

ONTWERP VAN BETONCONSTRUCTIES BESTAND TEGEN VORST-DOOICYCLI EN DOOIZOUTEN

TECHNOLOGIE | NOVEMBER 2012



- BEVRIEZING VAN VERHARD BETON
- DOOIZOUTEN
- BEVRIEZING VAN VERS BETON





Vorst is een van de bijzonder agressieve elementen die betonconstructies en betonverhardingen kunnen aantasten, vooral wanneer de vorst-dooicycli elkaar snel opvolgen. Verhard beton is meestal bestand tegen de invloed van vorst. Toch gebeurt het dat strenge weersomstandigheden beton aantasten dat verkeerd is samengesteld, niet correct werd verwerkt en daarbij nagenoeg verzadigd is met water. De aantasting van het beton door vorst kan twee vormen aannemen: interne scheurvorming en afschilfering van het oppervlak in aanwezigheid van dooizouten. Deze twee vormen van aantasting zijn te wijten aan verschillende processen die niet noodzakelijkerwijs tegelijkertijd optreden. De resultaten van talrijke proeven in laboratoria en studies van het gedrag van beton in situ hebben geleid tot een beter begrip van de correlatie tussen de samenstellingsparameters van het beton en zijn vorstbestendigheid. Onder meer het belang van de ingebrachte lucht is aangetoond. Deze kennis heeft geleid tot de ontwikkeling van proefmethodes, aanbevelingen en normen voor de uitvoering van duurzame betonconstructies.

In de winter zijn de wegverhardingen van beton meestal bijna volledig met water verzadigd. De vorst-dooicycli in combinatie met het gebruik van dooizouten, zijn dan zeer agressief. Met een aangepaste samenstelling en correcte verwerking is de betonnen wegverharding echter bijzonder goed bestand tegen de winterse belastingen.

1. BEVRIEZING VAN VERHARD BETON EN INTERNE SCHEURVORMING

Zelfs na vele jaren onderzoek kan het gedrag van beton bij vorst nog niet volledig worden verklaard. De onderzoekers zijn het er algemeen over eens dat de uitzetting die gepaard gaat met de verandering van water in ijs (ongeveer 9 %) niet de hoofdoorzaak is van de beschadiging van het beton dat aan vorst is blootgesteld. Uit de gedeeltelijk ontwikkelde modellen, blijkt dat deze beschadigingen hoofdzakelijk worden veroorzaakt door de bewegingen van het interne water.

- Bij een thermische gradiënt (zoals ijsvorming) treedt een afvloeiing op van de vochtigheid van de warme naar de koude zones. Omdat ijs zich in de koudste zone bevindt, migreert de vochtigheid naar de ijskristallen, condenseert en verandert in ijs. De ontwikkelde krachten zijn zodanig groot dat ze plaatselijke vervormingen veroorzaken die scheurvorming van het beton tot gevolg kunnen hebben.

- Bij vorst verandert alleen zuiver water in ijs. Water is in feite een zoutoplossing en bij bevriezing treedt dus een scheiding op in ijs enerzijds en anderzijds in een nog vloeibare oplossing waarvan de zoutconcentratie gedurig stijgt. In een cementpastaporie bevriest het water bovendien bij een temperatuur die onder meer afhankelijk is van de grootte van de porie. Bijvoorbeeld, het water van de CSH-poriën kristalliseert tot ijs bij een temperatuur van -78°C : het water van de CSH-poriën is in feite dus niet bevriesbaar – zie *figuur 1*. Het water van de aangrenzende poriën, wanneer die kleiner zijn, is dus nog niet bevroren. Daardoor is zijn zoutconcentratie, die haar oorspronkelijk niveau heeft behouden, veel lager dan die van het restwater in de al gedeeltelijk bevroren grote porie. Om de zoutconcentraties te egaliseren, gaat dit volgens de osmosewetten een toestroom van water veroorzaken van de kleine naar de grotere poriën. Door dergelijke migraties ontstaat een osmotische druk. Wanneer deze druk groter is dan de trekweerstand van het beton, zal scheurvorming optreden.

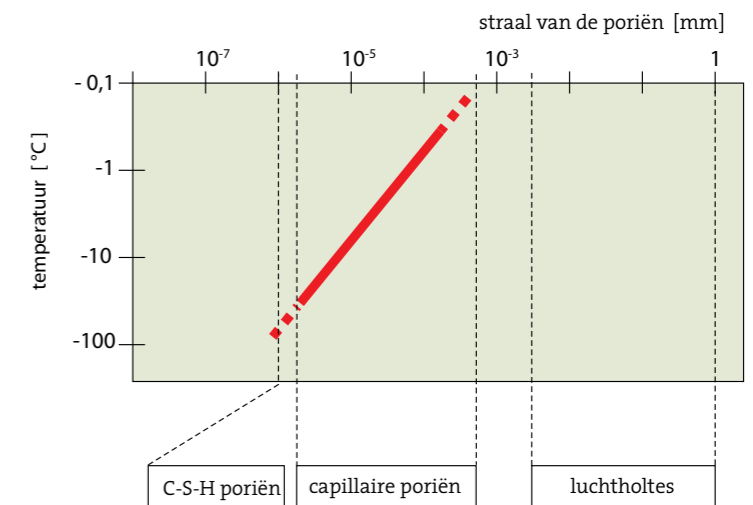


Fig.1 – Verlaging van de smeltemperatuur van het ijs met de verkleining van de straal van de poriën



Fig. 2 – Schematische voorstelling van de afstandsfactor

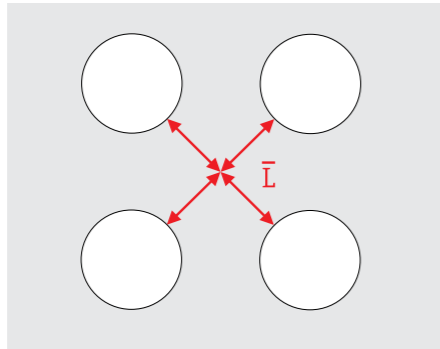
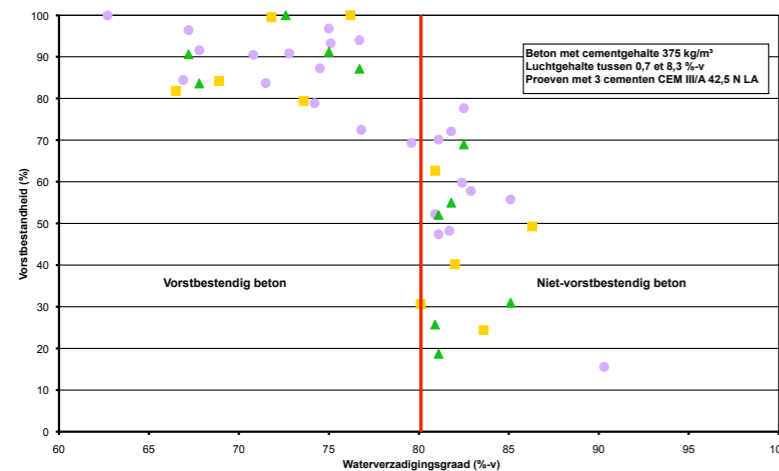


Fig. 3 – Invloed van de waterverzadigingsgraad van het beton op zijn vorstbestendigheid



TE ONTHOUDEN

Water in beton verandert niet volledig in ijs zodra de temperatuur onder 0°C daalt. Ijsvorming zet zich in de grotere capillairen in en verspreidt zich in de steeds kleinere poriën naarmate de temperatuur daalt. Een lagere W/C-factor verkleint de grootte van de poriën, wat de hoeveelheid ijs verlaagt die bij een bepaalde temperatuur wordt gevormd.

De mate van waterverzadiging van een cementpasta is bepalend voor zijn vorstbestendigheid. Een onverzadigde cementpasta bevat gasachtige ruimten die een buffervolume vormen waarin het ijs zich kan vormen zonder druk uit te oefenen op de wanden van de poriën.

De ingebrachte luchtbelletjes bieden ruimten (expansievaatjes) waar het water in vloeibare fase kan ophopen en kan bevriezen zonder schade te veroorzaken. Om de cementpasta te beschermen, moeten de luchtbelletjes voldoende dicht bij elkaar liggen zodat de interne spanningen veroorzaakt door de vorst kleiner zijn dan de uiteindelijke sterkte van de pasta. Zo is niet het volume ingebrachte lucht maar wel de afstandsfactor de belangrijkste parameter die de efficiëntie bepaalt van de bescherming geboden door het netwerk van ingebrachte luchtbelletjes: de afstandsfactor moet kleiner zijn dan een kritische waarde die afhankelijk is van de samenstelling van het beton en van de strengheid van de blootstelling aan vorst-dooicycli.

• Ten gevolge van dergelijke druk, ontstaan volgens de wetten van thermodynamica en osmose, wordt het water door het ijs aange trokken maar tegelijkertijd stoot het ijs het toevoeiende water af. Wanneer water in een holte bevriest, vergroot zijn volume met 9% zodanig dat het overtollige water wordt uitgedreven. De koelsnelheid bepaalt de hoeveelheid water die door het ijs wordt uitgedreven en moet circuleren. Zo ontstaat een waterdruk die afhankelijk is van de stromingsweerstand. Deze stromingsweerstand, op zijn beurt, is onder meer afhankelijk van de afstand tussen de porie die bevriest en een holte die het uitgedreven water kan opvangen. Vandaar het begrip afstandsfactor van de luchtballen uitgedrukt in \bar{L} en gedefinieerd door de Amerikaanse ASTM C 457 / C 457M-norm als de gemiddelde halve afstand tussen de wanden van twee aangrenzende luchtbelletjes van een regelmatig geacht netwerk (figuur 2). Moet het water een lange afstand afleggen, dan kan de waterdruk de trekweerstand van het beton overschrijden met een reëel risico van scheurvorming.

TE NEMEN VOORZORGSMAATREGELEN

In een betonsamenstelling heeft de W/C-factor de grootste invloed op de weerstand van het beton tegen interne scheurvorming. Enerzijds leidt een lagere W/C-factor tot een vermindering van de hoeveelheid bevroersbaar water ten gevolge van de vermindering van het totaal poreus volume en de verkleining van de poriën. Anderzijds leidt een lagere W/C-factor tot een grotere mechanische sterkte of een beton dat beter weerstand biedt tegen de interne spanningen die bij vorst optreden. Door hun inwerking op de rijpheid van het beton en op de porositeitsstructuur, kunnen minerale toevoegsels (slak, vliegas, microsilica) de weerstand van het beton tegen interne scheurvorming beïnvloeden. De invloed van minerale toevoegsels op de vorstbestendigheid van het beton is afhankelijk van het soort toevoegsel en van het cementvervangingspercentage. Uit talrijke studies blijkt dat microsilica, vliegas en slakken de weerstand van het beton tegen interne scheurvorming meestal niet opmerkelijk verbeteren. Toch kunnen de talrijke voordelen van de minerale toevoegsels worden benut door een minimaal cementvervangingspercentage voor te schrijven en door een voldoende rijpheid van het beton te verzekeren vóór de eerste blootstelling aan vorst.

De te nemen voorzorgsmaatregelen kunnen als volgt worden samengevat, afhankelijk van de blootstelling van de aan vorst onderhevige betonconstructies:

- in ieder geval:
 - een goed beton maken, d.w.z. een beton met een hoge treksterkte en een beperkte W/C-factor ($\leq 0,55$ en zelfs $0,50$), met inachtneming van de samenstellingscriteria, onder meer wat de continue korrelverdeling betreft (stabiliteit van het verse mengsel) en het gehalte aan fijne deeltjes (slorpen veel water op);
 - de juiste granulaten gebruiken. Vorstgevoelige granulaten dicht tegen het oppervlak absorberen het water en barsten onder invloed van vorst, waardoor de omhullende mortel wordt vernietigd en zich kratertjes in het betonoppervlak gaan vormen waarvan de grootte proportioneel is aan die van de granulaten;
 - het beton storten volgens de regels van goed vakmanschap, onder meer wat de stortingswijze, de dikte van de lagen en de verdichting betreft;

- het beton zo spoedig mogelijk na de verwerking en zelfs na de ontkisting tegen uitdroging beschermen.

• voor beton met een klein risico op waterverzadiging en dat geleidelijk aan normale vorst wordt blootgesteld (dus niet in strenge blootstellingsomstandigheden), zijn geen bijzondere maatregelen vereist. Omdat het beton niet verzadigd is met water, is voldoende met lucht gevulde expansieruimte beschikbaar voor de afvloeiing van het water dat onder druk wordt gezet. Uit figuur 3 blijkt duidelijk dat een beperkte verzadigingsgraad van het beton (lager dan 80%) ook vorstschade beperkt.

