

# NAAR EEN OPTIMALE SAMENSTELLING VAN WEGENBETON

- KENMERKEN VAN WEGENBETON
- KENMERKEN VAN MATERIALEN
- OPPERVLAGKENMERKEN VAN WEGVERHARDINGEN
- SAMENSTELLING VAN WEGENBETON
- ENKELE BIJZONDERE TOEPASSINGEN





# NAAR EEN OPTIMALE SAMENSTELLING VAN WEGENBETON

- KENMERKEN VAN WEGENBETON
- KENMERKEN VAN MATERIALEN
- OPPERVLAKKENMERKEN VAN WEGVERHARDINGEN
- SAMENSTELLING VAN WEGENBETON
- ENKELE BIJZONDERE TOEPASSINGEN

# INHOUDSTAFEL

|   |    |
|---|----|
| INLEIDING   | 4  |
| 1. KENMERKEN VAN BETON VOOR WEGVERHARDINGEN EN TOEBEHOREN VAN WEGEN   | 5  |
| 1.1. Aanbevelingen in termen van samenstelling en drukweerstand   | 5  |
| 1.2. Watergehalte van beton   | 7  |
| 1.3. Verwerkbaarheid van vers beton   | 11 |
| 1.4. Luchtgehalte van beton   | 13 |
| 1.5. Waterabsorptie van verhard beton   | 15 |
| 1.6. Weerstand tegen afschilfering  | 18 |
| 2. KENMERKEN VAN MATERIALEN VOOR BETON VOOR WEGVERHARDINGEN EN TOEBEHOREN VAN WEGEN IN BETON                  | 20 |
| 2.1. Granulaten   | 20 |
| 2.2. Cement   | 24 |
| 2.3. Aanmaakwater   | 25 |
| 2.4. Hulpstoffen  | 25 |
| 2.5. Kleurstoffen (pigmenten)   | 27 |
| 3. OPPERVLAKKENMERKEN VAN WEGVERHARDINGEN IN BETON  | 29 |
| 3.1. De veiligheid van de gebruikers  | 29 |
| 3.2. Geluidsarm beton   | 31 |
| 4. SAMENSTELLING VAN BETON VOOR WEGVERHARDINGEN EN TOEBEHOREN VAN WEGEN                                       | 34 |
| 4.1. Referentiekorrelverdelingskrommen voor wegenbeton  | 35 |
| 4.2. Praktische methode voor de bepaling van de dosering van granulaten: de methode van de kleinste kwadraten | 47 |
| 5. ENKELE BIJZONDERE TOEPASSINGEN VAN WEGENBETON  | 54 |
| 5.1. Gekleurd uitgewassen beton   | 54 |
| 5.2. Gefigureerd beton (of printbeton)  | 58 |
| 5.3. Beton bestemd voor herstelling van wegverhardingen   | 59 |
| 5.4. Wegenbeton op basis van gerecycleerde betonpuingranulaten  | 65 |
| 5.5. Walsbeton  | 70 |
| CONCLUSIES  | 74 |
| NUTTIGE NORMATIEVE REFERENTIES  | 75 |
| BIBLIOGRAFIE  | 78 |

# NAAR EEN OPTIMALE SAMENSTELLING VAN WEGENBETON

## VOORWOORD

Vers beton, samengesteld uit steenslag, zand, cement, water en hulpstoffen, dient zich door het binden en verharderen van het cement om te zetten tot een homogeen, resistent en duurzaam materiaal. Op het vlak van wegverhardingen in cementbeton, hoeft men de grote duurzaamheid van betonwegen niet meer in de verf te zetten. Talloze oude wegen zijn momenteel nog steeds in gebruik en vormen het bewijs dat dergelijke wegen door de combinatie van een goed ontwerp, vakkundige uitvoering en regelmatig onderhoud, meer dan 50 jaar kunnen meegaan.

Om tot dit resultaat te kunnen komen, dienen de bestanddelen van het beton op zich de gewenste kenmerken te bezitten : harde granulaten, zuiver en vrij van schadelijke stoffen, zuiver water, kwaliteitscement van een sterkteklasse aangepast aan het werk.

Een ander essentieel kenmerk dat men dient na te streven, vertrekkende vanaf welomschreven gegevens zoals beschikbare granulaten, vereiste weerstand, verwerkings- en verdichtingsmiddelen van het beton, is een aangepaste samenstelling. De oplossing volgt uit een gelijktijdige studie van de korrelgrootte van het beton, het cementgehalte en de hoeveelheid mengwater. De studie van de korrelverdeling van de betonsoorten, waar talloze onderzoekers zich op toeleggen, maakt gebruik van technieken die algemeen gangbaar geworden zijn. Sommige doen een beroep op ideale korrelverdelingskrommes als referentie om de verhoudingen van inerte grondstoffen te bepalen die een beton opleveren waarvan de korrelverdeling zo dicht mogelijk deze van de referentiekrommes benadert.

Er zijn verschillende redenen waarom de publicatie van dit document ons interessant lijkt. Naast een synthese van de eisen waaraan een wegverharding moet voldoen en een overzicht van de bestanddelen van het beton, wordt heel wat aandacht besteed aan de ideale korrelverdelingskrommes en een methode om de verhoudingen van de grondstoffen te bepalen om die ideale kromme te benaderen.

Deze publicatie richt zich vooral tot aannemers, verantwoordelijken van betoncentrales maar ook tot bouwheren, ontwerpers die te maken krijgen met het beheer van een betonweg.

Om deze gids te kunnen samenstellen, werden de bevindingen van talloze experimentele waarnemingen op de werf en in laboratorium als leidraad gebruikt. Deze waren het resultaat van een nauwgezette samenwerking tussen FEBELCEM en het Nationaal Centrum voor Wetenschappelijk en Technisch Onderzoek voor de Cementnijverheid (CRIC-OCCN).

## INLEIDING

Betonsoorten bestemd voor toepassingen van wegenbouw onderscheiden zich van beton voor kunstwerken door hun verwerking (aanbrenging) en door de belasting waaraan zij onderworpen worden. De vereisten en de principes voor de samenstelling zijn dus verschillend.

Het aanbrengen van wegenbeton is zeer specifiek : de verdichtingsmiddelen zijn bijzonder krachtig en het rendement van het aanleggen dient hoog te zijn, rekening houdend met de grote hoeveelheden die men dient te realiseren. De glijbekistingsmachines, uitgerust met talrijke trilnaalden, vergen een homogeen beton met een constante verwerkbaarheid, waarbij de ontkisting onmiddellijk volgt op de verdichting.

Wegen zijn, omwille van de grote blootgestelde oppervlakte, bijzonder onderhevig aan de inwerking van atmosferische invloeden. Voor alle wegentoepassingen is de bescherming van vers beton tegen vorst en verdamping van het water van cruciaal belang. Bovendien, in geval van wegverhardingen of bijhorigheden, is de weerstand van verhard beton tegen vorst en dooizouten van primordiaal belang. Zo dient beton dusdanig samengesteld te zijn dat een compact mengsel wordt bekomen met een minimum aan holle ruimtes. Daarom wordt wegenbeton gekenmerkt door een relatief laag gehalte aan zand en een gehalte aan water dat strikt beperkt is tot de hoeveelheid vereist voor de bevochtiging van het mengsel.

Dit document is bedoeld om te herinneren aan de regels waaraan de samenstelling van wegenbeton dient te voldoen. Dankzij het naleven van deze regels zal het beton voor wegverhardingen en bijhorigheden van de weg zijn natuurlijke kenmerken van duurzaamheid bewaren.



# 1. KENMERKEN VAN BETON VOOR WEGVERHARDINGEN EN TOEBEHOREN VAN WEGEN

## 1.1. AANBEVELINGEN IN TERMEN VAN SAMENSTELLING EN DRUKWEERSTAND

Tabel 1 geeft een samenvatting van de minimum aanbevelingen inzake samenstelling van beton voor wegverhardingen terwijl tabel 2 de minimum vereiste drukweerstand weergeeft. Deze aanbevelingen zijn afhankelijk van het type rijbaan en hebben betrekking op het minimum cementgehalte, de verhouding water-cement en het luchtgehalte in het beton. De samenstelling zelf – materiaalkeuze en verhoudingen – zal behandeld worden in de hoofdstukken 2 en 3.

Een opmerking die zich meteen opdringt : in het merendeel van de gevallen ligt het minimum aanbevolen cementgehalte hoger dan datgene wat strikt genomen noodzakelijk is om de opgelegde drukweerstand te bekomen. Dit minimum cementgehalte is dus niet enkel bedoeld om een bepaalde mechanische weerstand te bereiken, maar vooral om de duurzaamheid van de wegverhardingen te waarborgen tegen atmosferische invloeden en dooizouten en tevens een zeer goede slijtweerstand te bieden en het behoud ervan onder invloed van het verkeer.

**TABEL 1 – AANBEVELINGEN BETREFFENDE DE SAMENSTELLING VAN WEGENBETON**

| Type verharding en plaatsing | Maximale nominale afmetingen van de granulaten $D_{max}$ | Minimum cementgehalte W/C-factor ( $kg/m^3$ ) | Luchtgehalte (%-v) |
|------------------------------|--|---|--------------------|
|------------------------------|--|---|--------------------|

### Autosnelwegen en wegen met druk en zwaar verkeer

|  |                          |     |                          |                   |
|--|--------------------------|-----|--------------------------|-------------------|
| Bovenste laag (eenlaagse of tweelaagse verharding) | $> 20$ mm                | 400 | $\leq 0,45$              | -                 |
|  | $6 < D_{max} \leq 20$ mm | 400 | $\leq 0,45$              | $3 \leq v \leq 6$ |
|  | $D_{max} \leq 6$ mm      | 425 | van 0,40 tot 0,45 (0,42) | $5 \leq v \leq 8$ |
| Onderste laag (tweelaagse verharding)              | $\geq 20$ mm             | 375 | van 0,45 tot 0,50 (0,48) | $3 \leq v \leq 6$ |

### Gewest- en gemeentewegen

|  |                          |     |                   |                   |
|--|--------------------------|-----|-------------------|-------------------|
| Bovenste laag (eenlaagse of tweelaagse verharding) | $> 20$ mm                | 375 | $\leq 0,50$       | -                 |
|  | $6 < D_{max} \leq 20$ mm | 375 | $\leq 0,50$       | $3 \leq v \leq 6$ |
|  | $D_{max} \leq 6$ mm      | 400 | van 0,45 tot 0,50 | $5 \leq v \leq 8$ |
| Onderste laag (tweelaagse verharding)              | $\geq 20$ mm             | 350 | $\leq 0,50$       | $3 \leq v \leq 6$ |

### Landbouwwegen, fietspaden en voetgangerszones

|  |                          |     |             |                   |
|--|--------------------------|-----|-------------|-------------------|
| Bovenste laag (eenlaagse of tweelaagse verharding) | $> 20$ mm                | 350 | $\leq 0,50$ | -                 |
|  | $6 < D_{max} \leq 20$ mm | 350 | $\leq 0,50$ | $3 \leq v \leq 6$ |
|  | $D_{max} \leq 6$ mm      | 375 | $\leq 0,50$ | $5 \leq v \leq 8$ |
| Onderste laag (tweelaagse verharding)              | $\geq 20$ mm             | 325 | $\leq 0,55$ | $3 \leq v \leq 6$ |

In België gebeurt de controle op de mechanische weerstand van wegenbeton door middel van druksterkteproeven op kernen (10 cm hoogte, drukvlak van 100 cm<sup>2</sup>) genomen in het wegdek op een ouderdom van minimum 90 dagen. Dit laat toe niet enkel de samenstelling van het beton te controleren maar tevens de plaatsing (verdichting, nabehandeling). Door de monsters na 90 dagen of meer te nemen, zal de invloed van de buitentemperatuur op de ontwikkeling van de mechanische weerstand van het beton minimaal zijn, en kan dus als geneutraliseerd beschouwd worden

Niettemin, in het geval van wegverhardingen aangebracht in twee lagen, nat in nat, met twee verschillende betonsamenstellingen, conform de aanbevelingen van tabel 1, is het niet mogelijk om kernen van voldoende dikte te nemen in het wegdek. De

bovenste laag heeft in dit geval inderdaad meestal een maximum dikte van 5 tot 8 cm. Bijgevolg wordt de druksterkte gecontroleerd op proefkubussen met zijde van 15 cm en op de ouderdom van 28 dagen. De bereiding en bewaring van de kubussen gebeurt volgens de richtlijnen van de norm NBN EN 12390-2 terwijl de drukweerstand gecontroleerd wordt volgens de norm NBN EN 12390-3.

De aanbevelingen in verband met de bijhorendheden van de weg en de veiligheidstootbanden die ter plaatse worden gestort, worden in tabel 3 gegeven. Hier wordt onderscheid gemaakt tussen beton conform de normen NBN EN 206-1 en NBN B 15-001 en ieder ander gebruiksklaar beton.

**TABEL 2 – AANBEVOLEN MINIMUM DRUKSTERKTE VAN BETON PER TYPE WEGEN**

| Type van wegen | Autosnelwegen en wegen met druk en zwaar verkeer | Gewest- en gemeentewegen | Landbouwwegen, fietspaden en voetgangerszones |
|----------------|--|--------------------------|---|
|----------------|--|--------------------------|---|

**Eenlaagse verharding of onderste laag in geval van een tweelaagse verharding  
Proeven op kernen (h = 10 cm, drukvlak van 100 cm<sup>2</sup>) op minimum 90 dagen**

|  |     |     |     |
|--|-----|-----|-----|
| Minimum gemiddelde druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )  | 70  | 60  | 55  |
|  | 60* | 50* | 45* |
| Minimum individuele druksterkte (N/mm <sup>2</sup> ) | 60  | 50  | 45  |
|  | 50* | 40* | 35* |

\* In geval van toevoeging van luchtbelvormer

**Bovenste laag van een tweelaagse verharding  
Proeven op kubussen (15 cm zijde) op 28 dagen**

|  |    |    |    |
|--|----|----|----|
| Minimum gemiddelde druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )  | 50 | 40 | 35 |
| Minimum individuele druksterkte (N/mm <sup>2</sup> ) | 40 | 30 | 25 |



**TABEL 3 – AANBEVELINGEN VOOR BIJHORIGHEDEN EN VEILIGHEIDSTOOTBANDEN TER PLAATSE GESTORT**

| Beton conform de normen<br>NBN EN 206-1 : 2001 en<br>NBN B 15-001 : 2004   | Alle andere beton  |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Druksterkteklasse C30/37</li> <li>- Ongewapend beton (OB) of gewapend (GB)</li> <li>- Omgevingsklasse EE4<br/>  hetzij :     - W/C-factor ≤ 0,50 voor OB<br/>                  - W/C-factor ≤ 0,45 voor GB</li> <li>- Consistentieklasse S1</li> <li>- <math>D_{max} \leq 31,5</math> mm</li> <li>- Cementgehalte <math>\geq 375</math> kg/m<sup>3</sup></li> <li>- Luchtgehalte tussen 3 en 6 %-v</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>D_{max} \leq 31,5</math> mm</li> <li>- Cementgehalte <math>\geq 375</math> kg/m<sup>3</sup></li> <li>- W/C-factor <math>\leq 0,50</math></li> <li>- Luchtgehalte tussen 3 en 6 %-v</li> <li>- Gemiddelde en individuele druksterkte respectievelijk <math>\geq 50</math> et <math>\geq 40</math> N/mm<sup>2</sup> (Proeven op kernen (h = 10 cm, drukvlak van 100 cm<sup>2</sup>) op minimum 90 dagen)</li> </ul> |

## 1.2. WATERGEHALTE VAN BETON

Water is een zeer belangrijke factor voor de kwaliteit en de kenmerken van beton. Het is dus noodzakelijk om de hoeveelheid op een optimale manier te bepalen en zeer nauwkeurig te meten. In tabel 1 en 3 zien we dat die hoeveelheid beperkt wordt door de W/C-factor.

Voor de berekening van de W/C-factor, mag men enkel rekening houden met het effectieve water ( $W_{eff}$ ). Met andere woorden, voor de berekening van de W/C-factor mag het water dat geabsorbeerd wordt door de granulaten niet meegerekend worden. Het effectieve water werd gedefinieerd als het water dat in aanmerking komt om met een cementkorrel in contact te komen en zich ermee te verbinden. Het water dat zich in de granulaten bevindt, heeft uiteraard geen enkele kans om met enige cementkorrel in contact te komen. Om het eenvoudig te houden wordt er aanvaard dat voor courant gebruikte granulaten in België, ongeveer 10 liter water geabsorbeerd wordt per m<sup>3</sup> beton en bijgevolg:

$$W_{eff} = W_{totaal} - 10$$

In deze relatie vertegenwoordigt  $W_{totaal}$  het totale watergehalte in het beton. Dit wordt berekend door de volgende relatie:

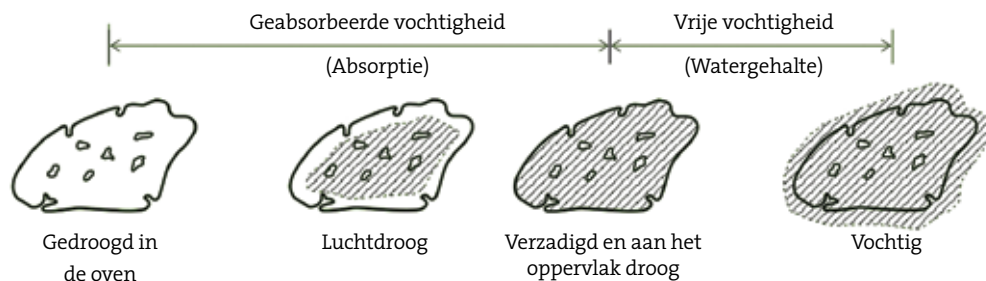
$$W_{totaal} = W_{granulaten} + W_{toegevoegd} + W_{hulpstoffen}$$

Met:

- $W_{granulaten}$ : het water aangebracht door alle granulaten (absorptiewater en water op het oppervlak van de granulaten);
- $W_{toegevoegd}$ : het mengwater toegevoegd aan het mengsel;
- $W_{hulpstoffen}$ : het watergehalte van eventuele hulpstoffen.

Voor bepaalde granulaten is de porositeit dusdanig dat de totale waterabsorptie hoger kan liggen dan 10 liter water per m<sup>3</sup> beton; het kan dus nuttig zijn om deze absorptiewaarde te kennen om de W/C-factor van het beton nauwkeuriger te kunnen berekenen. De waterabsorptie door de granulaten wordt bepaald door de procedure opgenomen in de norm NBN EN 1097-6. Deze kan gedefinieerd worden als zijnde het vochtgehalte van de verzadigde granulaten, droog aan de oppervlakte, uitgedrukt in percentage van de droge massa. Het oppervlaktewater van de granulaten wordt inderdaad opgeteld bij het water van het mengsel en ligt buiten het volume van de korrels. De basistoestand van de granulaten is dus verzadigd en droog aan de oppervlakte. In tabel 4 hierna ziet men enkele typische waarden voor waterabsorptie van granulaten.

Figuur 1 - Schematische voorstelling van de verschillende vochtigheidstoestanden van granulaten



**TABEL 4 – GEMIDDELDE WAARDEN VOOR WATERABSORPTIE EN REËLE VOLUMIEKE MASSA DIE ALGEMEEN GEVONDEN WORDEN VOOR BELGISCHE GRANULATEN**

| Type granulaat   | Waterabsorptie (%) | Reële volumieke massa (kg/m <sup>3</sup> ) |
|------------------|--------------------|--|
| Porfier          | 0,3 tot 0,8        | 2650 tot 2730                              |
| Zandsteen (Grès) | 0,8 tot 3,0        | 2460 tot 2690                              |
| Kalksteen        | 0,5 tot 1,0        | 2660 tot 2800                              |
| Maasgrind        | 0,9 tot 1,5        | 2630 tot 2650                              |
| Zeegrind         | 1,9 tot 4,5        | 2430 tot 2530                              |
| Rivierzand       | 0,3 tot 0,6        | 2630 tot 2650                              |



Figuur 2 – Controle van het verse beton. Op de achtergrond : beton wordt gedroogd met het oog op het bepalen van het watergehalte

Het totale watergehalte van vers aangemaakt beton kan proefondervindelijk bepaald worden door snel uitdrogen van een betonmonster, bijvoorbeeld op een gasstel. Tijdens deze proef bereikt de temperatuur van het materiaal 350°C en de totaliteit van het water verdampt vooraleer het zich kan verbinden met het cement door de hydratatiereactie.

Slechts een gedeelte van het effectieve water zal zich binden met het cement. De hoeveelheid water die nodig is voor de hydratatie van een cement bedraagt ongeveer 20 tot 25% van de cementmassa. Voor de verwerkbaarheid van het beton is een waterhoeveelheid van meer dan 25 % noodzakelijk. In feite dient men, om een homogeen en verwerkbaar beton te bereiden, het oppervlak van de granulaten en het cement te bedekken met een waterlaagje aangepast aan de beoogde kenmerken van het verse beton. Dit water vormt een laagje rond alle cementkorrels, zandkorrels en stenen en vermindert de wrijvingsweerstand tussen de korrels. De benodigde hoeveelheid water is dus afhankelijk van de som van de oppervlakken van al de te bevochtigen korrels. Tabel 5 geeft de hoeveelheden water nodig voor de bevochtiging van alle korrels. Deze zijn het resultaat van talrijke proefondervindelijke vaststellingen. Deze waarden worden gegeven in functie van de absolute volumes van de verschillende korrelfracties van de materialen in de samenstelling van het beton.

Deze hoeveelheden water volstaan om een aardvochtige consistentie te realiseren, m.a.w. beton dat kan verwerkt worden in de glijbekistingsmachine, en hebben betrekking op de materialen die algemeen te lande gebruikt worden. Indien een meer verwerkbaar beton vereist is, dient men een plastificeermiddel of zelfs een superplastificeerder toe te voegen.

Het feit te rekenen met absolute volumes stelt geen probleem. Het volstaat elke materiaal-massa, per korrelfractie, te delen door de reële volumieke massa van dit materiaal.

De totale hoeveelheid water om het mengsel aan te maken tot het een aardvochtige consistentie heeft, wordt bepaald door de afzonderlijke hoeveelheden welke nodig zijn om alle korrels van verschillende korrelgrootte te bevochtigen en dit in de verhouding van de absolute volumes waarin zij in de samenstelling van het mengsel voorkomen. Men dient te noteren dat deze hoeveelheid water berekend wordt voor droge materialen.

