

Good vibrations

– Tutkimus betonin tiivistettävyyteen vaikuttavista tekijöistä

Teemu Ojala

Tohtorikoulutettava, Betonitekniikka
teemu.ojala@aalto.fi

Fahim Al-Neshawy

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

Jouni Punkki

Professori (PoP), Betonitekniikka
jouni.punkki@aalto.fi

Tausta

Tuore betoni voi sisältää jopa 20 % ilmaa ennen tiivistystä. Ilmamäärään vaikuttaa sekä betonin ja muotin ominaisuudet että myös raudoituksen määrä. Tiivistyksellä pyritään poistamaan tämä tiivistysilma mahdollisimman hyvin. Betonissa on usein myös tarkoituksellisesti lisätty ilmaa, suojahuokosia. Suojahuokosten määrään tiivistyksen ei uskota kuitenkaan vaikuttavan merkittävästi. Vaikka tiivistys on olennainen osa betonirakenteiden valmistusprosessia, ajankohtaista kirjallisuutta tiivistyksestä on vain vähän saatavilla. Itsetiivistyvien betoneiden tulo markkinoille on ohjannut tuoreen betonin tutkimusta.

Betonissa on kuitenkin tapahtunut kolme merkittävää muutosta, joiden vuoksi monet tiivistystä käsittelevät vanhemmat tutkimustulokset eivät ole enää voimassa:

- Betonin notkistavat lisäaineet ovat kehittyneet.
- Tiivistyskalusto on kehittynyt.
- Betonit ovat notkeampia kuin aikaisemmin.

Viime aikoina on huomattu, ettei tavanomainen tiivistys ole aina riittävä, vaan betonin tiheys rakenteessa on jäänyt suunniteltua alhaisemmaksi. Ilmiö on tullut esille muun muassa valmistettaessa puoli-täysmittakaavaisia koerakenteita. Kyseisistä betoneista tehdyt laadunvalvontakokeet osoittavat tavoitteiden mukaista ilmamäärää, tiheyttä sekä puristuslujuutta. Porattujen rakennekoekappaleiden

tiheys on kuitenkin ollut selvästi alhaisempi (jopa 100...150 kg/m³) verrattuna koerakenteseen. Lisäksi ohuthiestä määritetty kokonaisilmamäärä on ollut tavoitetasoa korkeampi ja vastaavasti puristuslujuus selvästi alhaisempi. Yhteistä näille betoneille on ollut alhainen vesi-sementtisuhte (noin 0,40) ja korkea notkistinannostus (1...2 % sementin painosta). Olettamuksena on ollutkin, että kyseiset betonit ovat niin kittimäisiä, ettei kaikkea tiivistysilmaa normaaleilla tiivistysajoin pystytä poistamaan rakenteesta. Tällöin betonirakenteen tiivistyminen jää osin puutteelliseksi. Laboratoriokappaleiden tiivistys on ollut riittävän tehokas niiden pienen tilavuuden takia.

Betonin tiivistystä on tutkittu Aalto-yliopistossa. Tilaustutkimuksen "Good vibrations" tavoitteena oli selvittää, millaisilla betonilaaduilla tiivistysongelmia esiintyy ja toisaalta, millaisia tiivistysmääriä erityyppisille betoneille vaaditaan. Tavoitteena oli luoda ajantasainen ohjeistus betonin tiivistämisestä.

Koejärjestelyt

Tutkimus koostui pääosin kenttäkokeista, joissa valmistettiin koerakenteita käyttäen erilaisia betonikoostumuksia. Koerakenteet tiivistettiin täyryttämällä koerakenteita eripituisilla tiivistysajoin. Betoneista tehtiin tuoreen betonin testit ennen valua sekä valujen jälkeen. Projektin alkuperäisenä tavoitteena oli testata betonin koostumuksen vaikutuksia tiivistettävyyteen, mutta jo ensimmäisissä kenttäkokeissa huomattiin betonin erottuvan

Good vibrations

- Tilaustutkimus Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulussa, Rakennustekniikan laitoksessa
- Tavoitteena selvittää betonin koostumuksen vaikutukset sen työstettävyyteen
- Projektin kesto 05/2018–1/2019

Projektin rahoittajat

- Betoniteollisuus ry / Valmisbetoni-jaosto
- SBK-säätiö
- Finnsementti Oy
- Liikennevirasto
- BASF Oy
- Destia Oy

