

PRAKTISCHE HANDLEIDING

Ontwerp en uitvoering van duurzaam beton
Een publicatie van Holcim (België) N.V.



Inhoud

1. De bestanddelen van beton

1.1	Cement	6
1.2	Aanmaakwater	18
1.3	Granulaten	20
1.4	Hulpstoffen	26
1.5	Toevoegsels en toevoegingen	30

2. Van vers beton tot verhard beton

2.1	Classificatie van beton	36
2.2	Verwerkbaarheid en consistentie	43
2.3	Samenstelling en formulering van beton	46
2.4	Productie en transport	51
2.5	Bekisting	53
2.6	Verpompen van beton	55
2.7	Storten en verdichten	57
2.8	Nabehandeling	59
2.9	Betonneren bij warm weer	62
2.10	Betonneren bij koud weer	65

3. Speciale betonsoorten

3.1	Beton voor vloeren	70
3.2	Zelfverdichtend beton	75
3.3	Vezelversterkt beton	80
3.4	Zichtbeton	84
3.5	Wegenbeton	90
3.6	Hogesterktebeton	94
3.7	Beton voor diepfunderingen	99

Inhoud

4. Oorzaken en preventie van betonschade

4.1	Ontmenging	104
4.2	Krimp en scheurvorming	105
4.3	Corrosie van de wapening	112
4.4	Uitbloeiingen	116
4.5	Aantasting door vorst en dooizouten	118
4.6	Externe sulfaataantasting	121
4.7	Interne sulfaataantasting	122
4.8	Chemische aantasting	123
4.9	Alkali-silica reactie	125
4.10	Brandweerstand	128
4.11	Benaderingen van de duurzaamheid van beton	129

5. Veiligheid - Duurzame ontwikkeling

5.1	Beton en duurzame ontwikkeling	132
5.2	Gezondheid en veiligheid	136

6. Begrippenlijst

7. Bibliografie, normen en nuttige links

Copyright by

Holcim (België) N.V.

Auteurs

Holcim (België), Technical Support Center:

Geert De Mets

Thibaut Mercenier (coördinatie)

Steven Schaerlaekens

Dank voor hun bijdrage

Peter Allaert

Séverine Baudoin

Eric Fosseur

Jean-Marc Vanbelle

2^e editie 2018

"Holcim kan niet aansprakelijk worden gesteld voor een verkeerde toepassing of interpretatie van de inhoud van deze handleiding.

Aarzel niet om contact met ons op te nemen indien u vragen heeft"

De productie en verwerking van beton is in alle stadia onderworpen aan de regels der kunst. Met deze Praktische Handleiding willen wij deze bijeenbrengen en voor iedereen toegankelijk maken. Daarnaast bevat deze handleiding ook informatie en algemene richtlijnen uit de gebruikelijke handboeken en referentiewerken.

Deze Praktische Handleiding is bedoeld voor iedereen die te maken heeft met het ontwerp, de productie en de verwerking van zowel stortklaar als geprefabriceerd beton. Ook bouwheren en voorschrijvers hebben er alle belang bij deze informatie en aanbevelingen te lezen.

In het algemeen wordt beton beschouwd als een robuust materiaal met een uitzonderlijke duurzaamheid. Als er her en der toch schade optreedt, dan wordt die meestal veroorzaakt door een ontwerpfout of door een onoordeelkundige verwerking van beton.

De Praktische Handleiding wil een bijdrage leveren om dergelijke "fouten" te voorkomen. Bij het doornemen

ervan zal het duidelijk worden dat men door de toepassing van eenvoudige methodes en door de naleving van traditionele regels zonder al te grote moeilijkheden een duurzaam kwaliteitsbeton kan bekomen.

Voor specifieke projecten kan het evenwel nodig zijn om complexe constructiemethodes toe te passen. Om dit met succes te doen, moeten de uitvoerders beschikken over een grote vakbekwaamheid en moeten er doorgedreven controles worden uitgevoerd op de verwerking en de kwaliteit van het beton. In dergelijke gevallen staat het ervaren team van technische adviseurs van Holcim (België) ter beschikking van de gebruikers.

Deze tweede uitgave van de Praktische Handleiding werd uitgebreid met hoofdstukken over speciale betonsoorten. Tevens werd aandacht besteed aan de veiligheidsaspecten van het werken met (vers) beton en aan de principes van duurzaam bouwen. De begrippenlijst op het einde brengt duidelijkheid omtrent een aantal begrippen die in de betonwereld gebruikt worden. Wij nemen met plezier uw commentaren of voorstellen ter verbetering in ontvangst.



De bestanddelen van beton

1.1

Cement

1.2

Aanmaakwater

1.3

Granulaten

1.4

Hulpstoffen

1.5

Toevoegsels en toevoegingen



1.1 Cement

Algemeen

Cement is een hydraulisch bindmiddel. Het is immers een stof die, na contact met water, zal uitharden zowel boven als onder water. De verharde cementsteen ontwikkelt een belangrijke mechanische sterkte en is niet oplosbaar in water.

Cementen die in België worden geproduceerd beantwoorden aan de eisen van de Europese norm NBN EN 197-1 (Cement: Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten). De beoordeling van de conformiteit van cement aan deze norm wordt beschreven in de norm NBN EN 197-2 en de bijbehorende proeven worden uitgevoerd volgens de normenreeks NBN EN 196.

Historiek

Tot aan onze moderne tijd was cement meestal een bindmiddel op basis van kalk, gemengd met andere stoffen zoals gebakken klei onder de vorm van gemalen pannen of bakstenen. Hierdoor kreeg het bindmiddel hydraulische eigenschappen. Men voegde soms ook natuurlijke puzzolanen toe (vulkanische assen van Pozzuoli in de regio van Napels, Italië).

Het onderzoek naar de hydrauliteit van kalk start op het einde van de 18e eeuw en leidt omstreeks 1840 tot de productie van de eerste moderne cementen.

In 1796 ontdekt James Parker, op het eiland Sheppey in Groot-Brittannië, een snelcement (een uiterst hydraulische kalk of een natuurlijk cement met snelle binding gebrand bij 900°C, zoals de traditionele kalk) dat hij "romeins cement" noemt.

In 1817 ontwikkelt Louis Vicat de theorie van de hydrauliteit van kalk. Hij geeft daarbij precieze indicaties van de verhouding kalk op silicium die nodig is opdat het mengsel, na branden en malen, effectief een kunstmatig geproduceerd hydraulisch bindmiddel wordt. Hij publiceert zijn bevindingen zonder een patent neer te leggen.

In 1824 legt de Engelsman Joseph Aspdin een patent neer voor de productie van een hydraulische kalk met snelle binding die hij de handelsnaam "Portlandcement" geeft omdat de kleur van zijn product erg lijkt op de beroemde natuursteen van het schiereiland Portland aan het Kanaal.

In 1840 ontdekt Louis Vicat de principes van de hydrauliteit van cement: het branden bij de fusietemperatuur van 1450°C die toelaat klinker te maken en het gebruik van calciumsulfaat als bindingsregelaar. De industriële productie van moderne cementen kan hierdoor beginnen.



Fig 1.1.1
Algemeen
beeld van een
cementfabriek

1.1 Cement

De bestanddelen van cement

Cement, zoals gedefinieerd in de Europese norm NBN EN 197-1, is samengesteld uit verschillende grondstoffen. De hoofdbestanddelen die in onze regio worden gebruikt zijn Portlandklinker, vliegas, hoogovenslak en kalksteen.

Klinker (K)

Bij de productie van Portlandklinker is het nodig een mengsel van grondstoffen te maken met een specifieke korrelgrootte en chemische samenstelling (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 en Fe_2O_3) en dat te branden tot aan de fusietemperatuur van 1450°C .

Afhankelijk van het vochtgehalte van de kalksteen zal de productie van klinker gebeuren volgens de "natte weg" of de "droge weg". In het algemeen onderscheidt men 3 etappes in de productie van klinker:

Extractie van de grondstoffen

Om in de "droge weg" 1 ton klinker te maken is ongeveer anderhalve ton aan grondstoffen nodig – kalksteen of mergel en klei – die bij het branden waterdamp en koolzuurgas (CO_2) zullen vrijgeven. In de groeve wordt de grondstof ontgonnen (fig 1.1.2) en verbrijzeld tot een maximale grootte van ongeveer 60 mm. Bij de "natte weg" wordt de kalksteen (onder zijn zachtere krijtform) onder water ontgonnen (fig 1.1.3).

Voorbereiden van de grondstoffen

In deze fase worden de verschillende grondstoffen gemengd in verhoudingen die overeenkomen met de optimale chemische samenstelling.

Bij het proces via "droge weg" worden de verschillende grondstoffen terzelfdertijd gemengd en tot een fijn poeder gereduceerd in een maal- of kogelmolen. Na dit proces bekomt men een poeder dat men zal homogeniseren om een uniforme kwaliteit te bekomen.

Bij productie via de "natte weg" worden de grondstoffen met water gemengd om een vloeibaar deeg te bekomen dat in grote kuipen wordt gehomogeniseerd.

Omzetting tot klinker door het branden

Het branden van het natte of droge mengsel in een oven bij 1450°C is de belangrijkste stap in de klinkerproductie (fig 1.1.4 en 1.1.5). Aan de uitgang van de draai-oven is de klinker een roodgloeiende materie die snel met lucht zal moeten gekoeld worden (fig 1.1.6).

Tijdens het branden zullen de oxides (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 en Fe_2O_3) van de grondstoffen zich combineren tot de vorming van nieuwe mineralen – aangeduid met C_3S , C_2S , C_3A en C_4AF (afkortingen zoals in de cementwereld gebruikt: C = CaO , S = SiO_2 , A = Al_2O_3 , F = Fe_2O_3) – die in staat zijn om met water te reageren (zie ook hydratatie van cement).



Fig 1.1.2
Zwaar materieel in actie in een kalksteengroeve



Fig 1.1.3
Extractie van krijt onder water

1.1 Cement

Om de noodzakelijke warmte te produceren, wordt gebruik gemaakt van nobele brandstoffen (steenkool, olie of natuurlijk gas) maar ook meer en meer van vervangingsbrandstoffen (solventen, gebruikte oliën, banden, plastics of gedroogd baggerslib).

Er bestaan varianten op deze processen :

- ▶ De "half-droge weg": het droge poeder wordt op grote draaischijven door bevochtiging omgezet naar korrels. Deze korrels worden dan op een mobiel rooster voorverwarmd voor ze in de draaioven worden gebracht.
- ▶ De "half-natte weg": het deeg, zoals beschreven bij de "natte weg", wordt gedeeltelijk ontwaterd in filterpersen en vervolgens gedroogd en gemalen vóór de materie in de oven wordt gebracht



Fig 1.1.4
Draaioven, het hart van de cementfabriek



Fig 1.1.5
Binnenkant van een draaioven

Latent hydraulische bestanddelen

In aanwezigheid van water en in een basisch milieu – als gevolg van de vrijgave van kalk tijdens de hydratatie van klinker – zullen latent hydraulische stoffen reageren tot vorming van reactieproducten die vergelijkbaar zijn met de hydraten van Portlandklinker. Deze reactie zal echter trager verlopen dan die van Portlandcement.

Hoogovenslak (S)

Hoogovenslak (fig 1.1.7) is een restproduct van de staalindustrie. De productie ervan vergt de bouw van specifieke installaties (granulator) waarbij de vloeibare slak bruusk wordt afgekoeld (afgeschrikt) tot een korrelig materiaal met latent hydraulische eigenschappen.

In de cementfabriek zal de gegranuleerde slak gedroogd worden en samen met de Portlandklinker gemalen worden in doseringen die variëren van 6 tot 95% voor de productie van Portlandslakcement (CEM II, tot 35% slak) of hoogovencement (CEM III, tot 95% slak).

Puzzolane bestanddelen

Puzzolane bestanddelen kunnen natuurlijk zijn, zoals puzzolanen, of artificieel, zoals vliegias of silica fume (ook micro-silica genoemd).

In de eerste fase van de hydratatie zijn deze componenten inactief en vertragen ze dus in meer of mindere mate de sterkte-ontwikkeling van beton. In een tweede fase reageren ze traag met het vrijgekomen calciumhydroxide tot vorming van onoplosbare componenten, vergelijkbaar met de hydraten van Portlandklinker. Door de puzzolane reactie zullen deze bestanddelen de dichtheid en eindsterkte van de cementsteen verhogen.

1.1 Cement

Vliegias (V)

Vliegias is afkomstig van de verbranding van poederkool in thermische centrales (productie van elektriciteit). Hun kwaliteit hangt niet alleen af van de gebruikte brandstof (steenkool of bruinkool en eventuele bijstook) maar ook van het soort centrale en de exploitatie ervan. De kwaliteit van de vliegias kan daardoor sterk verschillen van de ene producent tot de andere.

Inerte bestanddelen

Kalksteen (L,LL)

Kalksteen wordt als een inert bestanddeel beschouwd in cement en is dus noch (latent) hydraulisch noch puzzolaan. Zijn toevoeging laat de verbetering toe van sommige fysische eigenschappen in de uiteindelijke toepassing. In functie van het gehalte organische koolstof van de kalksteen, wordt dit bestanddeel aangeduid als "L" of "LL".

De productie van cement

Om een cement met de gewenste eigenschappen te bekomen, worden de bestanddelen in een specifieke installatie gemalen tot de gewenste fijnheid (fig 1.1.8). Hun doseringen vallen binnen specifieke grenzen (tab 1.1.1) en steeds wordt een zekere hoeveelheid bindingsregelaar (meestal gips of anhydriet) toegevoegd. In sommige installaties worden de verschillende bestanddelen apart gemalen en nadien gemengd.



Fig 1.1.6
Klinker na het verlaten van de oven en de koeler



Fig 1.1.7
Gegranuleerde hoogovenslak

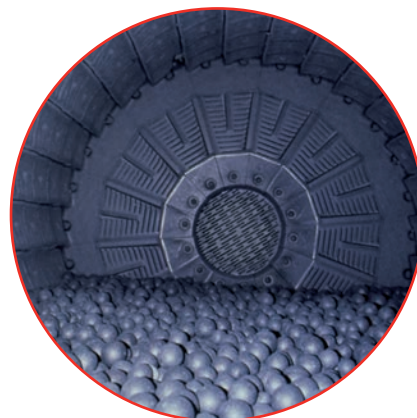


Fig 1.1.8
Binnenkant van een kogelmolen

1.1 Cement

Gebruikelijke cementtypes en hun sterkteklasse

De norm NBN EN 197-1 definieert de verschillende cementtypes en hun druksterkteklassen.

Het cementtype geeft informatie over de samenstelling van het cement (de aard en de hoeveelheid van de bestanddelen). De norm definieert 5 hoofdtypes (CEM I tot CEM V) en onderscheidt 27 verschillende cementtypes. Niet al deze types zijn op de Belgische markt beschikbaar.

Hoofdtypes	Benaming van de 27 producten (gewone cementen)		Samenstelling (in massaprocent ^{a)})												
			Hoofdbestanddelen										Nevenbestanddelen		
			Klinker K	Hoogovenslak S	Microsilica D ^{d)}	Natuurlijke puzzolanen P	Gebrande natuurlijke puzzolanen Q	Siliciumhoudende vliegas V	Calciumhoudende vliegas W	Gebrande leisteen T	Kalksteen L LL				
CEM I	Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Portlandslak-cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Portlandpuzzolaancement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5	
		Portlandvliegas-cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
			CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-W		80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5	
	Portlandleisteencement	CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5	
	Portlandkalksteencement	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5	
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5	
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5	
	Portlandcomposietcement ^{b)}	CEM II/A-M	80-88	← 12-20 →										0-5	
CEM II/B-M		65-79	← 21-35 →										0-5		
CEM III	Hoogovencement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Puzzolaancement ^{b)}	CEM IV/A	65-89	-	← 11-35 →					-	-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	← 36-55 →					-	-	-	0-5		
CEM V	Composietcement ^{b)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	← 18-30 →		-	-	-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	-	← 31-49 →		-	-	-	-	-	0-5		

Tab 1.1.1
Samenstelling van cement volgens NBN EN 197-1

^{a)} De waarden in de tabel zijn uitgedrukt ten opzichte van de som van de hoofd- en nevenbestanddelen, met uitsluiting van de calciumsulfaten (gips en anhydriet), die als bindingsregelaar gebruikt worden.
^{b)} In het geval van Portlandcomposietcement CEM II/A-M en CEM II/B-M, puzzolaancement CEM IV/A en CEM IV/B en composietcement CEM V/A en CEM V/B moeten de hoofdbestanddelen, anders dan klinker, in de aanduiding van het cement vermeld worden.
^{c)} Het gehalte microsilica is beperkt tot 10%

1.1 Cement

Cement wordt bovendien in 3 druksterkteklassen opgedeeld nl. 32,5 – 42,5 en 52,5 (tab 1.1.2). Deze 3 klassen worden aangevuld met drie subklassen in functie van de jonge druksterkte:

- ▶ normale beginsterkte (sterkteklasse aangevuld met de letter "N")
- ▶ hoge beginsterkte (sterkteklasse aangevuld met de letter "R")
- ▶ lage beginsterkte (sterkteklasse aangevuld met de letter "L"), enkel van toepassing voor cement van het type CEM III.

Sterkte-klasse	Druksterkte [N/mm ²]		
	Beginsterkte		Normsterkte
	2 dagen	7 dagen	28 dagen
32,5 L ^{a)}	-	≥ 12	≥ 32,5 ≤ 52,5
32,5 N	-	≥ 16	
32,5 R	≥ 10	-	≥ 42,5 ≤ 62,5
42,5 L ^{a)}	-	≥ 16	
42,5 N	≥ 10	-	
42,5 R	≥ 20	-	≥ 52,5 —
52,5 L ^{a)}	≥ 10	-	
52,5 N	≥ 20	-	
52,5 R	≥ 30	-	

Tab 1.1.2
Sterkteklassen volgens de norm NBN EN 197-1

^{a)} subklasse enkel voorbehouden voor het cementtype CEM III

Bijkomende eigenschappen volgens de norm NBN EN 197-1

Cement met beperkte hydratiewarmte

De norm NBN EN 197-1 duidt cementen met beperkte hydratiewarmte aan met de toevoeging "LH".

Een LH-cement is een cement waarvan de hydratiewarmte niet hoger is dan 270 J/g, gemeten na 7 dagen volgens de methode van de norm NBN EN 196-8 of na 41 uur volgens de norm NBN EN 196-9. Door deze karakteristiek zal de warmte-ontwikkeling in beton, als gevolg van de hydratatie van cement, beperkt worden.

LH-cementen worden in het bijzonder gebruikt voor de bouw van massieve structuren, waarbij de warmte-afgifte met de omgeving bijzonder traag verloopt.

Sulfaatbestand cement

De norm NBN EN 197-1 duidt sulfaatbestendige cementen aan met de toevoeging "SR".

Sulfaatbestand cement wordt gekenmerkt door een beperkt C₃A- en SO₃-gehalte (tab 1.1.3). SR-cementen worden gebruikt in beton dat in aanraking komt met grond of water dat veel sulfaten bevat (zie hoofdstuk 4.6).

Hoofdtypes	Aanduiding van de 7 producten (types gebruikelijk cement met hoge bestandheid tegen sulfaten)	C ₃ A in de klinker	Gehalte aan SO ₃
CEM I	Portlandcement met een hoge bestandheid tegen sulfaten	CEM I-SR0	= 0%
		CEM I-SR3	≤ 3%
		CEM I-SR5	≤ 5%
CEM III	Hoogovencement met een hoge bestandheid tegen sulfaten	CEM III/B-SR	≤ 4,0%
		CEM III/C-SR	≤ 4,5%
CEM IV	Puzzolaancement met een hoge bestandheid tegen sulfaten	CEM IV/A-SR ^{a)}	≤ 3,0% voor de klassen 32,5 N / 32,5 R / 42,5 N ≤ 3,5% voor de klassen 42,5 R / 52,5 N / 52,5 R
		CEM IV/B-SR	

Tab 1.1.3
Types en chemische eisen voor sulfaatbestand cement volgens NBN EN 197-1

^{a)} eisen op het vlak van de samenstelling

1.1 Cement

Bijkomende eigenschappen in België

Sommige cementen hebben eigenschappen die in België worden beschreven en niet in de Europese cement-norm. Zij worden hieronder opgesomd:

Cement met hoge bestandheid tegen sulfaten (HSR) volgens de norm NBN B12-108

"High Sulfate Resisting" (HSR) cement voldoet, volgens de Belgische ervaring, voor gebruik in toepassingen in contact met hoge gehalten aan sulfaten.

De volgende cementtypes zijn voorzien:

- ▶ Portlandcement CEM I-SR0 en CEM I-SR3
- ▶ Hoogovencement CEM III/B-SR en CEM III/C-SR
- ▶ Composietcement CEM V/A (S-V) HSR indien het gehalte $\text{CaO} \leq 50\%$
- ▶ Supersulfaatcement SSC HSR.

Cement met hoge aanvangsterkte (HES) volgens de norm NBN B12-110

CEM I "High Early Strength" (HES) cementen voldoen aan bijkomende eisen voor de minimale sterkte na 1 dag (24u) en laten dus een snelle ontlasting of ingebruikname toe:

- ▶ CEM I 42,5 R HES => druksterkte na 1 dag $\geq 10 \text{ N/mm}^2$
- ▶ CEM I 52,5 N HES => druksterkte na 1 dag $\geq 15 \text{ N/mm}^2$
- ▶ CEM I 52,5 R HES => druksterkte na 1 dag $\geq 20 \text{ N/mm}^2$

Cement met begrensd alkali-gehalte (LA) volgens de norm NBN B12-109

Het gebruik van "Low Alkali"-cement (LA) is een van de maatregelen om alkali-silica reactie (ASR) te voorkomen. Deze destructieve reactie kan zich voordoen in beton als aan de volgende 3 voorwaarden is voldaan:

- ▶ vochtige omgeving
- ▶ voldoende hoog alkaligehalte in het beton
- ▶ gebruik van alkali-gevoelige granulaten

De bijkomende eigenschap LA kan toegekend worden aan de cementtypes CEM I, CEM III/A, B of C en CEM V in functie van hun gehalte Na_2O -equivalent (tab 1.1.4).

Cement		Grenswaarde voor het gehalte aan Na_2O -eq (%)
CEM I LA		0,60
CEM III/A LA	$S^a) < 50\%$	0,90
	$S^a) \geq 50\%$	1,10
CEM III/B LA		1,30
CEM III/C LA		2,00
CEM V/A LA		1,50

^{a)} S is het slakgehalte van het cement in % ten opzichte van de som van de hoofd- en nevenbestanddelen

Tab 1.1.4
Maximaal gehalte aan Na_2O -equivalent van LA-cement volgens de norm NBN B12-109

1.1 Cement

Voorbeelden van genormaliseerde benamingen

CEM Cement	I Cement type I (Portlandcement)	52,5 Sterkteklasse 52,5	R Hoge beginsterkte	CE Conform NBN EN 197-1	HES Hoge aanvangsterkte	BENOR Conform PTV 603 en NBN B12-110			
CEM Cement	II Cement type II (Samengesteld Portlandcement)	B Gehalte toevoegsels tussen 21 en 35%	M Mengsel van toevoegsels	LL-S-V De toevoegsels zijn kalksteen, hoogovenslak en vliegas	32,5 Sterkteklasse 32,5	R Hoge beginsterkte	CE Conform NBN EN 197-1	BENOR Conform PTV 603	
CEM Cement	III Cement type III (Hoogoven cement)	B Gehalte toevoegsels tussen 66 en 80%	42,5 Sterkteklasse 42,5	N Normale beginsterkte	LH Beperkte hydratatiewaarde	SR Sulfaatbestand	CE Conform NBN EN 197-1	LA Cement met begrensd alkaligehalte	BENOR Conform PTV 603, NBN B12-108 en B12-109

Controle van de kwaliteit en de overeenkomstigheid met de normen

De kwaliteit van cement en zijn overeenkomst met de normen wordt gegarandeerd door een drievoudige procedure:

- ▶ kwaliteitsbeheerssysteem
- ▶ interne productiecontrole (zelfcontrole)
- ▶ externe controle door een erkend organisme.

Kwaliteitsbeheerssysteem

Holcim heeft een kwaliteitsbeheerssysteem geïmplementeerd, dat volgens de norm ISO 9001 gecertificeerd is. Zo kan gegarandeerd worden dat alle handelingen op een optimale, reproduceerbare en transparante manier verlopen.

Interne productiecontrole

Tijdens alle productiefasen, van de groeve tot de verzending, worden er monsters voor analyse genomen. Deze productiecontrole garandeert een hoge en constante kwaliteit.

De controlemethodes voor cement worden beschreven in de normenreeks NBN EN 196. De statistische verwerking van de resultaten van de monsternames bij de verzending moet beantwoorden aan de vereisten van de norm NBN EN 197-1.

Externe controle

De interne productiecontrole wordt aangevuld met een controle door een onafhankelijk extern controle-organisme, volgens de voorschriften van de norm NBN EN 197-2. Deze externe controle wordt uitgevoerd door een erkend organisme, op monsters die willekeurig genomen worden in de expeditie-silos van de fabriek.

Certificatie

De certificatie, uitgereikt door een door de overheid erkend organisme, geeft de eindgebruiker de garantie dat het cement dat hij gebruikt voldoet aan de normen. Het product krijgt daartoe een label. De verplichte **CE** - markering garandeert dat het cement voldoet aan de Europese normen. Het vrijwillige **BENOR** - merk garandeert dat het cement voldoet aan bepaalde bijkomende kenmerken die specifiek zijn aan in België gebruikte cementen (bijvoorbeeld: HSR, HES, LA,...) en voorziet bovendien in een verhoogde controlefrequentie.



Fig 1.1.9

Het CE en BENOR-merk geven aan dat het cement beantwoordt aan de geldende Europese en Belgische normen en dat hun kwaliteit door een extern organisme wordt gecontroleerd

1.1 Cement

Opslag en bewaring van cement

Wanneer cement lange tijd in silo's of zakken wordt opgeslagen zonder bescherming, absorbeert het cement het vocht uit de lucht. Daardoor kunnen klonters ontstaan hetgeen een invloed kan hebben op het verhardingsproces. Zolang de klonters gemakkelijk verpulverd kunnen worden tussen de vingers, is het sterkteverlies echter verwaarloosbaar.

Schijnbare volumieke massa cement :	
Niet verdicht (in silo)	900 - 1 250 kg/m ³ (naargelang het cementtype)
Verdicht (verpakt)	1 600 - 1 900 kg/m ³ (naargelang het cementtype en de duur en omstandigheden van bewaring)

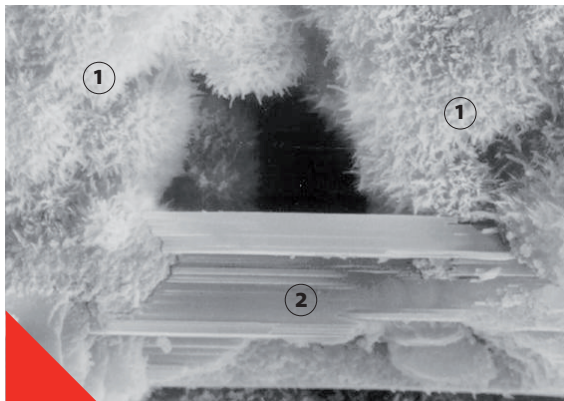


Fig 1.1.10
Beeld van gehydrateerde cementpasta genomen met de rasterelektronenmicroscoop

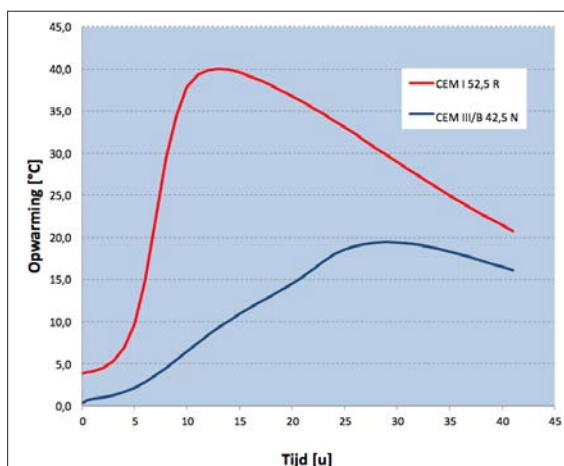


Fig 1.1.11
Temperatuurstijging van mortels aangemaakt met CEM I 52,5 R en CEM III/B 42,5 N

Hydratatie van cement

Eens gemengd met water zal cement binden (hydrateren). Dit proces omvat in feite een aaneenschakeling van complexe chemische reacties tussen het water, de bindingsregelaar, de mineralen van de klinker (C_3S , C_2S , C_3A en C_4AF) en de eventuele andere hoofdbestanddelen (slak, vliegash, ...) alsook de daarbij gevormde tussenproducten.

Sterk vereenvoudigd voorgesteld, leidt de hydratatie tot de vorming van 2 reactieproducten (fig 1.1.10) :

- ▶ naaldvormige calciumsilicaathydraten (CSH) die langzaam groeien en zich verstrengelen tot een compacte, sterke structuur (1)
- ▶ plaatvormige calciumhydroxiden (of gehydrateerde kalk $Ca(OH)_2$) die zeer alkalisch zijn en geen sterkte bezitten. Zij spelen een belangrijke rol bij de bescherming van wapeningsstaal tegen corrosie (2).

De hydratatie leidt tot een progressieve sterkte-ontwikkeling van de cementpasta en tot de vrijgave van een hoeveelheid warmte (fig 1.1.11). De dynamiek van deze reacties hangt heel sterk af van het cementtype en van zijn fijnheid en kan ook na 28 dagen nog verder gaan. Het is enkel bij conventie dat de eindsterkte reeds bij 28 dagen wordt vastgelegd.

Gedrag en gebruik van cement

Zoals eerder beschreven is cement een min of meer fijn gemalen mengsel van meerdere bestanddelen. Elk van deze zal aan het eindproduct specifieke eigenschappen geven (tab 1.1.5).

Klinker

Alle gebruikelijke cementen bevatten Portlandklinker. Is dit het enige hoofdbestanddeel, dan bekomt men een cement met grote reactiviteit en hoge sterkte. De ontwikkelde hydratatiwarmte zal meestal aanzienlijk zijn.

1.1 Cement

Hoogovenslak

Cementen die hoogovenslak bevatten zullen des te trager hun sterkte ontwikkelen naarmate het slakgehalte toeneemt. Hierdoor zijn meestal een langere bekistingstijd en nabehandeling nodig.

Toch hebben deze cementen een aantal kwaliteiten waardoor ze zeer geschikt zijn voor heel wat toepassingen:

- ▶ lagere hydratatiewarmte en dus aangewezen voor massabeton en betonneren bij warm weer
- ▶ hoge duurzaamheid waardoor het beton beter bestand is tegen zacht water, zeewater, sulfaathoudend water en tegen de indringing van chloorionen
- ▶ verminderd risico op uitbloeiingen (bij een hoog slakgehalte)
- ▶ goed behoud van de verwerkbaarheid
- ▶ zeer hoge mechanische sterkte op lange termijn
- ▶ verminderd risico op alkali-silica reactie
- ▶ heldere betonkleur.

Vliegas

Vliegas bestaat uit deeltjes die door hun fijnheid - te vergelijken met die van cement - en hun sferische vorm bijdragen tot een betere verwerkbaarheid van het beton. De toevoeging van vliegas aan cement geeft het beton ook een betere duurzaamheid. De verhardingsvertraging die vliegas veroorzaakt, beïnvloedt ook de ontwikkeling van de hydratatiewarmte waardoor de temperatuurpieken in geval van massabeton worden afgezwakt.

Het gebruik van luchtbelvormers samen met vliegas wordt afgeraden. De onverbrande koolstofdeeltjes in de vliegas verstoren immers de werking van deze hulpstof.

Kalksteen

Fijn kalksteenpoeder werkt als een "smeermiddel" en verbetert de verwerkbaarheid van beton, in het bijzonder wanneer het verpompt moet worden. De toevoeging van kalksteen verleent aan het cement een goed vermogen om water vast te houden, waardoor de risico's op bleeding worden beperkt en het verdichten wordt vergemakkelijkt.

Gebruiksgeschiktheid van cement

Hoewel de Europese betonnorm (NBN EN 206) alle gebruikelijke cementen als algemeen geschikt beschouwt, zijn toch niet alle cementtypes aanbevolen voor alle toepassingen in België. De norm NBN B15-001 bevat een "gebruiksgeschiktheids-matrix" voor alle cementtypes in functie van de omgeving waaraan het beton zal blootgesteld worden.

Bestanddeel	Werking	Chemische reactie	Effect op de eigenschappen van beton ↑ = Verhoging ↓ = Verlaging
Gegranuleerde hoogovenslak	Latent hydraulisch	In basisch milieu (de hydratatie van klinker doet de pH stijgen tot 13) en in aanwezigheid van water: vorming van hydraten vergelijkbaar met deze gevormd door de klinker.	↓ Porositeit ↑ Duurzaamheid ↓ Hydratatiewarmte ↓ Sterkte op jonge ouderdom ↑ Sterkte op lange termijn
Siliciumhoudende vliegas Silica fume Natuurlijke puzzolanen	Puzzolaan	Reactie met calciumhydroxide (Ca(OH)_2 , hydratatieproduct van klinker) en water: vorming van hydraten vergelijkbaar met deze gevormd door de klinker.	↑ Verwerkbaarheid ↓ Porositeit ↑ Duurzaamheid ↓ Hydratatiewarmte ↓ Sterkte op jonge ouderdom ↑ Sterkte op lange termijn
Kalksteen	Inert	Geen reactie of hoogstens een oppervlakkige reactie.	↑ Verwerkbaarheid ↓ Porositeit (opvuleffect)

Tab 1.1.5
Classificatie en effect van de andere bestanddelen

1.1 Cement



Fig 1.1.12
Aanbod ver-
pakt cement
van Holcim
(België)

Andere cementen

Metselcement

Metselcement, aangeduid als MC volgens de norm NBN EN 413-1, bevat klinker, een hoog gehalte toevoegsels (meestal kalksteen) en hulpstoffen. Ze zijn bijzonder geschikt voor het metselen van muren in baksteen of beton, voor het pleisteren of voor het plaatsen van tegels. Hun samenstelling laat toe een erg smeug mengsel te bekomen, wat de verwerking ten goede komt. Bovendien laat het daardoor weinig water los waardoor de mortel niet veel vocht zal verliezen aan de poreuze drager.

Cement met zeer lage hydratatiwarmte

Cement aangeduid met "Very Low Heat" (VLH) volgens de norm NBN EN 14216, heeft een hydratatiwarmte die niet hoger zal zijn dan de karakteristieke waarde van 220 J/g.

Slechts één sterkteklasse is bij dit cement voorzien: de klasse 22,5 (karakteristieke minimumwaarde 22,5 N/mm² en karakteristieke maximumwaarde 42,5 N/mm²).

De volgende 6 cementen kunnen potentieel VLH zijn:

- ▶ CEM III/B en CEM III/C
- ▶ CEM IV/A en CEM IV/B
- ▶ CEM V/A en CEM V/B.

1.1 Cement

Calciumaluminaatcement

Calciumaluminaatcement, aangeduid als CAC volgens de norm NBN EN 14647, heeft de volgende bijzondere eigenschappen:

- ▶ grote weerstand tegen sulfaten
- ▶ uiterst hoge beginsterkte zelfs bij lage omgevings-temperaturen
- ▶ weerstand tegen hoge temperaturen.

De hydratatie van calciumaluminaatcement is erg verschillend van die van Portlandcement. De gevormde calciumaluminaathydraten zijn afhankelijk van de hydratatietemperaatuur en kunnen tot meerdere jaren metastabiël zijn, afhankelijk van de omgevingstemperaatuur. Het gevolg is een zeer hoge initiële sterkte (na 6u minstens 18 N/mm² en na 24u minstens 40 N/mm²), het bereiken van een maximum en nadien een afname tot de eindsterkte. Deze "inversiereactie" kan meerdere jaren duren.

De calciumaluminaatklinker wordt gemaakt door de fusie van een specifiek mengsel van kalksteen en aluminiumhoudende grondstoffen.

Het gebruik van calciumaluminaatcement vraagt talrijke voorzorgsmaatregelen, onder meer het vermijden van pollutie met Portlandklinker of kalk.

Supersulfaatcement

Supersulfaatcement wordt aangeduid als SSC volgens de norm NBN EN 15743. Het hoofdbestanddeel van dit cement is hoogovenslak (S) ; het gehalte ervan bedraagt minstens 75%. De 2 andere bestanddelen zijn calciumsulfaat (5 à 20%) en een activeringssysteem. Dit cement kenmerkt zich in het bijzonder door een zeer lage hydratatiewarmte en een zeer hoge weerstand tegen agressieve stoffen, in het bijzonder sulfaten.

Wit cement

Wit cement is Portlandcement of Portlandkalksteencement zoals beschreven in de norm NBN EN 197-1. Wit cement wordt in specifieke productie-eenheden gemaakt op basis van uiterst zuivere grondstoffen (meestal krijt en witte klei (kaoliniet)) die slechts uiterst kleine hoeveelheden ijzer- en mangaanoxides mogen bevatten.

De productie van wit cement vergt een zeer grondige kwaliteitsopvolging in alle stadia van het proces om elke pollutie te vermijden, onder meer met ijzeroxide. Ijzeroxide speelt in het productieproces van gewone klinker de rol van smeltmiddel. De afwezigheid ervan zorgt ervoor dat het branden van de (witte) klinker bij hogere temperaturen moet gebeuren.

1.2 Aanmaakwater

Algemeen

Water speelt een dubbele rol in de betontechnologie. Enerzijds zorgt het voor de hydratatie van het cement ; anderzijds is het onmisbaar voor de verwerkbaarheid en goede verdichting van het beton.

Onder "totaal water" wordt de volledige hoeveelheid water bedoeld die het beton bevat. Het "effectief water" daarentegen omvat slechts:

- ▶ het aanmaakwater dat wordt toegevoegd bij het mengen
- ▶ het water dat zich aan het oppervlak van de granulaten bevindt
- ▶ het water aanwezig in hulpstoffen en eventuele toevoegsels (silica fume, kleurstoffen in oplossing, ...).

Het totale watergehalte omvat het effectieve watergehalte plus het water dat zich binnenin de granulaten bevindt (absorptiewater) en dat niet beschikbaar is om het mengsel te bevochtigen en aldus bij te dragen tot de verwerkbaarheid of de hydratatie van het cement.

Daarom wordt het effectief watergehalte gebruikt voor de berekening van de water-cement-factor (W/C).



Fig 1.2.1
Installatie voor de behandeling van spelwater in een betoncentrale: scheidingstoestel, bezinkbekkens en gebouw met filterpers

Eisen voor het aanmaakwater

Aanmaakwater mag geen belangrijke hoeveelheden bevatten van stoffen die eventueel kunnen reageren met het beton of de wapening.

Dergelijke stoffen kunnen meer bepaald leiden tot :

- ▶ een versnelling of vertraging van de binding en de verharding (bv. suiker, humuszuur)
- ▶ een ongecontroleerde en overmatige luchtbelvorming met sterkteverlies tot gevolg (bv. micro-organismen, oliën, vetten, suspensies, bepaalde minerale zouten)
- ▶ corrosie van de wapening.

De norm NBN EN 1008 hanteert als principe dat drinkbaar water zonder bijkomende controle gebruikt mag worden voor het aanmaken van beton.

De gebruiksgeschiktheid van aanmaakwater van andere oorsprong (oppervlaktewater, grondwater, proceswater) dient aangetoond te worden middels een analyse volgens de norm NBN EN 1008.

Vooreerst wordt nagegaan of het water helder en reukloos is, geen organisch materiaal bevat, een $\text{pH} \geq 4$ heeft en geen schuim vormt na schudden.

De volgende chemische kenmerken worden vervolgens geverifieerd :

- ▶ gehalte aan chloriden :
 - $\leq 500 \text{ mg/l}$ voor voorgespannen beton
 - $\leq 1\,000 \text{ mg/l}$ voor gewapend beton
 - $\leq 4\,500 \text{ mg/l}$ voor ongewapend beton
- ▶ gehalte aan alkaliën $\leq 1\,500 \text{ mg/l}$
- ▶ gehalte aan sulfaten $\leq 2\,000 \text{ mg/l}$.

Voor chloriden en alkaliën kan een hogere waarde aanvaard worden op voorwaarde dat de grenswaarden van de chloor- en alkalibalansen gerespecteerd worden.

Tot slot wordt nagekeken of het water geen stoffen bevat die de binding of de sterkte-ontwikkeling kunnen verstoren : suikers, fosfaten, nitraten, zink, lood.

1.2 Aanmaakwater

Gerecycleerd water (spoelwater)

Betoncentrales zijn vaak uitgerust met systemen om retour beton en spoelwater te behandelen. Deze systemen kunnen de granulaten recupereren en scheiden van het water dat rijk is aan fijne deeltjes.

In een eerste fase wordt het retour beton in een trommel gestort waar de granulaten worden gescheiden van de rest (fig 1.2.1). Het water met de fijne deeltjes wordt vervolgens behandeld volgens meerdere mogelijkheden (decantatie of bezinking (fig 1.2.2), filterpers (fig 1.2.3), reservoirs met roersystemen) en opnieuw gebruikt voor de aanmaak van beton. Regelmatige controles volgens NBN EN 1008 en in het bijzonder zijn bijlage 2.1 zijn vereist.

Het gebruik van gerecycleerd water met een dichtheid $> 1,01$ kg/liter vereist een aanpassing van de theoretische samenstelling (correctie water- en zandgehalte). Het gebruik van recyclagewater dat niet voldoende zuiver is kan een ongunstige invloed hebben op de verwerkbaarheid van beton.

Zeker in het geval van betonsoorten met bijzondere karakteristieken zoals zichtbeton, voorgespannen beton, beton met ingebrachte lucht, zelfverdichtend beton, hogesterktebeton ... moet deze invloed in rekening gebracht worden.

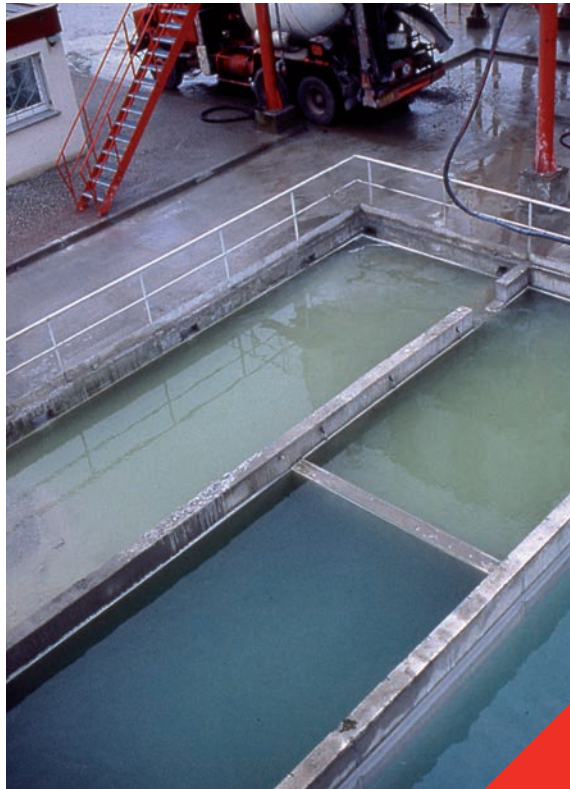


Fig 1.2.2
Bezinkings-
bekken voor
spoelwater
van een
betoncentrale



Fig 1.2.3
Filterpers

1.3 Granulaten

Algemeen

Onder granulaten verstaat men het geheel van korrelige materialen - van natuurlijke of kunstmatige oorsprong of afkomstig uit recyclage - die gebonden worden door het cement. De granulaten nemen ongeveer drie vierden van het volume van beton in en vormen er het "inert skelet" van. De eigenschappen van vers en verhard beton, zoals de druksterkte en de duurzaamheid, hangen in sterke mate af van de eigenschappen van de gebruikte granulaten.

Zoals geïllustreerd in tabel 1.3.1 maakt men een onderscheid tussen drie soorten granulaten: zand (rond of gebroken), grof granulaat (grind of steenslag, waarbij de term grind wordt voorbehouden voor materiaal van alluvionnaire oorsprong, doorgaans afgerond) en granulaatmengsels (mengsels van zand en grof granulaat, ook "all-in granulaat" genoemd).

Benaming	Definitie	Voorbeelden
Zand (rond of gebroken)	$D \leq 4 \text{ mm}$ en $d = 0$	0/1 0/2 0/4
Grof granulaat (grind of steenslag)	$D \geq 4 \text{ mm}$ $d \geq 2 \text{ mm}$	2/8 8/16 16/32 4/32
Granulaatmengsel (mengsel van zand en grof granulaat)	$D \leq 45 \text{ mm}$ en $d = 0$	0/32

Tab 1.3.1
Definitie en voorbeelden van de termen "zand", "grof granulaat" en "granulaatmengsel"

De term vulstof (of filler) wordt ook veel gebruikt. Hiermee wordt een granulaat aangeduid waarvan de korrels grotendeels door de zeef van 0,063 mm (63 μm) vallen en dat wordt toegevoegd aan beton om bepaalde eigenschappen te verkrijgen.

Kenmerken

De eisen met betrekking tot de kenmerken van granulaten voor beton worden gespecificeerd in de norm NBN EN 12620 "Granulaten voor beton" en in de PTV 411 "Codificatie van de granulaten".

De belangrijkste kenmerken van granulaten voor beton zijn :

- ▶ geometrische kenmerken (korrelgrootte, gehalte aan fijne deeltjes, vorm, zuiverheid van zanden, schelpgehalte)
- ▶ fysische kenmerken (Los Angeles, micro-Deval, volumieke massa en wateropsorping, weerstand tegen polijsting)
- ▶ chemische kenmerken (petrografie, classificatie van gerecycleerde granulaten, gehalte aan zwavel, oplosbare sulfaten, chloriden en elementen die de binding van beton kunnen verstoren)
- ▶ duurzaamheidskenmerken (vorst-dooibestandheid, alkali-silica reactiviteit, volumetrische stabiliteit).

1.3 Granulaten

Geometrische kenmerken

Korrelverdeling of granulometrische curve

De korrelverdeling heeft een bepalende invloed op de porositeit van het granulaatskelet (inert skelet) en bijgevolg ook op de dichtheid en de sterkte van het beton. Verder heeft ze een aanzienlijke invloed op de waterbehoefte en op de verwerkbaarheid van het beton.

De korrelverdeling geeft de dimensionele verdeling van de korrels, uitgedrukt in massaprocenten, die door een welbepaalde reeks van zeven gaan. Door de korrels te zeven met behulp van een reeks genormaliseerde zeven met vierkante mazen, verkrijgt men voor elke zeef een zeefrest, hetgeen toelaat om de kleinste korrelgrootte (d) en de grootste korrelgrootte (D) van het granulaat te bepalen en de korrelmaat uit te drukken als d/D . Aangezien alle korrelmaten van een granulaat voor normaal beton min of meer dezelfde volumieke massa hebben, volstaat het de korrelverdeling te bepalen in massaprocent. Hierna kan de korrelverdeling gevisualiseerd worden (zie de voorbeelden in fig 1.3.1 op de volgende bladzijde).

De zeven waaruit kan gekozen worden voor het aanduiden van de korrelmaat zijn opgenomen in tabel 1.3.2. In België wordt doorgaans de combinatie "Basisreeks + reeks 2" gebruikt.

Granulaten worden over het algemeen geleverd en gebruikt in welbepaalde korrelmaten (tab 1.3.3).

Wanneer een (tusseliggende) korrelmaat in een betonmengsel gedeeltelijk of volledig ontbreekt spreekt men van een "discontinue" korrelverdeling. Ter hoogte van de ontbrekende korrelmaat vertoont de korrelverdeling (granulometrische curve) een horizontaal of licht hellend gedeelte (fig 1.3.2). Meestal opteert men echter voor een continue korrelverdeling, omdat dit gunstig is voor de goede verwerkbaarheid van beton.

Basisreeks (mm)	Basisreeks + reeks 1 (mm)	Basisreeks + reeks 2 (mm)
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
-	5,6 (5)	-
-	-	6,3 (6)
8	8	8
-	-	10
-	11,2 (11)	-
-	-	12,5 (12)
-	-	14
16	16	16
-	-	20
-	22,4 (22)	-
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
-	-	40
-	45	-
-	-	56
63	63	63

Tab 1.3.2
Zeefopeningen voor de bepaling van de korrelmaat

Voorbeelden van korrelmaten	Aanduiding volgens NBN EN 12620
$\leq 0,063$ mm	Fijne deeltjes (filler)
Korrelmaten 0 – 4 mm 4 – 8 mm 8 – 16 mm 16 – 32 mm ≥ 32 mm	Zand Grof granulaat Grof granulaat Grof granulaat Grof granulaat

Tab 1.3.3
Gebruikelijke korrelmaten

1.3 Granulaten

Involed van het zand en het gehalte aan fijne deeltjes

De fractie 0-4 mm heeft een overheersende invloed op de kwaliteit van het totale mengsel van granulaten. De porositeit, de korrelverdeling en de vorm van deze fractie bepaalt voor een groot stuk de waterbehoefte van het inert skelet.

Een goed zand (of combinatie van zanden) voor beton heeft ongeveer een derde van zijn korrels tussen 0,250 en 0,500 mm. Daarom kan het noodzakelijk zijn om de fractie 0-4 mm samen te stellen op basis van gewassen rond zand (zeezand of rivierzand), gewassen gebroken zand en/of droog gebroken zand (voor magere mengsels).

Het gehalte aan fijne deeltjes ($\leq 0,250$ mm, ook "fijnstoffen" of "fijnen" genoemd) speelt een belangrijke rol. Ervaring heeft aangetoond dat het totale gehalte aan fijne deeltjes (cement, toevoegsels en het aandeel $\leq 0,250$ mm van de granulaten) bij voorkeur de waarden van tabel 1.3.4 benadert.

Dergelijk gehalte aan fijne deeltjes maakt het mogelijk om :

- ▶ beton vlot te verpompen
- ▶ een mooie afwerking te verkrijgen (zichtbeton)
- ▶ stabiel beton te bekomen (afwezigheid van bleeding en segregatie).

Wel moet men er op letten dat de fijne deeltjes zuiver zijn.

Maximale korrelgrootte van de granulaten (mm)	8	16	22,4	32
Gehalte fijne deeltjes (kg/m³ beton)	575	500	465	425

Tab 1.3.4

Aanbevolen gehalte fijne deeltjes ($\leq 0,250$ mm) voor pomp- en zichtbeton, in functie van de maximale korrelgrootte van het beton.

Fig 1.3.1
Voorbeeld van granulometrische curves van zand en grof granulaat

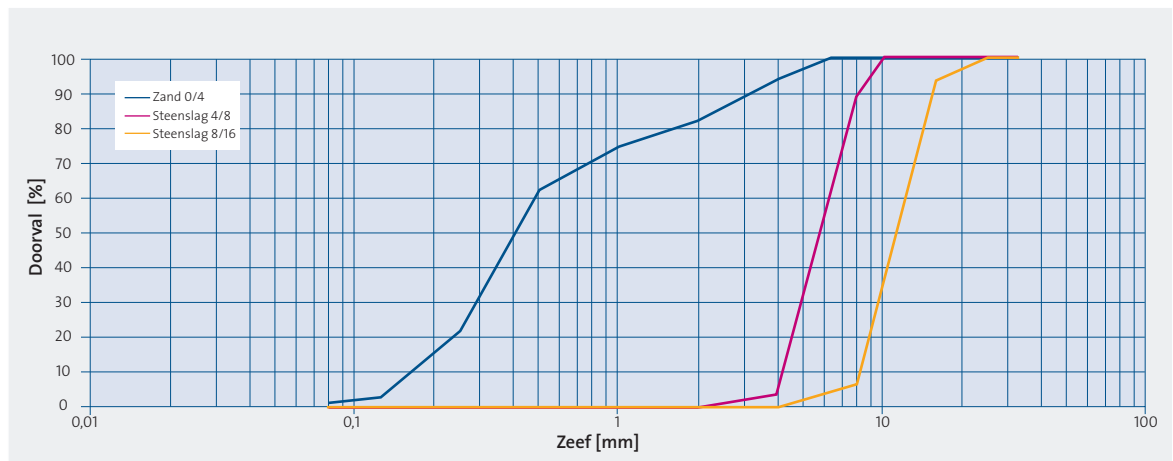
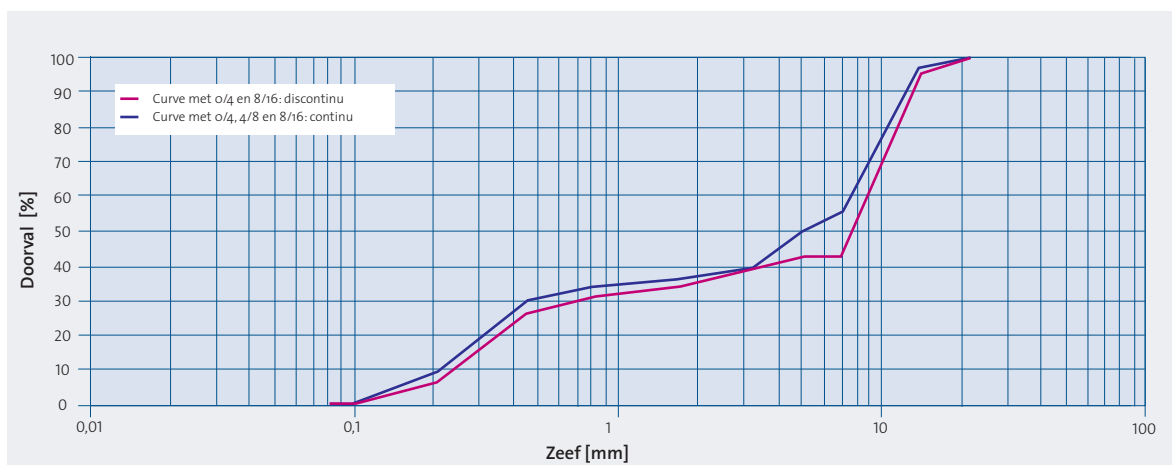


Fig 1.3.2
Granulometrische curve van beton met (continue curve) en zonder (discontinue curve) tussenfractie 4/8



1.3 Granulaten

Vorm

De porositeit en de vorm van de korrels, maar ook hun oppervlaktestructuur en de korrelverdeling hebben een aanzienlijke invloed op de waterbehoefte, de verwerkbaarheid en de stabiliteit (uitzwellen) van het beton (tab 1.3.5).

