

Betonin tiivistyslaadun arviointi

Hassan Ahmed

Väitöskirjatutkija, TkT
Rakennustekniikan laitos, Aalto-yliopisto
hassan.ahmed@aalto.fi

Artikkelissa käsitellään betonin tiivistystä ja tiivistyksen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Tässä artikkelissa esitetään väitöskirjan pääkohdat lyhyesti. Tarkemmat tiedot löytyvät väitöskirjasta <https://aaltodoc.aalto.fi/items/44d99e5e-1238-4392-892d-243ae-cea4427>

Betonin tiivistyksestä

Betonin tiivistyksen kannalta betonin huokosista olennaisia ovat tiivistyshuokokset sekä jossain määrin myös suojahuokokset. Tiivistyshuokokset ovat ei-toivottuja huokosia ja ne syntyvät tahattomasti betonin sekoituksen ja valun aikana. Suojahuokokset ovat sen sijaan hyödyllisiä ja niitä tarvitaan parantamaan betonin pakkasenkestävyyttä. Raja suoja- ja tiivistyshuokosten välillä on yleensä 0,8 mm, tätä suuremmat huokokset ovat tiivistyshuokosia, eivätkä ne juurikaan paranna betonin pakkasenkestävyyttä. Tiivistyshuokosten määrä sekoituksen jälkeen voi olla 5–20 % tuoreen betonin tilavuudesta ja tiivistyksen jälkeen niiden määrä on pudonnut muutama prosenttiin. Tiivistyshuokosten määrä vaikuttaa olennaisesti betonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Tutkimukset osoittavat, että jo 1 %-yksikön lisäys tiivistyshuokosissa voi vähentää lujuutta 5–9 %. Tehokkaalla tiivistyksellä voidaan vähentää tiivistyshuokosten määrää, mutta toisaalta riskinä on betonin erottuminen.

Erottuminen tarkoittaa betonin komponenttien kuten kiviainesten, sementtipastan ja ilmahuokosten epätasaista jakautumista betonirakenteen sisällä betonin valun ja tiivistyksen seurauksena. Erityisesti kiviaines erottuu helposti sementtipastasta tiheyserojen vuoksi. Kun betonia ei tiivistetä, kiviainekset rakeet eivät juurikaan liiku, koska sementtipastan viskositeetti on varsin korkea, poikkeuksena lähinnä itsetiivistyvä betoni. Betonin tiivistys

vibraamalla muuttaa kuitenkin olennaisesti sementtipastan reologisia ominaisuuksia, ja kiviainesrakeet pyrkivät alaspäin painovoiman vaikutuksesta.

Liian pitkäkestoinen tiivistys tai liian tehokkaan täryttimen käyttäminen lisää betonin erottumisriskiä. Myös betonin koostumuksella on vaikutuksia: erottumisriski kasvaa betonin notkeuden kasvaessa, samoin betonin ilmamäärän kasvaessa erottumisriski kasvaa. Erottumisherkimpiä betoneita ovat S4 tai S5-notkeusluokan huokostetut betonit. Itsetiivistyvät betonit eivät yleensä ole kovinkaan erottumisherkkiä, koska niitä ei tärytetä. Sinänsä jonkin asteinen erottuminen on luonnollinen ilmiö betonille, onhan kiviainesten tiheydet selvästi sementtipastan tiheyttä suurempia. Kuitenkin mikäli erottumistaso nousee liian suureksi, se vaikuttaa negatiivisesti betonin mekaanisiin ja säilyvyysominaisuuksiin. Erottuminen ei useinkaan näy betonipinnalla, poikkeuksena on hyvin voimakas erottuminen, mikä näkyy raitoina ja suurina huukosina betonin pinnassa.

Optimaalinen tiivistys on tasapainoilua kahden edellä mainitun epätoivotun ilmiön välillä: riittämätön tiivistys jättää betoniin ylimääräisiä tiivistyshuokosia, mutta toisaalta liian tehokas tiivistys voi johtaa betonin erottumiseen. Käytännössä betonia tulisi tiivistää niin kauan, että aikakin valtaosa tiivistyshuokosista poistuisi betonista, mutta ei kuitenkaan niin kauaa, että betoni merkittävästi erottuisi.



1

1 Sauvatäryttimet ovat kehittyneet entistä tehokkaimmiksi. Täryttimet toimivat aikaisempaa korkeammilla taajuuksilla ja suuremmilla amplitudeilla. Samanaikaisesti betonin notkeudet ovat kasvaneet ja betonin korkeampi notkeustaso säästää työtä valun yhteydessä.

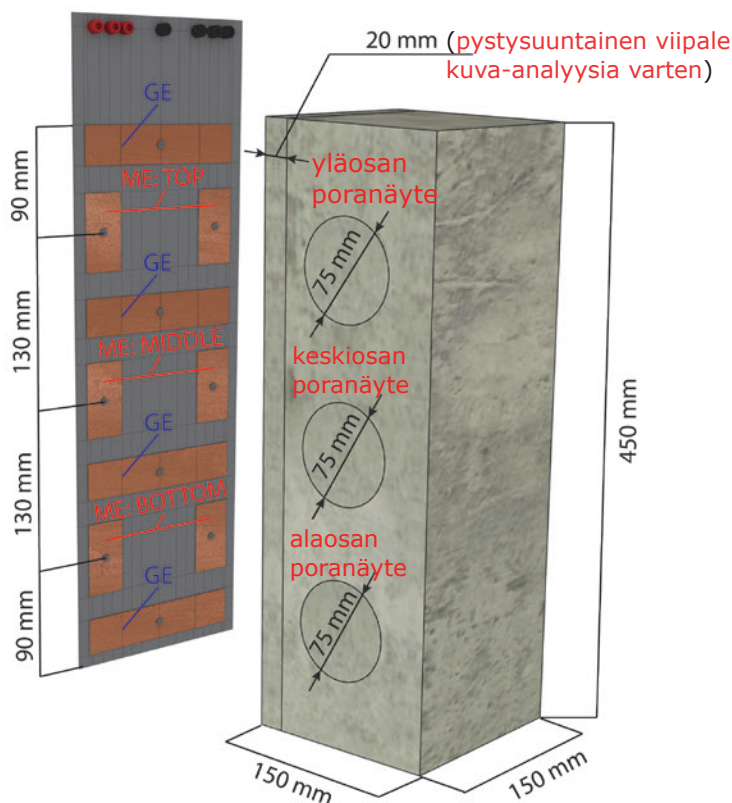
2 Betonin erottumisen osalta päätavoitteena oli kehittää reaaliaikainen mittausmenetelmä, joka voisi havaita betonin erottumisen tuoreesta betonista jo tiivistyksen aikana. Tämä mahdollistaisi tiivistysajan säätämisen niin, ettei merkittävää erottumista pääse tapahtumaan.

Hassan Ahmed



2

Kuva 1 Vasemmalla elektrodipaneeli, jossa on kolme kerrosta mittauselektrodeja (ME) – ylä-, keski- ja alaosassa – sekä maadoituselektrodeja (GE). Sen vieressä on betoninäyte, jossa on merkitty poranäytteiden paikat (ylä-, keski- ja alaosasta) sekä pystysuuntainen viipale digitaalista kuva-analyysia (DIA) varten.