• voor beton met een groot risico op waterverzadiging en/of dat aan strenge vorst wordt blootgesteld (strenge blootstellingsomstandigheden zoals wegen en dunne betonwanden die aan beide kanten zijn blootgesteld, enz.):

- letten op de kwaliteit van het beton (verlaging van de W/C-factor, $\leq 0,50$ en zelfs $0,45$) om de grootte van de capillaire poriën te verkleinen;
- ter aanvulling kan de vorstbestendigheid van dit beton nog worden verbeterd door een luchtbelvormer toe te voegen voor meer expansieruimte. De meeste onderzoekers zijn het erover eens dat voor een goede vorstbescherming een luchtgehalte van 9% van het mortelvolume nodig is. Aangezien de hoeveelheid mortel in het beton vermindert naarmate de maximumdiameter van de granulaten toeneemt, zal de nodige hoeveelheid lucht voor een beton met een D_{\max} van 32 mm duidelijk minder bedragen dan voor een beton met een D_{\max} van 6 mm. Bovendien moeten de luchtbelletjes klein zijn, bij voorkeur 100 tot 500 μm , en met een hoge soortelijke oppervlakte van 25 tot 50 mm^2/mm^3 .



Wanneer een poreus en met water verzadigd granulaat bevriest, treedt intern een waterdruk op waardoor het kan barsten. De bevriezing van granulaten in beton komt sterker tot uiting aan het oppervlak: plaatselijk treden barsten op en vormen zich kleine kratertjes (popouts).

Doorgaans gelden de volgende aanbevelingen voor het luchtgehalte van vers beton in verhouding tot de D_{max} van het granulaat:

- minimaal 4 %-v lucht voor een D_{max} begrepen tussen 20 en 31,5 mm;
- minimaal 5 %-v lucht voor een D_{max} begrepen tussen 11,2 en 16 mm;
- minimaal 6 %-v lucht voor een D_{max} begrepen tussen 5,6 en 10 mm.

Wat de afstandsfactor betreft, zal bij een kleine afstand de druk van het water veroorzaakt door het ijs beperkt blijven, en omgekeerd zal deze druk bij een grotere afstand toenemen. Een afstandsfactor \bar{L} kleiner dan 200 μm , wordt doorgaans als voldoende beschouwd voor een goede vorstbestendigheid, maar voor beton met een lage W/C-factor ($\leq 0,40$) kan een grotere afstandsfactor worden toegepast.

- waterophoping vermijden door profielen te ontwerpen die de afwatering versnellen. De buitenkanten van effen en horizontale oppervlakken bevorderen de ophoping van water en de verzadiging van het beton. Men zal dus altijd trachten om het beton met een helling uit te voeren of te voorzien in een systeem van watergroeven om de terugstroming van water naar de betonconstructie te beletten.



Bouwdelen waarvan het beton het meest met water is verzadigd, vertonen het snelst schade: het betreft hetzij bouwdelen die functioneel in aanraking komen met het water, hetzij bouwdelen die vanwege hun vorm het regenwater vasthouden (horizontale vlakken)



Op basis van de normen NBN EN 206-1:2001 en NBN B 15-001:2012, kunnen de duurzaamheidseisen worden voorgeschreven van ongewapend, gewapend en voorgespannen beton blootgesteld aan vorst (omgevingsklassen EE2 en EE3 - aanwezigheid van vorst zonder dooizouten). Tabel 1 hierna geeft een overzicht van de normeisen verbonden aan deze omgevingsklassen EE2 en EE3. Let wel dat in sommige gevallen een WAI-klasse wordt voorgeschreven (water absorption by immersion – waterabsorptie door onderdompeling). Deze aanvullende eis wordt meestal beschouwd als een duurzaamheidsindicator. Een lage waterabsorptie is synoniem van een compact beton van een kwaliteit bestand tegen de omgeving aan welke het is blootgesteld. Bijvoorbeeld, een gewapend

beton blootgesteld aan regen en vorst alleen (zonder dooizouten), zal in de omgevingsklasse EE3 worden voorgeschreven. Behalve een minimale sterkteklasse van C30/37, zal dit beton een W/C-factor $\leq 0,50$ en een cementgehalte van $\geq 320 \text{ kg/m}^3$ moeten hebben. De granulaten zijn vorstbestendig en het gebruik van minerale toevoegsels zal gereguleerd zijn. Mocht de voorschrijver dit verzoeken, zal bovendien een WAI-klasse (0,50) moeten worden verzekerd. Zo zal de wateropsorping door onderdompeling, gemeten op een proefstuk overeenkomstig de voorschriften van de norm NBN B 15-215, minder bedragen dan gemiddeld 6,0 % (gemeten op drie proefstukken) en individueel 6,5 % overeenkomstig bijlage O van NBN B 15-001.

Omgevingsklasse	EE2 (Vorst, geen contact met regen)		EE3 (Vorst, contact met regen)	
	Ongewapend beton (OB)	Gewapend (GB) of voorgespannen (VB) beton	Ongewapend beton (OB)	Gewapend (GB) of voorgespannen (VB) beton
Toepassingsgebied				
Betontype	T(0,55)	T(0,55)	T(0,55)	T(0,50)
Water/cementfactor	$\leq 0,55$	$\leq 0,55$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$
Cementgehalte (kg/m^3)	≥ 300	≥ 300	≥ 300	≥ 320
Sterkteklasse	$\geq \text{C}25/30$	$\geq \text{C}25/30$	$\geq \text{C}25/30$	$\geq \text{C}30/37$
Luchtgehalte van het vers beton (%)	-	-	-	-
Afstandsfactor \bar{L} van de luchtbelletjes	-	-	-	-
Granulaattype ⁽¹⁾	Vorstbestendig	Vorstbestendig	Vorstbestendig	Vorstbestendig
Wateropsorplingsklasse door onderdompeling ⁽²⁾	-	-	-	WAI (0,50)

(1) De vorstbestendigheid van de granulaten met een nominale afmeting $D \leq 4 \text{ mm}$ wordt toereikend geacht. De vorstbestendigheid van de granulaten met een nominale afmeting $D > 4 \text{ mm}$ (met uitzondering van de lichte granulaten) wordt toereikend geacht indien de waterabsorptie $\leq 1,0 \%$ (gemeten volgens de NBN EN 1097-6) of indien de Los Angeles-coëfficiënt ≤ 25 (gemeten volgens de NBN EN 1097-2) of indien het granulaat overeenkomstig de norm NBN EN 12620 tot klasse F_4 of klasse MS_{35} behoort na proeven uitgevoerd volgens respectievelijk de NBN EN 1367-1 en NBN EN 1367-2

(2) Eis van toepassing indien uitdrukkelijk voorgeschreven

Tabel 1 – Toepasselijke grenswaarden voor de samenstelling en kenmerken van beton blootgesteld aan vorst-dooicycli (zonder dooizouten) afhankelijk van de omgevingsklasse volgens de norm NBN B 15-001:2012. Let wel dat de PTV 100 en 200 betreffende prefab producten van beton in sommige gevallen iets andere specificaties kunnen vermelden.

De weerstand van een beton tegen vorst-dooicycli zonder dooizouten kan in een laboratorium worden beproefd door de resonantiefrequentie en de ultrasone pulssnelheid te meten van prisma's blootgesteld aan vorst-dooicycli. Deze cycli verlopen in een klimaatkamer, volgens het Technisch Verslag CEN/TR 15177 (na bewaring van de proefstukken gedurende 28 dagen ondergedompeld in water op $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, vorst in de lucht tot $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$ met een voorgeschreven koelsnelheid en dooi onder water op $(13 \pm 8)^\circ\text{C}$). De CEN/TR 15177 beoordeelt de vorstgevoeligheid van een beton door de metingen na n cycli (7, 14, 28, 42 en 56 cycli) te vergelijken met de aanvankelijke metingen vóór de vorst-dooicycli en past hiervoor de volgende formule toe:

$$\left(\frac{\text{meting } n}{\text{meting } 0} \right)^2 \times 100 [\%]$$

Het kan nuttig zijn deze proeven aan te vullen met metingen van de buigsterkte. De buigsterkte van de prismatische proefstukken wordt vergeleken met die van getuigeproefstukken die geen vorst-dooicycli ondergingen. Om te vermijden dat de mechanische weerstand nog verandert tijdens de proeven, worden deze best pas aangevat na 91 dagen bewaring bij 20°C en relatieve vochtigheid groter dan 95 %.

In trilling brengen bij buiging van een prismatisch proefstuk en meting van de resonantiefrequentie bij buiging.



Meting van de voortplantingssnelheid van ultrasone golven op een prismatisch proefstuk.

Tot op heden bestaan in België geen specificaties met betrekking tot die methodes. Op grond van de in verschillende labo's opgedane ervaring kunnen evenwel volgende criteria weerhouden worden :

- bij meting van de resonantiefrequentie en de voortplantingssnelheid van ultrasone golven wordt het beton als vorstbestendig beschouwd onder de omstandigheden van de proef, indien $(SS_{56}/SS_0)^2 \times 100$ of $(FF_{56}/FF_0)^2 \times 100$ gelijk is aan of groter dan 80 %. SS_{56} en SS_0 zijn de geluidssnelheden (*Sound Speed*) in m/s, respectievelijk na 56 cycli en vóór het begin van de cycli (aanvangsmeetwaarde), en FF_{56} en FF_0 resonantiefrequenties (*Fundamental Frequency*) in Hz, eveneens na 56 vorst-dooicycli en vóór het begin van de cycli (aanvangsmeetwaarde);
- bij meting van de buigtreksterkte wordt het beton als vorstbestendig beschouwd onder de omstandigheden van de proef, indien $(Fcf_{56}/Fcf_0)^2 \times 100$ gelijk is aan of groter dan 60 %. Fcf_{56} is de buigtreksterkte (*Flexural Strength*) van de proefstukken na 56 vorst-dooicycli en Fcf_0 de buigtreksterkte van de proefstukken die geen vorst-dooicycli ondergingen (bewaring bij 20°C en relatieve vochtigheid groter dan 95 %). De bepaling van de buigtreksterkte gebeurt volgens de richtlijnen van de norm NBN EN 12390-5.



Luchtbelvormers zijn hulpstoffen die aan de betonspecie worden toegevoegd en een groot aantal microscopische luchtbelletjes (met een diameter van 10 à 100 μm) doen ontstaan en stabiliseren, dewelke na het mengen gelijkmatig in het beton zijn verdeeld en na de verharding aanwezig blijven.

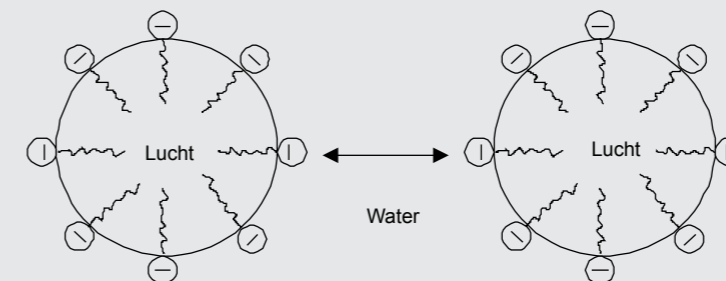
De toevoeging van ingesloten lucht verbetert de weerstand van het beton tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten aanzienlijk. De luchtbelletjes, 10 tot 1 000 keer groter dan de capillairen (diameter 10^{-5} tot 10^{-3} mm), doorkruisen immers het netwerk van de capillairen en vervullen zo de functie van expansievaatjes voor het water dat door het ijs wordt voortgestuwd of voor het ijs zelf dat zich in het verharde beton vormt. Zij beperken aldus de waterdruk, maar de doelmatigheid van de luchtbelvormers ter preventie van vorstschade is afhankelijk van de kenmerken van de ingebrachte lucht: het percentage ingebrachte lucht, de soortelijke oppervlakte van de microscopische luchtbelletjes en de afstandsfactor.

