ja lisäksi huokostamalla betoni. Pohjoismaissa betonin pakkasenkestävyyttä jäänsulatusaineilla arvioidaan lähes yksinomaan laattakokeen (CEN/TS 12390-9:2016:fi) [2] avulla. Keski-Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa on käytössä muita testausmenetelmiä. On kuitenkin epävarmaa, kuinka hyvin eri testimenetelmät ottavat huomioon betonin koostumuksen vesi-sideainesuhteen, ilmamäärän ja sementtityypin osalta.

Betonin valmistuksessa siirrytään yhä enemmän seostettujen sementtien käyttöön. Seossementeillä (CEM II ja CEM III) on positiivisia vaikutuksia joihinkin säilyvyysominaisuuksiin, kuten esimerkiksi kloridien tunkeutumiseen ja lisäksi ne usein kasvattavat

betonin loppulujuutta. Kuitenkin pakkasenkestävyyteen seosaineilla on usein negatiivisia vaikutuksia, esimerkiksi masuunikuona kasvattaa rapaumatason laattakokeessa [3].

Tämä artikkeli perustuu Mian Ammar Shafqatin diplomityöhön, joka valmistui Aalto-yliopistossa vuonna 2026 [4]. Työn ohjaajana toimi TkT Teemu Ojala sekä DI Ahsan Iqbal ja työtä valvoi prof. Jouni Punkki. Diplomityössä tutkittiin sideainetyypin, vesi-sideainesuhteen ja huokostuksen vaikutuksia betonin suola-pakkaskestävyyteen. Kokeellinen osuus toteutettiin Aalto-yliopiston betonitekniikan laboratoriossa.

Diplomityö keskittyy betonipinnan rapautumisen, betonin sisäisen vaurion ja kosteuden siirtymisen arviointiin laattakokeen aikana. Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi betonipinnan rapautumisen kehittymisen sekä sisäisen rapautumisen ja suomalaisen P-luvun laskennan välisiä yhteyksiä. Tavoitteena oli parantaa pakkasenkestävyyden tulkintaa käytännön sovelluksissa. Tässä artikkelissa betonin vedonimutuloksia ei käsitellä, mutta ne on esitetty julkaistussa diplomityössä.

1 Kuvituskuva. Laitaatsalmen sillat ovat Savonlinnan Laitaatsalmen ylittävät kaksi kaksikaistaista maantiesiltaa, jotka avattiin liikenteelle 2017–2018. Sillat ovat noin 500 metriä pitkiä, niiden alikulkukorkeus on korkeimmillaan 24,5 metriä. Sillat ovat Suomen suurimpia betonisilloja.



Taulukko 1

Tutkittujen betonimassojen koostumukset.

Tunnus	v/s-suhte	Sementti- tyyppi	Tavoite-ilma- määrä (%)	Sementti (kg/m ³)	Huokostin (%-sem.p.)	Tehonotkistin (%-sem.p.)
CEM I-0,4-5A	0,40	CEM I	5	430	0,04	0,7
CEM II-0,4-5A		CEM II/B	5	430	0,017	0,48
CEM II-0,4-2A		CEM II/B	2	430	0	0,5
CEM III-0,4-5A		CEM III /A	5	430	0,017	0,03
CEM I-0,5-5A	0,50	CEM I	5	400	0,03	0,2
CEM I-0,5-2A		CEM I	2	400	0	0,3
CEM II-0,5-6A		CEM II/B	5	400	0,02	0,1
CEM II-0,5-2A		CEM II/B	2	400	0	0,1
CEM III-0,5-5A		CEM III /A	5	400	0,03	0
CEM III-0,5-2A		CEM III /A	2	400	0	0
CEM I-0,6-5A	0,60	CEM I	5	330	0,03	0
CEM II-0,6-5A		CEM II/B	5	320	0,017	0
CEM II-0,6-2A		CEM II/B	2	340	0	0
CEM III-0,6-5A		CEM III /A	5	320	0,01	0

Koejärjestely

Koematriisi koostui 14 betonimassasta, jotka perustuivat kolmeen sideainetyyppiin, kolmeen vesi-sideainesuhteeseen ja kahteen ilmamäärätasoon. Erilaisten betonimassojen avulla pyrittiin saamaan vastauksia asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Valitut sideaineet ovat Suomessa yleisesti käytettyjä sementtityyppejä (CEM I, CEM II/B ja CEM III/A), ja ne erosivat toisistaan koostumukseltaan ja kuonasisältönsä puolesta. Kaikissa betonimassoissa käytettiin luonnonkiviaineksia, joiden maksimirakoko oli 16 mm. Betonien notkeustavoitteena oli painumaluokka S3. Yhteenveto betonimassojen koostumuksista on esitetty taulukossa 1.