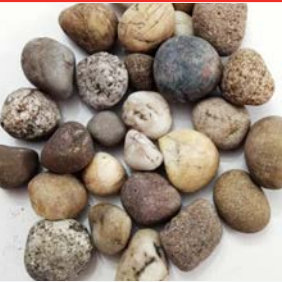



Ervaring heeft aangetoond dat een mengsel voor beton met uitsluitend gebroken grove granulaten zeer goed gebruikt kan worden. De gebroken granulaten verbeteren de mechanische sterkte van het beton (trek- en druksterkte, afslijting), maar hebben een ongunstige invloed op de verwerkbaarheid. De beperking van exploitierbare grindgroeven leidt tot een geleidelijke uitputting van de natuurlijke zand- en rolgroefafzettingen. Daarom zal in de toekomst steeds meer beroep gedaan worden op gebroken of gerecycleerde granulaten. Dit stelt geen enkel probleem op voorwaarde dat het volume cementpasta wordt aangepast.

Zuiverheid

Indien de granulaten onvoldoende zuiver zijn, heeft dit een nadelig effect op de kwaliteit van het beton. Zo kunnen de binding en de verharding verstoord worden of kan de vorstbestandheid verminderen. Daarom moeten sommige granulaten gewassen worden (fig 1.3.3) om organische stoffen, die gevaarlijk zijn voor de hydratatie van het cement, en kleideeltjes te verwijderen. De schadelijkheid van kleideeltjes wordt beoordeeld aan de hand van proeven zoals het zandequivalent en de methyleenblauwproef.



Fig 1.3.3
Industrieel wassen van grove granulaten

Gerolde granulaten		Gebroken granulaten	
			
Bolvormig	Afgeplat	Kubisch	Afgeplat
Afgerond		Hoekig	
Gladde oppervlakken		Ruwe oppervlakken	
←		→	
Stijgende waterbehoefte		Stijgende verwerkbaarheid en verdichtbaarheid	

Tab 1.3.5
Relatie tussen de vorm van de korrels en de eigenschappen van beton

1.3 Granulaten

Fysische kenmerken

Volumieke massa en wateropslorping

De volumieke massa van een granulaat wordt bepaald door de mineralogische oorsprong en de porositeit ervan (tab 1.3.6).

De bulkdichtheid (bepaald volgens NBN EN 1097-3) stemt overeen met de massa van het losgestort materiaal per volume-eenheid en wordt gebruikt voor het schatten van een voorraad. De reële volumieke massa (bepaald volgens NBN EN 1097-6) stemt overeen met de massa van het in een oven gedroogde materiaal ten opzichte van het volume dat dezelfde hoeveelheid materiaal inneemt in water, met inbegrip van de poriën (gesloten of toegankelijk voor water). De reële volumieke massa wordt gebruikt voor de samenstelling van beton.

Het vochtgehalte van de granulaten omvat het water aan het oppervlak van de korrels en het door de korrels geabsorbeerde water. Het vochtgehalte van zand ligt in het algemeen tussen 4 en 10% van de massa, terwijl het vochtgehalte van de grove granulaten zelden hoger is dan 5%. Het vochtgehalte van de granulaten moet in aanmerking genomen worden voor de berekening van de volumes granulaten en voor de berekening van het aanmaakwater.

Het door de granulaten geabsorbeerde water is niet beschikbaar voor de hydratatie en de vloeibaarheid van het beton. Het door grove granulaten geabsorbeerde water kan nefast zijn voor de vorstbestandheid.

Los Angeles

De Los Angeles coëfficiënt bepaalt de weerstand tegen verbrijzeling van een grof granulaat. Een lage LA coëfficiënt duidt op een goede weerstand tegen verbrijzeling.

Eventuele andere kenmerken

Voor bepaalde toepassingen kan het nodig zijn om specifieke bijkomende eisen te stellen: voor beton voor wegverhardingen worden bijvoorbeeld eisen opgelegd qua slijtvastheid (micro-Deval MDE) en qua weerstand tegen polijsting (Polished Stone Value PSV).

Tab 1.3.6
Classificatie van granulaten in functie van hun volumieke massa

Granulaten	Reële volumieke massa (kg/m ³)	Aard van de granulaten	Gebruik
Normale granulaten	2 550 – 2 800	Rivierafzettingen, gebroken granulaten	Gewapend en ongewapend beton, betonproducten
Zware granulaten	≥ 3 000	Bariet, ijzererts, hematiet, staalkorrels	Beton voor bescherming tegen straling
Lichte granulaten	≤ 2 000	Geëxpandeerde klei, schist of glas, puimsteen	Licht beton, isolatiebeton, hellingsbeton

1.3 Granulaten

Chemische kenmerken

Chloorionen

Het gehalte chloorionen dat oplosbaar is in water, moet gekend zijn om het chloridegehalte van het beton (de "chloridenbalans") te kunnen beoordelen.

Het chloridegehalte van beton moet beperkt worden om de risico's op corrosie van de wapening te beperken (zie hoofdstuk 4.3). Bepaalde chloorzouten versnellen bovendien de binding en verharding van beton. Ze zijn vooral te vinden in weinig of niet gewassen zeegranulaten.

Zwavel en oplosbare sulfaten

Het totale zwavelgehalte en het totale sulfaatgehalte zijn kenmerken die (in bepaalde regio's) belangrijk zijn om de invloed van een bepaald type granulaat op de duurzaamheid van beton te beoordelen, en meer bepaald het risico op secundaire ettringietvorming (zie hoofdstuk 4.6).

Daarbij valt op te merken dat voor gerecycleerde granulaten de proefmethode aangepast moet worden om enkel de in water oplosbare sulfaten te verkrijgen. De sulfaten aanwezig in de mortelfractie zouden immers vrijkomen door de zuuraantasting die toegepast wordt in de proefmethode voor natuurlijke granulaten, waardoor een aanzienlijk hoger gehalte zou bekomen worden dan het beoogde gehalte aan actieve sulfaten.

Met de aanwezigheid van ijzersulfide (pyriet, marcassiet ...) moet rekening worden gehouden bij beton waarvan het uitzicht een belangrijk kenmerk vormt (risico op roestvlekken).

Duurzaamheidskenmerken

Vorstbestandheid

Wanneer beton bestand moet zijn tegen vorst, moet de vorst-dooibestandheid van de grove granulaten verzekerd worden. Granulaten met een waterabsorptie $\leq 1\%$ en/of een $LA \leq 25$ worden beschouwd als niet-vorstgevoelig (zonder bijkomende proeven). Bepaalde granulaten kunnen echter een wateropsorping hebben $> 2\%$ en toch een afdoende vorstbestandheid bezitten.

De proef om de vorstbestandheid van granulaten te beoordelen bestaat erin met water verzadigde granulaten te onderwerpen aan vorst-dooi-cycli en daarna het massaverlies na zieving te bepalen.

Gevoeligheid voor alkali-silica reactie

De alkali-silica reactie wordt behandeld in hoofdstuk 4.9.

Reglementering

Sedert 1 juni 2004 zijn granulaten die op de markt gebracht worden onderworpen aan de verplichte CE-markering. De producent moet de prestaties van zijn granulaten ten opzichte van de norm NBN EN 12620 declareren. Een certificaat "Assessment and Verification of Constancy of Performance" attesteert deze verklaring. Een certificaat van niveau 4 komt overeen met een verklaring van de producent. Een certificaat van niveau 2+ impliceert bijkomend een bewaking en beoordeling van de zelfcontrole van de producent door een erkend organisme.

Certificatie

De vrijwillige BENOR-certificatie voor granulaten certificeert de codificatie van granulaten volgens PTV 411 alsook hun eventuele bijkomende kenmerken. Deze certificatie garandeert dat de productkenmerken voortdurend gecontroleerd en gerespecteerd worden door de producent alsook bevestigd worden door derde partijen (inspecteurs en laboratoria).

1.4 Hulpstoffen

Definitie en classificatie

Het gebruik van hulpstoffen komt tegemoet aan technische en economische overwegingen. Bepaalde prestaties van vers beton en verhard beton kunnen alleen bereikt worden met behulp van hulpstoffen. Door hulpstoffen te gebruiken kunnen de kosten voor mankracht, grondstoffen en mengenergie beperkt worden. Door de verwerkbaarheid van het beton te verbeteren laten hulpstoffen toe eenvoudigere verwerkingsmethodes toe te passen op de werf.

Het is echter nuttig om via voorafgaande proeven de doeltreffendheid van de hulpstoffen na te gaan.

De conformiteit van hulpstoffen voor beton wordt behandeld in de norm NBN EN 934-2.

Hulpstoffen bestaan uit organische, synthetische of natuurlijke moleculen en wateroplosbare zouten. Ze worden aan het beton toegevoegd tijdens het mengen. Door hun chemische of fysische werking veranderen deze stoffen bepaalde eigenschappen van vers of verhard beton, zoals bijvoorbeeld de verwerkbaarheid, de binding, de verharding of de vorstbestandheid.

Classificatie van hulpstoffen

Hulpstoffen	Belangrijkste effecten
Plastificeerders (of "water-reduceerders")	Ontvlokking van de cementkorrels Vermindering van de W/C-factor (verhoging van de mechanische kenmerken) Verbetering van de verwerkbaarheid en behoud in de tijd Verhoging van de samenhang van beton
Superplastificeerders (of "sterk water-reduceerders")	Sterke ontvlokking van de cementkorrels Sterke vermindering van de W/C-factor (sterke verhoging van de mechanische kenmerken) Sterke verbetering van de vloeibaarheid ; behoud in de tijd zeer variabel
Bindings- of verhardingsversnellers	Vermindering van de bindingstijd van beton Versnelling van de sterkte-ontwikkeling van beton Gebruik van beton tijdens de winter
Bindingsvertragers	Toename van de verwerkbaarheidsduur en de bindingstijd Regeling van de hydratatiewarmte Gebruik van beton tijdens de zomer en/of in geval van trage lossing
Luchtbelvormers	Bescherming van beton tegen de inwerking van vorst en doozouten door de vorming van een netwerk van micro-luchtbelletjes
Waterafstotende middelen	Vermindering van de capillariteit en de capillaire absorptie van beton Verbetering van de "intrinsieke waterdichtheid" van beton Mogelijkheid om bepaalde types van uitbloeiingen te verminderen

Tab 1.4.1
Synthese van de belangrijkste effecten van hulpstoffen

Dosering

In het algemeen worden hulpstoffen in kleine hoeveelheden en in vloeibare vorm toegevoegd tijdens het mengen. Het gewichtspercentage ligt doorgaans tussen 0,2 en 2% van de massa cement. De dosering moet in elk geval volgens de richtlijnen van de fabrikant gebeuren. De hoeveelheid water die via de hulpstof aan het betonmengsel wordt toegevoegd moet in rekening gebracht worden voor de W/C-factor.

De gebruikte doseersystemen (weegcellen in geval van gewichtsmatige dosering, pompen en debietmeters in

geval van volumetrische dosering) moeten aangepast zijn aan de voorziene doseringen en aan de viscositeit van de hulpstof. Het is immers van het grootste belang dat de hulpstof zeer precies kan gedoseerd worden.

Onder-doseringen leiden zeer snel tot een verlies van het gezochte effect ; over-doseringen kunnen ongewenste effecten veroorzaken zoals bindingsvertraging, segregatie, overmatige luchtinbreng met bijhorend verlies van druksterkte.

1.4 Hulpstoffen

Belangrijkste soorten hulpstoffen

Plastificeerders en superplastificeerders

Dit zijn veruit de meest gebruikte hulpstoffen voor beton. De plastificeerders zijn minder performant omdat ze minder geconcentreerd zijn of afkomstig zijn van hout- of maïservervaten. De krachtiger superplastificeerders bestaan uit kunstmatige (gesynthetiseerde) moleculen. De toeleveranciers van hulpstoffen richten hun onderzoeks-inspanningen vooral op deze laatste categorie: na de "melamines" (PMS) en de "naftalenen" (PNS), hebben nu de "polycarboxylaten" (PCP) en "polycarboxylaat-ethers" (PCE) nieuwe mogelijkheden gecreëerd voor de verwerking van beton. Hun gebruik dient steeds vergezeld te worden van een juiste hoeveelheid fijne deeltjes in het beton. De werkingwijze van deze hulpstoffen kan als volgt worden beschreven (fig 1.4.1):

- ▶ Bij een constante W/C-factor verbeteren superplastificeerders de verwerkbaarheid van het beton (A). Deze werking is vooral van belang voor de verlenging van de verwerkingstijd of om te betonneren bij warm weer. Het gebruiksgemak en dus ook de kwaliteit van het werk worden sterk verbeterd wanneer superplastificeerders op deze manier worden gebruikt.
- ▶ Bij eenzelfde verwerkbaarheid laten superplastificeerders toe om het aanmaakwater te verminderen en dus ook de W/C-factor (B). Met plastificeerders kan deze met tenminste 5% worden verminderd en met superplastificeerders met tenminste 12%. Het gevolg hiervan is een toename van de sterkte, de dichtheid en de duurzaamheid van het beton. Zowat alle eigenschappen van beton worden verbeterd wanneer superplastificeerders worden gebruikt om de hoeveelheid water te verminderen.
- ▶ In de praktijk wordt meestal een gecombineerde werking (C) toegepast, min of meer uitgesproken in de eerste of tweede zin.

Superplastificeerders zijn vooral van belang om de factoren kost, verwerkbaarheid en kenmerken van het beton te optimaliseren. Ze zijn onmisbaar geworden voor de realisatie van gewone betons en meer nog voor hogesterktebeton en zelfverdichtend beton.

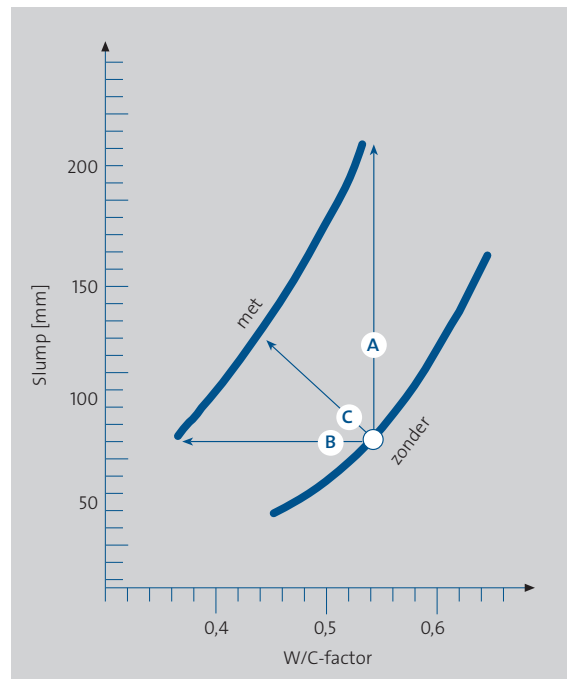


Fig 1.4.1
Effect van een superplastificeerder

Als neveneffecten van superplastificeerders moet de bindingsvertraging die optreedt bij een te hoge dosering vermeld worden alsook de moeilijkheid het luchtgehalte te regelen bij gebruik van luchtbelvormers. Een hoge dosering aan superplastificeerder kan ook leiden tot een belangrijke en ongewenste verhoging van de viscositeit van het beton.

Het is erg belangrijk om de compatibiliteit tussen de gebruikte cementen (en in mindere mate de granulaten) en de hulpstoffen na te gaan, vooral bij een hoge dosering of wanneer verschillende hulpstoffen gelijktijdig worden gebruikt.

Tot slot is het belangrijk om de werkingduur van superplastificeerders goed te kennen. Deze vermindert normaal gezien wanneer de temperatuur stijgt. Bij het stortklaar beton is het in België gebruikelijk om de superplastificeerder (gedeeltelijk) te doseren bij aankomst op de bouwplaats. In dat geval dient de precisie van het doseersysteem op de truckmixer bewaakt te worden, net zoals het respect van de mengtijd na toevoeging van de hulpstof (1 minuut/m³).

1.4 Hulpstoffen

Versnellers

Versnellers, soms onterecht antivriesmiddelen genoemd, zorgen voor een vroeger begin van de binding waardoor de hydratatiewarmte van het cement sneller vrijkomt. De meeste versnellers versnellen ook de verharding van het beton.

Ze laten dus toe om het beton sneller te ontkisten, te belasten of bloot te stellen aan vorst.

Het effect van versnellers is sterk afhankelijk van hun chemische samenstelling en die van het gebruikte cement. De allereerste versnellers, op basis van chloriden, worden vandaag alleen nog gebruikt in ongewapend beton omwille van hun corrosieve inwerking op de wapening.

Aangezien hun effect moeilijk te beheersen is, worden versnellers alleen nog gebruikt in bijzondere gevallen :

- ▶ spuitbeton
- ▶ betonstorten bij koud weer
- ▶ zeer korte ontkistingtijden
- ▶ betonstorten in contact met stromend water
- ▶ verankeringen
- ▶ herstelwerken
- ▶ afdichten van waterinfiltraties en waterlekken.

Vertragers

Deze hulpstoffen vertragen het begin van de binding van het cement en verlengen daardoor de verwerkingsduur van het beton. Vertragers worden vooral toegepast in de volgende gevallen :

- ▶ betonneren bij warm weer
- ▶ vervoer over lange afstanden
- ▶ betonneren van grote volumes of grote oppervlakken
- ▶ vermijden van stortnaden bij geplande stortonderbrekingen (geen discontinuïteit tussen de stortfasen)
- ▶ spreiding in de tijd van het vrijkomen van hydratatiewarmte in massief beton.

Beton met vertrager verhardt minder snel op jonge leeftijd maar de druksterkte na 28 dagen is doorgaans hoger dan bij beton zonder vertrager. Omwille van de vertraagde verharding in de aanvangsfase moet bijzondere aandacht worden besteed aan de nabehandeling.

Omdat het beoogde effect sterk afhangt van het soort vertrager, maar ook van het gebruikte cement en de omgevingstemperatuur, moeten er altijd voorafgaande proeven worden uitgevoerd bij verschillende temperaturen.

Luchtbelvormers

Luchtbelvormers zorgen voor een dicht netwerk van stabiele micro-luchtbelletjes in beton. Op die manier wordt de bestandheid van het beton tegen vorst en dooizouten sterk verbeterd (zie hoofdstuk 4.5). Het beton is daardoor ook beter verwerkbaar. Een ongewenst effect van luchtbelvormers is het verlies aan druksterkte.

De luchtbelletjes die in het vers beton worden ingebracht, blijven ook aanwezig in het verhard beton. Bij vorst nemen ze een deel van het water op dat in beweging wordt gezet in de capillairen. Het risico dat het beton gaat afschilferen door de druk van het ijs, wordt daardoor verminderd (fig 1.4.2). De micro-luchtbelletjes onderbreken daarnaast de continuïteit van de capillairen in het beton en beperken zo het wateropsloppingsvermogen.

In de meeste gevallen volstaat een zeer kleine hoeveelheid hulpstof voor het gewenste luchtgehalte. Het luchtgehalte hangt niet alleen af van de soort en de dosering van de hulpstof, maar ook van een ganse reeks andere factoren: cementsoort, aard en korrelverdeling van het zand, consistentie, temperatuur, intensiteit en duur van het mengen, transporttijd, ... De compatibiliteit van nieuwe betonmengsels moet zeker worden gecontroleerd aan de hand van geschiktheidsproeven.

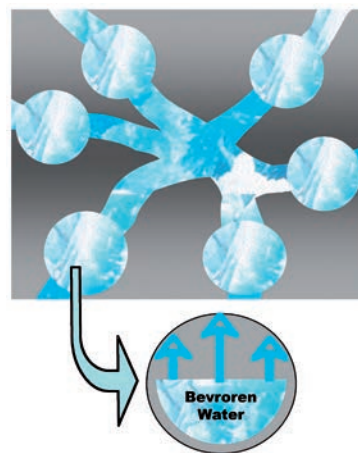


Fig 1.4.2
De luchtbelletjes vullen de rol van expansievat

1.4 Hulpstoffen

Praktische regel

1% ingebrachte lucht in het beton stemt overeen met een vermindering van de hoeveelheid aanmaakwater met ongeveer 5 liter per m³ en heeft hetzelfde effect op de verwerkbaarheid als 10 tot 15 kg fijne deeltjes.

1% ingebrachte lucht boven de 2% stemt overeen met een vermindering van ongeveer 5% van de druksterkte na 28 dagen.



Fig 1.4.3

Lokaal voor de opslag van hulpstoffen

Algemene regels voor het gebruik van hulpstoffen

Alhoewel hulpstoffen toelaten om interessante eigenschappen te bekomen, mag men nooit uit het oog verliezen dat ze het systeem cement-water-granulaten complexer maken. Daarom vereist het gebruik van hulpstoffen extra aandacht van de betrokkenen :

- ▶ De combinatie van bepaalde hulpstoffen kan ongewenste reacties veroorzaken (het risico neemt bovendien toe bij gebruik van hulpstoffen van verschillende fabrikanten).
- ▶ Behalve wanneer anders opgegeven, moeten hulpstoffen in de menger worden toegevoegd na het aanmaakwater, wanneer het mengsel reeds voldoende bevochtigd is.
- ▶ De opslag van hulpstoffen dient te gebeuren in een lokaal dat beschermd is tegen vorst en zonnestraling. De gebruiksdatum dient gerespecteerd te worden en hulpstoffen waarbij ontmenging is opgetreden mogen niet meer gebruikt worden.

Samenvatting

Effect op*	Plastificeerder	Superplastificeerder	Versneller	Vertrager	Luchtbelvormer
Consistentie	+	++			+
Behoud van verwerkbaarheid	++	+	-	+	+
Ontmenging / bleeding	+	+/-	+	-	+
Binding - versnelling	-		++	-	
Binding - vertraging	+		-	++	
Gedrag bij verpompings	+	+			+/-
Beginsterkte		+	++	-	-
Eindsterkte	+	++	-	+	-
Permeabiliteit	+	+			
Bestandheid tegen vorst en doozouten	+	+			++
Betonstorten bij koud weer	-	+	+	-	
Betonstorten bij warm weer	+	+	-	++	

++ beoogd effect + mogelijk gunstig effect - risico op ongewenste effecten

Tab 1.4.2

Synthese van het effect van hulpstoffen

* Deze tabel beschouwt de algemene trends van het verwachte gedrag. Gezien het uitgebreide gamma producten dat door de producenten van hulpstoffen voor beton wordt voorgesteld (voornamelijk op het vlak van superplastificeerders) kunnen bepaalde effecten afwijken.

1.5 Toevoegsels en toevoegingen

Algemeen

Toevoegsels

Zoals gezien in het hoofdstuk cement kunnen tijdens de productie ervan bepaalde hoofdbestanddelen een deel Portlandklinker vervangen en zo bijzondere karakteristieken geven aan het cement (verbeterde duurzaamheid, lage hydratatiewarmte ...). In de cementfabriek worden ze aan het cement toegevoegd hetzij door gezamenlijke maling hetzij door menging met gemalen klinker. Op die manier wordt niet enkel een precieze en constante dosering gerealiseerd maar ook een homogene verdeling van de bestanddelen in het cement.

Van de reeks hoofdbestanddelen in cement kunnen sommigen worden gebruikt als toevoegsel tijdens de productie van beton. Men heeft dan de mogelijkheid om de verhoudingen van het mengsel cement-toevoegsel vrij te kiezen en aan te passen aan de precieze eisen van de samenstelling. Dit voordeel komt echter niet zonder een aantal nadelen. Vooreerst zijn bijkomende silo's, doseerinstallaties en controles nodig voor de toevoegsels. Vervolgens hebben bepaalde toevoegsels de neiging om klonters te vormen tijdens een lange opslag. Tot slot vergt de homogene menging van de verschillende poeders soms een langere mengtijd.

De norm NBN EN 206 definieert 2 soorten toevoegsels:

- ▶ toevoegsels van het type I (quasi inert)
- ▶ toevoegsels van het type II (latent hydraulisch of puzzolaan).

Toevoegsels van het type II mogen in rekening gebracht worden in het bindmiddelgehalte volgens het "k-waarde" concept. De k-waarde is afhankelijk van het type toevoegsel en zijn chemische reactiviteit (tab 1.5.1).

Andere concepten worden in de norm NBN EN 206 beschreven om rekening te houden met het puzzolaan of latent hydraulisch karakter van bepaalde toevoegsels (zie hoofdstuk 4.11).

Toevoegingen

Toevoegingen zijn producten die worden verwerkt in het beton en die geen cement, granulaten, aanmaakwater, hulpstoffen of toevoegsels zijn. Het gaat bijvoorbeeld over vezels, producten die de viscositeit of de thixotropie verhogen, kleurstoffen ... Voor toevoegingen mag het k-waarde concept niet worden toegepast.

Eigenschappen van reactieve toevoegsels

Vliegas

De eigenschappen en voordelen van vliegas werden besproken in hoofdstuk 1.1.

De eisen met betrekking tot vliegas voor beton worden bepaald in de norm NBN EN 450-1. Vliegas kan worden gebruikt als een toevoegsel type II. De k-waarde is afhankelijk van het gebruikte cement en varieert van 0 tot 0,4.

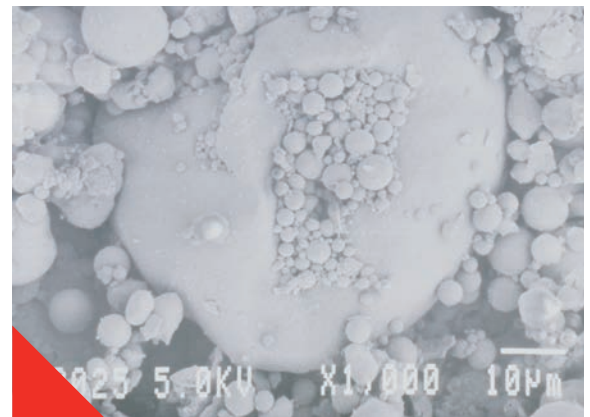


Fig 1.5.1

Beeld van vliegas onder een electronenmicroscop

Gemalen hoogovenslak

De eigenschappen en voordelen van hoogovenslak werden besproken in hoofdstuk 1.1. De eisen met betrekking tot gemalen hoogovenslak voor beton worden bepaald in de norm NBN EN 15167-1. Gemalen hoogovenslak kan worden gebruikt als een toevoegsel type II met een k-waarde op voorwaarde dat deze beschikt over een technische goedkeuring ATG volgens de regels gedefinieerd in de goedkeuringsleidraad "Gemalen hoogovenslak - LMA". Het gebruik van gemalen hoogovenslak is beperkt tot beton op basis van CEM I van klasse 42,5 of hoger.

1.5 Toevoegsels en toevoegingen

Toevoegsel	Cementtype	Coëfficiënt k	Maximale hoeveelheid toevoegsel die in rekening kan gebracht worden voor het k-concept (ten opzichte van cement)	Maximale hoeveelheid toevoegsel toegelaten in het betonmengsel (ten opzichte van cement)
Vliegas Categorie A of B volgens NBN EN 450-1	CEM I	0,4	33%	50% ^{a)}
	CEM II/A-S en B-S	0,2	25%	40% ^{a)}
	CEM II/A-LL en B-LL	0	0%	40% ^{a)}
	CEM III/A	0,2	25%	40% ^{a)}
	CEM III/B	0	0%	40% ^{a)}
Silica Fume klasse 1 volgens NBN EN 13263-1	CEM I	2,0 ^{b)}	11%	/
Gemalen hoogovenslak volgens NBN EN 15167-1 en met een ATG "LMA"	CEM I 42,5 N	0,9	45% ^{c)}	70% ^{d)}
	CEM I 42,5 R of CEM I 52,5 N/R	1,0		

Tab 1.5.1

In rekening brengen van toevoegsels type II volgens NBN EN 206 en NBN B15-001

^{a)} max. 25% voor vliegas van categorie B in omgevingsklasse EE2-EE3-EE4-ES2-ES4

^{b)} k = 1,0 indien W/C > 0,45 in omgevingsklasse EE2-EE3-EE4-ES2-ES4

^{c)} max. 20% in omgevingsklasse EE2-EE3-EE4-ES2-ES4

^{d)} ten opzichte van de massa cement + LMA

Silica fume

Door zijn extreme fijnheid en hoog siliciumgehalte beschikt silica fume (ook "micro-silica" of "silicarook" genoemd) over een zeer hoge puzzolane activiteitsindex. De k-coëfficiënt is 1 of 2, afhankelijk van het geval (zie NBN EN 206). Silica fume moet voldoen aan de eisen van de norm NBN EN 13263-1.

Omdat silica fume ongeveer 100 maal fijner is dan cement, kan de dosering of de homogeniteit bij het aanmaken van beton problemen opleveren.

Silica fume is beschikbaar in de volgende twee vormen :

- ▶ in poedervorm : vraagt een langere mengtijd
- ▶ in watersuspensie: eenvoudig te doseren (opgelet voor vorst en sedimentatie tijdens de opslag).

Een dosering van 5 à 10% silica fume (in verhouding tot het cementgewicht) geeft een aanzienlijke verbetering van bepaalde eigenschappen van het beton :

- ▶ verhoging van de cohesie en het watervasthoudend vermogen van vers beton en dus een vermindering van het risico op ontmenging
- ▶ voor spuitbeton: belangrijke vermindering van de "rebound" (terugkaatsen van granulaten tijdens het spuiten)
- ▶ sterke vermindering van de porositeit van de cementsteen met als gevolg een aanzienlijke toename van de duurzaamheid
- ▶ aanzienlijke toename van de druksterkte. De toevoeging van silica fume laat toe hogesterktebeton te vervaardigen.

1.5 Toevoegsels en toevoegingen

Eigenschappen van inerte toevoegsels

Kalksteen- en siliciumhoudende vulstoffen

Deze inerte toevoegsels, ook "fillers" of "vulstoffen" genoemd, kunnen de korrelopbouw van het beton verbeteren wanneer zand met weinig fijne deeltjes wordt gebruikt en geen correctiezand beschikbaar is.

Ze worden ook gebruikt om zelfverdichtend beton te maken, meer bepaald om de hoeveelheid cementpasta van het beton zodanig te verhogen dat het beton zonder trillen kan geplaatst worden.

Vulstoffen voor beton moeten voldoen aan de norm NBN EN 12620 en behoren tot de toevoegsels type I.

Eigenschappen van minerale kleurstoffen

Minerale kleurstoffen (fig 1.5.2) of pigmenten worden gebruikt om beton en mortel te kleuren (fig 1.5.3). In de praktijk voldoen alleen pigmenten op basis van oxiden aan de eisen qua korrelgrootte en stabiliteit. De eisen met betrekking tot kleurstoffen voor beton zijn vastgelegd in de norm NBN EN 12878.

Kleurstoffen hebben geen chemisch effect op het beton, maar door hun hoge waterbehoefte moet in het algemeen de water-cement-factor (W/C) worden verhoogd of moet gelijktijdig een superplastificeerder worden gebruikt.

De kleurstofdosering wordt in de regel bepaald door de intensiteit van de gewenste kleur (enkele procenten in verhouding tot het cementgewicht), maar de normale en maximale doseringen worden ook opgegeven in de productdocumentatie van de producenten.

Om contaminatie te vermijden moeten de menger, transportvoertuigen, overslaginrichtingen en alle gereedschappen voor en na het aanmaken van gekleurd beton zorgvuldig worden gereinigd. Met de tijd gaat de kleurintensiteit van gekleurd beton onvermijdelijk verminderen, zelfs met de beste kleurstoffen.

Fig 1.5.2
Minerale
kleurstoffen
voor gebruik in
beton



Fig 1.5.3
Gekleurde
betonstraatstenen



De realisatie van betonconstructies of -elementen in gekleurd beton vergt een zekere ervaring en een bijzondere aandacht voor :

- ▶ een perfect homogene menging van het beton
 - ▶ het gebruik van zand met een lichte kleur
 - ▶ het gebruik van helder of wit cement
 - ▶ een precieze dosering van de kleurstof
- zijn maar enkele van de onmisbare basisvoorwaarden om zichtbeton in een heldere en gelijkmatige kleur te bekomen. De kleur van de grove granulaten speelt daarentegen maar een beperkte rol.

1.5 Toevoegsels en toevoegingen

Eigenschappen van vezels

Inleiding

Vezels van verschillende aard en vorm kunnen aan beton toegevoegd worden. Men maakt onderscheid tussen constructieve vezels (gebruikt als wapening, die het beton een bepaalde sterkte-na-scheurvorming en een verhoogde vervormingscapaciteit geven) en vezels voor andere toepassingen (bv. weerstand tegen brand, beperking van de plastische krimp).

De vezels worden bij voorkeur in de betoncentrale toegevoegd voor een goede verdeling en oriëntatie. Hoofdstuk 3.3 beschrijft meer in detail de kenmerken van vezelversterkt beton.

Staalvezels

Indien staalvezels (fig 1.5.4 a en b) goed verdeeld zijn, verbeteren ze bepaalde mechanische eigenschappen van het beton, in het bijzonder het nascheurgedrag. Het gebruik ervan vergt enige specialistische kennis, aangezien de doeltreffendheid van de staalvezels afhankelijk is van hun lengte, hun diameter en hun vorm, die gekozen moeten worden in functie van de voorziene toepassing. De dosering ervan schommelt meestal tussen 20 en 70 kg per m³ beton, maar kan eventueel tot 150 kg/m³ oplopen. Voor hoge doseringen is het nodig om bij het mengen over een aangepaste toevoerinstallatie te beschikken teneinde een homogene verdeling te garanderen zonder gevaar voor "vezelnesten". Het gebruik van staalvezels vraagt in het algemeen een hogere cement- en zanddosering en leidt tot een verlies van verwerkbaarheid.

Kunststofvezels

De verschillende soorten kunststofvezels (of synthetische vezels, fig 1.5.4 c en d) onderscheiden zich door hun chemische samenstelling en de eigenschappen die er uit voortvloeien.

Zij worden bij voorkeur gebruikt voor de volgende toepassingen :

- ▶ beperking van de scheurvorming door vroegtijdige uitdroging/krimp
- ▶ beperking van de "rebound" bij spuitbeton
- ▶ verhoging van de brandweerstand bij hoge- of ultrahogesterktebeton
- ▶ verhoging van de druksterkte van jong beton
- ▶ verbetering van het watervasthoudend vermogen.

Polypropyleenvezels (PP) worden gebruikt om scheurvorming door vroegtijdige krimp te beperken. Zij verhogen het watervasthoudend vermogen en zijn in staat scheurvorming van de cementsteen van jong beton te vermijden of de scheuropeningen te beperken.

Hun smeltpunt situeert zich om en bij 165°C. Daardoor worden ze ook gebruikt om de weerstand bij brand van hoge- of ultrahogesterktebeton te verhogen. Ingeval van brand wordt een netwerk van fijne poriën gevormd die de druk van de gevormde waterdamp vermindert. Op die manier wordt afspatten van het beton vermeden.

Polypropyleenvezels worden gedoseerd tussen 0,5 en 1 kg/m³ om scheurvorming te vermijden en tussen 2 en 4 kg/m³ voor de verbetering van de brandweerstand.

Polyethyleenvezels (PE) worden toegepast als structurele wapening dankzij hun goede mechanische eigenschappen. Door hun hoge kostprijs worden ze echter weinig gebruikt.

Polyvinyl-alcohol vezels (PVA) werden in sommige toepassingen gebruikt om asbestvezels te vervangen. Hun goede mechanische eigenschappen worden voornamelijk gebruikt om de (buig-)treksterkte van beton te verbeteren.

1.5 Toevoegsels en toevoegingen

Fig 1.5.4 a
Lange
staalvezels



Fig 1.5.4 b
Korte
staalvezels



Fig 1.5.4 c
Korte polypro-
pyleenvezels



Fig 1.5.4 d
Lange polypro-
pyleenvezels



Koolstofvezels

Koolstofvezels presteren beduidend beter dan staalvezels op het vlak van treksterkte en elasticiteitsmodulus. Hun productie is echter bewerkelijk en duur.

Glasvezels

Glasvezels bereiken hoge treksterktes (1 500 à 4 000 N/mm²) en een elasticiteitsmodulus die 2 à 3 maal groter is dan deze van beton.

Gewoon glas is echter niet bestand tegen het alkalisch milieu van beton. Door de toevoeging van zirconiumdioxide en een speciale coating is het mogelijk om de alkali-weerstand van glasvezels te verhogen zodat ze hun eigenschappen in beton ook op lange termijn behouden. Hun gevoeligheid ten aanzien van beschadigingen van het oppervlak bv. tijdens de menging, kan deze weerstand evenwel in het gedrang brengen. Afhankelijk van de toepassing gebruikt men tussen 0,5 en 15 kg/m³ glasvezel.

Van vers beton tot verhard beton

2.1

Classificatie van beton

2.2

Verwerkbaarheid en consistentie

2.3

Samenstelling en formulering van beton

2.4

Productie en transport

2.5

Bekisting

2.6

Verpompen van beton

2.7

Storten en verdichten

2.8

Nabehandeling

2.9

Betonneren bij warm weer

2.10

Betonneren bij koud weer



2.1 Classificatie van beton

Inleiding

De Europese betonnorm NBN EN 206 en zijn nationale aanvulling NBN B15-001 vormen de normatieve basis voor de specificatie van alle constructieve betons. Beton kan worden voorgeschreven hetzij "op prestatie" hetzij "op samenstelling". De keuze voor één van beide vormen van specificatie heeft gevolgen voor de verantwoordelijkheden van de betrokken partijen.

In het geval van beton voorgeschreven "op prestatie" stelt de producent van het beton zich garant voor het respecteren van het geheel van de prestatie-eisen die deel uitmaken van de specificatie. De producent dient een zelfcontrolesysteem in stand te houden dat controles omvat op de grondstoffen, de productieparameters en de conformiteit van het afgewerkte product. Enkel beton op prestatie kan het voorwerp uitmaken van de BENOR-certificatie.



Deze certificatie, die gekenmerkt wordt door controles door een derde partij, geeft aan dat de producent bekwaam is om te voldoen aan de gevraagde eisen. Hierdoor vervalt doorgaans de noodzaak om nog controles uit te voeren op de werf (die vaak worden uitgevoerd in niet-ideale omstandigheden op het vlak van de aanmaak en de bewaring van proefstukken). De opdrachtgever kan weliswaar controles voorzien op de uitvoering, de afwerking en de bescherming van het vers beton.

In het geval van beton voorgeschreven "op samenstelling" is het de taak van de voorschrijver om na te gaan of de specificatie beantwoordt aan alle algemene eisen van de norm NBN EN 206 en of de voorgeschreven samenstelling toelaat om de gewenste eigenschappen te bekomen. De betonproducent dient zich enkel garant te stellen voor het respecteren van de voorgeschreven samenstelling.

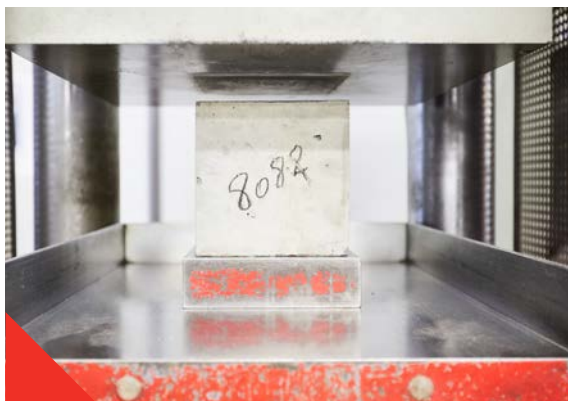


Fig 2.1.1
Drukproef op een kubus

Specificatie van beton op prestatie

De specificatie van beton op prestatie volgt de logica van de betonnorm NBN EN 206 en omvat 4 "basisgegevens":

- ▶ druksterkteklasse
- ▶ gebruiksdomein en milieuklassen of omgevingsklasse
- ▶ maximale korrelgrootte van de granulaten
- ▶ consistentieklasse.

Deze worden eventueel aangevuld met één of meerdere "aanvullende gegevens".

Druksterkteklasse

Beton wordt eerst en vooral ingedeeld in klassen volgens zijn druksterkte, uitgedrukt in N/mm².

De druksterkteklassen worden altijd aangeduid met de letter "C" (van het Engelse "Concrete") gevolgd door 2 waarden die overeenstemmen met de druksterkte gemeten op cilindervormige, respectievelijk kubusvormige proefstukken.

Voorbeeld : **C 30/37**

C geeft aan of het gaat om beton met een normale volumemassa of om zwaar beton,

30 duidt op de minimale karakteristieke druksterkte, gemeten op een cilinder ($\varnothing = 150$ mm, $h = 300$ mm).

37 duidt op de minimale karakteristieke druksterkte, gemeten op een kubus met een ribbe van 150 mm.

De Europese norm legt 16 druksterkteklassen vast gaande van C8/10 tot en met C100/115 (tab 2.1.1).

Als de volumieke massa van beton lager is dan 2 000 kg/m³ spreekt men van lichtbeton. In dat geval worden de druksterkteklassen aangeduid met "LC" (van het Engelse "Lightweight Concrete") en zijn er 14 sterkteklassen, gaande van LC8/9 tot en met LC80/88.

2.1 Classificatie van beton

Druksterkteklasse	Minimale karakteristieke druksterkte op cylinders $f_{ck,cyl}$ (N/mm ²)	Minimale karakteristieke druksterkte op kubussen $f_{ck,cube}$ (N/mm ²)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

Tab 2.1.1
Druksterkteklassen. De meest voorkomende klassen zijn omkaderd.

Gebruiksdomein en milieuklassen of omgevingsklassen

Gebruiksdomein

Aangezien de eisen met betrekking tot de duurzaamheid van beton afhankelijk zijn van het gebruiksdomein, dient de voorschrijver aan te geven of het om ongewapend beton (OGB), gewapend beton (GB) dan wel voorgespannen beton (VB) gaat.

Chloridengehalte

Het gehalte aan chloorionen in de betonsamenstelling dient beperkt te worden, afhankelijk van het gebruiksdomein, om het risico op chloriden-geïnitieerde wapeningscorrosie te beperken. In België gelden volgende grenswaarden:

- ▶ 1,00% voor OGB
- ▶ 0,40% voor GB
- ▶ 0,20% voor VB

Het chloridengehalte van beton wordt uitgedrukt ten opzichte van de massa van het bindmiddel en berekend op basis van het chloridengehalte van de bestanddelen. Men kan hiervoor gebruik maken van maximaal toegestane waarden van de productnormen of van waarden opgegeven door de producent.

2.1 Classificatie van beton

Milieuklassen en omgevingsklassen

De norm NBN EN 206 definieert 6 categorieën van potentiële aantastingsmechanismen, die verder in 3 of 4 klassen onderverdeeld worden naargelang de agressiviteit. In totaal definieert de norm op die manier 18 milieuklassen "X". Deze klassen worden in detail toegelicht en voorzien van voorbeelden in tabel 2.1.2.

De ontwerper kan verschillende klassen combineren in functie van de voorziene blootstelling van het betonelement.

Voor elke milieuklasse stellen de Europese norm en zijn nationale aanvulling minimale eisen voor opdat het beton zou weerstaan aan de bijhorende aantasting:

- ▶ minimale sterkteklasse
- ▶ minimaal cementgehalte
- ▶ maximale W/C-factor
- ▶ eventueel een minimaal luchtgehalte.

In België introduceert de norm NBN B15-001 bijkomend het begrip omgevingsklasse "E". 13 omgevingsklassen, die overeenkomen met de gebruikelijke Belgische praktijk, worden hierin gedefinieerd. De ontwerper hoort slechts één enkele omgevingsklasse te selecteren (uitgezonderd voor de klassen EA die met een klasse EE of ES moeten gecombineerd worden).

Bovendien introduceert de Belgische norm het begrip "Betontype" om op een eenvoudige wijze het geheel van minimale eisen aan de betonsamenstelling voor te stellen. Het betontype wordt genoteerd onder de vorm T(x,xx) waarbij x,xx de maximale W/C-factor voorstelt; eventueel gevolgd door de letter A (van het Engelse "Air") indien een minimaal luchtgehalte van toepassing is.

Tabel 2.1.3 verzamelt, voor alle E-klassen, de overeenkomstige X-klassen en de bijhorende betontypes alsook de minimale eisen aan de betonsamenstelling. Voorbeelden van veel gebruikte omgevingsklassen worden gegeven in figuur 2.1.2.

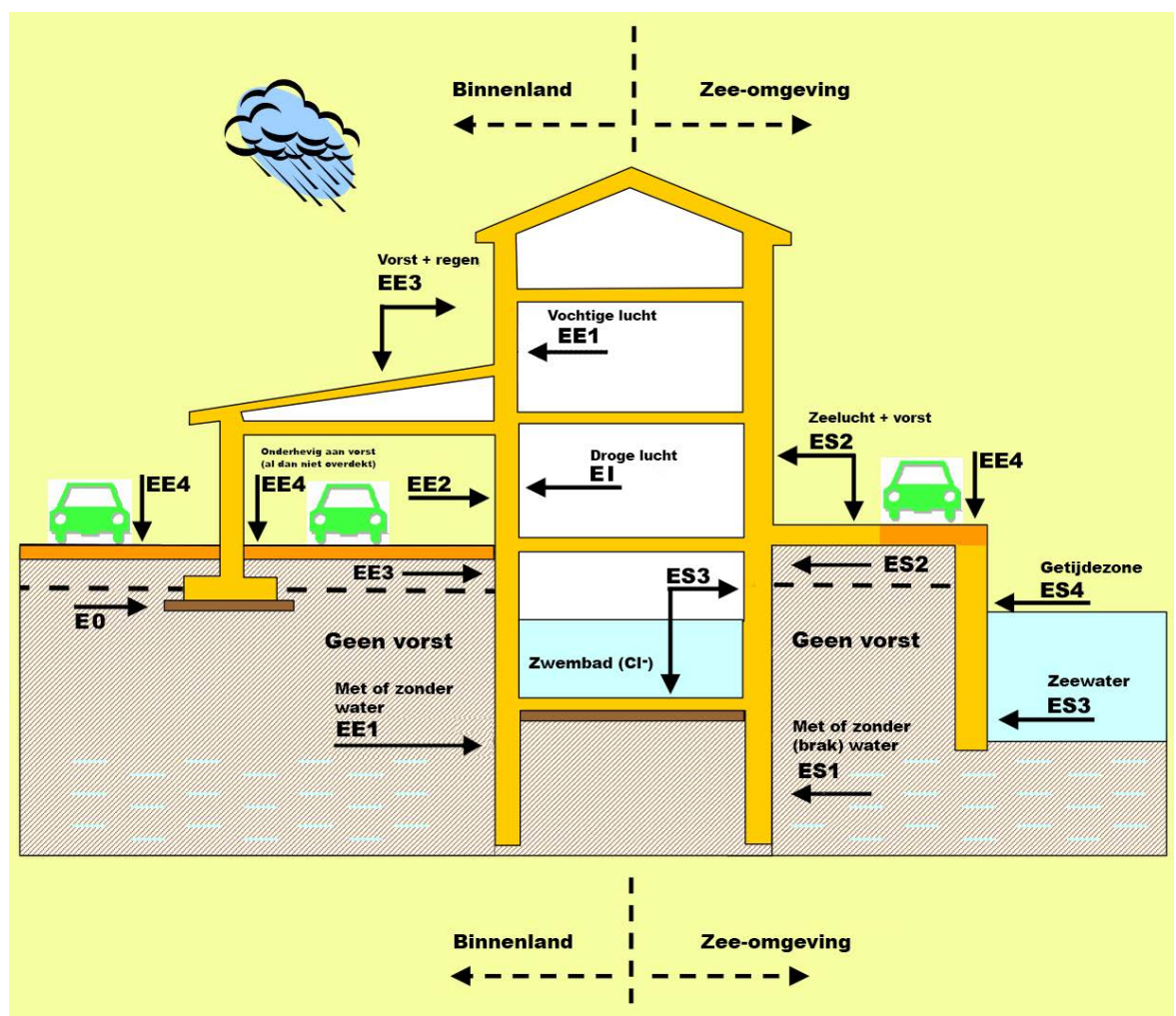


Fig 2.1.2
Voorbeelden
van veel
gebruikte
omgevings-
klassen

	Klasse-aanduiding	Beschrijving van het milieu	Informatieve voorbeelden waar de milieuklassen zich kunnen voordoen	
Geen risico	1. Geen risico op corrosie of aantasting			
	X0	Voor beton zonder wapening of ingesloten metalen onderdelen: alle milieus behalve bij vorst-dooi, afslijting of chemische aantasting		
		Voor beton met wapening of ingesloten metalen onderdelen: zeer droog ^{a)}	Beton binnen gebouwen met zeer lage luchtvochtigheid	
Acties met risico voor de wapening	2. Corrosie geïnitieerd door carbonatatie Voor beton met wapening of andere metalen onderdelen blootgesteld aan lucht en vocht, gelden de volgende milieuklassen:			
	XC1	Droog of blijvend nat	Beton binnen gebouwen met lage luchtvochtigheid Beton blijvend onder water	
	XC2	Nat, zelden droog	Betonoppervlakken langdurig in contact met water Veel funderingen	
	XC3	Matige vochtigheid	Beton binnen gebouwen met matige of hoge luchtvochtigheid Beton buiten beschermt tegen regen	
	XC4	Wisselend nat en droog	Betonoppervlakken blootgesteld aan contact met water, maar die niet vallen onder milieuklasse XC2	
	3. Corrosie geïnitieerd door chloriden uit andere bronnen dan zeewater Voor beton met wapening of andere metalen onderdelen, blootgesteld aan contact met water dat chloriden, inclusief dooiouten, bevat die komen uit andere bronnen dan zeewater, gelden de volgende milieuklassen:			
	XD1	Matige vochtigheid	Betonoppervlakken blootgesteld aan chloriden uit de lucht	
	XD2	Nat, zelden droog	Zwembaden Beton blootgesteld aan chloridehoudend industriewater	
	XD3	Wisselend nat en droog	Brugdelen blootgesteld aan chloridehoudend spatwater Verhardingen Vloeren van parkeerplaatsen voor voertuigen	
	4. Corrosie geïnitieerd door chloriden uit zeewater Voor beton met wapening of andere ingesloten metalen onderdelen, blootgesteld aan chloriden uit zeewater of brak water ^{b)} of aan lucht dat zout bevat uit de zee, gelden de volgende milieuklassen:			
	XS1	Blootgesteld aan zout uit de lucht, maar niet in direct contact met zeewater	Constructies bij of aan de kust	
	XS2	Blijvend ondergedompeld in zeewater of brak water ^{b)}	Delen van constructies in zee	
	XS3	Getijde-, spat- en nevelzone	Delen van constructies in zee	
	Acties met risico voor het beton	5. Aantasting door vorst/dooicycli met of zonder dooizouten Voor beton blootgesteld aan significante vorst-dooicycli en vocht gelden de volgende milieuklassen:		
		XF1	Matige waterverzadiging zonder dooizouten	Betonoppervlakken beschermt tegen regen en opspattend water
XF2		Matige waterverzadiging met dooizouten	Verticale betonoppervlakken van wegconstructies blootgesteld aan vorst en met de lucht meegevoerde dooizouten	
XF3		Hoge waterverzadiging zonder dooizouten	Betonoppervlakken blootgesteld aan vorst en regen en/of opspattend water	
XF4		Hoge waterverzadiging met dooizouten of zeewater	Wegen en brugdekken blootgesteld aan dooizouten Betonoppervlakken blootgesteld aan direct gesproeide dooizouten en aan vorst Spatzone van constructies in zee blootgesteld aan vorst	
6. Chemische aantasting Indien beton is blootgesteld aan chemische aantasting door natuurlijke grond, oppervlaktewater of grondwater, zoals aangegeven in tabel 2 van de norm NBN EN 206:2013 + A1:2016, moeten de milieuklassen worden ingedeeld zoals hieronder is aangegeven:				
XA1		Zwak chemisch agressieve omgeving Beton in contact met zeewater of brak water ^{b)}		
XA2		Middelmatig chemisch agressieve omgeving		
XA3		Sterk chemisch agressieve omgeving		

^{a)} opmerking: een zeer droge omgeving komt in België zeer zelden of niet voor

^{b)} brak water: ondiep licht zouthoudend water dat voornamelijk voorkomt in de kustvlakte, het poldergebied in de omgeving van Diksmuide, sommige Oost-Vlaamse polders en rond de haven van Antwerpen waarbij de hoogtelijn van 6 m wordt vastgesteld als de grens tot waar deze gebieden zich uitstrekken

Tab 2.1.2
Milieuklassen volgens de normen NBN EN 206 en NBN B15-001

Omgevingsklasse	Omschrijving	Informatieve voorbeelden waar de milieuklassen zich kunnen voordoen
E0	Niet agressieve omgeving	
E1	Droge binnenomgeving	Binnenkant van woningen en kantoren met een normaal binnenklimaat
EE	Vochtige binnenomgeving of buitenomgeving	
EE1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens, beton blijvend onder water
EE2	Vorst, geen contact met regen of opspattend water	Kruipkelder, open doorgang in gebouw
EE3	Vorst, contact met regen of opspattend water	Buitenmuur of horizontale buitenoppervlakken, in contact met regen en/of opspattend water
EE4	Vorst en dooizouten (aanwezigheid van ter plaatse ontdooid of opspattend of aflopend dooizouthoudend water)	Delen van weginfrastructuur, Vloeren van parkeergarages aan vorst onderhevig (al dan niet overdekt) of buitenoppervlakken, in contact met dooizouten
ES	Zeeomgeving	
Geen contact met zeewater, wel contact met zeelucht (tot 3 km van de kust) en/of brak water		
ES1	Geen vorst	Fundering onder vorstgrens in contact met brak water
ES2	Vorst	Buitenmuur of horizontale buitenoppervlakken in contact met regen in kustgebied
Contact met zeewater		
ES3	Ondergedompeld	
ES4	Getijden- en spatzone	Kaaimuren
EA	Chemisch agressieve omgeving	
EA1	Zwak chemisch agressieve omgeving	
EA2	Middelmatig chemisch agressieve omgeving	
EA3	Sterk chemisch agressieve omgeving	

(1) Enkel voor uitzonderlijke toepassingen in ongewapend beton, zoals bijv. zuiverheidsbeton voor funderingen, is betontype T(1,50) mogelijk.

