



Project MONOCRETE: eenlaagse verharding met grote dikte op basis van alternatieve bindmiddelen en gerecyclede granulaten

Inleiding

Veel infrastructuur heeft momenteel te kampen met een toenemende verkeersbelasting. Zo blijft het snelwegverkeer toenemen, moeten de taxibanen op luchthavens worden aangepast aan jumbojets en hebben zones voor goederenopslag steeds dikkere funderingen.

Eenlaagse betonverhardingen met grote dikte zijn een ideale oplossing om het hoofd te bieden aan deze nieuwe uitdagingen, want ze hebben een zeer lange levensduur, zelfs bij zware belasting, en zijn bestand tegen statische belasting zonder permanent te vervormen.

Het ontwerp en de uitvoering van beton met grote dikte vereisen speciale aandacht, aangezien een grotere betondikte eventuele problemen gelinkt aan een slechte verdichting van het mengsel of het slecht trillen van het beton zal accentueren. Dat verhoogt het risico op “zweten” of ontmenging van het beton in vergelijking met een dünnere verharding.



Figuur 1 – Eerste proefvak van het Monocrete-project in Bierset

Het onderzoeksproject MONOCRETE, ingediend in het kader van een projectoproep van de Waalse competitiviteitspool GreenWin, brengt industriële partners (Eloy en Holcim) en onderzoeksinstituten (OCW, CRIC-OCCN en ULiège) samen om deze problemen in verband met betonverhardingen met grote dikte te bestuderen. Het project is in maart 2021 van start gegaan en zal drie jaar duren. Naast de kwesties in verband met het ontwerp en de uitvoering van het beton is een tweede aspect van het project erop gericht de milieu-impact van deze verhardingen te verlagen door gerecyclede betongranulaten en een alternatief cement van het type CEM V te integreren in het mengsel. Ten slotte zal de milieu-impact van de voorgestelde toepassingen worden beoordeeld door middel van een levenscyclusanalyse (LCA) voor elk van de geteste varianten.

Deze kwesties worden bestudeerd door een combinatie van literatuurstudie, laboratoriumproeven en de aanleg van twee proefvakken, waarvan het eerste in november 2022 is aangelegd.

Invloed van het trillen op de eigenschappen van weg beton (literatuurstudie)

Tijdens de eerste maanden van het project bleek uit een uitgebreide literatuurstudie dat het trillen van weg beton reeds onderwerp van heel wat studie was, met name in sommige staten van de VS.