De tabellen 6, 7 en 8 geven voorbeelden voor de berekening van de hoeveelheid water voor drie samenstellingen van wegebeton. In deze voorbeelden hebben de zandsoorten 0/4 en 0/2 respectievelijk een fijnheidsmodulus van 3,0 en 1,5.

Deze voorbeelden laten toe vast te stellen dat het watergehalte van de diverse soorten wegebeton schommelt tussen 170 en 180 l/m<sup>3</sup>. Dit watergehalte is noodzakelijk om een homogeen beton te bekomen dat correct verwerkbaar is. Rekening houdend met het cementgehalte aanbevolen in tabel 1, laat een watergehalte in de orde van 180 l/m<sup>3</sup> algemeen toe dat de voorgeschreven W/C-factor kan gerespecteerd worden. In het tegenovergestelde geval dient het cementgehalte verhoogd te worden en/of de korrelverdeling van het inerte skelet aangepast te worden. Inderdaad, hoe groter de hoeveelheid fijne korrels (hoeveelheid en fijnheid van het zand), hoe hoger de vereiste hoeveelheid water.

**TABEL 5 – VEREISTE HOEVEELHEID BEVOCHTIGINGSWATER, W %, IN PROCENTEN VAN HET ABSOLUTE VOLUME VAN DE BESTANDDELEN VAN HET BETON**

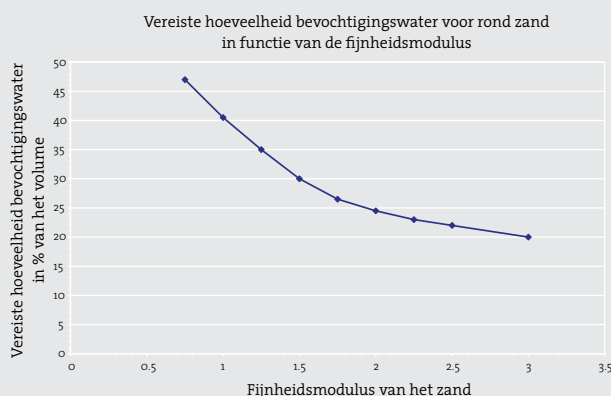
### Stenen

| Korrelgrootte (mm) | Waterbehoefte w (%) |                 |
|--------------------|---------------------|-----------------|
|                    | Ronde stenen        | Gebroken stenen |
| 20/32              | 3,20                | 3,50            |
| 14/20              | 3,70                | 4,10            |
| 10/20              | 4,00                | 4,40            |
| 6/14               | 5,00                | 5,50            |
| 6/10               | 6,00                | 6,60            |
| 4/6                | 7,00                | 8,00            |
| 2/4                | 8,50                | 10,00           |

### Zand

#### Rond zand

| Fijnheidsmodulus * | Waterbehoefte w (%) |
|--------------------|---------------------|
| 3,00               | 20,0                |
| 2,50               | 22,0                |
| 2,25               | 23,0                |
| 2,00               | 24,5                |
| 1,75               | 26,5                |
| 1,50               | 30,0                |
| 1,25               | 35,0                |
| 1,00               | 40,5                |
| 0,75               | 47,0                |



#### Breekzand

Gewassen breekzand : 30,0 tot 33,0 %

Ongewassen breekzand (in functie gehalte aan fijne deeltjes) : 33,0 tot 40,0 %

\* De fijnheidsmodulus wordt berekend door de som te maken van de gecumuleerde zeeffresten uitgedrukt in % op de zeven van 4 - 2 - 1 - 0,5 - 0,250 en 0,125 mm

### Cement

(absolute volumieke massa : 2,9 tot 3,1 kg/dm<sup>3</sup>)  
Waterbehoefte w = 70 %

**TABEL 6 - VOORBEELD 1 : SAMENSTELLING GELUIDSARM BETON 0/20**

| Materiaal           | Hoeveelheid materiaal in massa | Berekening hoeveelheden in volume | Berekening vereiste hoeveelheid bevochtigingswater |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Porfier 14/20       | 310 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,72 = 114 l/m <sup>3</sup>     | x 0,041 = 4,7 l/m <sup>3</sup>                     |
| Porfier 6/14        | 520 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,72 = 191 l/m <sup>3</sup>     | x 0,055 = 10,5 l/m <sup>3</sup>                    |
| Porfier 4/6         | 370 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,72 = 136 l/m <sup>3</sup>     | x 0,080 = 10,9 l/m <sup>3</sup>                    |
| Rivierzand 0/4      | 445 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,65 = 168 l/m <sup>3</sup>     | x 0,200 = 33,6 l/m <sup>3</sup>                    |
| Rivierzand 0/2      | 150 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,65 = 57 l/m <sup>3</sup>      | x 0,300 = 17,1 l/m <sup>3</sup>                    |
| CEM III/A 42,5 N LA | 400 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,95 = 136 l/m <sup>3</sup>     | x 0,700 = 95,2 l/m <sup>3</sup>                    |
| <b>Totaal</b>       |                                |                                   | <b>172,0 l water /m<sup>3</sup></b>                |

**TABEL 7 - VOORBEELD 2 : SAMENSTELLING VAN EEN GELUIDSARM BETON o/14**

| Materiaal           | Hoeveelheid materiaal in massa | Berekening hoeveelheden in volume | Berekening vereiste hoeveelheid bevochtigingswater |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Porfier 6/14        | 770 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,72 = 283 l/m <sup>3</sup>     | x 0,055 = 15,6 l/m <sup>3</sup>                    |
| Porfier 4/6         | 300 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,72 = 110 l/m <sup>3</sup>     | x 0,080 = 8,8 l/m <sup>3</sup>                     |
| Rivierzand o/4      | 450 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,65 = 170 l/m <sup>3</sup>     | x 0,200 = 34,0 l/m <sup>3</sup>                    |
| Zeezand o/2         | 250 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,65 = 94 l/m <sup>3</sup>      | x 0,300 = 28,2 l/m <sup>3</sup>                    |
| CEM III/A 42,5 N LA | 400 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,95 = 136 l/m <sup>3</sup>     | x 0,700 = 95,2 l/m <sup>3</sup>                    |
| <b>Totaal</b>       |                                |                                   | <b>181,8 l water /m<sup>3</sup></b>                |

**TABEL 8 - VOORBEELD 3 : SAMENSTELLING VAN EEN GELUIDSARM BETON o/6**

| Materiaal           | Hoeveelheid materiaal in massa | Berekening hoeveelheden in volume | Berekening vereiste hoeveelheid bevochtigingswater |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| Porfier 4/6         | 995 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,72 = 366 l/m <sup>3</sup>     | x 0,080 = 29,3 l/m <sup>3</sup>                    |
| Rivierzand o/4      | 700 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,65 = 264 l/m <sup>3</sup>     | x 0,200 = 52,8 l/m <sup>3</sup>                    |
| CEM III/A 42,5 N LA | 425 kg/m <sup>3</sup>          | : 2,95 = 144 l/m <sup>3</sup>     | x 0,700 = 100,8 l/m <sup>3</sup>                   |
| <b>Totaal</b>       |                                |                                   | <b>182,9 l water /m<sup>3</sup></b>                |

### 1.3. VERWERKBAARHEID VAN VERS BETON

Het essentiële kenmerk van verse betonspecie is de verwerkbaarheid, waardoor het geschikt is om correct verwerkt te worden. Talloze factoren beïnvloeden de verwerkbaarheid : type en dosering van het cement, korrelverdeling van het beton, vorm van de stenen, kwaliteit van het zand, gebruik van hulpstoffen en, uiteraard, het watergehalte.

Het watergehalte van vers beton is het kenmerk dat het makkelijkste kan aangepast worden om de verwerkbaarheid te wijzigen. Niettemin is het bekend dat de verhoging van het watergehalte belangrijke risico's inhoudt voor de kwaliteit van het beton, zoals bijvoorbeeld :

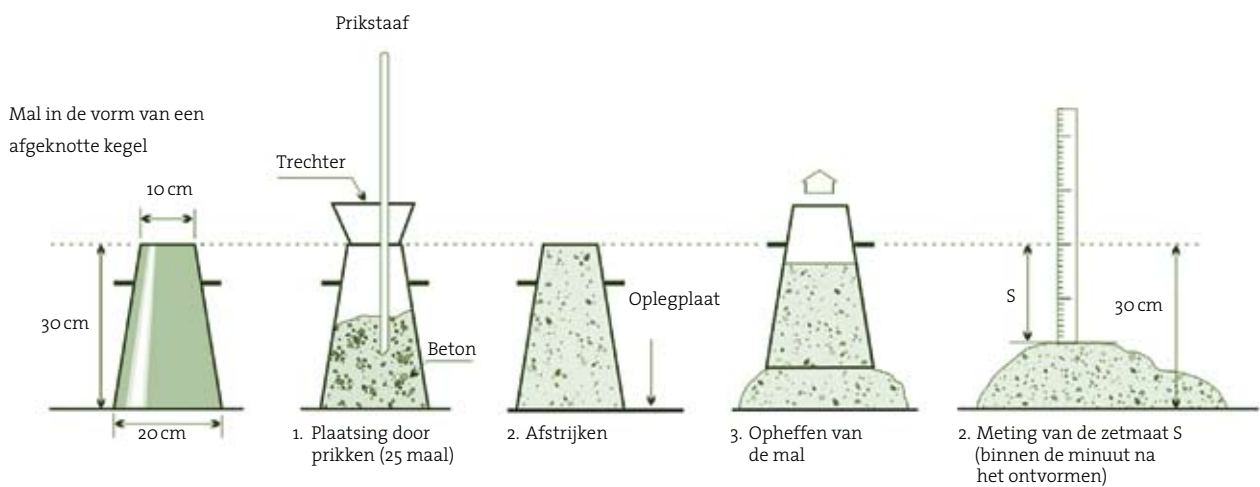
- de vermindering van de verdichtingsgraad en, tegelijkertijd, de mechanische weerstand;
- een grotere porositeit en bijgevolg een grotere gevoeligheid voor dooizouten;
- een grotere krimp.

De verwerkbaarheid van vers beton kan geëvalueerd worden dankzij genormaliseerde proeven : in het gamma van de consistentie van wegebeton, zijn de meest aangewezen proeven de zettingsproef met de kegel van Abrams (« Slump », NBN EN 12350-2, figuur 3) en de VeBe-proef (NBN EN 12350-3, figuur 4). De eerste bestaat uit de meting, in millimeter, van de zetting van een afgeknotte kegel verse betonspecie bij het uit de vorm nemen. De tweede proef bestaat uit de meting, in seconden, van de tijd nodig voor de totale zetting van dezelfde afgeknotte kegel op de bodem van een cilindervormige mal geplaatst op een genormaliseerde triltafel. De verhoging van de zetmaat van de kegel, evenals de daling van de VeBe-tijd wijzen op een toename van de vloeibaarheid van het beton.

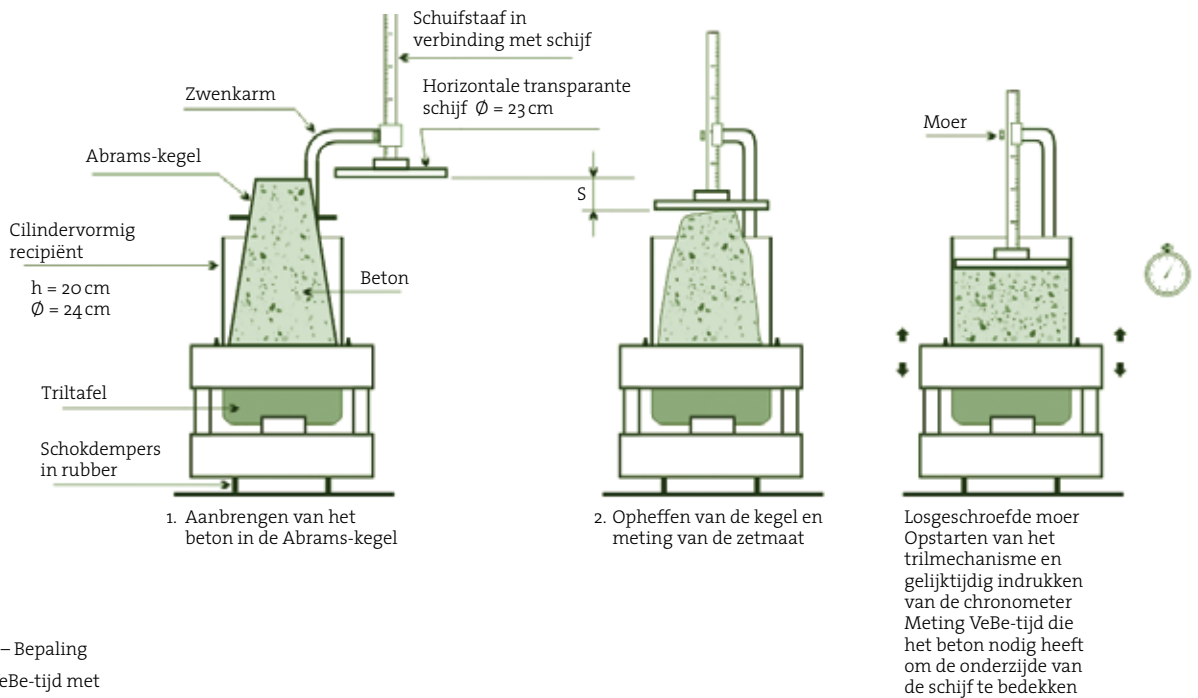
Teneinde een ideale plaatsing te garanderen, dient de verwerkbaarheid aangepast te zijn aan de middelen om het beton aan te brengen (manueel, trilbalk, glijbekistingsmachine) en het type werk (wegverharding, kantstrook, veiligheidstootband, ...).

Ter informatie, voor een wegverharding aangebracht met een glijbekistingsmachine, moet het beton een zetmaat (slump) hebben van 20 tot 60 mm (consistentieklasse S1 tot aan de lagere grenswaarde S2) of een VeBe-tijd van ongeveer 5 tot 7 seconden, wat overeenkomt met de VeBe-klasse V4 tot V3.

Voor een manuele plaatsing tussen vaste bekistingen en met behulp van een lichte trilbalk en trilnaalden, wordt een zetmaat van 80 tot 100 mm aanbevolen (klasse S2-S3). Men dient te noteren dat vroeger trilbalken zeer krachtig waren en een zeer lage zetmaat van het beton vereisten (van 0 tot 20 mm).



Figuur 3 – Bepaling van de zetmaat met de Abrams-kegel (slump-test)



Figuur 4 – Bepaling van de VeBe-tijd met de VeBe-consistometer

Figuur 5 – Aanbrengen van wegverharding in beton met trilnaalden en trilbalk.

Deze methode om beton aan te brengen vergt veel mankracht. Het beton blijft consistent, ook al is het klasse S2!



#### 1.4. LUCHTGEHALTE VAN BETON

Het gebruik van een luchtbelvormer heeft tot doel het beton een goede weerstand te geven tegen afschilfering door vorst in aanwezigheid van dooizouten.

De luchtbelvormers zijn hulpstoffen die een groot aantal microscopisch kleine luchtbellens verwekken en stabiliseren, gelijkmatig verdeeld in de betonmassa, ook na uitharding van het beton.

In tegenstelling tot de toevallig ingesloten lucht, zijn met opzet ingebrachte luchtbellens buitengewoon klein (van 10 tot 500  $\mu\text{m}$ ). Deze bellens zijn niet met elkaar verbonden en zijn gelijkmatig verdeeld in het mengsel (cement + water + lucht).

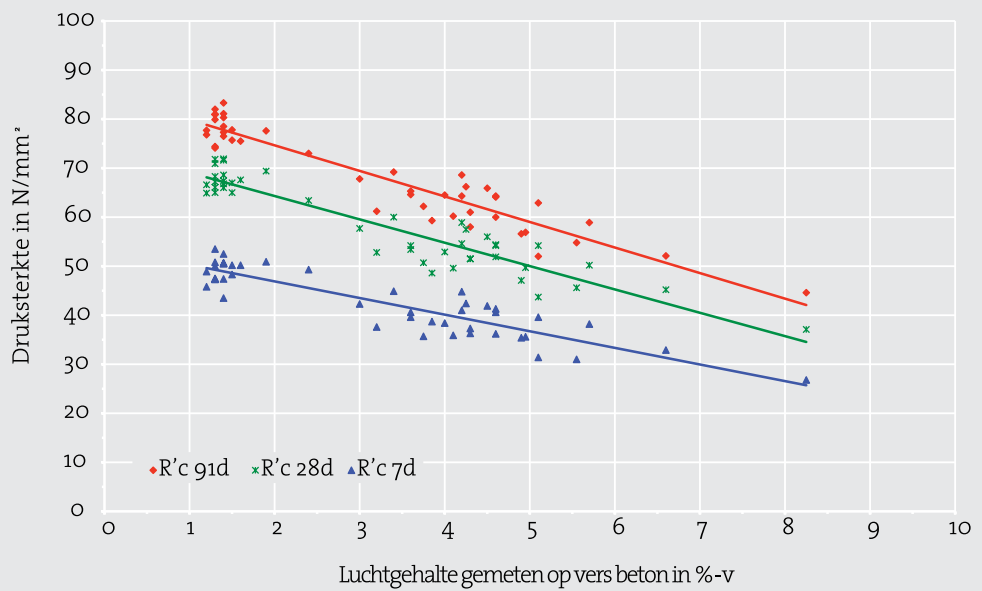
De eisen inzake luchtgehalte van wegenbeton zijn te vinden in tabel 1 voor de wegverhardingen en in tabel 3 voor lijnvormige elementen. Er dient opgemerkt dat wanneer de maximale korreldiameter verlaagt, het gehalte ingebrachte lucht dient verhoogd te worden. Inderdaad, een beton is des te gevoeliger voor afschilfering naarmate het mortelgehalte toeneemt. Dit mortelgehalte neemt toe bij kleinere korreldiameters.

De controle van het luchtgehalte op vers beton gebeurt met behulp van een aërometer (air meter) conform de norm NBN EN 12350-7 (drukmethode). Op verhard beton kunnen de kenmerken van de luchtbellens gecontroleerd worden door telling met behulp van een stereoscopische microscoop (norm NBN EN 480-11).

Naast de verbetering van de weerstand van beton tegen afschilfering, hebben de luchtbellens nog andere invloeden op de kenmerken van vers en verhard beton. De microscopische bellens werken als kogellagers tussen de zandkorrels waardoor de verwerkbaarheid van het beton toeneemt. De mechanische weerstand vermindert met de verhoging van het luchtgehalte. Het is aangetoond dat de drukweerstand met meer dan 5  $\text{N}/\text{mm}^2$  kan dalen per percent ingebrachte lucht (figuur 7).



Figuur 6 – Controle van het luchtgehalte met behulp van een aërometer (drukmethode volgens NBN EN 12350-7)



Figuur 7 – Druksterkte in functie van het luchtgehalte van het beton (Beton op basis van 375 kg/m<sup>3</sup> cement – W/C-factor = 0,45)



## 1.5. WATERABSORPTIE VAN VERHARD BETON

Beton is een poreus materiaal. Met andere woorden het bevat poriën of holtes. Deze poriën die ook bepalend zijn voor de weerstand en de duurzaamheid van het beton, worden veroorzaakt door de aanwezigheid van water tijdens de hydratatie. De hoeveelheid water die zich chemisch kan verbinden met portlandcement bedraagt ongeveer 25% van de cementmassa. Bovendien wordt een hoeveelheid water, gelijk aan ongeveer 15% van de cementmassa, gebonden als gelwater. Dit is water dat fysisch geabsorbeerd wordt aan het oppervlak van hydratatieproducten en een mono-moleculaire waterfilm vormt die gebonden wordt tussen de kristallisatieproducten. Het gelwater verdampt volledig in een droogoven op 105°C, maar ondanks deze vrije verbinding kan het niet reageren met het nog niet gebonden cement.

De gebonden hydratatieproducten hebben een absoluut volume dat lager ligt dan de som van de absolute volumes water en cement die reeds gereageerd hebben. Er wordt dus ruimte vrijgemaakt : het zijn capillaire holtes. Deze holtes kunnen leeg zijn, of gevuld met water. Zoals reeds aangehaald in paragraaf 1.2, voor een goede verwerkbaarheid van het beton zal de hoeveelheid water die gebruikt wordt voor het aanmaken van het beton leiden tot een W/C-verhouding die algemeen hoger ligt dan 0,40. Een deel van het water is dus noch scheikundig noch fysisch gebonden en vestigt zich in de capillaire holtes (poriënwater) vanwaar het eventueel achteraf kan verdampen. Deze vorming van capillaire holtes veroorzaakt een mechanische verzwakking van het beton. Gegeven het feit dat via dit netwerk van poriën makkelijk agressieve stoffen kunnen infiltreren in het beton, wordt de duurzaamheid eveneens negatief beïnvloed.

Het volume aan schadelijke holtes wordt in de praktijk bepaald door de proef op de wateropslorping door onderdompeling van het verharde beton (norm NBN B 15-215). Hoe groter het volume aan holtes, hoe groter het risico op schade door vorst en dooizouten.

Het betonoppervlak dat onderworpen is aan atmosferische invloeden is bijzonder groot; het is om deze reden dat de bestekken een maximum percentage absorptiewater voorschrijven gemeten in de bovenste 40 à 50 mm van de verharding. Deze proeven worden uitgevoerd op de bovenste schijven van de kernen (doorsnede 100 cm<sup>2</sup>) genomen uit de wegverharding. De maximum waterabsorptiewaarden door onderdompeling waarmee dient rekening gehouden te worden, zijn gegeven in tabel 9.

Factoren die van invloed zijn op het watergehalte, zijn eveneens van invloed op de waterabsorptie ; zo verhoogt het gebruik van fijn zand of iedere toevoeging van water de waterabsorptie (figuur 8). Zij is ook rechtstreeks afhankelijk van de kwaliteit van de bescherming van de betonspecie tegen verdamping. Deze bescherming dient zo snel mogelijk aangebracht te worden achter de machine waarmee het beton is aangebracht. Er is tevens vastgesteld dat voor iedere verhoging met 1% van het luchtgehalte van het beton, (bij constante W/C-factor) de waterabsorptie door onderdompeling verhoogt met meer dan 0,2 %-m (figuur 10). Enerzijds vermindert de aanwezigheid van luchtbellens die de capillaire poriën afsluiten de hoeveelheid water die geabsorbeerd wordt ; anderzijds heeft een beton met ingebrachte luchtbellens een kleinere massa dan een beton zonder ingebrachte lucht. Dit tweede fenomeen is doorslaggevend zodat de waterabsorptie uitgedrukt in % ten opzichte van de droge betonmassa over het algemeen hoger is.