Sauvatäryttimet keksittiin jo 1930-luvulla ja erityisesti viimeisten vuosikymmenien aikana sauvatäryttimet ovat kehittyneet entistä tehokkaimmiksi. Täryttimet toimivat aikaisempaa korkeammilla taajuuksilla ja suuremmilla amplitudeilla. Samanaikaisesti betonin notkeudet ovat kasvaneet, betonin korkeampi notkeustaso säästää työtä valun yhteydessä. Pelkästään pumppauksen yleistyminen on kasvattanut selvästi betonien notkeustasoa. Myös kiviainesten osalta siirtyään entistä enemmän murskattuihin kiviaineksiin. Käytännössä tarvitaankin yhä enemmän notkistavia lisäaineita ja tehonotkistimet ovat kehittyneet koko ajan tehokkaimmiksi. Betonissa käytetään aikaisempaa enemmän seosaineita ja muita lisäaineita, myös nämä vaikuttavat betonin reologisiin ominaisuuksiin ja sitä kautta myös betonin tiivistettävyyteen. Kokonaisuutena voidaan todeta, että betoni on vuosien kuluessa muuttunut notkeammaksi ja myös erottumisherkemmäksi ja samalla tiivistyskalusto on kehittynyt tehokkaammaksi.

Huolimatta edellä mainituista merkittävistä muutoksista, betonin tiivistysprosessi on edelleen työmaahenkilöstön subjektiivisesti valvoma. Perinteisesti on ohjeistettu lopettamaan tiivistys, kun betonin pinnalle ei enää nouse ilmakuplia. Oletetaan että tällöin valtaosa tiivistyshuokosista on poistunut betonista. Tämän käytännön luotettavuutta ei ole kuitenkaan vahvistettu betonin erottumisen kannalta. Betonin erottumiseen on kiinnitetty varsin vähän huomiota. Tiivistyshuokosten

nouseminen pintaan ja betonin erottuminen ovat kaksi eri ilmiötä. Siten on nähty selkeä tarve betonin tiivistyslaadun yksityiskohtaiselle tutkimukselle.

Tutkimuksen tavoitteet

Hassan Ahmedin väitöskirjatutkimuksessa tavoitteena oli arvioida betonin tiivistyslaadua analysoimalla betonin erottumista sekä tiivistyshuokosten määrää betonissa. Tutkimus keskittyi analysoimaan näiden tekijöiden välistä suhdetta. Tutkimuksessa analysoitiin sekä tuoretta että kovettunutta betonia.

Betonin erottumisen osalta päätavoitteena oli kehittää reaaliaikainen mittausmenetelmä, joka voisi havaita betonin erottumisen tuoreesta betonista jo tiivistyksen aikana. Tämä mahdollistaisi tiivistysajan säätämisen niin, ettei merkittävää erottumista pääsisi tapahtumaan. Kovettuneen betonin osalta keskityttiin erilaisten indikaattorien kehittämiseen betonin erottumisen mittaamiseksi. Tällä hetkellä ei ole standardoitua menetelmää betonin erottumisen arvioimiseksi.

Tiivistyshuokosten osalta tavoitteena on analysoida ilmakuplien nousua betonin pinnalle jo tiivistyksen aikana. Haluttiin tarkistaa voidaanko tiivistysaika optimoida sen perusteella, milloin ilmakuplien nousu loppuu. Kovettuneen betonin osalta tavoitteena on tutkia tiivistyshuokosten ominaisuuksia betoninäytteissä, joita oli tiivistetty eri pituisia aikoja. Tavoitteena oli saada selkeämpi käsitys tiivistyshuokosten määrästä ja jakautumisesta betonin sisällä.

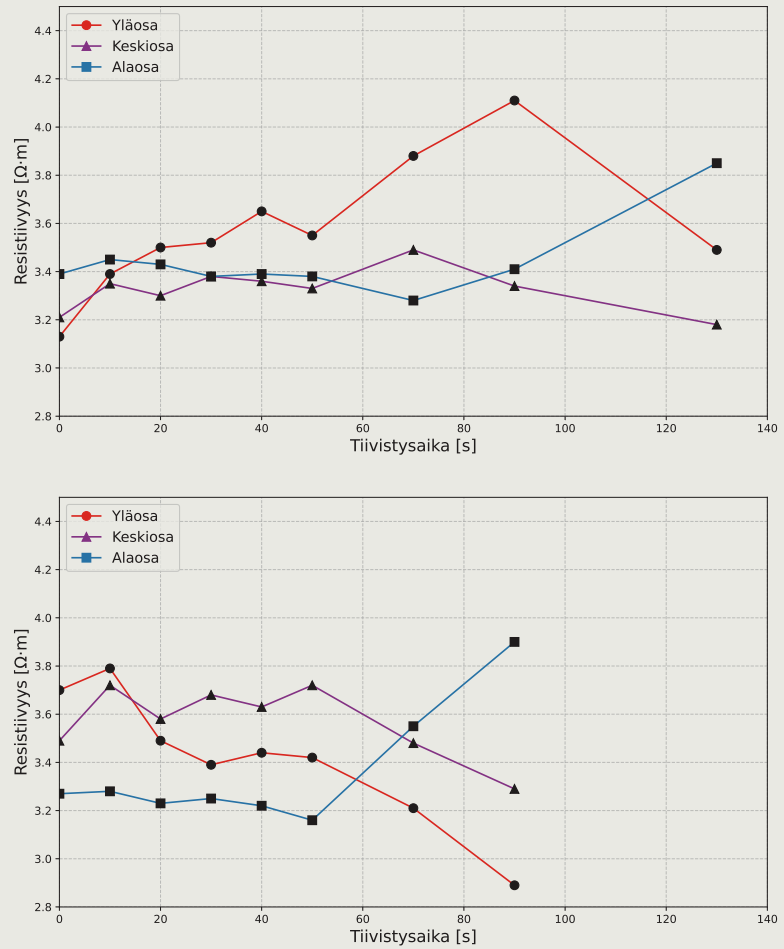
Erottumisen seuranta tuoreessa betonissa AC-impedanssispektroskopian (ACIS) avulla

ACIS on aineettarikkomaton sähköinen testausmenetelmä, jonka avulla mitataan materiaalin impedanssia johtamalla siihen vaihtovirtaa eri taajuuksilla. Betonin kiviainesten sähkönjohtavuus on sementtipastaa alhaisempi ja siten kiviainesten tilavuuden kasvu näkyy betonin kokonaisresistiivisyyden (BR = Bulk Resistivity) kasvuna. Teoreettisesti betonin erottumista voidaan siten arvioida reaaliaikaisesti kokonaisresistiivisyyden muutosten avulla.

Menetelmän toimivuutta tutkittiin seitsemän betoninäytteen avulla, jotka merkittiin koodeilla S130-1...4, S90-1, S90-2 ja S50-1. Neljä ensimmäistä tiivistettiin 130 sekuntia, kaksi seuraavaa 90 sekuntia ja viimeinen 50 sekuntia. Koekappaleet tiivistettiin tärypöydällä ja siten tiivistysajat ovat verrattain pitkiä. ACIS-mittauksia tehtiin tietyn välein tiivistyksen aikana. Kukin näyte valettiin PVC-muottiin, jonka koko oli 510 × 150 × 100 mm³ ja johon oli asennettu mittauselektrodit. Mittauselektrodit (ME) asetettiin muotin ylä-, keski- ja alapintaan, ja maadoituselektrodit (GE) sijoitettiin vähentämään sähkökentän leviämistä kerrosten välillä.