Luchtbelvormers zijn organische moleculen met een zeer variabele chemische samenstelling. Hun moleculen zijn lange ketens met

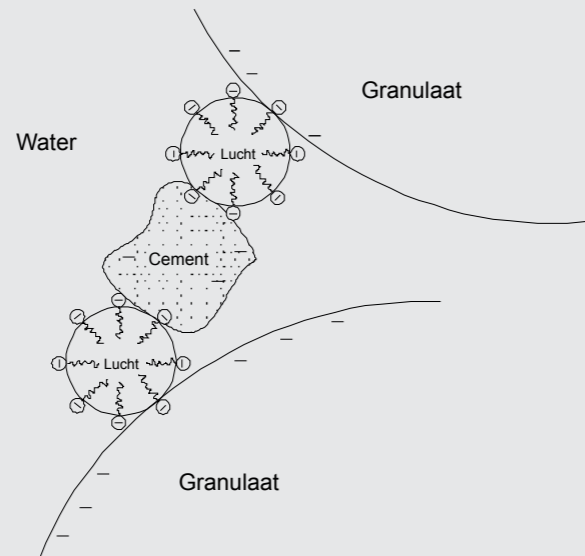
een hydrofobe staart die het water afstoot en een ioniseerbare hydrofiele kop die ervoor zorgt dat de moleculen in contact blijven met het water. Aan het raakvlak tussen water en lucht oriënteren de moleculen in oplossing zich met het ioniseerbare eind in het water en het organische (hydrofobe) eind in de lucht. Dit vermindert de oppervlaktespanning van het water en stabiliseert de luchtbelletjes wanneer de oplossing wordt geschud. De aldus gestabiliseerde luchtbelletjes worden door het apolaire (hydrofobe) eind van de luchtbelvormers in het verse beton vastgehouden en door het polaire eind aan de cementkorrels gehecht. Er zijn twee belangrijke redenen waarom de luchtbelletjes gestabiliseerd zijn:

- doordat de luchtbelletjes door negatief geladen moleculen zijn omringd, ontstaat een elektrostatische afstoting tussen de luchtbelletjes die het samenvloeien ervan verhindert en hun gelijkmatige spreiding bevordert;
- doordat de oppervlaktespanning vermindert, verminderen ook de krachten die de luchtbelletjes kunnen breken en grotere luchtbelletjes vormen.

Oriëntering van de tensio-actieve moleculen aan het contactoppervlak lucht-water en elektrostatische afstoting van de luchtbelletjes.



Vorming van stabiele luchtbelletjes



De dosering en de aard van de gebruikte hulpstof hebben een invloed op het volume ingesloten lucht, op de grootte en de verdeling van de luchtbelletjes en op hun stabiliteit. Als algemene regel geldt: hoe hoger de dosering luchtbelvormer, hoe groter de hoeveelheid ingebrachte lucht. Er bestaat echter een maximale dosering luchtbelvormer vanaf welke het ingebrachte luchtgehalte niet meer stijgt. De gelijktijdige toevoeging van een andere soort hulpstof, wijzigt het luchtgehalte dat zou worden verkregen wanneer uitsluitend een luchtbelvormer wordt aangewend. Wanneer gelijktijdig met een luchtbelvormer een plastificeerder wordt gebruikt, is de luchtbelvormer meestal doelmatiger en moet dus een lagere dosering worden toegepast. Het luchtgehalte varieert afhankelijk van het type en het gehalte aan cement. Om hetzelfde luchtgehalte te verkrijgen, moet meer hulpstof worden gebruikt naarmate:

- een hogere cementdosering wordt gebruikt;
- het cement minder sulfaten en minder alkaliën bevat;
- het cement meer vliegashoudend is;
- het cement fijner is (hoe groter de cementkorrels hoe meer lucht wordt gevormd).

Luchtbelvormers zijn gevoelig voor onverbrande koolstof. Vliegashoudend met een hoog koolstofgehalte beperkt bijgevolg de efficiëntie van de luchtbelvormer doordat de koolstof de luchtbelvormer absorbeert.

De W/C-factor beïnvloedt niet alleen het luchtgehalte maar ook de verdeling van de luchtbelletjes. Hoe hoger de W/C-factor, hoe groter de diameter van de luchtbelletjes en dus hoe groter de afstandsfactor bij een constant volume ingebrachte lucht. Hoe hoger het watergehalte, hoe beter de verwerkbaarheid en hoe hoger het gehalte ingebrachte lucht. Vanaf een bepaald verwerkbaarheidsniveau (slump > 150 mm), heeft de betere verwerkbaarheid echter een groter verlies van het luchtgehalte tijdens het vervoer en de verwerking tot gevolg.

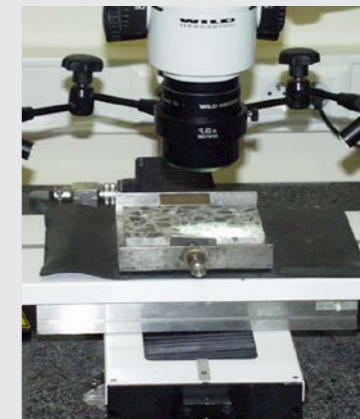
Voor een goede verdeling van de luchtbelletjes is een minimale mengtijd nodig. Talrijke parameters kunnen het luchtgehalte beïnvloeden: mengwijze, energie, mengtijd alsook het type van menger en het volume bereid beton. Zo stellen we vast dat een maximaal luchtgehalte met een bepaalde mengtijd overeenstemt; daarna daalt het luchtgehalte weer. Bovendien is het zo dat de 'korrelverdeling' van de luchtbelletjes tijdens het mengen verandert, waarbij de grote luchtbelletjes gewoonlijk verdwijnen.

Trillen van het beton verwijdert alleen de grote luchtbelletjes (die van weinig nut zijn). Hoe hoger de temperatuur van het verse beton, hoe lager het gehalte ingesloten lucht en omgekeerd. Dat is ook het geval wanneer het watergehalte werd gewijzigd om een constante verwerkbaarheid van het beton te behouden. Het verlies van lucht met de stijging van de temperatuur is des te groter bij een hoge verwerkbaarheid van het beton. De toevoeging van een luchtbelvormer wijzigt de kenmerken van het beton, zowel in verse als in verharde toestand. Bij gelijk watergehalte, verhoogt de toevoeging van een luchtbelvormer aan het beton de verwerkbaarheid ervan. Door hun goede vormcoëfficiënt, hun vervormingsvermogen, hun elasticiteit en glijvermogen zonder wrijving, werken de luchtbelletjes namelijk als een

smeermiddel. De andere invloeden op het verse beton, zijn een grotere homogeniteit en cohesie van het beton (minder ontmenging en bleeding). Met de toename van het luchtgehalte vermindert de mechanische sterkte. De druksterkte kan per percent ingebrachte lucht met 3 tot 5 N/mm² dalen. Merk ook op dat de wateropslorping door onderdompeling, of beter uitgedrukt, het resultaat van een wateropslorplingsproef door onderdompeling, hoger ligt in aanwezigheid van een netwerk van luchtbelletjes. De wateropslorping door onderdompeling wordt namelijk uitgedrukt in % van de droge betonmassa. Welnu, door de aanwezigheid van de luchtbelletjes is deze massa kleiner. Het resultaat van de wateropslorping door onderdompeling kan per percent ingebrachte lucht met 0,2% stijgen.



Het is essentieel het gehalte ingebrachte lucht van het beton te meten. Op vers beton, kan deze meting worden uitgevoerd door de drukmethode volgens de norm NBN EN 12350-7.



Op verhard beton kan het luchtgehalte worden gemeten door de observatie van gepolijste betonsneden met de microscoop. Behalve het luchtvolume, kunnen de gemiddelde soortelijke oppervlakte van de luchtbelletjes en de afstandsfactor worden bepaald (norm NBN EN 480-11).

2. DE INWERKING VAN DOOIZOUTEN

Het gebruik van dooizouten in de winter verergert de beschadiging van het beton. Deze schade, die zich hoofdzakelijk uit in de afschilfering van het beton, is om diverse redenen frequent geworden:

- het toenemend gebruik van dergelijke producten bij preventieve en curatieve winterbehandelingen. Bovendien worden dooizouten soms gestrooid op beton dat nog te jong is, t.t.z. na minder dan 6 à 8 weken;
- de ongeschiktheid van sommige betontypes voor dergelijke belastingen. Het beton wordt niet altijd samengesteld en verwerkt volgens de regels van goed vakmanschap. Bovendien gebeurt het dat de dooizouten op betonconstructies worden gestrooid die niet hiertoe werden ontworpen (industriële verhardingen, benzinstations, parkings, brugpijlers, enz.). Vergeet bovendien niet dat de banden van de voertuigen het zout meevoeren op betonconstructies die evenmin hiertoe werden ontworpen (toegang tot garages, enz.);
- de smeltende zouten zijn in direct contact met de buitenste lagen van het beton. De kenmerken van de betonhuid zijn verbonden aan de verwerking (vooral de afwerking) en aan de nabehandeling van het beton. De kenmerken van de betonhuid worden beïnvloed door de bekistingsmethode, de ontmenging, de verdamping, overmatige scheurvorming, enz. Dit resulteert in soms aanzienlijke kwaliteitsverschillen tussen het buitenvlak en het inwendige van het beton. De betonhuid is meestal poreuzer dan de kern van het beton en dus toegankelijker voor het water. Noteer overigens dat dit bij prefab producten niet noodzakelijk het geval is, maar afhangt van de oriëntatie van de bekiste oppervlakken tijdens de fabricage.

De inwerking van dooizouten is toe te schrijven aan diverse factoren die als volgt kunnen worden samengevat:

- het smelten van het ijs door de zouten is een endotherme reactie. De nodige warmte wordt onttrokken aan het materiaal in contact met het zout, d.w.z. aan de oppervlaktelaag van het beton die dus plots afkoelt. Zo ontstaat een thermische gradiënt die interne spanningen veroorzaakt waardoor scheurvorming in het beton kan optreden;
- door het smeltend ijs blijft de waterverzadigingsgraad aan het oppervlak van het beton hoog;
- na de dooi heeft het water een zeer hoge concentratie aan chloriden, die door capillaire absorptie en diffusie in het beton dringen. De aanwezigheid van zout verlaagt het vriespunt en wel des te meer naarmate de concentratie verhoogt. Uit metingen op constructies die regelmatig aan zout zijn blootgesteld, blijkt dat de concentratie-profielen van de chloriden meestal functie zijn van de dikte, zoals weergegeven in *figuur 4*. De combinatie vriespunt/temperatuur van het beton kan zodanig zijn dat twee bevroren lagen gescheiden zijn door een laag die niet bevroren is. Indien door een verdere daling van de temperatuur het water van deze laag eveneens befrist, zal het bij gebrek aan expansieruimte de bovenste laag opduwen waardoor deze plaatselijk "afschilfert";
- doordat de zoutconcentratie sterk varieert, ontstaat een osmotische druk, wat eveneens gevolgen heeft op het beton.

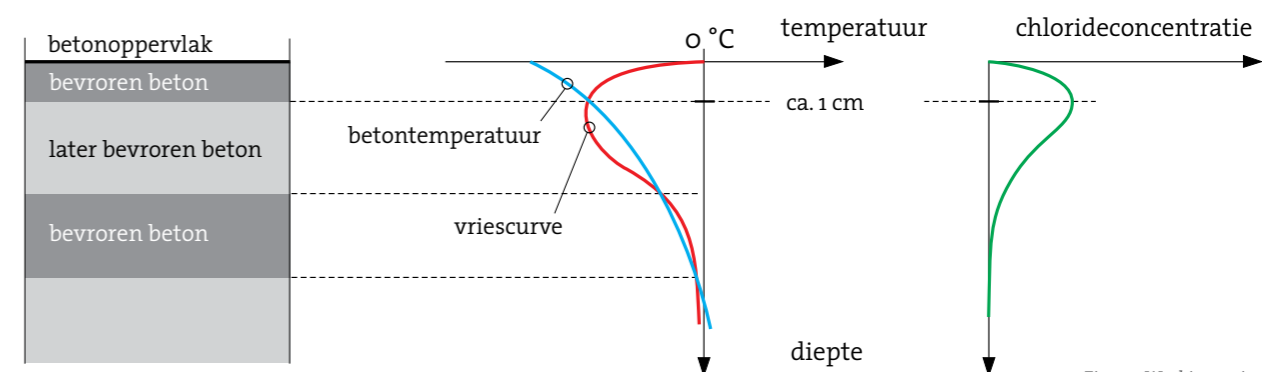


Fig. 4 – Werkingsprincipe van vorst in aanwezigheid van dooizouten (afschilfering)



Afschilfering aan het oppervlak van een gekleurd beton blootgesteld aan dooizouten.



Fietspad aangelegd in 2001 en in uitstekende staat, maar met een aangetast gedeelte ter hoogte van een inspectieput omwille van een minderwaardige betonsamenstelling.

TE ONTHOUDEN

De omvang van de schade die voortvloeit uit de gecombineerde werking van vorst-dooicycli en dooizouten is hoofdzakelijk te wijten aan de grotere vorstgevoeligheid van het betonoppervlak (hoge porositeit) en aan de winterse weersomstandigheden die de gebreken van het betonoppervlak erger maken: het oppervlak blijft met water verzadigd, het is onderhevig aan thermische schokken en het wordt onderworpen aan het gradiënten in zoutconcentraties (osmose, laagsgewijze bevroering).