(2) De vorstbestendigheid van granulaten met een nominale korrelmaat $D \leq 4$ mm wordt geacht te voldoen ; deze van granulaten met een nominale korrelmaat $D > 4$ mm (met uitzondering van lichte granulaten) wordt geacht te voldoen indien :

- ofwel de wateropslorping bepaald volgens NBN EN 1097-6 : 2013 kleiner of gelijk is aan 1,0% ;
- ofwel de LA-coëfficiënt bepaald volgens NBN EN 1097-2 : 2010 kleiner is of gelijk aan 25 ;
- ofwel, bij blootstelling aan milieuklassen XF1 t.e.m. XF3 (omgevingsklassen EE2, EE3 of ES2):
 - ofwel het granulaat na beproeving volgens NBN EN 1367-1: 2007 behoort tot klasse F_4 volgens NBN EN 12620 ;
 - ofwel het granulaat na beproeving volgens NBN EN 1367-2: 2010 behoort tot klasse MS_{35} volgens NBN EN 12620 ;
- ofwel, bij blootstelling aan milieuklasse XF4 (omgevingsklassen EE4 of ES4):
 - ofwel het granulaat na beproeving volgens NBN EN 1367-1: 2007 behoort tot klasse F_2 volgens NBN EN 12620 ;
 - ofwel het granulaat na beproeving volgens NBN EN 1367-2: 2010 behoort tot klasse MS_{25} volgens NBN EN 12620.

Ongewapend beton							Gewapend en voorgespannen beton					
Overeenkomstige X- klassen	Betontype	Rc min	W/C max	C min	Opm.	Overeenkomstige X- klassen	Betontype	Rc min	W/C max	C min	Opm.	
X0	T(1,00)	C12/15	1,00	-	(1)	Niet van toepassing						
X0	T(1,00)	C12/15	1,00	-		XC1	T(0,65)	C16/20	0,65	260		
X0	T(1,00)	C12/15	1,00	-		XC2	T(0,60)	C20/25	0,60	280		
XF1	T(0,55)	C25/30	0,55	300	(2)	XC3, XF1	T(0,55)	C25/30	0,55	300	(2)	
XF3	T(0,50) OF T(0,55)A	C30/37 --- C20/25	0,50 --- 0,55	320 --- 300	(2) (3)	XC4, XF3	T(0,50) OF T(0,50)A	C30/37 --- C25/30	0,50 --- 0,50	320 --- 320	(2) (3)	
XF4	T(0,45) OF T(0,50)A	C35/45 --- C25/30	0,45 --- 0,50	340 --- 320	(2) (3)	XC4, XD3, XF4	T(0,45) OF T(0,45)A	C35/45 --- C30/37	0,45 --- 0,45	340 --- 340	(2) (3)	
XA1	T(0,60)	C20/25	0,60	280		XC2, XS2, XA1	T(0,50)	C30/37	0,50	320		
XF3	T(0,50) OF T(0,55)A	C30/37 --- C20/25	0,50 --- 0,55	320 --- 300	(2) (3)	XC4, XS1, XF3	T(0,50) OF T(0,50)A	C30/37 --- C25/30	0,50 --- 0,50	320 --- 320	(2) (3)	
XA1	T(0,55)	C25/30	0,55	300		XC1, XS2, XA1	T(0,45)	C35/45	0,45	340		
XF4, XA1	T(0,45) OF T(0,50)A	C35/45 --- C25/30	0,45 --- 0,50	340 --- 320	(2) (3)	XC4, XS3, XF4, XA1	T(0,45) OF T(0,45)A	C35/45 --- C30/37	0,45 --- 0,45	340 --- 340	(2) (3)	
XA1	T(0,55)	C25/30	0,55	300		XA1	T(0,55)	C25/30	0,55	300		
XA2	T(0,50)	C30/37	0,50	320	(4)	XA2	T(0,50)	C30/37	0,50	320	(4)	
XA3	T(0,45)	C35/45	0,45	340	(4)	XA3	T(0,45)	C35/45	0,45	340	(4)	

(3) Beton zonder ingebrachte lucht behalve indien opgelegd door de voorschrijver

(4) Cement met hoge bestandheid tegen sulfaten (volgens NBN B12-108) of een combinatie van cement en gemalen gegraneerde hoogovenslakken conform de ATG "Gemalen gegraneerde hoogovenslakken – LMA" met minstens 66% m/m LMA ten opzichte van de totale hoeveelheid cement + LMA moet gebruikt worden indien het sulfaatgehalte > 600 mg/kg in water en > 3 000 mg/kg of 2 000 mg/kg (zie voetnoot c in tabel 2 van NBN EN 206:2013 + A1:2016) in de grond. In geval van gebruik van LMA, moet de hoge bestandheid tegen sulfaten aangetoond worden volgens de regels gedefinieerd in de Technische Goedkeuring (ATG) voor gemalen hoogovenslakken gedekt door een ATG met certificatie en verwijzend naar deze norm.

Tab 2.1.3
Omgevingsklassen met bijhorende milieuklassen en minimale eisen ten aanzien van de samenstelling volgens NBN B15-001

2.1 Classificatie van beton

Maximale korrelgrootte van het granulaat

Beton wordt verder gekenmerkt door de grootste nominale korrelafmeting van de granulaten (D_{max}).

Aanbevolen wordt om D_{max} zo groot mogelijk te kiezen, maar niet groter dan:

- ▶ $1/5 a$ met a : de kleinste afstand tussen de bekistingwanden of de vloerdikte
- ▶ $3/4 b$ met b : de kleinste afstand tussen de wapeningsstaven
- ▶ $1,5 b'$ met b' : de afstand tussen de wapeningsstaven ter hoogte van de wapeningsoverlappingsen
- ▶ c met c : de betondekking
- ▶ $2/5 e$ met e : de dikte van de opstortlaag van een samengestelde vloer.

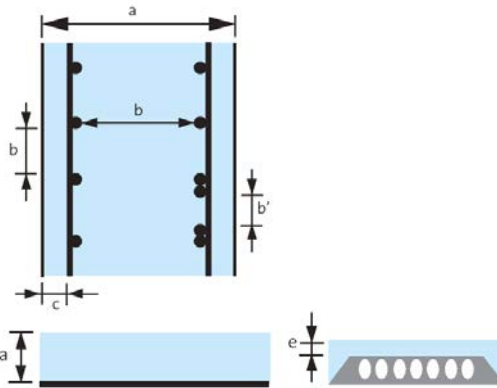


Fig 2.1.3

In rekening te nemen afmetingen voor de bepaling van D_{max}

Aanvullende gegevens

Naast de 4 "basisgegevens" kan de ontwerper of de aannemer vanzelfsprekend aanvullende gegevens formuleren, waarover best op voorhand met de betonproducent wordt overlegd. Onderstaande (niet-limitatieve) lijst omvat enkele voorbeelden:

- ▶ Eisen met betrekking tot de betonsamenstelling:
 - cementtype (bv. cement SR in aanwezigheid van sulfaten)
 - type granulaat (kalksteen, gerecycleerd ...)
 - betontype met toegevoegde lucht
 - toevoeging van vezels (type, hoeveelheid, ...)
 - conformiteit met bijlage D van de norm (beton voor speciale geotechnische werken)
- ▶ Eisen met betrekking tot het vers beton:
 - verwerkingsduur
 - minimale of maximale temperatuur
 - maximale warmte-ontwikkeling
- ▶ Eisen met betrekking tot de plaatsing:
 - lengte van de verpompings
- ▶ Eisen met betrekking tot het verhard beton:
 - klasse van de wateropslorping door onderdompeling "WAI"
 - maatregelen ter voorkoming van alkali-silica reactie (ASR).

Consistentieklasse

De consistentie wordt gekenmerkt door verschillende soorten consistentieproeven: de zetmaat (S) (fig 2.1.4), de verdichtingsmaat (C) of de schudmaat (F). Er zijn geen directe verbanden tussen de verschillende klassen die bestaan voor elke proef.



Klasse S1 - Stijf of aardvochtig



Klasse S2 - Half-plastisch



Klasse S3 - Plastisch



Klasse S4 - Vloeibaar



Klasse S5 - Zeer vloeibaar

Fig 2.1.4

De verschillende consistentieklassen van beton (zetmaat of slump test)

2.2 Verwerkbaarheid en consistentie

Belang van de verwerkbaarheid

Een goede verwerkbaarheid vergemakkelijkt de overslag en de verwerking van beton, d.w.z. het plaatsen in bekistingen en het verdichten. Een goede verwerkbaarheid heeft ook een gunstige invloed op de verwerkingskosten. Tot slot hangen de druksterkte en vooral de duurzaamheid van het verhard beton rechtstreeks af van een goede plaatsing, van de perfecte omhulling van de wapening en van een zorgvuldige verdichting. Al deze zaken zijn enkel mogelijk met een goede verwerkbaarheid.

Definitie van verwerkbaarheid en van consistentie

Het begrip verwerkbaarheid van beton beantwoordt niet aan een precieze definitie. Het omvat verschillende eigenschappen, zoals de consistentie (vloeibaarheid), de cohesie (interne samenhang), de neiging tot ontmenging, de verpompbaarheid, de viscositeit en de thixotropie alsook hun evolutie in de tijd. De consistentie, die op wetenschappelijk vlak beschouwd wordt als het gevolg van de interne wrijving van alle vaste deeltjes die in suspensie gehouden worden in het beton, kan in de praktijk door verschillende proefmethodes bepaald worden.

Proefmethodes voor de consistentie

In België zijn twee methodes gebruikelijk om de consistentie van beton te bepalen: de zetmaat ("slump") en de schudmaat ("flow"). Deze twee methodes (fig 2.2.1 en 2.2.2) worden beperkt tot bepaalde consistentiegebieden.

Consistentieklasse

Tabel 2.2.1 beschrijft de consistentieklassen horende bij de zetmaat en de schudmaat, zoals gedefinieerd door de norm NBN EN 206, en geeft ook de meest geschikte methode voor elk consistentiegebied aan.

De uitvoering van deze proeven wordt nauwkeurig beschreven in de Europese normen NBN EN 12350-2 en NBN EN 12350-5.

Controle van de consistentie bij aanvang van het betonneren

Vergelijkbare consistentiewaarden voor beton afkomstig uit verschillende installaties vormen geen garantie voor een strikt identieke verwerkbaarheid. De resultaten kunnen worden beïnvloed door de keuze van bestanddelen en door de gebruikte menginrichting. Daarom wordt de verwerkbaarheid best gecontroleerd bij aanvang van het betonneren teneinde de consistentie indien nodig aan te passen. Ook wanneer bv. andere granulaten worden gebruikt, dient de consistentie die is voorgeschreven voor het werk in uitvoering, opnieuw te worden gecontroleerd.

Consistentiegebied	Zetmaat (Slump) - S		Schudmaat (Flow) - F	
	Klasse	Grenzen in mm	Klasse	Grenzen in mm
Stijf of Aardvochtig	S1	10 à 40	F1 ⁽¹⁾	(≤ 340)
Half-plastisch	S2	50 à 90	F2	350 à 410
Plastisch	S3	100 à 150	F3	420 à 480
Vloeibaar	S4	160 à 210	F4	490 à 550
Zeer vloeibaar	S5 ⁽¹⁾	(≥ 220)	F5	560 à 620
			F6 ⁽¹⁾	(≥ 630)

⁽¹⁾ meetmethode niet geschikt voor dit consistentiegebied

Tab 2.2.1
Consistentie-
klassen voor
de zetmaat en
de schudmaat

2.2 Verwerkbaarheid en consistentie

Fig 2.2.1

Meting van de slump met de Abramskegel



Fig 2.2.2

Meting van de flow met de schoktafel



Superplastificeers verbeteren de consistentie

Dankzij de superplastificeers is het mogelijk om beton aan te maken in consistentieclassen S4 en S5 en toch een W/C-factor conform de specificatie te respecteren. Dergelijke betons worden bijzonder geapprecieerd omdat ze eenvoudig te plaatsen en te verdichten zijn en toch een hoge sterkte en hoge duurzaamheid opleveren.

Een verhoging van de consistentie mag nooit worden gerealiseerd door achteraf water toe te voegen.

Invloed van andere kenmerken van het beton op de consistentie

Naast hulpstoffen hebben vele andere factoren een invloed op de consistentie. Elke verandering van één of meer van deze factoren heeft niet alleen een invloed op de consistentie, maar ook op de druksterkte (en op heel wat andere eigenschappen) van het beton, vaak in tegengestelde zin. De te verwachten invloed van wijzigingen van een aantal basiskenmerken van beton op de consistentie en de druksterkte wordt in tabel 2.2.2 samengevat.

Wijziging van de verwerkbaarheid na het mengen

Het is onvermijdelijk dat de consistentie van beton wijzigt vanaf het einde van het mengproces. Dit gaat gepaard met een geleidelijke vermindering van de verwerkbaarheid. De "gegarandeerde verwerkingstijd" die op de leveringsbon wordt vermeld (doorgaans 100' voor CEM I en CEM II en 120' voor CEM III en CEM V) geeft de tijdspanne aan (na het eerste contact tussen cement en water) waarbij de betonspecie in geen geval in binding gaat.

Dit betekent echter niet dat de consistentie (vloeibaarheid) zolang ongewijzigd blijft. Figuur 2.2.3 toont een normaal gedrag van beton tijdens het transport en het lossen. Het beton moet tenminste 30' na de aanvang van het lossen in dezelfde klasse blijven (S4 in dit voorbeeld). Beton is gevoeliger aan verlies van verwerkbaarheid naarmate de temperatuur toeneemt, en naarmate het gebruikte cement een sneller reactieverloop kent.

2.2 Verwerkbaarheid en consistentie

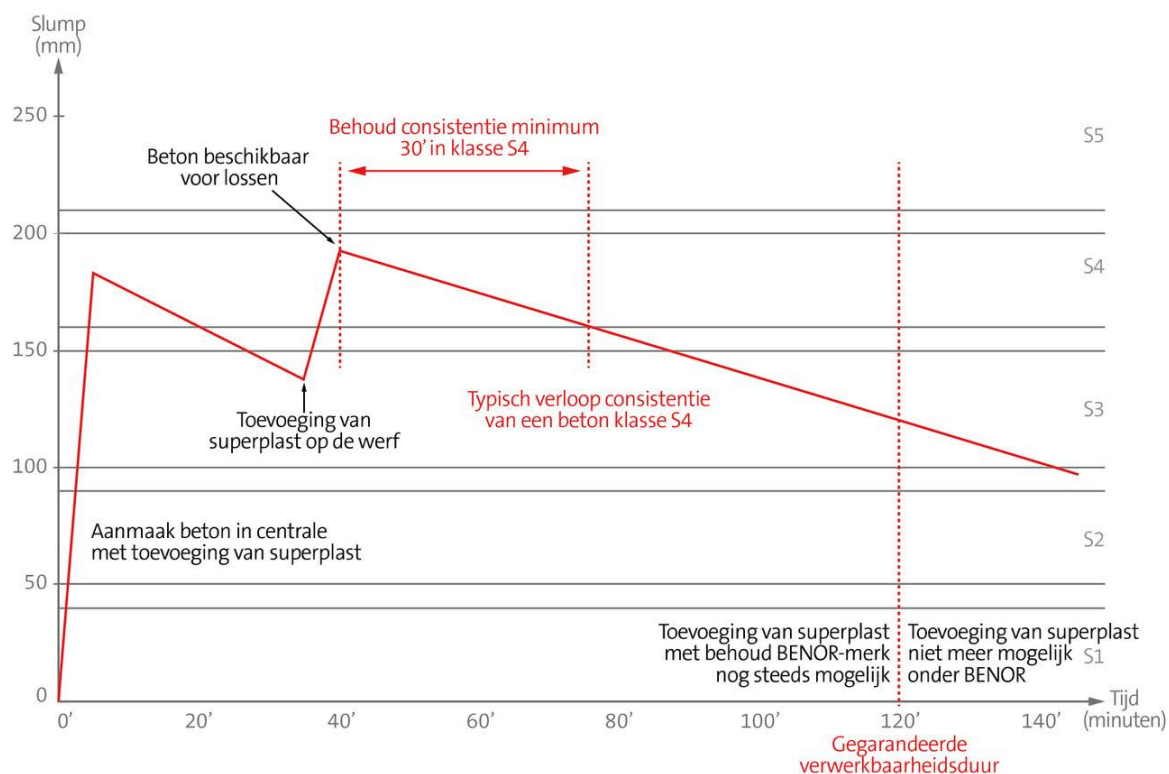


Fig 2.2.3
Voorbeeld van het verloop van de consistentie en gegarandeerde verwerkbaarheidsduur

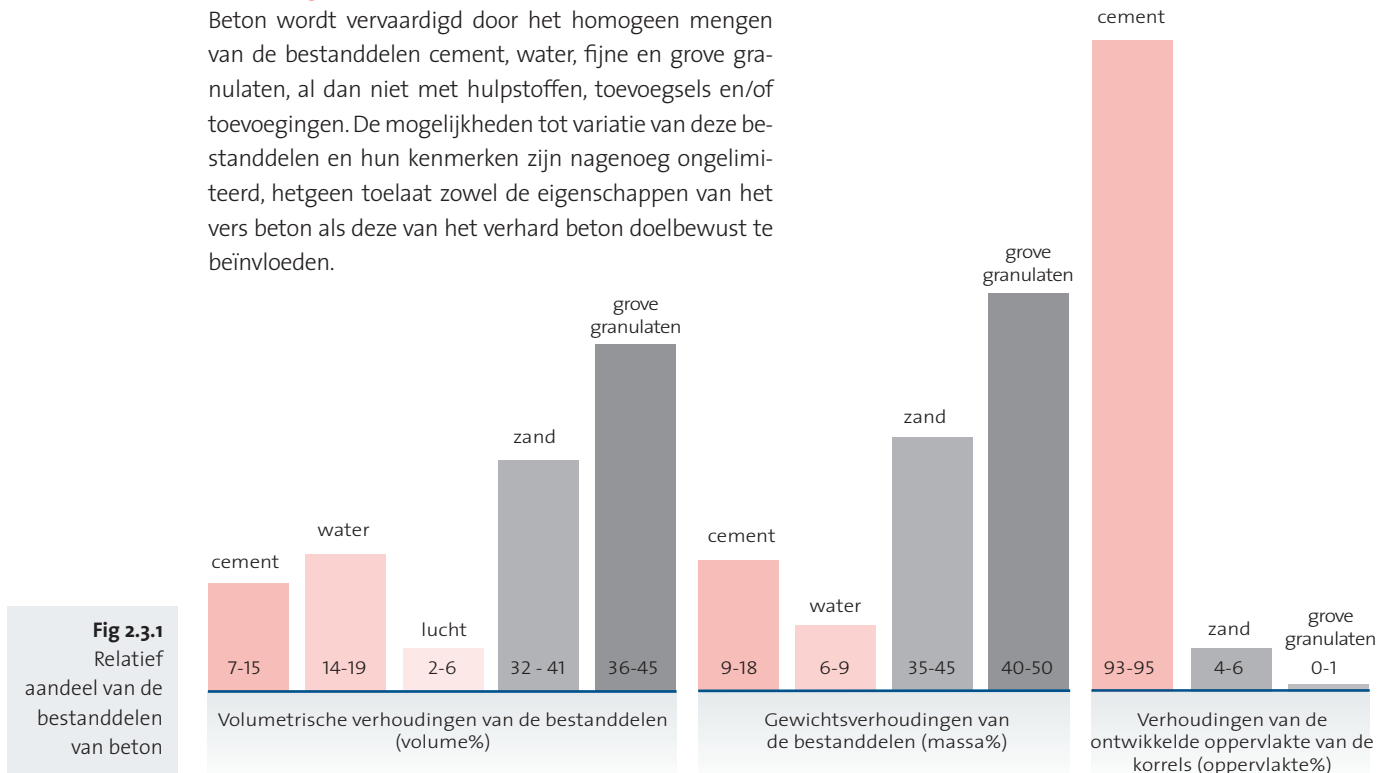
Wijziging	Invloed op de consistentie	Invloed op de druksterkte
Verbetering van de continuïteit van de korrelopbouw	+	=
Verhoging van het gehalte ronde granulaten	+	-
Verhoging van het gehalte gebroken granulaten	-	+
Verhoging van het aanmaakwater (bij constant C)	++	-
Verhoging van het aanmaakwater (bij constante W/C)	++	=
Verhoging van de temperatuur van vers beton	-	-
Gebruik van een superplastificeerder	++	+
Gebruik van een luchtbelvormer	+	-
Gebruik van een vertrager	=	+
++ zeer gunstige invloed + gunstige invloed - ongunstige invloed = geen merkbare invloed		

Tab 2.2.2
Invloed van de kenmerken van de samenstelling van beton op de consistentie en de druksterkte

2.3 Samenstelling en formulering van beton

Inleiding

Beton wordt vervaardigd door het homogeen mengen van de bestanddelen cement, water, fijne en grove granulaten, al dan niet met hulpstoffen, toevoegsels en/of toevoegingen. De mogelijkheden tot variatie van deze bestanddelen en hun kenmerken zijn nagenoeg ongelimiteerd, hetgeen toelaat zowel de eigenschappen van het vers beton als deze van het verhard beton doelbewust te beïnvloeden.



Normatief kader

In relatie tot de classificatie van beton definieert de Europese norm NBN EN 206 de minimale eisen voor de samenstelling van beton opdat het beton zou kunnen weerstaan aan de aantastingsmechanismen van de omgeving.

Het merendeel van de Europese landen hebben deze voorschriften aangevuld met nationale eisen.

In België wordt de norm NBN EN 206 aangevuld met normatieve eisen in functie van de Belgische ervaringen en informatieve commentaren, opgenomen in de norm NBN B 15-001 (zie hoofdstuk 2.1).

Zoals toegelicht in hoofdstuk 2.1, introduceert de Belgische norm omgevingsklassen ter vervanging van de milieuklassen uit de Europese norm en voegt daar bepaalde eisen ten aanzien van de betonsamenstelling aan toe. Het betreft meer bepaald de hoeveelheid cement of bindmiddel, de hoeveelheid (effectief) water en de sterkteklasse van het beton (tab 2.1.3).

2.3 Samenstelling en formulering van beton

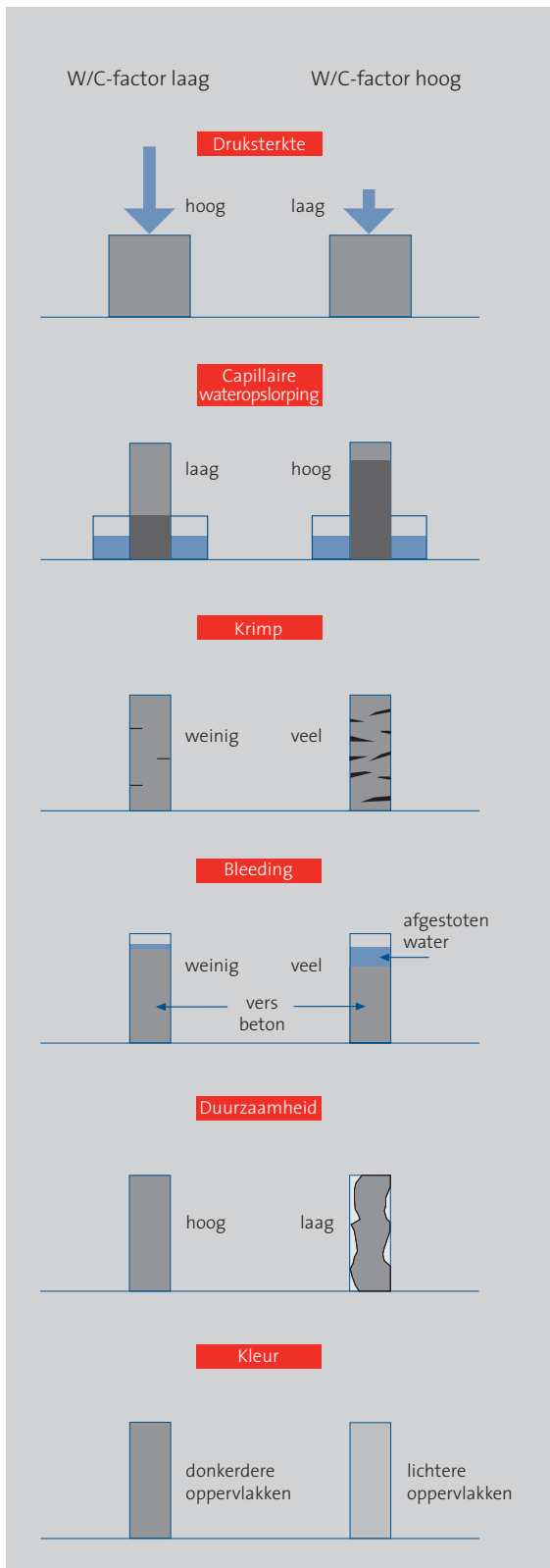


Fig 2.3.2
Invloed van de W/C-factor op de eigenschappen van beton

Belang van de water-cement-factor (W/C)

De verhouding water-cement of water-cement-factor (afgekort W/C-factor of W/C) is zonder twijfel één van de kenmerken die van doorslaggevende invloed is op het geheel van de eigenschappen van beton (fig 2.3.2).

Het is dan ook logisch dat de voorschrijver, via de geschikte keuze van de omgevingsklasse, de W/C-factor begrenst.

In de praktijk is het echter tijdrovend om het watergehalte van elk beton precies te meten. De beheersing van de W/C-factor tijdens de productie van beton gebeurt dan ook voornamelijk via de kennis van de vochtigheid van de bestanddelen - continu gemeten door een sonde of punctueel bepaald door droging (pan, oven, microgolfoven) - en de regelmatige controle van de water-weegschaal.

Men baseert zich eveneens op de meting van de consistentie. Voor een gegeven samenstelling staat deze in nauwe relatie tot het watergehalte. Op basis van de nodige ervaring geeft deze werkwijze een voldoende benadering, maar vervangt geenszins de regelmatige bepaling van het werkelijke watergehalte van het beton, zoals trouwens voorzien in de BENOR-certificatie van beton.

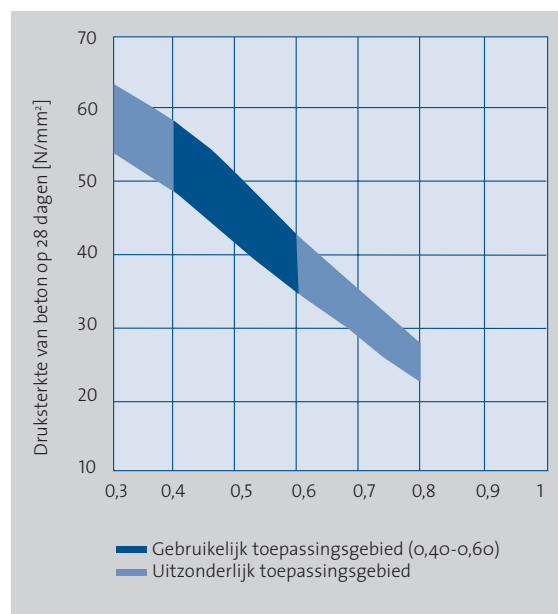


Fig 2.3.3
Invloed van de W/C-factor op de druksterkte van beton

2.3 Samenstelling en formulering van beton

Keuze van de W/C-factor

De keuze van de W/C-factor is afhankelijk van 2 belangrijke beschouwingen:

- ▶ De omgevingsklasse: de betonnorm NBN B15-001 legt voor elke omgevingsklasse een maximale W/C op (tab 2.1.3). De betonproducent zal bijkomend nog een kleine marge voorzien (0,01 à 0,02) om rekening te houden met de variatie van deze parameter.
- ▶ De mechanische belastingen die het verhard beton zal ondergaan. Zoals aangegeven in figuur 2.3.3 wordt de druksterkte van beton sterk beïnvloed door de W/C-factor. Voor een gewenste gemiddelde richtsterkte van het beton, kan men de maximale W/C-factor bepalen door middel van empirische formules zoals deze van Walz, indien de gemiddelde sterkte van het gebruikte cement gekend is:

$$f_{cm,28} = 0,46 \cdot f_{cm,28,ce} \cdot (C/E - 0,06)$$

met:

$f_{cm,28}$	gemiddelde druksterkte* v/h beton op 28d
$f_{cm,28,ce}$	gemiddelde druksterkte v/h cement op 28d
C/E	het omgekeerde van de W/C-factor

**de betonproducent zal een hogere gemiddelde druksterkte nastreven aan de karakteristieke waarde van de sterkteklasse om rekening te houden met de spreiding op de resultaten.*

De laagste W/C volgend uit beide beschouwingen zal weerhouden worden. In het geval van stortklaar beton zal de W/C-factor volgend uit de omgevingsklasse in de meeste gevallen maatgevend zijn.

Het kan steeds gebeuren dat op een specifieke werf nog strengere eisen ten aanzien van de W/C-factor worden voorgeschreven. Voor projecten met dergelijke bijzondere eisen loont het de moeite tevens bijkomende voorzorgsmaatregelen te nemen op het vlak van de verwerking.

Effectief watergehalte

In de W/C-factor beschouwt men het effectief watergehalte. Dit wordt als volgt gedefinieerd:

- ▶ effectief watergehalte =
totaal watergehalte – het water geabsorbeerd door de granulaten
- ▶ totaal watergehalte =
aanmaakwater + water in en aan het oppervlak van de granulaten + water van de hulpstoffen en vloeibare toevoegingen

Gehalte aan water en cement

Een voldoende cementgehalte vormt een effectieve bescherming van de wapening tegen corrosie. Deze bescherming wordt verzekerd door de hoge basiciteit/alcaliniteit van het calciumhydroxide dat gevormd wordt tijdens de hydratatie en door een lage porositeit van het beton.

Opdat deze voorwaarden steeds vervuld zouden zijn, voorziet de norm NBN B15-001 een minimaal cementgehalte in functie van de voorgeschreven omgeving. Zo zal een gewapend beton dat geplaatst wordt in een omgeving type EE3 (buitenomgeving, blootgesteld aan regen en vorst), minstens 320 kg cement per m³ beton bevatten.

De betonproducent zal echter in de regel een grotere hoeveelheid cement of equivalent bindmiddel (zie onder) voorzien. Dit kan het geval zijn wanneer hij het fijngehalte van het beton wenst te verhogen. Het zal echter vaker gebeuren in die situaties waarbij de combinatie van C_{min} en W/C_{max} zou leiden tot een watergehalte dat onvoldoende is voor het "bevochtigen" van het beton en het vermijden van een te hoge viscositeit. De hiervoor benodigde hoeveelheid water kan berekend worden op basis van de "waterbehoefte" van de verschillende bestanddelen van het beton of bepaald worden op basis van ervaring (in de sector van het stortklaar beton worden doorgaans waarden van 170 à 175 liter/m³ gehanteerd).

Equivalent bindmiddel

Indien behalve cement ook een toevoegsel type II aan het beton wordt toegevoegd (zie hoofdstuk 1.5), kan het k-waarde concept worden toegepast:

Equivalent bindmiddel = Cement + k . Toevoegsel.

De te gebruiken k-waarden vindt men terug in de normen NBN EN 206 en NBN B15-001 (tab 1.5.1).

Het equivalent bindmiddel kan in rekening worden gebracht voor de beoordeling van het minimaal cementgehalte en de maximale W/C-factor.

2.3 Samenstelling en formulering van beton

Korrelopbouw

De samenstelling van het "granulair skelet" of "inert skelet" op basis van de kenmerken van de beschikbare fijne en grove granulaten (korrelverdeling en vorm) heeft tot doel het volume aan holle ruimte in het beton te beperken. Op die manier wordt een lage porositeit bekomen die het beton een hoge duurzaamheid zal geven (fig 2.3.4 en 2.3.5).

In het algemeen kan men stellen dat een continue korrelopbouw zal resulteren in een beton met een betere verwerkbaarheid, een hoge samenhang en een beperkte neiging tot segregatie.

De praktijk heeft wel aangetoond dat voor courante betons ook een discontinue korrelopbouw kan leiden tot economische samenstellingen met goede prestaties op het vlak van uitzicht en druksterkte. Echter, gezien de grotere gevoeligheid van dergelijke samenstellingen voor variaties in de korrelopbouw van de granulaten en het risico op segregatie en uitzweten (bleeding), worden ze steeds minder toegepast.

Praktisch voorbeeld

In de praktijk zal het samenstellen van beton (bepalen van de gewichten van de samenstellende delen) op de volgende manier gebeuren :

A. Bepaling van de hoeveelheden water en cement

Zoals gezien in de paragraaf "Keuze van de W/C-factor" wordt de W/C-factor vastgelegd op basis van de omgevingsklasse, de te bereiken druksterkte of nog de specifieke eisen van de werf.

Zoals eveneens aangehaald in de vorige paragraaf kan het minimaal cementgehalte, opgelegd door de norm, aangepast worden om een grotere hoeveelheid (effectief) water te verkrijgen zonder de gekozen W/C-factor te verhogen. Onderstaand voorbeeld illustreert deze werkwijze.

Gegevens :

Gewapend beton (GB) in een buitenomgeving, in aanwezigheid van water en vorst --> omgevingsklasse EE3. De norm NBN B15-001 vereist een betontype T(0,50) voor EE3, en bijgevolg :

- ▶ $C_{\min} = 320 \text{ kg/m}^3$
- ▶ $W/C_{\max} = 0,50$
- ▶ Minimale druksterkteklasse = C30/37.

De ontwerper van de betonsamenstelling wenst een gemiddelde richtsterkte van 45 N/mm^2 te bekomen (37 N/mm^2 met een gebruikelijke marge van 8 N/mm^2) en gebruikt een cement waarvan de gemiddelde druksterkte op 28 dagen 56 N/mm^2 bedraagt.

Bepaling van de W/C-factor :

De toepassing van de formule van Walz (daarbij een marge van 0,01 op de W/C hanterend dus 0,49) leidt tot een verwachte druksterkte van 51 N/mm^2 , hoger dan de richtsterkte. De W/C_{\max} van 0,49 volgend uit de omgevingsklasse is strenger en bijgevolg maatgevend.

Bepaling van het cementgehalte :

De toepassing van C_{\min} (320 kg/m^3) met een W/C van 0,49 zou leiden tot een effectief watergehalte van 159 liter/m^3 . Echter, gezien zijn ervaring met de gebruikte grondstoffen zal de ontwerper van de betonsamenstelling 170 liter water nodig hebben om een voldoende lage viscositeit en een goede verwerkbaarheid van het beton te verkrijgen. Het cementgehalte zal bijgevolg verhoogd worden tot $170/0,49 \approx 345 \text{ kg/m}^3$.

B. Luchtgehalte

Voor beton zonder ingebrachte lucht kan een gemiddeld luchtgehalte van 1,5 à 2,5% in rekening gebracht worden.

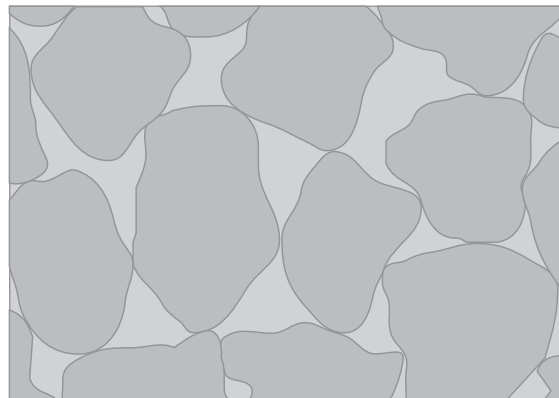


Fig 2.3.4
Een mono-granulaire korrelopbouw geeft een lage vulgraad : de porositeit is hoog

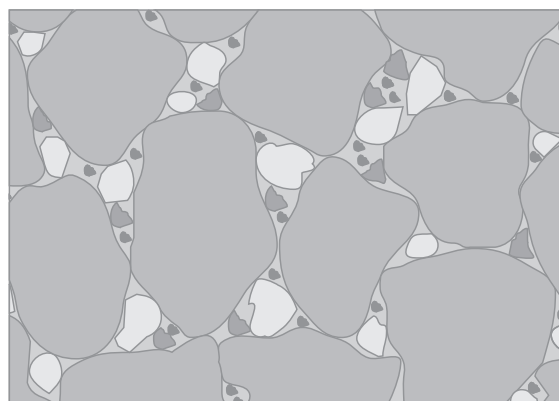


Fig 2.3.5
Beton met continue en optimale korrelopbouw geeft een hoge vulgraad: de porositeit is laag

2.3 Samenstelling en formulering van beton

C. Bepaling van het volume van de granulaten

1 m³ vers beton dient een volume (volumetrisch rendement) in te nemen van 1 000 liter. Het volume van de granulaten hierin kan bepaald worden op basis van de volumes ingenomen door het cement, het water en de lucht (tab 2.3.1).

Het volume cement kan afgeleid worden van de massa cement gebruik makend van de absolute volumieke massa (ρ_a) van het cement (zie technische fiche van de producent). Het resterend volume (699 liter in ons voorbeeld) dient gevuld te worden door het geheel van de granulaten.

D. Bepaling van het aandeel van de verschillende granulaatfracties

De granulometrische samenstelling van het beton (hoeveelheid van elke granulaatfractie) kan bepaald worden volgens 3 benaderingen:

- ▶ Grafische benadering op basis van de methodes van Füller, Bolomey, Faury of Dreux. Al deze methodes streven naar een maximale compactheid.
- ▶ Kleinste-kwadraten methode : zoeken naar een zo klein mogelijke afwijking van het samen te stellen beton met een gekende ideale korrelverdeling.
- ▶ Empirische benaderingen gebaseerd op de ervaring van de producent en doorgaans gebruik makend van verhoudingen G/Z (grof granulaat/zand) alsook verhoudingen tussen de zanden (bijvoorbeeld 50% rond zand, 50% breeksand) en tussen de grove kalibers (bijvoorbeeld 15% steenslag 2/6 en 85% steenslag 6/20).

Deze benaderingen worden meestal volumetrisch uitgevoerd ; de omvorming naar massa's (kg/m³) gebeurt aan de hand van de "oven-dried" volumieke massa (ρ_{rd}) van elk individueel granulaat (zie technische fiche van de producent).

E. Bepaling van de hoeveelheid hulpstof

De producent bepaalt de hoeveelheid te gebruiken hulpstof(fen) om de voorgeschreven consistentieklasse te bereiken, hetzij op basis van de berekening van de waterbehoefte, hetzij op basis van ervaring.

F. Controles en eventuele aanpassingen

Eens de theoretische formule bepaald is, worden volgende punten geverifieerd :

- ▶ Is het gehalte aan fijne deeltjes voldoende (zie kader hier onder en tab 1.3.4)? Indien dit niet het geval is, kan de toevoeging van een correctiezand of een toevoegsel worden overwogen.
- ▶ Is de korrelopbouw continu? Indien dit niet het geval is, kan het gebruik van een tussenliggend kaliber, type 2/6 of 4/8, worden overwogen.
- ▶ Voldoen de alkali- en de chloorbalansen?

Een optimaal gehalte aan fijne deeltjes :

- ▶ verhoogt de hoeveelheid smerende cementpasta zonder de hoeveelheid aanmaakwater aanzienlijk te moeten verhogen
- ▶ garandeert een betere verwerkbaarheid en verdichtbaarheid van het beton
- ▶ verbetert het waterretentievermogen van het mengsel en voorkomt uitzweten (bleeding) tijdens en na het storten
- ▶ voorkomt ontmenging tijdens het storten
- ▶ verbetert de compactheid van de cementpasta en daardoor ook de dichtheid van het beton.

De formule kan voorts worden bijgestuurd in functie van de resultaten van initiële typeproeven (ITT) uitgevoerd in het laboratorium of in de productie-eenheid.

De belangrijkste verificaties betreffen de verwerkbaarheid (consistentie, neiging tot segregatie en bleeding), de druksterkte en het volumetrisch rendement.

Bestanddeel	Massa (kg/m ³)	Volumieke massa (kg/l)	Volume (l)
Cement	345	3,1	345 / 3,1 = 111 liter
Effectief water	170	1	170 liter
Lucht			2,0% = 20 liter
Granulaten			1000 - 111 - 170 - 20 = 699 liter

Tab 2.3.1
Voorbeeld van een volumeberekening van beton

2.4 Productie en transport

Dosering van de bestanddelen

De correcte productie van een beton met een gegeven samenstelling hangt in hoge mate af van de gebruikte productie-installaties. De hoeveelheden van de verschillende bestanddelen (bindmiddel, granulaten, aanmaakwater, hulpstoffen en toevoegsels) moeten daarbij zeer precies worden gerespecteerd. Daarvoor bestaan er twee systemen: gewichtsmatige dosering en volumedosering, waarvan het laatste minder nauwkeurig is. De volgorde waarin de bestanddelen worden ingevoerd in de menger is van groot belang en moet voorafgaand worden uitgetest. Deze volgorde heeft meer bepaald invloed op:

- ▶ de goede verdeling van de bestanddelen
- ▶ de doeltreffendheid van het mengen
- ▶ een optimaal rendement van de hulpstoffen
- ▶ de productiecapaciteit
- ▶ de slijtage, reiniging en onderhoud van de menginstallatie.

Mengen van de bestanddelen

De menger moet alle afzonderlijke bestanddelen mengen tot een perfect homogeen mengsel en bovendien voldoen aan de volgende vereisten :

- ▶ hoge meng-intensiteit
- ▶ korte mengtijd
- ▶ snelle verdeling van de bestanddelen
- ▶ optimale omhulling van de granulaten met cementpasta
- ▶ snelle lediging
- ▶ minimale slijtage.

Het volume van de menger (doorgaans tussen 2 en 5 m³) is lager dan dat van truckmixers (tot 12 m³). Een volledige "lading" (= 1 volle truckmixer) bestaat daarom uit verschillende "batchen", ook wel "charges" genoemd.

Mengtijd

De mengtijd is de duur van het mengen vanaf het ogenblik dat alle bestanddelen, ook het water, in de menger zijn toegevoegd.

De vereiste mengtijd varieert afhankelijk van het te produceren beton en van het type menger. De mengtijd moet worden bepaald aan de hand van proeven.

Indien het nodig is om de consistentie aan te passen tijdens het mengen door water of hulpstof toe te voegen, moet de mengtijd worden verlengd.



Fig 2.4.1
Zicht binnen
in een menger
van een beton-
centrale

2.4 Productie en transport

De praktijk en vele proeven hebben aangetoond dat er naast de homogene menging nog andere factoren een belangrijke rol spelen voor de betonkwaliteit. Energiek mengen bijvoorbeeld is goed voor het bevochtigen en voor de dispersie van het bindmiddel, wat een gunstige invloed heeft op de druksterkte van het beton.

- ▶ Een mengtijd van minimaal 45 tot 60 seconden wordt aanbevolen.
- ▶ Bij gebruik van een luchtbelvormer moet deze duur verlengd worden.

Het gebruik van een wattmeter (meting van het vermogen dat wordt opgenomen door de motor van de menger tijdens het aanmaken van beton) laat een visuele weergave toe van het moment waarop het beton een voldoende homogeniteit verkrijgt (zie het horizontale deel van de curve op het einde van fase 2, fig 2.4.2).

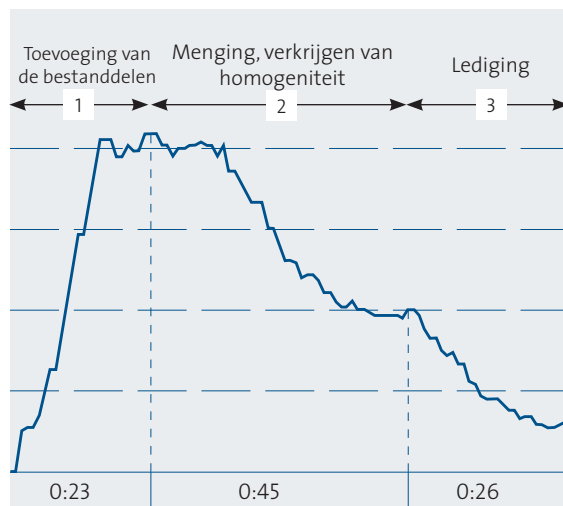


Fig 2.4.2
Voorbeeld van een Wattmetercurve in functie van de tijd (seconden)



Fig 2.4.3
Truckmixer



Fig 2.4.4
Centrale voor stortklaar beton

Transport en levering van het beton

Stortklaar beton moet zo snel mogelijk van de centrale naar de werf worden vervoerd, in het algemeen in een truckmixer (betonmixer). Het beton moet zo snel als mogelijk (maximum 100 à 120' na aanmaak) geplaatst worden als men de kwaliteit ervan wil bewaren. Indien beton vervoerd wordt met kipwagens dient het beschermd te worden tegen de weersomstandigheden.

Bij aankomst op de werf moet elke leveringsbon door de werfverantwoordelijke gecontroleerd worden (conformiteit met de bestelling). Bij vrachtwagens met menginrichting moet het beton bij aankomst opnieuw enkele minuten worden gemengd alvorens te lossen. Indien hulpstof wordt toegevoegd is een minimale mengtijd van 1 minuut/m³ noodzakelijk.

Het toevoegen van bijkomend water wordt ten stelligste afgeraden, omdat dit water de kwaliteit van het beton vermindert. Als de werfverantwoordelijke niettemin toch zou vinden dat er water toegevoegd moet worden, moet dit worden vermeld op de leveringsbon. Gecertificeerd beton verliest daardoor zijn conformiteitslabel.

Als een voertuig niet onmiddellijk kan worden gelost bij aankomst op de werf, moet het op een beschermde plek worden geplaatst (in de schaduw of onder een beschutting bijvoorbeeld). Als er langer dan de gegarandeerde verwerkingstijd moet gewacht worden, kan het beton alleen nog maar worden gebruikt voor secundaire of voorlopige werken (op- of aanvullingen, werfwegen, ...).

2.5 Bekisting

De bekisting levert een belangrijke bijdrage tot het welslagen van een betonconstructie en bepaalt het uitzicht, de structuur en de kleur van het oppervlak (fig 2.5.1). De bekisting schenkt aan het beton zijn architecturale eigenschappen. Niettemin wordt er soms te weinig zorg en aandacht aan besteed.

Keuze van de bekisting

In principe kiest de bouwonderneming de bekisting op basis van de volgende criteria:

- ▶ type werk of element
- ▶ kwaliteit van het betonoppervlak
- ▶ mogelijkheid tot (veelvuldig) hergebruik
- ▶ eenvoud van montage
- ▶ thermisch isolatievermogen
- ▶ prijs.

Bekistingsmaterialen

- ▶ ruwe of geschaafde planken
- ▶ behandelde houten panelen
- ▶ multiplex platen
- ▶ geplastificeerde bekisting (polyester, polystyreen, linoleum, elastomeren, ...)
- ▶ metalen bekisting.

Algemene eisen voor bekistingen

- ▶ nauwkeurige afmetingen
- ▶ waterdichtheid (fig 2.5.2)
- ▶ stijfheid, geen vervormingen (fig 2.5.3)
- ▶ zuiverheid
- ▶ lage hechting aan verhardend beton
- ▶ esthetisch uitzicht van de oppervlaktestructuur (fig 2.5.4 en 2.5.5)



Fig 2.5.1
Voorbeeld van een proef met verschillende bekistingen en gebruik van verschillende ontkistingsproducten. Alles werd met hetzelfde beton gestort



Fig 2.5.2
Effect van bekistingsvoegen die onvoldoende dicht zijn



Fig 2.5.3
Onvoldoende stijfheid van de bekisting en van de uitsparingen tijdens het storten van vloeibaar beton



Fig 2.5.4
Geslaagd betonoppervlak: bekisting met ruwe houten planken

2.5 Bekisting

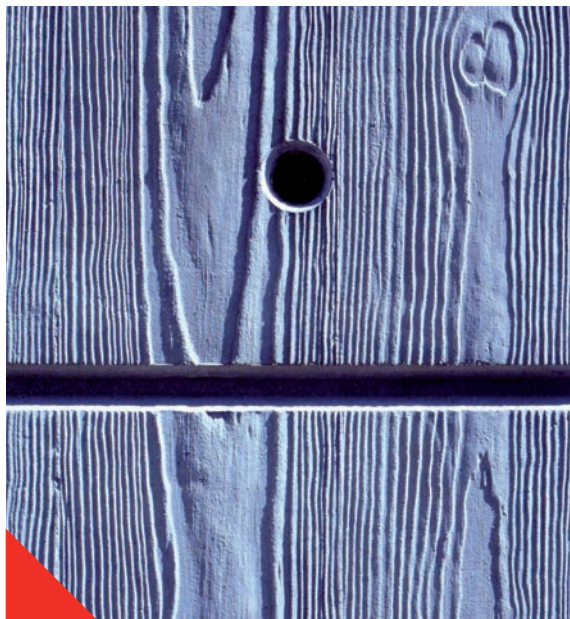


Fig 2.5.5
Voorbeeld van een erg geslaagd oppervlak in gestructureerd beton



Fig 2.5.6
Door een lokaal tekort aan ontkistingsproduct is het beton bij het ontkisten plaatselijk afgerukt



Fig 2.5.7
Kleurverschillen in een betongevel te wijten aan een slechte verdeling van het ontkistingsmiddel

Soorten bekisting

In het algemeen geldt dat naarmate een bekisting meer absorbeert, het oppervlak gladder en geslotener zal zijn, aangezien het overtollige water en de luchtballen van het pas gestorte beton, op zijn minst gedeeltelijk, geabsorbeerd zijn. Wanneer voor zichtbeton houten panelen worden gebruikt, moeten ze dezelfde mate van hergebruik hebben. Het absorberend vermogen van hout vermindert immers bij elk gebruik en zal op die manier andere kleurnuances veroorzaken. Ruwe planken moeten vooraleer ze gebruikt worden, met cementmelk verzadigd worden. Op die manier kan men de ongelijkheden in het hout min of meer elimineren.

Niet-absorberende en waterafstotende bekistingen bevorderen plaatselijke concentraties van fijne deeltjes (micro-ontmenging) en een verhoging van de W/C-factor. Hierdoor ontstaan onregelmatigheden in de kleur van het betonoppervlak ("wolken"). Belangrijke ontmenging aan het oppervlak kan leiden tot een verlies van duurzaamheid (zie hoofdstuk 4.1).

Ontkistingsmiddelen

Ontkistingsmiddelen of -producten worden gebruikt om de bekisting zonder problemen los te maken van het betonoppervlak en daarbij geen schade te veroorzaken aan één van beide (fig 2.5.6). Ze moeten met zorg worden aangebracht in een dunne en gelijkmatige laag vóór de wapening wordt geplaatst. Overtollig product moet worden weggenomen met een doek. Vlekken of grijsnuances aan het betonoppervlak zijn vaak een gevolg van het verkeerd aanbrengen van het ontkistingsproduct (fig 2.5.7).

Er zijn verschillende soorten ontkistingsproducten, zoals oliën, wassen, lakken en emulsies.

Ze zijn geformuleerd met of zonder een oplosmiddel. Oplosmiddelvrije ontkistingsproducten zijn klaar voor gebruik na aanbrenging. Ontkistingsmiddelen met een oplosmiddel zijn dit pas nadat de oplosmiddelen zijn verdampd. De droogtijden kunnen aanzienlijk langer zijn bij lage temperaturen, hoge luchtvochtigheid of bij het aanbrengen van een dikke laag product. Langdurige blootstelling aan weer en wind dient hoe dan ook vermeden te worden om volledige verdamping te vermijden.