Impedanssimittausten vertailua varten sovellettiin kahta lisämenetelmää: poranäytteiden tiheysmittauksia ja digitaalista kuva-analyysia (DIA). Kuvan 1 mukaisesti kustakin näytteestä otettiin kolme 75 mm poranäytettä ylä-, keski- ja alaosasta, joiden tiheydet mitattiin. Digitaalista kuva-analyysia varten leikattiin

Kuva 2 Kokonaisresistiivisyyksien muutokset tiivistysajan funktiona näytteissä: (a) S130-1 ja (b) S90-2.



pystysuuntainen noin 20 mm paksuinen viipale, ja karkeiden kiviainesten suhde (RCA) ylä-, keski- ja alaosassa laskettiin MATLAB-ohjelmistolla. Tarkempia tietoja menetelmistä ja valetusta betonista löytyy julkaisusta [1].

Kuva 2 näyttää kokonaisresistiivisyyden arvojen muutokset tiivistysajan funktiona näytteiden S130-1- ja S90-2- ylä-, keski- ja alapinnoille. Näytteen S130-1 yläkerroksen resistiivisyys nousi jyrkästi 90 sekuntiin asti, mikä todennäköisemmin johtuu tiivistysilman nousemisesta ylöspäin. Keski- ja alakerrokset osoittivat pienempiä vaihteluita, mutta alakerroksen resistiivisyys alkoi nousemaan noin 70 s tiivistyksen jälkeen. Oletettavasti kiviaineksen osuus alaosassa kasvoi betonin erottumisen seurauksena. Näytteen S90-2 kohdalla yläkerroksen resistiivisyys pieneni tasaisesti lyhyen alkukasvun jälkeen, mikä todennäköisesti johtuu kiviainesten erottumisesta. S90-2 keski- ja alakerrosten käyttäytyminen muistutti S130-1 trendiä, mutta osoitti vielä nopeampaa muutosta. Tämä samankaltainen käyttäytyminen viittaa siihen, että molemmat näytteet, S130-1 ja S90-2, olivat erottuneita, kiviainesten osuus alakerroksessa kasvoi tiivistyksen vaikutuksesta.

Erottumisen tason arvioimiseksi kullekin näytteelle määriteltiin resistiivisyyspohjainen erottumisindeksi (SI_{BR}) lopullisten resistiivisyysarvojen (BR) erona ylä- ja alaosien välillä:

$$SI_{BR} = BR_{final}(top) - BR_{final}(bottom) \quad (1)$$

missä SI_{BR} on BR-erottumisindeksi ($\Omega \cdot m$), $BR_{final}(top)$ on yläosan lopullinen BR-arvo [$\Omega \cdot m$] ja $BR_{final}(bottom)$ on alaosan lopullinen BR-arvo [$\Omega \cdot m$]. Huomionarvoista on, että vaikka sekä kahta tutkittua betonia (S90-1 ja S90-2) tiivistettiin täsmälleen sama aika, S90-2:n SI_{BR} -arvo oli viisi kertaa suurempi kuin S90-1, mikä osoittaa selvästi suurempaa erottumista.

SI_{BR} -indeksin luotettavuuden varmistamiseksi määriteltiin myös toinen erottumisindeksi karkeiden kiviainesten osuuden perusteella, SI_{RCA} :

$$SI_{RCA} = RCA(top) - RCA(bottom) \quad (2)$$

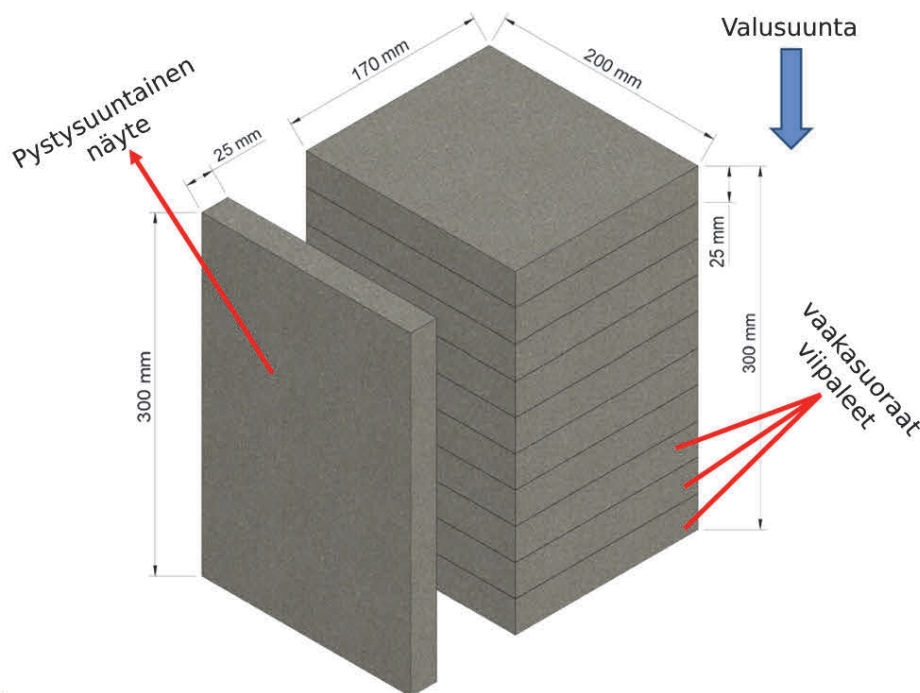
missä SI_{RCA} on kiviaineserottumisindeksi prosenttiyksikköinä, $RCA(top)$ on yläosan RCA-arvo [%] ja $RCA(bottom)$ on alaosan RCA-arvo [%]. Edellä esitettyjen kahden erottumisindek-

sin SI_{RCA} ja SI_{BR} välillä oli vahva negatiivinen korrelaatio ($R = -0,948$), mikä osoittaa, että ACIS-mittaukset pystyvät arvioimaan tehokkaasti karkeiden kiviainesten osuutta betonissa. Huomionarvoista on, että näytteen S90-1 SI_{RCA} -arvo oli noin kolmasosa S90-2 arvosta, mikä viittaa selvästi suurempaan erottumiseen samasta tiivistysajasta huolimatta.

Erottumisen taso arvoitiin myös tiheyksien perusteella lasketulla erottumisindeksillä, SI_{core_DEN} .

$$SI_{core_DEN} = Density(top) - Density(bottom) \quad (3)$$

missä SI_{core_DEN} on kiviaineserottumisindeksi [kg/m^3], ja $Density(top)$ sekä $Density(bottom)$ ovat ylä- ja alaosan betonien tiheydet [kg/m^3]. Tiheysindeksiin vaikuttaa kiviainesten painumisen lisäksi myös ilmakuplien nouseminen ylöspäin. Aiemmin mainittujen indeksien tapaan betonilla S90-1ä oli pienempi SI_{core_DEN} -arvo kuin betonilla S90-2. Näiden havaintojen perusteella ACIS-mittaukset ovat käyttökelpoinen menetelmä havaitsemaan kiviaineksen erottumista betonissa reaaliaikaisesti tiivistysprosessin aikana.



Kuva 3 Betonista sahatut näytekappaleet.

Erottumisen arviointi kovettuneessa betonissa

Koska kovettuneen betonin erottumisen arvioimiseksi ei ole standardoituja menetelmiä, tutkimuksessa kehitettiin kolme erottumisindeksiä. Indeksit on kuvattu tarkemmin julkaisussa [2]. Indeksien määrittämiseksi tiivistettiin kaksi ryhmää betonia käyttäen eri tiivistysaikoja. Ensimmäinen ryhmä tiivistettiin tärysauvalla ja betonit merkittiin kirjaimella 'P', jota seurasi tiivistysaika sekunteina, vaihteluvälillä 12–40 sekuntia. Toinen ryhmä tiivistettiin tärypöydällä ja merkittiin kirjaimella "T" tiivistysajan vaihdelta 40–140 sekunnin välillä. Kaikki betonit olivat huokostettuja, ilmamäärän ollessa $6,0 \pm 1,0$ %. Poikkeuksena kaksi näytettä, P6_8 ja P40_8, joissa ilmamäärä oli korkeampi (8 %), kyseiset betonit tiivistettiin 6 ja 40 sekunnin ajan.