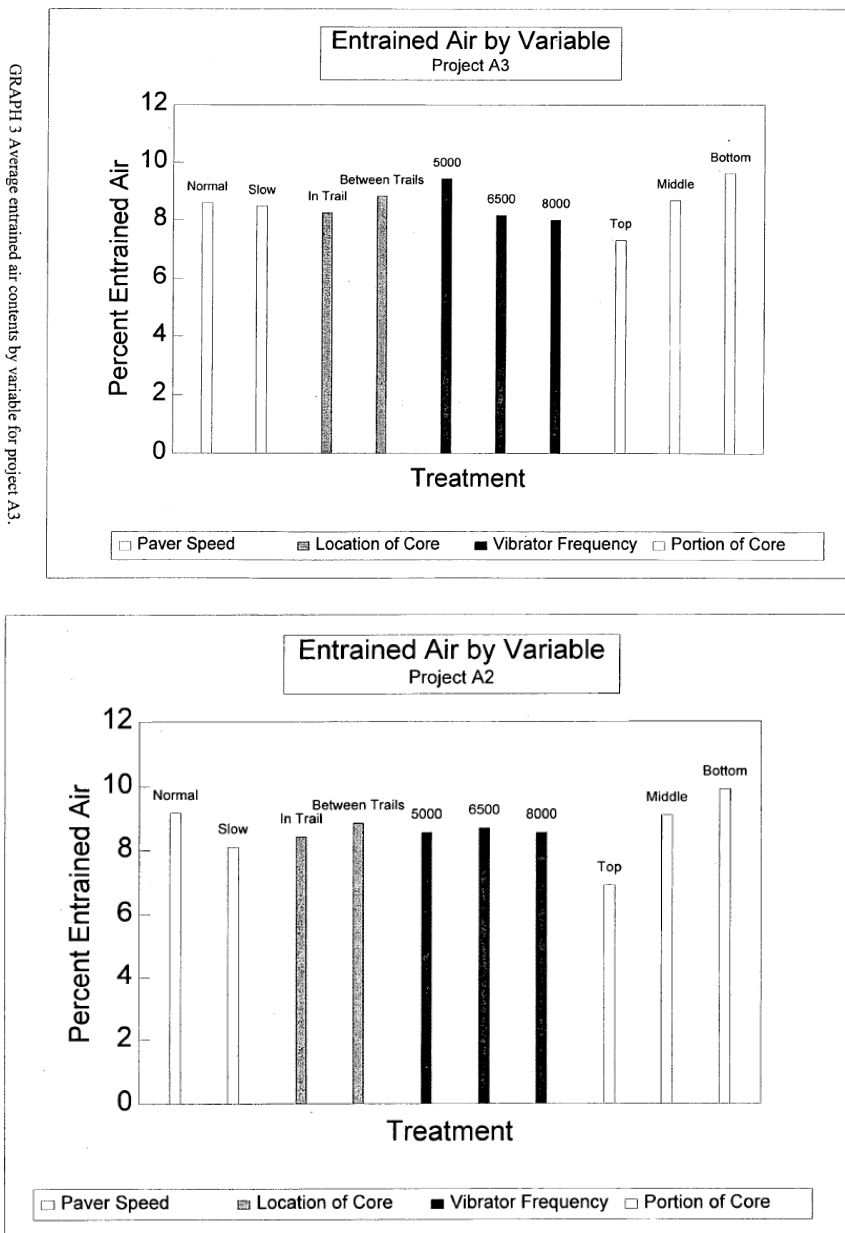
In betonmengsels onderscheiden we meestal ingesloten en ingebrachte lucht. De eerste bestaat uit belletjes met een diameter d van meer dan een millimeter, die men door het trillen van het beton zoveel mogelijk wil evacueren. De ingebrachte lucht daarentegen is een netwerk van microbelletjes lucht ($50 \mu\text{m} \leq d \leq 500 \mu\text{m}$, idealiter rond de $100 \mu\text{m}$) (Belgische Betongroepering, 2018) dat ontstaat door de toevoeging van een luchtbelvormer aan het mengsel, waarbij die luchtbelletjes als expansievaten fungeren om voldoende vorst-dooiweerstand in aanwezigheid van dooizouten te bieden.

Algemeen wordt aangenomen dat een luchtgehalte van 4-6 % in onverhard beton zorgt voor voldoende vorst-dooiweerstand. Deze stelling is alleen waar als het bij de in het beton aanwezige lucht voornamelijk gaat om ingebrachte lucht en niet om een paar grote ingesloten luchtbelletjes. Dat kan worden gecontroleerd door (op verhard beton) de afstandsfactor van de luchtbelletjes te meten: de gemiddelde halve afstand tussen twee luchtbelletjes (Powers, 1949). Hoe lager deze factor, hoe kleiner de luchtbelletjes. Norm NBN EN 934-2 inzake hulpstoffen voor beton (Bureau voor Normalisatie [NBN], 2012) vereist een afstandsfactor van minder dan $200 \mu\text{m}$.