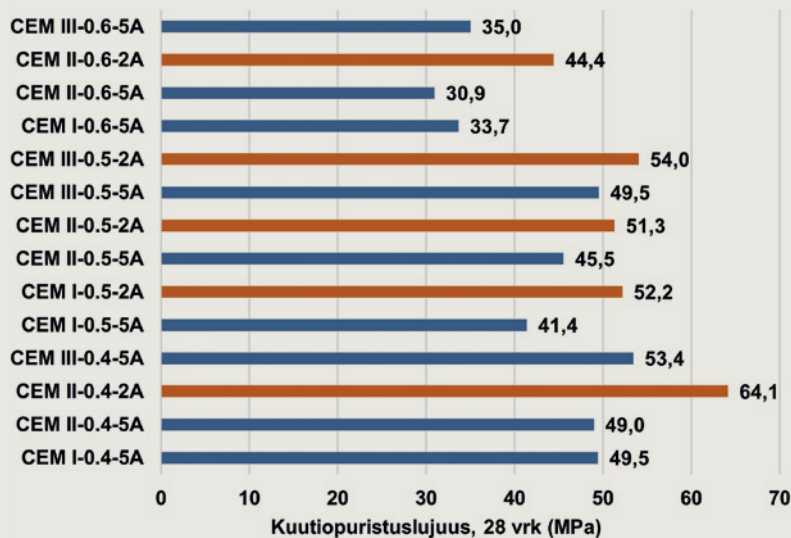
Pakkasenkestävyyttä arvioitiin teknisen spesifikaation (CEN/TS 12390-9) mukaisella laattakokeella, jossa betonipinnan rapautumista NaCl-liuoksessa seurattiin 56 jääty-mis-sulatussyklin aikana. Sisäistä vauriota arvioitiin ultraäänen läpäisymittauksella suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin (RDM) muutosten kautta, ja vedenimua mitattiin syklien aikana kosteuden tunkeutumisen selvittämiseksi. Lisäksi betoneille tehtiin kapillaarinen vedenimukoe ja painekyllästyskoe huokoisuuden määrittämiseksi.



Kuvat: Mian Ammar Shafiqat

Kuva 2a ja 2b Näytteiden koestaminen jäädytys-sulatuskapaissa (vasemmalla) ja rapautuneen materiaalin keräys (oikealla).

Kuva 3 Koebetonien puristuslujuudet 28 vrk:n iässä. Oranssit palkit ilmaisevat huokostamattomia (tavoiteilmamäärä: 2 %) betoneita ja siniset huokostettuja (tavoiteilmamäärä: 5 %) betoneita.



Koetulokset

Puristuslujuus

Betonien puristuslujuudet määritettiin särmäl-tään 100 mm:n kuutiokoekappaleilla 28 vrk:n iässä. Kuutioiden keskiarvotulokset ovat esi-tetty kuvassa 3.

Puristuslujuustulokset noudattivat odotet-tuja trendejä vesi-sideainesuhteen ja huokos-tuksen suhteen. Huokostamattomalla, alhai-simman vesi-sideainesuhteen 0,40 betonilla saavutettiin korkein lujuus (64,1 MPa). Huokos-tettujen betonien lujuudet jäivät alimmillaan hieman yli 30 MPa. Betonin huokostuksella oli selvä negatiivinen vaikutus lujuuteen: esimerkiksi betoni CEM II-0,5-2A antoi noin 26 % korkeamman lujuuden kuin vastaava huokostettu betoni (CEM II-0,5-5A). Kolmesta sementtityypistä CEM III/A antoi korkeimmat lujuudet kaikilla v/s-suhteilla. Tämä osoittaa, että kuonan vaikutus on merkittävä jo 28 vrk:n puristuslujuudessa, 91 vrk:n lujuudessa vai-kutus on vieläkin suurempi.