Erottumisen analysoimiseksi koekappaleista sahattiin näytteet kuvassa 3 esitetyllä tavalla. Vaakasuoran viipaleiden (25 mm) tiheys määritettiin, ja viidelle kymmenestä viipaleesta laskettiin kiviainesten jakautuma digitaalisen kuva-analyysin avulla. Samalla tavalla pystysuoran osan kiviainesten jakautuma määritettiin.

Kunkin viipaleen tiheydet mitattiin ja tulokset esitettiin tiheyden jakaumakuviona. Kuvassa 4 on esitetty selvästi erottuneen betonin tiheysvaihtelut. Kuvasta havaitaan, että tiheydet betonipinnan läheisyydessä ovat selvästi alhaisempi kuin näytteen pohjaosissa. Tiheysmittausten perusteella laskettiin erottumisindeksi, SI_{slice_DEN} , joka on vaakasuorien viipaleiden tiheyksien keskihajonta. Erottuminen on sitä suurempaa, mitä suurempi SI_{slice_DEN} on. Kyseinen erottumi-

sindeksi toimii vain vaakasuorille viipaleille ja kerralla tulee tarkastella yhtä valukerrosta. Esim. vaakasuoraan poratuista näytteistä ei voida määrittää kyseistä erottumisindeksiä.

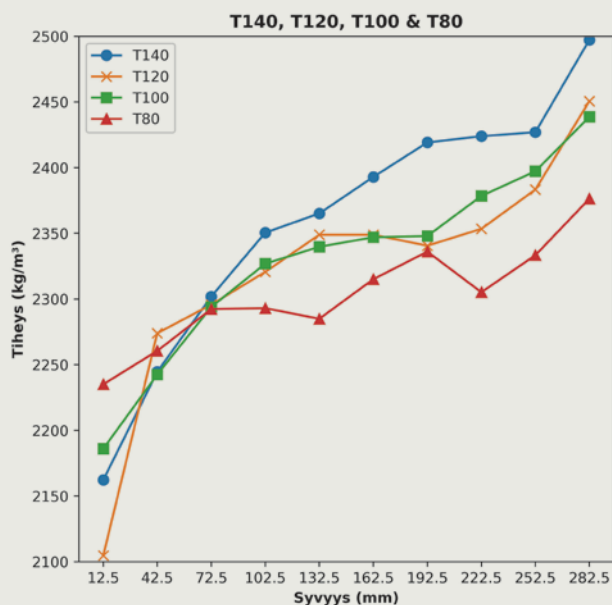
SI_{slice_DEN} -arvot sekä sauva- (P) pöytätärytetyille (T) näytteille on esitetty kuvissa 5a ja 5b. Erottumisindeksi SI_{slice_DEN} -perusteella ehdotettiin seuraavia erottumistasoja (Segregation Levels):

- SL1: $<30 \text{ kg/m}^3$,
- SL2: $30\text{--}60 \text{ kg/m}^3$,
- SL3: $60\text{--}90 \text{ kg/m}^3$ ja
- SL4: $>90 \text{ kg/m}^3$.

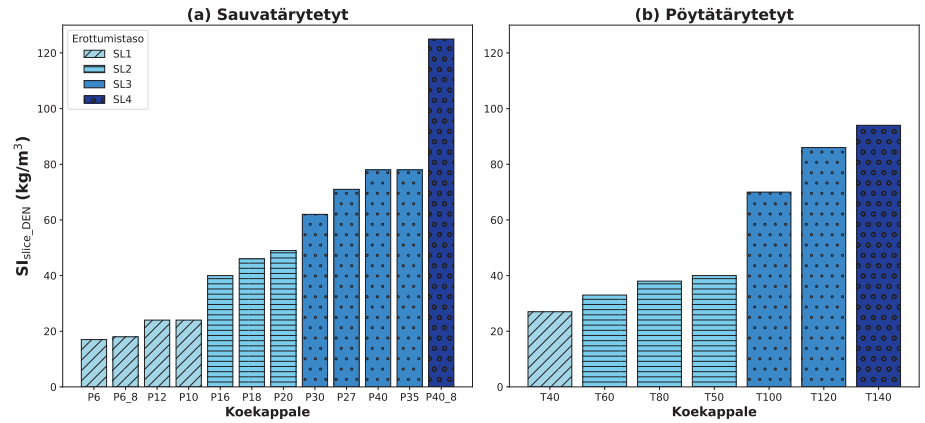
Hyväksyttävä erottumistaso vaihtelee rakenteiden mukaan. Esimerkiksi vesitiiveissä rakenteissa tai korkeasti rasitetuissa rakenteissa tulee tavoitella mahdollisimman alhaista erottumistasoa. Tarvitaan vielä lisätutkimuksia, jotta hyväksyttävät erottumistasot voidaan määrittellä eri käyttötarkoituksiin.

Edellä esitetyn tiheyseroihin perustuvat erottumisindeksin lisäksi tutkimuksessa esitetään kaksi muuta indeksiä erottumisen arvioimiseksi. Indeksit perustuvat karkean kiviainesten ($> 5 \text{ mm}$) jakautuman määrittämiseen. Indeks, SI_{AGG_H} , perustuu karkean kiviainesten osuuden keskihajontaan viidessä vaaka-

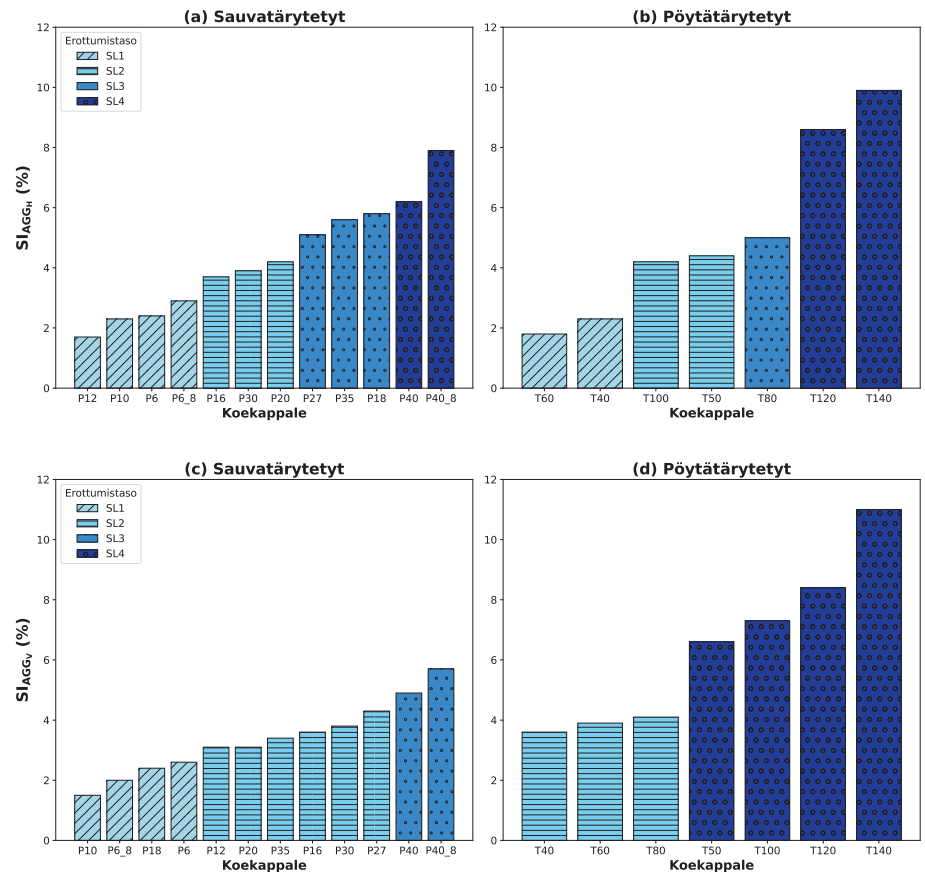
Kuva 4 Ylitiiivistettyjen betonien tiheysprofiilit: T140, T120, T100 ja T80. Etäisyys on matka betonin valupinnasta.