Raportti

- Raportti on julkinen ja ladattavissa osoitteessa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-8407-7>



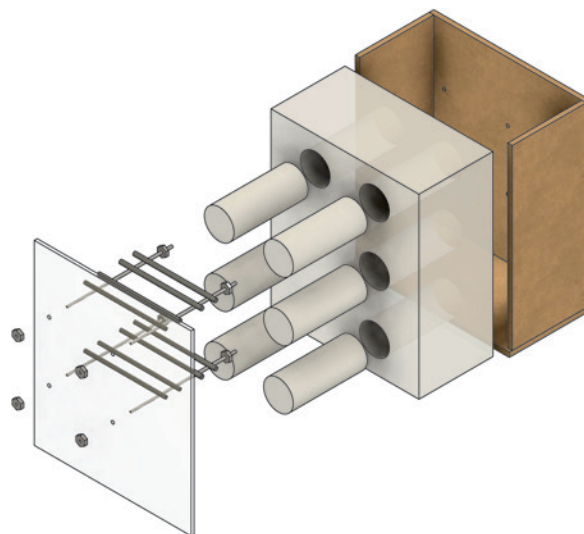
Kuvakollaasi – valokuvia tutkimuksen varrelta.





Kuva 1 Tiivistystä videoitiin kahdesta eri suunnasta muotin etupuolelta ja muotin päältä.

Kuva 2 Havainnekuva koemuotista, raudoituksesta sekä porattavista lieriökappaleista. Koerakennerratkaisua käytettiin kaikkien valujen betonien yhteydessä lukuun ottamatta tärysauvan vaikutusaluekoetta.



helposti. Tästä syystä tutkimuksessa analysoitiin tiivistysasteiden lisäksi myös betonin erottumisherkkyttä. Betonin tiivistymistä ja erottumisherkkyttä tutkittiin koerakenteista porattujen koekappaleiden tiheyksien ja puristuslujuuksien avulla. Lisäksi koerakenteiden tiivistystä dokumentoitiin kahdella videokameralla, muotin etuseinämän lävitse ja muotin päältä kuvan 1 mukaisesti. Videotallenteista arvioitiin toteutunutta tiivistysaikaa sekä tiivistysilman poistumisnopeutta betonista tärytyksen aikana.

Kokeet tehtiin pääsääntöisesti betoniasemakokeina, joissa testattiin yhteensä 19 erilaista koebetonit. Pääosin nämä betonit valettiin Ruskon Betoni Oy:n Kivenlahden valmisbetoniasemalla. Muutamia betonit tehtiin Ruskon Betoni Oy:n Tuusulan betoniasemalla, jossa kiviaines sisältää enemmän murskattua kiviainesta. Lisäksi työmaakokeita varten valmistettiin kaksi koebetonit, jotka kuljetettiin todellisen rakenteen valua varten Destia Oy:n työmaalle Kirkkonummeen. Kaikki koebetonit olivat koostumukseltaan erilaisia tuotantobetonit. Betoniasemakokeissa valettiin yhteensä 74 koerakennetta, ja niistä porattiin kaikkiaan 480 poraliieriötä. Koerakenteet analysoitiin Aalto-yliopistossa kesän ja syksyn aikana vuonna 2018.

Kenttäkokeissa valettiin useita koostumukseltaan ja laadultaan erilaisia betoneita:

- Lujuusluokka: C30/37...C60/75
- Sementtilaadut: Plussementti, Akmenés, SR-sementti
- P-luku: Huokostamattomia ja P20...P70
- Vesi-sementtisuhde: 0,353...0,453