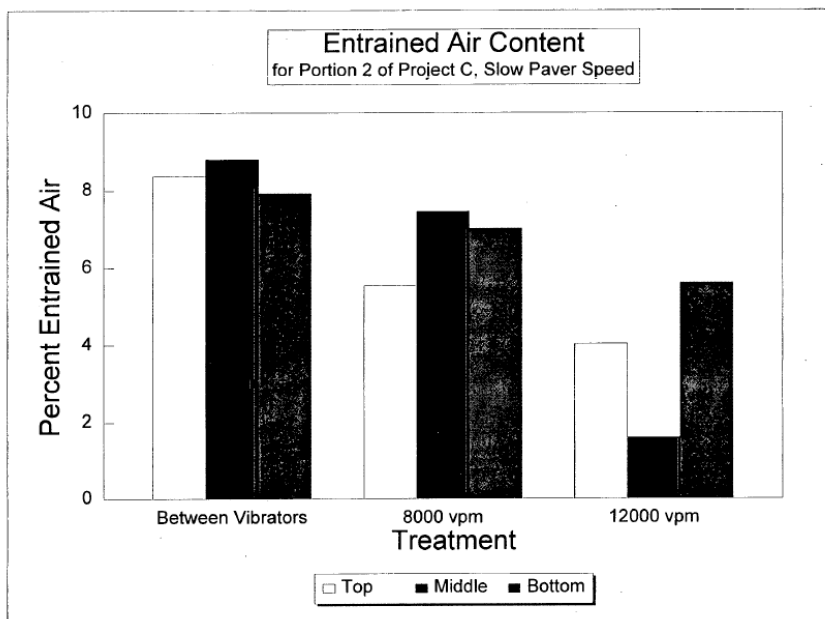
Het trillen van beton heeft tot doel om de hoeveelheid ingesloten lucht in het beton te verminderen, niet de ingebrachte lucht. Er is echter aangetoond dat dit toch gebeurt, vooral bij gebruik van hoge trillingsfrequenties. Stark toonde zo in 1986 al aan (Stark, 1986) dat de vorst-dooiweerstand kan afnemen wanneer de frequentie toeneemt. Recent hebben Ling en Taylor, 2021 aangetoond dat de afstandsfactor parallel toeneemt.

Er is ook op grote schaal geëxperimenteerd met beton dat met glijbekistingsmachines werd uitgevoerd.

In 1999 werd bijvoorbeeld een studie uitgevoerd in Iowa (Tymkowicz & Steffels, 1999a) om de invloed te onderzoeken van de trillingsfrequentie (5 000, 8 000 of plaatselijk 12 000 vpm (*vibrations per minute*)), de voortgangssnelheid (1,5 m/min of 0,75 m/min) en de verticale positie in de verharding op het luchtgehalte van verhard beton. Uit de studie bleek dat het luchtgehalte sterk varieerde afhankelijk van de diepte in de verharding, waarbij het luchtgehalte aan het oppervlak over het algemeen lager was dan aan de basis van het monster (figuur 2). De studie bevestigde ook dat een te hoge frequentie (in dit geval 12 000 vpm) resulteerde in een verlies van ingebrachte lucht, waarvan het gehalte onder de drempelwaarde voor een goede vorstbestendigheid daalde (figuur 3).



Figuur 2 - Evolutie van het luchtgehalte als functie van de voortgangssnelheid van de machine, de positie ten opzichte van de trilnaalden, de trillingsfrequentie en de diepte voor een van de beproefde zones (Tymkowicz & Steffels, 1999b)



Figuur 3 – Evolutie van het luchtgehalte als functie van de positie ten opzichte van de trilapparaten, de trillingsfrequentie en de diepte van de beproefde zone (Tymkowicz & Steffels, 1999b)