Kuva 5 Sauva- (P) ja pöytätärytetyjen (T) betonin erottumisindeksit SI_{slice_DEN} sekä niitä vastaavat erottumistasot. (a) Sauvatärytetyt betoninäytteet, (b) Pöytätärytetyt betoninäytteet.



Kuva 6 Karkean kiviaineksen osuuteen perustuvat erottumisindeksit SI_{AGG_H} ja SI_{AGG_V} ja niitä vastaavat erottumistasot. (a) SI_{AGG_H} Sauvatärytetyt betoninäytteet, (b) SI_{AGG_H} Pöytätärytetyt betoninäytteet, (c) SI_{AGG_V} Sauvatärytetyt betoninäytteet, (d) SI_{AGG_V} Pöytätärytetyt betoninäytteet.



suorassa viipaleessa. Toinen indeksi, SI_{AGG_V} , edustaa pystysuoran leikkeen karkean kiviainesten osuuden keskihajontaa kymmenessä digitaalisesti jaetussa viipaleessa. Lasketut SI_{AGG_H} -arvot on esitetty tutkituille betoneille kuvissa 6a ja 6b, ja vastaavat SI_{AGG_V} -arvot kuvissa 6c ja 6d. SI_{AGG_H} - ja SI_{AGG_V} -indekseille ehdotettiin erottumistasoja seuraavasti: SL1 arvoille alle 3 %, SL2 arvoille 3–4,5 %, SL3 arvoille 4,5–6 % ja SL4 arvoille yli 6 %.

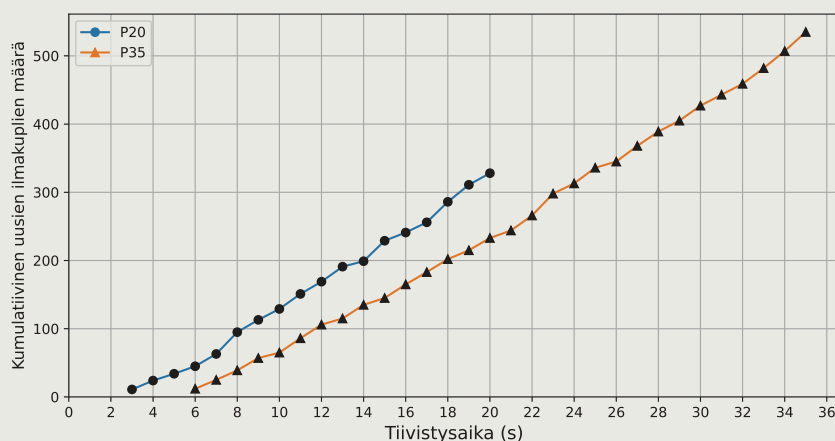
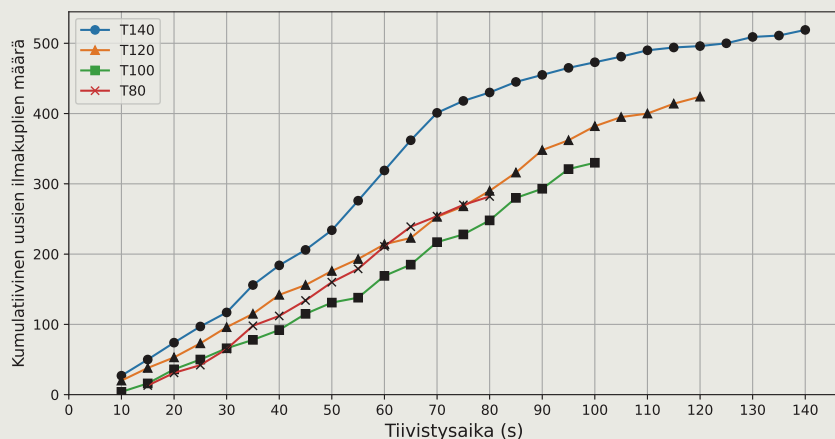
Karkean kiviaineksen osuuteen perustuvien indeksien SI_{AGG_H} ja SI_{AGG_V} toimivuutta arvioitiin vertaamalla niitä tiheyspohjaiseen indeksiin SI_{slice_DEN} . SI_{AGG_H} :n osalta saavutettiin voimakas korrelaatio tiheyspohjaisen indeksin kanssa (R^2 : 0,846 (P) ja 0,891 (T)). Samoin SI_{AGG_V} korreloi voimakkaasti tiheyspohjaisen indeksin kanssa (R^2 : 0,758 (P) ja 0,876

(T)). Tulosten perusteella betonin erottumista voidaan arvioida sekä tiheyserojen että karkean kiviaineksen jakautuman perusteella.

Erottumisindeksit tarjoavat myös mahdollisuuden analysoida betonin erottumisherkkyyttä. Esimerkiksi voidaan määrittää tiheyspohjaisen erottumisindeksin muutos tärytysajan suhteen. Tutkimuksessa pöytätärytetyjen betonien erottumisindeksi kasvoi 0,6 kg/m³ s suhteessa tärytysaikaan. Erottumisherkillä betonilla tämä arvo on luonnollisesti suurempi kuin vähemmän erottumisalttiilla betonilla. Toinen lähestymistapa olisi tarkastella reseptimuutosten vaikutuksia erottumisindeksiin. Näin voitaisiin optimoida betonin niin, että erottumisherkkyyks on mahdollisimman pieni.

Pintaan nousevien ilmakuplien analysointi tiivistyksen aikana

Perinteisesti betonin tiivistys on katsottu riittävaksi, kun ilmakuplien nousu betonin pinnalle loppuu. Tämä käytäntö on hyväksytty Yhdysvaltojen, Australian sekä Britannian ja Euroopan ohjeissa/standardeissa. Esimerkiksi standardi EN 12390-2 suosittelee betonin tiivistämistä niin kauan, kunnes suuria kuplia ei enää nouse pinnalle, mutta varoitetaan kuitenkin erottumisriskistä. Käytännössä tiivistysaika perustuu tiivistystä suorittavan henkilön arvioon kuplien nousun loppumisesta, mikä aiheuttaa huomattavaa subjektiivisuutta tiivistysprosessiin. Tutkimuksessa kuplien noususta on arvioitu digitaalisen kuva-analyysin avulla, kuten julkaisussa [3] on kuvattu.



Kuva 7 Kumulatiivinen uusien ilmakuplien määrä tiivistysajan funktiona. (a) Pöytätärytetyt betoninäytteet, (b) Sauvatärytetyt betoninäytteet.