**TABEL 9 – EISEN IVM DE WATERABSORPTIE EN DE VORSTBESTENDIGHEID IN AANWEZIGHEID VAN DOOIZOUTEN VOOR WEGENBETON**

| Type verharding en plaatsing | Maximale nominale afmetingen van de granulaten $D_{max}$ | Minimum cementgehalte (kg/m <sup>3</sup> ) | Waterabsorptie (%) | Gecumuleerd massaverlies aan vorst/dooi in aanwezigheid van dooizouten (g/dm <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|--|--|--------------------|---|
|------------------------------|--|--|--------------------|---|

### Autosnelwegen en wegen met druk en zwaar verkeer

|  |                          |     |                                      |          |
|--|--------------------------|-----|--------------------------------------|----------|
| Bovenste laag (eenlaagse of tweelaagse verharding) | $> 20$ mm                | 400 | $Abs_i \leq 6,5$<br>$Abs_m \leq 6,0$ | $\leq 5$ |
|  | $6 < D_{max} \leq 20$ mm | 400 | $Abs_i \leq 6,8$<br>$Abs_m \leq 6,3$ | $\leq 5$ |
|  | $D_{max} \leq 6$ mm      | 425 | $Abs_i \leq 7,0$<br>$Abs_m \leq 6,5$ | $\leq 5$ |
| Onderste laag (tweelaagse verharding)              | $\geq 20$ mm             | 375 | -                                    | -        |

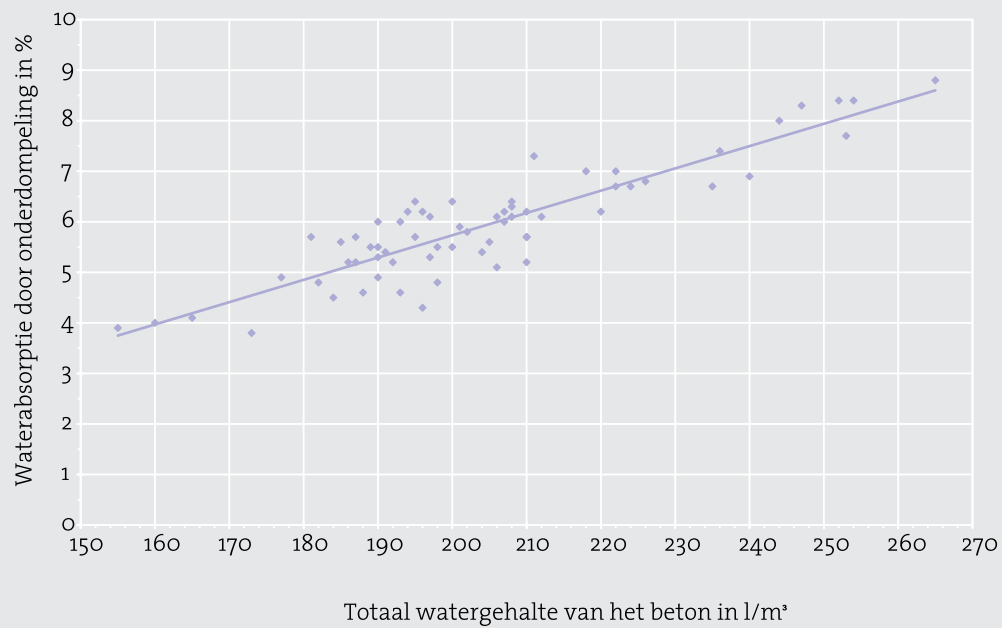
### Gewest- en gemeentewegen

|  |                          |     |                                      |           |
|--|--------------------------|-----|--------------------------------------|-----------|
| Bovenste laag (eenlaagse of tweelaagse verharding) | $> 20$ mm                | 375 | $Abs_i \leq 6,5$<br>$Abs_m \leq 6,0$ | $\leq 10$ |
|  | $6 < D_{max} \leq 20$ mm | 375 | $Abs_i \leq 6,8$<br>$Abs_m \leq 6,3$ | $\leq 10$ |
|  | $D_{max} \leq 6$ mm      | 400 | $Abs_i \leq 7,0$<br>$Abs_m \leq 6,5$ | $\leq 10$ |
| Onderste laag (tweelaagse verharding)              | $\geq 20$ mm             | 350 | -                                    | -         |

### Landbouwwegen, fietspaden en voetgangerszones

|  |                          |     |                                      |           |
|--|--------------------------|-----|--------------------------------------|-----------|
| Bovenste laag (eenlaagse of tweelaagse verharding) | $> 20$ mm                | 350 | $Abs_i \leq 6,8$<br>$Abs_m \leq 6,3$ | $\leq 20$ |
|  | $6 < D_{max} \leq 20$ mm | 350 | $Abs_i \leq 7,0$<br>$Abs_m \leq 6,5$ | $\leq 20$ |
|  | $D_{max} \leq 6$ mm      | 375 | $Abs_i \leq 7,0$<br>$Abs_m \leq 6,5$ | $\leq 20$ |
| Onderste laag (tweelaagse verharding)              | $\geq 20$ mm             | 325 | -                                    | -         |

$Abs_i$  = individuele waterabsorptie  
 $Abs_m$  = gemiddelde waterabsorptie

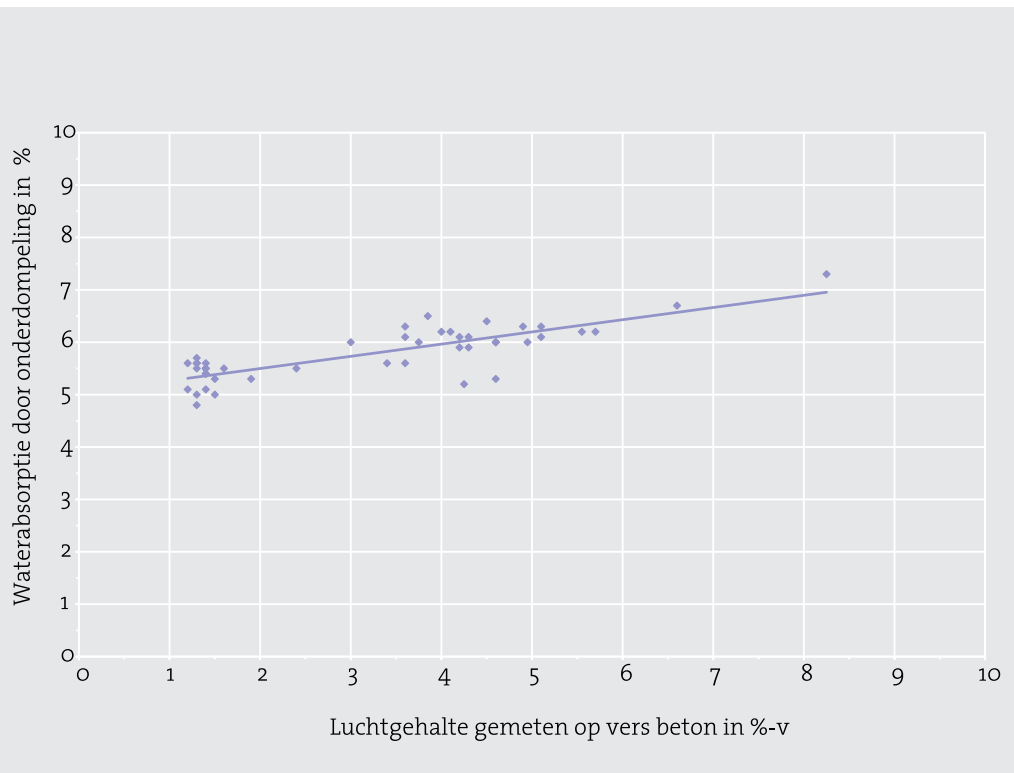


Figuur 8 – Waterabsorptie door onderdampeling in functie van het watergehalte van de betonspecie

Figuur 9 – Bescherming tegen uitdroging van vers geplaatst beton is een eerste vereiste voor de kwaliteit en bijgevolg voor de duurzaamheid van de wegverharding. Deze bescherming gebeurt meestal door het aanbrengen van een waterdicht membraan (links) of de verstuiving van een nabehandlingsproduct (rechts)



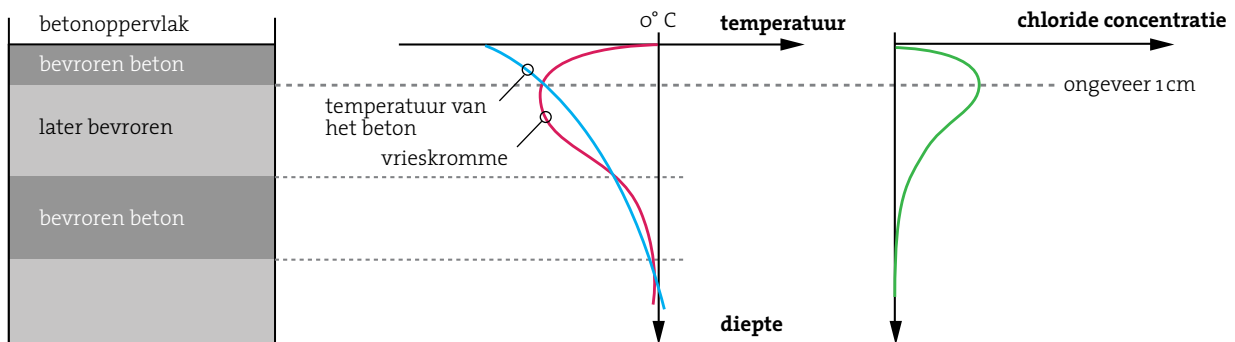
Figuur 10 – Waterabsorptie door onderdampeling in functie van het luchtgehalte (Beton op basis van 375 kg/m<sup>3</sup> cement - W/C-factor = 0,45)



## 1.6. WEERSTAND TEGEN AFSCHILFERING

Vorst, in combinatie met de inwerking van dooizouten, vormt een ernstige belasting voor het betonoppervlak. De verzwarende inwerking van dooizouten is te wijten aan volgende factoren:

- het smelten van het ijs door de zouten is een endothermische reactie. De warmte die nodig is, wordt onttrokken aan het materiaal wanneer het in contact komt met het zout, m.a.w. aan de toplaag van het beton, die plots gaat afkoelen. Er verschijnt dus een thermische gradiënt die interne spanningen met zich meebrengt waardoor er scheurvorming in het beton kan ontstaan;
- het smelten van het ijs behoudt een hoge mate van verzadiging in de bovenste laag;
- na een periode van dooi krijgt men water met een hoge concentratie aan chloorverbindingen. Deze worden meegevoerd door capillaire absorptie en diffusie. De aanwezigheid van zout verlaagt het vriespunt en dit stijgt nog naarmate de concentratie hoger wordt. Metingen op werken die aan zout onderhevig zijn tonen aan dat de chloorverbindingen over het algemeen concentratieprofielen vertonen in functie van de diepte zoals te zien is op figuur 11. De combinatie vriespunt/temperatuur van het beton kan dusdanig zijn dat twee lagen vorst gescheiden worden door een tussenlaag die niet bevroren is. Indien, tengevolge van een bijkomende daling van de temperatuur, het water van deze laag gaat bevriezen, vindt deze geen expansieruimte meer, waardoor de bovenste laag in feite wordt opgeduwd. Dit effect wordt «afschilfering» genoemd;
- omwille van het feit dat de zoutconcentratie sterk kan verschillen, ontstaat er osmotische druk waarvan de gevolgen eveneens gecumuleerd worden.



Figuur 11 – Water dat in lagen befrist in een beton blootgesteld aan de inwerking van dooizouten kan barsten veroorzaken

De aanbevelingen inzake vorstbestendigheid in aanwezigheid van dooizouten worden vermeld in tabel 9. De controle wordt uitgevoerd op kernmonsters genomen van de wegverharding conform het ontwerp van norm ISO-DIS 4846-2. Dit voorziet opeenvolgende cycli van vorst-dooi (tussen  $-18^{\circ}\text{C}$  en  $+20^{\circ}\text{C}$ ) op monsters waarvan het oppervlak bedekt is met een oplossing van een ontdooingsproduct (meestal  $\text{CaCl}_2$ ). Om de 5 cycli, wordt het verlies van massa van het monster gemeten. De ervaring toont dat de weerstand tegen afschilfering in situ van het beton goed is voor gecumuleerd verlies van materie dat lager ligt dan  $10 \text{ g/dm}^2$  na 30 cycli van vorst/dooi.

Laat ons signaleren dat er in 2006 een Europese technische specificatie gepubliceerd werd. Deze stelt 3 proefmethodes voor om de weerstand tegen dooizouten van beton te meten. De referentie proefmethode is de Slab test. Deze methode voorziet een opeenvolging van 56 cycli vorst/dooi tussen  $-20^{\circ}\text{C}$  en  $+20^{\circ}\text{C}$ . Het oppervlak van de monsters wordt bedekt met een  $\text{NaCl}$  oplossing en het verlies van de massa wordt om de 7 cycli gerecupereerd. De eerste oriëntatieproeven hebben aangetoond dat deze methode strenger is dan de methode ISO-DIS 4846-2. Bijgevolg dienen de goedkeuringscriteria voor beton aangepast te worden en deze zijn op dit ogenblik nog niet gekend.

Figuur 12 – Afschilfering op een wegverharding te wijten aan de inwerking van vorst en dooizouten



## 2. KENMERKEN VAN MATERIALEN VOOR BETON VOOR WEGVERHARDINGEN EN TOEBEHOREN VAN WEGEN IN BETON

### 2.1. GRANULATEN

Granulaten bestaan uit minerale korrels die, afhankelijk van hun afmetingen (tussen 0 en 125 mm), te situeren zijn bij de vulstoffen, zand, granulaatmengsels of stenen. Ze zijn afkomstig van zandformaties en grindbanken aangeslibd te land of te water, door de verbrijzeling van massieve rotsen (sedimentaire of magmatische) of nog door de recyclage van producten zoals sloopmateriaal. De vorm en de kenmerken variëren in functie van hun aard en de productietechnieken.

De minerale aard van een granulaat is een fundamenteel criterium voor het gebruik vermits elk rotsgesteente specifieke eigenschappen bezit op het vlak van mechanische weerstand, vorstbestendigheid en fysico-chemische eigenschappen. De meest gangbare granulaten voor de aanmaak van mortelspecie en beton zijn van alluviale oorsprong (rond of halfgebroken grind) of worden vervaardigd op basis van massieve rots (gebroken granulaten).

De granulaten worden geklasseerd in functie van hun korrelgrootte (verdeling op basis van de afmetingen van de korrels). Zij worden aangeduid door het koppel  $d/D$  waarbij  $d$ , de kleinste korrelgrootte van het granulaat is en  $D$ , de grootste.

De granulaten gebruikt voor het aanmaken van wegenbeton zijn zand, stenen en granulaatmengsels. Deze laatste kunnen echter grote schommelingen vertonen in korrelsaamenstelling, onder andere het zandgehalte. Ze zijn daarom niet aan te bevelen.

Granulaten worden beschouwd als gewoon wanneer hun volumieke massa hoger is dan  $2000 \text{ kg/m}^3$  en als licht indien hun volumieke massa lager is dan  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Granulaten dienen te voldoen aan bepaalde eisen en criteria voor kwaliteit en regelmatigheid, die afhankelijk zijn van hun oorsprong en het bewerkingsprocédé.

**TABEL 10 – ALGEMENE KENMERKEN VAN KORRELVERDELING VAN DE GRANULATEN VOLGENS NBN EN 12620**

| Families          | Afmetingen | Kenmerken  |
|-------------------|------------|--|
| Vulstoffen        | $0/D$      | $D < 2 \text{ mm}$ waarbij minstens 85 % doorval op $0,125 \text{ mm}$ en 70 % doorval op $0,063 \text{ mm}$ |
| Zand              | $0/D$      | $d = 0$ en $D \leq 4 \text{ mm}$   |
| Granulaatmengsels | $0/D$      | $d = 0$ en $D \geq 6,3 \text{ mm}$ en $\leq 45 \text{ mm}$   |
| Stenen            | $d/D$      | $d \geq 2 \text{ mm}$ en $D \geq 4 \text{ mm}$   |

## 2.1.1. EISEN INZAKE STENEN

In België is het gebruik van gebroken natuursteen en gebroken grind toegestaan voor het aanmaken van wegenbeton. Het gebruik van rolgrind dient vermeden te worden voor wegverhardingen voor autoverkeer. Grondstoffen die afkomstig zijn van rivieren of de zee hebben een glad of een licht ruw oppervlak wat ongunstig is voor het bekomen van een goede stroefheid van het wegoppervlak. Bovendien is de stroefheid van gebroken stenen gunstig voor een goede aanhechting aan de mortel. Dit voordeel vertaalt zich in een betere trekweerstand van het beton en een betere hechting van de stenen in het betonoppervlak dat onderhevig is aan slijtage door wrijving.

De maximum toegelaten afmeting van de korrels bedraagt 31,5 mm. Voor wegverhardingen in geluidsarm beton, is dit evenwel beperkt tot 20, zelfs tot 14 mm en 10 of 6,3 mm voor de bovenste laag bij tweelaagse plaatsing.

Om segregatie te vermijden is het noodzakelijk om stenen aan te voeren in smalle korrelfracties, zoals bijvoorbeeld 2/6,3, 6,3/14 en 14/20.

Stenen die gebruikt worden voor wegverhardingen in beton zijn onderworpen aan veel strengere kwaliteitscriteria dan deze voor klassiek structuurbeton. Deze criteria worden gegeven onder de vorm van categorieën in de norm NBN EN 12620 en de voorschriften voor het gebruik in wegenbeton worden gepreciseerd in de bestekken. Tabel 11 geeft de voornaamste voorwaarden inzake stenen bestemd voor wegenbeton.

Men dient op te merken dat de stenen moeten afkomstig zijn van harde en slijtvaste rotsen. Zo worden er criteria opgelegd inzake weerstand tegen verbrijzeling (Los Angeles coëfficiënt LA), weerstand tegen afschuring of slijtage (Micro-Deval coëfficiënt MDE) en weerstand tegen polijsting (Polished Stone Value PSV). De Los Angeles coëfficiënt wordt gemeten door het materiaal te onderwerpen aan inslaande

kogels in een ronddraaiende trommel terwijl de Micro-Deval coëfficiënt erin bestaat het afschuringseffect te meten op stenen die in een horizontale cilinder worden geplaatst in aanwezigheid van water. Zo spreekt men van Micro-Deval coëfficiënt in aanwezigheid van water (MDE). De weerstand is des te beter naarmate de LA en MDE waarden lager zijn. Gegeven het feit dat wegenbeton een grote slijtvastheid dient te vertonen, dient men duidelijk gebruik te maken van de meest harde stenen en, meer bepaald scherpe en stroeve granulaten met de beste aanhechtingscoëfficiënt aan de mortel. Men dient niettemin te benadrukken dat wat betreft de druk- en de treksterkte van het beton, granulaten met een gemiddelde sterkte ruimschoots volstaan. Voor wegverhardingen met gering verkeer (landbouwwegen, fietspaden...) of voor de onderste lagen van een tweelaagsverharding, zijn de eisen veel minder streng. De versnelde polijstingscoëfficiënt laat toe de polijstingsweerstand van de stenen te kwantificeren. Het verlies aan stroefheid van een granulaat nadat het in dynamisch contact is gekomen met schurende materialen wordt gemeten. Het gaat hier om een zeer belangrijke karakteristiek vermits de snelle en herhaaldelijke doorgang van voertuigen op de steenslag aan het oppervlak kan leiden tot de polijsting ervan wat slipgevaar en remafstanden doet toenemen. Een hoge coëfficiënt is dus noodzakelijk. Enkele typische waarden voor de coëfficiënten Los Angeles, Micro-Deval in aanwezigheid van water en de versnelde polijsting staan vermeld in tabel 12.

Zeer bijzondere aandacht dient tevens te worden besteed aan de vorstgevoeligheid van de granulaten. Vorstgevoelige granulaten kunnen immers water opsorpen en vervolgens zwellen wanneer het vriest waardoor er barsten kunnen ontstaan wanneer zij dicht tegen het oppervlak komen. Men dient bijzonder waakzaam te zijn voor dit risico bij gebruik van zandsteen (grès) waarvan de lagen soms doorkruist worden door aders leisteen, ook bij sommige types berggrind of bepaalde materialen die brose gesteente bevatten.