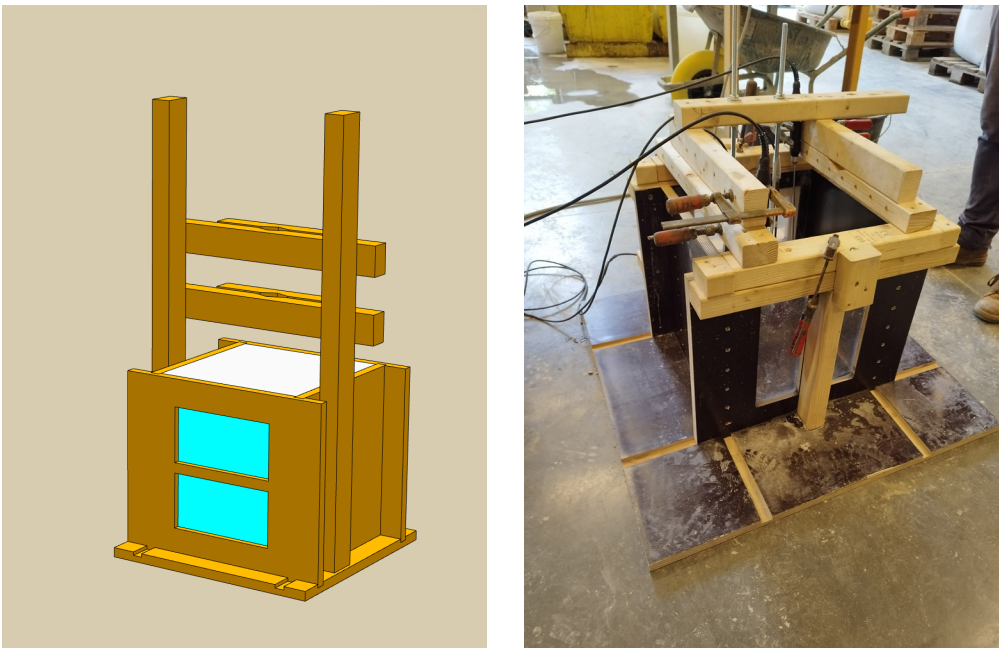
Een andere studie, uitgevoerd in Iowa (Cable et al., 2000), keek naar de invloed van de uitvoeringsparameters op de ingesloten luchtbellens. Op de proeflocatie werd het beton uitgevoerd met twee frequenties (5 000 of 8 000 vpm) en twee snelheden (1,22 of 1,88 m/min). Uit de proeven bleek dat het beste netwerk van luchtbellens (hoogste luchtgehalte en laagste afstandsfactor) werd verkregen bij een lage frequentie en snelheid, waarbij een hogere frequentie en/of snelheid soms leidde(n) tot een gebrek aan luchtbellens in de eerste centimeters (die het belangrijkst zijn om de vorst-dooiweerstand van de verharding te garanderen). Deze configuratie, die een lage frequentie en een lage uitvoeringssnelheid combineert, is echter niet de configuratie die door het uitvoerende team zou zijn gekozen om het esthetische aspect van het oppervlak te optimaliseren. De meest bevredigende oppervlakafwerking wordt eerder verkregen door een hoge frequentie en hoge snelheid te combineren. Deze studie suggereert dus dat het voor het netwerk van luchtbellens en de vorst-dooiweerstand waarschijnlijk niet optimaal is om zich alleen te baseren op het visuele aspect van een betonverharding om de uitvoeringsparameters te selecteren of de verdichtingskwaliteit te beoordelen.

In verschillende Amerikaanse staten hebben deze studies geleid tot aanbevelingen voor de frequenties en snelheden die op bouwplaatsen moeten worden gebruikt voor de uitvoering van wegconcrete. Zo wordt aanbevolen de frequentie te beperken tot 5 000 à 8 000 vpm en een gemiddelde voortgangssnelheid van 1 m/min te gebruiken.

In België bestaan er zoals in de meeste Europese landen momenteel geen aanbevelingen wat betreft de parameters voor de uitvoering van wegconcrete. Het lijkt er echter op dat de gebruikte frequenties over het algemeen hoger zijn dan de bovengenoemde aanbevelingen (> 9 000 vpm). Aangezien onze betonsamenstellingen nogal verschillen van die in de VS, werd besloten in het Monocrete-project verschillende parameters te testen, in het laboratorium, maar ook op proefvakken op grote schaal.

Laboratoriumproeven

Om het gedrag van beton tijdens het storten ervan beter te kunnen controleren, is aan de Universiteit van Luik een laboratoriumproevenprogramma opgezet. Zo werd een kist gecreëerd om de factoren die het gedrag bij trillen beïnvloeden te meten en te observeren. De afmetingen van de kist, 35*35*40 cm, werden gekozen om metingen te kunnen verrichten buiten de invloedzone van het triltoestel, die volgens de gegevens in de literatuur ongeveer 15 cm bedraagt. De kist was uitgerust met versnellingsmeters op 15 en 20 cm van de basis en een plexiglasvenster om de migratie van luchtbellen tijdens het trillen te observeren (figuur 4).