Rekening houdend met de risico's, zijn deze maatregelen een absolute vereiste.

Het beton moet van zeer goede kwaliteit zijn. Zo moet het beton een lage porositeit en een grote treksterkte bieden. Deze kwaliteit wordt traditioneel verkregen door een zeer lage W/C-factor ($\leq 0,50$ en zelfs $0,45$), d.w.z. een beton met een laag watergehalte ($\leq 180\text{ l/m}^3$) en met een minimaal cementgehalte van $360 - 375\text{ kg/m}^3$. Indien andere fijne deeltjes worden toegevoegd (bijvoorbeeld pigmenten in gekleurd beton), mag het watergehalte absoluut niet worden verhoogd. De W/C-factor zal zelfs worden verlaagd indien het cementgehalte wordt verhoogd.

Het gebruik van een luchtbelvormer is absoluut noodzakelijk, meer nog dan bij inwendige scheurvorming, met uitzondering misschien van beton met een laag zandgehalte (maximaal 500 kg/m^3 zand $0/2$) en met een W/C-factor $\leq 0,45$ voor een cementgehalte van minimaal 400 kg/m^3 . Ervaring leert dat boven een bepaald luchtgehalte in functie van de D_{max} van het beton en met een afstandsfactor L van de luchtbelletjes kleiner dan $200\text{ }\mu\text{m}$, afschilfering ten gevolge van vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten, beperkt blijft (figuur 5). De W/C-factor van het beton moet echter vrij laag zijn ($\leq 0,50$ en zelfs $0,45$), want voor een beton met een W/C-factor van $0,55$ of meer, zal een aangepast luchtgehalte gecombineerd met een lage afstandsfactor nooit voldoende weerstand kunnen bieden tegen afschilfering.

Het gebruik van een inert skelet dat het verse betonmengsel een zeer goede stabiliteit verleent, is uiterst belangrijk. Zo zal voorkeur worden gegeven aan goed betonzand dat weinig aanmaakwater vereist en in zo laag mogelijke verhoudingen in functie van de D_{max} van het granulaat, eerder dan aan fijn of hoekig zand dat veel aanmaakwater vereist. De instabiliteit van sommige mengsels leidt ertoe dat aanzienlijke hoeveelheden

mortel en cementmelk naar het oppervlak stijgen, dat juist aan de agressie inwerking van dooizouten is blootgesteld. Factoren die een bijzondere aandacht vereisen, zijn een geschikte consistentie, een continue korrelverdeling en een aangepaste verdichting.

Zoals bij interne scheurvorming kunnen minerale toevoegsels (microsilica, vliegas en slak) door hun inwerking op de rijpheid en op de porositeitsstructuur van het beton, de weerstand van het beton tegen afschilfering wijzigen. De invloed van minerale toevoegsels is afhankelijk van het type en van het cementvervangingspercentage. Beton van een normale sterkte, met minder dan 10% microsilica ter vervanging van cement, is zeer goed bestand tegen afschilfering wanneer het beschermd is door een efficiënt netwerk van ingebrachte luchtbelletjes of wanneer het beton een lage waterbindmiddelfactor heeft ($\leq 0,35$ of zelfs $0,30$). Beton met vliegas is minder bestand tegen afschilfering, vooral wanneer het vervangingspercentage hoger is dan 25%. De redenen waarom beton met vliegas minder goed bestand is tegen afschilfering, zijn nog niet volledig duidelijk. Sommige onderzoekers hebben echter aangetoond dat beton met vliegas vaak een hoge oppervlaktoporositeit heeft ten gevolge van de grotere bleeding van dergelijk beton.

Beton met slak lijkt voldoende bestand te zijn tegen afschilfering wanneer het beschermd wordt met een efficiënt netwerk van ingebrachte luchtbelletjes en voldoende lang gerijpt is vóór de eerste blootstelling aan dooizouten.

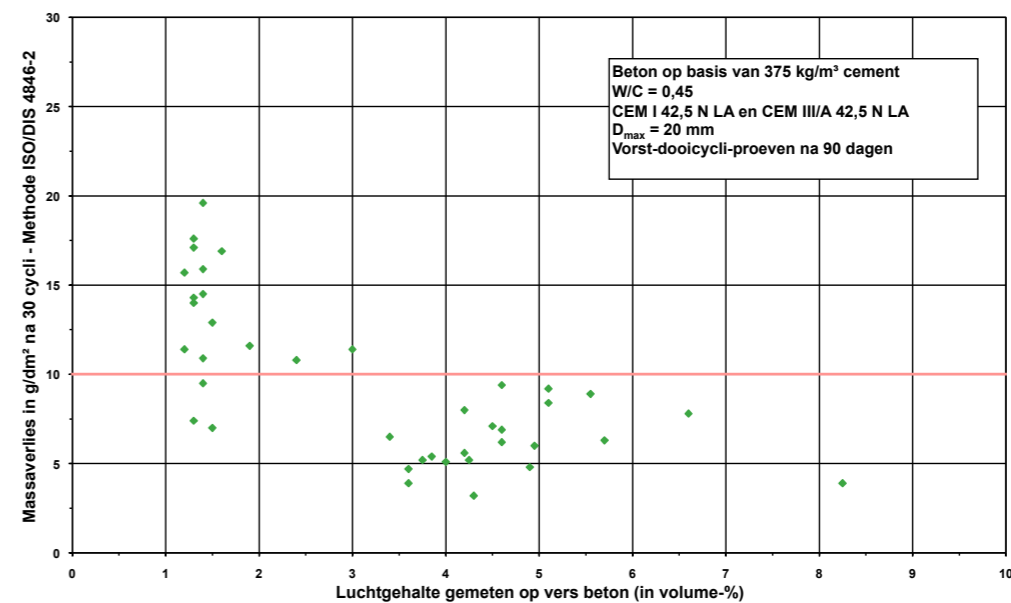


Fig. 5 – Invloed van het luchtgehalte van beton op de weerstand tegen vorst in aanwezigheid van dooizouten. Voor vers beton is een minimaal luchtgehalte van 3% vereist voor een maximaal verlies van 10 g/dm^2 na 30 vorst-dooicycli (in de meeste gevallen toegestane grenswaarde).



Gekleurd beton wordt meestal verkregen door de toevoeging van een pigment in poedervorm. Deze kleurstoffen zijn zeer fijn (gemiddelde korrelgrootte van $0,2$ tot $1\text{ }\mu\text{m}$) en vragen dus veel water. Om de bestandheid van het beton tegen vorst-dooicycli te behouden, is het essentieel het watergehalte van het mengsel niet te verhogen en het eventueel verlies aan verwerkbaarheid op te vangen door de toevoeging van een plastificeerder.



Vorstschade met dooizouten op de bovenkant van een betonwand van een bezinkingsbekken van een waterzuiveringsinstallatie. Bij te veel opstijging van mortel en cementmelk is het bovenvlak van verticale betonwanden bijzonder kwetsbaar. Het kan nuttig zijn ze af te borstelen of te verrijken door ze te bestrooien met een droog mengsel (1 deel cement – 1 deel zand) en ze vervolgens mechanisch of handmatig krachtig af te strijken.

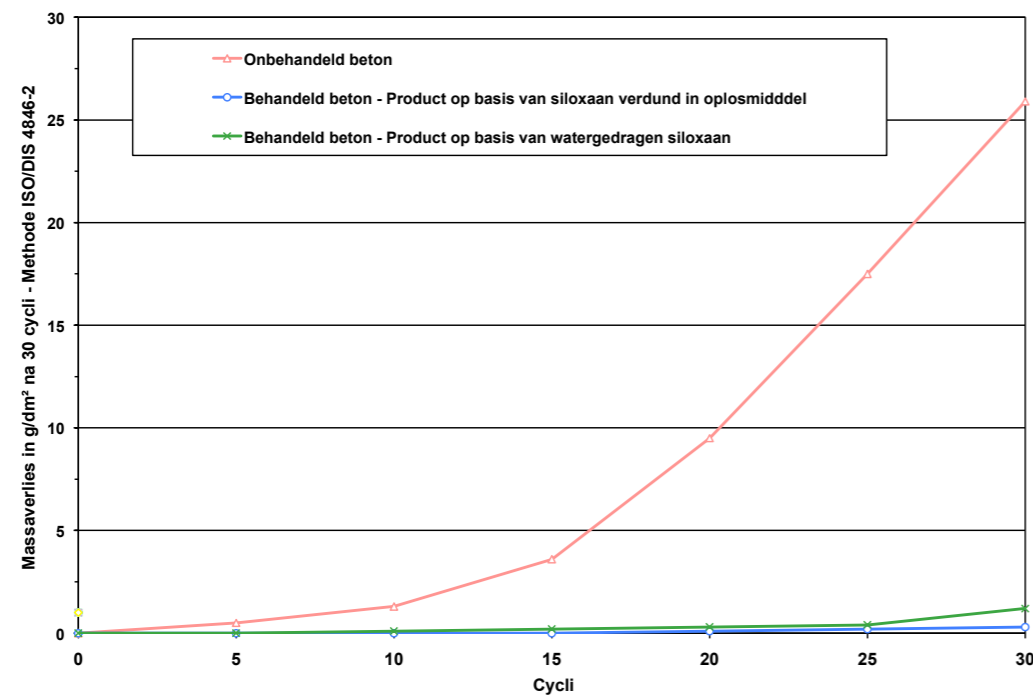
Oppervlakken van vers beton moeten altijd doelmatig tegen voortijdige uitdroging worden beschermd: voortijdig uitdrogen leidt tot een onvolledige hydratatie van het cement aan het oppervlak, tot de vermenigvuldiging van capillairen en tot kleine oppervlaktjescheurtjes die poedervorming, porositeit en een verminderde weerstand tegen dooizouten veroorzaken. De Belgische Nationale Bijlage bij de norm NBN EN 13670:2010 betreffende de vervaardiging van betonconstructies, bepaalt de minimale duur van de nabehandeling. Deze duur is afhankelijk van de weersomstandigheden en van het gebruikte cementtype. Voor meer informatie verwijzen wij de lezer ook naar ons bulletin T3 ('Scheurvorming beperken: noodzakelijke voorwaarde voor duurzaam beton').

Voor beton met een beperkte weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten, kan de oplossing bestaan in het waterdicht maken van te poreuze oppervlakken met een impregneermiddel. Door polymerisatie in de capillairen, vertragen impregneermiddelen de indringing van

het water en de dooizouten en vermijden zodoende schade door vorst-dooicycli. Deze producten werden op talrijke bouwplaatsen met succes toegepast (figuur 6). Bij het gebruik van dergelijke producten moet worden gecontroleerd of ze wel efficiënt zijn tegen dooizouten. Noteer ook dat hun werking niet permanent is en de behandeling dus periodiek moet worden herhaald (meestal elke 5 jaar, afhankelijk van het verkeer).

Het is eveneens nuttig om het strooien van dooizouten op beton dat minder dan 6 weken oud is, te vermijden. In 1973, in een omzendbrief van het Bestuur der Wegen van het Ministerie van Openbare werken, schreef de heer H. Hondermarcq, Directeur-generaal Bruggen en Wegen: "Op nieuwe wegverhardingen van cementbeton, zullen pas dooizouten mogen worden gestrooid na een periode van zes weken te rekenen vanaf de dag van hun uitvoering. Indien absoluut noodzakelijk, en in het bijzonder wanneer de veiligheid van de weggebruiker door vorst of sneeuw op het spel staat, mogen dooizouten worden gestrooid op beton 28 dagen na zijn aanleg".