**TABEL 11 – VOORNAAMSTE EISEN IVM STENEN BESTEMD VOOR WEGENBETON**

| Karakteristiek  | Voorschrift                         | Categorie volgens NBN EN 12620                         | Opmerking  |
|---|-------------------------------------|--|--|
| Gehalte aan fijne deeltjes (% in massa)                 | $\leq 1,5$<br>$\leq 4$              | $f_{1,5}$<br>$f_4$                                     | $D > 8 \text{ mm}$<br>$D \leq 8 \text{ mm}$  |
| Weerstand tegen verbrijzeling (Los Angeles coëfficiënt) | $\leq 25$<br>$\leq 30$              | $LA_{25}$<br>$LA_{30}$                                 | Slijtlagen<br>Onderste lagen ; lineaire elementen en indien bestek het toelaat, tevens voor slijtlagen van landbouwwegen en fietspaden |
| Schuurweerstand (Micro-Deval coëfficiënt)               | $\leq 20$<br>$\leq 25$              | $M_{DE20}$<br>$M_{DE25}$                               | Slijtlagen<br>Onderste lagen ; lineaire elementen en indien bestek het toelaat, tevens voor slijtlagen van landbouwwegen en fietspaden |
| Versnelde polijstingscoëfficiënt (PSV)                  | $\geq 50$<br>$\geq 40$<br>–         | PSV50<br>PSV <sub>Opgegeven</sub><br>PSV <sub>NR</sub> | Slijtlagen<br>Slijtlagen voor landbouwwegen en fietspaden indien het bestek dat toelaat<br>Onderste lagen en lineaire elementen        |
| Afplattingscoëfficiënt                                  | $\leq 20$<br>$\leq 25$<br>$\leq 30$ | $Fl_{20}$<br>$Fl_{25}$<br>$Fl_{30}$                    | $D > 16$<br>$8 < D \leq 16$<br>$D \leq 8$  |
| Gehalte aan chloorionen (%)                             | $\leq 0,03$                         | Opgegeven waarde                                       | -  |
| Gehalte aan schelpdelen (%)                             | $\leq 10$                           | $SC_{10}$  | Voor stenen van maritieme oorsprong  |
| Vorst-dooi weerstand                                    | $\leq 1$                            | $F_1$  | -  |
| Reële volumieke massa en waterabsorptiecoëfficiënt      | –                                   | Opgegeven waarde                                       | -  |

**TABEL 12 – GEMIDDELDE WAARDEN VOOR DE COËFFICIËNTEN LOS ANGELES, MICRO-DEVAL IN AANWEZIGHEID VAN WATER EN VERSNELDE POLIJSTING VAN BELGISCHE GRANULATEN**

| Type granulaat | Los Angeles (10/14) | Micro-Deval in aanwezigheid van water (10/14) | Versnelde polijstingscoëfficiënt |
|----------------|---------------------|---|----------------------------------|
| Porfier        | 11 tot 13           | 4 tot 8                                       | 53 tot 58                        |
| Zandsteen      | 13 tot 17           | 11 tot 24                                     | 55 tot 60                        |
| Kalksteen      | 20 tot 30           | 9 tot 17                                      | 37 tot 44                        |
| Gebroken grind | 17 tot 26           | 4 tot 10                                      | 55 tot 57                        |



Indien een granulaat niet volkomen beantwoordt aan de eisen inzake korrelgrootte, betekent dit niet noodzakelijk dat het niet geschikt zou zijn om een optimale korrelverdelingskromme te realiseren. Daarentegen dienen de eisen inzake de vorm en het percentage aan fijne deeltjes nauwgezet te worden gerespecteerd omdat dit bepalend is voor de verwerkbaarheid van het beton. Het niet-naleven van deze eisen leidt automatisch tot een hoger watergehalte van het beton. De vorm, bepaald door de afplattingscoëfficiënt, bepaalt de mate van afwijking van de steen in verhouding tot een ideale geometrische vorm, bol of kubus. Ronde grindkorrels zijn granulaten die over het algemeen het dichtst bij de bolvorm aanleunen, alhoewel sommige grindsoorten platte elementen bevatten van geringe dikte, waarvan enkel de scherpe randen wat afgerond zijn. De vorm van gebroken stenen is afhankelijk van de hardheid van het moedergesteente en het aantal breekcycli. Hoe meer de steen gebroken wordt, hoe meer de kubusvorm zal worden bekomen. Stenen met een platte en/of uitgerokken vorm bieden veel meer weerstand bij de verdichting van het beton en laten meer holle ruimtes na waardoor het beton minder goed wordt. Zogenaamd « her-broken » stenen die men op de Belgische markt vindt, zijn meer kubisch van vorm en verdienen de voorkeur indien men wil komen tot een kwaliteitsbeton.

### 2.1.2. EISEN INZAKE ZAND

De zandkwaliteit is in verschillende opzichten van doorslaggevend belang. Zij heeft een rechtstreekse invloed op de verwerkbaarheid, de duurzaamheid en de weerstand van het beton. Grof rivierzand 0/2 tot 0/4 met een fijnheidsmodulus hoger dan 2,4 is het meest geschikte zand voor beton voor wegverhardingen. Niettemin zullen wij in hoofdstuk 4 zien dat een zand met een minimum of zelfs helemaal geen korrels groter dan 2 mm, in welbepaalde gevallen, de voorkeur kan genieten.

#### PORFIER



#### GEROLD GRIND



#### KALKSTEEN



#### ZANDSTEEN



#### GEBROKEN GRIND

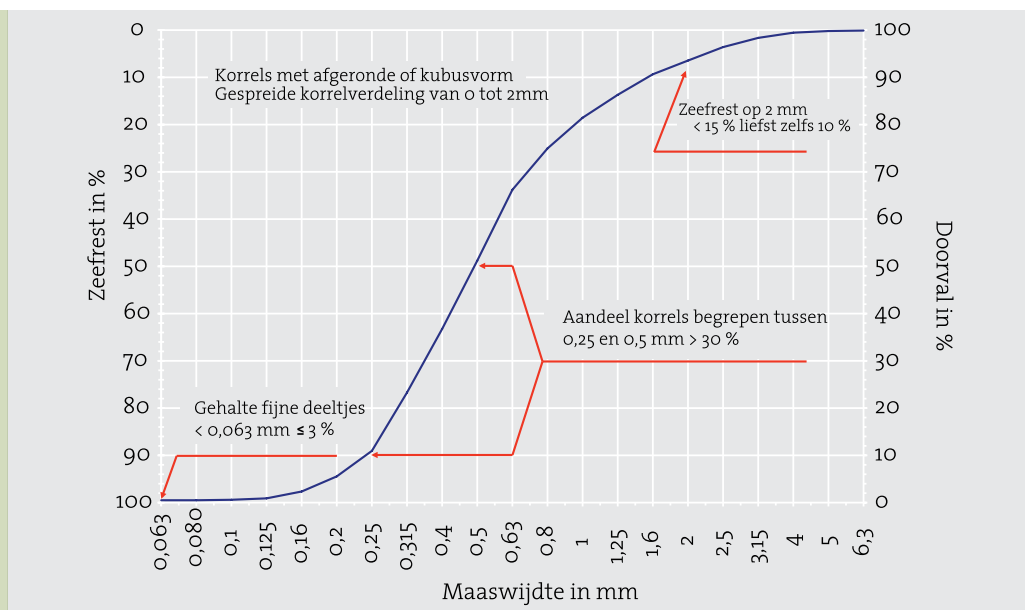


Figuur 13 – De meest courante soorten stenen in België

De norm NBN EN 12620 preciseert eveneens richtlijnen voor zand. De richtlijnen die van toepassing zijn op wegenbeton staan vermeld in de bestekken. De belangrijkste eisen hebben betrekking op de grootte van de korrels alsook op het gehalte aan fijne deeltjes. Dit laatste dient lager te liggen dan 3%. Algemeen genomen kan men stellen dat een goed zand voor beton de kenmerken dient te vertonen zoals vermeld op figuur 14.

Wegenbeton wordt gekenmerkt door een relatief laag gehalte aan zand. Een teveel aan zand vraagt om meer water en kan aanleiding geven tot een minder dicht en minder duurzaam beton.

Figuur 14 – Kenmerken van de korrelgrootte voor zand geschikt voor beton



## 2.2. CEMENT

De verschillende types cement die regelmatig gebruikt worden voor het maken van wegenbeton zijn cementsoorten met een sterkteklasse 42,5 (N of R). De keuze wordt gelaten tussen een portlandcement (CEM I) of een hoogovencement met een minimum slakgehalte van 65 % (CEM III/A). Cement met een sterkteklasse 52,5 wordt soms gebruikt voor bijzondere toepassingen zoals snelhardend beton dat bijvoorbeeld gebruikt wordt voor herstellingen.

Men dient absoluut cement te vermijden met een sterkteklasse van 32,5, zelfs in de zomer bij warm weer. Dit cement heeft immers een veel langere bindtijd en ontwikkelt een beton dat minder beschermd zal zijn tegen uitdroging.

Teneinde de alkali-silicareactie te vermijden, is het noodzakelijk een cement met beperkt alkaligehalte (type LA volgens de norm NBN B 12-109) te gebruiken voor wegverhardingen en bijhorigheden omwille van de vochtige omgeving waarin ze zich bevinden.

### 2.3. AANMAAKWATER

Aanmaakwater is onmisbaar om beton te bereiden. Indien men er echter teveel van gebruikt, is het een van de grootste vijanden: teveel water verhoogt het risico op scheurvorming van het beton en vermindert de weerstand alsook de duurzaamheid ervan.

Het aanmaakwater moet zuiver zijn. Het dient vrij te zijn van iedere stof die het binden of het verharderen van het beton zou kunnen beïnvloeden of de wapening zou kunnen corroderen.

Leidingwater is geschikt voor het bereiden van beton en behoeft geen voorafgaandelijke analyse.

Om allerlei redenen kan het gebeuren dat de betonfabrikant water dient te gebruiken van een andere oorsprong: waterwegen, putwater, gerecycleerd water, enz. In geval van twijfel aangaande de geschiktheid van het water voor het aanmaken van beton, dient men controles uit te voeren. De norm NBN EN 1008 geeft de eisen in dit verband. Het is mogelijk om de weerstand te vergelijken van twee dezelfde betons of twee dezelfde mortels, allebei op basis van het cement dat werkelijk gebruikt wordt voor het beton, waarbij de ene aangemaakt wordt met leidingwater, terwijl de andere aangemaakt wordt met het water van twijfelachtige oorsprong. Indien er geen duidelijke daling van de weerstand te merken is voor beton of mortel aangemaakt met het twijfelachtige water (maximaal 10% daling in sterkte) kan dit gebruikt worden voor de aanmaak van het beton. De test dient hernomen te worden in het geval de kenmerken van het water of het gebruikte cement zouden wijzigen.

### 2.4. HULPSTOFFEN

Plastificeerders die het benodigde water verminderen, superplastificeerders die het benodigde water in hoge mate verminderen en luchtbelvormers zijn de voornaamste

hulpstoffen die gebruikt worden voor wegebeton. Uitzonderlijk kunnen ook middelen gebruikt worden om de bindingsnelheid te beïnvloeden (vertragers en versnellers). Deze hulpstoffen dienen te voldoen aan de voorschriften van de norm NBN EN 934-2.

Men mag nooit uit het oog verliezen dat hulpstoffen bedoeld zijn om bepaalde kenmerken van het goed samengesteld beton te verbeteren. Het kan niet de bedoeling zijn om slecht samengesteld beton of beton dat samengesteld is uit ongeschikte of slecht gekozen materialen te corrigeren.

Het gebruik van een hulpstof veronderstelt meestal een test om te kijken of deze hulpstof compatibel is met het cement dat daadwerkelijk zal gebruikt worden op de werf. Het gebeurt namelijk soms dat de combinatie cement-hulpstof onverenigbaar is, of dat de dosering voorgesteld door de fabrikant niet strookt met het beoogde effect. In geval van twijfel zullen snelle laboratoriumtesten (meting van de verwerkbaarheid van vers beton, meting van de verwerkbaarheidsduur van het beton) toelaten om een aangepaste dosering te bepalen.

#### 2.4.1. PLASTIFICEERDERS - WATERBEPERKENDE VLOEIMIDDELEN

Plastificeerders zijn bijna steeds nodig om het wegebeton voldoende plastisch te maken. De voornaamste functie bestaat erin om, voor een gelijke verwerkbaarheid, tot een verhoogde mechanische weerstand te komen door het watergehalte van het beton te verlagen. Door het watergehalte te verminderen (minstens 10 l/m<sup>3</sup> beton) ontstaat er een stijging van de dichtheidsgraad en bijgevolg van de duurzaamheid. Deze middelen zijn op basis van lignosulfonaten, zouten van organische zuren, sulfonaatmelamines, sulfonaatnaftalenen en afgeleiden van melamines of naftalenen.

### 2.4.2. SUPERPLASTIFICEERDERS - STERK WATERBEPERKENDE VLOEIMIDDELEN

Superplastificeerders die meestal een korte tijd voor de verwerking toegevoegd worden aan de betonspecie hebben als voornaamste functie de verwerkbaarheid van het mengsel in sterke mate te verbeteren. Het zijn over het algemeen producten van organische synthese. De vaakst gebruikte middelen zijn afgeleiden van melamines of naftalenen, maar ook polyacrylaten en polycarboxylaten. Deze laatste zijn nieuwe moleculen van de chemische industrie die de prestaties van superplastificeerders aanzienlijk verbeterd hebben (grote verbetering van de verwerkbaarheid, langdurig behoud van de verbeterde verwerkbaarheid, ...).

In de wegenbouw worden superplastificeermiddelen minder vaak gebruikt dan plastificeermiddelen tenzij voor betonstorten waar weinig trillingsmiddelen beschikbaar zijn, of om beton met krachtige beginweerstand te realiseren dat reeds verkeer moet verdragen amper 72 uren na het aanbrengen ervan (herstelbeton met W/C-factor < 0,40).

### 2.4.3. LUCHTBELVORMERS

Luchtbelvormers hebben tot doel om microscopisch kleine luchtbellen te vormen en ze gelijkmatig te verdelen in het beton. Luchtbelvormers zijn tensioactieve stoffen : lignosulfonaten, harszuren, ethanolaminezouten, die men mengt in functie van de eigenschappen die men wenst te bereiken.

Het verharde beton bevat van nature een bepaalde hoeveelheid lucht, hetzij ingebracht bij de menging, hetzij ontstaan door de verdamping van niet gebonden aanmaakwater. Deze lucht (in de orde van 15 l/m<sup>3</sup>, hetzij 1,5 % van het volume) is willekeurig verdeeld. De luchtbelvormer daarentegen maakt het mogelijk om een hoger volume luchtbellen in te brengen en deze op meer gelijkmatige manier te verspreiden. De vorstbestendigheid van verhard beton, alsook de weerstand tegen dooizouten, worden aanzienlijk verbeterd. De microscopisch kleine luchtbellen die de capillaire netwerken doorbreken, beperken zo het ontstaan van spanningen die te wijten zijn aan het bevriezen van het poriënwater.

Het gebruiken van luchtbelvormers voor wegebeton is verplicht met uitzondering voor betonsoorten 0/32 met een hoog cementgehalte en een laag zandgehalte waardoor de mortelspecie niet vorstgevoelig is. De hoeveelheid ingesloten lucht aanwezig in andere soorten wegebeton dient hoger te liggen dan 3 % om zodoende een optimale duurzaamheid te garanderen bij de inwerking van vorst en dooizouten.

Meerdere factoren kunnen de doeltreffendheid van luchtbelvormers beïnvloeden. Bij de meest belangrijke kunnen wij het type luchtbelvormer citeren en het al dan niet aanwezig zijn van andere hulpstoffen. Inderdaad, wanneer er een plastificeermiddel gebruikt wordt simultaan met een luchtbelvormer, dan is deze laatste meestal efficiënter en kan de dosering bijgevolg ook lager liggen. Zie het voorbeeld in tabel 13.

**TABEL 13 – INVLOED VAN EEN PLASTIFICEERMIDDEL OP DE DOSERING VAN LUCHTBELVORMER**

| 375 kg/m <sup>3</sup> cement<br>CEM III/A 42,5 N LA<br>W/C-factor = 0,45<br>Zetmaat = ± 50 mm | Hoeveelheid<br>plastificeermiddel<br>(% in verhouding tot<br>hoeveelheid cement) | Hoeveelheid<br>luchtbelvormer<br>(% in verhouding tot<br>hoeveelheid cement) | % lucht in vers beton<br>(% - v) |
|---|--|--|----------------------------------|
| Beton zonder luchtbelvormer   | 0,35   | ---  | 1,4                              |
| Beton met luchtbelvormer  | 0,09<br>---  | 0,12<br>0,20   | 4,0<br>4,1                       |

Het type cement, de aanwezigheid van vliegas, het watergehalte, de W/C-factor en ook de korrelgrootte van de fractie « mortel » van het beton beïnvloeden eveneens de efficiëntie van de luchtbelvormers. Het mengen en de temperatuur oefenen ook een invloed uit. In feite, naarmate de temperatuur van het beton verhoogt, vermindert de hoeveelheid lucht voor eenzelfde dosering luchtbelvormer maar dit effect lijkt vooral uitgesproken naarmate de verwerkbaarheid van het beton hoger is (zetmaat > 50 mm); het langdurig mengen van beton vernietigt de luchtbellens en veroorzaakt zo tevens een daling van het gehalte ingebrachte lucht.

## 2.5. KLEURSTOFFEN (PIGMENTEN)

Een kleuring van het beton wordt soms voorgeschreven om esthetische redenen of omwille van de veiligheid (wegen in stedelijk milieu, fietspaden, verkeerseilanden, enz..).

Er bestaan twee soorten kleurstoffen: organische kleurstoffen en minerale kleurstoffen (natuurlijke of synthetische).

Minerale kleurstoffen worden het vaakst gebruikt. De dosering ervan schommelt meestal tussen 2 en 5% van de massa in verhouding tot de hoeveelheid cement afhankelijk van de gewenste tint. Indien de dosering hoger ligt dan 5% kunnen deze pigmenten een aanzienlijke vermindering veroorzaken van de sterkte van het beton omdat er omwille van hun korrelfijnheid meer water nodig is.

Men dient zeer omzichtig te werk te gaan bij het gebruik van organische kleurstoffen. De kleur van deze stoffen is minder stabiel dan deze van minerale kleurstoffen. Voor deze laatste wordt de stabiliteit van de kleur bevorderd door de fabricatie van synthetische pigmenten. Bovendien kunnen organische moleculen een invloed hebben op de snelheid waarmee de binding begint en op het hydratatieproces van het cement.

De voornaamste minerale kleurstoffen zijn:

- grijs tot zwart, rood, geel, bruin : ijzeroxides of ijzer-mangaandioxides ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ );
- wit : titaniumdioxide ( $\text{TiO}_2$ );
- groen : chroomoxyde ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ );
- blauw : kobaltoxyde;
- lichtgroen, felgeel, lichte oker : samengestelde metaaloxides;
- rood, oker, bruin : natuurlijke kleurstoffen op basis van aarde, bijgevolg organisch.

De werking van pigmenten wordt voornamelijk beïnvloed door de kleur van de fijne deeltjes van het beton : hoe helderder deze zijn, hoe doeltreffender de pigmenten. Een middel om de werking van de pigmenten te versterken bestaat er dus in, wit cement te gebruiken om de kleur te laten uitkomen of ook gekleurde granulaten (stenen en zand).



Figuur 16 – Wegverhardingen in gekleurd beton zijn multifunctioneel : publieke ruimtes, fietspaden, rijbanen voor bus of tram, ...

### 3. OPPERVLAKKENMERKEN VAN WEGVERHARDINGEN IN BETON

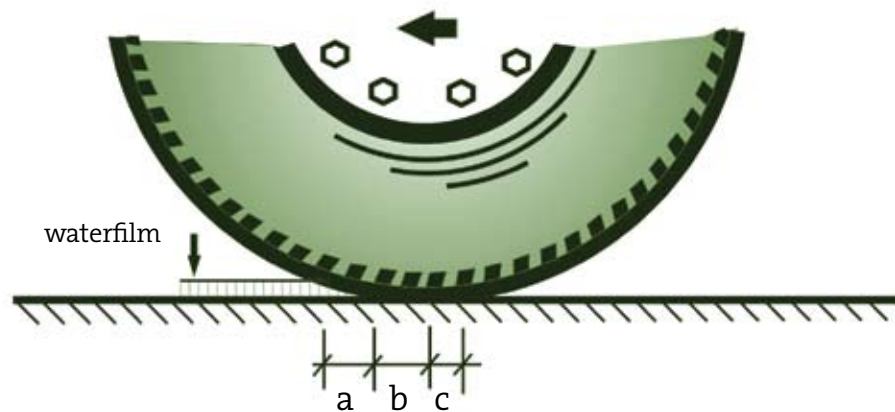
Wegverhardingen in beton dienen aan diverse criteria te voldoen in functie van het gebruik dat ervan gemaakt wordt. Deze criteria hebben uiteraard in de eerste plaats betrekking op de veiligheid van de gebruikers (glijweerstand en grip van de banden van het voertuig op het wegoppervlak) maar tevens op het rolgeluid dat zo laag mogelijk dient te zijn. Zo zijn de vlakheid van het wegdek en de textuur van het oppervlak van het allergrootste belang. Deze hangen af van de kwaliteit van de plaatsing van het beton maar ook van de samenstelling van het beton.

#### 3.1. DE VEILIGHEID VAN DE GEBRUIKERS

De glijweerstand tussen de banden van het voertuig en het wegoppervlak speelt een belangrijke rol in de veiligheid op de weg. Factoren die deze onmisbare slipweerstand beïnvloeden zijn, naast het rijgedrag (hetzij bewust, hetzij onbewust) van de bestuurder en de aanwezigheid van regenwater of ijsel, de diepte van het bandenprofiel, het lengteprofiel van de rijweg en de toestand en de oppervlakttextuur van het wegdek (micro- en macrottextuur).

Bij geringe snelheden wordt de stroefheid van de weg uitsluitend bepaald door de microtextuur. Voor een betonweg kan een dergelijk stroeve microtextuur, type schuurpapier, bekomen worden door eenvoudig borstelen van het wegoppervlak. De duurzaamheid van deze textuur zal des te groter zijn naarmate de gebruikte materialen meer bestand zijn tegen slijtage en polijsting en naarmate het verkeer minder druk zal zijn. Indien het gebruik van polijstbare materialen in het beton vermeden wordt of indien het verkeer ze tenminste niet aan het oppervlak doet verschijnen, kan een zekere mate van zelfherstel van de microtextuur verwacht worden. Door de wrijvingskrachten van de wielen op de rijbaan worden er continu korrels losgetrokken van de wegverharding en blijft de textuur voor het verkeer bijgevolg steeds gelijkwaardig. De fysisch-mechanische eigenschappen (Los Angeles, Micro-Deval in aanwezigheid van water, polijstingsweerstand) vereist voor granulaten voor de samenstelling van wegenbeton staan vermeld in hoofdstuk 2.1.

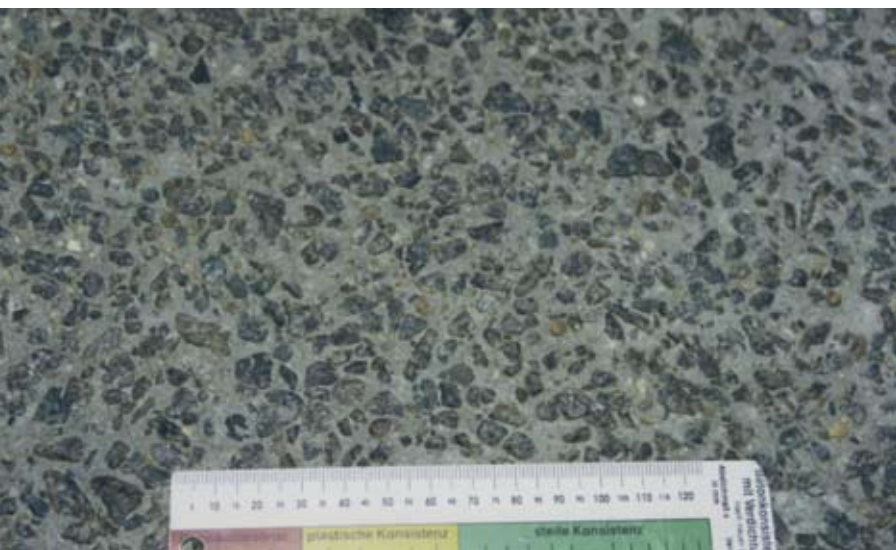
Voor hogere snelheden is een diepere macrottextuur noodzakelijk om het contact bandenrijbaan te kunnen bewaren, ook al staat er een waterfilm op het wegdek. Naarmate de snelheid toeneemt, zal de band het immers steeds moeilijker hebben om het water voor zich uit te duwen. Het contactoppervlak wordt steeds kleiner (figuur 17) : in de zone a wordt het contact volledig verbroken door de waterfilm ; in zone b, is deze film plaatselijk doorbroken door onregelmatigheden in het oppervlak, zodat wrijvingskrachten kunnen optreden dankzij de vervorming van de band ; het is pas in zone c, waar het water afgevoerd wordt dat er nog voldoende contact is. De dikte van de waterfilm alsook de textuur van de band en van de wegverharding zijn bepalend voor het belang van zone c. Zodra deze zone ophoudt te bestaan, verschijnt het alomgekende maar tevens gevreesde fenomeen van aquaplaning.