Figuur 4 – Experimenteel apparaat voor het meten van de trillingsvoortplanting in beton (ULiège)

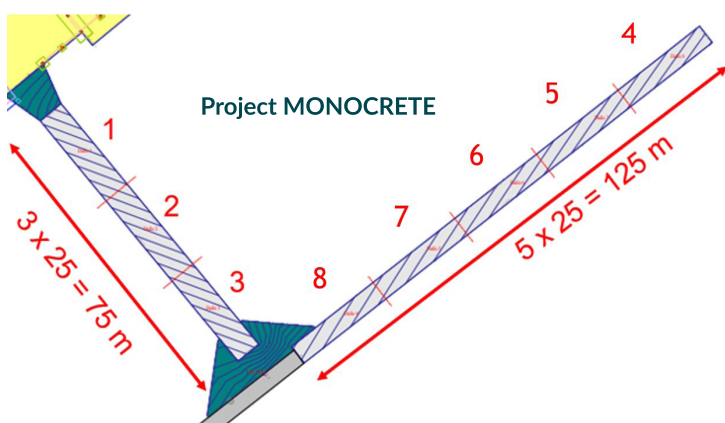
In de eerste reeks proeven werden verschillende betonvarianten getest, met veranderingen in het water- en luchtgehalte, waarbij de basissamenstelling overeenkwam met het weg beton op basis van natuurlijke materialen dat voor het eerste proefvak van het project was samengesteld. Er werden metingen verricht voor verschillende naaldposities en -bewegingen.

In dit stadium heeft onze experimentele campagne geen enkele kritische parameter op het gebied van het trillen van beton aan het licht kunnen brengen, maar ons wel in staat gesteld het experimentele proces te valideren door de waarnemingen van andere auteurs te bevestigen (Banfill et al., 2011; Ling & Taylor, 2021). Deze studie moet worden voortgezet door de gestarte gevoeligheidsstudie uit te diepen en bovendien de invloed van de parameters van de trilnaald (diameter en frequentie) te bestuderen.

Proefzone

Voorstelling van de proefvakken voor het project

De eerste proefzone voor het project Monocrete werd in november 2022 aangelegd bij Eloy in Bierset. Ze bestaat uit twee wegen, de ene 75 m lang en 6,5 m breed en de andere 125 m lang en 5 m breed, met een dikte van 38 cm. Voor de bouwplaats werd een klassieke wegbebonsamenstelling op basis van natuurlijke materialen (porfier, Rijzand, CEM III/A 42,5) in het laboratorium ontwikkeld en beproefd.



Figuur 5 – Eerste proefvak van het MONOCRETE-project (Bierset, november 2022)

Op het eerste deel van het proefvak, verdeeld in 6 (3 x 2) zones, werden verschillende trillingsparameters getest:

- de positie van de naalden (bijna horizontaal op de linkerhelft of schuiner op de rechterhelft);
- de trillingsfrequentie (150, 170 of 190 Hz, wat overeenkomt met 9 000, 10 200 en 11 400 vpm);
- de voortgangssnelheid van de machine (0,8 of 3,5 m/min).

Op het tweede deel van het proefvak werden de frequentie en de voortgangssnelheid van de machine constant gehouden, maar werden verschillende betonsamenstellingen beproefd:

- samenstelling met meer fijne bestanddelen (zand en cement);
- samenstelling met meer ingebrachte lucht;
- samenstelling met minder water en meer superplastificeerder;
- oorspronkelijke samenstelling.

Een helft van de sectie werd getrild met de trilnaalden wat dichter bij elkaar.

In het voorjaar van 2023 zal een tweede proefvak van bijna 500 m lang worden aangelegd, waarbij een alternatief cement en gerecyclede granulaten worden gebruikt om de ecologische voetafdruk van de verharding te verkleinen.

Eerste resultaten

De uitvoering van het eerste proefvak van 75 m, onder vrij extreme frequentie- en snelheidsomstandigheden, stelde ons in staat verschillende waarnemingen te doen.