- Notkistinmäärä: 0,63...1,68 % sementin painosta
- Notkeusluokka: S2...S4

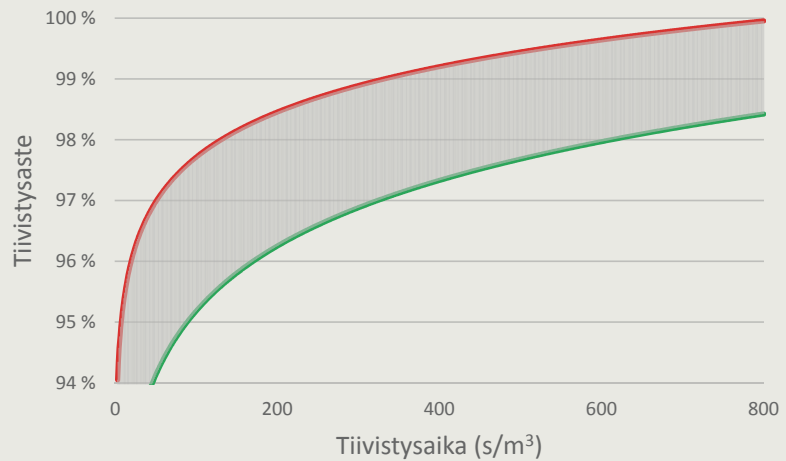
Tiivistystä varten valittiin neljä eri tiivistysaika. Esitestien perusteella valittiin tiivistysajoiksi 200...1600 s/m³, mutta jo ensimmäisten betonien jälkeen luovuttiin pisimmästä tiivistysajasta ja muut betonit tiivistettiin tehollisilla tiivistysajoilla 140...800 s/m³. Käytössä oli kaksi eri sukupolvea edustavaa tärysauvaa, joista vanhempaa tärysauvaa käytettiin vain 200 s/m³:n tiivistysajalla, ja joka myöhemmin muutettiin laskennallisesti vastaamaan 140 s/m³:n tärytystä uudemmalla tärysauvalla. Betonit valettiin kahdessa kerroksessa, ja kutakin kerrosta tärytettiin kolmesta eri kohdasta. Näin tärytyskohtia oli koerakenteessa yhteensä kuusi kappaletta. Tiivistysajalla 200 s/m³ yhden tärytyskohdan ajaksi tuli vain 2,5 sekuntia. Tiivistysaikoihin otettiin mukaan tärysauvan lasku- ja nostoaika. Työmaakokeissa betoneita tiivistettiin arvioiduilla optimiajoilla, kun koerakenteet ja todellinen rakenne valettiin.

Koerakenteiden valua varten valmistettiin 12 kappaletta muotteja. Kuvassa 2 on esitetty piirros käytetystä muotista siitä porattuineen koelieriöineen. Valettavan koerakenteen mitat olivat 500 × 600 × 250 mm³, eli tilavuus oli 75 litraa. Muotin etuseinämän materiaaliksi valittiin läpinäkyvä akryylilevy, jonka läpi voitiin taltioida tiivistysilman poistumista. Muotin uudelleenkasauksen yhteydessä sen sisälle asennettiin yksinkertainen rauditus. Koerakenteista porattiin kuusi kappaletta koelieriöitä, joiden halkaisijat olivat noin 100 mm. Näistä mitattuja tihey- ja puristuslujuustu-

loksia verrattiin samoista betoneista tehtyihin laboratoriokoekappaleisiin (Φ = 150 mm, h = 300 mm). Porattujen lieriöiden puristuslujuudet muutettiin vastaamaan kuutiolujuuksia. Myös laboratoriokoekappaleiden puristuslujuudet ovat muunnettu myös vastaamaan kuutiolujuuksia.

Tiivistysaste

Tiivistyksen riittävyttä mitattiin laskemalla koetuloksista betonin tiivistysaste. Tiivistysaste on koerakenteista porattujen koekappaleiden keskimääräinen tiheys suhteessa laboratoriokoekappaleiden tiheyteen. Tällöin 100 %:n tiivistysasteella saavutettaisiin sama tiheys sekä koerakenteessa että laboratoriokoekappaleissa. Tulosten perusteella eri tiivistysajoilla saavutetuista tiivistysasteista muodostettiin yksinkertaistettu verhoikäyrä, joka on esitetty kuvassa 3. Kuvasta nähdään, että tyyppillisellä tiivistysajalla (200 s/m³) saavutettiin noin 96...99 %:n tiivistysaste, ja vasta hyvin pitkillä tiivistysajoilla poraliieriöiden ja laboratoriokoekappaleiden tiheydet alkoivat vastata toisiaan. Lisääntynyt tiivistysilman määrä (1...4 %) vastaa betonin lujuudessa jopa 5...20 %:n alenemaa. Siten 85 %:n lujuusvaatimusta on vaikea saavuttaa edes pidemmällä tiivistysajoilla. Tiivistysilman poistumiseen vaikuttaa myös merkittävästi tiivistettävän betonikerroksen paksuus. Akryylilevyn läpi kuvattujen tallenteiden perusteella ilmapuhalat nousevat vain noin 2...4 cm/s nopeudella, jolloin korkeilla valukerroksilla vaadittaisiin hyvin pitkä tiivistysaika.