Figuur 17 – Contactzones tussen band en wegdek



Figuur 18 – De borsteling van het betonoppervlak gebeurt door een harde borstel met aaneensluitende haren in dwarsrichting over het verse beton te halen. De duurzaamheid van de microtextuur is afhankelijk van de kwaliteit van de mortelspecie (zand - cement - water - bescherming)



Figuur 19 – Het uitwassen is een bewerking waardoor de mortel aan het oppervlak verwijderd wordt om de stenen aan het oppervlak bloot te leggen. Deze behandeling is de enige die in België gebruikt wordt voor autosnelwegen en grote wegen omwille van het geringe rolgeluid dat erdoor bekomen wordt

Een stroeve en diepe macrotextuur bevordert de afvoer van het water, zodat de grootte van zone a beperkt blijft. Om de waterfilm te kunnen doorbreken in zone b, dient men bovendien te beschikken over een ruwe microtextuur. Zo zal deze, zoals in zone c, voldoende aanhechting mogelijk maken tussen band en wegdek.

Op primaire wegen met zwaar en snel verkeer, maar ook op bepaalde risicoplaatsen (nauwe bochten, remzones,...) van minder grote wegen, dient men te waken over de aanwezigheid van zowel een macrotextuur als van een microtextuur. Voor secundaire wegen waar de snelheid normaal gezien lager ligt, volstaat een goede microstructuur meestal wel. De verschillende oppervlakbehandelingen, toegepast in het kader van betonnen wegverhardingen, zijn het borstelen en het uitwassen (blootleggen). Het aanbrengen van groeven wordt niet meer toegepast teneinde de geluidshinder van het verkeer te beperken.

Behalve het gebruik van niet polijstbare materialen voor wegen waar de snelheid relatief hoog kan zijn, zal een oppervlakbehandeling door borsteling of door groeven geen bijzondere invloed hebben op de samenstelling van het beton. Men dient wel in ieder geval te vermijden dat men een beton krijgt met teveel mortel wat onvermijdelijk resulteert in een minder duurzame oppervlaktelaag.

De oppervlakbehandeling door uitwassen zal daarentegen een fijner korrelskelet vereisen, steeds met een geringe hoeveelheid mortel maar met een vrij grote hoeveelheid fijnkorrelige stenen (tussen 4 en 8 mm). Dit is een belangrijke eis om de geluidshinder van het verkeer te beperken en een esthetisch verantwoord uitzicht van het betonoppervlak te bekomen. Deze punten worden hierna verder uitgewerkt .



Figuur 20 – Het trekken van dwarse groeven gebeurt met behulp van een hark waarvan de tanden, in plastic of staal, onderling op een afstand van 20 tot 50 mm staan. De diepte van de groeven bedraagt 2 à 3 mm. Dit type behandeling werd veel gebruikt op drukke wegen maar is later in onbruik geraakt omwille van de akoestische hinder en het gebrek aan rijcomfort



### 3.2. GELUIDSARM BETON

Het contact tussen band en wegdek is een niet te verwaarlozen bron van geluidshinder die het rijcomfort van de automobilist belemmert en tevens niet onbelangrijke hinder veroorzaakt voor de buurtbewoners. Het merendeel van het dagdagelijkse geluid ligt tussen 30 en 90 decibel. Een niveau dat hoger ligt dan 90 dB wordt voornamelijk geassocieerd met het beroepsleven (industrie, leger, ...) en bepaalde vrijetijdsbestedingen (de jacht, muziek, mechanische sporten). Over het algemeen valt het autoverkeer te situeren in de buurt van ongeveer 80 dB. Men dient te noteren dat de decibelschaal een logaritmische schaal is. Zo zal een toename met 3 decibel overeenkomen met een verdubbeling van het geluidsniveau, terwijl 10 decibel dit geluidsniveau doet vertienvoudigen. Decibels kunnen ook niet opgeteld worden: twee voertuigen met een geluidsniveau van 80 decibel produceren niet het geluid van 160 decibel, maar van 83 decibel.

Er zijn diverse aspecten die bijdragen tot het geluidsniveau van het verkeer, nl. de vlakheid of de megatextuur en de oppervlakttextuur. Men dient absoluut te vermijden dat er problemen zijn met de vlakheid. Zo verdient de aanleg met een slipform, uitgerust met een langse afstrijkbalk aan de achterzijde (supersmoother) de voorkeur. Op het vlak van samenstelling en bereiding van het beton zijn een beton met een gelijkmatige consistentie

aangepast aan de machines en de werfomstandigheden alsook een regelmatige bevoorrading essentiële factoren tot het bekomen van een goede vlakheid van het oppervlak.

De oppervlakttextuur, nl. de macrottextuur, moet voldoende diep zijn. Dit laat toe dat de lucht die door de band wordt weggedrukt, kan ontsnappen in of aan het oppervlak van het wegdek. Om dus het rolgeluid optimaal te verminderen moet de techniek van de chemische uitwassing toegepast worden als oppervlakbehandeling en dient een aangepaste betonsamenstelling op punt te worden gesteld. Dit gebeurt op volgende manier:

- beperken van het maximum kaliber van het grootste granulaat. Hoe kleiner nl.  $D_{max}$  zal zijn, hoe minder lawaaierig het wegdek zal zijn. In de praktijk zal  $D_{max}$  beperkt zijn tot maximum 20 mm. Fijnere betons (0/6, 0/10) zijn mogelijk maar in deze gevallen wordt de techniek van het aanbrengen in dubbele laag toegepast;
- een groot gehalte van granulaat gebruiken met een korrelgrootte tussen 4 en 8 mm. De aanbevelingen vermelden een minimum van 20 % steenslag met een korrelgrootte tussen 4 en 6 mm of 25 % steenslag met een korrelgrootte tussen 4 en 8 mm;
- de diepte van het uitwassen beperken tot een waarde rond 1 mm (tussen 0,8 en 1,2 mm).



Figuur 21 - Supersmoother : lange afstrijk-balk aan de achterzijde van de machine die zich dwars over de weg verplaatst

Metingen hebben uitgewezen dat een wegverharding in uitgewassen beton 0/20 leidt tot een verbetering met 7 dB(A) van de geluidshinder door het verkeer, in vergelijking met een gegroefd beton 0/32. Men heeft in Estaimpuis in 2002 ook andere metingen uitgevoerd op vier experimentele wegvakken in doorgaand gewapend beton aangelegd in dubbele laag met behulp van twee glijbekistingsmachines, met voor de bovenste laag een  $D_{max}$  waarde van 7 mm (tegenwoordig 6 mm volgens de norm NBN EN 12620), 10, 14 en 20 mm. Tabel 14 geeft een samenvatting van de resultaten. Deze tonen aan dat hoe kleiner de  $D_{max}$  waarde van de steen is, hoe minder lawaaiër het wegdek, maar de verschillen zijn relatief klein. Wat wel duidelijk blijkt, is dat een uitvoering van een wegdek in twee lagen, nat in nat gelegd (dubbellagig) een aanzienlijke verbetering oplevert van de vlakheid van het oppervlak en dus van het geluidsarm karakter van het wegdek. De reden hiervoor blijkt te zijn dat het voor de tweede glijbekistingsmachine veel gemakkelijker is om een dunnere laag aan te brengen; de machine kan doorrijden bij een constante snelheid en zodoende kunnen de door het geleidingssysteem (draden) opgelegde niveaus beter nageleefd worden.

**TABEL 14 – GELUIDSMETINGEN IN ESTAIMPUIS OP VERSCHILLENDE SECTIES FIJN BETON (METINGEN UITGEVOERD 1 JAAR NA DE INGEBRUIKNAME VAN DE WEG)**

| Referentiesnelheid<br>(km/u) | Geluidsniveau van een licht voertuig in dB(A) (SPB methode (Statistical Pass-by Method)) |             |              |              |
|------------------------------|--|-------------|--------------|--------------|
|                              | Sectie 4/7   | Sectie 7/10 | Sectie 10/14 | Sectie 14/20 |
| 70                           | 75,9   | 76,6        | 77,2         | 77,8         |
| 90                           | 79,4   | 80,0        | 80,9         | 81,4         |



|   |   |
|---|---|
| 1 | 2 |
| 3 | 4 |
| 5 | 6 |
| 7 | 8 |

Figuur 22 – Aanbrengen van dubbellaags doorgaand gewapend beton in Estaimpuis  
 1 & 2 – Aanbrengen van de onderste laag (beton 0/32)  
 3 & 4 – Aanbrengen van de bovenste laag nat in nat (5 cm beton 0/7 of 6 cm beton 0/10 of 8 cm beton 0/14 of 8 cm beton 0/20)  
 5 – Verstuiven van de bindingsvertrager  
 6 – Plaatsen van een waterdicht membraan om het verse beton te beschermen tegen uitdroging  
 7 – Verwijderen van de mortel aan het oppervlak na enkele uren verharding (uitwassen)  
 8 – Uitzicht van uitgewassen beton, fijne macrotexuur verantwoordelijk voor het beperkte rolgeluid

## 4. SAMENSTELLING VAN BETON VOOR WEGVERHARDINGEN EN TOEBEHOREN VAN WEGEN

De keuze van de verhoudingen van de verschillende bestanddelen is van primordiaal belang om een kwaliteitsbeton te bekomen. Het algemeen verspreid gebruik van inwendig trillen en glijbekistingsmachines die geen correctie toelaten na het plaatsen van het beton, maken het gebruik van aangepaste samenstellingen noodzakelijk.

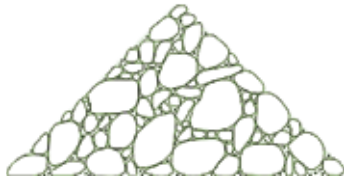
Er bestaan in de vakliteratuur talloze berekeningsmethodes voor de samenstelling van beton. Zo kunnen wij bijvoorbeeld de wet van FERET (1890) citeren, de wet van FULLER (1907), de wet van ABRAMS (1918), de wet van BOLOMEY (1925), ... Het is evenwel steeds noodzakelijk om deze te interpreteren in functie van het materiaal dat werkelijk beschikbaar is. De ervaring is van zeer groot belang op dit vlak, het is daarom aan te bevelen om zich te wenden tot een gespecialiseerd laboratorium wanneer er zich een probleem voordoet in verband met de samenstelling van het beton, bij de ingebruikname van een nieuwe machine, of nog wanneer materialen gebruikt worden waarvan de karakteristieken minder goed gekend zijn.

Zonder in detail te treden zijn de methodes erop gericht een compact beton te bekomen dat het geheel van de granulaten omhult met een optimale hoeveelheid cementpasta (figuur 23 : in deze schema's staat Z voor de zandfractie van het inerte skelet van het beton, korrels tussen 0 en 2 mm in tegenstelling tot de norm NBN EN 12620 en S voor de stenen tussen 2 en D mm). Deze optimale hoeveelheid cementpasta dient in principe minimaal te zijn in het mengsel maar dient in ieder geval aangepast te worden in functie van de noodzakelijke verwerkbaarheid. Hoe minder compact het beton, hoe groter het volume cementpasta wordt dat nodig is om tot de gewenste verwerkbaarheid te komen. Men riskeert zo een beton te bekomen met een hoog watergehalte en bijgevolg van slechte kwaliteit.

De holle ruimtes van het inerte skelet, bestaande uit stenen en zand, zijn dus belangrijke gegevens. Bepaalde methodes baseren zich op het volume van deze holle ruimtes om de optimale hoeveelheid cementpasta te bepalen, andere nemen de granulometrische samenstelling van het inerte skelet als basis om het volume van de holle ruimtes tot het minimum te beperken.

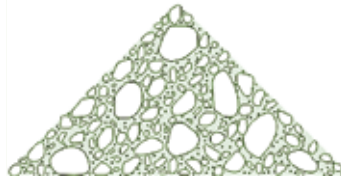
Het principe van de methodes die in Europa het meest gebruikt worden is het bepalen van de korrelverdelingskromme (of granulometrische bundels) in functie van de verwerkingsmethode, de vorm van het aan te leggen element en de manier waarop het beton wordt verdicht. De proporties van de granulaten worden vervolgens zodanig gekozen dat de korrelverdelingskromme van het beton zo dicht mogelijk aansluit bij de referentiekromme of zich perfect integreert binnen de granulometrische bundel.

De hierna volgende paragrafen geven korrelverdelingskrommen als referentie voor de inerte skeletten van verschillende betons voor wegverhardingen en bijhorigheden, alsook een werkwijze om de dosering van de granulaten te bepalen. Men dient te noteren dat deze referentiekrommen zowel geldig zijn voor verhardingen in discontinu platenbeton als in doorgaand gewapend beton. Inderdaad, de aan- of afwezigheid van dwarsvoegen in het wegdek verandert niets aan de samenstelling van het beton.



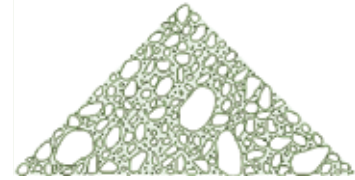
**Teveel grove granulaten**

Zwakke verhouding  $\frac{Z}{Z+S}$   
 = zwakke verdichtingsgraad  
 -> slechte verwerkbaarheid



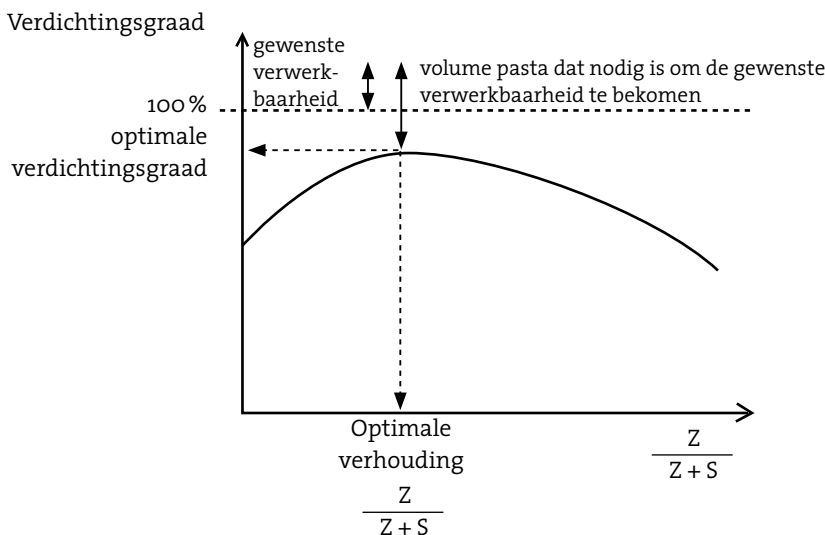
**Goede verhoudingen van de bestanddelen**

Optimale verhouding  $\frac{Z}{Z+S}$   
 = optimale verdichtingsgraad  
 -> • goede verwerkbaarheid  
 • goede weerstand  
 • weinig mortel



**Teveel fijne granulaten**

Hoge verhouding  $\frac{Z}{Z+S}$   
 = zwakke verdichtingsgraad  
 -> teveel bevochtigungswater



Figuur 23 – Evolutie van de dichtheid van het beton in functie van de verhouding van de bestanddelen. Links overheersen de stenen; rechts overheerst het zand en in het midden is het mengsel optimaal

#### 4.1. REFERENTIEKORRELVERDELINGSKROMMEN VOOR WEGENBETON

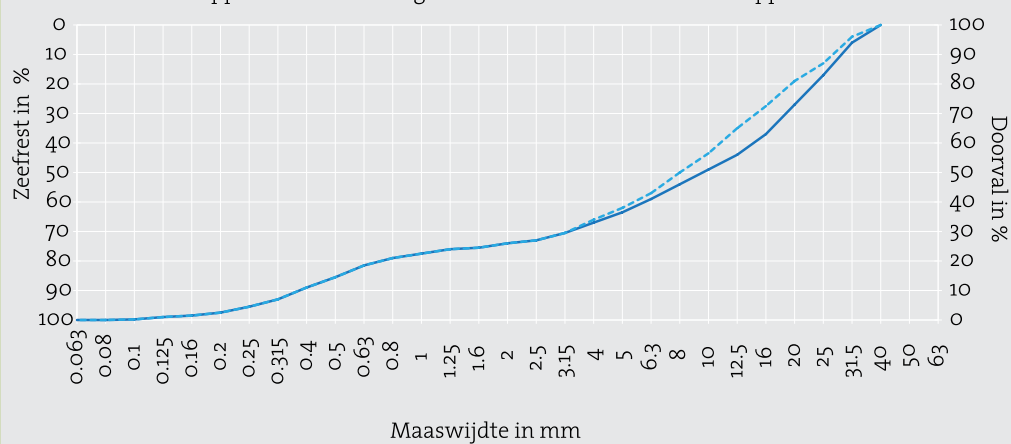
##### 4.1.1. BETON 0/32 VOOR AUTOSNELWEGEN, GEWEST- EN GEMEENTEWEGEN (FIGUUR 24)

De gewichtsverhouding tussen de fractie 0/2 van het gebruikte zand en het inerte skelet (verhouding  $Z/(Z+S)$ ) situeert zich voor dit beton 0/32 op  $\pm 26$  %. Vermits de verdichtingsenergie van de glijbekistingmachines vrij hoog ligt, zal het zandgehalte laag zijn.

Dit is gunstig voor de verdichtingsgraad en dus voor de duurzaamheid van dit beton, gegeven het feit dat de hoeveelheid water nodig voor het bevochtigen van het zand zo beperkt blijft. De curve in stippellijn op de grafiek laat toe een samenstelling van het beton te bekomen (ongeveer  $150 \text{ kg/m}^3$  stenen 20/32 minder) waarvan de extrusie verbeterd is evenals de stabiliteit van de staande rand van de betonplaat.

## Korrelverdelingskromme

Beton 0/32  
Autosnelwegen  
Gewest- en gemeentewegen  
Oppervlakbehandeling = bezemen van het verse betonoppervlak



Figuur 24 – Referentiekromme van het inerte skelet van een beton 0/32 voor autosnelwegen, gewest- en gemeentewegen

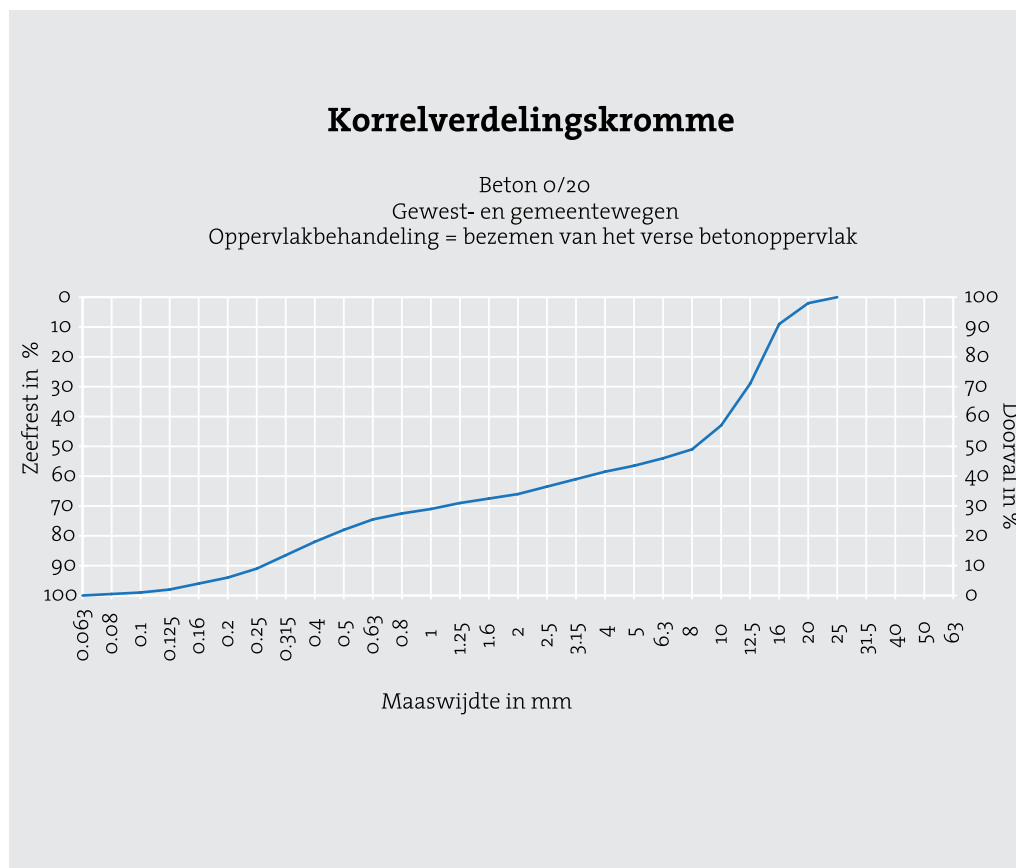


Figuur 25 – Heraanleg van de autosnelwegen E411 en E25 in de provincie Luxemburg met een doorgaand gewapend beton 0/32

#### 4.1.2. BETON 0/20 VOOR GEWEST- EN GEMEENTEWEGEN (FIGUUR 26)

De gewichtsverhouding tussen de fractie 0/2 van het gebruikte zand en het inerte skelet (verhouding  $Z/(Z+S)$ ) situeert zich voor dit beton 0/20 rond 33 à 34 %. Het zandgehalte is dus hoger dan in een goed verdicht beton 0/32 maar dit is uiteraard te wijten aan de vermindering van het nominale kaliber van de stenen (20 mm in plaats van 32 mm). De hoeveelheid water nodig voor dit beton zal dus hoger zijn, maar om de goede duurzaamheid te kunnen blijven waarborgen zal het cementgehalte worden opgetrokken ( $375 \text{ kg/m}^3$ , W/C-factor  $\leq 0,50$  voor dit beton 0/20, tegen  $350 \text{ kg/m}^3$ , W/C-factor = 0,50 voor een 0/32 beton).