Allereerst worden, wanneer een lage snelheid wordt gebruikt in combinatie met een hoge frequentie, onregelmatigheden in het oppervlak waargenomen, die waarschijnlijk wijzen op overmatig trillen (figuur 6).



Figuur 6 - Onregelmatigheden in het oppervlak, waargenomen bij gebruik van een lage snelheid in combinatie met een hoge trillingsfrequentie

Vervolgens zijn er wanneer een hoge snelheid wordt gecombineerd met een lage trillingsfrequentie, problemen met de oppervlakafwerking, die lijkt te "scheuren" (figuur 7).

Wanneer de snelheid hoog is, worden er enkele minuten – of enkele tientallen minuten – na het aanbrengen van de oppervlakafwerking (borstelen + nabehandelingmiddel), ook veel vaker kleine kraters op het oppervlak waargenomen, waarlangs water en luchtballen opstijgen. Dit laatste verschijnsel wijst waarschijnlijk op zweeten (de zwaartekracht heeft de neiging om de lucht en het water die nog in het beton aanwezig zijn, naar de oppervlakte te verdrijven. De lucht en het water zijn lichter dan de vaste deeltjes en vinden geprefereerde circulatiekanalen in minder geconsolideerde zones).

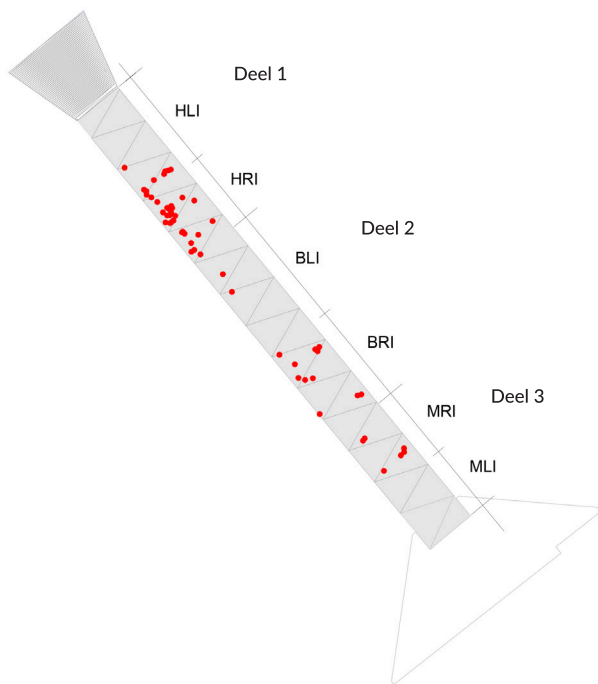
Het effect lijkt meer uitgesproken bij een hogere trillingsfrequentie, vooral op de helft van de sectie met bijna horizontale naalden (figuur 8 en Tabel 1).



Figuur 7 - "Scheuren" van het oppervlak, waargenomen wanneer een hoge snelheid wordt gecombineerd met een lage trillingsfrequentie



Figuur 8 - Krater door zweeten aan het oppervlak van de verharding, vooral wanneer een hoge snelheid wordt gebruikt



Figuur 9 – Positie van de kraters door zweten op het eerste deel van het proefvak

Wegvak	Benaming	Frequentie	Snelheid	Kraters
1a	HLI	Hoog	Traag	-
1b	HRI	Hoog	Snel	++
2a	BLI	Laag	Traag	-
2b	BRI	Laag	Snel	+
3a	MRI	Gemiddeld	Snel	+
3b	MLI	Gemiddeld	Traag	--

Tabel 1 – Frequentie van de kraters als functie van de uitvoeringsparameters

Aan het einde van de sectie stelden we de aanwezigheid van een grote hoeveelheid cementpasta op het oppervlak van het beton vast (figuur 10). Deze cementpasta komt uit een ophoping aan de voorkant van de machine. De impact van deze cementpasta aan het oppervlak van de verharding zal afhangen van de afstand waarover het laatste deel van het beton voor of na verharding wordt verwijderd. In het geval van het proefvak hebben wij vastgesteld dat het teveel aan cementpasta aan het oppervlak, zelfs na verwijdering van de laatste paar aangebrachte meters, meer dan 10 cm bedraagt aan het einde van de sectie en reeds waarneembaar is op een afstand van 2,5 m van het uiteinde, waar de cementpasta nog 1 cm dik is.