Fig. 6 – Invloed van de behandeling met een impregneermiddel op de weerstand tegen vorst in aanwezigheid van dooizouten



Beton nr.	1 Met pigment W/C ≈ 0,50	2 Met pigment W/C ≈ 0,50	3 Met pigment W/C ≈ 0,50	4 Zonder pigment W/C ≈ 0,50	5 Zonder pigment maar met vliegas W/C ≈ 0,55	
Gebroken grind 6/20	914 kg/m³	899 kg/m³	908 kg/m³	909 kg/m³	893 kg/m³	
Gebroken grind 2/6	293 kg/m³	289 kg/m³	292 kg/m³	291 kg/m³	286 kg/m³	
Rivierzand 0/2	357 kg/m³	351 kg/m³	355 kg/m³	355 kg/m³	348 kg/m³	
Rivierzand 0/1	186 kg/m³	183 kg/m³	185 kg/m³	185 kg/m³	182 kg/m³	
CEM III/A 42,5 N LA	366 kg/m³	360 kg/m³	364 kg/m³	364 kg/m³	334 kg/m³	
Vliegas	-	-	-	-	29 kg/m³	
Pigment (rood ijzeroxide)	5 % ofwel 18,3 kg/m³	5 % ofwel 18,0 kg/m³	5 % ofwel 18,2 kg/m³	-	-	
Plastificeerder Luchtbelvormer	780 ml/m³ 450 ml/m³	770 ml/m³ 480 ml/m³	775 ml/m³ 485 ml/m³	780 ml/m³ 490 ml/m³	765 ml/m³ 380 ml/m³	
Totaal watergehalte	183 l/m³	185 l/m³	187 l/m³	185 l/m³	190 l/m³	
Proeven op vers beton	Slump	35 mm	35 mm	20 mm	35 mm	
	Luchtgehalte	3,8 %	4,5 %	4,5 %	4,1 %	4,7 %
	Vochtige volumieke massa	2318 kg/m³	2285 kg/m³	2310 kg/m³	2290 kg/m³	2263 kg/m³
Proeven op verhard beton	Druksterkte ⁽¹⁾	55,6 N/mm²	53,1 N/mm²	52,8 N/mm²	54,2 N/mm²	45,4 N/mm²
	Wateropslorping door onderdempeling ⁽²⁾	6,3 %	6,6 %	6,4 %	7,5 %	7,4 %
	Vorstbestendigheid, afschilfering na 30 cycli ⁽³⁾	4,6 g/dm²	6,9 g/dm²	6,6 g/dm²	6,1 g/dm²	15,5 g/dm²

(1) De druksterkte wordt gemeten na 90 dagen op boorkernen met een sectie van 100 cm² en een hoogte van 10 cm
(2) De wateropslorping door onderdempeling wordt gemeten op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm²
(3) De vorst-dooibestendigheid in aanwezigheid van dooizouten wordt gemeten na 90 dagen op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm², proef volgens SO/DIS 4846.2

Tabel 2 – Voorbeelden van betonsamenstellingen en de invloed van diverse parameters op de vorst-dooibestendigheid in aanwezigheid van dooizouten. (Resultaten van metingen op bouwplaatsen - fietspaden in Aarschot)



Te noteren :

- De verschillende betonsamenstellingen vertonen bij de proeven slechts een lichte afschilfering met uitzondering van beton nr. 5 waarvan het cementgehalte eveneens lager is. Dit is gedeeltelijk toe te schrijven aan het lage zandgehalte van deze betonsamenstellingen (ongeveer 31% in verhouding tot het totaal inerte skelet).
- De toevoeging van een kleurstof zonder extra toevoeging van water heeft geen nadelige invloed op het gedrag van het beton.

VOORSCHRIJVEN VAN BETON BESTAND TEGEN VORST-DOOICYCLI IN AANWEZIGHEID VAN DOOIZOUTEN VOLGENS DE NORMEN NBN EN 206-1 & NBN B 15-001

Evenals voor de werking van vorst alleen, kunnen op basis van de normen NBN EN 206-1:2001 en NBN B 15-001:2012 de duurzaamheidseisen worden voorgeschreven van ongewapend, gewapend en voorgespannen beton blootgesteld aan vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten (omgevingsklasse EE4 – aanwezigheid van vorst met dooizouten). Tabel 3 hierna geeft een overzicht van de normen verbonden aan deze omgevingsklasse. Merk op dat per toepassingsgebied (ongewapend beton of gewapend en voorgespannen beton), twee betontypes kunnen worden voorgeschreven. Een betontype zonder ingebrachte lucht (aangeduid T(0,45)) en een betontype met ingebrachte lucht (aangeduid T(0,50)A of T(0,45)A). Let wel dat standaard het beton zonder ingebrachte lucht altijd van toepassing is, uitgezonderd indien de voorschrijver de aanwezigheid van ingebrachte lucht expliciet voorschrijft. Een WAI-weerstandsklasse tegen wateropslorping door

onderdompeling kan eveneens worden voorgeschreven. Bijvoorbeeld, een gewapend beton blootgesteld aan vorst en aan dooizouten, en waarvoor een netwerk van ingebrachte luchtbelletjes is gewenst, zal in de omgevingsklasse EE4A worden voorgeschreven. Behalve een minimale sterkteklasse van C30/37, zal dit beton een W/C-factor $\leq 0,45$, een cementgehalte van $\geq 340 \text{ kg/m}^3$, en een luchtgehalte moeten bieden op vers beton van minimaal 4 % afhankelijk van zijn D_{max} . De granulaten zijn vorstbestendig en het gebruik van minerale toevoegsels zal gereguleerd zijn. Mocht de voorschrijver dit verzoeken, zal bovendien een WAI-wateropslorplingsklasse door onderdompeling (0,45) A moeten worden verzekerd. Zo zal de wateropslorping door onderdompeling, gemeten op een proefstuk overeenkomstig de voorschriften van de norm NBN B 15-215, minder bedragen dan gemiddeld 5,8 % (gemeten op 3 proefstukken) en individueel 6,3 % overeenkomstig bijlage O van de NBN B 15-001.

Omgevingsklasse	EE4 (Vorst en dooizouten)			
	Ongewapend beton (OB)		Gewapend beton (GB) of voorgespannen beton (VB)	
Toepassingsgebied				
Netwerk van ingebrachte luchtbelletjes gewenst	neen	ja	neen	ja
Betontype	T(0,45)	T(0,50)A	T(0,45)	T(0,45)A
Water/cementfactor	$\leq 0,45$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$	$\leq 0,45$
Cementgehalte (kg/m ³)	≥ 340	≥ 320	≥ 340	≥ 340
Sterkteklasse	$\geq C35/45$	$\geq C25/30$	$\geq C35/45$	$\geq C30/37$
Luchtgehalte van het vers beton (%)	-	$\geq 4\%$ ⁽¹⁾ $\geq 5\%$ ⁽²⁾ $\geq 6\%$ ⁽³⁾	-	$\geq 4\%$ ⁽¹⁾ $\geq 5\%$ ⁽²⁾ $\geq 6\%$ ⁽³⁾
Afstandsfactor \bar{L} van de luchtbelletjes ⁽⁴⁾	-	$< 200 \mu\text{m}$	-	$< 200 \mu\text{m}$
Granulaattyp ⁽⁵⁾	Vorstbestendig	Vorstbestendig	Vorstbestendig	Vorstbestendig
Wateropslorplingsklasse door onderdompeling ⁽⁶⁾	WAI (0,45)	WAI (0,50)A	WAI (0,45)	WAI (0,45)A

(1) Van toepassing indien $20 \text{ mm} \leq D_{\text{max}} \leq 31,5 \text{ mm}$
(2) Van toepassing indien $11,2 \text{ mm} \leq D_{\text{max}} \leq 16 \text{ mm}$
(3) Van toepassing indien $5,6 \text{ mm} \leq D_{\text{max}} \leq 10 \text{ mm}$
(4) De afstandsfactor moet worden gemeten op verhard beton volgens de norm NBN EN 480-11. In de Europese norm worden de luchtbelletjes tot 4 mm geteld, in tegenstelling tot de norm ASTM C457 / C457M waar die tot 1 mm worden geteld.
(5) De vorstbestendigheid van de granulaten met een nominale afmeting $D \leq 4 \text{ mm}$ wordt toereikend geacht. De vorstbestendigheid van de granulaten met een nominale afmeting $D > 4 \text{ mm}$ (met uitzondering van de lichte granulaten) wordt toereikend geacht indien
- hetzij de waterabsorptie $\leq 1,0\%$ bedraagt gemeten volgens de NBN EN 1097-6,
- hetzij de Los Angeles-coëfficiënt ≤ 25 bedraagt, gemeten volgens de NBN EN 1097-2 of
- hetzij het granulaat van klasse F_s is overeenkomstig de norm NBN EN 12620 of van klasse MS_s , na proeven uitgevoerd volgens respectievelijk de NBN EN 1367-1 en NBN EN 1367-2.
(6) Eis van toepassing indien uitdrukkelijk voorgeschreven.

Tabel 3 – Toepasselijke grenswaarden voor de samenstelling en kenmerken van beton blootgesteld aan vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten volgens de norm NBN B 15-001:2012.

Let wel dat de PTV 100 en 200 betreffende betonnen prefab producten, in sommige gevallen iets andere specificaties kunnen vermelden.

WEGENBETON VOORSCHRIJVEN VOLGENS DE TYPEBESTEKKEN SB 250, CCT QUALIROUTES EN TB 2011

Wij verwijzen de lezer door naar de volledige voorschriften van de gewestelijke typebestekken SB 250, CCT Qualiroutes en TB 2011, maar de vereisten inzake samenstelling en prestaties van het wegenbeton kunnen worden samengevat zoals in tabel 4. Door hun groot blootgesteld oppervlak zijn wegverhardingen bijzonder onderhevig aan vorst-dooicycli en aan dooizouten, en meestal bijna volledig met water verzadigd. Bovendien moeten wegverhardingen zeer slijtvast zijn om de verkeersbelasting te kunnen weerstaan. Zo komt het dat de voorgeschreven cementgehalten ruim hoger liggen dan die voorgeschreven door de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15-001. Bovendien worden de prestaties op een volledig andere wijze gemeten dan die van beton dat aan deze normen voldoet. Deze beide types of voorschrijfwijzen van een beton mogen dus niet met elkaar worden verward.

Voor de uitvoering van wegenbeton van goede kwaliteit is een hoog cementgehalte een absolute vereiste om een mengsel te verkrijgen met een lage porositeit en dus met een betere weerstand tegen vorst-dooicycli. Hiervoor is het essentieel de voorgeschreven maximale W/C-factor nauwgezet in acht te nemen, en beton te bereiden met een watergehalte zodanig dat de W/C-factor nog lager ligt. Het is namelijk nutteloos het cementgehalte te verhogen met behoud van dezelfde W/C-factor, want dat komt erop neer

dat het watergehalte eveneens moet stijgen waardoor ook de porositeit toeneemt en de weerstand tegen dooizouten daalt.

Om de weerstand te beoordelen van betonverhardingen tegen vorst-dooicycli en tegen dooizouten, schrijven de typebestekken twee prestatieproeven voor: de wateropslorping door onderdompeling en de weerstand tegen afschilfering. Voor beide proeven worden in situ boorkernen genomen. De proeven worden uitgevoerd op de bovenste schijf (met een dikte van ongeveer 50 mm) van de boorkernen, d.w.z. het bovenvlak van de betonverharding dat aan de dooizouten is blootgesteld. Merk op dat meestal alleen de wateropslorplingsproef wordt uitgevoerd. Zijn de resultaten van deze proef niet conform, dan wordt de afschilferingsproef uitgevoerd om de kwaliteit van het beton te beoordelen. De ervaring leert dat een wat te hoog resultaat van de wateropslorplingsproef en een goede weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten, niet noodzakelijkerwijs onverenigbaar zijn. De aanwezigheid namelijk van een netwerk van luchtbelletjes maakt het beton lichter, wat dus de wateropslorping, uitgedrukt in % van de droge betonmassa, kan verhogen. Bovendien, met een efficiënt netwerk van luchtbelletjes (luchtgehalte en afstandsfactor) en een hoog cementgehalte, is na 30 vorst-dooicycli volgens de SO/DIS 4846.2-methode, het verlies meestal klein.

Tabel 4 – Toepasselijke grenswaarden voor de samenstelling en kenmerken van wegenbeton volgens de typebestekken SB 250, CCT Qualiroutes en het TB 2011.