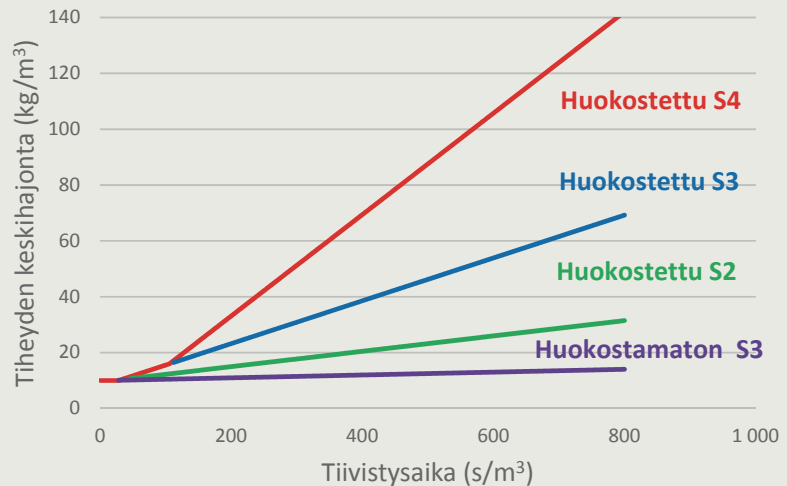


Kuva 3 Tulosten perusteella laadittu yksinkertaistettu verhoikäyrä, josta nähdään tiivistysajan vaikutus betonin tiivistysasteeseen. Koetuloksista noin 90 % osuu verhoikäyrän sisälle.

Erottumisherkkyyys

Betonin erottumisherkkyyttä arvioitiin koerakenteesta porattujen koekappaleiden tiheyksien keskihajonnan avulla. Kuvassa 4 esitetyn yksinkertaistetun mallin avulla nähdään nopeasti, että tiivistysajan lisääntyessä tiheyserot alkoivat kasvaa koerakenteen sisällä. Erottumista voidaan havaita myös kuvasta 5, jossa on esitetty betonin "C35/45 – P50 – S2" poraliieriöiden tiheys- ja lujuusarvot. Kuvasta havaitaan koerakenteen yläosan olevan tiheydeltään laboratoriokoekappaleita alhaisempi. Alaosan tiheys sen sijaan kasvaa tiivistysajan kasvaessa. Erottumiseriski onkin merkittävä varsinkin notkeilla, huokostetuilla betoneilla. Sen sijaan jäykemmällä betoneilla erottumiseriski näyttää olevan merkittävästi pienempi. Normaaleilla tiivistysajoilla erottuminen jää käytännössä kuitenkin yleensä vähäiseksi. Ongelmaksi saattavat tulla tilanteet, joissa ei ole riittävästi tiivistyskohtia vaan tärytystä joudutaan pitkittämään paikallisesti. Toisin kuin huokostetuilla betoneilla, huokostamattomalla betoneilla ei näyttäisi tapahtuvan selvää erottumista, vaikka tiivistysaika olisi pidempikin.