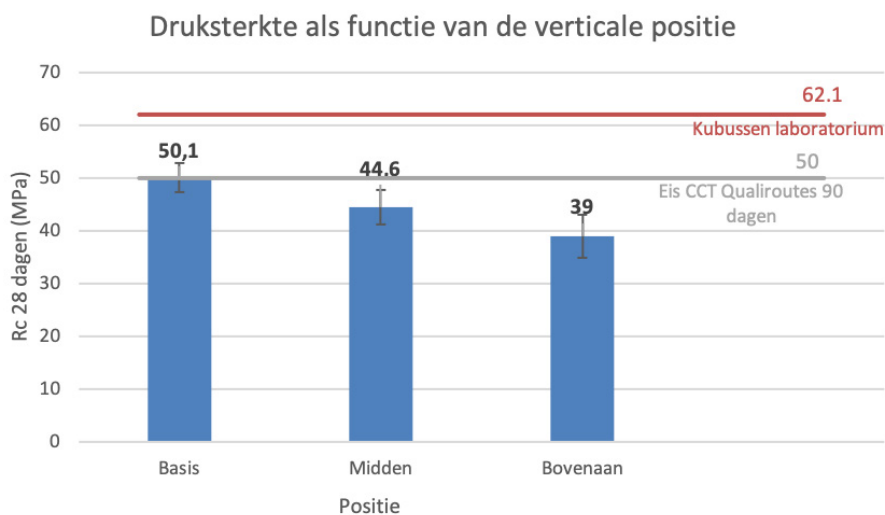
Dit teveel aan cementpasta, dat een hoge porositeit heeft, kan de waterabsorptie van het oppervlak verhogen en de druksterkte ervan verminderen. Daarom is het belangrijk ervoor te zorgen dat het uiteinde van de betonverharding aan het einde van de uitvoering over voldoende afstand wordt verwijderd.

Als er boorkernen uit de verharding moeten worden genomen, is het het beste deze te boren op een afstand van ten minste 2-3 m van het einde van de verharding. Boorkernen die te dicht bij het einde of a fortiori in de te verwijderen zone zijn genomen, kunnen namelijk resultaten opleveren die helemaal niet representatief zijn voor de volledige verharding.



Figuur 10 – Ophoping van cementpasta aan het oppervlak in het laatste gedeelte van de sectie

Proeven voor de druksterkte na 28 dagen werden uitgevoerd op uit het proefvak genomen boorkernen. Elke kern werd in drie proefstukken van 10 cm hoogte verzaagd. Figuur 11 maakt een vergelijking mogelijk van de drukweerstand gemeten aan de basis, in het midden en bovenaan de verharding.



Figuur 11 – De druksterkte na 28 dagen van de uit het proefvak genomen boorkernen is sterk afhankelijk van hun verticale positie en is veel lager dan die van op de bouwplaats vervaardigde en in het laboratorium bewaarde kubussen

Er is een duidelijke invloed van de positie van het proefstuk, dat bovenaan een 20 % lagere druksterkte heeft dan aan de basis van de verharding. Dit verschil kan waarschijnlijk worden verklaard door enige ontmenging van het materiaal tijdens de uitvoering. Een andere invloedsfactor zou de temperatuur van de verharding kunnen zijn, die in dit geval aan de oppervlakte lager is dan in de diepte. De zeer lage temperaturen die ter plaatse zijn waargenomen gedurende de 20 dagen tussen de uitvoering en de bemonstering van de boorkernen kunnen waarschijnlijk ook de vrij lage absolute waarde voor de druksterktes verklaren. Ook al wordt de door CCT Qualiroutes vereiste sterkte (individuele limiet op boorkern van 50 MPa voor een verharding type *Réseau I* met luchtbelvormer) waarschijnlijk na 90 dagen bereikt, toch kan worden vastgesteld dat de waarden veel lager zijn dan de gemiddelde druksterkte van 62 MPa na 28 dagen die is gemeten op betonkubussen aangemaakt tijdens de aanleg en die bij 20°C zijn bewaard.