2.6 Verpompen van beton

Toepassingsgebied

Verpompen is een moderne en economische methode om beton te storten (fig 2.6.1) en kan worden gebruikt voor bijna alle soorten werken. Toch wordt deze techniek vooral gebruikt voor omvangrijke storten of wanneer de stortzone moeilijk toegankelijk is.

De betonpompen worden ondergebracht in twee grote categorieën, mobiele pompen en stationaire pompen:

- ▶ Mobile pompen laten toe het beton dicht bij de plaats van storten te brengen. Het zijn meestal zuigerpompen. Rotorpompen kunnen ook gebruikt worden; ze hebben lagere debiet- en drukcapaciteiten, maar zijn in sommige gevallen effectiever, vooral voor het verpompen van beton met ingebrachte lucht (beperking van het risico op propvorming).
- ▶ Stationaire pompen zijn vast opgesteld en worden geïnstalleerd voor grootschalige projecten.

Wanneer de transportafstand en/of het betonvolume klein is, is het ook mogelijk om een "mixerpomp" te gebruiken (fig 2.6.2).

Aanbevelingen voor de samenstelling

Voor de samenstelling van pompbeton moet men bepaalde regels in acht nemen zodat het verse beton alle eigenschappen heeft die nodig zijn voor het verpompen. Het betonmengsel voor pompbeton moet dus altijd worden opgesteld door een ervaren betontechnoloog. Sommige betontypes (aardvochtig, poreus of schraal beton) zijn niet verpompbaar.

Bij het samenstellen van pompbeton moet extra zorg worden besteed aan de korrelopbouw, de cementdosering en het gehalte aan fijne deeltjes (tab 1.3.4), zonder de voorgeschreven eigenschappen van het verhard beton te verwaarlozen.

De pomp stuwt het beton naar de stortplaats via een systeem van leidingen (meestal $\text{\O} 100$ of 125 mm). Het belangrijkste gevaar bij het verpompen van beton is het risico op ontmenging.

Cement

Elk cementtype dat voldoet aan de norm, is in principe geschikt voor de productie van pompbeton, maar cement met een te lage fijnheid worden best vermeden. De minimale dosering om beton gemakkelijk door de leidingen te voeren is ongeveer 300 kg/m^3 .

Granulaten

De korrelopbouw van zand moet continu zijn. Te grote en ongecontroleerde variaties in korrelverdeling van het zand liggen dikwijls aan de oorzaak van moeilijkheden bij het verpompen.

Dankzij de vooruitgang die is geboekt bij het ontwikkelen van betonpompen, speelt de vorm van de grove granulaten (gerold of gebroken) niet langer een doorslaggevende rol bij de geschiktheid tot verpompen. Een continue opbouw van het inert skelet blijft echter aanbevolen.



Fig 2.6.1
Storten van beton met een betonpomp

2.6 Verpompen van beton

Toevoegsels

Door zijn ronde korrelvorm is vliegglas geschikt als toevoegsel voor het verpompen van vers beton, doorgaans bij doseringen tussen 20 en 70 kg/m³.

Hulpstoffen

Hulpstoffen kunnen worden gebruikt volgens dezelfde principes die ook gelden voor niet-verpompt beton. Luchtbelvormers kunnen het vermogen van de pomp wel nadelig beïnvloeden wanneer het luchtgehalte van het vers beton meer dan 4% bedraagt. Sommige cohesiemiddelen bevorderen het verpompen.

Consistentie

Om het beton gemakkelijk te kunnen verpompen moet het een voldoende plastische consistentie hebben, d.w.z. een slump tussen 100 en 210 mm. Bij het gebruik van een S5-beton (slump \geq 220 mm) moet een verhoogd gehalte aan fijne deeltjes zorgen voor voldoende stabiliteit en cohesie. Zo vermindert de neiging tot segregatie die kan leiden tot verstoppingen in de pompleidingen.

Adviezen voor de verwerking

Opdat het verpompen van beton probleemloos zou verlopen, moet er in een vroeg stadium overleg zijn tussen de aannemer, de betoncentrale en de pomp-onderneming.

- ▶ De pomp-onderneming is verantwoordelijk voor de installatie en het gebruik van de pomp, daar waar de aannemer verantwoordelijk is voor de plaatsing, de verdichting en de nabehandeling van het beton.
- ▶ Het leveringsritme van het beton en de prestaties van de pomp moeten afgestemd worden op het rendement van de plaatsers van het beton.
- ▶ Het verpompen wordt in het algemeen gestart met een smerings-operatie bestaande uit het verpompen van 0,5 tot 2 m³ cementrijke mortel of grout ("smeerbed" of "barbotine"). Deze mag in geen geval worden gebruikt als structuurbeton.



Fig 2.6.2

Het gebruik van de mixer-pomp vermindert de hinder in de stad

2.7 Storten en verdichten

Wijze van plaatsing	Consistentie van het beton				
	S1	S2	S3	S4	S5
Kubel (fig 2.7.1)					
Pomp					
Stortgoot (tot 3m)					

Tab 2.7.1
Wijze van plaatsing in functie van de consistentie

Betonstorten

Tabel 2.7.1 geeft de belangrijkste mogelijkheden voor het lossen en plaatsen van beton die gebruikt mogen worden, in functie van de consistentie en de bijzonderheden van de werf.

Het geleverde volume en de middelen voor het plaatsen moeten op elkaar afgestemd zijn. Het plaatsen van het beton moet tegen een constant ritme gebeuren, in horizontale lagen met een beperkte dikte (30 à 50 cm) die zo gelijkmatig mogelijk zijn. Om ontmenging te voorkomen mag de valhoogte maximaal 50 tot 70 cm bedragen (fig 2.7.2). Indien deze hoogte meer is dan 1 m, moet het beton worden gestort met een buis of een slang.

Men zal er tevens over waken dat het beton niet tegen de verticale wanden van de bekisting wordt gestort, om ontmenging te vermijden (fig 2.7.2).

Verdichten

Een zorgvuldige verdichting is van essentieel belang voor de duurzaamheid van het beton. Goed verdicht beton heeft de volgende voordelen:

- ▶ hogere waterdichtheid
- ▶ betere duurzaamheid
- ▶ hogere druksterkte
- ▶ betere hechting van het beton aan de wapening.

Verdichtingsmethodes

De keuze van de verdichtingsmethode is afhankelijk van de consistentie van het beton. De meest gebruikte en meest doeltreffende methode is trillen met behulp van trilnaalden (fig 2.7.3), bekistingstrillers of trilbalken. Dikwijls gebruikt men een combinatie van deze methodes. Trillen vermindert sterk de interne wrijving tussen de granulaten. De korrels komen dicht bij elkaar, de lucht stijgt naar het oppervlak en de holtes worden gevuld met cementpasta. Toch blijft er altijd een hoeveelheid lucht achter, de zogenaamde "ingesloten lucht", die meestal ongeveer 1,5% van het betonvolume bedraagt. Zelfverdichtend beton (zie hoofdstuk 3.2) vereisen geen verdichting. Onder invloed van de zwaartekracht verdicht dit betontype uit zichzelf.



Fig 2.7.1
Storten van beton met de kubel

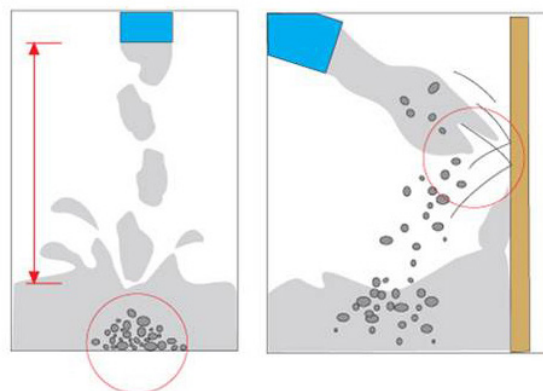


Fig 2.7.2
Risiko op ontmenging

2.7 Storten en verdichten

Toepassingsgebied van trilnaalden met hoge frequentie:

De ervaring heeft geleerd dat een frequentie van 12 000 t/min (200 Hz) het gunstigst is voor de meest courante betonsoorten. Voor beton met een beperkte korrelgrootte moet deze frequentie worden verhoogd tot 18 000 t/min (300 Hz).

Regels voor een goede verdichting

- ▶ Tril het beton in lagen met een dikte van 30 tot 50 cm.
- ▶ De trilnaald moet snel in het beton worden ingebracht, op gelijkmatige tussenafstanden. Ze moet kort op het laagste punt worden gehouden, daarna langzaam omhoog getrokken en tenslotte weggehaald worden zodat het oppervlak vanzelf terug dichtgaat. Als het oppervlak niet dichtgaat, kan dit erop wijzen dat de consistentie van het beton te laag is, dat de binding al begonnen is, of nog dat de trilduur onvoldoende is.
- ▶ Het beton mag niet horizontaal worden verplaatst met behulp van de trilnaald.
- ▶ Kies de trilpunten zodanig dat de trilzones elkaar licht overlappen (tab 2.7.2).
- ▶ Stop met trillen zodra er een fijne laag cementmelk wordt gevormd aan het oppervlak en er nog slechts sporadisch grote luchtballen naar boven komen.
- ▶ Wanneer het beton gestort is in opeenvolgende lagen, moet de trilnaald ongeveer 10 tot 15 cm in de onderliggende laag doordringen om een goede hechting tussen de twee lagen te garanderen (fig 2.7.4).
- ▶ Vermijd om de bekisting en de wapeningen aan te raken met de trilnaald.

Praktische regel

De afstand tussen de trilpunten = 8 à 10 maal de diameter van de naald.

Tab 2.7.2

Praktische waarden voor de werkzame zone en de afstand tussen de verdichtingspunten

Diameter van de trilnaald (mm)	Diameter van de invloedszone (cm)	Tussenafstand van de verdichtingspunten (cm)
< 40	30	25
40 à 60	50	40
> 60	80	70

Naverdichten (opnieuw trillen)

Door de trilnaald opnieuw in het reeds verdichte beton te brengen vooraleer de binding van het beton begonnen is, wordt de dichtheid nog verbeterd. Deze techniek is vooral geschikt voor beton met een hoge W/C-factor en met de neiging tot plastische zetting, of beton dat moeilijk te storten was. Zo kunnen holtes worden gevuld die ontstaan waren door het (na)zetten van het verse beton onder de horizontale wapeningen. Een absolute voorwaarde voor het succes van naverdichting is dit te doen op het goede moment, wanneer het beton nog verwerkbaar is. Dit is de grootste moeilijkheid. Daarom moet naverdichting worden uitgevoerd door gekwalificeerd en ervaren personeel.



Fig 2.7.3

Verdichting van beton met een trilnaald

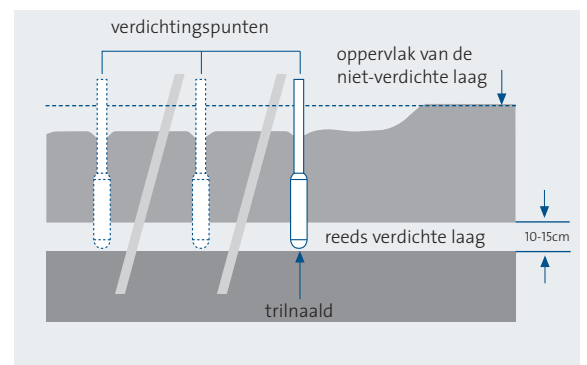


Fig 2.7.4

Storten in lagen en tussenafstand van de verdichtingspunten

2.8 Nabehandeling

Doel van de nabehandeling van beton

Onder de term "nabehandeling" of "curing" wordt het geheel van maatregelen begrepen die genomen moeten worden om het beton te beschermen vanaf het plaatsen totdat het voldoende sterkte heeft ontwikkeld, om zo de kwaliteit van het beton te garanderen.

De nabehandeling moet het beton beschermen tegen:

- ▶ de uitdroging van het verse en jonge beton ("vroegtijdige uitdroging") veroorzaakt door wind, zon, droge koude
- ▶ slechte weersomstandigheden.

De nabehandeling moet ervoor zorgen dat het geplaatste beton zijn intrinsieke eigenschappen kan ontwikkelen door een correcte hydratatie van het cement, en dit ook in de zones dichtbij het oppervlak (het dekkingsbeton). Het jonge beton is immers vooral in de oppervlaktelaag zéér gevoelig aan vroegtijdige uitdroging. Het is precies in die zone dat de cementpasta een hoge dichtheid en een minimale porositeit moet hebben om weerstand te bieden aan externe aantastingen.

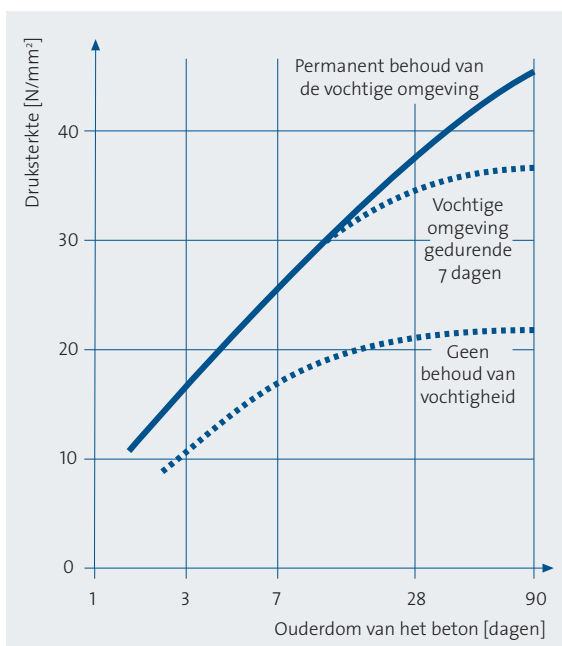


Fig 2.8.1

Invloed van het behoud van een vochtige omgeving op de sterkte-ontwikkeling van het beton van de oppervlaktelaag

Vroegtijdige uitdroging

Het is uiterst belangrijk om de maatregelen tegen vroegtijdige uitdroging toe te passen vanaf het ogenblik dat het beton geplaatst is, want de gevolgen van dit snelle verlies van water in de oppervlaktelaag zijn allerminst gewenst:

- ▶ snel optreden van grote krimp scheuren door "plastische krimp" (fig 4.2.6)
- ▶ verhoogd risico op een stoffig oppervlak
- ▶ vermindering van de slijtweerstand.

Naast deze "snelle" en "zichtbare" fenomenen heeft het verlies van water tijdens de eerste dagen en weken ook een effect op de kenmerken van het beton op lange termijn:

- ▶ vermindering van de waterdichtheid en de duurzaamheid
- ▶ verlies van sterkte (fig 2.8.1)
- ▶ verhoogd risico op het verschijnen van scheuren door "drogingskrimp".

Om al deze problemen te vermijden is het belangrijk om snel na te behandelen. Figuren 2.8.2 en 2.8.3 illustreren dat, met uitzondering van héél gunstige omstandigheden voor beton (lage lucht- en specietemperatuur, hoge relatieve vochtigheid, beperkte windsnelheid), de uitdrogingsnelheid steeds uitkomt boven de kritische waarde van $0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{u}$ voor het ontstaan van krimp scheuren.

De toepassing van gepolierde vloeren is bijzonder gevoelig aangezien het beton in de regel niet beschermd wordt in de tijdspanne tussen het einde van de plaatsing en het begin van het polieren. Bij ongunstige omstandigheden dient de toepassing van een "tussencuring" voorzien te worden.

2.8 Nabehandeling

Fig 2.8.2

Nomogram om de uitdroging van een horizontaal onbeschermd betonoppervlak te bepalen. Voorbeeld: T° van de lucht 28°C , RV van de lucht 50% , T° van het beton 28°C , windsnelheid 5 m/s . Resultaat: uitdrogingsnelheid $= 0,8\text{ kg/m}^2\cdot\text{u}$

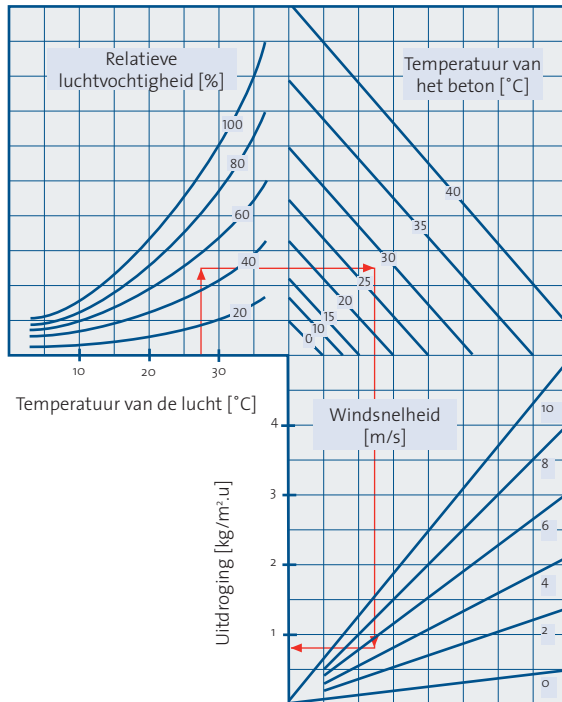


Fig.2.8.5

Met een gekleurd nabehandlingsproduct kan het aanbrengen beter gecontroleerd worden

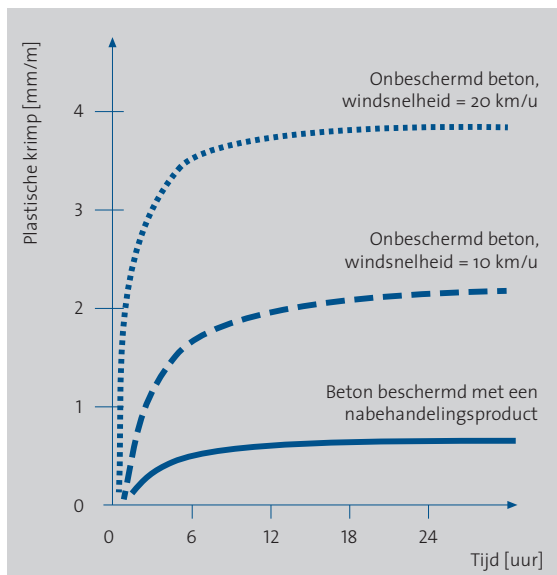


Fig 2.8.6

Nabehandeling door afdekking met plasticfolie

Fig 2.8.3

Gevolgen van ongunstige weersomstandigheden op de krimp van jong beton, met en zonder nabehandeling



Slechte weersomstandigheden

Afhankelijk van hun intensiteit kunnen neerslag en andere weersomstandigheden de eigenschappen van vers of jong beton - soms definitief - veranderen: uitwassing van het oppervlak, verhoogde porositeit, verminderde duurzaamheid, ...

Nabehandelingmethoden

De gebruikte methode en de duurtijd van de nabehandeling is afhankelijk van het type beton en vooral van de directe omgeving.

Fig 2.8.4

Vernevelen van een nabehandlingsproduct



Er bestaan verschillende methodes om vers geplaatst beton te beschermen:

- ▶ de bekisting niet verwijderen
- ▶ een nabehandlingsproduct of "curing compound" verstuiven (fig 2.8.4 en 2.8.5)
- ▶ afdekken met plasticfolie (fig 2.8.6)
- ▶ het betonoppervlak met water bespuiten (continu bij grote hitte)
- ▶ de elementen onder water houden
- ▶ afdekken met thermische zeilen
- ▶ bescherming aanbrengen die de vochtigheid behoudt (jute, geotextiel matten)
- ▶ verschillende van deze maatregelen combineren.

2.8 Nabehandeling

Duur van de nabehandeling

Het is belangrijk om de nabehandeling gedurende een voldoende lange periode te behouden. De norm NBN B15-400 (uitvoering van betonconstructies) laat toe om het vereiste minimaal aantal dagen, gaande van 1 tot 15, te bepalen in functie van de omgevingsomstandighe-

den en de sterkte-ontwikkeling van het beton (tab 2.8.1). Bij gebruik van een efficiënt nabehandelingsproduct of "curing compound" worden deze termijnen doorgaans gerespecteerd. Voor de andere methodes vereist het respect van deze termijnen bijzondere aandacht.

Minimumduur van de nabehandeling					
Omgevingsomstandigheden	T° aan het oppervlak van het beton	Sterkte-ontwikkeling van het beton			
		Snel	Gemiddeld	Langzaam	Zeer langzaam
GOED Geen directe blootstelling aan zon en wind Relatieve luchtvochtigheid $\geq 80\%$	$\geq 10^\circ\text{C}$	1 dag	2 dagen	3 dagen	4 dagen
	$< 10^\circ\text{C}$	2 dagen	4 dagen	5 dagen	6 dagen
NORMAAL Gemiddelde bezonning en/of relatieve vochtigheid $\geq 50\%$	$\geq 10^\circ\text{C}$	2 dagen	3 dagen	4 dagen	6 dagen
	$< 10^\circ\text{C}$	4 dagen	6 dagen	8 dagen	12 dagen
SLECHT Sterke bezonning en/of krachtige wind en/of relatieve vochtigheid $< 50\%$	$\geq 10^\circ\text{C}$	3 dagen	4 dagen	7 dagen	10 dagen
	$< 10^\circ\text{C}$	5 dagen	8 dagen	10 dagen	15 dagen

Tab 2.8.1
Minimumduur van de nabehandeling volgens de norm NBN B15-400

Voor de bepaling van de sterkte-ontwikkeling van het beton kan men zich baseren op het gebruikte cementtype (beschikbaar op de leveringsbon):

- ▶ CEM I 52,5 N of CEM I 52,5 R (eventueel gecombineerd met CEM III/A) : **Snel**
- ▶ CEM III/A 42,5 N LA (eventueel gecombineerd met CEM III/A 32,5 N LA) : **Gemiddeld**
- ▶ CEM III/A 32,5 N LA of CEM III/B 42,5 N-LH/SR LA : **Langzaam**
- ▶ indien het beton vlieg-as bevat (op de LB) moet een lagere klasse genomen worden (bv. gemiddeld in plaats van snel).

Door hun specifieke hydratatiemechanismen zijn cementen met een belangrijk aandeel hoogovenslak (type CEM III) bijzonder gevoelig aan vroegtijdige uitdroging.

Praktische raad

Om te vermijden dat het aanbrengen van een nabehandelingsproduct de hechting van een eventuele, later aangebrachte, toplaag zou bemoeilijken, moet het betonoppervlak indien nodig worden behandeld na het einde van de nabehandeling (zandstralen of afschuren bijvoorbeeld).

2.9 Betonneren bij warm weer

In de zomermaanden stelt men dikwijls een daling van enkele N/mm² van de gemiddelde druksterkte na 28 dagen vast. Het is een bekend fenomeen, dat zich overal ter wereld voordoet waar belangrijke temperatuurverschillen optreden tussen de seizoenen. De voornaamste oorzaken zijn een wijziging in de grootte van de cementshydraten bij hoge temperatuur en de toevoeging van water aan het beton.

Hogere temperatuur van het beton

In het algemeen verloopt bij een hogere temperatuur het hydratatieproces sneller omdat de vorming van hydraten versneld wordt. Daaruit volgt een toename van de beginsterkte, maar ook een afname van de eindsterkte (fig 2.9.1). De grovere en meer heterogene microstructuur van de gevormde hydraten bij hoge temperatuur leidt immers tot een minder fijne poriënstructuur en een lagere eindsterkte.

Toevoeging van water

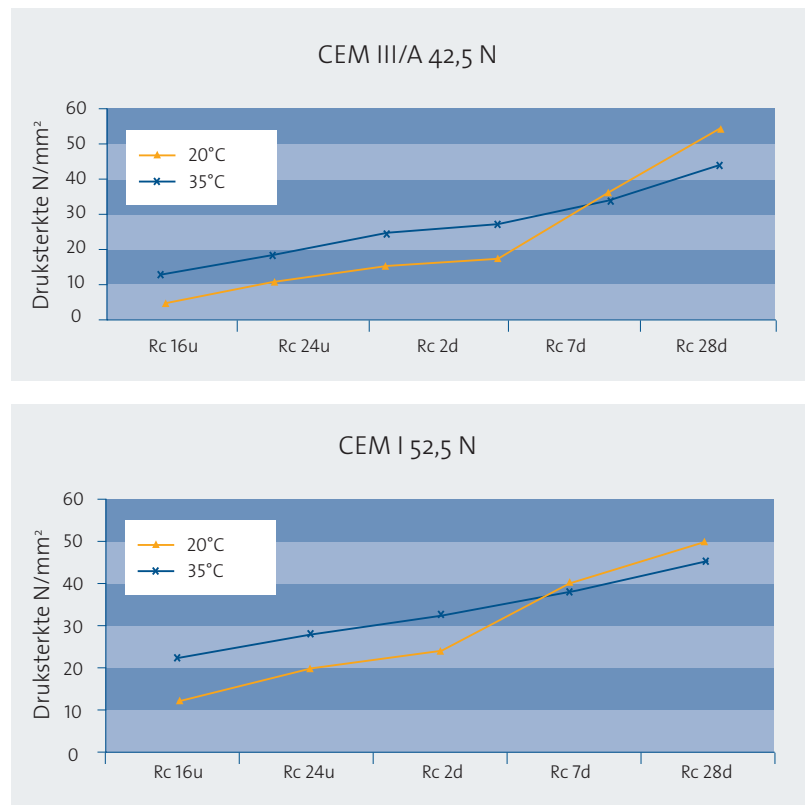
Bij hogere temperaturen stelt men in het algemeen vast dat de verwerkbaarheid van het beton sneller afneemt en dat er zelfs voortijdige verstijving kan optreden, waardoor het storten wordt bemoeilijkt. Het is niet altijd mogelijk om dit fenomeen volledig te compenseren door een hogere dosis (super)plastificeerder.

Alhoewel wordt aangeraden om op de werf nooit water aan beton toe te voegen, is de verleiding groot om het beton verwerkbaarder te maken door water toe te voegen. Maar elke toevoeging van water (hoe klein ook) verhoogt de W/C-factor en leidt onvermijdelijk tot een druksterktedaling en een nog groter verlies van duurzaamheid van het beton.

Praktische regel

De toevoeging van 10 liter water per m³ beton kan tot een verlies van ongeveer 10% van de druksterkte na 28 dagen leiden.

Fig 2.9.1
Invloed van een hoge temperatuur op de druksterkte. Het beton geproduceerd bij 35°C werd gedurende 48 uur bij deze temperatuur bewaard en daarna bij 20°C.



2.9 Betonneren bij warm weer

Om het verlies van druksterkte bij warm weer binnen aanvaardbare grenzen te houden mag de maximumtemperatuur van vers beton niet meer zijn dan 30°C. Voor beton dat aan bijzondere eisen moet voldoen, mag deze temperatuur niet meer zijn dan 25°C.

Naast het verlies van druksterkte (fig 2.9.1) en duurzaamheid kan een hoge temperatuur van het beton andere ongewenste effecten veroorzaken:

- ▶ De snellere hydratatie van het cement leidt tot een voortijdig verlies van verwerkbaarheid en soms zelfs tot een verstijving van het beton, die het storten zo goed als onmogelijk kan maken.
- ▶ Het beton gaat sneller uitdrogen aan het oppervlak. Dit fenomeen wordt nog versterkt bij wind (hoe zwak ook), zonnig weer en bij een lage luchtvochtigheid. Nabehandeling van het beton (zie hoofdstuk 2.8) kan het verlies van vocht beperken. Als men kiest om te besproeien met water, moet dit continu gebeuren om thermische schokken aan het oppervlak te voorkomen. Indien men geen maatregelen treft, wordt het cement onvolledig gehydrateerd. De uiteindelijke druksterkte en duurzaamheid van delen van het werk (vooral de oppervlakken) die snel uitgedroogd zijn, neemt af. Het beton zal onderworpen zijn aan plastische krimp met een belangrijk risico op scheurvorming (zie hoofdstuk 4.2). Zichtbeton kan ook weinig esthetische kleurverschillen vertonen.

Berekening van de temperatuur van vers beton

De temperatuur "T^b" van vers beton kan worden berekend via een vereenvoudigde formule:

$$T_b = \frac{(C_c \cdot C \cdot T_c) + (C_e \cdot E \cdot T_e) + (C_g \cdot G \cdot T_g)}{C_c \cdot C + C_e \cdot E + C_g \cdot G}$$

T_b Temperatuur van vers beton (°C)

C_c, C_e, C_g Soortelijke warmte :

Rekenwaarden 0,84 kJ/(kg . K) voor cement en granulaten en 4,19 kJ/(kg . K) voor water

C, E, G Gehalte aan cement, water en granulaten (kg/m³)

T_c, T_e, T_g Temperatuur van water, cement en granulaten (°C)

Nemen we bijvoorbeeld volgende betonsamenstelling:

- cement : 350 kg
- water : 175 liter
- granulaten : 1 800 kg

In onderstaande tabel worden de betontemperaturen aangegeven (in het rood) op basis van de temperatuur van het cement (in abscis in het blauw) en deze van de granulaten (in ordinaat in het groen). In de tabel wordt verondersteld dat de temperatuur van het water constant blijft op 20°C, maar met dezelfde formule kan ook de invloed van de watertemperatuur op de temperatuur van het vers beton bepaald worden.

		T° van het cement					
		20	30	40	50	60	70
T° van de granulaten	20	20	21	22	23	25	25
	30	26	27	28	29	21	32
	40	32	33	34	35	37	38
	50	38	39	40	41	42	44
	60	44	45	46	47	48	50
	70	50	51	52	53	54	56

T° van beton in functie van de temperatuur van cement en granulaten

De tabel toont dat de temperatuur van de granulaten de grootste invloed heeft op de temperatuur van het beton, en dat de temperatuur van het cement slechts een beperkte invloed heeft. Een temperatuurstijging van 1°C van het beton wordt bekomen wanneer:

- de temperatuur van de granulaten met ongeveer 1,6°C toeneemt, of
- de temperatuur van het water met 4°C toeneemt, of
- de temperatuur van het cement met 10°C toeneemt.

2.9 Betonneren bij warm weer

Overzicht van de te nemen maatregelen

Vorbereiding van de werf

Betonneren bij warm weer vereist een goede planning :

- ▶ Een zorgvuldig coördinatie van de betonleveringen en het storten laat toe wachttijden te vermijden.
- ▶ Voldoende materieel en personeel voorzien voor het betonneren, zodat storten en verdichten van het beton zonder onderbreking kunnen verlopen.
- ▶ Indien, om welke reden dan ook, niet aan de voorwaarden voor correct betonneren bij warm weer voldaan kan worden, moet het betonneren worden uitgesteld tot de temperatuur minder hoog is.

Samenstelling en vervaardiging van beton

De meeste maatregelen hebben tot doel de temperatuur van het vers beton te verlagen :

- ▶ De grove granulaten afkoelen door besproeiing (de dosering van het aanmaakwater moet overeenkomstig worden verminderd). Het wordt ten zeerste afgeraden om warme granulaten, die bijvoorbeeld waren blootgesteld aan de zon, te gebruiken om in de zomer beton te maken. De temperatuur van de granulaten kan oplopen tot 50°C of meer aan het oppervlak van de voorraad. Het wordt aanbevolen om granulaten bij voorkeur 's morgens te gebruiken nadat ze 's nachts zijn afgekoeld of ze eerst af te koelen.
- ▶ De granulaatsilo's voorzien van een thermische isolatie.
- ▶ Het aanmaakwater koelen.
- ▶ In bepaalde specifieke gevallen en onder controle van specialisten, kan men het beton afkoelen met vloeibare stikstof.
- ▶ Het gebruik van bindingsvertragers kan in beperkte mate de nadelige gevolgen van een te snelle hydratatie van het cement verhelpen. Vertragers vereisen echter een langere nabehandeling. Voorafgaande proeven dienen uitgevoerd te worden om de juiste dosering van de hulpstof te bepalen.

Plaatsing en verdichting

Bij de verwerking van het beton neemt men volgende maatregelen :

- ▶ De bekisting of ondergrond voor het storten bevochtigen opdat zij geen water van het vers beton zouden opslorpen. Overmatig besproeien waardoor water in de bekisting zou achterblijven echter vermijden.
- ▶ Het beton snel en zonder onderbreking plaatsen.
- ▶ Als onvoorzien wachttijden niet vermeden kunnen worden, moet het beton in de vrachtwagen en/of stortkubel worden beschermd tegen zon en wind. De buitenkant van de truckmixers kan met water besproeid worden om het beton in de kuip af te koelen.
- ▶ Elke toevoeging van water op de werf strikt verbieden.

Nabehandeling

Op het gebied van nabehandeling dienen volgende maatregelen genomen te worden :

- ▶ de nabehandeling onmiddellijk na het plaatsen van het beton starten
- ▶ de bescherming (fig 2.9.2) voldoende lange tijd behouden (tab 2.8.1).



Fig 2.9.2

Beschermen van het beton tegen uitdroging

2.10 Betonneren bij koud weer

Risico's bij lage temperaturen

Figuur 2.10.1 toont het vertragend effect van lage temperaturen op de sterkte-ontwikkeling van beton. Deze vertraging is vooral merkbaar op jonge ouderdom. Het vervaardigen en het storten van beton bij lage temperaturen vraagt dus bepaalde voorzorgsmaatregelen.

De norm NBN EN 206 bepaalt dat de temperatuur van vers beton niet lager mag zijn dan 5°C op het ogenblik van levering.

Wanneer de temperatuur van beton onder 5°C daalt, wordt er zo goed als geen sterkte ontwikkeld. Als water in het jonge beton befrist, kan de inwendige samenhang worden verstoord door de uitzetting van het ijs. Beton dat dergelijke schade vertoont, moet verwijderd worden.

Voor betonwerkzaamheden in periodes met risico op nachtvorst moet men ervoor zorgen dat de temperatuur van het beton tenminste +5°C is bij het storten. Vervolgens dient men het beton te beschermen totdat het voldoende sterkte heeft bereikt. Men neemt aan dat beton bestand is tegen vorst van zodra de druksterkte 5 N/mm² bereikt.

In de praktijk hanteert men de volgende regel om vorstschade te voorkomen: "De temperatuur van het meest blootgestelde oppervlak van het beton moet ten minste +5°C zijn gedurende de eerste 72 uur na de plaatsing".

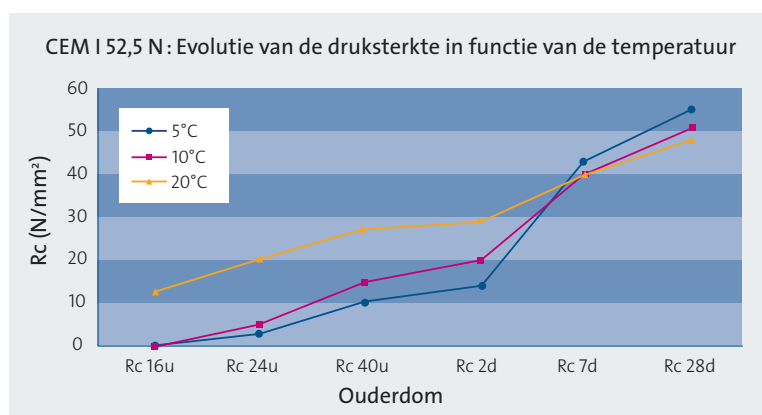
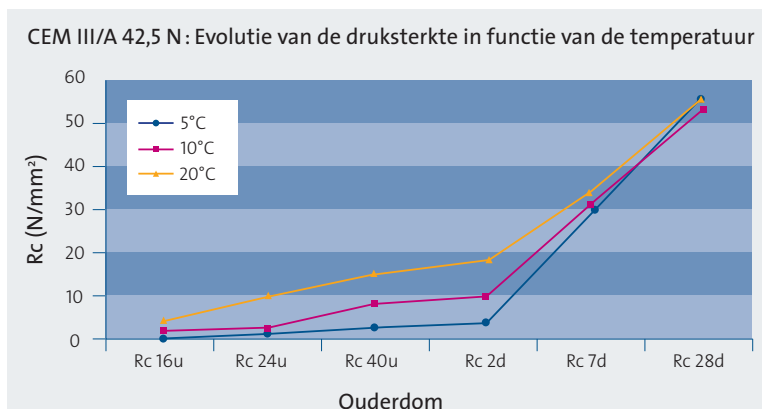


Fig 2.10.1

Involed van lage temperaturen op de druksterkte. Voorbeeld van een beton met 300 kg cement. Het beton wordt 48 uur op de aanmaaktemperatuur gehouden, daarna bewaard bij 20°C.

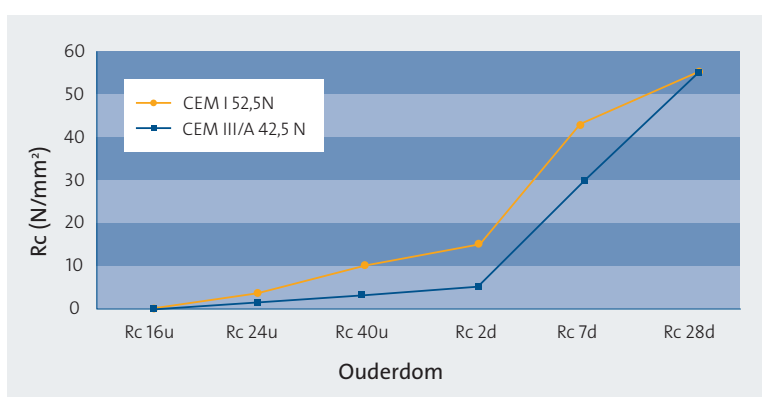


Fig 2.10.2

Vergelijking van de reactiviteit van CEM I 52,5 N met CEM III/A 42,5 N bij 5°C

2.10 Betonneren bij koud weer

Maatregelen om de temperatuur van vers beton te verhogen

Opdat de temperatuur van vers beton niet te laag zou zijn tijdens het betonneren, kan men de bestanddelen verwarmen of het cement en de granulaten tenminste op een temperatuur houden die hoger ligt dan de buitentemperatuur.

Door toepassing van de formule op pagina 63 bekomt men onderstaande tabel die de temperatuur geeft van het vers beton (in het rood) in functie van de temperatuur van het aanmaakwater (in abscis in het blauw) en de temperatuur van de granulaten (in ordinaat in het groen), in de veronderstelling dat de temperatuur van cement 20°C bedraagt. De formule laat natuurlijk ook toe de invloed van de cementtemperatuur op de betontemperatuur te bepalen.

		T° van het water					
		10	20	30	40	50	60
T° van de granulaten	0	5	8	11	14	17	20
	10	11	14	17	20	23	26
	20	17	20	23	26	29	32

T° van het beton in functie van de temperatuur van de granulaten en het water

De tabel illustreert dat het beton gemakkelijk een temperatuur van 10°C bereikt indien de temperatuur van de granulaten op tenminste 10°C wordt gehouden.



Fig 2.10.3
Meten van de temperatuur van vers beton

Voorzorgsmaatregelen voor het vervaardigen van beton bij koud weer

Bij de productie van beton kunnen volgende maatregelen genomen worden om de sterkte-ontwikkeling en de evolutie van de betontemperatuur te verbeteren bij koud weer:

- ▶ De temperatuur van het vers beton verhogen door het aanmaakwater en/of de granulaten te verwarmen.
- ▶ De cementdosering verhogen en/of een cement met snellere sterkte-ontwikkeling kiezen zonder de andere bestanddelen te veranderen: hierdoor zal de jonge sterkte toenemen (fig 2.10.2).
- ▶ De W/C-factor verlagen door gebruik te maken van een superplastificeerder: hoe minder water in het beton, hoe minder gevoelig voor vorst en hoe sneller de sterkte toeneemt.
- ▶ De sterkte-ontwikkeling versnellen door gebruik te maken van een bindings- en verhardingsversneller (zonder chloor).

Voorzorgsmaatregelen op de werf bij koud weer

Voor het betonneren bij lage temperaturen moeten op de werf bepaalde voorzorgsmaatregelen worden genomen:

- ▶ Nooit betonneren op een bevroren bodem noch tegen bevroren beton.
- ▶ Het voorverwarmde beton moet snel worden gestort in een bekisting die volledig vrij is van ijs en sneeuw. Er moet ook onmiddellijk verdicht worden.
- ▶ Onmiddellijk na het storten moet het beton worden beschermd tegen warmteverliezen, zodat de hydratiewarmte van het cement ten volle benut wordt. Een bescherming met isolerende matten of thermische dekzeilen wordt aanbevolen.
- ▶ Als deze matten niet rechtstreeks op het betonoppervlak gelegd kunnen worden, moet luchtcirculatie onder de matten vermeden worden.
- ▶ De inwendige betontemperatuur meten.
- ▶ Tijdens de volledige verhardingsperiode moet het beton niet alleen worden beschermd tegen warmteverliezen, maar ook tegen uitdroging. Bij koud weer is de relatieve luchtvochtigheid doorgaans erg laag wat de verdamping van water uit het beton bevordert.
- ▶ Als de betontemperatuur tijdens de verharding onder het vriespunt daalt, moeten de ontkistings- en nabehandelingstijd worden verlengd met het aantal vorstdagen.

2.10 Betonneren bij koud weer

In tabel 2.10.1 zijn de aanbevelingen van het WTCB (Digest n°12) overgenomen. Deze zijn uitgedrukt in functie van het "weertype", dat bepaald wordt in functie van de maximale en minimale temperaturen die gedurende een cyclus van 24u gemeten worden (fig 2.10.4).

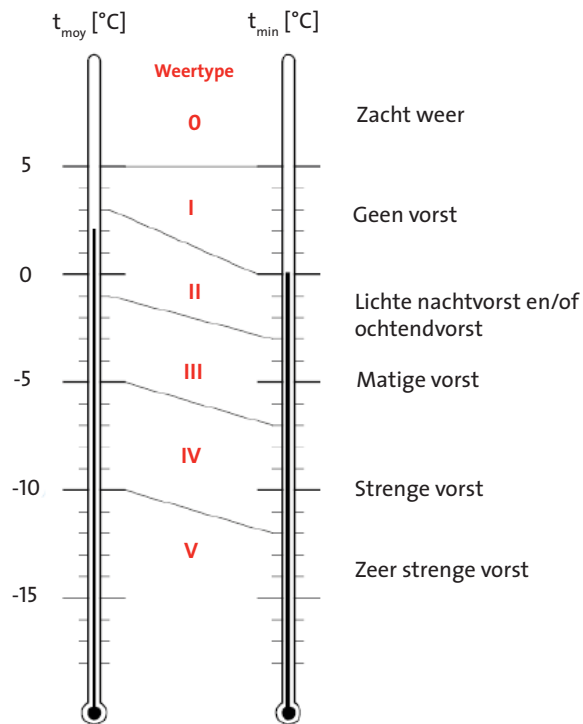


Fig 2.10.4
Weertypes
(bron: WTCB)

Vorzorgsmaatregelen	Weertypes				
	I	II	III	IV	V
Het water verwarmen tot max. 70°C (de temperatuur van het beton mag niet hoger zijn dan 40°C)	—	(X)	X	X	X
Bij voorkeur thermisch isolerende (waterdichte en redelijk dikke) houten bekistingen gebruiken	X	X	X	X	X
Metalen bekistingen thermisch isoleren	(X)	(X)	X	X	X
Matige thermische isolatie (houten plaat of dekzeil met luchtlaag van 2 tot 5 cm)	X	X	—	—	—
Sterke thermische isolatie voorzien (bv. minstens 4 cm dikke minerale-wolmat in een kunststofhoes)	—	—	X	X	X
Bescherming met verwarmde ruimte	—	—	—	(X)	(X)

Legende
 — geen maatregel X noodzakelijke maatregel (X) gewenste maatregel

Tab 2.10.1
Bescher-
mende
maat-
regelen voor
blootgestelde
betonnen
oppervlakken
op basis van
het weertype
(bron: WTCB)

Speciale betonsoorten

3.1

Beton voor vloeren

3.2

Zelfverdichtend beton

3.3

Vezelversterkt beton

3.4

Zichtbeton

3.5

Wegenbeton

3.6

Hogesterktebeton

3.7

Beton voor diepfunderingen

3

3.1 Beton voor vloeren

Inleiding

Beton voor vloeren (of vloerenbeton) wordt gebruikt voor de realisatie van horizontale betonelementen die in één laag worden uitgevoerd en waarvan het oppervlak klaar is voor gebruik. Bij toepassingen binnen spreekt men van (binnen)vloeren, bij toepassingen buiten van (buiten)verhardingen. Verhardingen en vloeren worden niet alleen gebruikt voor berijdbare oppervlakken maar ook in woningen en (commerciële of industriële) gebouwen. Het oppervlak wordt, na het plaatsen, verdichten en effenen, manueel of machinaal afgewerkt.

Voor binnenvloeren wordt de machinale afwerking uitgevoerd met behulp van een toestel met aangepaste schroefbladen (fig 3.1.1 en 3.1.2), slechts enkele uren na het plaatsen, als het beton al voldoende stijfheid heeft maar nog een vochtige schijn. Met die behandeling wordt de ongeveer 3 mm dikke oppervlaktelaag niet alleen vlak en glad maar ook hard en duurzaam. Op die manier kan de vloer zonder bijkomende beschermlaag aan verschillende belastingen worden blootgesteld.

Voor buitenverhardingen worden de plaatsings- en afwerktechnieken die gekend zijn uit de wegenbouw toegepast. Ze staan beschreven in het hoofdstuk 3.5.

Buitenverhardingen worden aan andere sollicitaties blootgesteld dan binnenvloeren, meer bepaald aan de weersomstandigheden. De voornaamste factoren hierbij zijn de verhardingsomstandigheden van het vers beton, de verschillen in krimp en uitzetting door de dagelijkse en seizoensgebonden wisselingen van de temperatuur en de invloed van vorst en dooizouten. Dit vraagt om aanpassingen in het ontwerp, de betonsamenstelling en de uitvoering. De vloeren binnen en buiten een gebouw vergen dus duidelijk een andere aanpak.

Normatieve eisen

Bij het voorschrijven van het beton zal men rekening houden met de bestemming, de voorziene lasten, de draagkracht van de grond en eventuele bijkomende eisen. Er moet eveneens rekening worden gehouden met de wijze van plaatsing en de afwerking van het oppervlak. Het beton kan worden voorgeschreven op basis van de norm NBN EN 206.

De TV 204 van het WTCB bundelt de regels van de goede praktijk voor binnenvloeren in beton. De ontwerper vindt hier nuttige aanwijzingen voor de specificatie van beton (in het bijzonder de aanvullende eisen). De handleiding A82/11 van het OCW bevat de aanbevelingen voor de uitvoering van industriële buitenverhardingen in beton.

Als druksterkteklasse van het beton kiest men doorgaans:

- ▶ **C25/30**: voor residentiële, sociale, commerciële en administratieve gebouwen en voor matig belaste vloeren in opslagruimtes en industriële lokalen
- ▶ **C30/37**: voor zwaar belaste vloeren in opslagruimtes en industriële gebouwen alsook voor buitenvloeren die niet aan dooizouten worden blootgesteld
- ▶ **C35/45**: voor uitzonderlijke belastingen die een hogere sterkte vragen alsook voor buitenverhardingen die aan dooizouten worden blootgesteld.

Voor buitenverhardingen zal de omgevingsklasse EE3 of EE4 voorgeschreven worden. Voor binnenvloeren geldt klasse EI enkel indien het binnenklimaat héél droog is. Indien er een zekere vochtigheid is, moet gekozen worden tussen EE1 (geen vorst) of EE3 (vorst mogelijk).



Fig 3.1.1
Afwerking
met een
"helikopter"

3.1 Beton voor vloeren

Samenstellen van beton

Cement

Het meest gebruikte cementtype voor beton voor verhardingen en vloeren is een hoogovencement CEM III/A met een sterkteklasse 42,5 N. Een cement CEM I 52,5 (N of R) kan ook gebruikt worden als een snelle verharding bij lage temperaturen nodig is. Het gebruik van cement met een sterkteklasse 32,5 wordt best vermeden. Dergelijke cementen geven het beton immers een erg lange verhardingstijd waardoor het beton zeer gevoelig wordt voor plastische krimp. Hun gebruik kan eventueel overwogen worden bij hoge buitentemperaturen.

Als het beton aan een vochtige omgeving wordt blootgesteld, vermindert het gebruik van een LA-cement het risico op de alkali-silica reactie. Dit cement beantwoordt aan de norm NBN B12-109 en heeft een beperkt alkaligehalte (Na_2O en K_2O). Het evalueren van de alkalibalans van het beton kan als een alternatieve aanpak gelden (zie hoofdstuk 4.9).

Bij een blootstelling aan sulfaten zal een cement gebruikt worden van het type SR volgens de norm NBN EN 197-1 of HSR volgens de norm NBN B12-108.

Het minimaal cementgehalte bedraagt 320 kg/m^3 .

Granulaten en gehalte fijne deeltjes

Voor binnenvloeren is het belangrijk een voldoende cohesief beton te gebruiken om problemen van ontmenging, uitzweten (bleeding) en krimp te vermijden. Voor dit beton zal de korrelverdeling van het inert skelet continu moeten zijn.

Om de stabiliteit en de verpompbaarheid van het mengsel te garanderen, zal het mengsel voldoende fijne deeltjes ($\leq 0,250 \text{ mm}$) bevatten (tab 1.3.4).

Echter, een té hoog gehalte aan fijne deeltjes geeft aanleiding tot de volgende problemen:

- ▶ een verhoogde waterbehoefte van het beton
- ▶ een grotere krimp
- ▶ een verhoogde behoefte aan superplastificeerder, wat het beton visceuser of kleveriger kan maken
- ▶ een verhoogd risico op loskomen van de toplaag (delaminatie)
- ▶ een gebrek aan bleedingwater dat voor een (begin van) nabehandeling van het verse beton zorgt en voor de bevochtiging van het nadien ingestrooide slijtlaag-mengsel.

Voor buitenvloeren die aan zware lasten worden blootgesteld of aan verkeer, zal bijzondere aandacht worden besteed aan de intrinsieke kwaliteit van de granulaten. De keuze valt dan best op grove granulaten met een hoge weerstand tegen verbrijzeling, afslijting en polijsting. Omdat dit beton een aardvochtige consistentie (S_1) heeft, zal voorkeur gegeven worden aan zand (of zandmengsel) met een brede korrelverdeling en een fijnstofgehalte ($\leq 0,063 \text{ mm}$) van het inert skelet beperkt tot 3%. Op die manier zal de waterbehoefte beperkt worden.



Fig 3.1.2
Afwerking met een "helikopter"

3.1 Beton voor vloeren

Water en hulpstoffen

Om een goede afwerking van het oppervlak mogelijk te maken en daarbij te vermijden dat te veel hulpstof wordt gebruikt, is het nodig een bepaalde hoeveelheid en kwaliteit van de mortelfractie na te streven. Hiervoor kiest men best voor een minimum gehalte van 180 l/m³ voor het effectief water en van 320 kg/m³ voor het cement, hoewel dat laatste meestal hoger zal liggen om de eis van de W/C-factor te respecteren. Een te hoog gehalte aan hulpstof kan immers nadelige neveneffecten hebben: luchtbelvorming, vertraging in het opstijven van het beton, verhoogde viscositeit die aan het oppervlak een soort korst doet ontstaan. Hierdoor denkt men dat het uitharden is begonnen terwijl in de kern het beton nog plastisch is (wordt ook omschreven als "matras-effect").

Voor gepolierde binnenvloeren zal men het luchtgehalte beperken tot 3% en wordt afgeraden om met luchtbelvormer te werken. Op die manier wordt vermeden dat bij het vlinderen luchtbellens naar het oppervlak van het beton migreren waar ze zich net onder de slijtlaag gaan verzamelen. De vorming van deze "luchtlenzen" kan later het loskomen van de slijtlaag veroorzaken.

Voor buitenverhardingen daarentegen kan het aangewezen zijn een minimale hoeveelheid lucht voor te schrijven om zo het beton bestand te maken tegen de werking van vorst en eventuele dooizouten. In dat geval zal een luchtbelvormer toegevoegd moeten worden.

Consistentie

De consistentie van het beton hangt af van de toepassing. Voor binnenvloeren die gevlinderd zullen worden, zal men meestal voor een vloeibaar beton kiezen (S4). Hoe lager de consistentie, hoe sneller men met de afwerking zal kunnen beginnen. Voor het plaatsen van beton onder helling wordt meestal een consistentieklasse S3 voorgeschreven.

Voor buitenverhardingen, geplaatst met technieken uit de wegenbouw, is het aangewezen een beton met consistentie S1 te gebruiken (eventueel S2 of S3 voor zones waar de plaatsing manueel gebeurt).

Aanbevelingen voor de uitvoering van betonvloeren

Weersomstandigheden

De tijd die nodig is om het beton te laten opstijven hangt, behalve van de betonsamenstelling, ook van de omgevingstemperatuur af. De ideale temperatuur voor het plaatsen van een betonnen vloer bevindt zich tussen 10°C en 25°C.

Bij een buitentemperatuur onder 10°C zal het beton trager opstijven dan bij 20°C. De hoeveelheid water die daardoor aan het oppervlak komt wordt bijna verdubbeld terwijl de hoeveelheid die kan verdampen gehalveerd wordt. Omgekeerd, bij een temperatuur van 30°C zal de afwerking van het beton sneller kunnen gebeuren. De hoeveelheid bleedingwater halveert terwijl de verdamping aan het oppervlak verdubbelt. Een variërende blootstelling aan zon en schaduw zal dus voor een onregelmatig gedrag bij de afwerking kunnen zorgen.