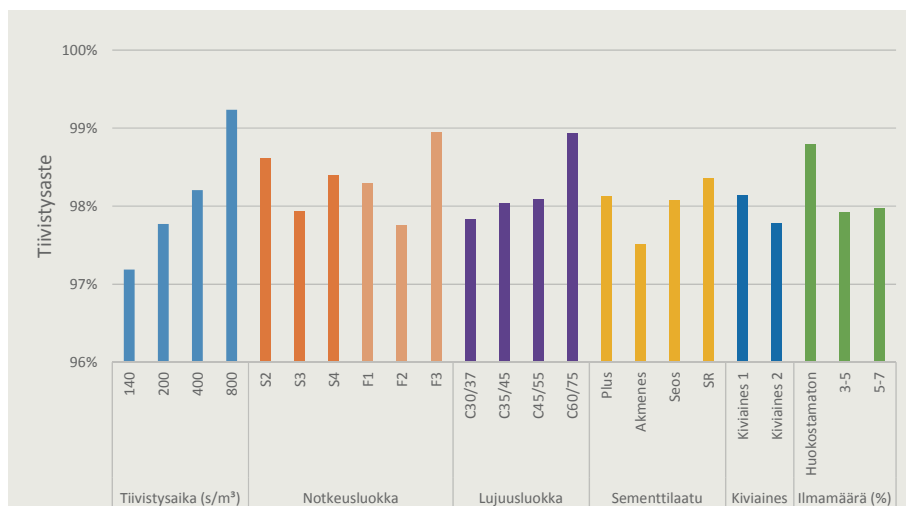
Tutkimuksessa selvitettiin myös, miten tiivistysaika vaikuttaa koerakenteesta porattavien koeliieriöiden ja laboratoriokoekappaleiden puristuslujuuksien suhteisiin. Tulosten perusteella voidaan todeta, että koerakenteiden puristuslujuudet jäivät selvästi pienemmiksi kuin laboratoriokoekappaleiden. Pidemmällä tiivistysajoilla voidaan saavuttaa 85 %:n vaatimustaso, mutta keskimäärin jäädään noin 75...80 %:n tasolle. Lujuudet ovat kuitenkin melko sopusoinnussa tiivistysasteiden kanssa, vaikka hajontaa onkin runsaasti (kuva 8).



Kuva 4 Tiivistysajan vaikutus koekappaleiden tiheyksien keskihajontaan.

GV-13		Lab.koekappaleiden tiheys =		2253 kg/m³		51,3 MPa	
140 s/m³ 6 * 2,5 s		200 s/m³ 6 * 2,5 s		400 s/m³ 6 * 5 s		800 s/m³ 6 * 10 s	
2183 34,0	2166 33,3	2178 36,5	2172 37,6	2190 39,6	2200 39,4	2162 42,1	2195 32,6
2181 38,0	2193 36,2	2210 42,4	2206 42,4	2241 42,1	2243 37,9	2273 42,5	2258 43,7
2198 41,0	2196 41,4	2233 42,8	2227 43,3	2267 42,4	2262 42,0	2313 44,6	2270 45,2
Tiheys, KA.= 2186 Tiheys, KH.= 12,1 PL, KA.= 37,3 PL, KH.= 3,4		Tiheys, KA.= 2204 Tiheys, KH.= 24,9 PL, KA.= 40,8 PL, KH.= 3,0		Tiheys, KA.= 2234 Tiheys, KH.= 31,9 PL, KA.= 40,6 PL, KH.= 1,9		Tiheys, KA.= 2245 Tiheys, KH.= 55,8 PL, KA.= 41,8 PL, KH.= 4,7	

Kuva 5 Esimerkki betonista "C35/45 – P50 – S2" valetuista koerakenteiden tuloksista, joissa on tiheydet ja puristuslujuudet esitetty värikartassa. Vihreä väri merkitsee minimi vaatimustason täyttämistä, kun taas punaisella värjätty arvot jäävät tasoa alemmaksi ja vastaavasti siniset suuremmiksi.



Kuva 6 Vertailu tiivistysasteeseen vaikuttavista tekijöistä. Kiviaines 2 sisältää enemmän murskattua kiviainesta kuin Kiviaines 1. Huom. Koebetoneiden määrä vaihtelee luokittain.

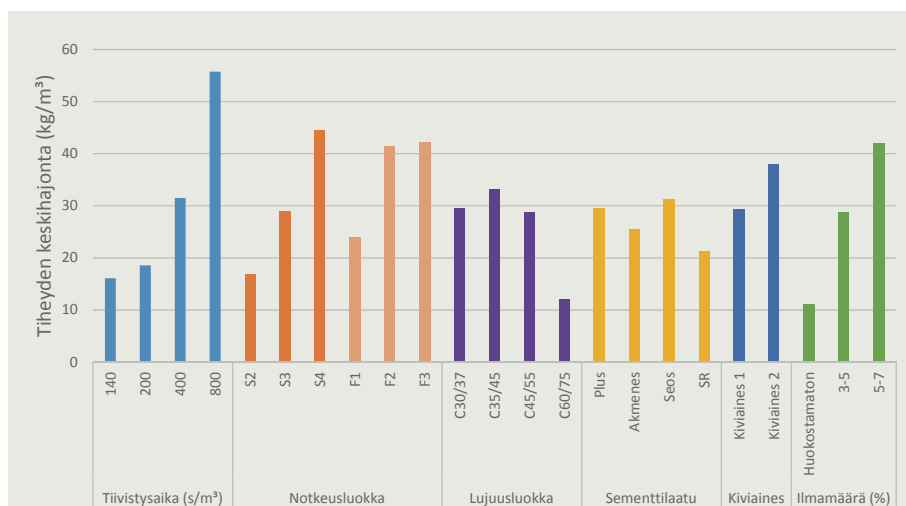
Mitä tiivistyksestä opittiin?