Betonin huokoisuus

Kapillaariseen vedenimukokeeseen ja paine-kyllästyksen perustuvassa ilmahuokosanalyyy-sissa voidaan erottaa kovettuneen betonissa kapillaarisesti täyttyvät huokokset sekä ilma-huokokset. Kapillaarinen huokoisuus riippuu pääasiallisesti vesi-sideainesuhteesta eikä huokostus muuta merkittävästi kapillaarista huokosjärjestelmää. Sementtityyppi vaikuttaa jossain määrin kapillaariseen huokoisuuteen.

Ilmahuokokset pitävät sisällään sekä suoja-huokokset että tiivistyshuokokset. Kovettuneesta betonista mitattu ilmahuokosten määrä kor-reloi varsin hyvin tuoreen betonin ilmamää-rän kanssa, mutta on tyypillisesti noin 1 %-yks.

alhaisempi [5]. Ilmahuokosten määrä riippuu siten huokostuksesta, mutta ei vesi-sideaine-suhteesta eikä myöskään sementtityypistä.

Ilmahuokosanalyysien tulokset ovat esi-tetty taulukossa 2. Sideainetyyppien väliset erot olivat odotetusti pieniä. Kokeen perus-teella ilmahuokosten määrä saavutti pääosin tavoiteilmamäärän huokostetuissa betoneissa,

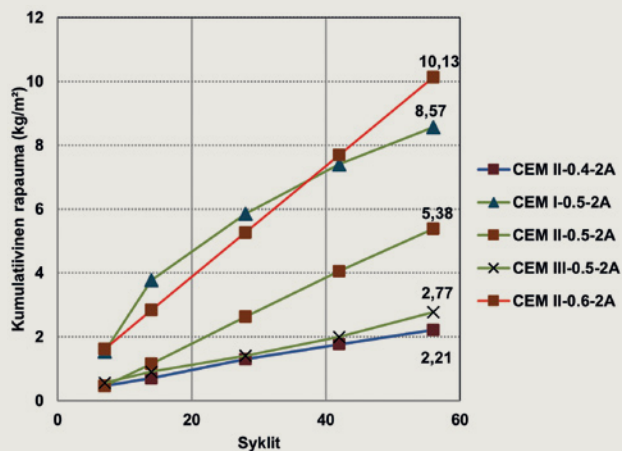
kun taas huokostamattomissa massoissa ilma-määrä pysyi johdonmukaisesti alhaisena. Kapillaarisessa huokoisuudessa oli selkeä ero vesi-sideainesuhteiden 0,40 ja 0,50 välillä, mutta välillä 0,50 ja 0,60 ero oli pienempi. Osassa tapauksissa vesi-sideainesuhteella 0,50 saavutettiin korkeampi huokoisuus kuin v/s-suhteella 0,60.

Taulukko 2

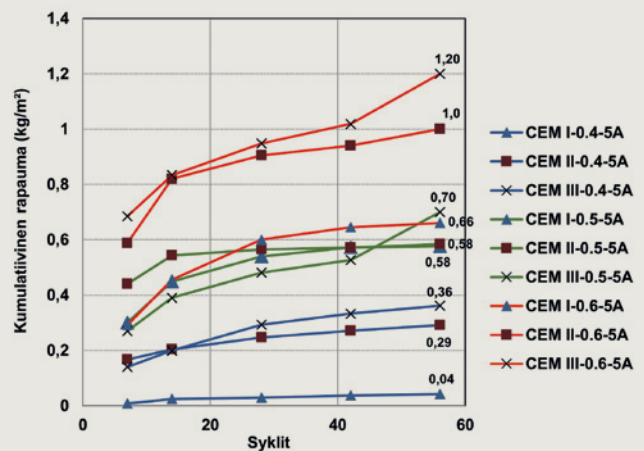
Kovettuneen betonin ilmahuokosanalyysien tulokset

Tunnus	Kapillaarinen huokoisuus (%)	Ilmahuokokset (%)	Kokonais-huokoisuus (%)
CEM I-0,4-5A	12,6	5,0	17,5
CEM II-0,4-5A	12,9	5,1	18,1
CEM II-0,4-2A	13,1	1,8	14,9
CEM III-0,4-5A	13,5	4,4	17,9
CEM I-0,5-5A	14,6	4,4	18,9
CEM I-0,5-2A	14,7	1,1	15,8
CEM II-0,5-5A	16,1	4,0	20,0
CEM II-0,5-2A	14,9	1,6	16,5
CEM III-0,5-5A	15,4	4,0	19,4
CEM III-0,5-2A	15,1	1,4	16,5
CEM I-0,6-5A	15,0	4,8	19,9
CEM II-0,6-5A	15,8	6,1	21,8
CEM II-0,6-2A	16,1	1,5	17,6
CEM III-0,6-5A	15,1	5,5	20,6