Snelheid van uitvoering

Een niet realistische planning in de aanvoer van het beton zal tot wachttijden van de truckmixers leiden of omgekeerd tot te lange periodes tussen de verschillende losbeurten. In beide gevallen zijn negatieve effecten op de betonkwaliteit te verwachten. Men zal het aantal arbeiders en de benodigde hoeveelheid materieel afstemmen op het gewenste uitvoeringsritme maar ook (gezien de verwerkingsduur) op de hoeveelheid besteld beton. Om het opstijven van het beton zo uniform mogelijk te laten verlopen, zal bijzondere aandacht nodig zijn indien beton vanuit verschillende betoncentrales wordt geleverd.

Afwerken van het oppervlak

Bij binnenvloeren

Bij de afwerking zal men doorgaans streven naar een hard en vlak oppervlak.

Voor deze afwerking wordt gebruik gemaakt van een mechanische vlindermachine of "helikopter" (fig 3.1.1 en 3.1.2).

3.1 Beton voor vloeren

Terminologie

Men spreekt van “gepolierd beton” of “polierbeton” indien de afwerking van het betonoppervlak bij het begin van binding gerealiseerd wordt door een manuele spaan of een mechanische vlindermachine (helikopter). Het aantal passages en de eventuele inwerking van een specifiek slijtlaag-mengsel bepalen het niveau van glans en hardheid. Soms wordt naar dit beton ook verwezen als “gepolijst beton”. Dit is echter een term die in de technische literatuur wordt voorbehouden voor beton dat (na eventueel affrezen) wordt bewerkt met abrasief materiaal waardoor een stuk van het betonoppervlak wordt weggenomen (zie hoofdstuk 3.4).

Het machinaal vlinderen dient binnen een welbepaald tijdsvenster te gebeuren. Men is te laat als de hydratatie zo ver is gevorderd dat reeds een vaste structuur in het beton is ontstaan. De afwerking dient om die reden net voor het begin van binding te starten en voor het einde van binding te eindigen. De grootte van dit tijdsvenster hangt af van de snelheid waarmee het beton aan het oppervlak opstijft.

Wanneer men op het oppervlak kan beginnen lopen, meer bepaald als een voetafdruk nog slechts enkele millimeter diep is, kan met het vlinderen worden gestart. Meestal zal het beton dan een licht vochtige schijn geven (fig 3.1.4).

Bij een buitentemperatuur van ongeveer 20°C, zal het vlinderen bij benadering 3 uur na het storten, verdichten en effenen kunnen starten. Deze tijd is afhankelijk van de temperatuur en van het type beton.

Als met het vlinderen te vroeg wordt begonnen, zal de vlindermachine te veel in het beton zakken, wat ongunstig zal zijn voor de gewenste vlakheid. Te laat starten brengt de hechting van de oppervlaktelaag met het onderliggende beton in het gedrang.

Deze wachttijd is dus kritisch voor het beton. Het oppervlak mag immers tussen het effenen van het betonoppervlak en het afwerken ervan niet uitdrogen. Bij reeds opgetrokken industriële gebouwen zal men er over waken dat alle openingen zijn gesloten om ongewenste tocht te vermijden. Deze zou immers het uitdrogen bevorderen. Indien er een risico op overmatige verdamping bestaat (niet gesloten gebouw, sterke wind of bezonning), kan een voorlopige nabehandeling noodzakelijk zijn. Hierbij kan men kiezen voor het vernevelen van water of het aanbrengen van een aangepast nabehandelmiddel.

Men kan de eigenschappen van de oppervlaktelaag verbeteren door het instrooien van een specifiek mengsel op basis van cement en harde granulaten, zoals kwarts, korund of carborundum à rato van 2 à 5 kg/m². Van zodra het oppervlak beloopbaar is, moet dit mengsel uitgestrooid worden met een verdeeltoestel, hetzij manueel hetzij machinaal. Het slijtlaag-mengsel zal tijdens de verdere polieroperaties (manueel of mechanisch) geïntegreerd worden in de toplaag van het beton.

Bij buitenverhardingen

Voor buitenverhardingen die aan de weersinvloeden worden blootgesteld, wenst men doorgaans een ruw oppervlak. Door het betonoppervlak te bezemen zal men een zekere stroefheid bekomen. Bovendien biedt deze vorm van afwerking een betere bestandheid tegen vorst en de inwerking van dooizouten dan de afwerking met de helikopter (zelfs bij “halfpolieren”) die men nog vaak toepast in de praktijk. Een doorgedreven vlindering (“glanspolieren”) wordt ten stelligste afgeraden voor buitenverhardingen.



Fig 3.1.3
Betonvloer
in volle
uitvoering

3.1 Beton voor vloeren

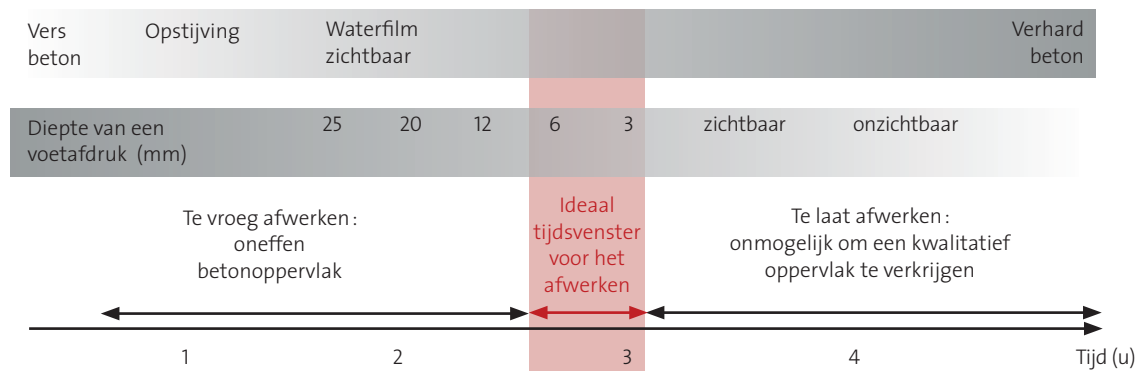


Fig 3.1.4
Typische afwerkijd voor een polievloer

Nabehandeling

Het oppervlak moet direct na het afwerken beschermd worden tegen uitdroging. De verschillende nabehandelingstechnieken zijn beschreven in hoofdstuk 2.8. Een performante nabehandeling die lang genoeg aanhoudt zal bijkomend het risico verminderen op "schoteling" ("curling" in het Engels) veroorzaakt door differentieële krimp (meer krimp aan het oppervlak dan aan de onderkant).

Voegen

Door een oordeelkundige keuze en uitvoering van voegen (fig 4.2.1), kan de spanningsopbouw in een vloer beperkt worden en kan men vervormingen en scheuren beheersen. Het voegpatroon dient voor de aanvang van de werken bepaald te worden door de ontwerper van de vloer.

Men onderscheidt drie soorten voegen die kunnen aangebracht worden:

- ▶ krimpvoegen (zie hoofdstuk 4.2): zo vroeg mogelijk uitgevoerd zonder de voegrand te beschadigen (fig 3.1.5)
- ▶ voegen die de vloer losmaken van vaste elementen (wanden en kolommen)
- ▶ uitzettingsvoegen.

Bovendien kunnen hernemingsvoegen voorzien worden zodat een kwaliteitsvolle verbinding mogelijk is tussen 2 gescheiden betonneerfasen van een vloer.

Voegen veroorzaken discontinuïteiten in de vloer. Tijdens het berijden kunnen er dus schokken ontstaan (vooral bij gebruik van harde, kleine wielen) die schade kunnen veroorzaken aan het rollend materieel en aan de voeg zelf, vooral bij intensief gebruik. Geconcentreerde lasten in de nabijheid van voegen kunnen dit fenomeen nog bijkomend versterken. Voegen vormen dus zwakke zones in een betonvloer en kunnen soms meer problemen veroorzaken dan scheuren. Daarom wordt aanbevolen om niet meer voegen te voorzien dan noodzakelijk.

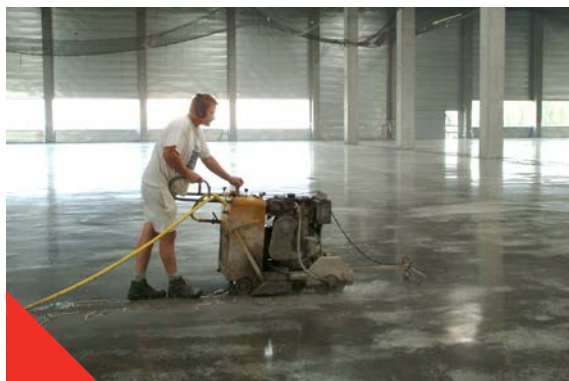


Fig 3.1.5
Inzagen van krimpvoegen

3.2 Zelfverdichtend beton

Eigenschappen

Zelfverdichtend beton (ZVB) onderscheidt zich van traditioneel beton op de volgende punten:

- ▶ een hoge vloeibaarheid die een grote mobiliteit toelaat zonder segregatie of bleeding
- ▶ ontluchting van het beton tijdens het plaatsen
- ▶ een volledige vulling van de bekisting met homogeen beton, ook bij uitsparingen en tussen nabijgelegen wapeningsstaven
- ▶ geen enkele verdichting nodig.

Het gebruik van zelfverdichtend beton vereenvoudigt het verloop van de werf en biedt tal van technologische voordelen zoals het in één keer uitvoeren van complexe constructie-onderdelen of het bekomen van een betonoppervlak met hoge esthetische kwaliteiten. Deze technologie laat toe de globale bouwkost te verlagen en draagt bovendien bij tot een verbetering van de werkomstandigheden (lichter werk en minder geluidshinder).

Technische bijzonderheden

Omdat voor het ontwerp van ZVB met meer aspecten dient rekening gehouden te worden dan voor getrild beton, is grondige betontechnologische kennis vereist.

Bestanddelen van het beton

Pasta

De hoeveelheid pasta (water + fijne deeltjes $\leq 0,125$ mm + hulpstoffen + lucht) die nodig is bij een zelfverdichtend beton is groter dan bij een beton dat moet getrild worden. De pasta zorgt ervoor dat de granulaten uit elkaar worden geduwd waardoor de interne wrijving vermindert. Dit komt de vloeibaarheid en het opvullend vermogen van het beton ten goede.

Over het algemeen zal het gehalte fijne deeltjes in een ZVB minstens 500 kg/m^3 bedragen. Deze fijnen zijn afkomstig van het cement, de toevoegsels en de granulaten.

Voor een ZVB gebruikt men bij voorkeur een hoeveelheid effectief water van ongeveer 190 l/m^3 . De gewenste hoge vloeibaarheid wordt bekomen door het gebruik van een belangrijke hoeveelheid superplastificeerder. Overdosering, die tot ontmenging en waterafscheiding kan leiden, zeker als het watergehalte te sterk varieert, is uiteraard te vermijden.

Granulaten

Het is mogelijk om gebroken of ronde granulaten te gebruiken voor ZVB.

Omdat de grove granulaten voor verstopping kunnen zorgen bij het doorstromen van vernauwingen, moet hun hoeveelheid beperkt worden. Anderzijds zorgen de grove granulaten voor de compactheid van het inert skelet van het betonmengsel hetgeen de hoeveelheid cementpasta om de noodzakelijke verwerkbaarheid en sterkte te bekomen beperkt. Om dit evenwicht te respecteren zal de G/Z (massaverhouding Grof granulaat/Zand) van ZVB meestal rond de 1 liggen.

In het algemeen zal de grootste korreldiameter van de granulaten D_{max} niet meer dan 16 mm bedragen.

Door het hoge zandgehalte in dit soort beton is het bijzonder belangrijk het vochtgehalte ervan te bepalen zodat er bij de aanmaak rekening mee kan gehouden worden. Zonder deze informatie zal het niet mogelijk zijn ZVB met de gewenste verse betoneigenschappen te bekomen.

Eigenschappen van het vers beton

Door zijn bijzondere eigenschappen in verse toestand, is het niet mogelijk de gebruikelijke methodes voor het meten van de vloeibaarheid te gebruiken voor zelfverdichtend beton.

Specifieke proefmethodes, opgenomen in tabel 3.2.1, zijn ontwikkeld om de eigenschappen van ZVB te bepalen. Voor al deze eigenschappen zijn specifieke klassen voor ZVB opgenomen in de norm NBN EN 206.

3.2 Zelfverdichtend beton

Te meten kenmerk	Proefmethode	Beschrijving van de proef
Consistentie	Vloeimaat (of "Slumpflow" in het Engels) volgens NBN EN 12350-8	Men meet de uitspreiding van het beton op een plaat, zonder hindernissen (fig 3.2.1). De proef bepaalt het gemak waarmee het beton zal vloeien en ruimtes zal opvullen.
Blokkeringsmaat	L-box volgens NBN EN 12350-10	De proef bepaalt het gemak waarmee het beton doorheen obstakels, onder de vorm van wapeningsstaven, vloeit en verder ruimtes kan opvullen (fig 3.2.2).
Viscositeit	V-funnel volgens NBN EN 12350-9	Men meet de tijd om het beton door een nauwe opening te laten stromen (fig 3.2.3). De proef bepaalt het gemak waarmee het beton vloeit.
Stabiliteit		Als deze proef na 15' rust wordt herhaald, bekomt men een maat voor de weerstand tegen segregatie (stabiliteit).
Stabiliteit	Zeefproef volgens NBN EN 12350-11	De proef bepaalt de mate waarin het beton zijn cohesie behoudt als het op een zeef wordt uitgegoten (fig 3.2.4).

Tab 3.2.1
Overzicht van de proeven op ZVB



Fig 3.2.1
Meting van de slumpflow



Fig 3.2.2
Meting met de L-box

Fig 3.2.4
Zeefproef



Fig 3.2.3
Meting met de V-funnel



3.2 Zelfverdichtend beton

Productie, transport en plaatsing

Voor stortklaar beton kan de productie, het transport en de plaatsing van zelfverdichtend beton gebeuren met het materieel dat voor traditioneel beton wordt gebruikt. Men zal echter een bijzondere aandacht besteden aan de perfecte sluiting van mixers, kubels en bekistingen.

In de prefabindustrie kan het nodig zijn de transport- en plaatsingssystemen aan te passen aan dit hoogvloeibaar en pastrijk beton.

Bij de productie-eenheid worden de grondstoffen best overdekt opgeslagen en wordt gebruik gemaakt van een performant meetsysteem voor de bepaling van de vochtigheid van elke granulaatfractie.

De mengtijd wordt zo gekozen dat een stabilisering van het opgenomen vermogen van de menger wordt bekomen. Zelfverdichtend beton kan vervoerd worden zoals een beton met klassieke vloeibaarheid. Men zal er in het bijzonder op toezien dat de transportbak (prefab) of de kuip van de truckmixer (stortklaar beton) zuiver is en geen water meer bevat vóór het laden.

In geval van stortklaar beton zal de kuip ook langzaam draaien om de homogeniteit van het mengsel te behouden. Bij aankomst op de werf zal men, net vóór het lossen, nog intensief mengen gedurende 1 minuut/m³. Men zal er in het bijzonder op toezien dat de bekisting geen lekken vertoont.

De snelheid van het plaatsen van het beton zal in belangrijke mate de kwaliteit van het oppervlak bepalen. Daarom moet de stort snelheid aangepast worden aan de consistentie en de viscositeit van het beton. Het is van belang dat het beton langzaam in de bekisting vloeit zodat er voldoende tijd is voor het ontluichten. Anders zal lucht zich opstapelen tussen het beton en de bekisting en zullen aan het oppervlak luchtbelletjes zichtbaar blijven.



Fig 3.2.5
ZVB laat probleemloos toe concave vormen te maken zonder hernemingen en met een mooie afwerking

3.2 Zelfverdichtend beton

Fig 3.2.6

Verpompung van zelfverdichtend beton via de onderkant van de bekisting



Fig 3.2.7

Plaatsing van zelfverdichtend beton voor een dekvloer



Fig 3.2.8

Afwerking met een ontluchtingsregel



Fig 3.2.9

Verneveing van een nabehandlungs-product



Zelfverdichtend beton kan met de conventionele plaatsingstechnieken gestort worden zoals met de kraan, door verpompen (van boven uit fig 3.2.5 of via de onderkant fig 3.2.6) of rechtstreeks via de stortgoot van de truckmixer. Ook al heeft zelfverdichtend beton een hogere stabiliteit dan traditioneel beton, is het niet aangewezen dit beton van te grote hoogte te laten vallen. Door de vulslang in het verse reeds gestorte beton te laten hangen vermindert men bovendien het risico op luchtinsluitingen.

Voor horizontale toepassingen kan ZVB geplaatst worden rechtstreeks vanuit de mixer met de stortgoot, met de kubel of door verpompung (fig 3.2.7). De afwerking van het oppervlak gebeurt bij voorkeur met een ontluchtingsregel (fig 3.2.8).

Studies hebben aangetoond dat ZVB bij het plaatsen een bekistingsdruk ontwikkelt die gelijk is aan de hydrostatische druk als de stijgsnelheid in het te storten volume minstens 12 m/u bedraagt.

Het is dan ook noodzakelijk de bekisting te ontwerpen op deze hydrostatische druk tenzij een specifieke studie tot een ander besluit is gekomen of tenzij men voorziet in een opvolging van de uitgeoefende bekistingsdruk door middel van sensoren.

De nabehandeling van zelfverdichtend beton dient direct na het plaatsen te gebeuren (fig 3.2.9) onder meer omwille van het hoge pastagehalte, de afwezigheid van bleedingwater en het lange verwerkbaarheidsbehoud. Deze kunnen immers meer krimp veroorzaken.

Net zoals bij traditioneel beton moet het aanbrengen van de voegen (indien noodzakelijk) gebeuren zodra dit mogelijk is.

3.2 Zelfverdichtend beton

Toepassingsvoorbeelden

Zelfverdichtend beton kent een brede waaier aan toepassingen gaande van de bouw van woningen, gebouwen, civieltechnische toepassingen, ... tot elementen in de prefabindustrie waar dit type beton omwille van de afwezigheid van trillingen en geluid, de snelheid van uitvoering en de oppervlaktekwaliteit bijzonder geapprecieerd wordt.

Door zijn hoge vloeibaarheid en zijn capaciteit om autonoom te ontluichten, is ZVB bijzonder geschikt waar hoge wapeningsconcentraties of complexe vormen een uitdaging vormen (fig 3.2.10). Door de hoge afwerkingsgraad na ontkisting, worden de vaak lastige en dure herstelwerken vermeden die doorgaans eigen zijn aan klassiek getrild beton.



Fig 3.2.10
Dankzij ZVB kon de realisatie van deze complexe vormen uitgevoerd worden met een minimum aan betonneerfasen

3.3 Vezelversterkt beton

Algemeen

Vezelversterkt beton is een beton waaraan tijdens de productie staalvezels (fig 3.3.1) of kunststofvezels (ook polymeer- of synthetische vezels genoemd) worden toegevoegd zodat de eigenschappen van het beton

worden verbeterd. Er bestaan ook andere vezeltypes (zie hoofdstuk 1.5). Deze worden minder frequent gebruikt en worden daarom niet behandeld in dit hoofdstuk.



Fig 3.3.1
Beton met
staalvezels

De voornaamste eigenschappen van beide soorten vezels zijn opgenomen in tabel 3.3.1:

	Beton	Staalvezels	Kunststofvezels
Elasticiteitsmodulus	$\pm 30\ 000\ \text{N/mm}^2$	$\pm 210\ 000\ \text{N/mm}^2$	3 000 tot 10 000 N/mm ²
Treksterkte	3 à 6 N/mm ²	500 tot 2 000 N/mm ²	200 tot 600 N/mm ²
Smeltpunt		$\pm 1\ 500^\circ\text{C}$	$\pm 165^\circ\text{C}$
Absolute volumieke massa	$\pm 2\ 400\ \text{kg/m}^3$	$\pm 7\ 850\ \text{kg/m}^3$	$\pm 910\ \text{kg/m}^3$
Gebruikelijke lengte		30 tot 60 mm	Micro: 6 tot 20 mm Macro: 30 tot 65 mm
Gebruikelijke diameter		0,5 tot 1,0 mm	Micro: 0,015 tot 0,030 mm Macro: 0,5 tot 1,0 mm
Productnorm		NBN EN 14889-1	NBN EN 14889-2

Tab 3.3.1
De voor-
naamste
eigenschappen
van staal-
vezels en
kunststof-
vezels

Staal- en kunststofvezels hebben niet hetzelfde toepassingsgebied. Talrijke parameters dienen in rekening gebracht te worden bij de keuze van de vezels: structurele eisen, risico op corrosie, uitzicht, eindgebruik van het beton, plaatsing, ...

3.3 Vezelversterkt beton

De voornaamste toepassingsdomeinen van de verschillende vezels zijn vermeld in tabel 3.3.2:

Toepassingsdomein	Staalvezels	Micro-kunststofvezels	Macro-kunststofvezels
Structurele versterking	✓		
Verbetering van de taaiheid (ductiliteit) en van de schokweerstand	✓		✓
Beperking van scheuren door plastische krimp		✓	
Beperking van scheuren door uitdrogingskrimp	✓		✓
Verbetering van de slijtweerstand	✓		
Verbetering van de brandweerstand van HSB		✓	
Geschiktheid voor beton onder helling	✓	✓	
Tijdelijke werken	✓		✓
Beperking van de bleeding		✓	

Tab 3.3.2
Toepassings-
gebied van
vezels

Invloed van vezels op de betonsamenstelling

Bij het gebruik van vezels zal meestal meer cementpasta en zand worden voorzien om de vezels voldoende te omhullen en om de oppervlakte-afwerking te bevorderen. Men kiest bij voorkeur consistentie S4 voor een vlotte verwerking.

Bij de toevoeging van vezels aan het beton zal de water- of hulpstofdosering moeten aangepast worden.

Staalvezelversterkt beton voor het gebruik in gewapende industrievloeren zal meestal tot 35 kg/m³ vezels bevatten. Hogere doseringen tot 80 kg/m³ zullen slechts voor bijzondere toepassingen worden gebruikt zoals bij het vervangen van (een deel van) de passieve wapening.

Micro-kunststofvezels worden meestal gedoseerd aan 0,5 tot 1 kg/m³ om de effecten van plastische krimp te beperken en aan 2 tot 4 kg/m³ om de brandweerstand te verbeteren. Macro-kunststofvezels worden in een hoeveelheid van 3 à 10 kg/m³ toegevoegd voor verbetering van draagkracht.

Granulaten

De lengte van de vezels dient aangepast te worden aan de maximale korrelgrootte van de granulaten. Deze beïnvloedt immers de verdeling en de oriëntatie van de vezels in het beton. Als voor een te korte vezel wordt gekozen, zullen de grove granulaten de vezels wegduwen waardoor ze niet meer scheur-overbruggend kunnen werken tussen de grotere korrels (fig 3.3.2). Over het algemeen kiest men voor een vezellengte die minstens het dubbele van de maximale korrelafmeting bedraagt.

Een inert skelet op basis van gebroken granulaten of met een discontinue opbouw kan, in combinatie met hoge vezeldoseringen, de verwerkbaarheid ongunstig beïnvloeden.

3.3 Vezelversterkt beton

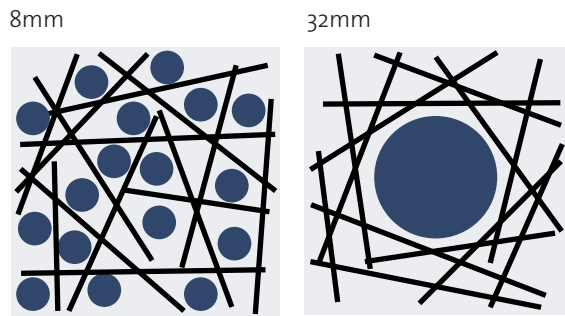


Fig 3.3.2
Invloed van de maximale korrelgrootte op de verdeling van de vezels : links een homogene verdeling van korrels en vezels ; rechts uitedrijven van vezels door een te grote korrel.

Invoel van vezels op de productie en plaatsing van beton

Het mengen

De vezels worden bij voorkeur toegevoegd tijdens het mengproces van het vers beton. Men wil immers een goede integratie en homogene verdeling van de vezels bekomen. Het verdient echter voorkeur eerst het beton te mengen en pas nadien de vezels toe te voegen. Bij het gebruik van staalvezels dient de natte mengtijd niet verhoogd te worden. Wanneer men de vezels in de menger van de betoncentrale toevoegt, bekomt men een betere verdeling van de vezels. Nadeel hierbij kan zijn dat bij het ledigen van de menger nog vezels kunnen achter blijven. De vezels kunnen ook toegevoegd worden in de truck-mixer, echter enkel indien het beton voldoende vloeibaar is. Na het toevoegen van de vezels moet nog minstens 5 minuten gemengd worden aan hoge snelheid.

Als vezels worden toegevoegd voor structurele doeleinden, dan mogen ze niet geplooid of gewrongen geraken tijdens het mengproces. Als de slankheid van de vezels l/d (verhouding van de lengte tot de dikte) verhoogt, zal de verwerkbaarheid dalen en verhoogt het risico op clustervorming (ook "egelvorming" genoemd). In de praktijk zal meestal voor een slankheid van 50 tot 80 worden gekozen.

Kunststofvezels worden meestal in voorverpakte, wateroplosbare zakjes aan het verse betonmengsel toegevoegd. Lange staalvezels worden meestal geleverd in verlijmd pakketjes. De wateroplosbare lijm laat de vezels geleidelijk aan loskomen tijdens het mengen. De dosering van grote hoeveelheden vezels wordt geoptimaliseerd door gebruik te maken van automatische doseersystemen met tijdwinst voor gevolg.

Plaatsing en verdichting

De plaatsing van vezelversterkt beton komt in grote lijnen overeen met dat van traditioneel beton. Bij het verpompen van staalvezelversterkt beton zal de maximale korreldiameter beperkt worden tot 16 mm. Om het risico op verstoppingen te beperken wordt bovendien een voldoende grote diameter van de pompbuis voorzien (120 mm) en wordt het leidingstelsel zo recht mogelijk aangelegd.

Beton met staalvezels zal meer verdichtingsenergie vergen dan beton zonder vezels. Deze zal groter worden naarmate de vezeldosering toeneemt. De klassieke verdichtingsmiddelen (trilnaald of trilbalk) en afwerkingstechnieken (afreien, borstelen, vlianderen) kunnen gebruikt worden.

3.3 Vezelversterkt beton

Invloed van vezels op het gedrag van het beton

Mechanische en structurele eigenschappen

De toevoeging van staalvezels en macro-kunststofvezels zal slechts in beperkte mate de druksterkte en de elasticiteitsmodulus van het beton beïnvloeden. Het verbeterd gedrag onder trek en buiging daarentegen geeft het vezelversterkt beton interessante structurele eigenschappen.

Beton zonder vezels kenmerkt zich, tijdens een trek- of buigproef, door een quasi onmiddellijke breuk wanneer de maximale treksterkte wordt bereikt (fig 3.3.3, blauwe kromme). Beton zonder vezels gedraagt zich op een "brosse" of "fragiele" manier.

Bij beton versterkt met vezels valt de weerstand bij een trek- of buigbelasting niet terug op nul maar blijft daarentegen op een "residueel" niveau (fig 3.3.3, rode kromme). Het niveau van de residuele weerstand hangt logischerwijze af van het type en de hoeveelheid vezels aangezien zij de energie bepalen die nodig is om de aanhechting van de vezels aan de cementsteen te verbreken. Beton met vezels gedraagt zich op een "ductiele" manier.

Merk op dat de toevoeging van vezels de initiële weerstand tegen trek of buiging niet wijzigt; de vezels gaan met andere woorden het risico op het verschijnen van scheuren niet verminderen.

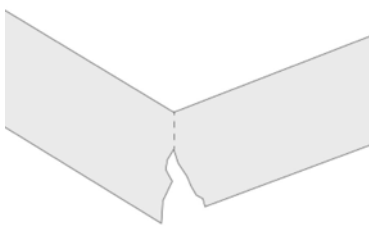
Deze principes laten toe het structureel gedrag van vezelversterkt beton te begrijpen: ter plaatse van de eerste scheur zal het gedeeltelijk uittrekken van de vezels, die deze scheur overbruggen, de residuele sterkte mobiliseren en zo verhinderen dat de scheur zich verder doorzet. Door deze gemobiliseerde sterkte zullen echter andere scheuren optreden niet ver van de eerste scheur. De toevoeging van vezels wijzigt dus het verschijnen van één (of enkele) grote scheur(en) door de vorming van een reeks kleine scheurtjes die doorgaans geen verdere gevolgen hebben (fig 3.3.4).

Macro-kunststofvezels kenmerken zich door hun gebruiksgemak en lage kost ten opzichte van staalvezels. Gezien hun potentiële degradatie als gevolg van langdurige blootstelling aan UV-straling worden ze echter bij voorkeur gebruikt in tijdelijke constructies.

Brandweerstand

De toevoeging van kunststofvezels kan de weerstand tegen brand van hoge- of ultra-hogesterktebeton verhogen. In geval van brand creëert het verdwijnen van de vezels (smeltpunt rond de 165°C) een netwerk van poriën waarlangs de waterdamp, die zich ontwikkelt in het beton, kan ontsnappen. Zo wordt het afspatten van beton voorkomen.

Beton zonder vezels



Beton met vezels



Fig 3-3-4

Illustratie van het beperkend en verdelend effect van vezels op de scheurvorming.

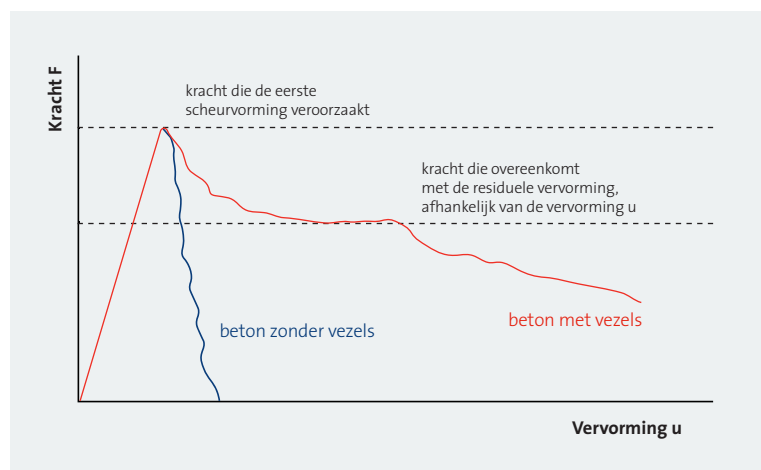


Fig 3-3-3

Belastings-ervormings-diagramma van beton met en zonder vezels

3.4 Zichtbeton



Fig 3.4.1
Gekleurd
beton gegoten
in een mal
met structuur-
matten

Algemeen

Met de term zichtbeton verwijst men naar elk betonoppervlak, horizontaal of verticaal, dat zichtbaar blijft en dat daardoor aan bepaalde esthetische eisen dient te voldoen.

In grote lijnen bestaan er twee basistechnieken om zichtbeton te maken. In het ene geval wordt de bekisting gebruikt om een bepaald patroon op het oppervlak achter te laten. In het andere geval wordt het beton na ontkisting bewerkt. In beide gevallen kan het kleuren van het beton een bijkomende esthetische toets geven.



Fig 3.4.2
Gevel in
ontbewerkt
zichtbeton

Om zichtvlakken met een homogeen uitzicht te bekomen is bijzondere aandacht en zorg nodig voor volgende factoren:

- ▶ type en materiaal voor de contactbekisting
- ▶ frequentie van hergebruik en zuiverheid van de bekisting
- ▶ hernemingsvoegen
- ▶ stijfheid van het bekistingssysteem
- ▶ hoeveelheid en type ontkistingsolie
- ▶ samenstelling en vervaardiging van het beton
- ▶ plaatsing en verdichting van het beton
- ▶ weersomstandigheden tijdens de uitvoering en de nabehandeling.

De norm NBN B15-007 behandelt de esthetische aspecten van zichtbeton en beschrijft de eisen voor de visuele kenmerken zoals textuur, aantal en afmeting van de luchtbellens en homogeniteit van de kleur. Zij laat toe om op een objectieve manier esthetische eisen voor te schrijven en te beoordelen.

Ondanks alle zorg die besteed wordt aan de keuze van de grondstoffen en aan het optimaal samenstellen en produceren van het beton, dient men er altijd rekening mee te houden dat beton bestaat uit natuurlijke grondstoffen. Hierdoor blijft altijd een zekere mate van imperfectie mogelijk.

Bestanddelen

Cement

Elk cement dat voldoet aan de norm NBN EN 197-1 is in principe geschikt voor de productie van zichtbeton. Omdat de kleur van het betonoppervlak mee bepaald wordt door die van het cement, evenals door de fijne deeltjes van de granulaten, mag het cementtype noch de oorsprong van de granulaten wijzigen tijdens de uitvoering van de werken.

- ▶ Portlandcement (CEM I) geeft betonoppervlakken met een specifieke grijs tint.
- ▶ Wit cement heeft zijn sporen verdiend voor de uitvoering van elementen in beton met een hoge esthetische waarde. Zijn witte kleur is ook het ideale vertrekpunt om gekleurd beton te maken.
- ▶ Hoogovencement (CEM III) geeft, na uitdroging, betonoppervlakken met een beduidend lichter oppervlak dan Portlandcement. De typische blauw-groene verkleuringen die men bij dit cementtype direct na ontkisting kan waarnemen, verdwijnen vanzelf na het uitdrogen.

3.4 Zichtbeton



Fig 3.4.3
Bijzondere
textuur van
het oppervlak
dankzij het
gebruik van
een bekisting
in houten
planken

Water

Leidingwater of grondwater kunnen gebruikt worden voor de productie van zichtbeton. Men gebruikt bij voorkeur geen recyclagewater omdat het een negatief effect kan hebben op het uitzicht van het beton of zijn andere eigenschappen.

Granulaten

Zichtbeton dat zich buiten bevindt moet weerstand bieden aan vorst en andere weersinvloeden. Hierdoor is het belangrijk vorstbestendige granulaten te gebruiken. De kleur van het oppervlak wordt niet alleen beïnvloed door de kleur van het cement maar ook door de tint van de fijne fracties van de granulaten. Als het zichtvlak na ontkisten wordt bewerkt, zal ook de kleur van de grovere fracties van belang zijn. Het is daarom belangrijk tijdens de uitvoering van de werken de herkomst van de granulaten niet te wijzigen.

Hulpstoffen

Plasticiseerders en superplastificeerders laten toe een hogere vloeibaarheid te bereiken en daardoor een beton dat gemakkelijker kan verwerkt worden, zonder dat meer water moet worden toegevoegd. Hulpstoffen hebben geen significante invloed op de kleur van het zichtbeton. Hulpstoffen kunnen ook gebruikt worden om de W/C-factor te verminderen, met behoud van de verwerkbaarheid. Hierdoor worden vele karakteristieken van het beton verbeterd doch zal ook in lichte mate de kleur beïnvloed worden. Een beton dat minder water bevat zal immers een donkerder kleur hebben.

Toevoegsels en toevoegingen

De meest gebruikelijke toevoegsels voor zichtbeton zijn minerale fillers en kleurstoffen die tot doel hebben het beton te kleuren (zie hoofdstuk 1.5).

3.4 Zichtbeton



Fig 3.4.4
Wooncomplex



Fig 3.4.5
Uitgewassen
beton



Fig 3.4.6
Trap in
printbeton

Samenstelling van beton

De praktijk heeft aangetoond dat het cementgehalte voor zichtbeton best minstens 350 kg/m^3 bedraagt.

De W/C-factor zal zo laag mogelijk gehouden worden om ongewenst opstijgen van water te voorkomen.

Het gehalte fijne deeltjes (waaronder het cement, de eventuele toevoegsels en de fijnen van de granulaten) dient minstens de waarden van tabel 1.3.4 te bedragen. De korrelverdeling van het inert skelet dient continu te zijn.

Consistentie

Een aangepaste consistentie is een basisvereiste om zichtbeton correct te verwerken. De consistentieclassen S3 en S4 geven de beste garantie voor het volledig omhullen van de wapening in het beton en een volledige vulling van de bekisting.

Vervaardiging en plaatsing van het beton

Men dient er vóór alles over te waken dat de W/C-factor van elke mengeling dezelfde is, wat ook het vochtgehalte is van de grondstoffen. Een variatie van 0,02 zal immers reeds aanleiding geven tot kleurvariaties die met het blote oog zichtbaar zijn. Het is van belang ook de mengtijd zo constant mogelijk te houden (minstens 50 seconden). De temperatuur van het vers beton is bij voorkeur zo constant mogelijk. Een variatie van de temperatuur zal het hydratatieproces beïnvloeden en kan dus tot kleurverschillen leiden.

3.4 Zichtbeton

De verdichting dient met grote regelmaat uitgevoerd te worden. Men verdicht best niet te intensief en in kleine laagdiktes. Het is van het grootste belang de wapening niet te laten meetrillen om lokale kleurverschillen te vermijden.

In het algemeen spelen de weersomstandigheden een grotere rol bij zichtbeton dan bij andere betontypes. De hydratatie van het cement is een chemische reactie die des te sneller verloopt naarmate de temperatuur toeneemt en des te trager naarmate ze daalt. De hydratatiegraad is bovendien afhankelijk van de vochtigheid. Op die manier zal het beton niet dezelfde kleur hebben als het is uitgehard bij koud en droog weer als bij warm en vochtig weer. Variaties in de luchtvochtigheid hebben een invloed op de vochtigheid van de bekistingshuid en dus onvermijdelijk op het uitzicht van het beton.

Om al die redenen hebben de weersomstandigheden een onmiskenbare invloed op realisatie van elementen in zichtbeton.

Ontkisting

Het is van het grootste belang dat bij het ontkisten alle elementen eenzelfde tijd bekist zijn geweest (zie hoofdstuk 2.8). In het bijzonder dienen alle elementen die gelijktijdig gestort zijn op hetzelfde moment ontkist te worden.

Ontkiste oppervlakken dienen vrij te blijven (er geen bekistingen tegen plaatsen) om vlekvorming te vermijden.

Wanden in zichtbeton zouden niet mogen ontkist worden voor of tijdens sterke neerslag en ze mogen ook niet met water besproeid worden net na het ontkisten. Het ontkistingsritme moet zodanig gekozen worden dat alle elementen eenzelfde bekistingstijd hebben gekend. Men moet in dit verband ook rekening te houden met weekends en verlofdagen.

Bescherming van het beton

De bescherming van het beton streeft voornamelijk de volgende twee objectieven na:

- ▶ een homogene hydratatie van het cement in de oppervlaktezone garanderen voor een constante kleur
- ▶ het zichtbaar oppervlak en de wachtstaven beschermen tegen neerslag.

Voor zichtbeton worden de volgende beschermingsmaatregelen aanbevolen:

- ▶ bedekken van de ontkiste vlakken met een plastic folie om het te beschermen tegen vroegtijdige uitdroging (het direct contact tussen folie en wand vermijden evenals het creëren van een schouweffect of het gebruik van kleefband voor de bevestiging van de folie)
- ▶ behoud van de vochtigheid, echter zonder condensatie (risico op kalkuitslag) te veroorzaken (door bijvoorbeeld de bekisting te lossen maar te laten staan)
- ▶ de randen en hoeken beschermen tegen mechanische beschadiging
- ▶ de net ontkiste zichtvlakken beschermen tegen overvloedige regen en ze ook niet besproeien met water
- ▶ de wijze waarop het water wordt afgevoerd in de aan regen blootgestelde vlakken zorgvuldig bestuderen
- ▶ inpakken van de wachtstaven in plastic folie om de vorming van roeststrepen te vermijden.



Fig 3.4.7
Vloer in
decoratief
beton

3.4 Zichtbeton



Fig 3.4.8
Printbeton

Bijzondere oppervlakte-afwerkingen

Voor het ontwerp van oppervlakken in zichtbeton kunnen - naast het werken met de betonhuid en de schikking van voegen en centerpennen - ook bijzondere technieken gebruikt worden:

- ▶ printen (of figureren) van het beton
- ▶ behandelen van het oppervlak
- ▶ kleuren van het beton.

Printen

Een bijzonder architectonisch effect kan bekomen worden met behulp van structuurmatten die in de bekisting worden geplaatst of in het verse (horizontale) betonoppervlak worden gedrukt (fig 3.4.6 en 3.4.8). De mogelijkheden zijn uiterst gevarieerd: van de imitatie van natuursteen tot het produceren van afbeeldingen door het effect van licht en schaduw.

Oppervlaktebehandeling

Er bestaan verschillende oppervlakte-behandelings-technieken, waarvan de voornaamste zijn beschreven in tabel 3.4.1. Een goede beheersing van deze technieken is vereist om een uniform resultaat te bekomen.

Techniek	Beschrijving
Uitwassen (fig 3.4.5)	Een bindingsvertrager wordt verneveld op de bekisting of op het vers afgewerkte betonoppervlak. Hierdoor zal het betonoppervlak niet uitharden. Een dun laagje onverhard beton wordt nadien verwijderd door een waterstraal. Het eindresultaat wordt beïnvloed door de dieptewerking van de vertrager en de parameters van het uitwassen (wachtijd, kracht). De cementpasta alsook de vorm en kleur van de granulaten hebben eveneens hun effect.
Zand- of gritstralen	Het te behandelen oppervlak wordt onder hoge druk gezandstraald. Licht stralen maakt de zandkorrels zichtbaar terwijl sterk stralen ook de grove granulaten bloot legt. Hoe intensiever de behandeling, hoe meer het oppervlak een matte schijn zal krijgen.
Slijpen/frezen en polijsten (fig 3.4.9)	Het betonoppervlak wordt geslepen of gefreesd en eventueel verder gepolijst. De diepte van het verwijderde beton en de mate van polijsten beïnvloeden het eindresultaat. De kleur van de cementpasta is dominant bij een ondiepe bewerking; die van de grove granulaten bij een diepere bewerking. De parameters van het polijsten (type en korrelgrootte van het abrasief materiaal) bepalen de finaal bekomen glans.
Boucharderen (fig 3.4.10)	Bij het boucharderen of punthameren geeft men het betonoppervlak het aspect van een ruw bewerkte natuursteen. Dit resultaat wordt bekomen met behulp van een puntige hamer. Het finale aspect van het oppervlak wordt mee bepaald door de bewerkingdiepte (van 1 tot 8 mm) en het gebruikte materieel.

Tab 3.4.1
Oppervlakte-
behandeling
van zichtbeton

3.4 Zichtbeton

Tijdens de oppervlaktebehandeling moet men er steeds over waken de minimale vereiste wapeningsdekking te respecteren en geschikte afstandhouders te gebruiken die niet zichtbaar zijn aan het oppervlak.

Gekleurd beton

Normaal wordt gekleurd beton gemaakt met behulp van wit cement in combinatie met kleurstoffen. De kleur kan ondersteund worden door gebruik te maken van een gekleurd granulaat dat nadien door een oppervlaktebehandeling zichtbaar wordt gemaakt. Beton op basis van grijs cement kan ook gekleurd worden, maar het effect zal minder zuiver en helder zijn. De kleurintensiteit hangt af van de hoeveelheid pigment en van zijn kwaliteit. Om de meest intense kleur te bekomen, moet de kleurstof bij zijn saturatiegraad gebruikt worden (gehalte van 3 à 6% ten opzichte van de massa van het cement).

Kleurstoffen worden aan het mengsel toegevoegd onder de vorm van parels, poeder of als een slurry. Het verdient aanbeveling het oppervlak van een gekleurd beton te behandelen met een hydrofobeermiddel.

Meer dan voor gelijk welk ander beton is het voor zichtbeton raadzaam om met alle betrokken partijen vooraf duidelijke afspraken te maken over de verwachte esthetische resultaten. De specificaties van NBN B15-007 kunnen hierbij een leidraad zijn, en eventueel kunnen referentiewerven bezocht worden.



Fig 3.4.9
Gepolijst
beton

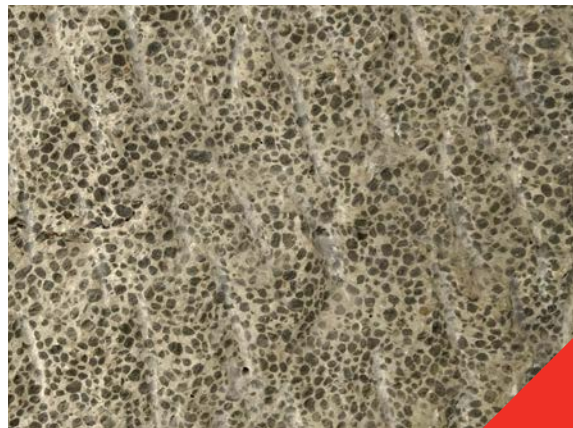


Fig 3.4.10
Gebouchar-
deerd beton



Fig 3.4.11
Gebouw in
gekleurd
beton

3.5 Wegenbeton

Algemeen

Wegverhardingen zijn constructie-elementen die sterk belast worden door het verkeer, dagelijkse temperatuurcycli en het effect van vorst in de aanwezigheid van dooizouten. Het betonoppervlak dient over een hoge duurzaamheid te beschikken, in het bijzonder bij een intense verkeersbelasting met hoge aslasten. De typische spoorvorming die eigen is aan asfaltverhardingen zal bij betonverhardingen niet voorkomen door de betere lastenverdeling, de hogere stijfheid en vormvastheid, zelfs bij hoge temperaturen. Hierdoor bekomt men een lange levensduur met beperkte onderhoudskosten.

Bij wegverhardingen in beton wordt de verkeersveiligheid positief beïnvloed door de hoge antislipweerstand en de heldere oppervlaktekleur.

Verhardingen in beton worden vooral gebruikt voor oppervlakken die intensief bereiden worden zoals autosnelwegen, ronde punten, bushaltes, landingsbanen, wegparkings of landbouwwegen. Een preciese inachtnaam van alle ontwerpaspecten en een verzorgde uitvoering zijn belangrijk om de hoge verwachtingen gesteld aan betonwegen te kunnen inlossen.

Reglementaire context

De eisen voor de bestanddelen, de samenstelling en de uitvoering van wegenbeton, bevinden zich in de typebestekken (TB) van de verschillende regio's: het Standaardbestek 250 (SB 250) in het Vlaamse Gewest, CCT Qualiroutes in het Waase Gewest en het TB voor de wegen van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest.

Samenstellen van wegenbeton

De vereiste duurzaamheid zal slechts behaald worden als het beton een voldoende hoge druk- en buigtreksterkte bezit evenals een voldoende weerstand tegen vorst met dooizouten en tegen slijtage. Over het algemeen wordt een hoge slijtweerstand bekomen door middel van de mechanische weerstand, een goed verzorgde nabehandeling van het wegoppervlak maar ook door de keuze van hoogkwalitatieve granulaten.

Cement

De regionale lastenboeken schrijven het gebruik van cement van het type CEM I LA of CEM III/A met een sterkteklasse 42,5 voor.

Granulaten

De oppervlaktelaag van het beton wordt meestal gemaakt met een gebroken granulaat waarvan de grootste korrel maximaal 20 mm bedraagt. Voor een tweelagige verharding kan de onderlaag (15 à 20 cm dik) grotere korrelmaten bevatten (tot 31,5 mm) terwijl kleinere granulaten (kaliber 4/6,3) voor de top laag worden gebruikt. Een dergelijke samenstelling van de top laag komt het rolgeluid ten goede.

Een minimale polijstweerstand (PSV) van 50 wordt vereist voor de granulaten die in de top laag worden gebruikt. Een goede slijtweerstand (MDE) en weerstand tegen verbrijzeling (LA) zijn bijkomend vereist. Het gebruik van rolgrind is niet toegestaan.

Hulpstoffen

Naast de gebruikelijke plastificeerder, wordt in de top laag doorgaans ook een luchtbelvormer voorzien om het beton voldoende vorstbestand te maken. De efficiëntie van de luchtbelvormer zal geëvalueerd worden door de meting van het luchtgehalte in het beton.

Consistentie

De machines die doorgaans gebruikt worden om wegenbeton te plaatsen (glijbekistingen, ook wel (slipform) paver genoemd, zie figuur 3.5.1) vereisen het gebruik van aardvochtig beton (consistentieklasse S1) zodat de laterale randen na plaatsing niet nazakken. Kleine stukken of stukken met een complexe geometrie (of nog herstellingen) kunnen manueel verwerkt worden. De consistentie zal aangepast worden aan de verdichtingsmiddelen, wat ook de gebruikte plaatsingstechniek is.

3.5 Wegenbeton

Verwerking van het beton

Plaatsing en verdichten

Het beton kan in één of twee lagen wordt geplaatst. Bij een éénlagige uitvoering moet de volledige betondikte over de kwaliteit van de toplaag beschikken waardoor een grote hoeveelheid hoogwaardige granulaten zal nodig zijn. Indien tweelagig wordt gewerkt, moet enkel de toplaag over granulaten van hoge kwaliteit beschikken. De grondlaag kan dan met lokale of gerecycleerde granulaten worden uitgevoerd. Bij een éénlagig systeem zal men echter kosten besparen op materieel en personeel.

Voor de manuele uitvoering van kleine oppervlakken (bv. rond punt of bushalte) of bij plaatsing van oppervlakken met beperkte werkruimte, zal doorgaans met vaste bekistingen worden gewerkt. Deze dienen voldoende verankerd te zijn en voldoende steun te nemen op de ondergrond omdat ze voor het referentiepeil van de verharding zorgen.

Het beton dient regelmatig over de volledige breedte verspreid te worden. Hierbij moet segregatie en een eerste ongecontroleerde verdichting vermeden worden. Bij een tweelagig systeem kunnen de onder- en bovenlaag terzelfdertijd door eenzelfde glijbekisting geplaatst worden. Het is ook mogelijk met 2 glijbekistingen na elkaar te werken. In dat geval moet de nivellering van de onderlaag met zorg gebeuren zodat voor de bovenlaag een minimum dikte van 4 à 5 cm kan gegarandeerd worden. De tijdspanne tussen het plaatsen van beide lagen is zó dat de onderlaag geen zichtbare tekenen van uitdroging vertoont noch in binding begint te gaan. De bovenlaag wordt "nat-in-nat" aangebracht om een optimale hechting te bekomen van beide lagen. De verharding zal zich op die manier als een monoliet systeem gedragen waardoor het zonder beschadiging alle interne en externe belastingen kan dragen.

Het beton dient regelmatig en over de volledige dikte verdicht te worden. De glijbekistingmachines verdichten het beton over de gehele breedte aan de hand van vaste trilnaalden waarvan de goede positionering dient gegarandeerd te worden. Hun tussenafstand wordt gekozen aan de hand van hun actieradius.

Bij het trillen dienen "trilsporen" (aanrijken van fijne mortel) vermeden te worden. Het gelijkmatig rijden van de glijbekisting voorkomt de vorming van oneffenheden door een ongelijkmatige verdichting.

Bij manuele plaatsing dient, na de eerste verdichting met trilnaalden, het beton te worden afgewerkt met andere hulpmiddelen (trilbalken) die over de volledige breedte werken.

Om de verharding voor te bereiden voor de finale oppervlakte-afwerking (zie hierna) wordt bij machinale plaatsing het gladstrijken uitgevoerd met een automatische spaan ("supersmoother" in het Engels) die toelaat de vereiste vlakheid te bekomen (fig 3.5.2). Bij manuele plaatsing wordt voor deze afwerking gebruik gemaakt van een trillat of -balk. Het mechanisch vlinderen/polieren met een helikopter wordt voor deze toepassingen afgeraden omwille van het dunne mortellaagje dat aan het oppervlak wordt gecreëerd. Dit laagje is rijk aan fijne deeltjes wat nefast kan zijn voor de noodzakelijke stroefheid van de weg en voor de vorst-dooizout bestandheid.



Fig 3.5.1
Glijbekisting-
machine



Fig 3.5.2
Automatisch
gladstrijken
van het beton

3.5 Wegenbeton

Oppervlakte-afwerking

De uiteindelijke oppervlaktebewerking, die plaatsvindt na het verdichten en effenen, geeft aan de rijweg de noodzakelijke stroefheid.

Bezemen

Op de meeste werven kan na het effenen een oppervlaktestructuur worden gecreëerd met behulp van een borstel. Deze bewerking, waarbij een borstel dwars over de weg wordt getrokken, gebeurt van op een werkplatform (fig 3.5.3 en 3.5.4) of vanop de zijkant van het net geplaatst beton.



Fig 3.5.3

Bezemen van het betonoppervlak



Fig 3.5.4

Eindresultaat van een gebezemd betonoppervlak



Fig 3.5.5

Eindresultaat van een uitgewassen betonoppervlak

Uitwassen van het oppervlak

Het gebruik van uitgewassen (gedesactiveerd) beton, samengesteld op basis van fijne granulaten (korrelmaat 4/6 of 4/8), is in België een courante praktijk bij de aanleg van autosnelwegen (fig 3.5.5). Bij dit proces wordt direct na het effenen een bindingsvertrager op het oppervlak verneveld. Deze verhindert de binding van het cement aan het oppervlak en zal tevens als nabehandlingsproduct dienst doen. De definitieve oppervlaktestructuur wordt bekomen door, na het eventueel zagen van de transversale voegen, alle niet verharde delen aan het oppervlak mechanisch te verwijderen met een bezemtoestel.

Nabehandeling

Onmiddellijk na het plaatsen en afwerken van het beton moet een nabehandlingsproduct op de wegverharding worden verneveld. Dit product beïnvloedt de oppervlakte-textuur van de rijweg niet.