Betonin pintaa kuvattiin tiivistyksen aikana 4k-kameralla. Tämän jälkeen video leikattiin pysäytyskuviksi, ja kuviissa olevat ilmakuplat valittiin manuaalisesti MATLAB-sovelluksen avulla. Ilmakuplien valintaa hienosäädettiin edelleen Pythonissa edustamaan kussakin ruudussa juuri nousseita kuplia. Uusien ilmakuplien kumulatiivinen määrä arvoitiin tiivistysajan funktiona, kuten kuvassa 7 esitetään.

Pöytätärytetyllä T80-näytteellä havaitaan varsin tasainen kuplien nousunopeus, kun taas muilla näytteillä havaitaan lievää kuplien nousunopeuden hidastumista, erityisesti näytteellä T140 kuplien nousunopeus vähenee selvästi. Toisaalta sauvatärytetyillä betoninäytteillä (kuva 7b) ei havaita ilmakuplien nousunopeuden hidastumista koko testausjakson aikana. Näitä hienovaraisia muutoksia on vaikea havaita paljaalla silmällä työmaalla. Lisäksi nousunopeus ei missään tapauksessa laskenut nollaan, mikä viittaa siihen, että tiivistystä olisi pitänyt edelleen jatkaa.

Kyseiset betoninäytteet tutkittiin erottumisen osalta hyödyntäen SI_{slice_DEN} -indeksiä, ja todettiin, että kaikki tutkitut betoninäytteet olivat erottuneet eri asteisesti. Yksikään näyt-

teistä ei sijoittunut alimpaan erottumistasoon (SL1). Pöytätärytetyjen betonien osalta T80N erottumisindeksi oli 38 kg/m^3 , näytteen T100 erottumisindeksi oli 70 kg/m^3 mikä vastaa erottumistasoa SL3 ja näytteellä T120 vastaavasti 86 kg/m^3 (SL3). Näytteelle T140 mitattiin korkein erottumisindeksi 94 kg/m^3 (SL4). Sauvatärytetyjen ryhmässä näyte P20 sai erottumisindeksin 49 kg/m^3 (SL2) ja vastaavasti P35 sai erottumisindeksin 78 kg/m^3 (SL3).

Nämä havainnot vahvasti kyseenalaistavat perinteisen käytännön, jossa ilmakuplien nousun loppumista käytetään tiivistysajan määrittämiseen. Ilmakuplien nousu betonin pinnalla jatkui, vaikka betoni oli jo selvästi erottunut. Lisäksi pöytätärytetyillä näytteillä havaittiin kolme erilaista kuplien nousumallia: tasainen nousu, korkea alkuvaiheen nousunopeus, jota seurasi jyrkkä lasku, tai matala alkuvaiheen nousunopeus, jossa jonkin verran vaihtelua. Tällainen vaihtelu korostaa ilmakuplien nousun epäjohtomukaisuutta ja osaltaan kyseenalaistaa pintakuplien tarkkailun luotettavuuden, korostaen tarvetta moderneimmille tiivistyksen arviointimenetelmille.

Tiivistyshuokosten analyysi kovettuneessa betonissa röntgentomografialla (XCT)

Kovettuneen betonin tiivistyshuokokset ovat jääneet vähälle huomiolle, koska niiden on oletettu poistuvan tiivistyksen aikana. Tässä tutkimuksessa on tutkittu tiivistyshuokosten määrää ja niiden jakaumaa betonin sisällä [4]. Tiivistyshuokosia on tutkittu eri notkeusluokkien betoneilla käyttäen erilaisia tiivistysaikoja.

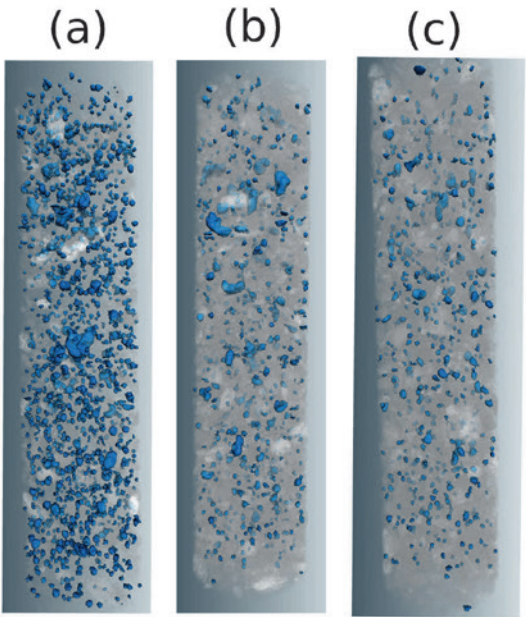
Tutkimuksessa käytettiin kolmea betonierää, joiden notkeudet säädettiin tehonotkistimen annostuksia muuttamalla notkeusluokkiin S2, S3 ja S4. Jokaisesta erästä valettiin kolme näytettä normaaliin lieriömuotoon. Tiivistys suoritettiin tärypöydällä käyttäen kolmea eri tiivistysaikaa: 5, 20 ja 45 sekuntia. Näin saavutettiin korkea, keskitason ja matala tiivistyshuokosmäärät. Näytteet merkittiin notkeusluokan ja tiivistysajan mukaan (esim. S2-5: notkeusluokka: S2, tiivistysaika: 5 s). Kunkin koekappaleen keskeltä porattiin 70 mm poranäyte. Näytteen skannattiin röntgentomografialla ja tämän jälkeen näytteet sahattiin kymmeneen vaakasuoraan viipaleeseen erottumisen analysoimiseksi tiheysmittausten avulla.

Taulukko 1

Röntgentomografialla (XCT) määritetty tiivistyshuokosten määrä.

Näyte	S2-5	S2-20	S2-45	S3-5	S3-20	S3-45	S4-5	S4-20	S4-45
Tiivistyshuokoisuus	2,2 %	1,5 %	0,7 %	1,8 %	1,3 %	0,8 %	1,3 %	1,2 %	0,7 %

Kuva 8 Tiivistyshuokosten 3D-rekonstruktiot 2D-kuvana. (a) S2-5, (b) S2-20, (c) S2-45.



Tiivistyshuokosten kokonaismäärä määritettiin röntgentomografian avulla. Tiivistyshuokosiksi katsottiin yli 0,8 mm läpimittaiset huokokset. Tulokset on esitetty taulukossa 1. Tiivistyshuokosten hyväksyttävä tasona pidetään yleisesti 1–2 %. Tutkimuksessa betonin notkeus vaikutti tiivistyshuokosten määrään kaikilla tiivistysajoilla: jäykemmissä betoneissa tiivistyshuokosten määrä oli yleensä korkeampi. Tämä trendi on selkeä erityisesti lyhyillä tiivistysajoilla, mutta väheni tiivistysajan kasvaessa; 45 sekunnin tiivistysjalla eri notkeusluokkien tiivistyshuokosten määrät olivat samalla tasolla, mikä viittaa siihen, että suurin osa tiivistyshuokosista oli jo poistunut.

Kuva 8 esittää tiivistyshuokosten 3D-rekonstruktioita 2D-kuvana näytteissä S2-5, S2-20 ja S2-45. Näytteessä S2-5 (kuva 14a) tiivistyshuokosia ovat runsaasti koko näytteen korkeudella. Näytteessä S2-20 (kuva 14b) havaitaan huomattava huokoisuuden väheneminen, ja suuremmat huokokset ovat keskittyneet lähelle näytteen yläosaa. Näytteessä S2-45 (kuva 14c) huokosten määrä vähenee edelleen, erityisesti suurempien huokosten osalta. Tämä kehitys

korostaa tiivistysajan merkitystä tiivistyshuokosten määrän osalta.