De korrelverdeling van het inerte skelet van dit beton is continu en de hoeveelheid stenen tussen 2 en 8 mm ligt vrij hoog (ongeveer 15% van de totaliteit van het inerte skelet). Het gaat evenwel niet om een beton bestemd om chemisch te worden uitgewassen (geluidsarm beton). De gepaste oppervlakbehandeling is dus dwars bezemen van het verse betonoppervlak.



Figuur 26 – Referentiekromme voor het inerte skelet van een beton 0/20 voor gewest- en gemeentewegen



Figuur 27 – Betonneringswerken van de N29 te Perwez. De weg bestaat uit een verharding in gedevelde betonplaten met geborsteld oppervlak

Figuur 28 – Indien de weg aangelegd wordt in gedeveld platenbeton en indien de deuvels in het beton ingetrild worden, mag men niet opteren voor een beton 0/32 maar is een beton 0/20 aangewezen. Dit laatste bevat, inderdaad, meer mortel waardoor de deuvels gemakkelijker in te trillen zijn en het oppervlak correct kan afgewerkt worden na het inbrengen van de deuvels.



### 4.1.3. BETON 0/32 EN 0/20 VOOR LANDBOUWEGEN EN FIETSPADEN (FIGUREN 30 EN 31)

De eisen inzake mechanische sterkte van beton voor landbouwwegen of fietspaden zijn minder hoog dan voor wegen met drukker verkeer. Het cementgehalte zal dus ook lager liggen (dit ligt meestal in de orde van  $350 \text{ kg/m}^3$ ). Zo zal, teneinde een mortelgehalte te bekomen voor een optimale plaatsing, het zandgehalte hoger liggen in verhouding tot beton 0/32 en 0/20 voor gewest- en gemeentewegen. De gewichtsverhouding tussen de fractie 0/2 van het gebruikte zand en het inerte skelet (verhouding  $Z/(Z+S)$ ) zal zich situeren rond +/- 33 % en +/- 37 % respectievelijk voor beton 0/32 en 0/20. Deze betons, die meer zand bevatten, vereisen minder verdichtingsenergie en meer bevochtingswater.

Zij zullen dus minder compact zijn maar landbouwwegen en fietspaden zijn over het algemeen minder blootgesteld aan dooizouten. Wanneer echter toch veel dooizouten gebruikt worden (bijvoorbeeld op sommige fietspaden), is het beter om te kiezen voor het type beton waarvan het inerte skelet beschreven werd in voorgaande paragraaf 4.1.2.

Men dient te noteren dat men er steeds de voorkeur aan dient te geven om een beton te gebruiken met een zo groot mogelijke  $D_{\text{max}}$ . Een dergelijk beton vraagt minder pasta om alle granulaten te omhullen en zal dus van betere kwaliteit zijn. Fietspaden worden over het algemeen aangelegd met minder krachtige glijbekistingsmachines waardoor een beton 0/20 hier de voorkeur geniet.



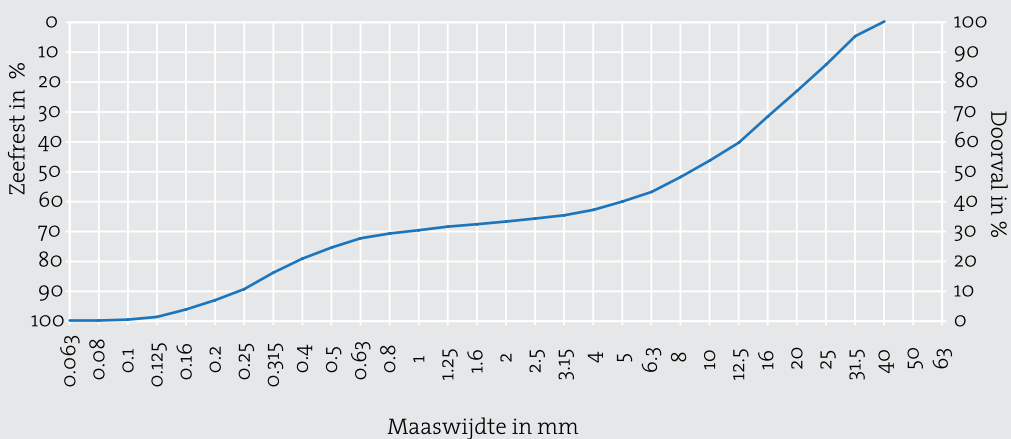
Voor wat betreft de oppervlakbehandeling, is het inerte skelet van die soorten beton niet geschikt om te worden uitwassen. Het gaat dus om het bezemen (dwars of langs) van het verse betonoppervlak.



Figuur 29 – Betonning van een ruilverkavelingsweg te Fexhe-le-Haut-Clocher

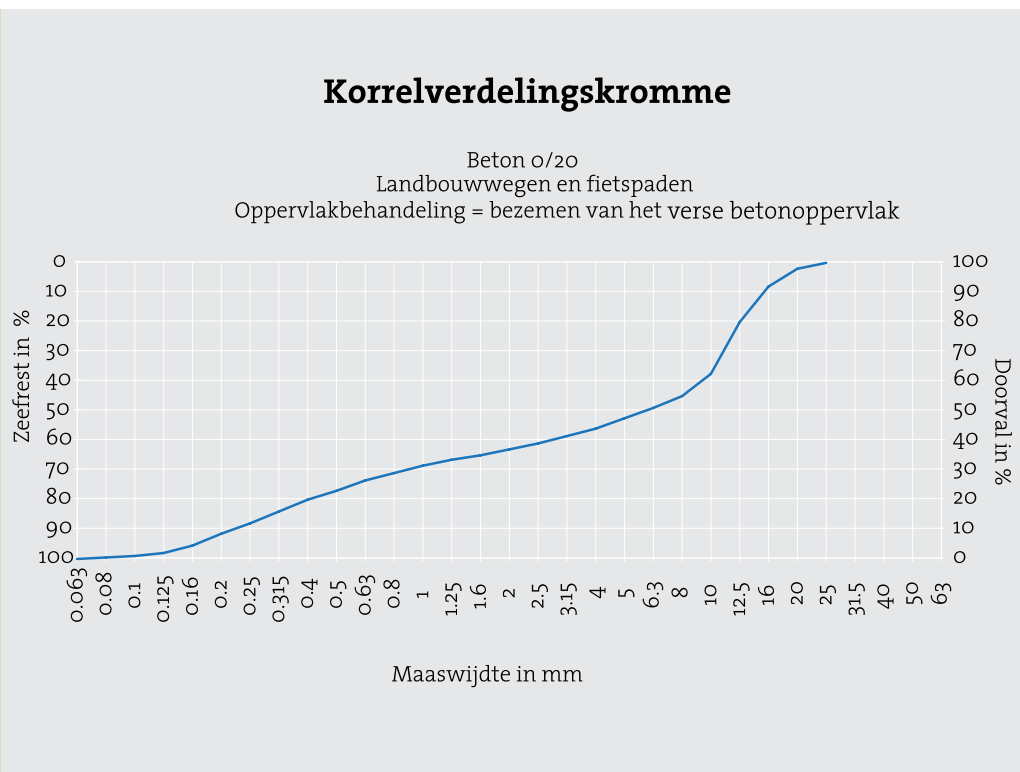
## Korrelverdelingskromme

Beton 0/32  
Landbouwwegen  
Oppervlakbehandeling = bezemen van het verse betonoppervlak



Figuur 30 – Referentiekromme voor het inerte skelet van beton 0/32 voor landbouwwegen

Figuur 31 –  
Referentiekromme  
voor het inerte skelet  
van beton 0/20  
voor landbouwwegen  
en fietspaden



#### 4.1.4. GELUIDSARM BETON 0/20, 0/14, 0/10 EN 0/6 (FIGUREN 32 TOT 35)

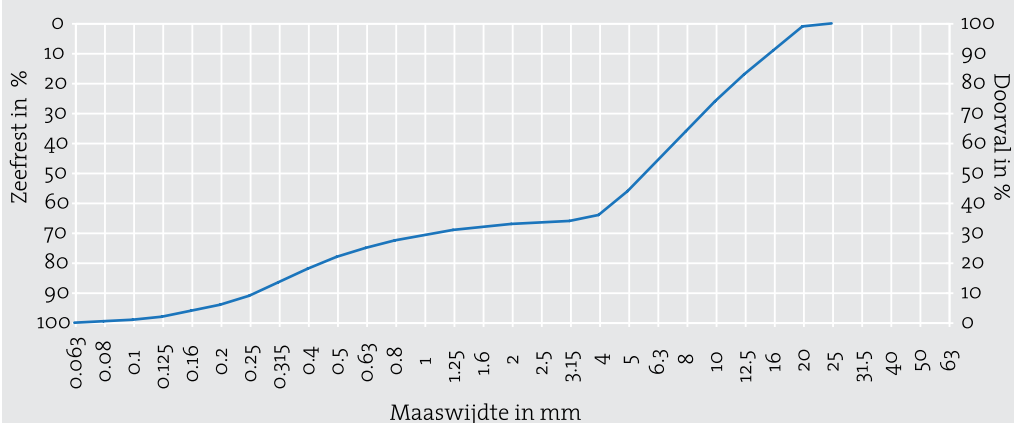
De gewichtsverhouding tussen de fractie 0/2 van het gebruikte zand en het inerte skelet (verhouding  $Z/(Z+S)$ ) situeert zich voor beton 0/20 rond 33 à 34 %. Het zandgehalte is dus identiek aan dat van een klassiek beton 0/20. Het verschil schuilt in de grote hoeveelheid stenen tussen 4 en 6 mm of tussen 4 en 8 mm, respectievelijk 20 en 25% van de totaliteit van het inerte skelet van het beton. Na uitwassen van het betonoppervlak bekomt men zo een goede macrottextuur (een oppervlak dat goed gevuld is met kleine stenen) wat bevorderlijk is voor het rijcomfort zoals wij reeds konden vaststellen in hoofdstuk 3.

Door de  $D_{max}$  van het granulaat te verminderen (beton 0/14, 0/10 en 0/6), verhoogt het zandgehalte 0/2 in verhouding tot het beton 0/20. Dit heeft tot gevolg, zoals reeds verklaard werd, dat de vraag naar water stijgt.

Men dient op te merken dat al deze betons nagenoeg discontinu zijn vermits de fractie 2/4 omzeggens nul is. In feite zou men, voor wat het zand betreft, beter zand vermijden met korrels tussen 2 tot 4 mm en voor wat de stenen betreft, eerder de voorkeur geven aan een fractie 4/6 ipv 2/6. Door dit te doen wordt de fractie korrels tussen 2 en 4 mm in het beton niet overgedoseerd wat gunstig is voor de macrottextuur en het uitzicht van het beton.

## Korrelverdelingskromme

Beton 0/20  
Autosnelwegen  
Gewest- en gemeentewegen  
Geluidsarm beton  
Oppervlakbehandeling = uitwassen van het betonoppervlak



Figuur 32 – Referentiekromme voor het inerte skelet van een geluidsarm beton 0/20

De krommen in doorlopende lijn op de grafieken worden bekomen vertrekkend van een grof rivierzand (zand 0/2 met een fijnheidsmodulus hoger dan 2,4). De kromme in stippellijn van het beton 0/14 (figuur 33) toont een geval uit de praktijk waarbij het enige zand dat beschikbaar was in de betoncentrale rivierzand 0/1 was met middelmatige korrel (fijnheidsmodulus gelijk aan 2,1). Om dit zand als dusdanig te kunnen gebruiken, werd de zandfractie van het beton tot het minimum

beperkt en de fractie 2/6 werd aanzienlijk verhoogd. De samenstelling van het beton is te zien op tabel 15.

Dit voorbeeld bewijst dat alle krommen individueel moeten geanalyseerd worden in functie van de beschikbare materialen en in functie van de middelen waarmee het beton zal geplaatst worden. Tabel 16 geeft enkele voorbeelden van samenstelling voor fijn geluidsarm beton en het hierbij bekomen resultaat na uitwassen.

### TABEL 15 – SAMENSTELLING EN UITZICHT VAN GELUIDSARM BETON 0/14 AANGELEGD IN WANZE IN 2006 (WEG VAN HUCCORGNE TE WARNANT)

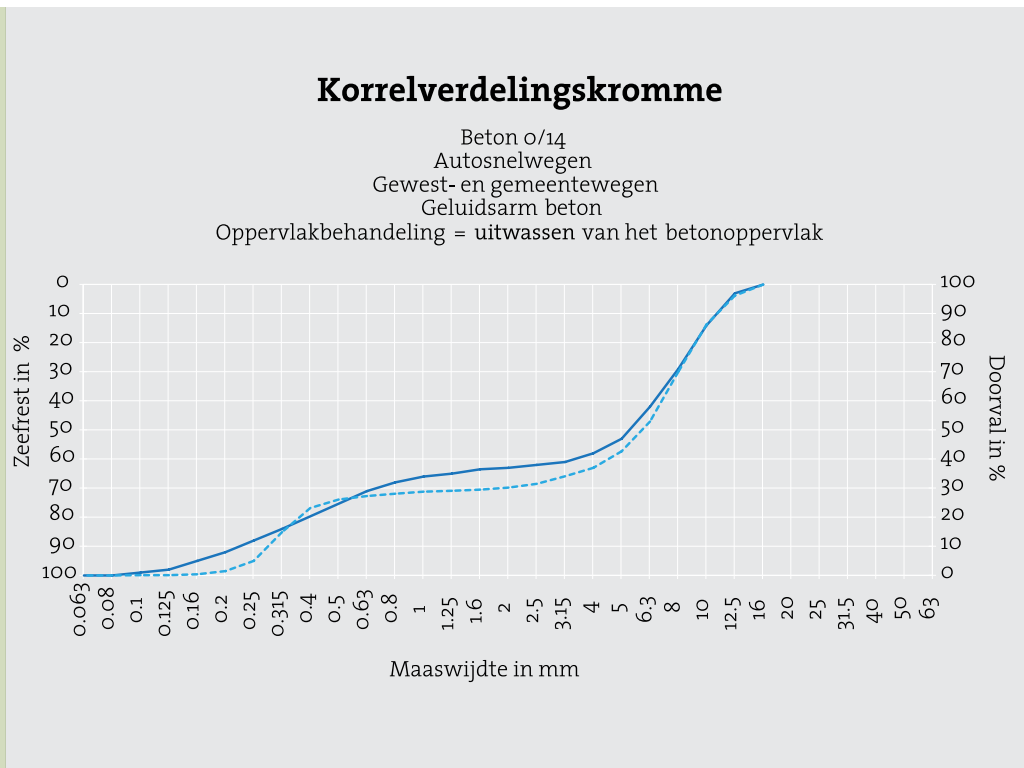
Gebroken zandsteen 6/14 : 38,1 % hetzij 685 kg/m<sup>3</sup>  
Gebroken zandsteen 2/6 : 31,7 % hetzij 570 kg/m<sup>3</sup>  
Rivierzand 0/1 : 30,2 % hetzij 545 kg/m<sup>3</sup>

Cement CEM III/A 42,5 N LA : 400 kg/m<sup>3</sup>  
W/C - factor ≤ 0,45

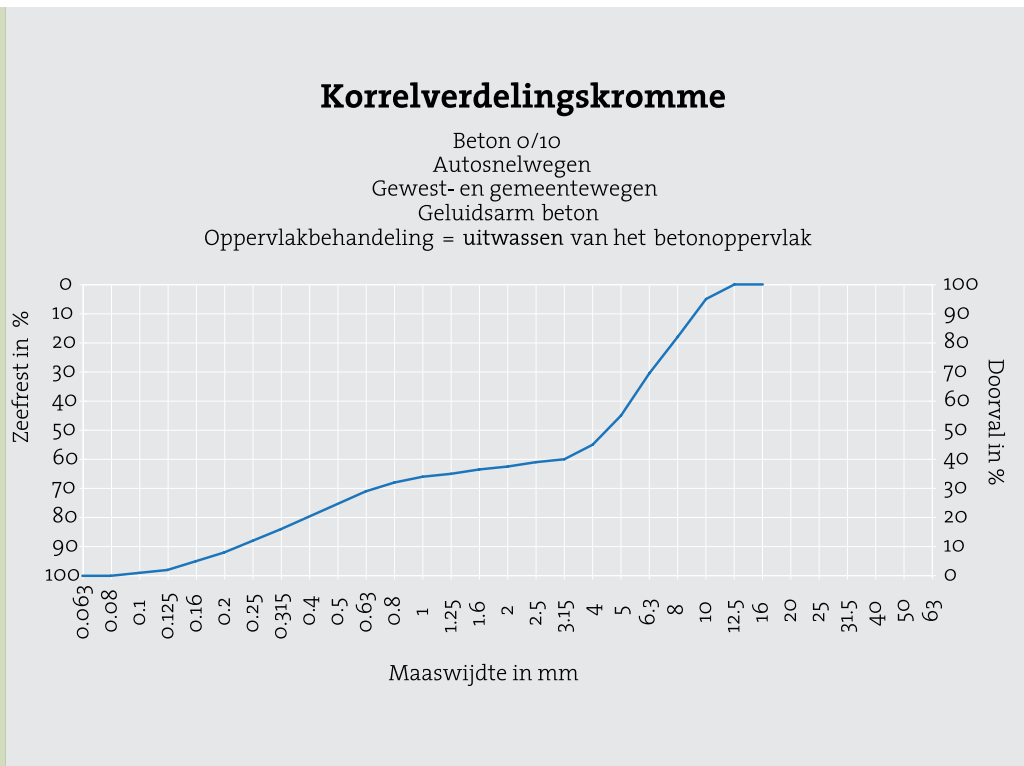
Plastificeerder en luchtbelvormer



Figuur 33 – In volle lijn, de referentiekromme van het inerte skelet voor een geluidsarm beton o/14

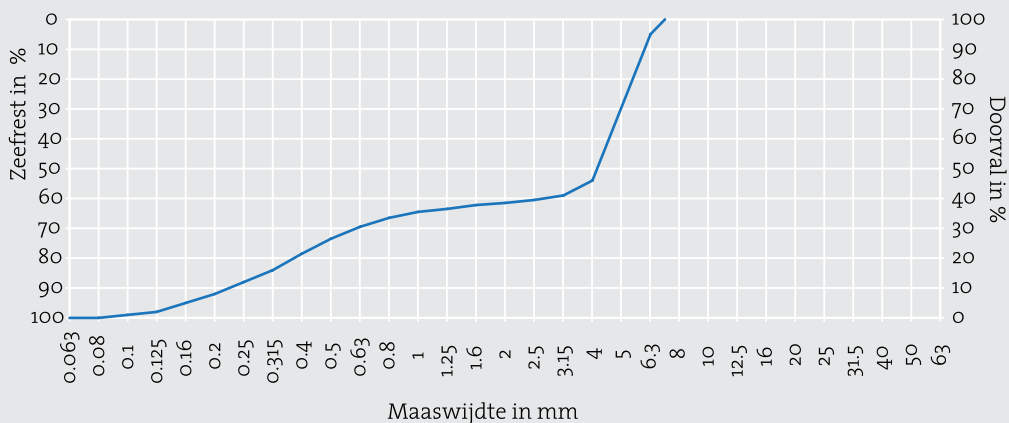


Figuur 34 – Referentiekromme van het inerte skelet voor een geluidsarm beton o/10



## Korrelverdelingskromme

Beton 0/6  
Autosnelwegen  
Gewest- en gemeentewegen  
Geluidsarm beton  
Oppervlakbehandeling = uitwassen van het betonoppervlak



Figuur 35 – Referentiekromme van het inerte skelet voor een geluidsarm beton 0/6

### 4.1.5. BETON 0/20 EN 0/32 VOOR BIJHORIGHEDEN VAN DE WEG (FIGUREN 36 EN 37)

Voor beton voor toebehoren van wegen dat ter plaatse gestort wordt, gebruikt men meestal glijbekistingsmachines waarvan het trilvermogen lager ligt dan dit van machines voor wegverhardingen. Teneinde de verwerkbaarheid van het beton te verbeteren evenals de stabiliteit van de staande rand na extrusie, en een goede afwerking van het oppervlak te bekomen, bevatten de samenstellingen die meestal gebruikt worden, meer zand. De gewichtsverhouding tussen de fractie 0/2 en de totaliteit van het inerte skelet (verhouding  $Z/(Z+S)$ ) situeert zich, voor beton bestemd voor de constructie van veiligheidsstootbanden, op ongeveer 40% (figuur 36). Het zandgehalte ligt dus ongeveer 7% hoger dan bij beton 0/20 voor wegverhardingen. Over het algemeen worden twee zanden gebruikt voor de bereiding van beton voor veiligheidsstootbanden : een fijn zand (bijvoorbeeld grovezand 0/1) en een grof rivierzand. Deze twee zanden worden meestal gemengd in de volgende verhoudingen : ongeveer 20% voor het fijn zand en ongeveer 80 % voor het grof

zand. Dit is niet evenzo het geval voor beton bestemd voor het storten van boordstenen of straatgoten (figuur 37). Deze elementen worden inderdaad zwaar op de proef gesteld door water dat veel dooizouten bevat. Het is daarom aanbevolen om het zandgehalte niet drastisch te verhogen teneinde de duurzaamheid van deze elementen te waarborgen .

Soms worden de veiligheidstootbanden vervaardigd met een beton waarvoor de  $D_{max}$  32 mm bedraagt. Het gaat echter niet echt om een beton 0/32 omdat het enige verschil met een beton 0/20 zit in het feit dat zo'n 150 tot 200 kg/m<sup>3</sup> stenen 8/20 vervangen wordt door een gelijke hoeveelheid stenen 20/32. Men dient tevens te wijzen op de perfecte continuïteit van de korrelverdeling van het inerte skelet van deze betonsoorten .

De duurzaamheid tegen dooizouten van toebehoren voor wegen hangt uiteraard in sterke mate af van de W/C-factor van het beton en meer bepaald het cementgehalte. Zo raadt men aan om niet minder dan 375 kg cement per m<sup>3</sup> beton te gebruiken. Bovendien is ook een luchtbelvormer verplicht voor deze betons.