De aan te brengen hoeveelheid hangt af van het gekozen product en van de oppervlakteruwheid en heeft tot doel een dunne continue laag te vormen. In functie van de textuur van het oppervlak variëren deze hoeveelheden van 150 tot 200 g/m². Een overmaat aan curing vertraagt zijn natuurlijke verwijdering en kan de beoogde stroefheid in het begin nadelig beïnvloeden.

Oppervlakken die met een curing zijn bedekt mogen niet bereiden worden. Het afslijten van het nabehandlingsproduct door het verkeer zou immers tot een te hoog vochtverlies kunnen leiden. Doorgaans houdt men het oppervlak 7 dagen verkeersvrij.

Nabehandlingsproducten zijn meestal wit of metaalisch van kleur zodat het zonlicht maximaal weerkaatst wordt en opwarming van het beton wordt beperkt.

Het afdekken van een wegverharding met een plasticfolie is een efficiënte maatregel om het beton te beschermen tegen felle neerslag en kan eveneens als nabehandeling dienst doen, op voorwaarde dat de folie intact blijft gedurende de vereiste periode (zie hoofdstuk 2.8).

3.5 Wegenbeton

Wapening en voegen

Verschillende verhardingstypes worden gebruikt voor de bouw van wegen of industrieterreinen.

Korte platen in ongewapend beton

Dit type verharding bestaat uit een aaneenschakeling van platen waarvan de lengte beperkt wordt tot ongeveer 25 keer de dikte. In de praktijk wordt de lengte meestal beperkt tot 5 m (4 m voor fietspaden) en worden ter hoogte van de voegen eventueel kracht-overbrengende systemen (deuvels) voorzien. De bewegingen als gevolg van variaties in temperatuur en vochtigheid worden opgenomen ter hoogte van de voegen. Deze worden meestal afgedicht om te beletten dat het oppervlaktewater in het weglichaam terecht komt. De breedte van de platen is beperkt tot 4,5 m.

Doorgaand gewapend beton

Bij verhardingen in doorgaand gewapend beton is geen sprake van transversale voegen. Ze zijn immers voorzien van een langswapening (fig 3.5.6) waarvan de dwarsdoorsnede zó is berekend dat scheurvorming wordt beheerst middels een homogene verdeling van scheuren met een gemiddelde afstand van 1,5 à 3 m. De scheuropening blijft beperkt en mag in geen geval meer dan 0,3 mm bedragen. De gelijkmatigheid van de scheurvorming kan ook bevorderd worden door het aanbrengen van actieve scheuraanzetten om de 1,2 à 1,5 m.

Gewapende platen

Gewapende platen worden niet vaak toegepast, behalve bij industriële binnenvloeren of buitenverhardingen die zwaar belast worden en waarbij men het aantal krimpvoegen wil beperken.

Staalvezelversterkt beton

Dit type beton wordt doorgaans bij industrievloeren gebruikt waar het veel toepassingsmogelijkheden kent (opslag in havengebieden, parkings voor vrachtverkeer, logistieke terreinen, ...). Voor wegverhardingen wordt staalvezelbeton slechts in bijzondere gevallen gebruikt nl. bij dunne of extra-dunne toplagen.



Fig 3.5.6
Doorgaand
gewapend
beton tijdens
de uitvoering

3.6 Hogesterktebeton

Eigenschappen

Hogesterktebeton (HSB) onderscheidt zich van traditioneel beton door zijn zeer hoge druksterkte. Meestal wordt de term HSB gebruikt voor een sterkteklasse hoger dan C50/60.

De voornaamste eigenschappen van dit betontype zijn :

- ▶ hogere mechanische eigenschappen zowel op jonge ouderdom als op lange termijn (druk- en treksterkte, elasticiteitsmodulus)
- ▶ zeer lage porositeit, leidend tot een betere weerstand tegen agressieve stoffen, vorst-dooicycli of afslijting.

Meestal worden deze betonsoorten met een hoge vloeibaarheid gemaakt. Het gebruik van HSB laat toe, in functie van de gewenste karakteristieken, de dwarssectie van betonelementen te verkleinen, de overspanning te verhogen (fig 3.6.1) of de duurzaamheid van de ermee vervaardigde bouwwerken te verhogen (fig 3.6.2).

De wedloop naar prestaties

De zoektocht naar steeds hogere druksterktes vereist de volgende ingrepen:

- ▶ verhoging van het cementgehalte
- ▶ verlaging van de W/C-factor
- ▶ verfijning van de korrelbouw.

De verhoging van het cementgehalte (gecombineerd met de lichte daling van de W/C-factor), laat toe druksterktes te bekomen van 40 tot 50 N/mm². De verdere reductie van de W/C-factor beneden 0,40 biedt de mogelijkheid de druksterkte te laten toenemen boven 80 N/mm².

De toevoeging van ultrafijne deeltjes, die de micro-holten in de korrelbouw verder vullen, laat toe om de dichtheid van beton verder te verhogen. Deze ultrafijne deeltjes, gecombineerd met performante superplastificeerders, leiden tot een verbetering van de verwerkbaarheid en een verdere daling van de W/C-factor tot 0,35 hetgeen toelaat druksterktes te bekomen van 100 N/mm² en meer.

Bestanddelen van HSB

Cement

Alle cementtypes komen in principe in aanmerking, doch in de praktijk zal meestal een cement van het type CEM I gebruikt worden met een sterkteklasse 52,5. De cementgehalten kunnen hoger dan 400 kg/m³ liggen.

Toevoegsels

Als toevoegsels gebruikt worden, dan is silica fume het meest toegepast voor de productie van HSB. Het gebruik ervan laat immers een sterke stijging toe van de dichtheid van het beton. Silica fume heeft een extreem hoge fijnheid (ongeveer 100 keer fijner dan cement) en heeft bovendien puzzolane eigenschappen.

Bij de hydratatie van een traditioneel beton blijven er steeds (capillaire) poriën bestaan tussen de granulaten en de cementhydraten. Silica fume vult deze holtes gedeeltelijk op. Door de puzzolane reactie van silica fume met kalkhydraat (portlandiet) afkomstig van de hydratatie van Portlandklinker, zullen zich hydraten vormen die deze poriën opvullen en leiden tot een zéér lage porositeit.

Meestal bedraagt het gehalte silica fume in HSB zo'n 6 tot 10% van het cementgewicht.

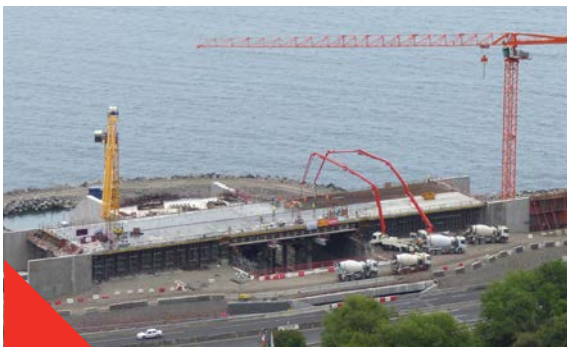
Fig 3.6.1

Balken met grote overspanning in HSB



Fig 3.6.2

Betonnen brug in een kustzone, met een gemiddelde druksterkte van 65 N/mm² op 28d en 80 N/mm² op 90d (cilinders). Ontworpen voor een levensduur van 100 j.



3.6 Hogesterktebeton

Granulaten

Een traditioneel beton zal tijdens de drukproef bezwijken onder invloed van transversale trek in de contactzone granulaat-cementsteen of in de cementsteen zelf (fig 3.6.3 boven).

Bij hogesterktebeton wordt de cementsteen en de contactzone versterkt door de lagere capillaire porositeit en door de verlaging van de W/C-factor. De breuk zal zich dus niet meer voordoen in de contactzone maar door het granulaat zelf gaan (fig 3.6.3 onder). Het gebruik van granulaten afkomstig van een hard gesteente (bijvoorbeeld porfier) heeft dan ook de voorkeur bij de samenstelling van HSB.

Om de waterbehoefte van hogesterktebeton te beperken, zal bijzondere aandacht besteed worden aan de zuiverheid van het zand. Het zand zal bovendien een continue korrelopbouw moeten hebben, een grote regelmaat en een beperkt gehalte aan fijne deeltjes.

De maximale korreldiameter wordt doorgaans beperkt tot 16 mm. De elasticiteitsmodulus van de grove granulaten is immers groter dan die van de cementsteen. Er is dus een groot verschil in modulus in de overgangszone tussen het grof granulaat en de cementsteen, wat tot spanningsconcentraties kan leiden. Door kleinere korrels te gebruiken, kunnen deze spanningsconcentraties beter verdeeld worden in het beton. De maximale korrelgrootte mag echter niet te sterk dalen omdat dan de hoeveelheid water, nodig om alle korrels te omhullen, te sterk zou toenemen.

Superplastificeerders

De hoeveelheid superplastificeerder zal doorgaans vrij hoog liggen. Hierdoor kan de hoeveelheid water in het beton sterk gereduceerd worden en kunnen W/C-factoren worden bekomen ruim onder 0,40 en zelfs tot ongeveer 0,25 mét behoud van een hoge vloeibaarheid. Deze hoge doseringen aan superplastificeerder verhogen echter ook de kleverigheid (viscositeit) van het mengsel en geven het beton een thixotropoos karakter.



Fig 3.6.3
Beeld van het breukvlak van beton met normale sterkte (boven) en HSB (onder)

3.6 Hogesterktebeton

Eigenschappen van het vers beton

Verwerkbaarheid

De grote hoeveelheid pasta en een hoog gehalte aan superplastificeerder laten toe een beton te bekomen met een hoge consistentie. Een zetmaat van 180 à 200 mm is zeker niet uitzonderlijk voor dit type beton.

Warmte-ontwikkeling

Door het hoge cementgehalte in een hogesterktebeton is de warmte-ontwikkeling, inherent aan de hydratatie van het cement, hoger dan voor een traditioneel beton. Deze grote warmtetoename moet reeds bij het ontwerp in rekening worden gebracht, waarbij de risico's verbonden aan scheurvorming door krimp en thermische werking dienen geëvalueerd te worden. Indien nodig moeten maatregelen genomen worden om verhin-derde thermische krimp te vermijden evenals te grote temperatuurverschillen (zie hoofdstuk 4.2). De risico's op de ontwikkeling van interne sulfaataantasting (zie hoofdstuk 4.7) moeten beperkt worden.

Om de maximum temperatuur, die in het beton ontwikkeld wordt, te beperken, kunnen de volgende maatregelen overwogen worden :

- ▶ De dwarssectie van massieve elementen tot het minimum beperken en uitsparingen voorzien die warmte kunnen afvoeren.
- ▶ Een deel van het CEM I-cement vervangen door een cement op basis van hoogovenslak.
- ▶ Vermijden beton te storten op het warmste moment van de dag en het storten zo snel mogelijk na aankomst van de truckmixer starten.

Eigenschappen van het verhard beton

Druksterkte

Op jonge ouderdom zal de druksterkte van HSB reeds hoog zijn door hun hogere hydratatiegraad via de gecombineerde werking van een hoog cementgehalte en een lage W/C-factor.

Op hogere ouderdom, wanneer een beton met normale sterkte aan druk wordt belast, ontstaan hechtings-scheuren in de contactzone tussen de mortel en de granulaten. Deze scheuren verspreiden zich vervolgens over de rest van de mortelfractie. Het beton bezwijkt onder invloed van een ononderbroken netwerk van interne scheuren in de mortel terwijl de granulaten intact blijven.

Hogesterktebeton kenmerkt zich door een grotere hechtsterkte van de mortel aan de granulaten. Scheuren in de aanhechtingszone zullen dus minder snel optreden. Bovendien is de sterkte van de cementsteen en het granulaat van dezelfde grootteorde. Het beton zal dus bezwijken door scheurvorming die doorheen de mortelfractie en de granulaten gaat. Maar vanaf het bereiken van de (hogere) bezwijklast zal het draagvermogen onmiddellijk terug op nul vallen. Men spreekt van een brosse breuk (meer uitgesproken dan bij normaal beton).

Treksterkte

In het algemeen is de treksterkte van beton gerelateerd aan zijn druksterkte. De winst van de treksterkte is bij een HSB echter kleiner. Een beton C30/37 zal bijvoorbeeld een treksterkte hebben die ongeveer 1/10 bedraagt van de druksterkte terwijl dat voor een beton C80/95 slechts ongeveer 1/15 zal zijn.

De toevoeging van vezels in het beton kan de (residuele) treksterkte verhogen (zie hoofdstuk 3.3).

Elasticiteitsmodulus

Door de grote compactheid en de kleine hoeveelheid poriën zal de elasticiteitsmodulus van HSB beduidend hoger zijn dan die van traditionele betontypes.

De elasticiteitsmodulus bedraagt 37 000 à 45 000 N/mm² tegenover 32 000 à 33 000 N/mm² voor beton met normale sterkte.

3.6 Hogesterktebeton

Krimp en kruip

De evolutie in de tijd van het vervormingsgedrag van hogesterktebeton wordt beïnvloed door zijn geringe porositeit, zijn elasticiteitsmodulus en zijn hoge dichtheid. De volgende fenomenen worden vastgesteld in vergelijking met beton met een normale druksterkte:

- ▶ de endogene krimp is beduidend hoger
- ▶ de uitdrogingskrimp neemt af naarmate de sterkte toeneemt
- ▶ de kruipvervorming vermindert naarmate de sterkte toeneemt maar bereikt sneller zijn eindwaarde.

De endogene krimp van hogesterktebeton is hoger dan die bij beton met normale sterkte. De uitdrogingskrimp zal daarentegen lager zijn. De globale krimp zal voor hogesterktebeton uiteindelijk lager zijn dan die voor traditioneel beton (zie hoofdstuk 4.2 voor de definities van de verschillende soorten krimp).

De snellere sterkte-ontwikkeling van hogesterktebeton leidt tevens tot een snellere warmte-ontwikkeling. Constructie-elementen die belemmerd zijn in hun beweging zullen dus op jongere ouderdom de invloed ondervinden van de hydratatie-warmte in combinatie met de endogene krimp. Het risico op scheurvorming op jonge ouderdom is dus groter bij hogesterktebeton.

Brandweerstand

Door zijn zeer lage porositeit kan de dampdruk, die in het beton ontstaat bij temperaturen hoger dan 100°C, moeilijk worden beperkt. De stoom kan immers niet snel genoeg naar de buitenkant worden afgeleid. Ten opzichte van conventioneel beton zal de druksterkte bij hogesterktebeton dus sneller afnemen bij temperaturen hoger dan 100°C.

Bovendien bestaat er, door de interne spanningsopbouw, een risico op (bruusk) afspringen (ook "afspatten" genoemd) van het oppervlaktebeton voor beton met zeer hoge sterkte ($\geq C80/95$).

Om dit risico te beperken heeft de toevoeging van micro-vezels in polypropyleen een gunstig effect (fig 3.6.4). Bij hoge temperatuur zullen deze vezels immers smelten waardoor kleine evacuatiekanaaltjes ontstaan die de interne dampdruk sneller kunnen doen afvoeren.

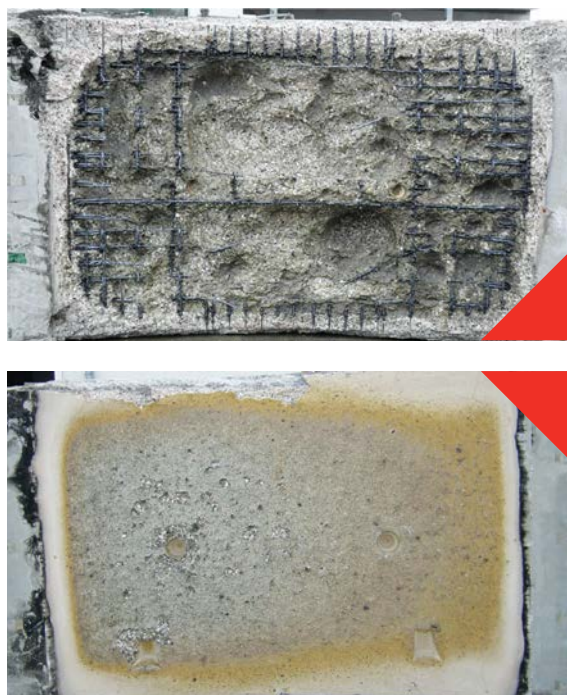


Fig 3.6.4
Element in HSB zonder polypropyleen-vezels (boven) en met (onder) na een brandproef. (Bron: GMPB, Leipzig GmbH)

Duurzaamheid

Door zijn lage porositeit kan HSB beter weerstand bieden aan de inwerking van uitwendige aantastingen. Het grootste deel van de aantastingsmechanismen wordt immers veroorzaakt door de opname door het beton van water of agressieve stoffen zoals chloriden, sulfaten, zuren, koolstofdioxide ... Door zijn lage porositeit zullen water en andere stoffen in HSB trager binnendringen waardoor de aantastingsmechanismen ook trager zullen verlopen. De slijtweerstand alsook de weerstand tegen vorst van dit beton type is ook sterk verhoogd.

3.6 Hogesterktebeton

Productie, transport en verwerking

De productie, het transport en de verwerking van HSB gebeurt met middelen die ook voor traditioneel beton worden gebruikt.

De mengder dient over voldoende vermogen te beschikken omwille van de hogere schuifkrachten in het mengsel (hogere viscositeit). Door het hoge gehalte aan poeder en zeker in het geval van toevoeging van silica fume, zal de mengtijd in vergelijking met die voor traditioneel beton moeten verlengd worden. Dit betontype wordt best gemengd totdat een volledige stabilisatie van de vermogensmeter van de motor is bereikt.

Voor stortklaar beton zal het transport gebeuren in truckmixers. Deze moeten gecontroleerd worden vóór het laden zodat geen restanten van spoelwater meer aanwezig zijn. Hogesterktebeton zal, bij aankomst op de werf, nog worden doorgemengd alvorens te worden gelost.

Hogesterktebeton zal meestal, bij gelijke verwerkbaarheid, een meer thixotroop gedrag vertonen dan beton met normale sterkte. Hierdoor is er meer energie nodig bij het verwerken. Als dit beton moet verpompt worden, zal de pompsnelheid lager zijn, zeker als er gebroken granulaten worden gebruikt.

In de prefabindustrie komt het frequent voor dat HSB als zelfverdichtend beton wordt uitgevoerd, zodat moeizame plaatsings- en verdichtingsoperaties kunnen vermeden worden. Het verwerken van HSB kan verder via de klassieke methodes gebeuren.



Fig 3.6.5
Bouwwerk in
UHPFRC

Ultra-hogesterktebeton (UHPC)

Er bestaan ook betontypes waarvan de kenmerken nog veel extremer zijn dan bij HSB. De druksterkte situeert zich tussen 150 en 200 N/mm². De samenstelling van deze betontypes, ook wel UHPC (Ultra-High Performance Concrete) genoemd, lijkt nog in weinig op die van traditioneel of zelfs hogesterktebeton, in het bijzonder op de volgende punten:

- ▶ zéér fijne korrelopbouw (maximum 0/2 of 0/4)
- ▶ gebruik van grote hoeveelheden minerale toevoegsels
- ▶ zéér lage W/C-factor ($\approx 0,25$).

De toevoeging van een hoge dosering van korte staalvezels transformeert de - extreem brosse - cementsteen in een composietmateriaal met een uitzonderlijke ductiliteit dat UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete) wordt genoemd. Dit betontype maakt de uitvoering mogelijk van zeer slanke elementen die de ontwerper een grote architecturale vrijheid bieden (fig 3.6.5). Zonder de sterke reductie van de dwarsdoorsnede zouden deze toepassingen anders in staal worden uitgevoerd.

Toepassingen

Hogesterktebeton biedt tal van toepassingsmogelijkheden. Naast prestigeprojecten getuigen talrijke viaducten en snelweg-overgangen van de mogelijkheden van HSB om grotere overspanningen en een sterke verbetering van de duurzaamheid te bekomen, hetgeen de onderhoudskosten sterk reduceert.

Bij de constructie van gebouwen wordt belangrijke plaatswinst gerealiseerd door te werken met grotere overspanningen en gereduceerde secties.

In de prefabsector wordt HSB ook gebruikt voor de productie van betonnen buizen die daardoor een veel grotere duurzaamheid vertonen voor agressief (huishoudelijk of industrieel) afvalwater.

3.7 Beton voor diepfunderingen

Inleiding

In de funderingstechniek zijn boorpalen en diepwanden twee van de belangrijkste constructie-elementen. Palen laten toe de lasten van een gebouw over te dragen naar dieper gelegen draagkrachtige lagen in de grond. Boorpalen en diepwanden dienen ook als keermuren bij grote uitgravingen. Ze kunnen worden geprefabriceerd of ter plaatse gestort. Indien geprefabriceerd worden ze als heipalen in de grond geslagen.

Boorpalen

Bij de uitvoering van boorpalen in ter plaatse gestort beton (fig 3.7.1) wordt in de grond geboord tot op een draagkrachtige laag. Meestal wordt het boorgat gestut door een buis om het inkalven van de omliggende grond te vermijden. De wapeningskorf wordt dan in het boorgat geplaatst waarna het beton kan gestort worden. Tijdens het vullen met beton wordt de steunbuis geleidelijk opgetrokken en gerecupereerd (fig 3.7.2).

In bepaalde uitvoeringsprocédés wordt de wapening onmiddellijk na het betonneren in het vers beton geplaatst.



Fig 3.7.1
Wand uitgevoerd in secans boorpalen

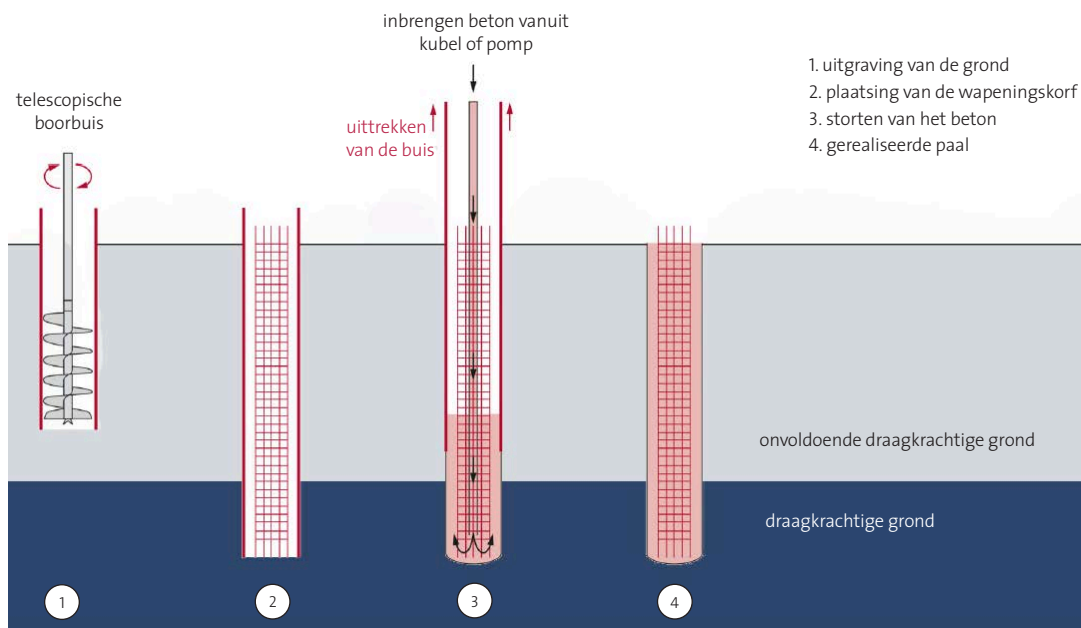


Fig 3.7.2
Uitvoering van een boorpaal met een tijdelijke steunbuis

3.7 Beton voor diepfunderingen

Diepwanden

Diepwanden worden in 2 fasen uitgevoerd (fig 3.7.3). In een eerste fase wordt de grond verwijderd en wordt de sleuf ondersteund door een steunvloeistof (bijvoorbeeld een bentoniet-suspensie).

In de tweede fase wordt de wapeningskorf geplaatst en het beton gestort. Door het storten van het beton wordt de steunvloeistof omhoog gedruwd, waar ze wordt gerecupereerd voor zuivering en hergebruik.

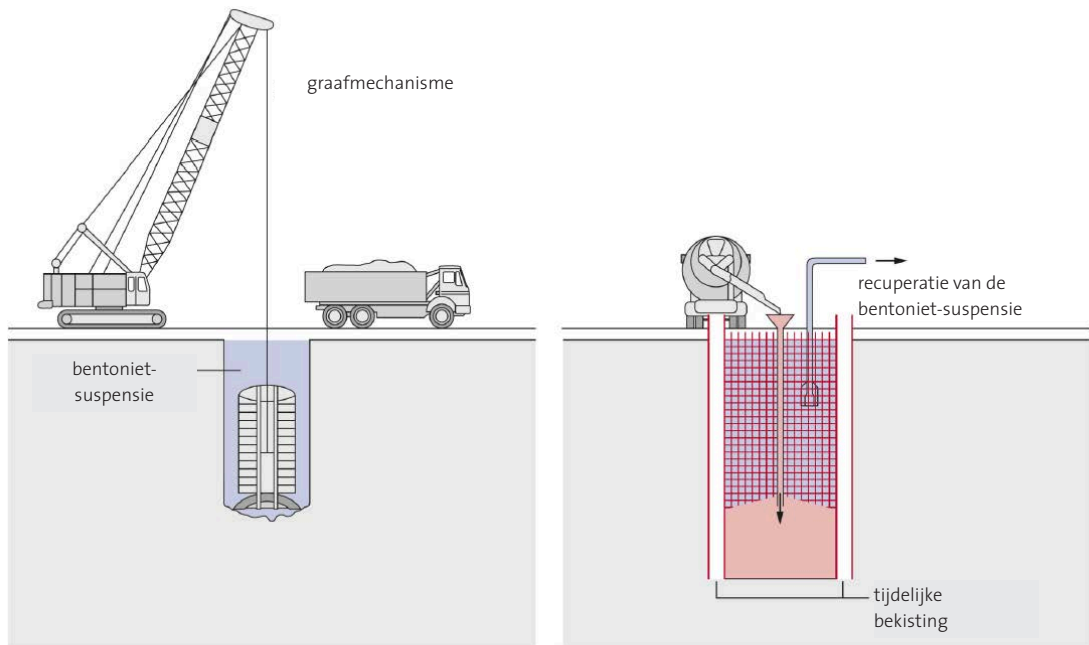


Fig 3.7.3

Uitvoering van een diepwand in twee fasen

Fase 1: Uitgraving

Fase 2: Plaatsen van de wapeningskorf en het beton



Fig 3.7.4

Storten van paneel van een diepwand

3.7 Beton voor diepfunderingen

Normatieve eisen

De eisen die gelden voor beton voor boorpalen en diepwanden worden beschreven in de normen NBN EN 206 en NBN B15-001 en meer specifiek in bijlage D. Hierbij wordt beoogd dat het beton:

- ▶ een grote weerstand bezit tegen ontmengen
- ▶ een goed vloeigedrag heeft zodat het zich vlot verplaatst onder zwaartekracht
- ▶ zich verdicht zonder verdichtingsenergie
- ▶ zijn verwerkbaarheid behoudt tijdens de volledige duur van het betonneren (inclusief de plaatsing van de wapening en het verwijderen van betonneerkolommen).

De eisen met betrekking tot cementgehalte, minimum gehalte aan fijne deeltjes, consistentie en het behoud ervan zijn in bijlage D beschreven en zijn strenger dan voor conventionele toepassingen. Zij laten toe, in afwezigheid van verdichting, een volledige omhulling van de wapening en een voldoende compacte betonstructuur te garanderen.

De normen NBN EN 1536 "Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk – Boorpalen" en NBN EN 1538 "Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk – Diepwanden" zijn eveneens van toepassing.

Beton voor boorpalen en diepwanden wordt meestal in de sterkteklasse C25/30 uitgevoerd. De eisen met betrekking tot de duurzaamheid, zoals het risico op alkali-silica reactie (ASR) of chemische aantasting, dienen in het lastenboek te worden opgenomen.

Samenstellen van beton

Cement

Het beton voor boorpalen en diepwanden mag met elk courant cement gemaakt worden. Toch zijn de cementtypes CEM III/A en CEM III/B door hun trage binding bijzonder geschikt voor toepassingen met lange verwerkbaarheidsduur, waarbij de uitvoering soms onverwacht lang kan duren. Deze cementtypes verkleinen bovendien het risico op alkali-silica reactie of op aantasting door chemische stoffen die zich in de grond of in het grondwater kunnen bevinden.

Granulaten

De eisen van de norm NBN EN 12620 zijn van toepassing voor de granulaten. Om een voldoende hoeveelheid fijne deeltjes in het beton te garanderen zal onder meer gekozen worden voor een betonsamenstelling met een wat grotere zandfractie, vergelijkbaar met de aanbevelingen voor verpompt beton. Het zandgehalte ($d \leq 4$ mm) zal minstens 40% van de totale massa granulaten bedragen. Een discontinue korrelopbouw is voor dit soort toepassingen niet toegestaan. De maximale korrelgrootte wordt beperkt tot 32 mm en dient bovendien aangepast te worden aan de tussenafstand van de horizontale wapeningsstaven en de diameter van de popleidingen en stortbuizen.

Hulpstoffen

Voor beton voor boorpalen en diepwanden zullen meestal superplastificeerders gebruikt worden om de samenhang en vloeibaarheid van het verse beton te verbeteren. Hun efficiëntie dient niet alleen gegarandeerd te zijn voor het bekomen van de hoge vloeibaarheid maar ook voor het behoud ervan. Het kan nodig zijn bindingsvertragers te gebruiken om de vloeibaarheid op peil te houden of om onverwacht oponthoud te kunnen overbruggen.

Consistentie

Bij de plaatsing, via de stortbuis, van beton voor boorpalen en diepwanden zal meestal op de zwaartekracht gerekend worden. De consistentie zal vloeibaar of zeer vloeibaar gespecificeerd worden met een schudmaat die doorgaans 570 à 630 mm zal bedragen, wat bij benadering overeenkomt met een zetmaat van 180 à 230 mm. Vaak zal men eisen dat de vloeibaarheid gedurende een bepaalde periode (typisch 3u) kan behouden worden.

Bleeding

Omdat bij deze constructies de hoogte van de massa vers beton erg groot is, zal bijzondere zorg besteed worden aan de interne samenhang van het mengsel en in het bijzonder aan het beperken van bleeding. Deze eigenschap kan getest worden via de proeven beschreven in de normen NBN EN 480-4 (Bepalen van bleeding) en ASTM C232 (Snelheid van bleeding) of nog via de "Bauertest" (meting van het waterverlies door een filterpapier, onder druk).

Oorzaken en preventie van betonschade

4.1

Ontmenging

4.2

Krimp en scheurvorming

4.3

Corrosie van de wapening

4.4

Uitbloeiingen

4.5

Aantasting door vorst en dooizouten

4.6

Externe sulfaataantasting

4.7

Interne sulfaataantasting

4.8

Chemische aantasting

4.9

Alkali-silica reactie

4.10

Brandweerstand

4.11

Benaderingen van de duurzaamheid van beton



4.1 Ontmenging

Vormen van ontmenging

Ontmenging (of segregatie) is een scheiding van de bestanddelen van vers beton die kan optreden telkens wanneer het beton wordt vervoerd of in beweging wordt gebracht (overslag, verpompen, storten, verdichten) of gewoon onder invloed van de zwaartekracht wanneer het beton in rust is.

Ontmenging heeft altijd belangrijke gevolgen voor het uitzicht van het beton en heel dikwijls ook voor zijn sterkte en duurzaamheid. De ontmenging kan het gevolg zijn van de scheiding van:

- ▶ de verschillende fracties van de granulaten
- ▶ de granulaten en de cementpasta
- ▶ de fijne deeltjes en het aanmaakwater.

De meest voorkomende vormen van ontmenging zijn:

- ▶ "grindnesten": plaatselijke concentraties van grove granulaten (fig 4.1.1)
- ▶ "zandlopers": overtollig of afgescheiden water dat tijdens de verdichting opstijgt langs de verticale bekistingswanden (fig 4.1.2)
- ▶ "bleeding" (of uitzweten): accumulatie van overtollig of afgescheiden water op de horizontale oppervlakken van het beton. Dit leidt tot onregelmatige, stofferige of poreuze oppervlakken (fig 4.1.3)
- ▶ "micro-ontmenging" van cement en/of fijne deeltjes: deze zijn doorgaans meer hinderlijk voor het oog dan voor de kwaliteit (fig 4.1.4).

Oorzaken

De belangrijkste oorzaken van de verschillende soorten ontmenging zijn:

- ▶ te vloeibaar beton
- ▶ te hoge dosering plastificeerder of superplastificeerder
- ▶ foutieve verwerking van het beton (overdreven trillen, geen stortbuis voor grote hoogtes, storten van beton tegen een verticale bekisting (fig 2.7.2))
- ▶ onaangepaste betonsamenstelling (slechte verhouding van de granulaatfracties, onvoldoende fijne deeltjes, te hoog watergehalte)
- ▶ te grote maximale korreldiameter ten opzichte van de afmetingen van het te betonneren element en de betondekking (fig 2.1.3)
- ▶ te korte mengtijd
- ▶ slechte dichting van de bekistingnaden, verlies van cementmelk (filtereffect)
- ▶ te dichte wapening (zeefeffect).



Fig 4.1.1
Grindnest



Fig 4.1.3
Bleeding van een betonvloer



Fig 4.1.2
Zandlopers



Fig 4.1.4
Micro-ontmenging

4.2 Krimp en scheurvorming

Algemeen

Het is erg moeilijk om scheuren te voorkomen in het materiaal beton. De treksterkte van beton is immers erg laag in vergelijking met de druksterkte. Uit voorzichtigheid leggen de normen voor de berekening van betonconstructies in de meeste gevallen op dat er geen rekening gehouden mag worden met de treksterkte. Het is dan ook onvermijdelijk dat er scheuren ontstaan vanaf het ogenblik dat de trekspanningen in het beton de waarde van de treksterkte (2 à 3 N/mm² voor normaal beton) bereiken of overschrijden.

Deze trekspanningen en het risico op scheurvorming dat daaruit voortvloeit, kunnen het gevolg zijn van één of meer van de volgende factoren:

- ▶ krimp van het beton
- ▶ zettingen van de funderingen
- ▶ temperatuurseffecten
- ▶ belastingen (eigengewicht, verkeer, ...)
- ▶ vorst
- ▶ chemische reacties (wapeningscorrosie, alkali-silica reactie, sulfaataantasting ...).

Scheuren hebben zelden een nadelige invloed op de stabiliteit van een constructie, op voorwaarde dat ze beperkt blijven dankzij de hulp van aangepaste maatregelen.

Echter, naast de negatieve weerslag op het uitzicht van het betonoppervlak, kunnen scheuren toch nadelig zijn voor de duurzaamheid van de constructie: agressieve stoffen kunnen via de scheuren gemakkelijker het beton binnendringen en zo het beton en de wapening aantasten.

Dankzij bepaalde maatregelen is het evenwel mogelijk om het risico en de omvang van de scheurvorming sterk te verminderen of zelfs helemaal te voorkomen. Afhankelijk van de oorzaak van de scheurvorming kunnen min of meer doeltreffende maatregelen genomen worden op het vlak van:

- ▶ het ontwerp, de dimensionering en de constructieve schikkingen van het bouwwerk
- ▶ de keuze van de constructie- en betonneerfasen
- ▶ de samenstelling en de nabehandeling van het beton.

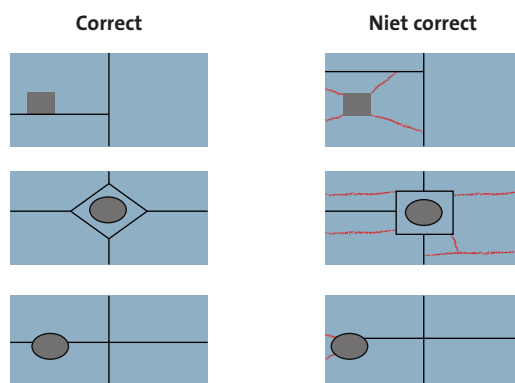


Fig 4.2.1
De slechte positionering van de voegen kan tot scheurvorming leiden

Ontwerp, dimensionering en constructieve schikkingen van het bouwwerk

De keuze van het statisch systeem, het aantal en de plaats van de voegen hebben een grote invloed op de trekspanningen die worden opgewekt in het beton door krimp, kruip of de vervormingen ten gevolge van de belastingen.

De toepassing van voorspanning kan scheurvorming voorkomen doordat de drukspanningen, opgewekt door de voorspanning, de trekspanningen compenseren.

Het voorzien van een (minimale) passieve wapening (volgens de normen) voorkomt in geen geval het optreden van scheuren, maar laat wel toe de scheuropening te beperken tot een aanvaardbaar niveau, dat afhankelijk is van de hoeveelheid gebruikte wapening. De normen voor de dimensionering van betonconstructies (Eurocode 2) laten toe de minimale passieve wapening te ontwerpen in functie van de toegelaten scheuropening (doorgaans 0,3 mm).

Scheurvorming van beton is vaak ook het gevolg van weinig doordachte of zelfs foutieve keuzes met betrekking tot het ontwerp, de dimensionering of de constructieve schikkingen, bijvoorbeeld:

- ▶ onvoldoende draagvermogen
- ▶ verkeerde schikking van de wapeningen
- ▶ slechte plaatsing of afwezigheid van voegen (fig 4.2.1)
- ▶ optreden van onverwachte of uitzonderlijk hoge spanningen door de keuze van het draagsysteem, zetting van de funderingen of bodemverzakkingen.

4.2 Krimp en scheurvorming



Fig 4.2.2
Scheuren in een (verondersteld) waterdichte constructie

Constructie- en betonneerfasen

Voor constructies die niet door voegen onderbroken kunnen worden, speelt de keuze van de constructie- en betonneerfasen eveneens een rol in het beheersen van het scheurrisico.

De krimp van het beton verloopt niet lineair in de tijd, maar neemt sterk toe in het begin en vermindert vervolgens in de loop van de tijd. Daarom is het raadzaam om de verschillende betonneerfasen van een doorlopende betonconstructie met een minimum aan tussentijd te laten verlopen om de nadelige gevolgen van de differentiële krimp tussen de fasen zo veel mogelijk te beperken. Dit is typisch het geval voor het storten van wanden op een vooraf gestorte funderingsplaat, waar de differentiële krimp (groter voor de wand dan voor de vloer die reeds een deel van zijn krimp heeft ondergaan), verhinderd door de vloerplaat, doorgaande scheuren kan veroorzaken (fig 4.2.2)

Het is voorts aangewezen om de betonneerfasen van wanden met een zekere lengte te verzorgen (fig 4.2.3 boven).

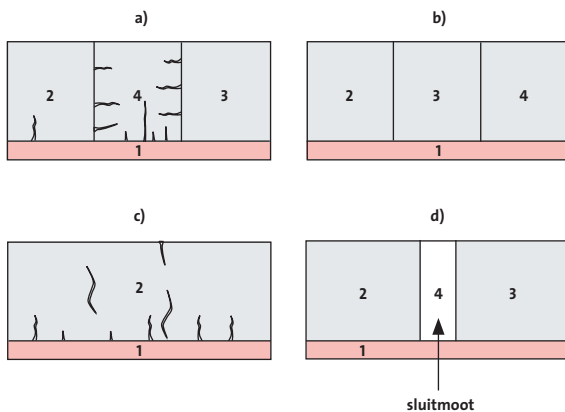


Fig 4.2.3
Betonneerfasen voor een steunmuur
a) en c) ongunstige oplossing
b) en d) gunstige oplossing

Voor omvangrijke werken kan het risico op scheurvorming aanzienlijk worden beperkt door smalle stroken of "sluitmooten" niet te betonneren en deze te laten werken als tijdelijke krimpvoegen door ze pas nadien – indien mogelijk zelfs maanden later – dicht te betonneren (fig 4.2.3 onder en 4.2.4).



Fig 4.2.4
Het later betonneren van "sluitmooten" bij een betonvloer

4.2 Krimp en scheurvorming

Samenstelling en nabehandeling van het beton

De samenstelling van het beton en de nabehandeling hebben een zeer grote invloed op de krimpvormingen en bijgevolg op het risico op scheurvorming. De verschillende soorten krimp en de bijhorende preventieve maatregelen worden hierna behandeld.

Het is belangrijk om het onderscheid te maken tussen de verschillende soorten krimp en de gevolgen ervan (type scheuren en het tijdstip waarop ze verschijnen), om voor elk geval de juiste preventieve maatregelen te kunnen nemen (tab 4.2.1).

Soorten krimp

In het algemeen beschouwt men als krimp de vermindering van het volume van beton, veroorzaakt door de zetting van vers beton (krimp door plastische zetting), het verlies van water uit het beton (plastische krimp en drogingskrimp), de hydratatie van cement (endogene krimp) of nog als gevolg van thermische fenomenen (thermische krimp).

Soort krimp	Grootte-orde	Risico op scheurvorming		Nut / doeltreffendheid van de verschillende maatregelen		
	(mm/m)	Tijdstip van verschijning	Type scheuren	Betonsamenstelling	Nabehandeling	Nabehandeling
Krimp door plastische zetting	tot 1% van de dikte	Voor de binding	Oppervlakkig	Zeer hoog	Geen	Geen
Plastische krimp ¹⁾	tot 4	Voor of tijdens de verharding	Oppervlakkig	Zwak	Zeer hoog	Geen
Drogingskrimp ²⁾	0,3 à 0,8	Enkele dagen tot een jaar na het betonneren	Oppervlakkig tot doorgaand	Middelmatig	Zeer hoog	Zeer hoog
Endogene krimp ²⁾	0,04 à 0,1 (W/C ≥ 0,45) tot 1 (UHPC)	Enkele weken tot een jaar na het betonneren	Intern	Middelmatig	Geen	Hoog
Thermische krimp	0,01 · ΔT°	10u tot een week na het betonneren	Oppervlakkig, doorgaand of intern	Zeer hoog	Geen ³⁾	Middelmatig

¹⁾ verdamping van het water uit het vers beton (synoniem: vroegtijdige krimp of capillaire krimp)
²⁾ verlies van water uit het verhard beton (door verdamping en/of endogeen "verbruik")
³⁾ de aanwezigheid van thermische isolatie kan een gunstige rol spelen

Tab 4.2.1
Risico op scheurvorming in functie van het soort krimp

4.2 Krimp en scheurvorming

Plastische zetting

De zetting (of zakking) van vers beton wordt veroorzaakt door de bezinking van vaste deeltjes en de gelijktijdige opstijging van water naar het oppervlak onder invloed van verschillen in volumieke massa (zie hoofdstuk 4.1). Dergelijk fenomeen doet zich voor direct na de plaatsing en de verdichting van het beton en voor de binding van het cement.

In het slechtste geval kan de zetting tot 1% van de hoogte van het constructie-element bedragen. Het nog jonge beton dat nauwelijks enige stijfheid bezit kan scheuren ter hoogte van wijzigingen in de dikte of de geometrie van het element of ter hoogte van de wapeningen, zeker als de betondekking klein is (fig 4.2.5).

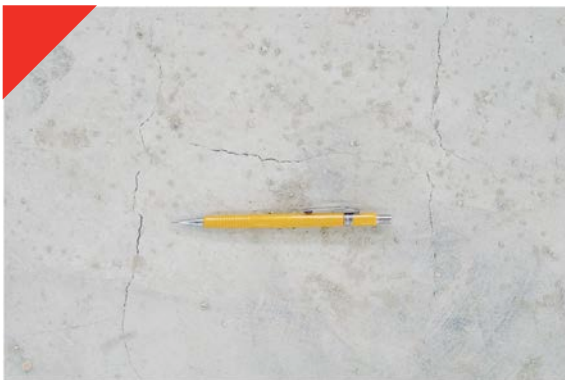


Fig 4.2.5
Rechtlijnig patroon van scheuren als gevolg van plastische zetting (globaal beeld en detail)

Preventieve maatregelen

Scheurvorming door de zetting van vers beton kan worden vermeden of beperkt door volgende maatregelen:

- ▶ kiezen voor een lagere consistentie van het vers beton
- ▶ de hoeveelheid aanmaakwater verminderen
- ▶ het gehalte aan fijne deeltjes verhogen en/of een fijner cement gebruiken om het watervasthoudend vermogen te vergroten en bleeding te verminderen
- ▶ (half-)gebroken grof granulaat gebruiken
- ▶ omvangrijke elementen traag betonneren of in verschillende lagen (nat in nat)

Dergelijke scheuren in het vers beton kunnen terug gesloten worden door een bijkomende (latere) verdichting en afwerking, die echter op het goede moment d.w.z. voor het begin van de binding dient uitgevoerd te worden.

4.2 Krimp en scheurvorming

Plastische krimp

Plastische krimp, ook capillaire krimp of vroegtijdige krimp genoemd (omdat deze optreedt vóór het einde van de binding) is te wijten aan het snelle verlies van water, onmiddellijk na het storten van het beton.

Dit waterverlies is te wijten aan een buitensporige verdamping of aan een sterke opslorping door de bekisting of de ondergrond. Daaruit volgt een aanzienlijke krimp (tot wel 4 mm/m in extreme gevallen) in de lagen waar het waterverlies groot is, terwijl de rest van het beton minder getroffen wordt. Daardoor ontwikkelen zich interne trekspanningen tussen de lagen die onderworpen zijn aan deze krimpverschillen. Als deze spanningen de treksterkte van het beton (die in het nog jonge beton zéér laag is) overschrijden, ontstaan er scheuren van enkele centimeter diepte, dus meestal niet doorgaand, die tot 1 mm of meer breed kunnen zijn.

Horizontale elementen (funderingsplaten, vloeren, verhardingen, druklagen, ...) zijn het meest gevoelig aan plastische krimp (fig 4.2.6).

Het risico op plastische krimpscheuren is des te groter naarmate de kwaliteit van het beton toeneemt door de keuze van een lage W/C-factor: hoe minder water het beton bevat, hoe gevoeliger het is aan vroegtijdige uitdroging.

Naast esthetische schade kunnen plastische krimpscheuren ook leiden tot andere betonschade, bijvoorbeeld door waterinsijpeling gevolgd door vorst.

Het verlies van water kan bovendien een goede hydratatie van het cement verhinderen. Het betonoppervlak zal dan minder sterkte en een hoge porositeit hebben. In ongunstige omstandigheden zal dergelijk beton weinig voldoening geven: waterinfiltratie, loskomen van grove granulaten, stoffig oppervlak en afschilferingen.

Tijdens het polieren van het beton worden eventuele plastische krimpscheuren aan het oppervlak dichtgewreven, hetgeen op esthetisch vlak voldoening geeft. In de diepte blijven de scheuren echter bestaan en vormen ze vaak de aanzet voor latere scheurvorming bv. door drogingskrimp.



Fig 4.2.6
Plastische krimpscheuren in een vloer, te wijten aan het niet of te laat nabehandelen

Preventieve maatregelen

De volgende maatregelen laten toe om plastische krimpscheuren te voorkomen:

- ▶ Het beton onmiddellijk na het storten nabehandelen, zoals beschreven in hoofdstuk 2.8, om de verdamping maximaal te beperken.
- ▶ Wateropslorping door de bekisting of de ondergrond vermijden door deze vooraf te verzadigen.
- ▶ Zo mogelijk vermijden om te betonneren bij ongunstige weersomstandigheden (te hoge temperaturen en/of te veel wind), zie de aanbevelingen van hoofdstuk 2.9 volgen.
- ▶ Polypropyleenvezels toevoegen (zie hoofdstuk 1.5).

4.2 Krimp en scheurvorming

Uitdrogingskrimp

Uitdrogingskrimp, ook hydraulische krimp genoemd, wordt veroorzaakt door de volumevermindering die ontstaat door het langzame uitdrogen van het beton. Hoe groter de hoeveelheid niet-gebonden water verdampt, hoe groter de krimp van beton. Dit uitdrogingsproces, en de krimp die erdoor ontstaat, neemt toe naarmate de luchtvochtigheid van de omgeving lager is.

De uitdrogingskrimp neemt toe en treedt sneller op indien de hoeveelheid niet-gebonden water hoog is. De grotere porositeit en doorlatendheid van het beton versnellen immers het uitdrogingsproces. De uiteindelijke waarde van de uitdrogingskrimp ligt gewoonlijk tussen 0,3 en 0,8 mm/m. De beheersing van deze vorm van krimp beroept zich dan ook voornamelijk op een beperking van de hoeveelheid water in beton. Een compacte korrelverdeling van het inert skelet bevordert eveneens de beperking van de uitdrogingskrimp.



Fig 4.2.7

Beheersing van de effecten van krimp door onderbreking (voegen)



Fig 4.2.8

De afwezigheid van voegen in veiligheidsstootbanden veroorzaakt regelmatige scheuren als gevolg van uitdrogingskrimp

Preventieve maatregelen

De volgende maatregelen laten toe om scheuren door uitdrogingskrimp te voorkomen :

- ▶ Een aangepaste continue korrelverdeling kiezen om de holle ruimten in het betonmengsel te minimaliseren en de waterbehoefte zoveel mogelijk te beperken.
- ▶ De W/C-factor beperken tot een optimaal niveau met behulp van een superplastificeerder ($W/C \leq 0,50$).
- ▶ Hetzij onderbrekingen van het betonelement aanbrengen door middel van krimpvoegen (fig 4.2.1 en 4.2.7), hetzij een voldoende minimumwapening en/of staalvezels voorzien. Deze wapening zal de scheurvorming niet vermijden maar wel beheersen (de verschijning van vele micro-scheuren is meestal minder schadelijk dan één of enkele zeer grote scheuren).
- ▶ De betonneerfasen weldoordacht plannen (fig 4.2.2 en 4.2.3).
- ▶ De nabehandlings-maatregelen toepassen en de nabehandlungsduur respecteren, zoals aanbevolen in hoofdstuk 2.8

Endogene krimp

Zelfs wanneer er geen enkel contact en dus ook geen vochtverlies is met de omgeving, kent beton nog een "endogene krimp". Deze heeft een dubbele oorsprong.

De chemische krimp (ook Le Chatelier krimp genoemd) is een volumevermindering die plaatsvindt tijdens de hydratatie van het cement omdat het volume van de gevormde hydraten kleiner is dan het volume van de originele producten (cement en water). Deze volumevermindering bedraagt zo'n 8 à 12% en ligt met name aan de basis van de poreuze structuur van beton.

De voortschrijdende hydratatie bindt het vrije water chemisch. Wanneer er geen vrij water meer beschikbaar is in de capillaire poriën, wordt het water in de gelporiën verbruikt, waardoor hun relatieve vochtigheid daalt. Deze "interne uitdroging" leidt ook tot interne spanningen en krimp.

De endogene krimp is afhankelijk van de W/C-factor. Hoe lager de W/C-factor, hoe hoger de endogene krimp. Voor courante betons met een W/C-factor $\geq 0,45$ bedraagt deze zo'n 0,04 à 0,1 mm/m dus zo goed als verwaarloosbaar. Voor HSB, en meer nog voor UHPC, kan de endogene krimp oplopen tot 1 mm/m.

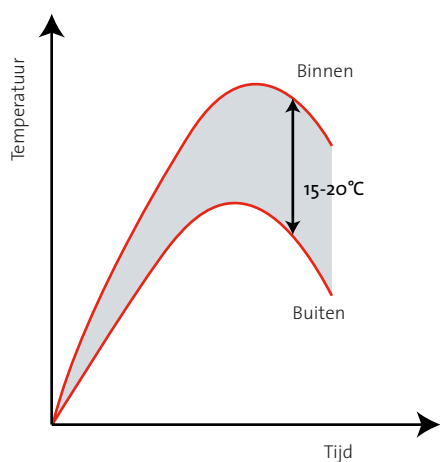
4.2 Krimp en scheurvorming

Thermische krimp

De warmte die vrijkomt wanneer het cement hydrateert, veroorzaakt temperatuur-gradiënten in beton. Hoge omgevingstemperaturen versnellen de hydratatie en leiden tot nog grotere gradiënten.

Na de duidelijke temperatuurstijging die gepaard gaat met de binding en het begin van verharding, koelt het jonge beton in contact met de omgeving af en, zoals voor de meeste andere materialen, neemt zijn volume af naarmate de betontemperatuur daalt. Aangezien het beton sneller zal afkoelen aan het oppervlak dan in de massa, zullen er interne spanningen ontstaan tussen de interne zone die minder krimpt en de externe zone die meer krimpt (fig 4.2.9). Deze spanningen kunnen oppervlakkige scheuren veroorzaken.

Wanneer het betonelement voorts in zijn langsricting niet onbelemmerd kan krimpen (bv. een wand op een reeds gekoelde vloer), kan de krimp die te wijten is aan de langzame afkoeling, net zoals de uitdrogingskrimp, aanleiding geven tot doorgaande scheuren.



Preventieve maatregelen

- ▶ Cement met een lage hydratatiewarmte (type LH) gebruiken en/of het cementgehalte beperken (eventueel de druksterkte op een hogere ouderdom dan 28 dagen specificeren).
- ▶ Temperatuur-gradiënten vermijden tijdens de opwarming van het beton (houten bekisting of thermische bescherming).
- ▶ Thermische schokken vermijden door niet te ontkisten op het moment dat de temperatuur in het beton maximaal is (en deze aan het oppervlak bruusk zou afkoelen door het ontkisten). Temperatuursondes kunnen gebruikt worden om het verschil kern-buitenzijde op te volgen.
- ▶ Betonneerfasen weldoordacht plannen (fig 4.2.3).
- ▶ Grote vrije oppervlakken isoleren.