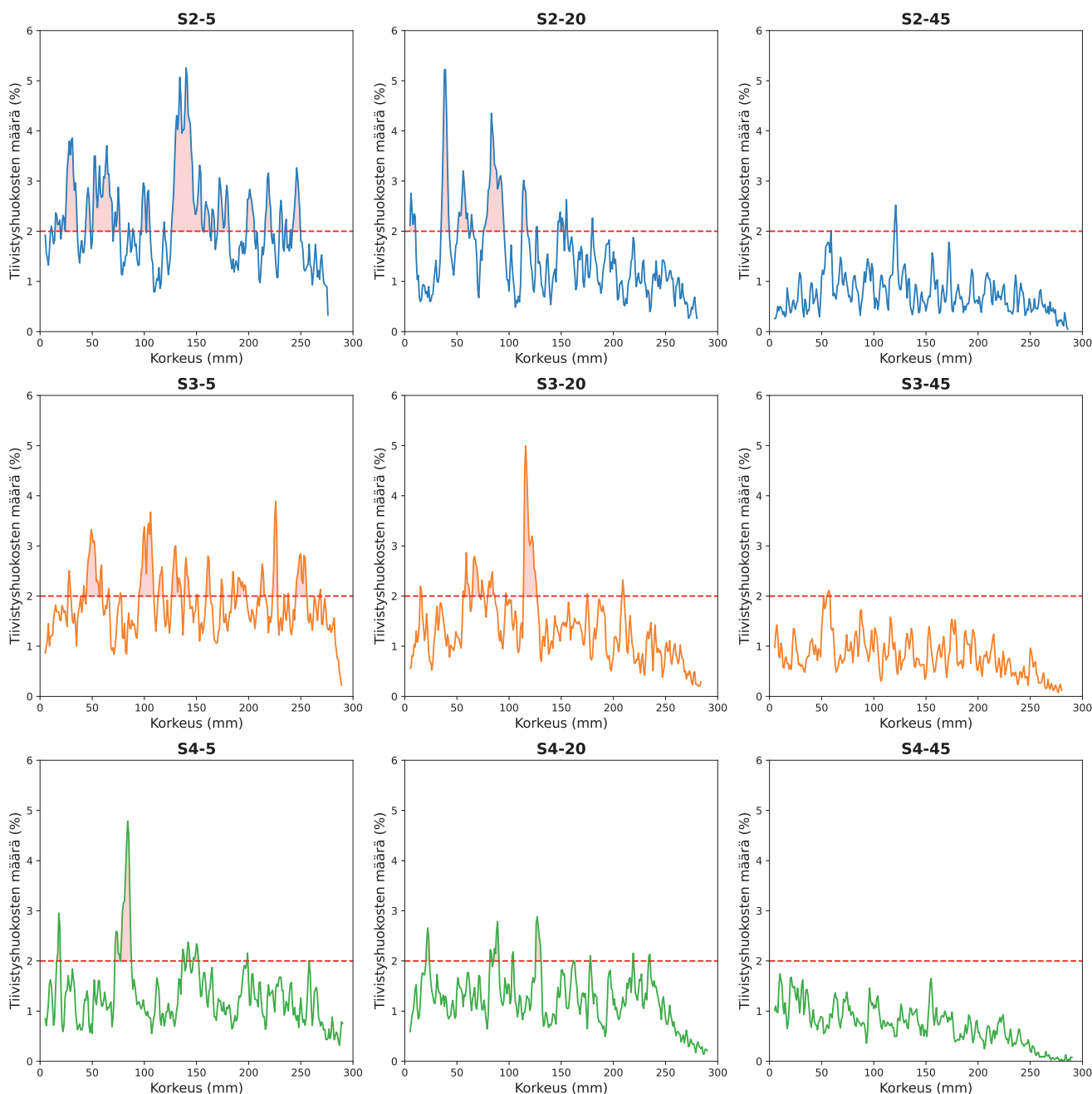
Kuva 9 esittää tiivistyshuokosprofiilit käyttäen 0,1 mm paksuisia digitaalisia leikkeitä. Arvo on leikkeen keskimääräinen tiivistyshuokosten määrä ja vertailutasona on yleisesti käytetty 2 % tiivistyshuokosten määrä. Näytteellä S2-5 tämä vertailutaso ylittyy useita kertoja, mikä viittaa korkeaan tiivistyshuokosten määrään. Näytteellä S2-20 on vähemmän vertailutason ylityksiä ja pääosin lähempänä betonin pintaa. Pitkään tärytettyssä S2-45 näytteessä 2 %:n vertailutaso ylittyy vain harvakseltaan.

Vastaava ilmiö havaitaan myös S3- ja S4-notkeusluokkien näytteissä. Lyhyillä tiivistysajoilla (S3-5 ja S4-5) tiivistyshuokosten määrä ylittää usein 2 %:n vertailutason. Tiivistysajan pidentyessä (S3-20 ja S4-20) 2%:n vertailutaso ylittyy harvemmin, ja pisimmillä tiivistysajoilla (S3-45 ja S4-45) vertailutaso ylittyy vain harvoin. Koesarja osoittaa tiivistysajan merkittävän vaikutuksen tiivistysilman määrään, tiivistysilman kokonaismäärä vähenee olennaisesti tiivistysajan pidentyessä. Pidemmät tiivistysajat tuottavat myös tasaisempia

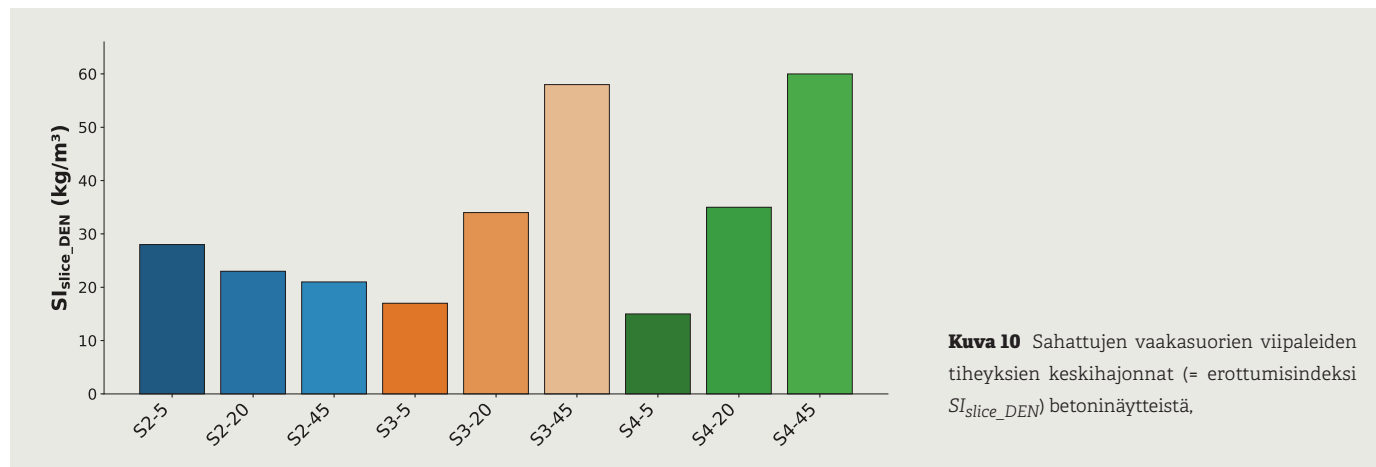
tiivistysilman jakautumia kaikissa tutkituissa notkeusluokissa.