Maximale nominale afmeting van de betongranulaten	Minimaal cementgehalte ⁽¹⁾	W/C-factor ⁽²⁾	Luchtgehalte	Wateropslorping door onderdompeling ⁽³⁾	Afschilfering na 30 cycli ⁽⁴⁾
$D_{\text{max}} = 32 \text{ mm}$	350 tot 400 kg/m ³	$\leq 0,50$ tot $\leq 0,45$	-	$W_i \leq 6,5\%$ $W_m \leq 6,0\%$	$\leq 20 \text{ g/dm}^2$ of $\leq 10 \text{ g/dm}^2$ of $\leq 5 \text{ g/dm}^2$
$6,3 \text{ mm} < D_{\text{max}} \leq 20 \text{ mm}$	350 tot 400 kg/m ³	$\leq 0,50$ tot $\leq 0,45$	$\geq 3\%$	$W_i \leq 6,8\%$ $W_m \leq 6,3\%$	$\leq 20 \text{ g/dm}^2$ of $\leq 10 \text{ g/dm}^2$ of $\leq 5 \text{ g/dm}^2$
$D_{\text{max}} \leq 6,3 \text{ mm}$	375 tot 425 kg/m ³	$\leq 0,50$ tot $\leq 0,42$	$\geq 5\%$	$W_i \leq 7,0\%$ $W_m \leq 6,5\%$	$\leq 20 \text{ g/dm}^2$ of $\leq 10 \text{ g/dm}^2$ of $\leq 5 \text{ g/dm}^2$
Minimale druksterkte⁽⁵⁾ 50 tot 70 N/mm² of 40 tot 60 N/mm² wanneer een luchtbelvormer aan het beton wordt toegevoegd					
(1) Het minimaal cementgehalte is afhankelijk van het wegtype (verkeersdichtheid) (2) De maximale W/C-factor is afhankelijk van het wegtype (verkeersdichtheid) (3) W_i = individuele wateropslorping door onderdompeling, W_m = gemiddelde wateropslorping door onderdompeling. Meting op de bovenste schijven (dikte 50mm) van de in situ genomen boorkernen (4) De maximale afschilfering is afhankelijk van het wegtype (verkeersdichtheid). Meting op de bovenste schijven van de in situ genomen boorkernen en proef volgens ISO/DIS 4846.2 (5) De vereiste druksterkte is afhankelijk van het wegtype (verkeersdichtheid). De druksterkte is onafhankelijk van de D_{max} van het beton en wordt gemeten na minimaal 90 dagen op boorkernen met een sectie van 100 cm ² en een hoogte van 10 cm					

BEOORDELING VAN DE WEERSTAND VAN EEN BETON TEGEN VORST-DOOICYCLI IN AANWEZIGHEID VAN DOOIZOUTEN (AFSCHILFERING)

Tabel 5 – Beschrijving van de doorgaans toegepaste vorst-dooiproeven in aanwezigheid van dooizouten

De weerstand van een beton tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten, kan worden gemeten in een laboratorium op basis van de hoeveelheid afgeschilferde deeltjes aan het oppervlak van een proefstuk van beton bedekt met een zoutoplossing en blootgesteld aan opeenvolgende vorst-dooicycli. Het proefstuk is meestal de bovenste schijf van een boorkern (schijf van het oppervlak dat effectief

met dooizouten in contact komt), maar kan ook een afgesneden vlak van een proefstuk zijn, een kubus of een volledige betonnen straatsteen. Tabel 5 stelt de verschillende methoden voor die in België worden toegepast. De verschillen schuilen hoofdzakelijk in het aantal vorst-dooicycli, de temperatuurcycli en vooral de koel- en dooisnelheid of nog het gebruikte dooizouttype.

Methode Referentienorm	ISO-DIS 4846.2	Slab test CEN/TS 12390-9	Op prefab betonnen straatstenen NBN EN 1338 NBN EN 1339 NBN EN 1340 NTN 018
Temperatuurvariatie tijdens een cyclus	Van (20 ± 2) °C tot (-18 ± 2) °C met controle van de koelsnelheid	Van (20 ± 4) °C tot (-20 ± 2) °C met controle van de koelsnelheid	Van (20 ± 4) °C tot (-18 ± 2) °C met controle van de koelsnelheid
Temperatuurcontrolepunt	Omgevingstemperatuur in de koelcel	Voeler geplaatst aan het oppervlak van het proefstuk blootgesteld aan dooizouten	Voeler geplaatst aan het oppervlak van het proefstuk blootgesteld aan dooizouten
	Niet thermisch geïsoleerde vlakken van het proefstuk niet blootgesteld aan dooizouten	Thermisch geïsoleerde vlakken van het proefstuk niet blootgesteld aan dooizouten	Thermisch geïsoleerde vlakken van het proefstuk niet blootgesteld aan dooizouten
Cyclusduur	24 u	24 u	24 u
Aantal cycli	30	56	28
Dooizouttype	Oplossing op 3 % van CaCl ₂	Oplossing op 3 % van NaCl	Oplossing op 3 % van NaCl
criterium	Opgenomen in de typebestekken betreffende wegverhardingen van beton – een beton met een verlies ≤ 10 g/dm ² (1 kg/m ²) wordt als bestand beschouwd	De norm NBN EN 13877-2 stelt voor de vorst-dooibestandheid van wegverhardingen van beton drie sterkteklassen voor. De criteria gaan van 0,5 tot maximaal 1,5 kg/m ² verlies. Bij gebrek aan ervaring worden die in België echter niet toegepast.	Opgenomen in de normen betreffende prefab beton-elementen, maar meestal een gemiddelde van ≤ 1,0 kg/m ² en individueel ≤ 1,5 kg/m ²



Eprouvette après 30 cycles de gel-dégel (ISO-DIS 4846.2)



Eprouvette d'essai et pertes récupérées lors du Slab test (CEN/TS 12390-9)

VOORBEELDEN VAN BETONSAMENSTELLINGEN EN WEERSTAND TEGEN VORST-DOOICYCLI IN AANWEZIGHEID VAN DOOIZOUTEN

Tabel 6 stelt betonsamenstellingen voor op basis van cement CEM III/B 42,5 N HSR LA. Deze samenstellingen voldoen enerzijds aan de eisen van de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15 001, en anderzijds aan die van de typebestekken, met uitzondering van het cementtype CEM III/B dat niet is toegestaan voor de uitvoering van wegverhardingen. Behalve enkele verschillen in de geanalyseerde parameters (W/C-factor, al dan niet met ingebrachte lucht), onderscheiden de betonsamenstellingen van tabel 6 zich sterk door hun inert skelet. Het wegenbeton heeft een zeer continu korrelskelet met een laag zandgehalte (33% van het totale inerte skelet), terwijl het andere beton een duidelijk onstabiel korrelskelet heeft (vrij lage hoeveelheid steenslag 2/6 en hoog zandgehalte van ongeveer 41 % van het totale inerte skelet). De instabiliteit van deze laatste samenstellingen wordt nog versterkt door hun hoge verwerkbaarheid (consistentieklasse S3). Deze verschillende factoren kunnen aanzienlijke opstijgingen van mortel en cementmelk naar de oppervlakte laag veroorzaken en maken dat het beton niet bestand is tegen de agressie van vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten. Hoewel het cementgehalte CEM III/B 42,5 N HSR LA van de betonsamenstellingen overeenkomstig de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15-001 iets lager is, is hun weerstand tegen dooizouten namelijk niet vergelijkbaar met die van het wegenbeton. Nochtans voldoen deze betonsamenstellingen aan de minimumeisen van de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15 001.

Zelfs de een luchtgehalte van 4,9% maakt hun weerstand tegen dooizouten niet beter. Vergeet niet dat het vrij hoge zandgehalte van het beton een zeer nadelige factor is voor zijn weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten en dat het dus belangrijk is de zanddosering zo veel mogelijk te beperken. Het oude voorschrift dat de zand/cementfactor (Z/C) op maximaal 1,5 vastlegde, is ongetwijfeld zeer streng voor beton met een D_{max} van de granulaten van 20 mm, maar een beperking van deze factor tot 1,7 zou gunstig zijn om een beton te verkrijgen dat bestand is tegen de agressie van opeenvolgende vorst-dooicycli met dooizouten. Merk ook op dat de weerstand van het beton tegen dooizouten niet in correlatie kan worden gebracht met de druksterkte.

Schade te wijten aan afwisselende vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten, treedt vaak op aan het oppervlak van bedrijfsverhardingen. Vergeet niet dat de dooizouten in grote hoeveelheden worden meegevoerd door de banden van de voertuigen. Bovendien zijn deze verhardingen van beton zelden samengesteld om weerstand te kunnen bieden aan dergelijke agressie, vaak zijn ze niet correct uitgevoerd en bovendien zijn ze meestal nagenoeg verzadigd met water.



Toepassingstype		Beton volgens de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15-001					
Betontype	C35/45 EE4 OB, GB en VB S3 20 mm <i>Zonder ingebrachte lucht, WAI (0,45) (W/C = 0,45)</i>	C30/37 EE3 GB en VB S3 20 mm <i>Zonder ingebrachte lucht, WAI (0,50) (W/C = 0,50)</i>	C30/37 EE4 GB en VB S3 20 mm <i>Met ingebrachte lucht, WAI (0,45)A (W/C = 0,45)</i>	C35/45 EE4 OB, GB en VB S3 20 mm <i>Zonder ingebrachte lucht, WAI (0,45) (W/C = 0,45)</i>	C30/37 EE3 GB en VB S3 20 mm <i>Zonder ingebrachte lucht, WAI (0,50) (W/C = 0,50)</i>	C30/37 EE4 GB en VB S3 20 mm <i>Met ingebrachte lucht, WAI (0,45)A (W/C = 0,45)</i>	
Steenlag 14/20	352 kg/m ³	345 kg/m ³	335 kg/m ³	355 kg/m ³	-	-	
Steenlag 6/14	600 kg/m ³	588 kg/m ³	570 kg/m ³	605 kg/m ³	-	-	
Steenlag a2/6	150 kg/m ³	147 kg/m ³	143 kg/m ³	151 kg/m ³	-	-	
Rivierzand 0/2	771 kg/m ³	756 kg/m ³	734 kg/m ³	778 kg/m ³	-	-	
CEM I 42,5 N LA	-	-	-	363 kg/m ³	-	-	
CEM III/B 42,5 N HSR LA	362 kg/m ³	365 kg/m ³	361 kg/m ³	-	-	-	
(Super)plastificeerder Luchtbelvormer	1500 ml/m ³ -	- -	615 ml/m ³ 345 ml/m ³	1610 ml/m ³ -	- -	- -	
Totaal watergehalte	173 l/m ³	192 l/m ³	174 l/m ³	173 l/m ³	-	-	
Proeven op vers beton	Slump	140 mm	140 mm	140 mm	-	-	
	Luchtgehalte	0,9 %	0,8 %	4,9 %	1,3 %	-	
	Vochtige volumieke massa	2412 kg/m ³	2392 kg/m ³	2316 kg/m ³	2427 kg/m ³	-	
Proeven op verhard beton	Druksterkte	na 28 dagen op kubussen van 15 cm	54,9 N/mm ²	48,3 N/mm ²	47,6 N/mm ²	60,5 N/mm ²	-
		na 91 dagen op kubussen van 15 cm	61,4 N/mm ²	53,8 N/mm ²	49,8 N/mm ²	70,3 N/mm ²	-
		na 28 dagen op boorkernen (100 cm ²)	60,0 N/mm ²	54,9 N/mm ²	50,2 N/mm ²	69,6 N/mm ²	-
		na 91 dagen op boorkernen (100 cm ²)	-	-	-	-	-
	Wateropsloping door onderdempeling ⁽¹⁾	5,1 % - 5,1 % - 5,0 % gemidd.: 5,1 %	5,8 % - 5,6 % - 5,7 % gemidd.: 5,7 %	5,5 % - 5,6 % - 5,8 % gemidd.: 5,6 %	4,7 % - 4,8 % - 4,7 % gemidd.: 4,7 %	-	-
Vorstbestendigheid, afschilfering na 30 cycli ⁽²⁾	42,9 g/dm ²	51,7 g/dm ²	42,6 g/dm ²	49,8 g/dm ²	-	-	

(1) De wateropsloping door onderdempeling wordt gemeten op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm²

(2) De vorst-dooibestandheid in aanwezigheid van doozouten wordt gemeten na 90 dagen op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm², proef volgens SO/DIS 4846.2

Tabel 6.1 – Voorbeelden van betonsamenstellingen. Invloed van diverse parameters op de weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van doozouten. In al deze gevallen is het beton conform de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15-001.