## TABEL 16 – VOORBEELDEN VAN SAMENSTELLINGEN VOOR FIJN GELUIDSARM BETON

### A10/E40 te Ternat – Plaatsing in 2002 – Beton o/20

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Gebroken porfier 14/20:           | 270 kg/m <sup>3</sup>    |
| Gebroken porfier 6/14:            | 590 kg/m <sup>3</sup>    |
| Gebroken porfier 4/6              | 345 kg/m <sup>3</sup>    |
| Rivierzand 0/4:                   | 440 kg/m <sup>3</sup>    |
| Rivierzand 0/1:                   | 150 kg/m <sup>3</sup>    |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA:       | 405 kg/m <sup>3</sup>    |
| Totaal water:                     | 175 l/m <sup>3</sup>     |
| Plastificeerder en luchtbelvormer |                          |
| Totaal:                           | ≅ 2375 kg/m <sup>3</sup> |



### Lorrainedreef te Ukkel – Plaatsing in 2003 – Beton o/14

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Gebroken porfier 6/14:            | 770 kg/m <sup>3</sup>    |
| Gebroken porfier 4/6:             | 300 kg/m <sup>3</sup>    |
| Rivierzand 0/4:                   | 450 kg/m <sup>3</sup>    |
| Zeezand 0/1:                      | 250 kg/m <sup>3</sup>    |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA:       | 400 kg/m <sup>3</sup>    |
| Totaal water:                     | 180 l/m <sup>3</sup>     |
| Plastificeerder en luchtbelvormer |                          |
| Totaal:                           | ≅ 2350 kg/m <sup>3</sup> |



### Chaussée de Wavre te Wanze – Plaatsing in 2009 – Beton o/14

|                                   |                              |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Gebroken grind 6/14 :             | 620 kg/m <sup>3</sup>        |
| Gebroken grind 2/6 :              | 560 kg/m <sup>3</sup>        |
| Rivierzand 0/2 :                  | 580 kg/m <sup>3</sup>        |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA :      | 375 kg/m <sup>3</sup>        |
| Bruin pigment :                   | 7,5 kg/m <sup>3</sup>        |
| Totaal water :                    | 180 tot 200 l/m <sup>3</sup> |
| Plastificeerder en luchtbelvormer |                              |
| Totaal :                          | ≅ 2335 kg/m <sup>3</sup>     |



### N49/E34 te Zwijndrecht – Plaatsing in 2008 – Beton o/6

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Gebroken porfier 2/6 :            | 1015 kg/m <sup>3</sup>   |
| Zeezand 0/4 :                     | 470 kg/m <sup>3</sup>    |
| Zeezand 0/1 :                     | 200 kg/m <sup>3</sup>    |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA :      | 425 kg/m <sup>3</sup>    |
| Totaal water :                    | 190 l/m <sup>3</sup>     |
| Plastificeerder en luchtbelvormer |                          |
| Totaal :                          | ≅ 2300 kg/m <sup>3</sup> |



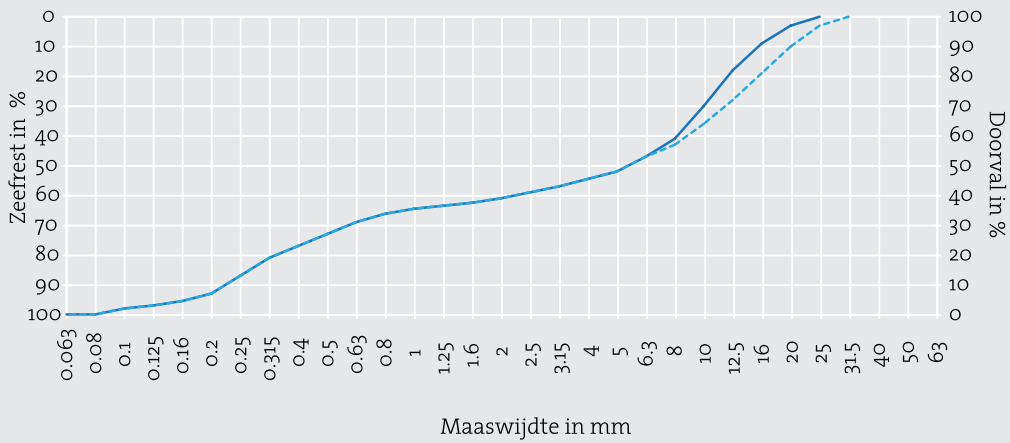
### Havenlaan te Brussel – Laboratoriumonderzoek – Beton o/6

|   |                          |
|---|--------------------------|
| Mengsel gebroken grind<br>en zandsteen 4/6: | 1060 kg/m <sup>3</sup>   |
| Rivierzand 0/2 :                            | 625 kg/m <sup>3</sup>    |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA :                | 425 kg/m <sup>3</sup>    |
| Bruin pigment :                             | 17 kg/m <sup>3</sup>     |
| Totaal water :                              | 200 l/m <sup>3</sup>     |
| Plastificeerder en luchtbelvormer           |                          |
| Totaal :                                    | ≅ 2330 kg/m <sup>3</sup> |



## Korrelverdelingskromme

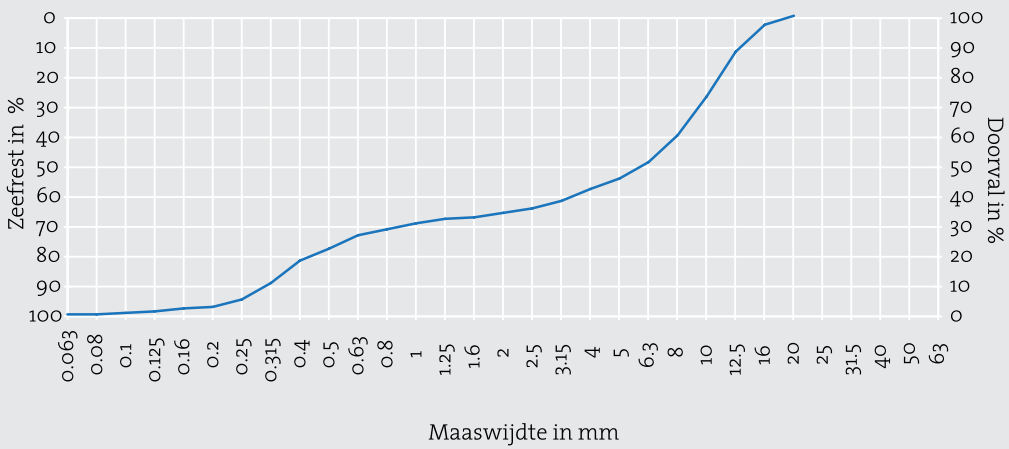
Beton 0/20 en 0/32  
Veiligheidsstootbanden



Figuur 36 – Referentiekromme van het inerte skelet voor beton 0/20 en 0/32 voor veiligheidsstootbanden

## Korrelverdelingskromme

Beton 0/20  
Boordstenen, watergreppels



Figuur 37 – Referentiekromme van het inerte skelet voor beton 0/20 voor boordstenen of straatgoten



Figuur 38 – Betonning van een veiligheidsstootband (STEP profiel) op de N49/E34 in 2007





## 4.2. PRAKTISCHE METHODE VOOR DE BEPALING VAN DE DOSERING VAN GRANULATEN : DE METHODE VAN DE KLEINSTE KWADRATEN

### 4.2.1. PRINCIPE

De methode van de kleinste kwadraten laat toe de dosering van een willekeurig aantal grondstoffen te bepalen zodanig dat de samenstellende zeefkromme de opgegeven ideale zeefkromme benadert. De methode wordt toegepast op ideale krommen voor het vaste skelet (incl. cement) ofwel voor ideale krommen voor het inerte skelet. Hierna wordt enkel de berekening gemaakt voor het inerte skelet.

De methode van de kleinste kwadraten is gebaseerd op de idee dat de kwadraten van de verschillen tussen de ordinaat van de werkelijke kromme van het mengsel en de ordinaat van de ideale kromme tot het minimum zouden herleid worden. Het aantal onbekenden is onbeperkt, de methode van de kleinste kwadraten is dan ook absoluut algemeen toepasbaar.

→ In eerste instantie gaan we ervan uit dat er slechts twee inerte materialen zijn.

Wij noemen de ordinaat van de korrelverdelingskromme van materiaal 1 :  $y_{n1}$  voor de abscis  $n$  en hetzelfde voor materiaal 2 :  $y_{n2}$ .

De resulterende ordinaat bekomen door de twee inerte stoffen te mengen in de verhoudingen  $s_1$  en  $s_2$  (in volume) bedraagt :

$$y_{n1} s_1 + y_{n2} s_2$$

waarbij  $s_1 + s_2 = 1$

Indien  $y_{ni}$  staat voor de ordinaat van de ideale kromme voor het inerte skelet, zal het verschil  $V_n$  tussen de ordinaat van het reële mengsel en het ideale mengsel het volgende zijn :

$$V_n = y_{n1} s_1 + y_{n2} s_2 - y_{ni}$$

$$\Leftrightarrow V_n = y_{n1} s_1 + y_{n2} (1 - s_1) - y_{ni}$$

$$\Leftrightarrow V_n = a_{n1} s_1 - a_n$$

waarbij :  $a_{n1} = y_{n1} - y_{n2}$   
 $a_n = y_{ni} - y_{n2}$

Wij zullen  $s_1$  bepalen op een dusdanige manier dat de som van de kwadraten van de verschillen minimaal weze :

$$\Rightarrow \sum V_n^2 = \sum (a_{n1} s_1 - a_n)^2 \text{ weze minimaal.}$$

De minimum waarde wordt bekomen door de afgeleide te berekenen van deze functie en gelijk te stellen aan 0.

Dus :

$$\frac{\delta \left[ \sum (a_{n1} s_1 - a_n)^2 \right]}{\delta s_1} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\delta}{\delta s_1} \sum (a_{n1}^2 s_1^2 - 2 a_{n1} a_n s_1 + a_n^2) = 0$$

$$\Leftrightarrow \sum (2 a_{n1}^2 s_1 - 2 a_{n1} a_n) = 0$$

$$\Leftrightarrow s_1 = \frac{\sum a_{n1} a_n}{\sum a_{n1}^2}$$

als wij  $s_1$  kennen, dan ook  $s_2$  door de verhouding  $s_2 = 1 - s_1$

→ In het geval er drie inerte materialen dienen gemengd te worden.

Wij hebben  $s_1 + s_2 + s_3 = 1$  (of  $s_3 = 1 - s_1 - s_2$ )

$$\begin{aligned} V_n &= y_{n1}s_1 + y_{n2}s_2 + y_{n3}s_3 - y_{ni} \\ \Leftrightarrow V_n &= y_{n1}s_1 + y_{n2}s_2 + y_{n3}(1 - s_1 - s_2) - y_{ni} \\ \Leftrightarrow V_n &= (y_{n1} - y_{n3})s_1 + (y_{n2} - y_{n3})s_2 + y_{n3} - y_{ni} \end{aligned}$$

De som van de kwadraten van de verschillen bedraagt dan :

$$\begin{aligned} \sum V_n^2 &= \sum [(y_{n3} - y_{ni})^2 + 2(y_{n1} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni})s_1 \\ &\quad + 2(y_{n2} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni})s_2 \\ &\quad + 2(y_{n1} - y_{n3})(y_{n2} - y_{n3})s_1s_2 \\ &\quad + (y_{n1} - y_{n3})^2s_1^2 + (y_{n2} - y_{n3})^2s_2^2] \end{aligned}$$

$s_1$  en  $s_2$  worden bepaald door de volgende vergelijkingen :

$$\frac{\partial \sum V_n^2}{\partial s_1} = 0 \text{ en } \frac{\partial \sum V_n^2}{\partial s_2} = 0$$

hetzij

$$2 \sum (y_{n1} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni}) + 2 \sum (y_{n1} - y_{n3})(y_{n2} - y_{n3})s_2 + 2 \sum (y_{n1} - y_{n3})^2s_1 = 0$$

en

$$2 \sum (y_{n2} - y_{n3})(y_{n3} - y_{ni}) + 2 \sum (y_{n1} - y_{n3})(y_{n2} - y_{n3})s_1 + 2 \sum (y_{n2} - y_{n3})^2s_2 = 0$$

$$\Leftrightarrow s_1 \sum a_{n1}^2 + s_2 \sum a_{n1}a_{n2} = \sum a_{n1}a_{ni} \text{ en } s_1 \sum a_{n1}a_{n2} + s_2 \sum a_{n2}^2 = \sum a_{n2}a_{ni}$$

$$\begin{aligned} \text{waarbij } a_{n1} &= y_{n1} - y_{n3} \\ a_{n2} &= y_{n2} - y_{n3} \\ a_{ni} &= y_{ni} - y_{n3} \end{aligned}$$

Dit stelsel laat toe de waarden  $s_1$  en  $s_2$  te bepalen.

De vergelijking  $s_3 = 1 - s_1 - s_2$  geeft dan de waarde van  $s_3$ .

De zuiver mathematische uitwerking van deze methode leidt dus tot een systeem van  $x$  vergelijkingen voor  $x$  gebruikte kalibers. Indien talrijke kalibers dienen gecombineerd te worden, zal het berekeningswerk in aanzienlijke mate toenemen en is het gebruik van de nodige informatica aan te bevelen.

#### 4.2.2. VOORBEELD VAN BEREKENING

Als voorbeeld van berekening van de samenstelling van een beton o/32 voor autosnelwegen, nemen we de korrelverdelingen van de grondstoffen en van het inerte skelet van het refentiebeton vermeld in tabel 17. De eisen inzake cementgehalte en W/C-factor zijn als volgt (zie tabel 1) :

- cementgehalte = 400 kg/m<sup>3</sup>;
- W/C-factor = 0,45 hetzij efficiënt watergehalte = 180 kg/m<sup>3</sup>;
- er wordt geen lucht ingebracht.

Volgens de redenering uiteengezet in 4.2.1., dient men het volgende systeem van vergelijkingen op te lossen :

$$s_1 + s_2 + s_3 + s_4 = 1$$

$$s_1 \sum a_{n1} a_{n1} + s_2 \sum a_{n1} a_{n2} + s_3 \sum a_{n1} a_{n3} = \sum a_{n1} a_n$$

$$s_1 \sum a_{n1} a_{n2} + s_2 \sum a_{n2} a_{n2} + s_3 \sum a_{n2} a_{n3} = \sum a_{n2} a_n$$

$$s_1 \sum a_{n1} a_{n3} + s_2 \sum a_{n1} a_{n3} + s_3 \sum a_{n3} a_{n3} = \sum a_{n3} a_n$$

waarbij  $a_{n1} = y_{n1} - y_{n4}$   
 $a_{n2} = y_{n2} - y_{n4}$   
 $a_{n3} = y_{n3} - y_{n4}$   
 $a_n = y_{n1} - y_{n4}$

$s_1, s_2, s_3$  en  $s_4$  zijn respectievelijk de doseringen in volume voor zand 0/2, gebroken zandsteen 2/6, 6/20 en 20/32.

De berekening van  $a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}$  en  $a_n$  alsook de berekening van de som van hun producten staan vermeld in tabel 18.

**TABEL 17 – KORRELVERDELING VAN DE GRONDSTOFFEN EN VAN HET INERTE SKELET VAN HET REFERENTIEBETON**

| Zeef (mm) | Zand 0/2 Doorval in % | Zandsteen 2/6 Doorval in % | Zandsteen 6/20 Doorval in % | Zandsteen 20/32 Doorval in % | Referentiebeton Doorval in % |
|-----------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 0,080     | 1,1                   | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 0,0                          |
| 0,100     | 1,2                   | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 0,5                          |
| 0,125     | 1,4                   | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 1,0                          |
| 0,160     | 2,3                   | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 2,0                          |
| 0,200     | 4,1                   | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 2,5                          |
| 0,250     | 8,3                   | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 5,0                          |
| 0,315     | 18,3                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 7,5                          |
| 0,400     | 33,4                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 10,0                         |
| 0,500     | 45,9                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 13,0                         |
| 0,63      | 62,8                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 17,5                         |
| 0,8       | 73,1                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 20,0                         |
| 1         | 80,2                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 21,5                         |
| 1,25      | 85,5                  | 0,7                        | 0,6                         | 0,8                          | 23,0                         |
| 1,60      | 89,6                  | 0,8                        | 0,6                         | 0,8                          | 24,0                         |
| 2         | 92,0                  | 1,2                        | 0,6                         | 0,8                          | 26,0                         |
| 2,5       | 94,2                  | 3,3                        | 0,6                         | 0,8                          | 27,5                         |
| 3,15      | 96,3                  | 12,4                       | 0,7                         | 0,8                          | 30,0                         |
| 4         | 98,2                  | 34,9                       | 0,7                         | 0,8                          | 34,0                         |
| 5         | 99,6                  | 51,1                       | 0,9                         | 0,8                          | 38,0                         |
| 6,3       | 100,0                 | 82,5                       | 1,2                         | 0,8                          | 42,0                         |
| 8         | 100,0                 | 99,5                       | 6,5                         | 0,8                          | 50,0                         |
| 10        | 100,0                 | 99,9                       | 26,6                        | 0,8                          | 57,0                         |
| 12,5      | 100,0                 | 100,0                      | 59,0                        | 0,9                          | 65,0                         |
| 16        | 100,0                 | 100,0                      | 94,0                        | 4,1                          | 72,5                         |
| 20        | 100,0                 | 100,0                      | 100,0                       | 27,7                         | 80,5                         |
| 25        | 100,0                 | 100,0                      | 100,0                       | 84,6                         | 87,0                         |
| 28        | 100,0                 | 100,0                      | 100,0                       | 95,0                         | 90,0                         |
| 32        | 100,0                 | 100,0                      | 100,0                       | 99,6                         | 95,0                         |
| 40        | 100,0                 | 100,0                      | 100,0                       | 100,0                        | 100,0                        |

**TABEL 18 – BEREKENING VAN  $a_{n1}$ ,  $a_{n2}$ ,  $a_{n3}$  EN  $a_n$  EN VAN DE SOM VAN HUN PRODUCTEN**

$$(a_{n1} = y_{n1} - y_{n4}, a_{n2} = y_{n2} - y_{n4}, a_{n3} = y_{n3} - y_{n4} \text{ et } a_n = y_{n1} - y_{n4})$$

| Zeeff (mm) | $a_{n1}$ | $a_{n2}$ | $a_{n3}$ | $a_n$ | $a_{n1} \cdot a_{n1}$ | $a_{n1} \cdot a_{n2}$ | $a_{n1} \cdot a_{n3}$ | $a_{n2} \cdot a_{n2}$ | $a_{n2} \cdot a_{n3}$ | $a_{n3} \cdot a_{n3}$ | $a_n \cdot a_{n1}$ | $a_n \cdot a_{n2}$ | $a_n \cdot a_{n3}$ |
|------------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0,080      | 0,3      | -0,1     | -0,2     | -0,8  | 0,09                  | -0,03                 | -0,06                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | -0,24              | 0,08               | 0,16               |
| 0,100      | 0,4      | -0,1     | -0,2     | -0,3  | 0,16                  | -0,04                 | -0,08                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | -0,12              | 0,03               | 0,06               |
| 0,125      | 0,6      | -0,1     | -0,2     | 0,2   | 0,36                  | -0,06                 | -0,12                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 0,12               | -0,02              | -0,04              |
| 0,160      | 1,5      | -0,1     | -0,2     | 1,2   | 2,25                  | -0,15                 | -0,3                  | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 1,8                | -0,12              | -0,24              |
| 0,200      | 3,3      | -0,1     | -0,2     | 1,7   | 10,89                 | -0,33                 | -0,66                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 5,61               | -0,17              | -0,34              |
| 0,250      | 7,5      | -0,1     | -0,2     | 4,2   | 56,25                 | -0,75                 | -1,5                  | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 31,5               | -0,42              | -0,84              |
| 0,315      | 17,5     | -0,1     | -0,2     | 6,7   | 306,25                | -1,75                 | -3,5                  | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 117,25             | -0,67              | -1,34              |
| 0,400      | 32,6     | -0,1     | -0,2     | 9,2   | 1062,76               | -3,26                 | -6,52                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 299,92             | -0,92              | -1,84              |
| 0,500      | 45,1     | -0,1     | -0,2     | 12,2  | 2034,01               | -4,51                 | -9,02                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 550,22             | -1,22              | -2,44              |
| 0,63       | 62       | -0,1     | -0,2     | 16,7  | 3844                  | -6,2                  | -12,4                 | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 1035,4             | -1,67              | -3,34              |
| 0,8        | 72,3     | -0,1     | -0,2     | 19,2  | 5227,29               | -7,23                 | -14,46                | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 1388,16            | -1,92              | -3,84              |
| 1          | 79,4     | -0,1     | -0,2     | 20,7  | 6304,36               | -7,94                 | -15,88                | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 1643,58            | -2,07              | -4,14              |
| 1,25       | 84,7     | -0,1     | -0,2     | 22,2  | 7174,09               | -8,47                 | -16,94                | 0,01                  | 0,02                  | 0,04                  | 1880,34            | -2,22              | -4,44              |
| 1,60       | 88,8     | 0        | -0,2     | 23,2  | 7885,44               | 0                     | -17,76                | 0                     | 0                     | 0,04                  | 2060,16            | 0                  | -4,64              |
| 2          | 91,2     | 0,4      | -0,2     | 25,2  | 8317,44               | 36,48                 | -18,24                | 0,16                  | -0,08                 | 0,04                  | 2298,24            | 10,08              | -5,04              |
| 2,5        | 93,4     | 2,5      | -0,2     | 26,7  | 8723,56               | 233,5                 | -18,68                | 6,25                  | -0,5                  | 0,04                  | 2493,78            | 66,75              | -5,34              |
| 3,15       | 95,5     | 11,6     | -0,1     | 29,2  | 9120,25               | 1107,8                | -9,55                 | 134,56                | -1,16                 | 0,01                  | 2788,6             | 338,72             | -2,92              |
| 4          | 97,4     | 34,1     | -0,1     | 33,2  | 9486,76               | 3321,34               | -9,74                 | 1162,81               | -3,41                 | 0,01                  | 3233,68            | 1132,12            | -3,32              |
| 5          | 98,8     | 50,3     | 0,1      | 37,2  | 9761,44               | 4969,64               | 9,88                  | 2530,09               | 5,03                  | 0,01                  | 3675,36            | 1871,16            | 3,72               |
| 6,3        | 99,2     | 81,7     | 0,4      | 41,2  | 9840,64               | 8104,64               | 39,68                 | 6674,89               | 32,68                 | 0,16                  | 4087,04            | 3366,04            | 16,48              |
| 8          | 99,2     | 98,7     | 5,7      | 49,2  | 9840,64               | 9791,04               | 565,44                | 9741,69               | 562,59                | 32,49                 | 4880,64            | 4856,04            | 280,44             |
| 10         | 99,2     | 99,1     | 25,8     | 56,2  | 9840,64               | 9830,72               | 2559,36               | 9820,81               | 2556,78               | 665,64                | 5575,04            | 5569,42            | 1449,96            |
| 12,5       | 99,1     | 99,1     | 58,1     | 64,1  | 9820,81               | 9820,81               | 5757,71               | 9820,81               | 5757,71               | 3375,61               | 6352,31            | 6352,31            | 3724,21            |
| 16         | 95,9     | 95,9     | 89,9     | 68,4  | 9196,81               | 9196,81               | 8621,41               | 9196,81               | 8621,41               | 8082,01               | 6559,56            | 6559,56            | 6149,16            |
| 20         | 72,3     | 72,3     | 72,3     | 52,8  | 5227,29               | 5227,29               | 5227,29               | 5227,29               | 5227,29               | 5227,29               | 3817,44            | 3817,44            | 3817,44            |
| 25         | 15,4     | 15,4     | 15,4     | 2,4   | 237,16                | 237,16                | 237,16                | 237,16                | 237,16                | 237,16                | 36,96              | 36,96              | 36,96              |
| 28         | 5        | 5        | 5        | -5    | 25                    | 25                    | 25                    | 25                    | 25                    | 25                    | -25                | -25                | -25                |
| 32         | 0,4      | 0,4      | 0,4      | -4,6  | 0,16                  | 0,16                  | 0,16                  | 0,16                  | 0,16                  | 0,16                  | -1,84              | -1,84              | -1,84              |
| 40         | 0        | 0        | 0        | 0     | 0                     | 0                     | 0                     | 0                     | 0                     | 0                     | 0                  | 0                  | 0                  |
| Totaal     | 1558     | 665,2    | 269,7    | 612,5 | 133346,8              | 61861,67              | 22887,68              | 54578,62              | 23020,9               | 17646,2               | 54785,5            | 33938,5            | 15407,7            |