Tutkimus antoi lisäselvyyttä betonin tiivistämiseen. Tiivistäminen on hyvin merkittävässä roolissa betonirakenteiden valmistusprosessissa. Riittämätön tiivistys voi aiheuttaa huomattavia puutteita betonin lujuusominaisuuksissa, mutta vastaavasti liian voimakas tai pitkäkestoinen tärytys voi aiheuttaa betonin erottumista. Kokeiden perusteella voidaan todeta, että muotti saadaan helposti täytettyä tiivistyksen avulla nykyaikaisilla tärysauvoilla. Jo suhteellisen lyhyillä tiivistysajoilla pystytään täyttämään muotti betonin notkeudesta riippumatta. Tästä voidaan päätellä, että ”rotan kolot” tai vastaavat isommat valuvirheet johtuvat siitä, ettei virhekohtia ole tärytetty ollenkaan tai sitoutuminen on alkanut ennen tiivistystä.

Vaikka muotti saadaan täytettyä varsin helposti, tiivistysilman poistaminen rakenteesta on haasteellista. Käytännön tiivistysajoilla (n. 200 s/m³) rakenteeseen jää tiivistysilma 1...4 % enemmän verrattuna laboratoriokoekappaleisiin. Lujuuksessa tämä vastaa arviolta noin 5...20 %:n alentumaa. Vastoin alkuperäistä oletusta betonin notkeudella, vesi-sementtisuhteella tai notkistinannostuksella ei näyttäisi olevan vaikutusta betonin tiivistysasteeseen.

Jo projektin alkuvaiheessa havaittiin, että betonit alkavat erottua nopeasti tärytyksen vaikutuksesta. Erottuminen huomataan tiheyseroina koerakenteen ylä- ja alaosan välillä. Erottumisherkkyyteen vaikuttaa olennaisesti betonin notkeus. Erityisesti notkeilla, huokostetuilla betoneilla erottumisriski on merkittävä. Kuitenkin käytännön tiivistysajoilla erottumisriski jää yleensä kohtuullisen pieneksi. Tärytettäessä raskaasti raudoitettuja paikkoja tärytysajat saattavat olla huomattavasti pidempiä, jolloin merkittävää erottumista saattaa tapahtua.

Vaikka erottumista syntyikin, sen vaikutus betonin puristuslujuuteen oli pieni. Erottuminen on kuitenkin merkittävä ongelma betonille. Muun muassa muodonmuutosominaisuudet voivat heikentyä erottumisen seurauksena. Eri-



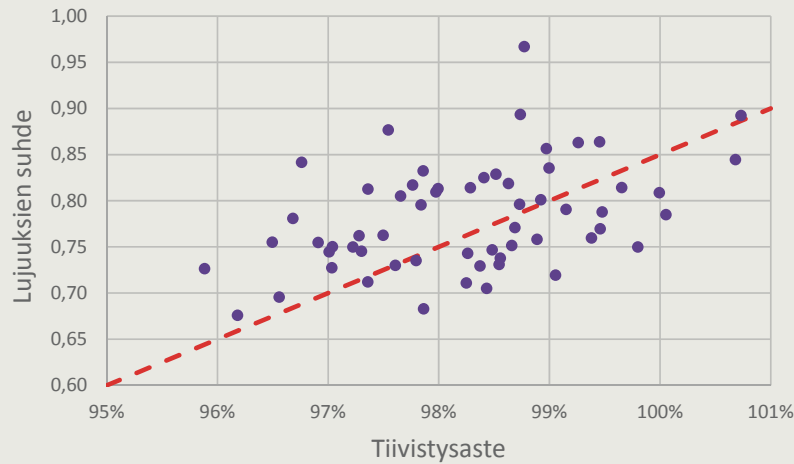
Kuva 7 Vertailu tiheyden keskihajontaan vaikuttavista tekijöistä. Kiviaines 2 sisältää enemmän murskattua kiviainesta kuin Kiviaines 1. Huom. Koebetoneiden määrä vaihtelee luokittain.