Toepassingstype		Wegenbeton					
Betontype	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ W/C ≤ 0,50 <i>Zonder ingebrachte lucht</i>	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ W/C ≤ 0,45 <i>Zonder ingebrachte lucht</i>	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ W/C ≤ 0,45 <i>Met ingebrachte lucht</i>	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ W/C ≤ 0,50 <i>Zonder ingebrachte lucht</i>	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ W/C ≤ 0,45 <i>Zonder ingebrachte lucht</i>	D _{max} = 20 mm CEM = 375 kg/m ³ W/C ≤ 0,45 <i>Met ingebrachte lucht</i>	
Steenlag 14/20	387 kg/m ³	389 kg/m ³	376 kg/m ³	394 kg/m ³	394 kg/m ³	381 kg/m ³	
Steenlag 6/14	626 kg/m ³	630 kg/m ³	608 kg/m ³	638 kg/m ³	637 kg/m ³	616 kg/m ³	
Steenlag a2/6	243 kg/m ³	245 kg/m ³	237 kg/m ³	247 kg/m ³	248 kg/m ³	239 kg/m ³	
Rivierzand 0/2	613 kg/m ³	617 kg/m ³	595 kg/m ³	625 kg/m ³	624 kg/m ³	603 kg/m ³	
CEM I 42,5 N LA	-	-	-	375 kg/m ³	376 kg/m ³	379 kg/m ³	
CEM III/B 42,5 N HSR LA	377 kg/m ³	374 kg/m ³	379 kg/m ³	-	-	-	
(Super)plastificeerder Luchtbelvormer	- -	2300 ml/m ³ -	195 ml/m ³ 1130 ml/m ³	- -	480 ml/m ³ -	- 450 ml/m ³	
Totaal watergehalte	184 l/m ³	169 l/m ³	171 l/m ³	175 l/m ³	170 l/m ³	171 l/m ³	
Proeven op vers beton	Slump	40 mm	35 mm	40 mm	25 mm	25 mm	
	Luchtgehalte	0,7 %	1,3 %	3,6 %	1,0 %	1,2 %	
	Vochtige volumieke massa	2430 kg/m ³	2425 kg/m ³	2367 kg/m ³	2454 kg/m ³	2449 kg/m ³	2389 kg/m ³
Proeven op verhard beton	Druksterkte	na 28 dagen op kubussen van 15 cm	-	-	-	-	
		na 91 dagen op kubussen van 15 cm	-	-	-	-	
		na 28 dagen op boorkernen (100 cm ²)	59,0 N/mm ²	65,0 N/mm ²	52,8 N/mm ²	69,5 N/mm ²	66,6 N/mm ²
		na 91 dagen op boorkernen (100 cm ²)	70,7 N/mm ²	74,4 N/mm ²	61,2 N/mm ²	82,2 N/mm ²	77,7 N/mm ²
	Wateropsloping door onderdempeling ⁽¹⁾	6,3 %	5,7 %	6,3 %	5,3 %	5,1 %	
Vorstbestendigheid, afschilfering na 30 cycli ⁽²⁾	16,5 g/dm ²	13,1 g/dm ²	9,0 g/dm ²	11,7 g/dm ²	11,4 g/dm ²		

(1) De wateropsloping door onderdempeling wordt gemeten op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm².

(2) De vorst-dooibestandheid in aanwezigheid van doozouten wordt gemeten na 90 dagen op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm², proef volgens SO/DIS 4846.2.

Tabel 6.2 – Voorbeelden van betonsamenstellingen in de wegenbouw. Invloed van diverse parameters op de weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van doozouten.

3. BEVRIEZING VAN VERS BETON

Zuiver water bevriest op 0°C met een volumetoename van 9 %. Net als leidingen die door de uitzetting van hun inhoud onder de werking van vorst barsten, wordt vers beton beschadigd door de uitzetting van het water dat bevriest.

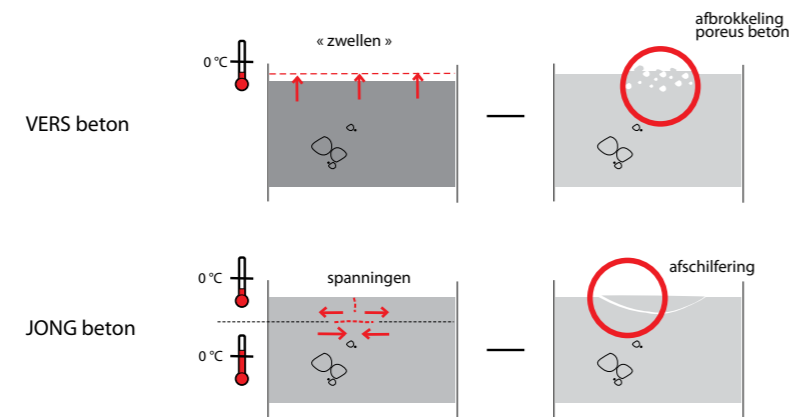
Twee gevallen kunnen zich voordoen (figuur 7):

- het water bevriest wanneer het beton nog niet is verhard (vers beton: het nog elastische beton, kan de uitzetting gemakkelijk opvangen. Het gevolg hiervan is de opzwellen van het

beton buiten zijn bekisting. Bijgevolg zal het beton na zijn verharding van zeer slechte kwaliteit zijn omdat het niet voldoende is verdicht;

- het water bevriest wanneer het beton verhard is maar nog zeer jong is: de ontwikkelde weerstand is te zwak om de trekspanningen op te vangen veroorzaakt door het temperatuurverschil tussen het oppervlak en de kern. Het oppervlak zal afschilferen.

Fig. 7 - Bevriezing van nog niet verhard beton



TE NEMEN VOORZORGSMAATREGELEN

Bij koud weer moet cement met een hoge sterkteklasse worden gebruikt (klasse 42,5 en zelfs 52,5). Het is nuttig de cementdosering te verhogen (een cementdosering van minstens 350 kg/m³ is aanbevolen), zonder echter de hoeveelheid water te verhogen. Om een voldoende vloeibaarheid te verkrijgen, moet eventueel een superplastificeerder worden toegevoegd of de dosering ervan worden verhoogd.

Bindings- en/of verhardingsversnellers die de duur van de verharding van het cement in het beton inkorten, of die de ontwikkeling van de initiële weerstand van het beton versnellen, al dan niet door de duur van de verharding te wijzigen, worden meestal gebruikt om het beton vorstvrij te maken, d.w.z. om het beton vóór de komst van de vorst een druksterkte te geven van 5 N/mm², een waarde die wordt beschouwd als een te overschrijden kritische

drempel. Hulpstoffen op basis van chloriden zijn zeer geschikt, maar zij veroorzaken wapeningscorrosie en zijn derhalve verboden in gewapend en voorgespannen beton, cfr. de norm NBN EN 206-1.

Wanneer de temperatuur lager is dan 5 °C of wanneer een beton wordt uitgevoerd tegen wanden waarvan de temperatuur lager is dan 3 °C, kunnen speciale beschermingsmaatregelen worden genomen, zoals de bedekking van het beton met een folie (om het tegen de koude te isoleren) zoals geïllustreerd in figuur 8. Vergeet echter niet dat een natte isolatie helemaal niet isoleert. Een andere oplossing, maar moeilijker uit te voeren in de praktijk (behalve voor mengsels van een kleine hoeveelheid), bestaat erin het aanmaakwater wat op te warmen. Tabel 7 geeft een overzicht van een aantal aanvullende beschermingsmaatregelen.

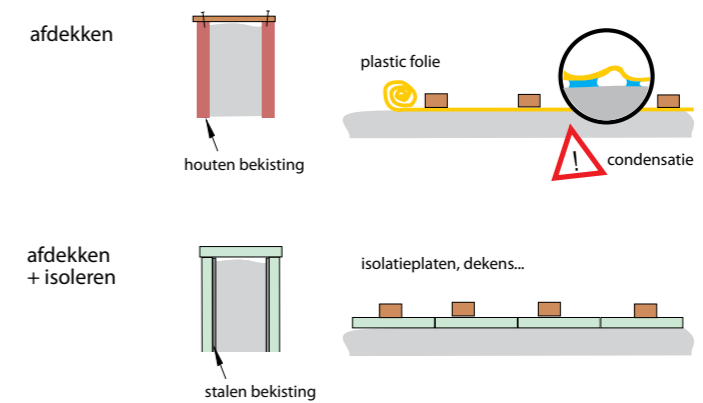


Fig. 8 - Bescherming van vers beton

	WEL	NIET
Het weer	<ul style="list-style-type: none"> • het weerbericht raadplegen vóór het begin van de werken 	
De granulaten	<ul style="list-style-type: none"> • indien mogelijk, stockeren op een zonnige plek 	<ul style="list-style-type: none"> • bevroren granulaten gebruiken (dat geldt vooral voor het zand)
Het water	<ul style="list-style-type: none"> • gebruik van voorverwarmd water; de temperatuur van het betonmengsel mag echter niet meer bedragen dan 40°C 	<ul style="list-style-type: none"> • zeer koud water gebruiken
De bekistingen en de wapeningen	<ul style="list-style-type: none"> • bij voorkeur houten bekistingen gebruiken • sneeuw en ijs verwijderen 	<ul style="list-style-type: none"> • metalen bekistingen gebruiken • beton storten tegen een bevroren element
Verwerking	<ul style="list-style-type: none"> • betonneren tijdens de warmste uren van de dag • het beton beschermen tegen verdamping van het aanmaakwater (curing compound) en tegen warmteverlies (oppervlak afdekken) 	<ul style="list-style-type: none"> • betonneren bij een temperatuur lager dan 5°C • te snel ontkisten of de bescherming verwijderen: het beton kan dan een thermische schok ondergaan • ontkisten bij vriesweer

Tabel 7 - Aanvullende voorzorgsmaatregelen om het vers beton tegen vorst te beschermen



Voorbeelden van vers beton dat aan vorst werd blootgesteld: - straatgoot en boorkern genomen in het beton; het beton heeft niet langer een compacte structuur



- afschilfering van het oppervlak van een vloer van gepolijst beton

TE ONTHOUDEN

De temperatuur van het betonoppervlak dat het meest is blootgesteld, moet gedurende 72 uur na de uitvoering minstens + 5 °C bedragen.

België heeft een uitgebreid wegennet met veel betonwegen. Het is niet ongewoon betonwegen aan te treffen die ouder zijn dan 40 jaar. Destijds werden betonwegen uitgevoerd tussen vaste bekistingen met machines die over de rails van de bekisting voortbewogen. Vervolgens werden de eerste glijbekistingsmachines gebruikt, onder meer op de E42 (foto hieronder) die in december 1972 werd ingehuldigd. Een bijzondere aandacht werd besteed aan de samenstelling van het beton, maar ook aan de verdichting, de afwerking en de bescherming van het jonge beton tegen uitdroging.

Beton met continue korrelverdeling type A van Bruggen en Wegen werd het meest gebruikt. Dit beton was als volgt samengesteld:

steenslag 22/40 :	750 kg/m ³
steenslag 8/22 :	375 kg/m ³
steenslag 2/8 :	350 kg/m ³
rivierzand 0/2 :	405 kg/m ³
cement:	400 kg/m ³
water:	160 l/m ³

Opmerking: Destijds werden de korrelgroottes vastgelegd door middel van zeven met ronde gaten. Thans worden zeven met vierkante

mazen of geperforeerde platen gebruikt. Zo was een 22/40 goed vergelijkbaar met een huidige 20/32, een 8/22 met een 6/20 en een 2/8 met een 2/6.

Dankzij de kwaliteit van het beton bieden deze verhardingen een zeer hoge mechanische weerstand en slijtvastheid. De voorgeschreven minimale druksterkte bedroeg 60 N/mm² na 56 dagen. Noteer dat ondanks de afwezigheid van een luchtbelvormer, dit beton zeer bestand is tegen dooizouten. Dat is toe te schrijven aan de kwaliteit van het mengsel (laag watergehalte, hoog cementgehalte) en aan het laag zandgehalte. Destijds schreven de typebestekken voor de samenstelling van wegenbeton een zand/cementfactor (Z/C) voor begrepen tussen 1,0 en 1,5. Met het oog op een groter akoestisch comfort van de betonverhardingen hebben veel samenstellingen thans een fijnere korrelverdeling. Het zandgehalte is bijgevolg veel hoger (meestal 600 kg/m³ rivierzand voor een beton 0/20 mm en nog hoger voor een lagere D_{max}). In dat geval is het gebruik van een luchtbelvormer een absolute vereiste.



(volgende pagina:)

Langsheen het centrum en de Nationale Plantentuin in Meise lopen twee parallelle wegen : de gewestweg N277 – of de Nieuwelaan – en de autosnelweg A12.

In beide gevallen gaat het om betonwegen, maar dan wel van twee verschillende generaties.

De Nieuwelaan werd aangelegd in platenbeton in 1952 en is vandaag nog steeds in dienst. Na zestig winters kan men nog steeds spreken van een weerstandbiedend oppervlak !

Het gedeelte van de A12 ter hoogte van Meise werd in 2001 heraangelegd in doorgaand gewapend beton.

Uiteraard betreft het een totaal ander type beton dan op de Nieuwelaan, maar ook hier weerstaat het wegdek aan de belastingen van verkeer en klimaat.