Kuva 4 Huokostamattomien betonien kumulatiivinen rapauma laattakokeessa. Betonimassojen vesi-sideainesuhteet on eroteltu eri värisillä viivoilla. Vain v/s-suhteella 0,50 on testattu kaikki kolme eri sementtityyppiä. Huom. Huomaa y-akselien erot kuvien 4 ja 5 välillä.



Kuva 5 Huokostettujen betonien rapautuminen laattakokeessa. Betonimassojen vesi-sideainesuhteet on eroteltu eri värisillä viivoilla. Huom. Huomaa y-akselien erot kuvien 4 ja 5 välillä.



Betonin rapautuminen

Betonien väliset erot rapaumamäärissä selittyivät pääasiassa huokostuksella ja vesi-sideainesuhteella. Myös sideainetyypillä oli osin merkittävä vaikutus. Rapauma-arvot kasvoivat jäätymis-sulatussykliä myötä kaikissa betoneissa, mutta sekä rapautumisnopeus että suuruusluokka vaihtelivat huomattavasti. Huokostuksen roolin korostamiseksi tulokset esitetään erikseen huokostetuille ja huokostamattomille betoneille (kuvat 4 ja 5).

Eri betonimassoja välillä nähtiin eroavaisuuksia jo rasituksen varhaisessa vaiheessa. Huokostamattomat betonit rapautuivat paljon jo ensimmäisten syklien aikana. Esimerkiksi betoni CEM II-0.4-2A saavutti noin 0,70 kg/m²:n rapauksen 14 syklin jälkeen, kun taas huokostetut betonit samalla v/s-suhteella pysyivät alle 0,26 kg/m²:ssä. Huokostamattomat betonit rapautuivat varsin lineaarisesti kokeen aikana, kun taas huokostetut betonit eivät juurikaan rapautuneet ensimmäisten 14 syklin jälkeen. Kaikkien huokostettujen betonien rapaukset pysyivät verrattain alhaisina. Kokonaisrapauma oli v/s-suhteella 0,40 alle 0,40 kg/m², minkä lisäksi rapaukset olivat korkeammillakin v/s-suhteilla suhteellisen alhaisia (v/s-suhteella 0,50 alle 0,70 kg/m² ja 0,60 alle 1,20 kg/m²).

Vesi-sideainesuhteen vaikutus oli huomattava sekä huokostamattomilla että huokostetuilla betoneilla. Huokostamattomat betonit korkeammilla v/s-suhteilla rapautuvat varsin nopeasti ja voimakkaasti laattakokeessa.

Myös sementtityypillä oli varsin selkeä vaikutus rapaamaan huokostetuilla betoneilla. Sementillä CEM III saatiin korkein rapauma-arvo kaikilla tutkituilla v/s-suhteilla. Vastaavasti CEM I:n sementti antoi pienimmät

rapauma-arvot. Tulokset ovat sopusoinnussa aikaisempien tutkimusten kanssa, joissa on havaittu masuunikuonan osuuden lisäävän rapaumamäärää. Sen sijaan huokostamattomilla betoneilla (kuva 4) sementtityypin vaikutus oli päinvastainen. Koesarja oli tosin tältä osin varsin suppea, sillä vain kolme sementtityyppiä tutkittiin v/s-suhteella 0,50. Huokostamattomilla betoneilla sementti CEM III antoi alhaisimman rapauma-arvon ja sementti CEM I korkeimman rapauma-arvon.