Praktische regels

- ▶ Scheuren door temperatuur-gradiënten (doorgaans oppervlakkig) zijn te vrezen indien het temperatuurverschil tussen de kern en de buitenzijde van het element 15°C overschrijdt.
- ▶ Scheuren door verhinderde afkoeling (doorgaans doorgaand) zijn te vrezen bij temperatuurverschillen vanaf 20°C.
- ▶ Een passieve wapening voorzien en deze ontwerpen/detaileren in de zones met het hoogste risico. In het bijzonder dient de horizontale wapening het dichtst bij de bekisting te worden geplaatst (met inachtnaeme van de regels voor betondekking). Het wapeningspercentage wordt ook best verdeeld over kleinere staafdiameters.

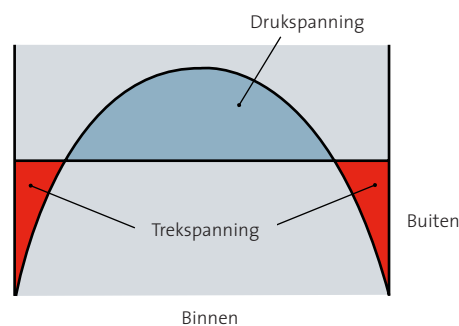


Fig 4.2.9
Spanningsdiagramm als gevolg van een temperatuurverschil van 15-20°C tussen binnen en buiten

4.3 Corrosie van de wapening

Algemeen

In het algemeen zijn wapening en metalen insluitsels van nature beschermd in beton. Er zijn nochtans twee mechanismen die, in bepaalde omstandigheden, tot corrosie kunnen leiden:

- ▶ carbonatatie
- ▶ chloriden-aantasting.

Voor beide corrosie-mechanismen maakt men onderscheid tussen 2 fasen:

- ▶ fase 1: initiatie, waarvan het einde overeenkomt met de "depassivatie" van de wapening
- ▶ fase 2: propagatie, die overeenkomt met de eigenlijke corrosie van de wapening.

Corrosie van de wapening kan gedurende de ontwerp-levensduur van een bouwwerk vermeden worden door een goede kwaliteit en dikte van het dekkingsbeton. Het is eveneens mogelijk om wapeningsstaal met een verhoogde weerstand tegen corrosie te gebruiken indien extreem strenge eisen gerespecteerd dienen te worden.

Oorzaken

In niet-gecarbonateerd beton dat niet belast is met chloriden is wapeningsstaal op een duurzame manier beschermd tegen corrosie. De bescherming wordt gegarandeerd door de hoge alkaliniteit van de poriën-oplossing in de cementsteen, waarvan de pH-waarden zich situeren tussen 12,5 en 13,5 afhankelijk van het cementtype en de aanwezigheid van eventuele toevoegsels (bv. vlieg-as, silica fume).

De beschermende laag aan het oppervlak van het wapeningsstaal kan echter vernietigd worden door twee mechanismen: carbonatatie en chloriden-aantasting. De snelheid van depassivatie (fase 1) hangt vooral af van de dikte en de kwaliteit van de betondekking en van de omgevingsvoorwaarden.

Fig 4-3.1

Uitwendige tekenen van corrosie aan het betonoppervlak: roestsporen (foto links) en loskomen van beton ter hoogte van gecorrodeerde wapening (foto rechts).



4.3 Corrosie van de wapening

Corrosie door carbonatatie

Carbonatatie is de chemische reactie tussen het koolzuurgas CO_2 uit de lucht en het calciumhydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$ van de cementsteen. De carbonatatie begint aan het oppervlak van het beton en dringt vervolgens langzaam door in de diepte. De invloed ervan op het beton zelf is gunstig omdat het beton daardoor compacter wordt en de mechanische sterkte en de duurzaamheid toenemen. Carbonatatie werkt als een natuurlijke bescherming tegen de indringing van gasen of vloeistoffen. Ongewapend beton profiteert ten volle van de gunstige invloed van de carbonatatie.

In gewapend beton daarentegen kan de carbonatatie belangrijke schade toebrengen aan de structuur. De carbonatatie vermindert immers de hoge alkaliniteit van de poriënoplossing van de cementsteen, waardoor de pH van ± 13 (die de wapening beschermt) daalt naar een $\text{pH} < 9$. Zodra het "carbonatatiefront" de zone bereikt waar de wapening zich bevindt, hetgeen overeenkomt met het einde van fase 1 (depassivatie), kan deze beginnen roesten (fig 4.3.2).

De snelheid waarmee het carbonatatiefront binnendringt in het beton, is des te groter naarmate het beton poreuzer is. Het proces vertraagt geleidelijk in de loop van de tijd omdat de reeds gecarbonateerde laag de uitwisselingen met de buitenlucht afremt (fig 4.3.3). De carbonatatiesnelheid en -diepte worden evenwel beïnvloed door vele andere factoren, zoals het cementgehalte, de temperatuurschommelingen en de frequentie van de wisselingen tussen droge en natte toestand van het betonoppervlak.

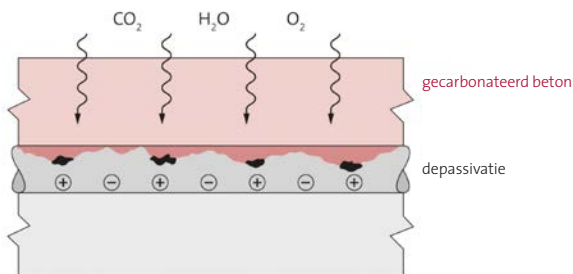


Fig 4.3.2
Corrosie ingeleid door carbonatatie

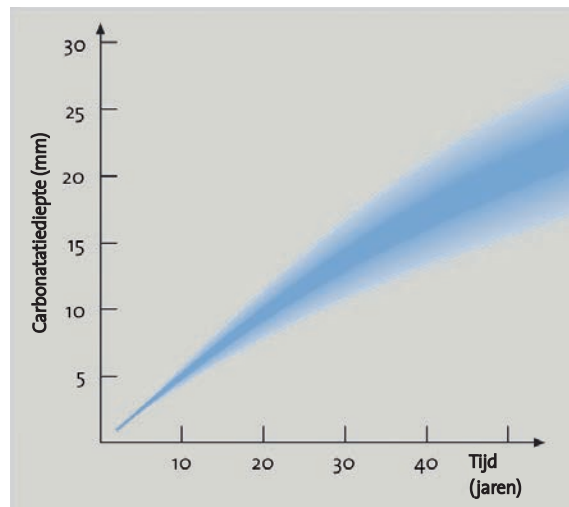


Fig 4.3.3
Het verband tussen de ouderdom van het beton en de carbonatatie diepte vertoont een grote spreiding als gevolg van de vele parameters die de carbonatatiesnelheid beïnvloeden

De corrosie van de wapening (fase 2) start zodra de volgende drie voorwaarden vervuld zijn :

- ▶ het carbonatatiefront heeft de wapening bereikt (depassivatie)
- ▶ beschikbaarheid van vocht
- ▶ beschikbaarheid van zuurstof.

In constructie-elementen die permanent verzadigd zijn met water of die volledig droog zijn is het risico op corrosie dus klein omdat hetzij zuurstof hetzij vocht ontbreekt. Omgekeerd verhogen alternerende periodes van droogte en vocht het risico op corrosie. De keuze van de omgevingsklasse EE (of milieuklassen XC) weerspiegelt o.a. deze invloed.

4.3 Corrosie van de wapening

Corrosie door chloriden

Als gevolg van de infiltratie van chloriden uit dooizouten, zeewater, chloorhoudend water, ... stijgt de concentratie van chloriden in het poriënwater van het beton. Wanneer ter plaatse van de wapeningen een "kritische concentratie" bereikt wordt, kan dit leiden tot een lokale depassivatie van het staaloppervlak, hetgeen overeenkomt met het einde van fase 1 (fig 4.3.4).

De propagatie (fase 2) zal afhangen van de gelijktijdige aanwezigheid van chloriden, water en zuurstof. De keuze van de omgevingsklasse ES (of milieuklassen XS of XD) weerspiegelt o.a. deze invloed.

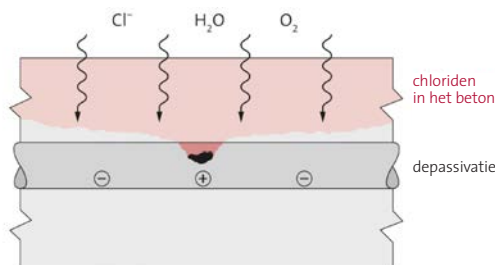


Fig 4.3.4
Corrosie
ingeleid door
chloriden



Fig 4.3.5
Schade door
gelijkmatige
wapenings-
corrosie als
gevolg van
carbonatatie

Uiterlijke verschijningsvormen

Betonoppervlak

Afhankelijk van zijn omvang kenmerkt corrosie van de wapening zich aan het oppervlak van beton door roestsporen of loslaten van dekkingsbeton (fig 4.3.1). Roestsporen zijn doorgaans de eerste zichtbare tekenen aan het betonoppervlak. De vorming van roest aan het oppervlak van de wapening gaat gepaard met een 2 à 3-voudige verhoging van het volume. De daaruit volgende druk leidt tot scheurvorming in het dekkingsbeton en, in een verder gevorderd stadium, tot het volledig loskomen van het dekkingsbeton. De wapeningsstaven hebben dan geen enkele bescherming meer en het gewapend beton begint zijn draagvermogen te verliezen.

Wapening

De wapening ondergaat een verlies van doorsnede door de corrosie. Dit heeft een direct effect op de structurele veiligheid van het constructie-element. Men onderscheidt de regelmatige corrosie van het oppervlak van de wapening bij carbonatatie (fig 4.3.5) van de plaatselijke corrosie ("putcorrosie") door de inwerking van chloriden. Het verlies van doorsnede bij putcorrosie is meestal veel meer uitgesproken en kritisch dan bij carbonatatie. De regelmatig verdeelde corrosie kenmerkt zich door afspringen van het dekkingsbeton, terwijl de putcorrosie zich vaak onopgemerkt voordoet omdat er weinig of geen uitwendige tekenen te zien zijn.

4.3 Corrosie van de wapening

Preventieve maatregelen

De maatregelen hebben tot doel te verzekeren dat de duur van fase 1 (initiatie) minstens de voorziene levensduur van het element (50 jaar in het kader van de norm NBN EN 206) overschrijdt.

Daartoe moet men:

- ▶ De wapeningen omhullen met voldoende dekking. In het algemeen bedraagt deze voor gebouwen 25 à 40 mm. De norm NBN EN 1992-1-1 (Eurocode 2) voor de berekening van constructies in beton legt de eisen voor de betondekking vast in functie van de milieuklasse en de structurele klasse. Daarbij moet bijzondere aandacht worden besteed aan de wapeningen achter groeven en valse voegen.
- ▶ De regels van de norm NBN EN 206 inzake samenstelling van beton respecteren.
- ▶ Het beton goed verdichten en nabehandelen zodat het oppervlak goed gehydrateerd wordt en de carbonatatiesnelheid vanaf het begin zo sterk mogelijk wordt afgeremd.
- ▶ Scheurvorming van het beton beperken. Scheuren met een opening groter dan 0,3 mm bevorderen immers de indringing van koolstofdioxide (CO_2), chloriden (Cl^-), water (H_2O) en zuurstof (O_2) tot bij de wapening.

Indien het beton wordt blootgesteld aan chloriden (zeewater, chloorhoudend water) verdient het aanbeveling een cement met hoog gehalte aan hoogovenslak (type CEM III/B 42,5) te gebruiken. De chloriden in oplossing worden immers (deels) gebonden door de hydratatieproducten van de hoogovenslak waardoor hun mobiliteit beperkt wordt.

De prestatie van een specifiek beton ten aanzien van de beide corrosie-mechanismen kan beoordeeld worden aan de hand van "prestatieproeven":

- ▶ bepaling van de weerstand tegen carbonatatie volgens NBN EN 13295 en NBN EN 14630 (fig 4.3.6)
- ▶ bepaling van de migratiecoëfficiënt van chloride-ionen volgens NT Build 492 (fig 4.3.7).



Fig 4.3.6

Visualisatie van het carbonatatiefront middels een test met fenolftaleïne. Het gecarbonateerd beton blijft grijs terwijl het niet-gecarbonateerd beton in het centrale deel, zeer alkalisch, door deze indicator rood-paars kleurt.

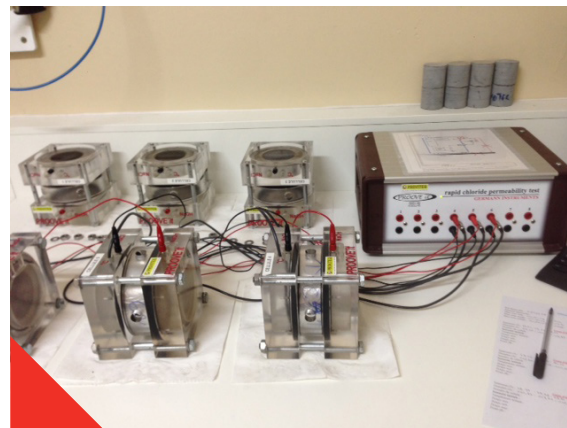


Fig 4.3.7

Uitrusting voor de versnelde bepaling van de migratiecoëfficiënt van chloride-ionen

4.4 Uitbloeiingen

Wat zijn uitbloeiingen ?

Uitbloeiingen zijn vlekken, meestal wit van kleur, die verschijnen aan het betonoppervlak. Ze worden veroorzaakt door bestanddelen die in water oplossen bij het mengen of bij de hydratatie van het cement en die zich, naarmate het beton droogt, afzetten op het oppervlak op de plaatsen waar het water verdampt.

De meest voorkomende uitbloeiingen worden veroorzaakt door calciumhydroxide (of kalkhydraat) dat vrijkomt tijdens de hydratatie van het cement. Men spreekt dan van kalkuitbloeiingen of kalkuitslag. Wanneer het water verdampt aan het oppervlak van het beton, laat het een rest van calciumhydroxide achter dat door het koolzuurgas (CO_2) van de lucht snel wordt omgevormd tot onoplosbaar calciumcarbonaat. Door herhaalde wisselingen van bevochtiging en uitdroging van het betonoppervlak kan deze afzetting voldoende dik worden om zichtbaar te zijn in de vorm van een witte sluier (fig 4.4.3).

Men maakt onderscheid tussen primaire en secundaire uitbloeiingen:

- ▶ Primaire uitbloeiingen treden op tijdens de aanvangsfase van de verharding van het beton, nog vóór het beton blootgesteld is aan wisselende weersomstandigheden.
- ▶ Secundaire uitbloeiingen treden op na de eerste verharding van het beton, ofwel als gevolg van de blootstelling aan regen ofwel als gevolg van de verdere hydratatie van het cement.

Gevolgen van uitbloeiingen

Uitbloeiingen hebben geen enkele invloed op de mechanische kenmerken van beton: geen vermindering van de mechanische sterkte of van de slijtvastheid, geen nadelig invloed op de vorstbestandheid of vorst-dooizoutbestandheid ...

Uitbloeiingen hebben in eerste instantie zeker een negatief effect op het uitzicht van beton, maar zij vervaagen of verdwijnen in de loop der jaren.

Wanneer worden kalkuitbloeiingen gevormd ?

De atmosferische omstandigheden waaraan het beton wordt onderworpen, spelen een belangrijke rol. Een afwisselend droge en vochtige omgeving van het jonge beton bevordert het verschijnen van kalkuitbloeiingen. In het algemeen worden uitbloeiingen vooral gevormd bij koud en vochtig weer (fig 4.4.1). Regen, sneeuw, mist en dauw bevorderen het optreden van uitbloeiingen.

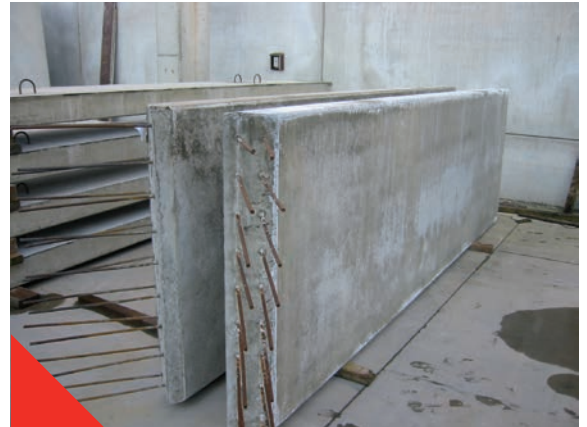


Fig 4.4.1

Uitbloeiingen op een betonelement
(algemeen beeld en detail)



4.4 Uitbloeiingen

Verwijderen van uitbloeiingen

Afzettingen van calciumcarbonaat vervagen of verdwijnen normaal in de loop van de tijd door de regen. Dit proces kan versneld worden door het oppervlak te behandelen met bijvoorbeeld een oplossing van zoutzuur (maximum 3%). Het is raadzaam om het betonoppervlak eerst te verzadigen met water zodat het zuur er niet in doordringt en alleen inwerkt op het oppervlak. Na de reactie moet overvloedig worden gespoeld met water om een latere inwerking van het zuur op het beton zelf te vermijden.

Preventieve maatregelen

Het is moeilijk om het risico op uitbloeiingen bij betonelementen, die onvermijdelijk blootgesteld zijn aan de weersomstandigheden, helemaal te vermijden. Toch kan dit risico tot een minimum beperkt worden met de volgende maatregelen:

- ▶ De hoeveelheid aanmaakwater verminderen (plastificeerders of superplastificeerders gebruiken) om een compact en weinig poreus beton te verkrijgen.
- ▶ Het jonge beton beschermen tegen regen en directe zon.
- ▶ Geprefabriceerde betonelementen bewaren in voldoende vochtige (maar niet verzadigde) omgeving, daarbij het ontstaan van condensatiewater vermijden. Betonproducten niet rechtstreeks tegen elkaar stapelen.
- ▶ Cement met toevoegsels (hoogovenslak, vliegas, ...) gebruiken die minder kalk produceert tijdens de hydratatie.
- ▶ Beschermende coatings of verven gebruiken. Deze maatregel vereist het advies van een specialist.

Het optreden van uitbloeiingen is een fenomeen dat afhangt van talrijke factoren, die moeilijk, soms zelfs helemaal niet, te beheersen zijn, omdat ze dikwijls verbonden zijn met het lokale microklimaat. Daarom moeten de maatregelen geval per geval bepaald worden en moeten er indien nodig proeven gedaan worden om de beste methode te weerhouden.



Fig 4.4.2
Uitbloeiingen op een betonnen muur die na ontkisting blootgesteld werd aan regen

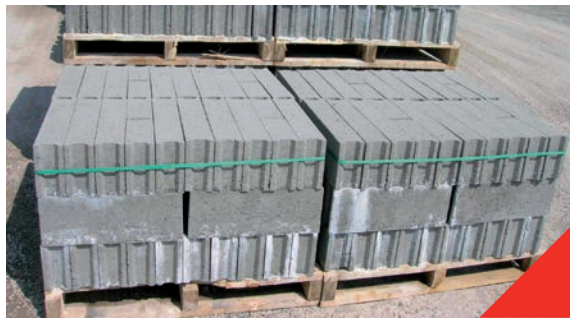


Fig 4.4.3
Uitbloeiingen op betonblokken onderworpen aan wisseling van droogte en vocht

4.5 Aantasting door vorst en doozouten

Aantasting door vorst

De aantasting van beton door de opeenvolging van vorst en dooi is hoofdzakelijk te wijten aan de transformatie in ijs van het water dat zich bevindt in de capillairen van de cementsteen of in de granulaten. Door de omzetting in ijs neemt het volume van water met ongeveer 10% toe. Deze volumetoename en de migratie van het nog niet bevroren water in de capillairen veroorzaken een aanzienlijke interne hydraulische druk. Indien de trekspanningen die daardoor ontstaan de treksterkte van het beton overschrijden ontstaat interne schade. De herhaalde opeenvolging van vorst-dooicycli veroorzaakt dan een zeer dicht netwerk van micro-scheurtjes in de oppervlaktelaag van het beton. Dit netwerk ontwikkelt zich min of meer snel tot een afschilferend oppervlak (fig 4.5.1).

Temperatuurdalingen van het beton onder het vriespunt van water zijn des te nadeliger wanneer ze snel en frequent optreden.

Fig 4.5.1

Het onderste deel van deze betonwand wordt alle dagen met water gereinigd. Vorst heeft afschilferingen van het oppervlak veroorzaakt



Fig 4.5.2

Afschilfering van een veiligheidsstootband in gewapend beton



Aantasting door doozouten

Schade aan beton veroorzaakt door doozouten (ook smeltmiddelen genoemd) kan verschillende oorzaken hebben:

- ▶ Waterverzadiging aan het oppervlak: de smeltmiddelen doen de sneeuw of het ijs smelten. Er ontstaat dus een laag water op het oppervlak dat het beton verzadigt. Er zijn daardoor geen "expansievaten" meer voor het opvangen van de zwelling wanneer het water opnieuw befrist.
- ▶ Thermische schok, veroorzaakt door deze middelen, in de bovenste lagen van het materiaal: het zout onttrekt aan het beton de warmte die nodig is om de sneeuw en het ijs te doen smelten. Zij veroorzaken daardoor een bruuske daling van de temperatuur in het betonoppervlak, waardoor hoge spanningen ontstaan tussen de oppervlaktelaag en de daaronder liggende lagen (waarvan de temperatuur niet gedaald is). Dit kan zeer snel leiden tot het afspatten of afschilferen van het oppervlak (fig 4.5.2).
- ▶ Osmotische druk: het water in het beton dat befrist is eigenlijk een zoutoplossing. Tijdens het befristen ontstaat er een scheiding in enerzijds ijs, met een lagere concentratie zout dan het oorspronkelijke water, en anderzijds een meer geconcentreerde zoutoplossing. Er ontstaat dan ook een flux om deze zoutconcentraties opnieuw in evenwicht te brengen. Deze flux veroorzaakt een druk in het materiaal die kan leiden tot scheuren of afschilferingen, afhankelijk van de diepte waarop deze druk plaatsvindt.
- ▶ Bevriezing in lagen: bij een welbepaalde temperatuur bevriezen de bovenste en onderste lagen onder de invloed van de koude. De tussenlaag met de grootste concentratie aan chloorzouten bevriest niet. Indien de temperatuur nog verder daalt, begint ook deze laag te bevriezen. Het bevrizende water heeft geen mogelijkheid meer om vrij uit te zetten en duwt de bovenste laag omhoog.



De aantasting door doozouten is gevaarlijker dan deze door vorst alleen, maar is wel beperkter in omvang: alleen de oppervlakken die in contact komen met de doozouten (direct of meegevoerd) lopen gevaar.

4.5 Aantasting door vorst en dooizouten

Bijkomende effecten van dooizouten

Demeestgebruikte dooizouten zijn calcium- of natriumchloride. Eens opgelost in het gesmolten ijs of de gesmolten sneeuw, dringen deze chloriden binnen in het beton over een diepte die afhankelijk is van de porositeit van het beton. Zodra de chloriden de wapening bereiken, zelfs alleen maar plaatselijk (bijvoorbeeld ter hoogte van een scheur), vormen ze een ernstig risico op corrosie (zie hoofdstuk 4.3).

Bovendien kunnen de zouten alkaliën bevatten. Hiermee dient men rekening te houden bij het beoordelen van het risico op alkali-silica reactie (zie hoofdstuk 4.9).

Gebruik van luchtbelvormers

Wanneer beton bevriest, is de belangrijkste parameter de afstand die het water door de capillairen moet afleggen om een plek te vinden waar het onbelemmerd kan uitzetten.

Het inbrengen van minuscule luchtbelletjes vermindert deze afstand. Daartoe wordt aan het beton een luchtbelvormer toegevoegd bij het mengen. De doeltreffendheid van luchtbelvormers wordt bepaald door het vermogen om, voor een gegeven volume lucht, vele kleine belletjes te vormen.

De ruimtelijke verdeling van de luchtbelletjes wordt gekenmerkt door de "afstandsfactor" (ook "spacing factor" genoemd in het Engels). Dit is de gemiddelde halve afstand tussen twee luchtbelletjes. Een waarde lager dan 200 µm is doorgaans voldoende om het beton vorstbestand te maken. De beoordeling van de verdeling van de luchtbelletjes en de bepaling van de afstandsfactor gebeurt door beeldanalyse van slijpplaatjes uit het verhard beton (fig 4.5.3. en 4.5.4).

De verhoging van het luchtgehalte veroorzaakt wel een daling van de druksterkte van het beton: elke extra % ingebrachte lucht boven 2% leidt tot een daling van 5% van de druksterkte na 28 dagen.

Deze daling kan opgevangen worden door cement te gebruiken van een hogere sterkteklasse of door de W/C-factor te verminderen. Per percent ingebrachte lucht kan immers ongeveer 5 liter aanmaakwater per m³ beton bespaard worden, zonder negatieve invloed op de verwerkbaarheid.

Bij het aanmaken en verwerken van beton met ingebrachte lucht wordt best bijzondere aandacht geschonken aan volgende punten:

- ▶ precieze dosering van de luchtbelvormende hulpstof (zeer kleine hoeveelheden)
- ▶ consistentie van beton
- ▶ duur en intensiteit van het mengen
- ▶ bij verpompen: type betonpomp en pompdruk
- ▶ verdichtingmethode en -duur (de luchtbelletjes mogen niet vernietigd worden).

Bovendien moet met behulp van voorafgaande proeven bepaald worden of het beton met ingebrachte lucht geschikt is voor gebruik en moet dit verder worden gecontroleerd tijdens de uitvoering.

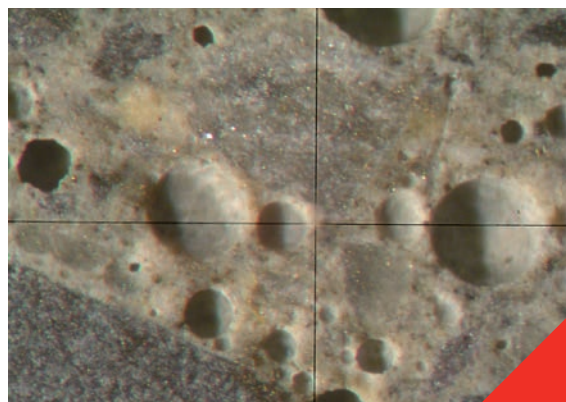


Fig 4-5-3
Goede verdeling van micro-luchtbelletjes in beton met luchtbelvormer (vergroting 100x)

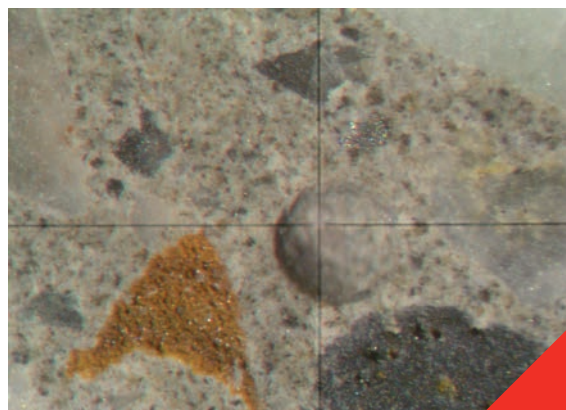


Fig 4-5-4
Slechte verdeling van micro-luchtbelletjes in beton met luchtbelvormer (vergroting 100x)

4.5 Aantasting door vorst en dooizouten

Samenstelling van beton dat blootgesteld is aan vorst en dooizouten

Preventieve maatregelen

Het basisprincipe voor beton dat bestand moet zijn tegen vorst, is het volgende: het beton bezit voldoende mechanische sterkte, is voldoende dicht om te verhinderen dat er water binnendringt, en heeft een fijn verdeeld netwerk van luchtbelletjes. In de praktijk betekent dit:

- ▶ hoog cementgehalte
- ▶ lage W/C
- ▶ ingebrachte lucht (luchtbelvormer)
- ▶ gebruik van vorstbestendige granulaten.

De minimale eisen voor de betonsamenstelling worden opgelegd door de norm NBN B15-001 (omgevingsklassen EE2, EE3 of EE4 ; in zeeomgeving ES2 of ES4). Het gebruik van luchtbelvormer dient expliciet voorgescreven te worden.

Om beton te bekomen dat bestand is tegen dooizouten moet de huid van het beton, die als eerste aangeast zal worden door de zouten, met zorg behandeld worden. Dit wil zeggen:

- ▶ bijzondere aandacht voor nabehandeling
- ▶ bleeding en afscheiding van cementpap vermijden.

Voor de afwerking van betonoppervlakken onderworpen aan dooizouten worden best de aanbevelingen van hoofdstuk 3.1 gevolgd (bv. borstelen). Minder belaste oppervlakken kunnen gespaand worden om de betonhuid goed te sluiten. Een te intensieve bewerking (bv. polieren) moet vermeden worden omdat deze cementpap naar het oppervlak brengt.



Fig 4-5-5
Controle van het luchtgehalte met de luchtmetertje

Wegenbeton

Het spreekt voor zich dat de weerstand tegen vorst en dooizouten van het grootste belang is voor betonwegen. Daarom voorzien de standaardbestekken van de regionale wegenadministraties (Standaardbestek 250 in Vlaanderen, Qualiroutes in Wallonië en Typebestek van het Brussels Hoofdstedelijk Gewest) bijkomende eisen voor de samenstelling en de prestaties van het verhard beton, met name voor wat de wateropslorping en de afschilfering betreft.

Nazicht door proeven

De weerstand van beton tegen vorst kan worden nagegaan via de proef voor "interne vorst" (CEN/TR 15177, fig 4.5.6) en de "afschilferingsproef" in aanwezigheid van dooizout (CEN/TS 12390-9, fig 4.5.7). De bepaling van de wateropslorping door onderdompeling (WAI, voor "Water Absorption by Immersion" volgens NBN B15-215) is een goede algemene indicator van de duurzaamheid.



Fig 4-5-6
Proef voor de bepaling van de vorstweerstand



Fig 4-5-7
Proefstukken na de afschilferingsproef

4.6 Externe sulfaataantasting

Aantasting door externe sulfaten

Sulfaathoudend (of gipshoudend) water en sulfaatrijke gronden tasten verhard beton aan. Door de reactie tussen de in het poriënwater opgeloste sulfaten en het tricalcium-aluminaat (in originele of gehydrateerde vorm) van het cement wordt een expansief product gevormd dat ettringiet (of Candlot-zout) wordt genoemd.

Doorgaans beschouwt men de omgeving in contact met het beton potentieel agressief vanaf 600 mg/l sulfaten in geval van water of 3 000 mg/kg in geval van grond (omgevingsklassen EA2 of EA3).

Risico's en schade door externe sulfaten

Bovengronds kunnen goten en reservoirs (stockage/zuivering) voor huishoudelijk en/of industrieel afvalwater een risico vormen, wanneer deze sulfaten in oplossing bevatten.

Sulfaataantasting kenmerkt zich door een uitzetting van het beton en een sterke scheurvorming (fig 4.6.1). De aantasting verloopt evenwel relatief langzaam, zodat tijdelijke constructies geen specifieke maatregelen vragen.

Het risico bestaat ook in de ondergrond, bij aanwezigheid van sulfaathoudende mineralen zoals gips en anhydriet (calciumsulfaten). Zelfs wanneer deze verwijderd zijn dient men er rekening mee te houden. Het grondwater kan de sulfaten immers oplossen en ze over grote afstanden meevoeren. Sulfaataantasting bedreigt dus vooral ingegraven (delen van) bouwwerken.

Preventieve maatregelen

Wanneer betonelementen in contact zijn of kunnen komen met sulfaten opgelost in water of aanwezig in de bodem, moet men de volgende voorzorgsmaatregelen nemen:

- ▶ Cement met hoge bestandheid tegen sulfaten (HSR) gebruiken, overeenkomstig de norm NBN B12-108:
 - cement CEM I SR
 - cement dat meer dan 65% hoogovenslak bevat (CEM III/B SR en CEM III/C SR)
 - cement CEM V/A HSR.
- ▶ Alleen zeer compact beton, dus met een lage porositeit, gebruiken.
- ▶ De W/C-factor beperken in overeenstemming met de gekozen omgevingsklasse.
- ▶ Rekening houden met het feit dat het sulfaathoudend water door capillaire opzuiging redelijk hoog kan opstijgen in de structuur.



Fig 4.6.1
Sterke uitzetting van mortelprisma's onderworpen aan een sulfaatbestandheidsproef

4.7 Interne sulfaataantasting

Interne sulfaataantasting

De interne sulfaataantasting, ook DEF genoemd (Delayed Ettringite Formation) is een reactie die onder bepaalde omstandigheden ontstaat tussen in het beton aanwezige sulfaten en aluminaten. Daarbij is de aanwezigheid van water noodzakelijk.

Dit fenomeen vereist het gelijktijdig samengaan van verschillende voorwaarden: hoge temperatuur tijdens de verharding (inclusief duurtijd), samenstelling van het cement, aanwezigheid van water aan het oppervlak van het beton. De "overtollige" sulfaten zijn voornamelijk afkomstig van de ontbinding, bij hoge temperatuur, van primair ettringiet (tri-sulfoaluminaat), gevormd tijdens de hydratatie van het cement, tot mono-sulfoaluminaat.

Bij aanwezigheid van water, zal enkele weken tot enkele jaren na de verharding van het beton het overtollige sulfaat reageren met de aluminaten om zogenaamd secundair ettringiet te vormen. Ettringiet heeft de eigenschap te zwellen. Het primair ettringiet, dat zich vormt tijdens de hydratatie van het cement, heeft de ruimte om te zwellen aangezien het zich ontwikkelt op het ogenblik dat het materiaal nog niet verhard is. Het secundair ettringiet daarentegen vormt zich wanneer het materiaal reeds verhard is. Het heeft dus geen ruimte om ongehindert te zwellen en de ontwikkeling ervan gaat gepaard met een expansie van het beton en met scheurvorming (fig 4.7.1).



Fig 4.7.1

Massieve brugpijler aangetast door interne sulfaataantasting. Het beton onderging een temperatuur van 80°C gedurende meer dan 200 uur.

Preventie

De beste maatregel bestaat erin om de temperatuur in de kern van het beton tijdens de verharding te beperken tot 65°C. Aangezien dergelijke hoge betontemperaturen tijdens de verharding nadelig zijn voor de sterkte op lange termijn en bovendien thermische krimp en dus risico op scheurvorming veroorzaken, heeft deze maatregel eveneens een gunstige invloed op de intrinsieke betonkwaliteit. Constructieve schikkingen om stagnatie van water op het betonoppervlak te vermijden vormen eveneens een middel om DEF tegen te gaan.

Middelen om de betontemperatuur te beheersen tijdens de verharding

Er bestaan verschillende middelen om de betontemperatuur van massieve elementen te verlagen tijdens de verharding:

- ▶ cement met lage hydratatiwarmte gebruiken, zoals bijvoorbeeld hoogovencement
- ▶ bij voorkeur niet-isulerende bekistingen gebruiken (wel opletten want nadelig voor de thermische krimp)
- ▶ het aanmaakwater afkoelen of de granulaten in de zomer besproeien
- ▶ een actief koelsysteem installeren (door circulatie van koud water)
- ▶ betonneren van massieve elementen bij warm weer vermijden.

4.8 Chemische aantasting

Twee aantastingsmechanismen door chemische producten

Bij blootstelling aan chemische producten kan beton ofwel bestand zijn, ofwel min of meer snel aangetast geraken. Indien aantasting optreedt, gebeurt dit in grote lijnen volgens twee mechanismen.

Chemische erosie

Aantasting van beton door chemische erosie treedt op wanneer één of meerdere van de bestanddelen van de cementsteen opgelost wordt door de externe chemische stof (fig 4.8.1 tot 4.8.3). Hierop volgt een uitloging van het opgeloste bestanddeel: het beton wordt alsmaar poreuzer, verliest materiaal en tegelijkertijd zijn rol als bescherming van de wapening.

Dit proces begint altijd vanaf het oppervlak dat in contact komt met de chemische stof en het zet zich progressief (meestal langzaam) voort in het beton.

Zwelling

Bij swelling treedt een reactie op tussen de chemische stof die het beton is binnengedrongen via het oppervlak, een bestanddeel van de cementsteen, en het capillair water. Indien het reactieproduct een volume inneemt dat groter is dan dit van de oorspronkelijke bestanddelen, veroorzaakt de reactie interne spanningen die kunnen leiden tot een uitzetting van de massa en een langzame, maar uitgesproken scheurvorming. Deze kan optreden tot op een bepaalde afstand van het punt waar de agressieve stof is binnengedrongen.

Preventieve maatregelen

Voor de bescherming van beton tegen chemische aantasting zijn de volgende maatregelen nodig:

- ▶ correcte keuze van het cement en een aangepast cementgehalte
- ▶ compact beton met een lage porositeit aanwenden, en een lage W/C-factor $\leq 0,50$
- ▶ voldoende betondekking op de wapening voorzien (desgevallend met een extra dikte die kan "opgeofferd" worden)
- ▶ het beton zorgvuldig nabehandelen
- ▶ de betreffende normen en aanbevelingen toepassen.

Het cementtype CEM III wordt in het algemeen aanbevolen voor alle gevallen waar constructie-elementen beschermd moeten worden tegen chemische aantasting (zuren, zouten of sulfaten).

Bij aantasting door sulfaten in oplossing moeten de voormelde maatregelen gecombineerd worden met het gebruik van een cement met hoge bestandheid tegen sulfaten. Er kan geopteerd worden voor HSR-cementen van het type CEM I, CEM III of CEM V (zie ook hoofdstuk 4.6).

In het geval van zeer specifieke aantastingen of zeer hoge concentraties aan agressieve stoffen (zie NBN EN 206), moeten de voormelde maatregelen worden aangevuld met het aanbrengen van een speciaal daarvoor voorziene oppervlaktelaag (op basis van synthetisch hars, keramische materialen, ...). In geval van twijfel, wordt aangeraden het advies van een specialist in te winnen.

Voorbeelden van beton onderworpen aan een zuuraantasting



Fig 4.8.1
Goed bestand



Fig 4.8.2
Slecht bestand beton - siliciumhoudende granulaten



Fig 4.8.3
Slecht bestand beton - kalksteenhoudende granulaten

4.8 Chemische aantasting

Effect van enkele chemische stoffen op beton

Tabel 4.8.1 geeft een overzicht van de impact van verschillende chemische (of natuurlijke) stoffen wanneer deze langdurig in contact komen met beton.

Het effect zal des te groter zijn naarmate de concentratie of de verversingsgraad hoger is.

Chemische stoffen	Gedrag van het beton			Gedrag van gewapend beton
	Geen aantasting	Aantasting door chemische erosie	Aantasting door zwelling	Aantasting door corrosie van de wapening
Basen	●			
Zuren		◆		■
Zouten in oplossing (magnesium en ammonium)		◆		
Regenwater Gedistilleerd water Gedemineraliseerd water		◆		■
Olie, vetten	●			
Sulfaten in oplossing			◆	■
Chloriden in oplossing	●			◆
Koolzuurgas (CO ₂)	●			■

● Geen aantasting
 ◆ Directe aantasting
 ■ Corrosie tengevolge van de aantasting van het omhullingsbeton of door sterke carbonatatie

Tab 4.8.1
Effect van enkele chemische stoffen op beton

4.9 Alkali-silica reactie

Inleiding

Men noemt Alkali-Silica Reactie (ASR) de reactie tussen het reactief silicium aanwezig in bepaalde granulaten en de alkaliën aanwezig in het poriënwater van het beton. Een noodzakelijke voorwaarde voor het optreden van deze reactie is de gelijktijdige aanwezigheid van een potentieel reactief granulaat, een voldoende hoog alkali-gehalte en een voldoende hoge vochtigheid in het beton (fig 4.9.1).

Reactieve granulaten

De oplosbaarheid van het silicium is afhankelijk van zijn kristalstructuur: amorf silicium (bv. opaal, silex, silicificatie van kalksteen en zandsteen) gaat gemakkelijker in oplossing dan silicium in een kristallijne structuur (kwarts) of in een min of meer ordelijke vorm (bv. gneiss, zandsteen). Binnen de reactieve gesteenten kan de snelheid van optreden van de reactie en de ernst van de potentiële schade sterk variëren.

Alkaliën

De alkaliën (natrium en kalium) in oplossing in het poriënsysteem van beton zijn voornamelijk afkomstig van cement en toevoegsels. Het gehalte aan alkaliën wordt op een vereenvoudigde manier uitgedrukt als het Na_2O -equivalent ($\text{Na}_2\text{O-eq} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$). De alkaliën die deelnemen aan de reactie worden actieve alkaliën genoemd.

Vochtigheid

De ontwikkeling van ASR hangt vooral af van de vochtigheid die heerst in en om het bouwwerk. De reactie gaat voort zolang een minimale vochtigheid en een voldoende gehalte aan alkaliën aanwezig zijn. De minimale vereiste vochtigheid is afhankelijk van het gehalte aan alkaliën in het poriënwater maar situeert zich rond 70 à 80% relatieve vochtigheid in het beton. In massieve betonconstructies (dikte > 50–60 cm), die nooit helemaal uildrogen, is de interne vochtigheid voldoende hoog voor de ontwikkeling van ASR.

Infiltratie van water in het beton, versterkt door scheuren als gevolg van krimp, vorst of wapeningscorrosie, bevordert de ontwikkeling van ASR in het beton.

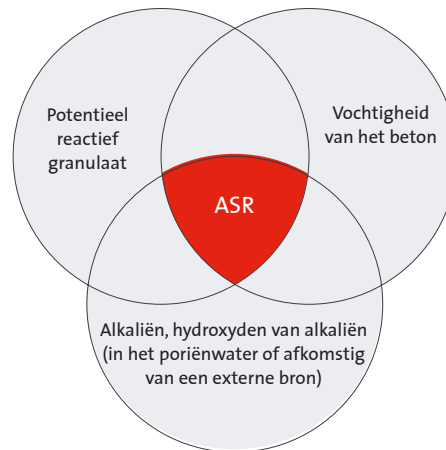


Fig 4.9.1

Schematische voorstelling van de noodzakelijke voorwaarden voor het optreden van ASR

Schadebeeld

In het algemeen kan men scheurvorming in een karakteristiek patroon, vergezeld van uitscheiding van gel (zie verder) in diverse kleuren (donkergrijs, geel-bruinachtig) waarnemen. Een bijzondere expertise is nochtans nodig om de aanwezigheid van ASR te beoordelen alsook om zichtbare schade er aan toe te wijzen.

ASR kan leiden tot een geleidelijke aftakeling van het beton door de ontwikkeling van een dicht netwerk van scheuren met grote opening en met laterale verplaatsingen (fig 4.9.2).

ASR veroorzaakt een verspreide verdeling van schade in het constructie-element. Naast een verlies van mechanische sterkte neemt ook het risico op schade als gevolg van vorst of wapeningscorrosie toe. De geschiktheid voor gebruik komt in het gedrang wanneer de vervormingen de goede werking verhinderen.



Fig 4.9.2

Kunstwerk aangetast door alkali-silica reactie

4.9 Alkali-silica reactie

Oorzaken

De snelheid waarmee ASR-schade zich ontwikkelt is sterk afhankelijk van de betonkwaliteit, de gebruikte granulaten, de blootstelling van het constructie-element (vooral de vochtigheid en eventuele temperatuurcycli), de wapening, ... Hoe hoger het gehalte aan alkaliën in de poriënoplossing, hoe groter het gehalte aan hydroxyde-ionen. Deze hydroxyde-ionen werken in op het aanwezige silicium in de granulaten waarbij een gel van gehydrateerde alkali-silicaten en calcium wordt gevormd, doorgaans kortweg "gel" genoemd (fig 4.9.3).

De gel kan grote hoeveelheden water absorberen en de bijgaande expansie creëert een interne druk in het betonelement. Zodra deze de treksterkte van het granulaat overschrijdt, worden scheuren gevormd die vertrekken vanuit het granulaat. Aan het betonoppervlak manifesteren deze scheuren zich als een netwerk. De scheurvorming tast de integriteit van de granulaten en de cementsteen aan en verzwakt zo de structuur van het beton waardoor de mechanische weerstand sterk afneemt (fig 4.9.4).

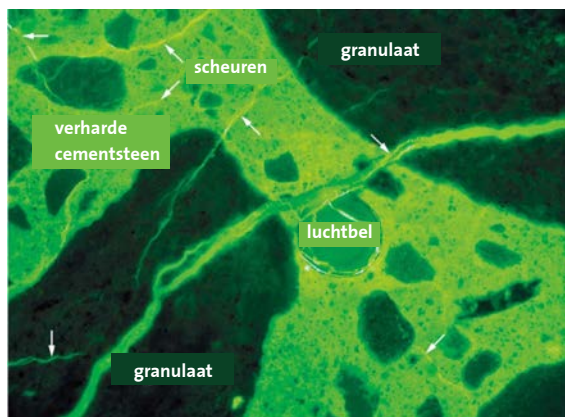


Fig 4.9.3
Aangetast beton met afzetting van ASR-gel in scheuren en een luchtbel (foto: UV-licht)

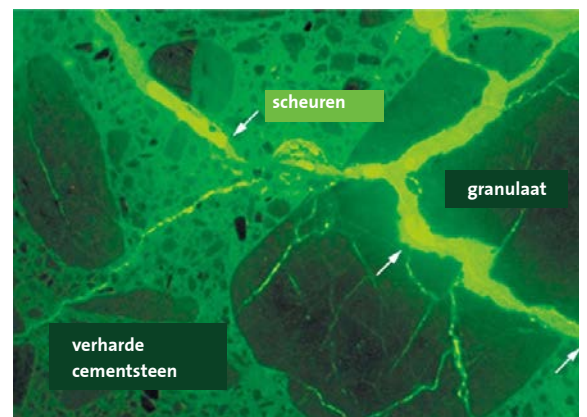


Fig 4.9.4
Typische scheurvorming doorheen een granulaat en de cementsteen als gevolg van ASR (foto: UV-licht)

4.9 Alkali-silica reactie

Preventieve maatregelen:

De betonnormen en in het bijzonder bijlage I van de norm NBN B15-001 bevatten de toe te passen maatregelen om het risico op de ontwikkeling van ASR te voorkomen. Minstens één van de volgende 4 maatregelen dient toegepast te worden:

- ▶ Niet-reactieve granulaten gebruiken voor het geheel van het inert skelet.
- ▶ Een LA-cement (Low Alkali) gebruiken overeenkomstig de norm NBN B12-109.
- ▶ Een alkalibalans van de betonsamenstelling opmaken gebaseerd op de maximale waarden (statistisch of absoluut) van alle bestanddelen. De toelaatbare grenswaarde voor het Na_2O -equivalent (kg/m^3) is afhankelijk van het gebruikte cementtype (tab 4.9.1). De norm bevat gelijkaardige tabellen voor combinaties cement-toevoegsel of voor mengsels van cement.
- ▶ Een betonsamenstelling gebruiken die voldoet aan een zwelproef.

Het vermijden van de externe aanvoer van water door geschikte ontwerpkeuzes (vormen die de evacuatie van water vergemakkelijken, betrouwbare en inspecteerbare waterdichtingen, ...) is eveneens een zéér efficiënte maatregel. Het is echter niet altijd eenvoudig om het blijvend karakter van dergelijke maatregelen te garanderen.

Keuze van het cement

Zoals blijkt uit tabel 4.9.1 vormt het gebruik van hoogovencement een interessante preventiemaatregel. De hydratatiereacties in deze cementtypes zijn voordelig aangezien deze de alkaliën fixeren.

Cement		Grenswaarden voor de alkalibalans van beton (kg/m^3)
CEM I CEM II		3,5
CEM III/A	$S^a) < 50\%$	5,0
	$S^a) \geq 50\%$	6,0
CEM III/B		7,0
CEM III/C		10,0
CEM V/A		8,0

^{a)} S is het slakgehalte van het cement in % ten opzichte van de som van de hoofd- en nevenbestanddelen

Tab 4.9.1

Grenswaarden voor de alkalibalans in functie van het cementtype

4.10 Brandweerstand

Beton en vuur

Zelfs wanneer beton aan zeer hoge temperaturen onderworpen wordt, brandt het niet en komen er geen toxische rook of gassen vrij. In tegenstelling tot andere constructiematerialen verhindert beton de verspreiding van vuur en bij brand stijgt de temperatuur van het beton slechts heel langzaam. Beton is dus een uitstekende barrière tegen brand zonder dat er een bijkomende bescherming voorzien moet worden. Enkel bij een intense en langdurige blootstelling wordt het afspatten van het beton ter hoogte van de wapeningen waargenomen (fig 4.10.1).

Het verzekeren van de brandweerstand van betonstructuren houdt verband met de robuustheid ervan, met name het goede ontwerp van de verbindingen als ook de continuïteit en de dekking van de wapeningen.

Kritieke temperatuur

Met of zonder wapening kan beton zonder schade temperaturen verdragen tot 300°C. Deze zogenaamd "kritieke" temperatuur wordt pas erg langzaam bereikt in contact met brand. Proeven hebben aangetoond dat wanneer het betonoppervlak wordt blootgesteld aan een vlam van 1 000°C (hetgeen overeenstemt met een intens houtvuur of een gasbrander), men een uur moet wachten vooraleer de kritieke temperatuur een diepte van 2 cm in het beton bereikt, en nog eens een uur vooraleer deze een diepte van 5 cm bereikt.



Fig 4.10.1
Blootgestelde wapening door het afspatten van de betondekking bij een brand



Fig 4.10.2
Dankzij een brandmuur in beton werd een gebouw gespaard

Bijkomende beschermende maatregelen voor bijzondere gevallen

Beton vormt op zichzelf een uitstekende bescherming tegen brand en hoge temperaturen. Indien nodig kan men deze bescherming nog verhogen door de betondekking op de wapening te verhogen.

Bij uitzonderlijk brandrisico, zeer hoge thermische belasting of bedrijfstemperatuur, kan men nog bijkomende maatregelen nemen om de thermische bestandheid van beton nog aanzienlijk te verbeteren, zoals bijvoorbeeld:

- ▶ Gecarbonateerde of kiezelhoudende granulaten (zoals kalksteen en zandsteen bijvoorbeeld) vervangen door granulaten die bestand zijn tegen vuur, zoals basalt, geëxpandeerde klei, baksteen, ...
- ▶ Een keramische stabilisator toevoegen (bijvoorbeeld poeder van dakpannen) in het geval van zeer hoge bedrijfstemperatuur.
- ▶ Kunststofvezels aan het beton toevoegen die smelten bij hoge temperatuur en zo micro-kanalen achterlaten waarlangs het poriënwater kan worden afgevoerd zonder overdruk te veroorzaken, zodat het afspatten van het dekkingsbeton vermeden wordt.

Na de brand

Bouwwerken die een brand hebben meegemaakt moeten visueel worden geïnspecteerd en vergeleken met gelijkaardige gevallen. Alle betonelementen die werden blootgesteld aan temperaturen boven 300°C, moeten grondig onderzocht worden om na te gaan welke beschadigde lagen vervangen moeten worden.

Voor beton dat enkel werd blootgesteld aan temperaturen lager dan 300°C, volstaat dikwijls een eenvoudige reiniging.

De snelheid van herstellen is een belangrijke factor om het exploitatieverlies na een grote brand te beperken.

Om economische redenen heeft herstellen de voorkeur boven afbraak en wederopbouw.

4.11 Benaderingen van de duurzaamheid van beton

Inleiding

Duurzaamheid kan in het algemeen gedefinieerd worden als de geschiktheid van een goed om zijn functies te vervullen totdat een bepaalde grenstoestand bereikt wordt.

Voor beton zijn de criteria voor duurzaamheid lange tijd verbonden geweest aan de mechanische prestaties op 28 dagen alsook het gedrag in gebruik.

Nochtans verouderen constructies ook onder invloed van de acties die de omgeving, waarin ze zich bevinden, uitoefenen. De constructie en de gebruikte materialen moeten dus aangepast zijn aan hun omgeving. Het klimaat, de agressiviteit van water, grond en lucht zijn parameters die vanaf het ontwerp van een betonconstructie in rekening moeten gebracht worden opdat deze de gepaste fysische en chemische eigenschappen zou bezitten om hieraan te weerstaan.

Hoe belangrijker het bouwwerk hoe beter de duurzaamheid ervan dient verzekerd te worden, enerzijds om zijn functionaliteit te blijven behouden en anderzijds om de "return on investment" te optimaliseren. De duurzaamheid, of levensduur, van constructief beton kan dus gedefinieerd worden als de tijd gedurende welke het bouwwerk geen grondige onderhoudswerken moet ondergaan.

Verschillende benaderingen

De norm NBN EN 206 voorziet verschillende benaderingen om het duurzaamheidsaspect van beton te beschouwen:

- ▶ de prescriptieve (voorgeschreven) benadering
- ▶ de concepten voor gelijkwaardige prestatie
- ▶ de prestatiegerichte benadering.