tyisesti betonin kutistuma kasvaa, jos sementtipastaa erottuu betonirakenteen yläosaan. On myös todennäköistä, että viime vuosina rakenteesta porattujen koekappaleiden tiheyksiä on osin tulkittu väärin. Tiheyden aleneman on tulkittu johtuvat betonin ilmamäärän kohoamisesta sekoituksen jälkeen. Ilmamäärän kohoamista on varmasti tapahtunut, mutta lisäksi betonin erottuminen on aiheuttanut tiheyden muutoksia. Samoin kovettuneen betonin ilmamäärä on voinut olla korkea johtuen erottuneen betonin suuremmasta sementtikiven tilavuusosuudesta. Kohonneisiin ilmamääriin vaikuttavat tekijät ovat viime aikoina selkeyntyneet, mutta tarvitaan vielä lisätutkimuksia, jotta huokostettujen betonien käyttäytyminen ymmärrettäisiin paremmin.

Tutkimuksessa tulokset voidaan tiivistää seuraaviin havaintoihin:

- Muotti saadaan täytettyä jo lyhyellä tiivistysajalla.
- Tiivistysilmaa emme saa kokonaisuudessaan poistettua betonista.
- Erottumisriski on olemassa erityisesti notkeilla, huokostetuilla betoneilla.
- Betonin erottuminen on paikoin yllättävänkin suurta.
- Huokostetun betonin käyttäytymistä emme täysin ymmärrä.

Projektin tulosten perusteella laadittiin neliporainen ohje betonirakenteiden tiivistämiseen. Ohje julkaistaan Betoni-lehdessä 2/2019.



Kuva 8 Lujuuksien suhteen (rakennekoekappaleet/laboratoriokoekappaleet) riippuvuus betonin tiivistysasteesta. Kuvassa on esitetty myös teoreettinen riippuvuussuhde punaisella katkoviivalla olettamuksena, että 1 %-yksikkö tiivistysasteessa vastaa 5 %:a lujuudessa, ja että 100 %:n tiivistysasteella saavutettaisiin 85 % laboratoriokoekappaleiden lujuudesta.

Good vibrations – research project

Fresh concrete may contain up to 20% of entrapped air before compaction. The amount of air depends on many factors such as the properties of concrete, mould and reinforcement. The aim of compaction is to remove this entrapped air as well as possible. In addition to the entrapped air, the concrete often contains entrained air to improve the freeze and thaw resistance of concrete. It is though assumed that the entrained air is not greatly impacted by the compaction.

Within couple of years, it has been noted that the compaction of concrete is not always sufficient. This has been observed during experiments where test structures have been cast. In these cases, the density of the drilled cores was notably lower, even 100...150 kg/m³, compared to the laboratory specimens. Conversely, the estimated air content in these cores was higher while the compressive strength was considerably lower.

“Good vibrations” is a contract research project carried out in Aalto University, Department of Civil Engineering. The purpose of the project was to investigate how the composition of concrete affects the degree of compaction and how much compaction different concrete types require. The research was based on test structures cast in a ready-mix plant. Drilled cores were extracted from the hardened structures

and their densities and compressive strengths were analyzed in Aalto University. In addition, realized vibrations times and the removal of the entrapped air was estimated from the recordings.

The results show that the compaction fills the mould with concrete easily but removing the entrapped air is challenging. After typical vibrations times, the remaining entrapped air was generally 1...4% more than in the laboratory specimens. This corresponds to a reduction of compressive strength about 5...20%. Against the initial assumptions, the workability of concrete, low water-cement ratio or high superplasticizer amount have little effect on the degree of compaction. However, during the first cast of test structures it was noted that vibration might easily cause segregation even with short vibration times. Fortunately, with typical vibration times this risk of segregation is moderately low. It was also noted that the segregation of the concrete did not clearly affect the average strength of the test structures. Since air-entrained concretes with high consistency were much more likely to segregate, the sensitivity of air-entrained concrete requires further research.

The practical goal of the project was to put together a set of instructions for compacting the concrete. In this report, a four-step process was developed in which a poker vibrator is used for compaction.