(foto's A. Nullens)



BETONVERHARDINGEN BESTAND TEGEN VORST-DOOICYCLI IN AANWEZIGHEID VAN DOOIZOUTEN

ENKELE VOORBEELDEN

		Ans, Place Mattéoti De eerste toepassing van een gekleurde uitgewassen betonverharding in België. Uitvoering met trilbalk in september 1992.		Treignes Verharding van gekleurd uitgewassen beton. Uitvoering met trilbalk in juni 1998.	
		Steenslag 4/16 Rivierzand 0/2 CEM III/A 42,5 N LA Rood pigment	1285 kg/m ³ 515 kg/m ³ 350 kg/m ³ 25 kg/m ³	Zandsteen 4/6 et 6/14 Rivierzand 0/2 CEM III/A 42,5 N LA Geel pigment	1235 kg/m ³ 535 kg/m ³ 400 kg/m ³ 12 kg/m ³
		Superplastificeerder en luchtbelvormer		Plastificeerder en luchtbelvormer	
Proeven op vers beton	Totaal watergehalte	207 l/m ³		215 l/m ³	207 l/m ³
	Slump (zetmaat)	70 mm		105 mm	80 mm
	Luchtgehalte	4,5 %		3,9 %	2,7 %
Proeven op verhard beton	Druksterkte ^(a)	47,7 N/mm ²		42,6 N/mm ²	54,6 N/mm ²
	Wateropsorping door onderdompeling ^(b)	5,8 %		7,5 %	7,3 %
	Vorstbestendigheid, afschilfering na 30 cycli ^(c)	3,8 g/dm ² (gedeelte dat na het uitwassen tegen uitdroging werd beschermd)	10,0 g/dm ² (gedeelte dat na het uitwassen niet tegen uitdroging werd beschermd)	19,6 g/dm ²	15,5 g/dm ²
(a) De druktsterkte wordt gemeten na 90 dagen op boorkernen van 100 cm ²		Ondanks het vrij lage cementgehalte en het vrij hoge watergehalte, staat de duurzaamheid van het beton ongetwijfeld in correlatie met het lage zandgehalte (Z/C-factor = 1,5), een correcte ingebrachte lucht, een doelmatige verwerking en een goede bescherming van het beton tegen uitdroging.		Ondanks het hoge cementgehalte en een zeer lage Z/C-factor (= 1,3) is de weerstand tegen dooizouten ontoereikend. Deze resultaten zijn te wijten aan het hoge watergehalte en onvoldoende luchtgehalte. Bovendien vertoont het beton bij de verwerking de neiging tot aanzienlijke cementmelkvorming aan het oppervlak (hoog gehalte cementpasta).	
(b) De wateropsorping door onderdompeling wordt gemeten op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm ²				Foto : augustus 2012	
(c) De vorst-dooibestandheid in aanwezigheid van dooizouten wordt gemeten na minstens 90 dagen op de bovenste schijven van de boorkernen van 100 cm ² , proef volgens SO/DIS 4846.2					
					

De te nemen voorzorgsmaatregelen voor de samenstelling van beton blootgesteld aan vorst-dooicycli met dooizouten kunnen als volgt worden samengevat:

- minimaal cementgehalte: 375 kg/m³;
- W/C-factor ≤ 0,45 en watergehalte ≤ 180 l/m³;
- zand van goede kwaliteit (met ronde korrel) en in beperkte hoeveelheid, zand/cementfactor (Z/C) ≤ 1,7 en zelfs 1,5;
- gebruik van een luchtbelvormer in het beton voor een luchtgehalte van het verse beton van minimaal 4 %.

Bovendien moet de trilling van het beton met zorg worden uitgevoerd en moet het beton onmiddellijk erna tegen uitdroging worden beschermd. Dit zijn noodzakelijke voorwaarden want het is de huid van de betonelementen die het meest aan de agressie van de dooizouten is blootgesteld. De kenmerken van de betonhuid zijn nauw verbonden aan de verwerking (trilling, oppervlakafwerking, rijping met water). Voor verhardingen van uitgewassen beton, zal het verharde beton na het uitwassen nog met een nabehandlungsproduct worden besproeid.

		Gembloers Verharding van gekleurd uitgewassen beton. Uitvoering met trilbalk in augustus 1998.		Herne Wegdek van uitgewassen beton. Uitvoering met glijbekistingsmachine in april 1996.		Leuven Industriële buitenverharding van beton afgestreeken (gevlinderd) met helikopter - Gietbeton. Handmatige uitvoering zonder trillen.	
		400 kg/m ³ de CEM III/A 42,5 N LA Rivierzandgehalte 0/2: 33 % van het gehele inerte skelet. Toevoeging van een geel pigment.		Porfier 2/6 Rivierzand 0/2 CEM III/A 42,5 N LA	995 kg/m ³ 700 kg/m ³ 425 kg/m ³	Druksterkteklasse C30/37 375 kg/m ³ CEM III/A 42,5 N LA Staalvezels: 30 kg/m ³ Zandgehalte 0/2 : 37 % van het gehele inerte skelet	
		Plastificeerder en luchtbelvormer		Plastificeerder en luchtbelvormer		Superplastificeerder	
		210 l/m ³	205 l/m ³	187 l/m ³		212 l/m ³	212 l/m ³
		30 mm	35 mm	25 mm		170 mm	170 mm
		4,4 %	4,5 %	4,2 %		1,2 %	1,3 %
		54 N/mm ²	52,2 N/mm ²	76,3 N/mm ²		55,7 N/mm ²	56,4 N/mm ²
		6,5 %	7,0 %	5,3 %		7,0 %	7,1 %
		7,5 g/dm ²	8,3 g/dm ²	4,6 g/dm ²		37,8 g/dm ²	39,8 g/dm ²
		Dit voorbeeld moet in verband worden gebracht met dat van Treignes. De weerstand tegen dooizouten is veel groter. Dit is toe te schrijven aan het hogere luchtgehalte en de lagere verwerkbaarheid (kleiner risico van cementmelkvorming aan het oppervlak).		Uit de resultaten blijkt dat dit beton over de nodige kwaliteiten beschikt (hoog cementgehalte, laag watergehalte, voldoende luchtgehalte) om bestand te zijn tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten. Bovendien voorkomt de uitvoering met slipform cementmelkvorming aan het oppervlak.		Deze betonverharding is niet bestand tegen dooizouten. De kwaliteit van dit beton (hoog watergehalte en afwezigheid van ingebrachte lucht) gekoppeld aan de vele uitvoeringsgebreken (geen trillen, afwerking met helikopter, late bescherming tegen uitdroging) zijn de oorzaak van dit gebrek aan duurzaamheid.	
		Foto : april 2012		Foto: uitzicht van het beton in april 1996 en boorkernen genomen in mei 2011, met inbegrip in een dwarsseur van de doorgaand gewapende betonverharding.		Foto's : uitvoering in 1997, afschilfering van het oppervlak in maart 1998.	
							
							
							

GEciteerde NORMEN OF NORMATIEVE DOCUMENTEN

- [1] NBN B 15-001:2012 : Aanvulling op de NBN EN 206-1:2001 - Beton - Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit, Brussel : NBN, 2012
- [2] NBN EN 206-1:2001 : Beton - Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit, Brussel : NBN, 2001
- [3] ASTM C457 / C457M – 11 : Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.
- [4] PTV 100 (+ Addendum) : Geprefabriceerde producten van ongewapend, van gewapend en van staalvezelversterkt beton voor infrastructuurwerken, Brussel : PROBETON, 2011
- [5] PTV 200 (+ Addendum) : Geprefabriceerde structurelementen van gewapend beton en van voorgespannen beton - Specificaties voor de grondstoffen, de fabricage, de afgewerkte elementen en de berekening, Brussel : PROBETON, 2005
- [6] CEN/TR 15177 : 2006 : Testing the freeze-thaw resistance of concrete – Internal structural damage, Brussel : CEN, 2006
- [7] NBN EN 12350-7 : Beproeving van betonspecie - Deel 7: Luchtgehalte - Drukmethode, Brussel : NBN, 2009
- [8] NBN EN 480-11 : Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel - Beproevingmethoden - Deel 11: Bepaling van de eigenschappen van luchtbellen in uitgehard beton, Brussel : NBN, 2005
- [9] Typebestek Qualiroutes, Waalse Overheidsdienst, 2011
- [10] Standaardbestek 250 voor de wegenbouw, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, versie 2.2., 2010
- [11] Typebestek 2011, Ministerie van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest, Bestuur Uitrusting en Vervoer.
- [12] CEN/TS 12390-9:2006 : Testing hardened concrete – Part 9 : Freeze-thaw resistance of concrete – Scaling, Brussel : CEN, 2006
- [13] ISO/DIS 4846.2 : Beton - Bepaling van weerstand tegen afschilfering van oppervlakten onderworpen aan chemische smeltmiddelen, 1984
- [14] NBN EN 1338 : Betonstraatstenen - Eisen en beproevingsmethoden, Brussel : NBN, 2003
- [15] NBN EN 1339 : Betontegels - Eisen en beproevingsmethoden, Brussel : NBN, 2003
- [16] NBN EN 1338 : Betonboordstenen - Eisen en beproevingsmethoden, Brussel : NBN, 2003
- [17] NTN 018 : Proeven op beton - Bestandheid tegen dooizouten, Brussel : PROBETON, 1999
- [18] NBN EN 13877-2 : Betonverhardingen - Deel 2: Functionele eisen, Brussel : NBN, 2004



CONCLUSIES

Betonconstructies die niet in direct contact komen met water, zijn meestal goed bestand tegen vorst-dooicycli, voor zover het beton volgens de regels van de kunst werd samengesteld en verwerkt. Delen van betonconstructies die langdurig in contact komen met water, zijn echter veel gevoeliger. Een goede weerstand eist de nauwgezette inachtneming van de regels van goed vakmanschap qua samenstelling, verwerking en nabehandeling.

Wanneer deze vorst-dooicycli gepaard gaan met het gebruik van strooizouten, moet het beton bovendien absoluut een netwerk van ingebrachte luchtbelletjes bevatten. Voor beton dat aan dergelijk agressieve omgeving is blootgesteld, kunnen de maatregelen qua samenstelling als volgt worden samengevat:

- minimaal cementgehalte: 375 kg/m³;
- W/C-factor f_{fi} 0,45 en watergehalte f_{fi} 180 l/m³;
- zand van goede kwaliteit en in beperkte hoeveelheid, zand/cementfactor (Z/C) ≤ 1,7
- gebruik van een luchtbelvormer in het beton voor een luchtgehalte van het verse beton in verhouding tot de D_{max} van het granulaat van:
 - minimaal 4 %-v lucht voor een D_{max} begrepen tussen 20 en 31,5 mm;
 - minimaal 5 %-v lucht voor een D_{max} begrepen tussen 11,2 en 16 mm;
 - minimaal 6 %-v lucht voor een D_{max} begrepen tussen 5,6 en 10 mm.

Bovendien moet het beton met zorg worden getrild en onmiddellijk daarna tegen uitdroging worden beschermd. Dit zijn noodzakelijke voorwaarden want het is de huid van de beton-elementen die sterk aan de agressie van de dooizouten is blootgesteld. De kenmerken van de betonhuid zijn nauw verbonden aan de uitvoering (trillen, oppervlakafwerking, rijping).

Wordt in de winter gewerkt, dan mag niet worden gebetonneerd bij een temperatuur van minder dan of gelijk aan 1 °C en moeten voorzorgsmaatregelen worden genomen (isolatie, enz.) voor het geval de temperatuur binnen de 72 uur na de verwerking van het beton onder 5 °C daalt. Op beton dat minder dan 6 weken oud is, moet het strooien van dooizouten worden verboden.

Ten slotte kan de weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten van te poreus beton, worden verbeterd door het oppervlak met een impregneermiddel te behandelen.

foto: Manwolste
cover: Pazham
(stockfreeimages.com)



T-4

Dit bulletin is een publicatie van :
FEBELCEM
Federatie van de Belgische Cementnijverheid
Vorstlaan 68 - 1170 Brussel
tel. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70
www.febelcem.be
info@febelcem.be

Auteur : ir. C. Ployaert

Wettelijk depot :
D/2012/0280/06

V. u. : A. Jasienski

BIBLIOGRAFIE

- [1] JASIENSKI A.
Vorst- en dooibestendigheid van betonverhardingen, Dossier Ciment, bulletin n°2, FEBELCEM, 1994
- [2] NEVILLE A.
Propriétés des bétons, Paris: Eyrolles, 2000
- [3] La durabilité des bétons — Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Association Technique de l'industrie des Liants Hydrauliques, Paris: Presse de l'école des ponts et chaussées, 2008
- [4] Handleiding voor de toepassing van luchtbelvormers in wegbeton. Toepassing, mengselontwerp en keuring, Opzoekingscentrum voor de Wegenbouw R 73 / 02, Brussel, 2002
- [5] HONDERMARCQ H.
Omzendbrief BRA/591/6 n° 496 217 : Winterdienst, strooien op pas aangelegde betonwegen, Ministerie van Openbare werken - Bestuur der Wegen, Brussel, 1973
- [6] PLOYAERT C.
Scheurvorming beperken: noodzakelijke voorwaarde voor duurzaam beton, Dossier Ciment, bulletin T-3, FEBELCEM, 2010

infobeton.be