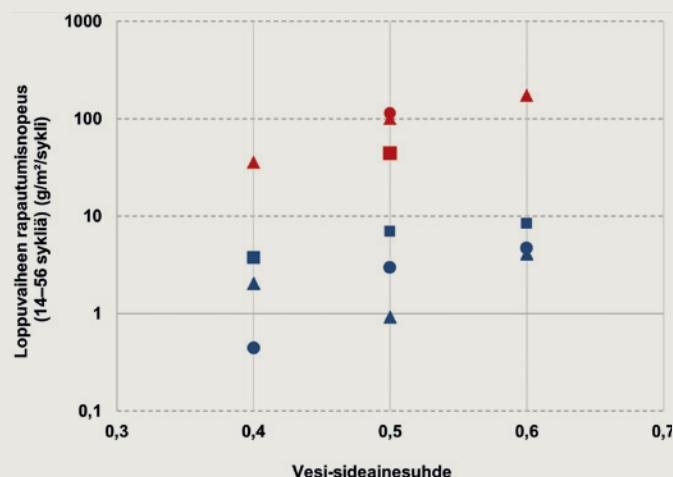
Rapautumisnopeuden analyysi

Rapautumisnopeus jäädytys-sulatuskokeessa noudattaa usein kaksivaiheista lineaarista trendiä, joka voidaan jakaa alkuvaiheeseen (0–14 syklin) aikana rapauma-arvo kasvaa nopeasti. Puolestaan

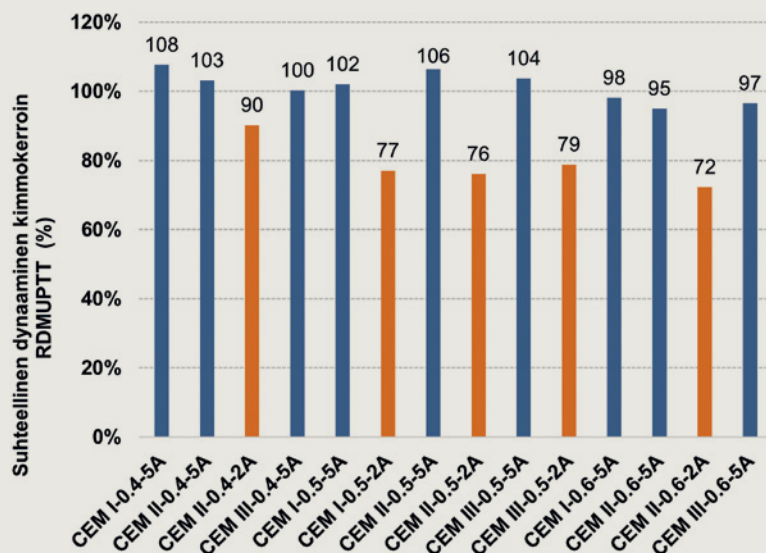
loppuvaiheessa (14–56 sykliä) kehitys on tasaisempaa ja lähes lineaarista 56 sykliin asti. Koska alkuvaiheen rapaamaan vaikuttaa merkittävästi betonipinnan ominaisuudet kuten pinnan karbonatisoitumismäärä, voisi loppuvaiheen rapautumisnopeus olla luotettavampi indikaattori suola-pakkaskestävyydelle. Kuvassa 6 on esitetty kokeen loppuvaiheen rapautumisnopeus ilmaistuna rapauma yhtä jäätymis-sulamissykliä kohden.

Loppuvaiheen rapautumisnopeuksissa havaittiin selviä eroja, suurimmillaan loppuvaiheen rapautumisnopeuden erot olivat yli 100-kertaiset. Huokostettujen betonien rapautumisnopeudet jäivät hyvin alhaiselle tasolle verrattuna huokostamattomiin betoneihin. Lisäksi v/s-suhteella oli selvä vaikutus rapautumisnopeuteen huokostamattomilla betoneilla,

Kuva 6 Loppuvaiheen (14–56 sykliä) rapautumisnopeus v/s-suhteen funktiona. Huom. y-akselin asteikko on logaritminen. Huokostamattomat betonit merkitty punaisella ja huokostetut betonit sinisellä. Ympyrä: CEM I, kolmio: CEM II/B ja neliö: CEM III/A..



Kuva 7 Sisäisen vaurion arviointi suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin (RDM) avulla 56 jäätymis-sulatussyklin jälkeen. Oranssit palkit ovat huokostamattomia betoneita ja siniset huokostettuja.



kun taas huokostetuilla betoneilla v/s-suhteen vaikutus jäi varsin vähäiseksi. Huokostetuilla myös sementtityypillä oli lievä vaikutus lopuvaiheen rapautumisnopeuteen.