Prescriptieve benadering

Deze benadering, veruit de meest gebruikelijke, beoogt een levensduur van 50 jaar. De eisen worden voornamelijk in termen van middelen uitgedrukt (aard en gehalte van de bestanddelen). De eisen zijn opgenomen in de norm NBN EN 206 en zijn nationale aanvulling NBN B15-001. Er is dus geen rechtstreeks verband met de verschillende aantastingsmechanismen van beton. Deze benadering steunt eveneens op de principes van het ontwerp van betonconstructies, zoals opgenomen in de norm voor het berekenen van betonconstructies Eurocode 2 (die de regels voor de betondekking bevat), en van de uitvoering van betonconstructies NBN EN 13670 en zijn nationale aanvulling NBN B15-400.

Concepten voor de gelijkwaardige prestaties

De concepten voor de gelijkwaardige prestaties van beton (in het Engels ECPC voor Equivalent Concrete Performance Concept en EPCC voor Equivalent Performance of Combinations Concept) zijn eveneens opgenomen in de norm NBN EN 206.

Zij maken het mogelijk om aanpassingen te doen aan de eisen van de prescriptieve benadering voor wat het minimale cementgehalte en de maximale water-cement-factor betreft. Dit kan op voorwaarde dat wordt aangetoond dat het voorgestelde beton gelijkwaardige prestaties vertoont als een referentiebeton. Deze gelijkwaardigheid geldt in het bijzonder voor het gedrag ten aanzien van de duurzaamheid.

In België zijn de concepten van de gelijkwaardige prestaties voor een aantal toepassingen uitgewerkt in de norm NBN B15-100. Hoofdstuk 7 van deze norm beschrijft de methode volgens dewelke een beton met een bepaald(e) bindmiddel(combinatie) kan worden vergeleken met een referentiebeton dat voldoet aan alle eisen volgens de prescriptieve benadering voor de gekozen toepassing.

4.11 Benaderingen van de duurzaamheid van beton

Prestatiegerichte benadering

Deze benadering (in het Engels PSC of PBS voor Performance-Based Specification of concrete) formuleert de eisen qua duurzaamheid in termen van resultaten en dus prestaties. Het gaat om voorspellingen die via proeven en modellen gemaakt worden van de duurzaamheid van betonconstructies. Deze zijn gebaseerd ofwel op "directe bepaling" van de prestaties in relatie tot een aantastingsmechanisme ofwel op "indirecte" duurzaamheidsindicatoren.

Dergelijke benadering kan gebruikt worden voor het ontwerp alleen, maar ook voor de conformiteitscontrole tijdens de uitvoering.

De prestatiegerichte benadering wordt voornamelijk gebruikt in die gevallen waar de verwachte levensduur hoger is dan 50 jaar. De betonnormen NBN EN 1992-1-1 (Eurocode 2) en NBN EN 206 voorzien de mogelijkheid om gebruik te maken van dergelijke methodes. Echter, er bestaan op dit moment op Europees niveau nog geen geharmoniseerde regels voor de directe bepaling van de prestaties noch voor de duurzaamheidsindicatoren (keuze van de indicatoren, proefmethodes, criteria).

Ook in België bestaat nog geen referentiedocument voor de toepassing van de prestatiegerichte benadering. In die gevallen waar de opgelegde levensduur groter is dan 50 jaar, inspireren de ontwerpers zich doorgaans op prenormatieve documenten zoals fib34 of benaderingen die in andere landen worden gebruikt (in het bijzonder in Frankrijk is men ver gevorderd met een dergelijke benadering).

De eerste toepassing in Europa van de prestatiegerichte benadering dateert van 1995 voor het beton voor de Vasco da Gama brug in Lissabon, met het oog op een contractuele levensduur van 120 jaar.

Vooruitzichten

De toepassing van de concepten voor de gelijkwaardige prestaties en de prestatiegerichte benadering opent de deur voor nieuwe ontwikkelingen rond het materiaal beton en vormen in dit opzicht een opportuniteit voor de betonwereld.

Vooral de toepassing van de prestatiegerichte benadering leidt tot meer technische betons. De uitvoering van de studies voor de betonsamenstelling en de voorbereiding van de werven vragen veel tijd, die in de planning van de projecten moet voorzien worden (bepaalde duurzaamheidsproeven duren tot 6 maanden). De vervaardiging van deze betons vraagt om goed opgeleid personeel en performante productie-installaties, voornamelijk op het vlak van betrouwbaarheid en doseerprecisie.

De kosten van beton in een prestatiegerichte benadering zijn doorgaans hoger, maar daartegenover staat een lagere onderhoudskost en een langere levensduur van de bouwwerken voor de opdrachtgever.

Veiligheid - Duurzame ontwikkeling

5.1

Beton en duurzame ontwikkeling

5.2

Gezondheid en veiligheid



5.1 Beton en duurzame ontwikkeling

De definitie van duurzame ontwikkeling gaat terug naar het rapport "Our Common Future" van de Verenigde Naties in 1987 (Brundtland rapport): "*Duurzame ontwikkeling is de ontwikkeling die aansluit op de behoeften van het heden zonder het vermogen van de toekomstige generaties om in hun eigen behoeften te voorzien in gevaar te brengen*".

Duurzaam bouwen is dan uiteraard de toepassing van deze principes op bouwwerken en het bouwproces. Men onderscheidt bij duurzame ontwikkeling 3 componenten, die met elkaar in balans moeten zijn:

- ▶ Economische component ("profit"): de focus op duurzaamheid moet enerzijds financieel haalbaar zijn; anderzijds biedt de aandacht voor bv. duurzaam bouwen ook veel nieuwe zakelijke opportuniteiten; men spreekt nu meer van "prosperity" om naast de economische winst ook de maatschappelijke winst in de afwegingen te betrekken.
- ▶ Sociale component ("people"): de aandacht voor de mens in het verhaal vertaalt zich in aspecten zoals veiligheid, gezondheid, welzijn (bv. op de bouwplaats en in gebouwen) maar ook aandacht voor werkgelegenheid, interactie met omgeving/omwonenden ...
- ▶ Milieu-component ("planet"): het beperken van de impact van menselijke activiteiten op het milieu, meer specifiek (voor duurzaam bouwen) de impact van het bouwen op het milieu. Algemeen wordt aanvaard dat een milieu-beoordeling dient te gebeuren over de ganse levenscyclus van een bouwwerk (de gebruikte grondstoffen, de bouw zelf, maar ook het energieverbruik tijdens de gebruikperiode, eventuele reparatie/renovatie, eventueel hergebruik en finaal de sloop).

Er wordt geschat dat bouwen en wonen wereldwijd goed zijn voor $\pm 40\%$ van het energieverbruik (waarvan het overgrote deel tijdens het wonen) en $\pm 50\%$ van het grondstoffenverbruik.

De milieu-component is dus veel ruimer dan de milieu-impact van de materialen waarmee gebouwd wordt (hoewel deze relatief gezien belangrijker wordt naarmate de energetische prestaties beter worden). Andere belangrijke aspecten van duurzaam bouwen zijn:

- ▶ de inplanting van het gebouw (nabijheid van voorzieningen zoals riolering, openbaar vervoer)
- ▶ het globaal ontwerp van het gebouw (aanpasbaarheid, oriëntatie (zonnewarmte, daglichttoetreding), compactheid, efficiënt structureel ontwerp, beperking lozing hemelwater, ...)
- ▶ de milieu-impact van het bouwproces (o.a. beperken van afval)
- ▶ de energetische prestaties van het bouwwerk in gebruik (warmte-isolatie, luchtdichtheid, recuperatie van warmte bij ventilatie, gebruik thermische capaciteit, geothermie, ... desgevallend integratie van energie-opwekkende installaties bv. zonneboiler, zonnepanelen, windmolen, ...)
- ▶ de mogelijkheid tot demonteren en hergebruiken dan wel recyclen aan het eind van de cyclus
- ▶ dit alles rekening houdend met de gezondheid, het welzijn en het comfort van de gebruikers.

Milieu-impact beoordelingsschema's zoals BREEAM, LEED, HQE, ... trachten (gewogen) scores te geven aan het geheel van deze elementen om zo de milieuvriendelijkheid van gebouwen te beoordelen. Overheden kunnen deze of gelijkaardige systemen gebruiken als stimuli voor duurzaam bouwen. De nieuwste richtlijnen met betrekking tot openbare aanbestedingen laten immers meer ruimte voor "green procurement" (duurzaam aankopen).

5.1 Beton en duurzame ontwikkeling

Duurzaam bouwen met beton

Beton wordt algemeen beschouwd als een duurzaam materiaal. Inderdaad, het materiaal beton en de ermee geproduceerde constructie-elementen beschikken over zéér veel troeven :

- ▶ beperkte grijze energie (energie verbruikt voor ontginning, productie en transport)
- ▶ lokale productie met globaal kleine transportafstanden
- ▶ grote thermische inertie (interessant voor "Bijna Energie Neutrale" of passieve gebouwen)
- ▶ zeer lange levensduur, met gemiddeld zeer weinig onderhoud
- ▶ geen afgifte van (vluchtige organische) stoffen naar de binnenlucht, bescherming tegen eventueel aanwezig natuurlijk radon in de ondergrond
- ▶ geen uitloging van stoffen naar het grondwater
- ▶ goede brandweerstand
- ▶ goede akoestische eigenschappen
- ▶ zeer goed recycleerbaar.

Om de milieu-impact van een gebouw (opgedeeld in functionele eenheden bv. een m² vloer of wand) te bestuderen blijkt het gebruik van EPD (Environmental Product Declarations), opgemaakt volgens de Europese normalisatieregels, op dit moment de beste methode te zijn. Dergelijke analyse wordt uitgevoerd op de volledige levenscyclus van het materiaal op basis van een reeks criteria, ook wel impact-categorieën genoemd, zoals de opwarming van de aarde, het uitputten van natuurlijke grondstoffen, ...

Niettegenstaande het feit dat bij de productie van cement (15 à 20% van de massa van het beton) een belangrijke hoeveelheid CO₂ wordt uitgestoten, en dat beton grote hoeveelheden granulaten vereist, voornamelijk afkomstig van de extractie van natuurlijke grondstoffen, heeft de cement- en betonindustrie belangrijke middelen ingezet om deze impact te beperken.

Productie van cement

Figuur 5.1.1 illustreert het relatieve gewicht van de belangrijkste bijdragen aan de CO₂-uitstoot van (Portland) cement. Het spreekt dan ook vanzelf dat de reductie van fossiele brandstoffen en de (gedeeltelijke) vervanging van klinker de belangrijkste hefbomen zijn voor de cement- en betonindustrie om de CO₂-uitstoot te reduceren.

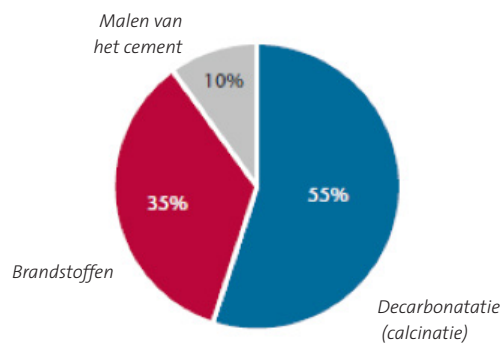


Fig 5.1.1
Verdeling van de CO₂-uitstoot tijdens de productie van cement

Gebruk van alternatieve brandstoffen voor de productie van Portlandklinker

Restproducten van andere industrieën worden voorbehandeld in specifieke industriële platformen om gebruikt te kunnen worden als brandstoffen voor de cementovens. Op die manier wordt de CO₂-uitstoot van traditionele fossiele brandstoffen vanzelfsprekend verminderd. Voorbeelden zijn solventen gedrenkt in zaagmeel, dierlijk meel en vet, biomassa, fijn-geshredderde rubberbanden... producten die aan het einde van hun levenscyclus zijn en niet meer gerecycleerd kunnen worden maar toch nog een belangrijk calorisch vermogen bezitten. De minerale stoffen aanwezig in de alternatieve brandstoffen worden gerecupereerd in het klinkerproces : men spreekt in dat geval van "co-processing". De selectie en exacte dosering van alternatieve brandstoffen vereisen daarom een intensieve kwaliteits-opvolging. Het klinker-productieproces garandeert de totale vernietiging van deze afvalstoffen. Het vervangingspercentage van de meest performante fabrieken situeert zich momenteel boven 90%.

5.1 Beton en duurzame ontwikkeling

Vervanging van klinker door minerale toevoegsels

In principe kunnen alle toevoegsels opgenomen in de NBN EN 197-1 toegepast worden. In de praktijk gaat het voornamelijk om gegranuleerde hoogovenslak, vliegas en kalksteen. Hoogovenslak wordt in België reeds gebruikt sedert de jaren 1930. Uiteraard zijn er – naast de limieten van de cementnorm – grenzen aan deze evolutie, enerzijds door de beperkte beschikbaarheid van hoogovenslak en vliegas en anderzijds door de eigenschappen van de resulterende cementen (minder reactief op jonge ouderdom).

Tabel 5.1.1 toont duidelijk het potentieel van de beperking van het klinkergehalte voor de reductie van de CO₂-emissie per ton cement. Zoals hiervoor aangegeven heeft dit belangrijke gevolgen voor de kenmerken van de betreffende cementen en betonsoorten (voornamelijk reactiviteit op jonge leeftijd). Bovendien is steeds een deel klinker vereist, enerzijds voor de activatie van hoogovenslak en vliegas, anderzijds om een hoge pH in het beton te waarborgen (alkalisch milieu voor de bescherming van de wapening tegen corrosie). In België is het gemiddelde klinkergehalte van cement de voorbije 10 jaar met ongeveer 10% gedaald en situeert zich momenteel rond de 62%.

Toekomstige evoluties

Er wordt veel onderzoek verricht door de producenten van cement in samenwerking met de academische wereld, al dan niet binnen de contouren van de cementnorm NBN EN 197-1:

- ▶ cementtypes met grotere percentages toevoegsels
- ▶ cementtypes met nieuwe combinaties van toevoegsels
- ▶ gebruik van nieuwe bestanddelen
- ▶ nieuwe cementtypes met andere mineralogische vormen bv. calcium-sulfo-aluminaatcementen, super-sulfaatcement of geopolymercement.

Een degelijk validatietraject, met o.a. mechanische proeven en duurzaamheidsonderzoek, maar ook bv. invloed op wapeningscorrosie, en compatibiliteit met tal van hulpstoffen, is uiteraard nodig om de gebruiksgeschiktheid van nieuwe cementtypes te bepalen.

Er wordt ook onderzocht in welke mate de geproduceerde CO₂ kan opgevangen en bewaard worden (hetzij in de grond/rots hetzij voor andere doeleinden). Het geheel van deze acties noemt men CCS of "Carbon Capture & Storage/Sequestration".

Bestanddeel	CO ₂ -uitstoot per ton
Klinker (K)	820
Vliegas (V)	22
Hoogovenslak (S)	42
Kalksteen (L)	32

Tab 5.1.1

CO₂-uitstoot per ton van de verschillende bestanddelen (bron: VN Constructeurs)

5.1 Beton en duurzame ontwikkeling

Transport van inerte grondstoffen

Het vervoer van granulaten en cement vormt een belangrijk aandeel in de milieu-impact van beton. Maatregelen die kunnen genomen worden zijn de volgende:

- ▶ voorkeur geven aan grondstoffen die lokaal worden geproduceerd
- ▶ gebruik maken van vervoer over water.

Beperking van het grondstofverbruik

Het verbruik van grondstoffen voor de productie van beton kan beperkt worden door volgende maatregelen:

- ▶ het vermijden en/of hergebruiken van retour beton (met respect voor de norm NBN EN 206)
- ▶ het recupereren van hemelwater
- ▶ het laten bezinken en hergebruiken van spoelwater.

Een belangrijke bijdrage aan de beperking van natuurlijke grondstoffen kan gebeuren door de recyclage van beton aan het einde van de levenscyclus. Performante recyclage vereist echter een globale ketenbehandeling:

- ▶ selectief slopen
- ▶ acceptatiepolitiek en beheer van inkomende stromen bij een breekinstallatie
- ▶ breekoperatie al dan niet met voorafgaande reiniging/eliminatie van vervuiling
- ▶ kwaliteitscontrole volgens de eisen van de productnormen voor granulaten (NBN EN 12620).

Vervolgens is het van groot belang dat de geproduceerde granulaten worden ingezet in de meest geschikte toepassing. Gerecycleerde granulaten kunnen volgens de norm NBN B15-001 worden ingezet in de productie van nieuw beton in functie van hun kwaliteit en de omgevingsklasse (tab 5.1.2).

Minder hoogwaardige producten vinden ruime afzetmogelijkheden als aanvulmateriaal of als (onder)fundering.

Duurzaamheid van beton

Dit (technische) duurzaamheid of levensduur van beton is een aspect dat vaak vergeten wordt, wellicht omdat beton in courante constructies zelden beschadigd raakt. Nochtans zijn er constructies die veel onderhoud vergen en in sommige gevallen zelfs moeten afgebroken worden omdat de technische duurzaamheid niet voldoet. Dit is soms het geval met betonconstructies aan de kust (corrosie door chloriden) en met betonconstructies in de infrastructuur (wegen en kunstwerken, kaaimuren, sluizen, ...). Deze laatste worden immers vaak veel langer in gebruik gehouden dan oorspronkelijk voorzien, vaak met onvoldoende of geen onderhoud.

Voor dergelijke constructies is het belangrijk dat de ontwerp-levensduur goed gedefinieerd wordt (indien afwijkend van de standaard d.i. 50 jaar), en dat vervolgens al het nodige wordt gedaan opdat de betonconstructie bestand zou zijn tegen de verschillende geïdentificeerde potentiële schademechanismen (zie hoofdstuk 4).

In dit verband kan tot slot gepleit worden voor het gebruik van kwalitatieve en innovatieve betonsoorten, zó ontworpen dat ze in één materiaal de meest uiteenlopende functies verenigen : isolerend beton (schuimbeton), decoratief beton, (ultra)hogesterkte beton, ... Deze materialen zijn op die manier vanzelf zeer duurzaam.

	Omgevingsklassen			
	EI	EE1	EE2, EE3, EA1	EE4, ES1, ES2, ES3, ES4, EA2, EA3
Betonggranulaat type A+ ¹⁾	30%	30%	20%	0%
Menggranulaat type B+ ²⁾	20%	0%	0%	0%

¹⁾ De norm NBN B15-001 definieert de criteria voor de samenstelling en de eigenschappen van betonggranulaat "A+"

²⁾ De norm NBN B15-001 definieert de criteria voor de samenstelling en de eigenschappen van menggranulaat "B+"

Tab 5.1.2

Maximum vervangingspercentage van grof granulaat (volume%) in gewapend beton

5.2 Gezondheid en veiligheid

Veilig werken met cement en beton

Cement is een hydraulisch bindmiddel. In contact met water of vocht leidt de hydratatiereactie vrijwel onmiddellijk tot een sterke stijging van de pH tot een waarde van ± 13 . Daardoor kunnen cement en beton irritatie of brandwonden veroorzaken bij langdurig contact met de huid of spatten in de ogen. Het is daarom van essentieel belang beschermende uitrusting te dragen bij het omgaan met beton en producten op basis van cement: veiligheidsbril, beschermende kledij, handschoenen, laarzen, ... In geval van irritatie, met veel water spoelen en een arts raadplegen.

De veiligheidsinformatiebladen van cement en beton zijn beschikbaar bij de producenten.

Cement en de Europese richtlijn inzake chroom VI

Chroom VI is van nature aanwezig in extreem lage hoeveelheden in de grondstoffen die worden gebruikt voor de productie van cement. Sommige mensen kunnen een allergische reactie ontwikkelen wanneer ze in contact komen met chroom VI. De Europese Richtlijn 2003/53/EG, bij koninklijk besluit omgezet naar Belgisch recht, schrijft voor dat "cement en cementhoudende preparaten niet mogen worden gebruikt of op de markt worden gebracht als ze, indien gehydrateerd, meer dan 0,0002% (2 ppm) oplosbaar chroom VI bevatten van het totale droge gewicht van cement".



Fig 5.2.1
Plaatsing
van de anti-
terugslagkabel

De cementproducent voegt daarom een reductiemiddel toe aan het cement dat het mogelijk maakt om een chroom VI-gehalte lager dan de opgelegde limiet te garanderen. De duur waarbij het reductiemiddel effectief is, wordt vermeld op elke leveringsbon of op elke verpakking. Deze periode is geldig onder de gepaste opslagomstandigheden: het cement moet worden opgeslagen in silo's of zakken, beschermd tegen vocht, en mag niet worden blootgesteld aan overmatige ventilatie.

Het is belangrijk om eraan te herinneren dat de meeste gevallen van huiduitslag gerelateerd zijn aan irritatie vanwege de alkalische aard van de cementpasta. Ze kunnen optreden als de instructies voor het dragen van persoonlijke beschermingsmiddelen niet worden opgevolgd. De vermindering van het gehalte aan oplosbaar chroom VI van cement mag in geen geval de gebruiker vrijstellen van het gebruik van handschoenen, ondoordringbare schoenen, beschermende kledij, veiligheidsbril, ...

Levering van cement

Het lossen van cement uit de tankwagens naar de silo's van de betoncentrales wordt uitgevoerd met perslucht afkomstig van een compressor die op de transportvoertuigen is gemonteerd. Zoals bij elk proces met perslucht bestaat er een risico op breuk van flexibele leidingen of koppelstukken ingeval van slijtage of een overmatige drukstijging.

De gevolgen van dit risico, een plotselinge klap van de leiding, kunnen beperkt worden door de plaatsing van een borgkabel of "anti-terugslagkabel" (fig 5.2.1). Deze kabel is een extra veiligheidsmaatregel en vervangt vanzelfsprekend niet de inspectie en het regelmatige onderhoud van alle leidingen en koppelstukken.

5.2 Gezondheid en veiligheid

Wanneer het cement in de silo wordt geblazen, moet de lucht in de silo kunnen ontsnappen om zo ruimte te laten voor cement. Om milieuvervuiling door cementstof te voorkomen, wordt deze lucht doorheen filters bovenop de silo's geleid (fig 5.2.2). Het is essentieel om regelmatig te controleren of deze filters niet verstopt zijn en of de veiligheidsventielen goed werken. Een verstopte filter kan exploderen en in zijn val ernstige letsels veroorzaken.



Fig 5.2.2
Filters bovenop de silo's van een betoncentrale

Beton verpompen

De plaatsing van verpompt beton genereert een aantal specifieke risico's die niet mogen worden onderschat. In het bijzonder moet men steeds nagaan of rekening gehouden werd met:

- ▶ de toename van de betondruk op verticale bekisting
- ▶ de mogelijke aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn in de actieradius van de pompgiek
- ▶ de draagkracht van de voorziene standplaats van de pomp en zijn accessoires (pompgiek, ...)
- ▶ de beperking van het risico op ongecontroleerde bewegingen van de flexibele leiding.

Risico op elektrocutie

In geval van contact van de pompgiek met een elektrische leiding, staat de pomp onder spanning. Elk contact met de pomp veroorzaakt dan een elektrische schok. Dit geldt ook voor de grond rondom de machine. Deze spanning neemt af met de afstand, hetgeen inhoudt dat als men een voet verplaatst, er een potentiaalverschil tussen de twee voeten ontstaat. Hierbij vloeit er een stroom door het lichaam van de ene voet naar de andere. Ook zonder direct contact met een elektrische leiding kan de pomp onder spanning komen te staan. Dit komt omdat er vanaf een bepaalde afstand tussen de giek en de leiding een elektrische boog kan ontstaan.

In de nabijheid van hoogspanningslijnen, is het daarom alleen toegestaan om te werken als de spanning tijdens de duur van het werk wordt afgesloten. Als dit niet mogelijk is, moet een veiligheidsafstand van minstens 6 m tussen de giek en de electriciteitsleiding worden aangehouden. De pomp moet uit voorzorg ook effectief worden geaard bij het werken in de buurt van elektrische leidingen.

5.2 Gezondheid en veiligheid

Als gevolg van de multidirectionele bewegingen van de pompgiek en de noodzaak om te focussen op het lospunt, kan de bediener van de betonpomp de positie van de giek ten opzichte van de elektrische kabel uit het oog verliezen. Afhankelijk van de positie ten opzichte van de kabel, kan het voor de pompbediener onmogelijk zijn om de afstand tussen de giek en de kabel te beoordelen. Als de giek van de pomp niet uitgerust is met een lijndetectie-apparaat, moet een "waarnemer" worden aangewezen. Deze staat in radiocontact met de bediener en moet op elk moment de positie van de giek ten opzichte van de elektrische leiding volgen (fig 5.2.3).

Risico's door ongecontroleerde bewegingen van de betonnerslang

De flexibele aanvoerleiding hangt meestal verticaal aan het uiteinde van de pompgiek (fig 5.2.4). Als er lucht in de betonpomp wordt gezogen, kan de druk die daaruit voortvloeit een "zweepslag" veroorzaken wanneer deze de aanvoerleiding verlaat. Daarom kan een leiding met een metalen kraag aan het uiteinde nooit als aanvoerleiding gebruikt worden. Een onverwachte beweging van de giek of de flexibele aanvoerleiding kan nooit worden uitgesloten. Daarom zal het aantal mensen in de zone nabij de de giek of flexibele aanvoerleiding tot het noodzakelijke minimum worden beperkt.

Plaatsen van beton met de kubel

Het plaatsen van beton met de kubel is een gebruikelijke situatie. Een kubel gevuld met beton weegt enkele tonnen en heeft daarom een aanzienlijke traagheid. Om ervoor te zorgen dat de kubel wordt gebruikt in de beste veiligheidsomstandigheden, zal bijzondere aandacht worden besteed aan de volgende punten :

- ▶ Regelmatig alle hijsapparatuur controleren.
- ▶ Zich tijdens de beweging van de kubel nooit tussen de kubel en de truckmixer of gelijk welk ander vast voorwerp positioneren om het risico op verpletting te vermijden. Steeds een veilige afstand respecteren en zich nooit onder opgehesen lasten verplaatsen .
- ▶ Ingeval van defecte of moeilijke communicatie met de kraanmachinist, het werk stoppen.
- ▶ Ervoor zorgen dat de hijsuitrusting geschikt is voor de lading (gewicht, verankering, bevestiging).
- ▶ Nooit proberen om betonresten in de kubel terug in de truckmixer te brengen.
- ▶ De kubel niet optillen tijdens het vullen of het reinigen. Deze moet steeds stabiel op de grond staan.
- ▶ De werken stil leggen in geval van sterke wind die de kubel doet slingeren.
- ▶ De kubel nooit handmatig proberen tegen te houden.
- ▶ Ervoor zorgen dat de werkplatformen bovenaan de bekisting stabiel zijn en voorzien zijn van borstweringen.

Fig 5.2.3
Pompbediener bijge-
staan door een
waarnemer in
de nabijheid
van elektrische
leidingen

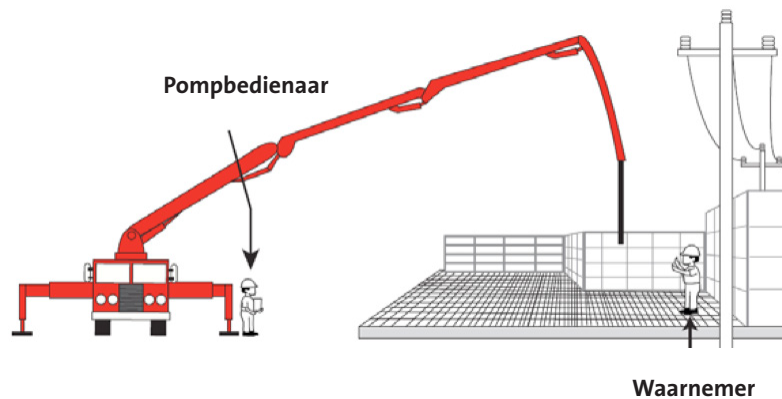


Fig 5.2.4
Risicozone
rond de
aanvoer-
leiding



Begrippenlijst



Begrippenlijst

A

Aanmaken van beton

Operatie waarbij de bestanddelen van een grout, mortel of beton homogeen worden gemengd. Bij uitbreiding, de volledige vervaardiging van beton.

Alkaliën

Chemische stoffen die in water alkalische oplossingen vormen. De alkaliën behoren tot de groep van de basen. In beton beschouwt met de alkaliën Na_2O en K_2O , meestal in de vorm van Na_2O -equivalent ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$).

Alkali-silica reactie (ASR)

Wordt eveneens alkali-granulaat reactie genoemd. Chemische reactie tussen oplosbaar silicium in bepaalde granulaten en de alkaliën in het beton, voornamelijk afkomstig uit het cement. Er wordt een gel gevormd die sterk zwelt wanneer deze water absorbeert. De swelling creëert trekspanningen in het beton en kan aanzienlijke schade veroorzaken (inwendige en uitwendige scheuren).

B

Beton

Materiaal dat wordt gevormd door het mengen van cement, grof en fijn toeslagmateriaal en water, met of zonder hulpstoffen, toevoegsels en toevoegingen, en dat zijn eigenschappen ontwikkelt door hydratatie.

Betonfamilie

Een groep van betonsamenstellingen waarbij voor de belangrijkste kenmerken een betrouwbare relatie is afgeleid en gedocumenteerd.

Beton met ingebrachte lucht

Beton dat wordt aangemaakt met gebruik van een luchtbelvormer

Beton (voorgeschreven) "op samenstelling"

Beton waarvoor de betonsamenstelling en de toe te passen grondstoffen zijn opgelegd aan de producent, die verantwoordelijk is voor de levering van beton met de voorgeschreven samenstelling.

Beton (voorgeschreven) "op prestatie"

Beton waarvoor de vereiste eigenschappen en eventuele aanvullende kenmerken zijn opgelegd aan de producent, die verantwoordelijk is voor de levering van beton dat aan de vereiste eigenschappen en aanvullende kenmerken voldoet.

Beton - Gewapend beton

Beton waarvan de wapening bestaat uit passieve wapeningsstaven of uit staalvezels. De wapeningsstaven worden als dusdanig gebruikt (gebonden op de werf) dan wel als vooraf vervaardigde wapeningsnetten of wapeningskorven.

Beton - Voorgespannen beton

Beton dat onderworpen is aan drukspanningen veroorzaakt door de werking van voorgespannen stalen kabels, waardoor het hogere trekspanningen kan opnemen. De stalen kabels kunnen hetzij voorgespannen worden vóór het storten van beton en erin geïntegreerd worden (men spreekt in dat geval van "voorspanning met voorgerekt staal") hetzij geplaatst worden in een kabelholte ("gaine") en opgespannen worden na uitharding van het beton (men spreekt in dat geval van "voorspanning door naspannen").

Beton - (Element van) Geprefabriceerd beton

Element van beton, vervaardigd in een fabriek of op de werf, dat op een later tijdstip (na verharding) in het bouwwerk wordt geplaatst.

Beton - Stortklaar beton

Beton dat vervaardigd wordt in een betoncentrale en met geschikte voertuigen (bv. truckmixers) naar de werf wordt getransporteerd waar het direct kan geplaatst worden.

Beton - Normaal beton

Beton met in ovendroge toestand een volumieke massa van meer dan 2 000 kg/m^3 maar niet meer dan 2 600 kg/m^3 .

Beton - Licht beton

Beton met in de ovendroge toestand een volumieke massa van niet minder dan 800 kg/m^3 en niet meer dan 2 000 kg/m^3 . Licht beton wordt vervaardigd (deels of volledig) met lichte granulaten.

Beton - Zwaar beton

Beton met in de ovendroge toestand een volumieke massa van meer dan 2 600 kg/m^3 . Dankzij het gebruik van zware granulaten kan de volumieke massa verhoogd worden tot maximaal 3 500 kg/m^3 . Dergelijk beton wordt gebruikt in beschermende constructies bv. tegen nucleaire straling.

Beton - Verhard beton

Beton in een vaste toestand dat een bepaalde sterkte heeft bereikt.

Beton - Vers beton (of betonspecie)

Volledig gemengd beton dat met de gekozen methode nog kan worden verdicht.

Beton - Hogesterktebeton

Beton met een druksterkteklasse gaande van C55/67 tot en met C100/115.

Beton - Massabeton

Beton voor constructieve elementen met een dikte groter dan ongeveer 60 cm.

Beton - Pompbeton

Vers beton dat geplaatst wordt door verpomping via een systeem van (vaste) buizen en (soepele) darmen.

Beton - Spuitbeton

Beton dat geplaatst en verdicht wordt door projectie van opeenvolgende lagen. Men maakt onderscheid tussen natte en droge procédés.

Beton - Vezelversterkt beton

Beton dat gewapend wordt met metalen of kunststofvezels van kleine diameter en waarvan de lengte van dezelfde grootte-orde is als de maximale korreldiameter van het granulaat.

Beton - Zelfverdichtend beton

Beton dat door zijn eigen gewicht kan uitvloeien en verdichten, het bekistingswerk met wapening, leidingen, sparingen enz. kan vullen, en daarbij homogeen van samenstelling blijft.

Beton - Zichtbeton

Beton met een oppervlak dat zichtbaar gelaten wordt en waaraan specifieke esthetische eisen worden gesteld.

C

Carbonatatie

Reactie van het portlandiet Ca(OH)_2 in de cementsteen met CO_2 uit de lucht. Als gevolg van deze reactie daalt de pH in de poriënstructuur van het beton waardoor het beton zijn beschermende functie tegen corrosie van het wapeningsstaal verliest.

Cement

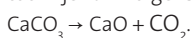
Fijngemalen, minerale (anorganische) stof die gemengd met water een pasta vormt die bindt en verhardt door hydratatie-reacties en -processen en die, na verharding, zijn sterkte en stabiliteit behoudt, zelfs onder water.

Certificatie-organisme

Door de staat geaccrediteerd organisme dat de conformiteit van een bouwproduct (bv. beton, cement, granulaten) met de geldige technische normen beoordeelt en een conformiteits-certificaat aflevert.

CO_2

Koolstofdioxide of koolzuurgas (CO_2) is een chemisch element bestaande uit koolstof en zuurstof, dat deel uitmaakt van de gasen die verantwoordelijk zijn voor het serre-effect. In de cementindustrie wordt het voornamelijk gevormd tijdens de productie van Portlandklinker en met name in de fase waarin de voornaamste grondstof calciumcarbonaat decarboneert tot vrije kalk volgens de chemische reactie:



Consistentie

Eigenschap van vers beton die een indicatie geeft van de verwerkbaarheid en de verdichtbaarheid.

D

Druksterkte

Kenmerk van een beton, gemeten door middel van een genormaliseerde drukproef, die zijn weerstand tegen externe drukbelasting uitdrukt.

E

Effectief watergehalte

Totaal watergehalte in de betonspecie verminderd met het water dat door de granulaten is geabsorbeerd. Het effectief watergehalte wordt gebruikt in de berekening van de water-cement-factor.

Elasticiteitsmodulus

Eigenschap van een materiaal die de relatie spanning/vervorming kenmerkt in een lineair-elastisch bereik.

F

Filler (of vulstof)

Vrijwel inert toevoegsel (Type I) waarvan het merendeel van de korrels kleiner dan of gelijk is aan 0,063 mm.

G

Gehalte aan fijne deeltjes

In beton beschouwt men de som van het gehalte aan cement, het aandeel van de granulaten kleiner dan 0,250 mm alsook de eventuele toevoegsels. In bepaalde omstandigheden beschouwt met het gehalte aan fijne deeltjes op 0,125 mm (indien dit het geval is in dit document wordt het duidelijk aangegeven). In een granulaat beschouwt men de fractie die door de zeef van 0,063 mm valt (filler).

Granulaat

Natuurlijke, kunstmatige, teruggewonnen of gerecycleerde korrelvormige grondstof van minerale oorsprong geschikt om te worden toegepast in beton.

Granulaat - Normaal granulaat

Granulaat met in de oven-droge toestand een volumieke massa van de korrel $> 2\ 000\ \text{kg/m}^3$ en $< 3\ 000\ \text{kg/m}^3$.

Granulaat - Licht granulaat

Granulaat met in de oven-droge toestand een volumieke massa van de korrel $\leq 2\ 000\ \text{kg/m}^3$.

Granulaat - Zwaar granulaat

Granulaat met in de oven-droge toestand een volumieke massa van de korrel $\geq 3\ 000\ \text{kg/m}^3$.

Granulaat - All-in granulaat

Granulaat bestaande uit een mengsel van fijne granulaten (zand) en grove granulaten (gerold of gebroken).

Begrippenlijst

H

Hulpstof

Chemische stof die in kleine hoeveelheden, ten opzichte van de massa van het cement, gedurende het mengproces van betonspecie wordt toegevoegd met de bedoeling de eigenschappen van betonspecie of verhard beton te wijzigen.

Hydratatie

Chemische reactie van cement met water, waarbij de cementmineralen omgevormd worden tot reactieproducten die water bevatten (gehydrateerde fasen).

Hydratatiwarmte

Hoeveelheid warmte die ontwikkeld wordt als gevolg van de hydratatie van cement gedurende een bepaald tijdsinterval.

I

Ingebrachte lucht

Microscopisch kleine luchtbelletjes, gewoonlijk tussen 10 en 300 µm in diameter, die gedurende het mengproces worden ingebracht, gewoonlijk door toevoeging van een oppervlakteactieve stof.

Initiële proef (Initial Type Testing of ITT in het Engels)

Proef uitgevoerd bij het begin van de productie van een nieuwe betonsamenstelling of betonsoort (of bij een nieuwe of gewijzigde productie-installatie) en die tot doel heeft de conformiteit aan het geheel van voorgeschreven eisen te verifiëren.

K

Karakteristieke sterkte

Statistische ondergrens voor de sterkte van beton, waarboven zich 95% van de populatie van alle sterktemetingen (voor het beschouwde betontype en de beschouwde evaluatieperiode) bevindt.

(Klassen -) Chloridgehalte

Genormaliseerde klassen voor het gehalte van chloriden aanwezig in het beton, berekend op basis van het gehalte aan chloriden in elk van zijn bestanddelen. Voor gewapend beton geldt een klasse Cl 0,40.

(Klassen -) Consistentieklassen

Genormaliseerde klassen voor de consistentie van beton in functie van de gekozen meetmethode. Voor de zetmaat S1 t/m S5.

(Klassen -) Druksterkteklassen

Genormaliseerde classificatie van beton in functie van zijn druksterkte op een ouderdom van 28 dagen. Voor beton met een normale en hoge volumieke massa gaande van C8/10 tot en met C100/115.

(Klassen -) Milieuklassen

Indeling van elementen van een bouwwerk in functie van de aantastingsmechanismen en de bijhorende risico's voor de duurzaamheid van beton.

(Klassen -) Omgevingsklassen

Indeling van elementen van een bouwwerk in functie van de gebruikelijke omgevingen voor de Belgische praktijk en de bijhorende risico's voor de duurzaamheid van beton.

Krimp - Plastische krimp

Volumevermindering van beton als gevolg van capillaire spanningen veroorzaakt door het verlies van water in het nog jonge beton.

Krimp - Uitdrogingskrimp

Volumevermindering van beton veroorzaakt door het verlies van water vanaf de verharding.

Krimp - Endogene krimp

Volumevermindering van beton veroorzaakt door de hydratatie van cement (interne uitdroging). Deze vorm van krimp is voornamelijk van belang bij (zeer) lage W/C-factoren.

Krimp - Thermische krimp

Volumevermindering van beton veroorzaakt door een daling van de temperatuur, hetzij in het jonge beton na de opwarming als gevolg van de hydratatie, hetzij van het verhard beton als gevolg van variaties in de omgevingstemperatuur.

Kruip

Vervorming van een betonelement in de tijd (bijkomend aan de elastische vervorming) onder invloed van een constante belasting.

L

Levensduur

Tijd gedurende dewelke een bouwwerk zonder noemenswaardig verlies van zijn prestaties kan gebruikt worden.

Luchtgehalte

Volume ingenomen door lucht in het vers beton. Het betreft lucht gecreëerd tijdens het mengproces en niet uitgedreven tijdens de verdichting (ingesloten lucht) of lucht ingebracht door het gebruik van een luchtbelvormer (ingebrachte lucht).

N

Nabehandeling

Beschermingsmaatregel waarbij vers geplaatst beton beschermd wordt tegen uitdroging en externe acties totdat het een voldoende druksterkte bereikt heeft. De nabehandeling is vooral belangrijk voor de zone dichtbij het betonoppervlak.

P

Portlandklinker

Hoofdbestanddeel van cement, bekomen door het calcineren van een precies mengsel van grondstoffen. Zijn hydraulische reactie leidt tot de verharding van cement.

Prestatieverklaring

(Declaration of Performance of DoP in het Engels)

Verplicht document - voor bouwproducten die binnen het toepassingsgebied van een Europese geharmoniseerde norm vallen - waarin de producent de prestaties verklaart die verband houden met de essentiële kenmerken van de Bouwproductenrichtlijn.

Puzzolanen

Puzzolanen zijn natuurlijke of kunstmatige stoffen die gebruikt worden als bindmiddel in beton op basis van hun samenstelling (silicium- of aluminium-silicium-achtige verbindingen). Natuurlijke puzzolanen zijn vaak rotsen van vulkanische oorsprong (tuf, trass). Kunstmatige puzzolanen zijn bv. gecalcineerde klei, silica fume en vliegas.

T

Thixotropie

Verhoging van de viscositeit van beton wanneer het beton in rust is. Het fenomeen is omkeerbaar bij een intensieve mening en dus niet te verwarren met het verlies van verwerkbaarheid in de tijd.

Toevoeging

Product toegevoegd aan beton met de bedoeling bepaalde eigenschappen te verbeteren, dat noch cement noch granulat noch aanmaakwater noch een toevoegsel is. Voorbeelden zijn vezels, producten die de viscositeit of de thixotropie verhogen, kleurstoffen ...

Toevoegsel (ook vulstof genoemd)

Fijn verdeelde, minerale grondstof gebruikt in beton met de bedoeling bepaalde eigenschappen te verbeteren of speciale eigenschappen te bereiken. De norm NBN EN 206 behandelt 2 types toevoegsels: de vrijwel inerte (Type I) en de puzzolane of latent hydraulische (Type II).

Truckmixer (of betonmixer)

Voertuig gebruikt voor het transport en de levering van beton, uitgerust met een mengkuip waarmee betonspecie gedurende het transport in een homogene toestand kan worden gehouden.

U

Uitbloeiing

Kristallisatie van zouten aan het oppervlak van beton.

Uitzweten (of Bleeding in het Engels)

Accumulatie van water aan het oppervlak van vers, verdicht beton, doorgaans als gevolg van een niet-aangepaste betonsamenstelling.

V

Volume van de cementpasta (of cementsteen)

Volume ingenomen door het cement, het (effectief) water, de toevoegsels, toevoegingen in poedervorm en het luchtgehalte.

Volumetrisch rendement

Verhouding van de theoretische volumemassa van het beton (berekend als de som van de massa's van de bestanddelen zoals die gedoseerd worden voor de vervaardiging van 1 m³ beton) tot de reële volumieke massa van het beton (gemeten op vers beton volgens NBN EN 12350-6).

W

Wapening

Staven en netten uit wapeningsstaal (passieve wapening) alsook voorspanstaal (actieve wapening). Staalvezels kunnen onder bepaalde voorwaarden ook beschouwd worden als passieve wapening.

Wapeningsdekking

Dikte van de zone beton tussen (de buitenzijde van) de buitenste wapening en het betonoppervlak.

Wapeningsstaal

Staal dat kan gebruikt worden als passieve wapening in beton.

Water - Aanmaakwater

De hoeveelheid water die tijdens het mengproces van beton wordt toegevoegd aan het mengsel van cement, toevoegsels en granulaten.

Water - Totaal water

Toegevoegde hoeveelheid water plus het water dat zich binnenin en op het oppervlak van het toeslagmateriaal bevindt plus het water in hulpstoffen en in vulstoffen die in de vorm van een slurry worden toegevoegd, alsmede het water dat overblijft uit toegevoegd ijs.

Begrippenlijst

Water - Gerecycleerd water (of recyclagewater)

Water afkomstig van de reiniging van de menger en de truck-mixers op de betoncentrale en dat na behandeling kan hergebruikt worden voor de vervaardiging van beton.

Water-cement-factor

Massaverhouding van het effectief watergehalte tot het cementgehalte in vers beton, afgekort W/C-factor of nog W/C. Indien toevoegsels type II gebruikt worden, kan het cementgehalte worden vervangen door het equivalent cementgehalte of bindmiddelgehalte, berekend als (cement + k.toevoegsel).

Weerstand tegen carbonatie

Kenmerk van een beton, gemeten door middel van een genormaliseerde (versnelde) carbonatatieproef, die zijn weerstand tegen de indringing van CO₂ uitdrukt.

Weerstand tegen indringing van chloriden

Kenmerk van een beton, gemeten door middel van een genormaliseerde chloriden-migratieproef, die zijn weerstand tegen de indringing van chloriden uitdrukt.

Weerstand tegen vorst/dooi in aanwezigheid van dooizouten

Kenmerk van een beton, gemeten door middel van een genormaliseerde vorstproef, die zijn weerstand tegen vorst-dooicycli in aanwezigheid van dooizouten uitdrukt.

Bibliografie, normen en nuttige links



Bibliografie, normen en nuttige links

Bibliografie

AFGC (Association Française de Génie Civil)
Conception des bétons pour une durée de vie
donnée des ouvrages
Parijs 2004, Frankrijk

Baron/Ollivier (onder leiding van)
Les bétons – bases et données pour leur formulation
Eyrolles, Parijs 1996, Frankrijk

BBG (Belgische BetonGroepering)
Cursus Betontechnologie
Brussel 2006, België

Bekaert
Steel – and Synthetic Fibre Reinforced Concrete
Zwevegem 2011, België

Cimbeton
Construire avec les bétons
Le Moniteur, Frankrijk (2000)

Cimbeton
Fiches techniques G10 et G11
Parijs 2003 en 2006, Frankrijk

Dreux/Festa
Nouveau guide du béton et de ses constituants
Eyrolles, Parijs 1998, Frankrijk

Febelcem
ABC van cement en beton
Brussel, België 2003
Dossiers Cement (doorlopende publicatie)

fib (Fédération Internationale du Béton)
Bulletin 34: Model Code for Service Life Design
Lausanne 2006, Zwitserland

Holcim (Suisse)
Guide pratique du béton
6ème édition (2015)

Kosmatka/Panarese/Allen/Cumming
Design and Control of Concrete Mixtures
Portland Cement Association
Chicago 1991, USA

Neville
Properties of Concrete
Longman, Burnt Mill, Harlow 1995, Verenigd Koninkrijk

OCW (OnderzoeksCentrum voor de Wegenbouw)
A82/11: Handleiding voor industriële buitenverhardingen in
beton
Brussel 2011, België

Ollivier/Vichot (onder leiding van)
La durabilité des bétons
Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
Parijs 1992, Frankrijk

Soletanche Bachy
Guide technique
2ème édition (2013)

TFB (Technik und Forschung im Betonbau)
Bulletin du ciment
Mensuel du service de recherche et conseils techniques
en matière de ciment et béton
Wildegg, Zwitserland

Venuat
La pratique des ciments, mortiers et bétons
Tome 1: La pratique des liants et des bétons
Tome 2: Pratique du bétonnage, pathologie et applications
Editions du Moniteur
Parijs 1989, Frankrijk

Vereniging Nederlandse Constructeurs
Duurzaam Construeren met materialen
Gorinchem 2013, Nederland

WTCB
(Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf)
V.Pollet en B.Dooms
Digest n° 12: Beton storten tijdens de winterperiode
Brussel 2002, België

WTCB
(Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf)
TV 204: Cementgebonden bedrijfsvloeren (document in herziening)
Brussel 1997, België

Bibliografie, normen en nuttige links

Lijst van normen en referentiedocumenten

NBN EN 197-1: Cement - Deel 1: Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gewone cementsoorten, oktober 2011

NBN EN 197-2: Cement - Deel 2: Overeenkomstigheidsbeoordeling, februari 2014

NBN EN 196-8: Beproevingmethoden voor cement - Deel 8: Hydratatiewarmte - Oplosmethode, mei 2010

NBN EN 196-9: Beproevingmethoden voor cement - Deel 9: Hydratatiewarmte - Semi-adiabatische methode, mei 2010

NBN EN 206+A1: Beton - Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit, november 2016

NBN EN 413-1: Metselcement - Deel 1: Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria, juni 2011

NBN EN 450-1: Vliegas voor beton - Deel 1: Definitie, specificaties en overeenkomstigheidscriteria, september 2012

NBN EN 934-2+A1: Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel - Deel 2: Hulpstoffen voor beton - Definities, eisen, conformiteit, markering en etikettering, juli 2012

NBN EN 1008: Aanmaakwater voor beton - Specificatie voor monsterneming, beproeving en beoordeling van de geschiktheid van water, inclusief spoelwater van reinigingsinstallaties in de betonindustrie, als aanmaakwater voor beton, september 2002

NBN EN 1536+A1: Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk - Boorpalen, augustus 2015

NBN EN 1538+A1: Uitvoering van bijzonder geotechnisch werk - Diepwanden, juli 2015

NBN EN 1992-1-1/AC: Eurocode 2: Ontwerp en berekening van betonconstructies - Deel 1-1: Algemene regels en regels voor gebouwen, november 2010

NBN EN 12620+A1: Granulaten voor beton, mei 2008

NBN EN 12878: Pigmenten voor het kleuren van bouwmaterialen op basis van cement en/of kalk - Specificaties en beproevingsmethoden, mei 2014

NBN EN 13263-1+A1: Silica fume voor beton - Deel 1: Definities, eisen en overeenkomstigheidscriteria, mei 2009

NBN EN 13295: Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies - Beproevingmethoden - Bepaling van de weerstand tegen carbonatatie, juli 2004

NBN EN 14216: Cement - Samenstelling, specificaties en conformiteitscriteria voor bijzondere cementsoorten met erg lage hydratatiewarmte, augustus 2015

NBN EN 14630: Producten en systemen voor het beschermen en herstellen van betonconstructies - Beproevingmethoden - Bepaling van de carbonatatie diepte van verhard beton d.m.v. de fenolftaleïne-methode, maart 2007

NBN EN 14647/AC: Calciumalumiinaatcement - Samenstelling, specificaties en overeenkomstigheidscriteria, november 2006

NBN EN 14889-1: Vezels in beton - Deel 1: Staalvezels - Definities, specificaties en conformiteit, maart 2007

NBN EN 14889-2: Vezels in beton - Deel 2: Polymeervezels - Definities, specificaties en conformiteit, maart 2007

NBN EN 15167-1: Gemalen gegranuleerde hoogovenslak voor gebruik in beton, mortel en injectiemortel - Deel 1: Definities, specificaties en conformiteitscriteria, maart 2007

NBN EN 15743+A1: Supersulfaatcement - Samenstelling, specificaties en overeenkomstigheidscriteria, mei 2015

NBN EN ISO 9001: Kwaliteitsmanagementsystemen - Eisen, september 2015

NBN B12-108: Cement - Cement met hoge bestandheid tegen sulfaten, juni 2015

NBN B12-109: Cement - Cement met begrensd alkali-gehalte, juli 2015

NBN B12-110: Cementsoorten - Portlandcementsoorten met hoge aanvangsterkte, januari 2002

NBN B15-001: Beton - Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit - Nationale aanvulling bij NBN EN 206 :2013 + A1 :2016, voorzien in 2018

NBN B15-007: Zichtbeton - Classificaties en specificaties, mei 2018

NBN B15-100: Beton - Methodologie voor de evaluatie en attestering van de gebruiksgeschiktheid van cementen en van toevoegsels bestemd voor beton, voorzien in 2018

Bibliografie, normen en nuttige links

NBN B15-215: Beproeving van verhard beton - Wateropsorping door onderdompeling, mei 2018

NBN B 15-400/AC: Uitvoering van betonconstructies - Nationale aanvulling bij NBN EN 13670:2010, april 2016

NT Build 492: Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, november 1999

CEN/TR 15177: Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage, april 2006

CEN/TS 12390-9: Testing hardened concrete - Part 9: Freeze-thaw resistance with de-icing salts - Scaling, december 2016

PTV 411: Codificatie van de granulaten overeenkomstig de normen NBN EN 12620, NBN EN 13043, NBN EN 13139 en NBN EN 13242, Uitgave 2,3, 2017

PTV 603: Cementsoorten - bijkomende kenmerken, Uitgave 3,3, 2018

SB 250 - Standaardbestek 250 voor de wegenbouw
Administratie Wegen en Verkeer, Vlaamse Overheid

Cahier des Charges Type (CCT) Qualiroutes,
Service Public de Wallonie

CCT 2015 - Cahier des Charges Type relatif aux Voiries
Région de Bruxelles-Capitale

Nuttige links

BBG (Belgische BetonGroepering)
www.gbb-bbg.be

CRIC-OCCN (OnderzoeksCentrum voor de Cementnijverheid)
www.cric.be

FEBE (Federatie van de Belgische Prefab Betonindustrie)
www.febe.be

Febelcem (Federatie van de Belgische Cementnijverheid)
www.febelcem.be

FedBeton (Federatie voor Stortklaar Beton)
www.fedbeton.be

Infobeton
www.infobeton.be

Probeton
www.probeton.be

Expertise Beton en Staal - Departement Mobiliteit en Openbare Werken (MOW)
www.expertisebetonenstaal.be

Bruxelles Mobilité – Service Public Régional de Bruxelles
www.mobilite-mobiliteit.brussels

SPW (Service Public de Wallonie)
Qualité et Construction
qc.spw.wallonie.be

Holcim (België) N.V. / Holcim (Belgique) S.A.
Avenue Robert Schuman 71
B-1401 Nivelles
Tel +32 67 87 66 01
www.holcim.be



 A member of
LafargeHolcim