Myös betonin notkeus vaikuttaa tiivistyshuokosten määrään. Notkeusluokan kasvaessa 2 % vertailutason ylittävä alue pienenee, erityisesti 5 ja 20 sekuntia tiivistetyissä näytteissä. Pidemmällä tiivistysajalla (45 s) notkeusluokan vaikutus vähenee jossain määrin, kaikilla notkeusluokilla päästiin pääosin alle 2% tason.

Betoninäytteiden erottumista arvioitiin tiheyspohjaisen erottumisindeksin SI_{slice_DEN} avulla (kuva 10). S2-notkeusluokassa havaittiin vähäistä erottumista, erottumisindeksin arvot jäivät alle 30 kg/m³. Sen sijaan notkeusluokissa S3- ja S4 erottumisindeksit kasvoivat tiivistysajan myötä, nousten suurimmillaan lähelle 60 kg/m³. Nämä havainnot osoittavat, että jäykemmät betonit ovat selvästi vähemmän alttiita erottumiselle ja hyötyvät pidemmistä tiivistysajoista. Toisaalta notkeammilla betoneilla tiivistys poistaa tehokkaammin tiivistyshuokokset, mutta betonit ovat alttiimpia erottumiselle, erityisesti pidemmällä tiivistysajalla.



Kuva 9 Tiivistysluokosten määrä eri notkeusluokilla ja eri tiivistysajoilla. Katkoviiva merkitsee 2 % vertailutasoa. Huomautus: Näytteiden yläosa vastaa korkeutta = 0.



Kuva 10 Sahattujen vaakasuorien viipaleiden tiheyksien keskihajonnat (= erottumisindeksi SI_{slice_DEN}) betoninäytteistä.

Johtopäätökset ja tulevat tutkimuskohteet

Tämä tutkimus korostaa kokonaisvaltaisen lähestymistavan tarvetta betonin tiivistyksen laadunvalvonnassa. Betonin tiivistyksessä tulee huomioida sekä betonin erottumisriski että tiivistyshuokosten poistuminen betonista. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että nämä ongelmat voivat ilmetä samanaikaisesti tiivistyksen aikana. Betonin erottuminen voi alkaa jo ennen kuin tiivistyshuokokset ovat poistuneet betonista. Havainnot korostavat myös reaaliaikaisen seurannan merkitystä tiivistyksen aikana. Perinteisten indikaattorien,

kuten pinnalle nousevien ilmakuplien, sijaan tarvitaan kehittyneempiä menetelmiä, kuten esimerkiksi ACIS-tekniikkaa.

Tutkimuksessa kehitetyt erottumisindeksit tarjoavat hyödyllisen työkalun eri betonilaitosten erottumisherkkyyden arvioimiseen ja mahdollistavat kohdennetut säädöt tiivistysstrategioihin. Yhdistämällä tiivistysajan betonikohtainen arviointi edistyneeseen tiivistyksen monitorointiin parantaisi merkittävästi betonin tiivistyksen laatua.

Tämä tutkimus avaa uusia näkökulmia betonin tiivistyslaadun parantamiseksi. Lupaa-

via alueita ovat ACIS-seurantajärjestelmän kehittäminen automaattisen kerrosanalyysin avulla sekä älypuhelinsovellusten luominen tiivistystarpeen arviointiin. Toteutuneiden rakenteiden tutkimukset auttaisivat tarkentamaan erottumisindeksejä ja parantamaan luokittelun tarkkuutta. Syvällisempi ymmärrys tiivistyslaatuun vaikuttavista tekijöistä mahdollista tiivistyksen seurantamenetelmien kehittämisen, mikä parantaa betonirakentamisen laatua ja voi johtaa suunnittelun varmuuskertoimien pienentymiseen ja siten tarjota taloudellisia ja ympäristöhyötyjä. •

Viitteet

- [1] T. Ojala, H. Ahmed, P. Kuusela, A. Seppänen, and J. Punkki, "Monitoring of concrete segregation using AC impedance spectroscopy," *Constr Build Mater*, vol. 384, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131453.
- [2] H. Ahmed and J. Punkki, "Methods for Assessing Concrete Segregation Due to Compaction," *Nordic Concrete Research*, vol. 70, no. 1, pp. 1–23, Jun. 2024.
- [3] H. Ahmed and J. Punkki, "Surface Bubbles Emergence as an Indicator for Optimal Concrete Compaction," *Materials*, vol. 17, no. 10, May 2024, doi: 10.3390/ma17102306.
- [4] H. Ahmed, J. Kuva, and J. Punkki, "Analysing entrapped pores in concrete via x-ray computed tomography: Influence of workability and compaction time," *Constr Build Mater*, vol. 417, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135322.

Abstract: Evaluating Concrete

Compaction: A Multi-modal Approach

Concrete compaction quality is crucial for structural strength and durability, as entrapped pores weaken concrete while segregation risks uneven material distribution. Hassan Ahmed at Aalto University analyzed compaction effectiveness by measuring segregation and pore distribution in fresh and hardened concrete. Using AC-impedance spectroscopy (ACIS), the study introduced a segregation index that evaluates aggregate segregation in fresh concrete. For hardened concrete, indices based on density and aggregate distribution quantified segregation levels, revealing variations across vibration durations and mix consistencies.

Additionally, X-ray tomography was used to examine entrapped pores, showing that longer compaction times effectively reduce porosity in low-workability concretes while posing segregation risks for high-workability mixes. Traditional indicators, like observing bubble emergence to the surface, proved unreliable, highlighting the need for advanced, objective monitoring techniques. Findings suggest that incorporating real-time monitoring and the new segregation indices can optimize concrete quality by balancing air expulsion and minimizing segregation. Future research aims to refine ACIS monitoring and explore smartphone-compatible on-site tools, contributing to improved construction practices and potentially reducing environmental impact.



Hassan Ahmed väitteli 29.11.2024 Aalto-yliopistolla "Evaluating Concrete Compaction: A Multi-modal Approach". Väitöstyö käsitteli betonin tiivistystä ja tiivistyksen laatuun vaikuttavia tekijöitä. Väitöskirjan vastaväittäjänä toimi prof. Andrzej Cwirzen Luulajan teknillisestä yliopistosta. Työn esitarkastajina toimivat prof. Andrzej Cwirzen ja prof. Stefan Jacobsen. Työn valvojana toimi prof. Jouni Punkki. Tässä artikkelissa on esitelty väitöskirjan pääkohdat lyhyesti.

Työn tekijä ja oppilaitos: Väitöskirjatutkija Hassan Ahmed. Betonitekniikka, Rakennustekniikan laitos, Aalto-yliopisto.

Työn otsikko ja aihe: "Evaluating Concrete Compaction: A Multi-modal Approach"

Työn valvoja ja ohjaaja: Professori (POP) Jouni Punkki

Väitöskirjan esitarkastajat: Prof. Andrzej Cwirzen, LUT, Ruotsi ja prof. Stefan Jacobsen, NTNU, Norja

Vastaväittäjä: Prof. Andrzej Cwirzen, LUT, Ruotsi

Väitöskirja löytyy sähköisesti: <https://aaltodoc.aalto.fi/items/44d99e5e-1238-4392-892d-243aecea4427>