Sisäisen vaurion kehittyminen

Betonin sisäistä vauriota arvioitiin suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin (RDM) avulla 56 jäätymis-sulatussyklin jälkeen (kuva 7). Tulokset osoittavat selkeän eron huokostettujen ja huokostamattomien betonien välillä. Koska huokostettujen betonien RDM-arvot olivat lähellä tai jopa yli 100 % kaikilla v/s-suhteilla, ei sisäistä vaurioitumista ollut tulosten perusteella tapahtunut. Joissakin tapauksissa havaittiin jopa lievä kimmomoduulin kasvu.

Sitä vastoin huokostamattomat betonit osoittivat johdonmukaista RDM:n vähenemistä, ja vaurio kasvoi v/s-suhteen kasvaessa. Alhaisimmalla v/s-suhteella (0,40) vaurioituminen oli rajallista, mutta v/s-suhteilla 0,50 ja 0,60 RDM-arvot laskivat merkittävästi. Tämä indikoi pakkasvaurioista betonin mikrorakenteesta. Sideainetyyppien väliset erot olivat suhteellisen pieniä verrattuna huokostuksen ja v/s-suhteen vaikutukseen. Tästä voidaan päätellä, että riittävän suojahuokosrakenteen puuttuminen on hallitseva tekijä sisäisen vaurion kehittämisessä.

Rapautumisen korrelaatio P-luvun kanssa

Koebetonien P-luvut laskettiin Väyläviraston Infrabetonien valmistus-ohjeen [6] mukaisesti. Rapauma-arvon riippuvuus betonin P-luvusta on esitetty kuvassa 8. Laskelmissa on käytetty mitattua tuoreen betonin ilmamäärää. Ohjeiden mukaisesti massat, joilla P-luku on alle 20, on rajattu tarkastelun ulkopuolelle. Jäljelle jääville betonimassoille havaitaan selvä

trendi, jossa rapautuminen vähenee P-luvun kasvaessa. Sementtityyppien välillä ei ole merkittäviä eroja riippuvuudessa. Tämä viittaa siihen, että P-luku pystyy arvioimaan varsin hyvin betonin suorituskykyä laattakokeessa. P-lukuun vaikuttaa erityisesti betonin vesi-sideainesuhde, ilmamäärä ja sementtityyppi ja kaikilla niillä on selkeä vaikutus rapaumaan, kuten tässä tutkimuksessa on osoitettu.