Deze resultaten zullen moeten worden bevestigd door drukproeven na 90 dagen en door waterabsorptie- en vorst-dooiproeven. Een gedetailleerde analyse van het netwerk aan luchtbelletjes zal ook op proefstukken van verhard beton worden uitgevoerd.

Over deze nieuwe analyses en de resultaten van de volgende proefvakken zullen we in toekomstige Newsletters verder verslag uitbrengen. In het kader van het project is ook voorzien om aanbevelingen op te stellen in verband met het trillen van betonverhardingen met grote dikte.

Voorlopige conclusies

Eenlaagse betonverhardingen met grote dikte zijn een goede oplossing voor de huidige mobiliteitsuitdagingen. Toch is de uitvoering ervan soms delicaat en blijft de ecologische impact ervan (wat betreft CO₂-equivalent en natuurlijke hulpbronnen) aanzienlijk. Het Monocrete-project, dat loopt tot in maart 2024, heeft tot doel de uitvoeringsparameters te optimaliseren en tegelijkertijd de milieu-impact te verminderen door het gebruik van materialen uit de circulaire economie.

Aangezien de bouwsector bijna 40 % van de wereldwijd ontgonnen natuurlijke hulpbronnen verbruikt en vergelijkbare afvalpercentages produceert, draagt dit project bij tot een lager verbruik van hulpbronnen, de terugwinning van afvalmaterialen en minder goederenvervoer door het lokale gebruik van gerecyclede producten te bevorderen.

De projectpartners bedanken de Waalse competitiviteitspool GreenWin voor de financiële ondersteuning van het project.



Audrey Van der Wielen

E a.vanderwielen@brrc.be

T +32 2 766 03 87

Thomas Van Hoye (Eloy Béton)

E t.vanhoye@eloybeton.be

T +32 491 36 78 27

Julien Hubert (ULiège)

E julien.hubert@uliege.be

T +32 4 366 92 24

Literatuur

Banfill, P. F. G., Teixeira, M., & Craik, R. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011>

Bureau voor Normalisatie. (2012). *Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel. Deel 2: Hulpstoffen voor beton: Definities, eisen, conformiteit, markering en etikettering* (NBN EN 934-2+A1). https://www.nbn.be/shop/nl/norm/nbn-en-934-2-a1-2012_14404/

Cable, J. K., McDaniel, L., Schlorholtz, S., Redmond, D., & Rabe, K. (2000). *Evaluation of vibrator performance vs. concrete consolidation and air void system* (PCA R&D Serial No. 2398). Portland Concrete Association.

Belgische Betongroepering. (2018). *[Handboek] betontechnologie*. <https://www.gbb-bbg.be/nl/publicaties/handboek-betontechnologie/>

- Ling, Y., & Taylor, P. (2021). Effect of controlled vibration dynamics on concrete mixtures. *ACI Materials Journal*, 118(5), 161–172. <https://doi.org/10.14359/51732981>
- Powers, T. C. (1949). The air requirement of frost-resistant concrete. In *Proceedings of the Highway Research Board* (Vol. 29, pp. 184-211). <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrbproceedings/29/29-010.pdf>
- Stark, D. C. (1986). *Effect of vibration on the air-void system and freeze-thaw durability of concrete* (Research and development bulletin No. RD092.01T). Portland Concrete Association.
- Taylor, P. *Effects of vibration on concrete mixtures* (Moving Advancements into Practice [MAP Brief] No. Fall 2021). National Concrete Consortium (NCC). <https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2021/09/MAPbriefFall2021.pdf>
- Tymkowicz, S., & Steffels, R. (1999a). *Vibration study for consolidation of portland cement concrete: Final report for MLR-95-4*. Iowa Department of Transportation (Iowa DOT)