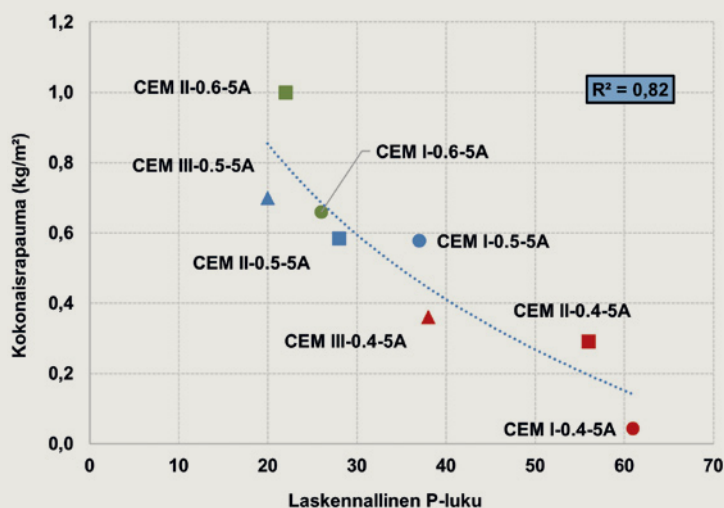
Johtopäätökset

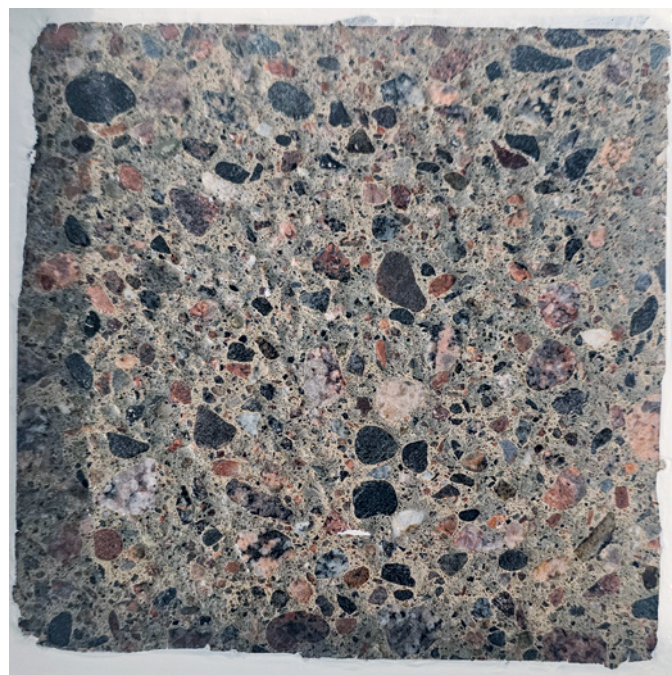
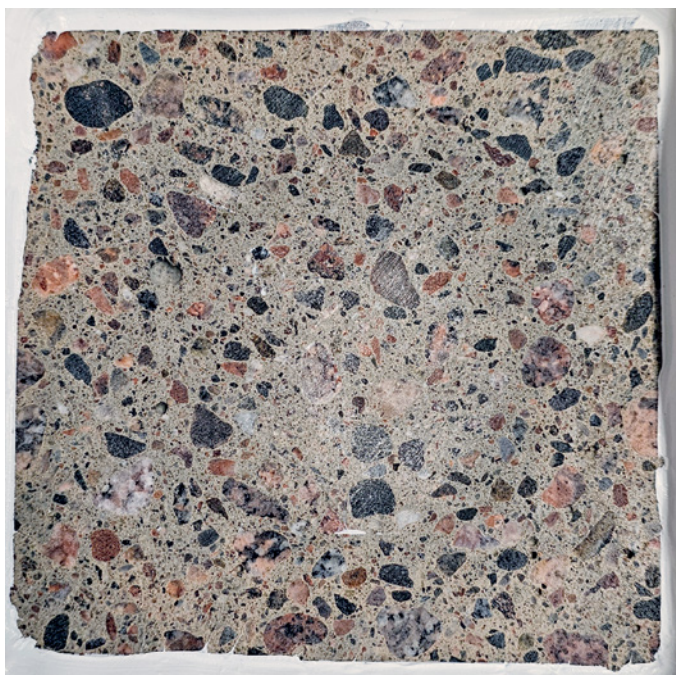
Diplomityössä tutkittiin betonin suola-pakkasenkestävyyttä tarkastelemalla betonipinnan rapautumista, sisäistä vauriota ja kosteuden siirtymistä. Tulokset osoittavat, että huokostus ja vesi-sideainesuhde vaikuttavat merkittävästi betonin pakkas-suolakestävyyteen. Huokostamattomat betonit rapautuivat nopeasti

sideainetyypistä tai vesi-sideainesuhteesta riippumatta, kun taas huokostetut betonit säilyttivät hyvän pakkasenkestävyyden koko kokeen ajan. Suojahuokosten läsnäolo toimii selvästi päämekanismina laattakokeessa jäätyneen aikaisten sisäisten paineiden lievittämisessä.

Tuloksien perusteella vesi-sideainesuhde ei yksinään määritä pakkasenkestävyyttä. Jopa korkeammilla v/s-suhteilla huokostetut betonit suoriutuivat hyvin, kun taas huokostamattomat massat osoittivat vahvaa vaurion kasvua v/s-suhteen kasvaessa. Tässä mielessä huokostus vähentää betonin herkkyyttä v/s-suhteelle ja mahdollistaa myös jossain määrin korkeampien v/s-suhteiden betonimassojen riittävän suola-pakkasenkestävyyden. Kuitenkin paras suola-pakkasenkestävyyden taso saavutetaan

Kuva 8 Kokonaisrapauman (56 sykliä) riippuvuus betonin laskennallisesta P-luvusta.





Kuvat: Mian Ammar Shafqat

Kuva 9 Betoninäytteen pinta ennen jäätymis-sulatuskoetta (vasemmalla) ja kokeen jälkeen (oikealla). Kokonaisrapauma 0,58 kg/m².

alhaisella vesi-sementtisuhteella ja riittävällä betonin ilmamäärällä.

Suomalainen P-luvun laskenta osoittautui varsin toimivaksi käytännön indikaattoriksi betonipinnan rapautumiselle laattakokeessa. Betonimassat, joilla oli korkeammat P-luvut, osoittivat johdonmukaisesti alhaisempaa rapautumista.

Sideainetyypillä oli toissijainen vaikutus verrattuna huokostukseen ja v/s-suhteeseen, mutta joitakin eroja oli silti havaittavissa. Huokostetuilla betoneilla kuonamäärä kasvattaa betonipinnan rapaamaa laattakokeessa. Huokostamattomilla vaikutus oli päinvastainen, mutta huokostamattomien betonien toimivuus rapautuman osalta oli kaikkiaan huono. Sisäisten vaurioiden osalta sementtityypillä ei havaittu olevan merkittävää vaikutusta.

Tutkimuksessa analysoitiin myös loppuvaiheen (14–56 sykliä) rapautumisnopeutta. Rapautumisnopeuksissa oli suuret erot, jotka johtuivat pääosin betonin ilmamäärästä, mutta myös vesi-sementtisuhteella sekä sementtityypillä oli vaikutusta. Loppuvaiheen rapautumisnopeus voisi olla kokonaisrapaamaa luotettavampi suola-pakkaskestävyyden indikaattori, koska alkuvaiheessa rapaumatason vaihtelevat mm. pinnan karbonaistoitumistason riippuen.

Tulokset tukevat ajatusta myös siitä, että betonipinnan rapautuminen ja sisäinen vaurio eivät aina kehity samalla tavalla. Normaalityönteissä pinnan rapautuminen on kyllä selvästi merkittävämpi tekijä kuin sisäinen vau-

rioituminen. Joissakin betoneissa havaittiin merkittävää betonipinnan rapautumista ilman sisäistä rapautumista, mutta päinvastaista tilanne ei tullut vastaan. Siten suola-pakkasrasitettujen betonien osalta pinnan rapautuminen on selvästi tärkein vauriomekanismi.

Lähteet

1. Helsing E. Review of Frost Requirements on Concrete; RISE Report 78; RISE Research Institutes of Sweden, Borås, 2025. Saatavilla: <https://urn.fi/urn:nbn:se:ri:diva-78776>
2. CEN/TS 12390-9:2016.fi. Kovettuneen betonin testaus. Osa 9: Jääditys-sulatuskestävyys jään-sulatusaineilla. Pintarapautuminen. SFS Suomen Standardoimisliitto, Helsinki, 2016.

Understanding Salt-Frost Durability in Concrete: The Role of Concrete Mix Parameters

In Mian Ammar Shafqat's master's thesis, the salt-frost resistance of concrete has been investigated with respect to both surface scaling and internal damage. The study comprised 14 different concrete mixes in which the cement type, water-to-binder ratio, and air content were varied. The test results show that air entrainment has a highly significant effect on surface scaling in the slab test; air-entrained and non-air-entrained concretes produce scaling values at entirely different levels. The water-to-binder ratio and cement type also had a

3. Iqbal, A.; Ojala, T.; Punkki, J. Effect of carbonation on salt-frost scaling of concrete with different binders. *Construction and Building Materials*, 2024. Saatavilla: <https://doi.org/10.2478/ncr-2024-0012>
4. Shafqat, M. A. Investigation of surface scaling and internal damage in concrete using the slab test, Diplomityö, Aalto-yliopisto, Espoo, 2026. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202603092713>
5. Alam, R. Evaluation of pore-filling test for freeze-thaw resistance of concrete, Diplomityö, Aalto-yliopisto, Espoo, 2025. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-202601191473>
6. Infrabetonien valmistus, Väyläviraston ohjeita 41/2020, Helsinki, 2020. Saatavilla: https://aineistot.vayla.fi/api/file/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2020-41_infrabetonien_valmistus_web.pdf

notable effect on the scaling value, particularly for air-entrained concretes. Regarding internal damage, air entrainment likewise had a substantial effect. Air-entrained concretes showed no internal damage regardless of cement type or water-to-binder ratio. For non-air-entrained concretes, the water-to-binder ratio also influenced the degree of internal damage. The P-factor of infrastructure concretes correlates well with the scaling value from the slab test. The P-factor accounts for the parameters included in the thesis, namely binder composition, water-to-binder ratio, and air content. Based on the test results, the P-factor method captures the influence of these parameters reasonably well. •