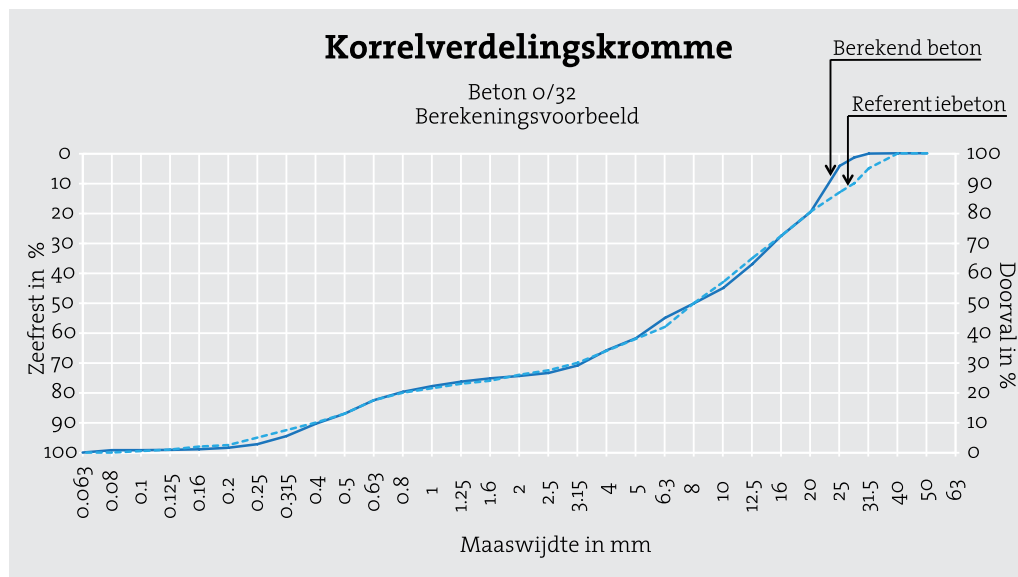
Het stelsel van 4 vergelijkingen met 4 onbekenden geeft zo de volgende oplossingen:

$$\begin{aligned}
 s_1 &= \% \text{ zand } 0/2 && = 27,1 \% \\
 s_2 &= \% \text{ zandsteen } 2/6 && = 21,1 \% \\
 s_3 &= \% \text{ zandsteen } 6/20 && = 24,7 \% \\
 s_4 &= \% \text{ zandsteen } 20/32 && = 27,1 \%
 \end{aligned}$$

Tabel 19 en de figuur 39 geven de korrelverdelingskromme van het berekend beton.

**TABEL 19 – BEREKEND INERTE SKELET**

| Zeef (mm) | Berekend beton (%) |         |
|-----------|--------------------|---------|
|           | Zeefrest           | Doorval |
| 0,080     | 99,2               | 0,8     |
| 0,100     | 99,2               | 0,8     |
| 0,125     | 99,1               | 0,9     |
| 0,160     | 98,9               | 1,1     |
| 0,200     | 98,4               | 1,6     |
| 0,250     | 97,2               | 2,8     |
| 0,315     | 94,5               | 5,5     |
| 0,400     | 90,4               | 9,6     |
| 0,500     | 87,0               | 13,0    |
| 0,63      | 82,5               | 17,5    |
| 0,8       | 79,7               | 20,3    |
| 1         | 77,8               | 22,2    |
| 1,25      | 76,3               | 23,7    |
| 1,60      | 75,2               | 24,8    |
| 2         | 74,4               | 25,6    |
| 2,5       | 73,4               | 26,6    |
| 3,15      | 70,9               | 29,1    |
| 4         | 65,6               | 34,4    |
| 5         | 61,8               | 38,2    |
| 6,3       | 55,0               | 45,0    |
| 8         | 50,1               | 49,9    |
| 10        | 45,0               | 55,0    |
| 12,5      | 37,0               | 63,0    |
| 16        | 27,5               | 72,5    |
| 20        | 19,6               | 80,4    |
| 25        | 4,2                | 95,8    |
| 28        | 1,4                | 98,6    |
| 32        | 0,1                | 99,9    |
| 40        | 0,0                | 100,0   |



Figuur 39 – Referentie en berekende inerte skeletten

Op basis van de verschillende berekende mengverhoudingen kan men de samenstelling in l/m<sup>3</sup> berekenen ; door vervolgens de absolute volumes ingenomen door de verschillende bestanddelen van het beton te vermenigvuldigen met hun reële volumieke massa, bekomt men de samenstelling in kg/m<sup>3</sup>.

|   |  |   |   |  |
|---|--|---|---|--|
|   | Totaal volume                                | =   | 1000 l/m <sup>3</sup>   |  |
| - | Ingesloten lucht                             | =   | 10 l/m <sup>3</sup> (geschatte waarde = 1%, beton zonder ingebrachte lucht) |  |
| - | Volume cement = 400 kg/m <sup>3</sup> : 2,95 | =   | 136 l/m <sup>3</sup>  |  |
| - | Effectief water                              | =   | 180 l/m <sup>3</sup> (W/C-factor = 0,45 maximum)                            |  |
| = | Volume inerte stoffen                        | =   | 674 l/m <sup>3</sup>  |  |
| ⇒ | hoeveelheid zand 0/2 :                       | 0,271 . 674 = 183 l/m <sup>3</sup> . 2,65 = | 485 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid zandsteen 2/6 :                  | 0,211 . 674 = 142 l/m <sup>3</sup> . 2,69 = | 382 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid zandsteen 6/20 :                 | 0,247 . 674 = 166 l/m <sup>3</sup> . 2,69 = | 447 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid zandsteen 20/32 :                | 0,271 . 674 = 183 l/m <sup>3</sup> . 2,69 = | 492 kg/m <sup>3</sup>   |  |

Bij deze mengverhoudingen dient nog 10 l absorptiewater voor de granulaten toegevoegd te worden en ook een plastificeerder om de gewenste verwerkbaarheid te bekomen.

Men dient tevens de vraag naar bevochtigingswater van de bestanddelen te verifiëren. Dit gebeurt op basis van de gegevens van hoofdstuk 1.2. Deze berekeningen leiden tot een watergehalte van om en nabij de 160-165 l/m<sup>3</sup> in functie van de hypothesen. Men kan dus de kwaliteit van de cementpasta in hoge mate verbeteren. De samenstelling van het beton ziet er dus uit als volgt :

|   |   |   |   |  |
|---|---|---|---|--|
|   | Totaal volume   | =   | 1000 l/m <sup>3</sup>   |  |
| - | Ingesloten lucht  | =   | 10 l/m <sup>3</sup> (geschatte waarde = 1%, beton zonder ingebrachte lucht) |  |
| - | Volume cement = 400 kg/m <sup>3</sup> : 2,95                      | =   | 136 l/m <sup>3</sup>  |  |
| - | Effectief water   | =   | 165 l/m <sup>3</sup>  |  |
| = | Volume inerte stoffen   | =   | 689 l/m <sup>3</sup>  |  |
| ⇒ | hoeveelheid zand 0/2 :  | 0,271 . 689 = 187 l/m <sup>3</sup> . 2,65 = | 496 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid zandsteen 2/6 :                                       | 0,211 . 689 = 145 l/m <sup>3</sup> . 2,69 = | 390 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid zandsteen 6/20 :                                      | 0,247 . 689 = 170 l/m <sup>3</sup> . 2,69 = | 457 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid zandsteen 20/32 :                                     | 0,271 . 689 = 187 l/m <sup>3</sup> . 2,69 = | 503 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid cement :  |   | 400 kg/m <sup>3</sup>   |  |
|   | hoeveelheid water : 165 l effectief water + 10 l absorptiewater = |   | 175 l/m <sup>3</sup>  |  |
|   | totaal :  |   | 2421 kg/m <sup>3</sup>  |  |

De vochtige volumieke massa die bereikt wordt door berekening (theoretische volumieke massa  $VVM_{\text{theoretisch}}$ ) van dit beton bedraagt dus 2421 kg/m<sup>3</sup>. Deze waarde dient vergeleken te worden met de reële vochtige volumieke massa ( $VVM_{\text{reëel}}$ ) van het beton verkregen door meting na bereiding van een mengsel volgens de richtlijnen van de norm NBN EN 12350-6.

Het rendement R van de samenstelling kan dan ook berekend worden.

$$R = \frac{VVM_{\text{theoretisch}}}{VVM_{\text{reëel}}} \times 1000$$

Indien dit verschilt van 1000 l, kunnen de hoeveelheden van de verschillende bestanddelen gecorrigeerd worden door ze te delen door de waarde van het behaalde rendement. De respectievelijke mengverhoudingen blijven identiek maar aldus worden de exacte hoeveelheden per eenheid van volume berekend. De effectieve samenstelling wordt bekomen door de individuele massa's te delen door R.

Indien wij bijgevolg, na meting van de volumieke massa,  $2400 \text{ kg/m}^3$  bekomen, is het rendement R van de samenstelling gelijk aan :

$$R = \frac{2421}{2400} \times 1000 = 1009 \text{ l}$$

De gecorrigeerde hoeveelheden van de verschillende bestanddelen bedragen dus :

- hoeveelheid zand 0/2 :  $496 : 1009 \cdot 1000 = 492 \text{ kg/m}^3$
- hoeveelheid zandsteen 2/6 :  $390 : 1009 \cdot 1000 = 387 \text{ kg/m}^3$
- hoeveelheid zandsteen 6/20 :  $457 : 1009 \cdot 1000 = 453 \text{ kg/m}^3$
- hoeveelheid zandsteen 20/32 :  $503 : 1009 \cdot 1000 = 499 \text{ kg/m}^3$

Theoretisch dienen de hoeveelheden cement en water ook gecorrigeerd te worden maar om deze menghoeveelheden niet te verlagen of te verhogen, kan men beslissen om deze ongewijzigd te houden.

## 5. ENKELE BIJZONDERE TOEPASSINGEN VAN WEGENBETON

Naast de verschillende betons die in hoofdstuk 4 beschreven staan, bestaan er nog enkele andere types wegebeton of andere types van toepassingen. We denken onder andere aan gekleurd beton, gefigureerd of printbeton, beton voor snelle herstellingen, beton met gerecycleerde granulaten en walsbeton.

### 5.1. GEKLEURD UITGEWASSEN BETON

De laatste jaren is er een grote inspanning geleverd voor de renovatie van openbare ruimtes. Om deze ruimtes zo goed mogelijk te integreren speelt het uitzicht van de verharding een grote rol. Een techniek die vaak wordt toegepast, samen met betonstraatstenen of natuurkasseien, is die van het gekleurd en uitgewassen beton.

De techniek bestaat erin gekleurde granulaten te gebruiken al of niet in combinatie met een kleurpigment. Het beton wordt hetzij in één laag, hetzij in twee lagen, nat in nat, aangelegd met behulp van een glijbekistingsmachine of manueel tussen vaste bekisting en met behulp van een trilbalk en trilnaalden. Als oppervlakbehandeling past men de techniek toe van het uitwassen zodat het betongranulaat tot zijn recht komt.



Figuur 40 – Verharding in diverse gekleurde betons voor een complex van sociale woningen in Grivegnée (Cité Demoitelle)



Wat de betonsamenstelling betreft, zijn alle aanbevelingen van de voorgaande hoofdstukken van toepassing. Gezien het opzet van de oppervlakbehandelingstechniek om de granulaten tot hun recht te laten komen, zal de keuze van de stenen afhangen van het gewenste effect. De granulaten zullen dus gekozen worden in functie van hun kleur daar het de kleur is die de verharding haar tonaliteit, warmte en uiterlijk geeft.

Het uitgewassen beton leent zich tot het gebruik van een uitgebreid gamma granulaten in de mate dat deze voldoen aan verschillende technische vereisten betreffende de korrelverdeling, vorm, zuiverheid, hardheid en vorstbestendigheid. De voorschriften betreffende de granulaten zijn van toepassing in functie van de klasse-indeling van het verkeer waaraan ze blootgesteld zijn (voor meer details zie hoofdstuk 2). Afhankelijk van de toepassing, zal de keuze moeten gemaakt worden tussen gebroken, halfgebroken of ronde stenen, en eventueel stenen met een hoge weerstand tegen polijsting ( $PSV \geq 50$ ).

Bepaalde gekleurde granulaten zijn echter wel tamelijk duur en bijgevolg kunnen ze zwaar wegen op de kostprijs van een betonnen wegverharding. Men mag immers niet vergeten dat een kubieke meter beton tussen de 1100 kg en 1350 kg stenen bevat.

Om de kostprijs toch te drukken kan men een beton 0/20 aanmaken dat ontmengt bij de plaatsing en zo een fijne korrelverdeling oplevert aan het oppervlak. In tabel 20 wordt een voorbeeld gegeven van een dergelijke samenstelling, figuur 41 toont de granulometrische curve van het inerte skelet van dit beton. Het voorbeeld betreft een beton bereid op basis van witte kwarts 2/5 en 5/8 en een traditioneel porfier 14/20. Wit kwarts is het kostbare granulaat dat grotendeels vervangen is door traditioneel porfiersteenslag en op deze manier toch zorgt voor een fijne korrelverdeling aan het oppervlak. Men kan effectief op de foto zien dat de oppervlakte van het beton een groot aantal witte korrels (kwarts) toont en dat een groot aantal porfierkorrels in de massa liggen.

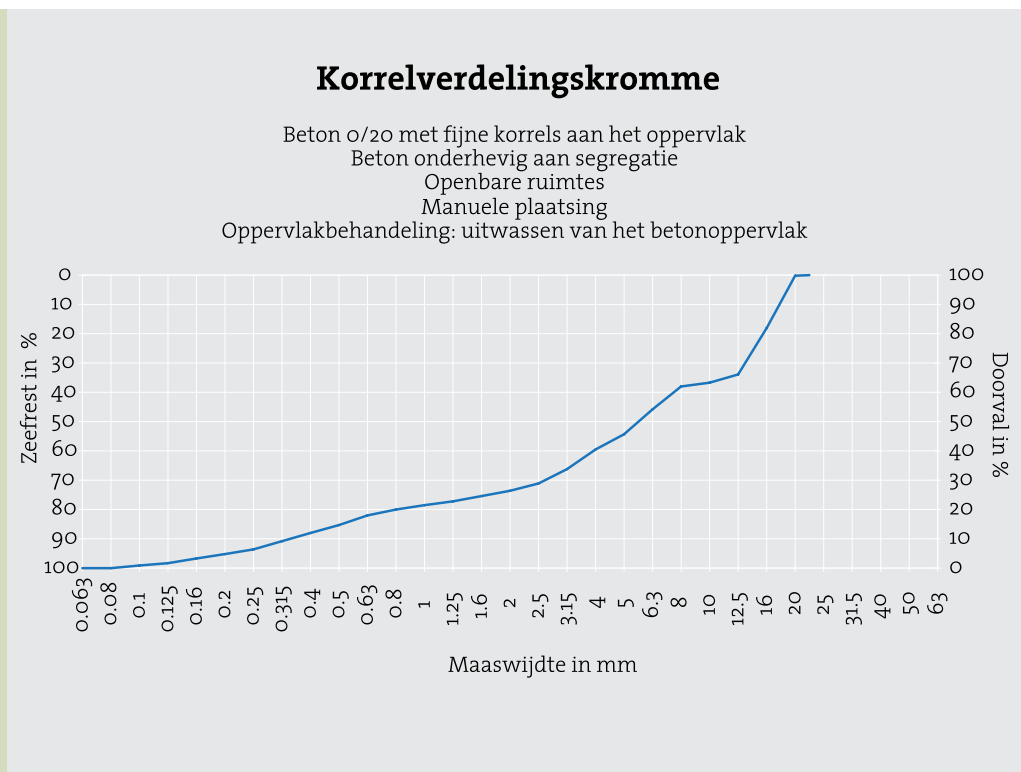
Dit beton is gekenmerkt door een discontinu inert skelet : korrels met korrelverdeling tussen 8 en 12 mm ontbreken volledig. Bovendien is de verhouding tussen de steenslagfractie (groter dan 2 mm) en de zandfractie (0/2) tamelijk groot met het gevolg dat na uitwassen een betonoppervlak wordt bekomen met een maximum aantal stenen. Bijgevolg dient dit beton niet met de glijbekistingsmachine geplaatst te worden maar eerder manueel en verdicht met de trilnaald.

**TABEL 20 – VOORBEELD VAN SAMENSTELLING VOOR EEN BETON DAT KAN ONTMENGEN (BETON 0/20 MET FIJNE KORRELVERDELING AAN HET OPPERVLAKE)**

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Porfier 14/20 :                   | 660 kg/m <sup>3</sup>    |
| Kwarts 5/8 :                      | 260 kg/m <sup>3</sup>    |
| Kwarts 2/5 :                      | 260 kg/m <sup>3</sup>    |
| Rivierzand 0/2 :                  | 560 kg/m <sup>3</sup>    |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA :      | 400 kg/m <sup>3</sup>    |
| Totaal water :                    | 180 l/m <sup>3</sup>     |
| Plastificeerder en luchtbelvormer |                          |
| Totaal :                          | ≅ 2320 kg/m <sup>3</sup> |



Figuur 41 – Referentiekromme van het inerte skelet voor beton 0/20 dat kan ontmeng



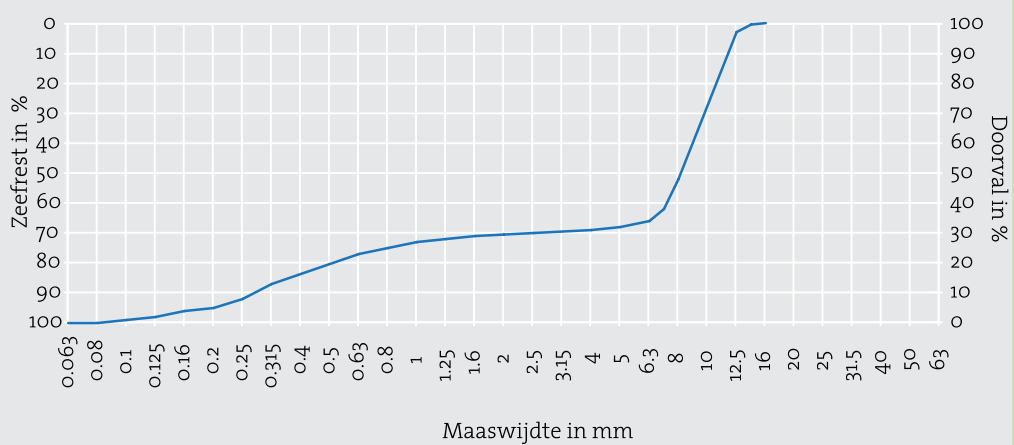
Tegenwoordig wordt gekleurd uitgewassen beton in toenemende mate toegepast voor zones voor voetgangers (stoepen, wandelpaden in parken, ...) of wanneer een oppervlak gewenst is met vooral dicht bij elkaar liggende stenen met middelmatig kaliber ( $D_{max}$  van 12 tot 16 mm). Deze betons zijn gekenmerkt door een discontinu inert skelet, de fractie 2/6 ontbreekt volledig en de verhouding tussen de steenslagfractie ( $\geq 6$  mm) en de zandfractie (0/2) is tamelijk groot (de verhouding van stenen/zand is ongeveer 2) zodat na uitwassen, een betonoppervlak wordt bekomen met een maximum aantal stenen.

In dit geval gaat het opnieuw over manueel geplaatst beton maar in tegenstelling tot het voorgaande, wordt het beton niet getrild om een maximum aan steenslag aan de oppervlakte te bekomen. Het niet trillen geeft geen aanleiding tot problemen omdat deze soort bestratingen gelegd wordt op een dikte van ongeveer 15 cm en niet belast wordt. Dit soort beton wordt geplaatst met de hand tussen vooraf gestelde bekistingen, wordt getrokken met de lat en dan vlak afgestroken.

Om de plaatsing te vergemakkelijken, moet de consistentie een klasse S3 zijn (zetmaat tussen 100 en 150 mm). Het gebruik van een plastificeerder of zelfs een superplastificeerder zal daarom noodzakelijk zijn. Om te beletten dat de oppervlakvertrager in het beton dringt, is het absoluut noodzakelijk dat het oppervlak voldoende glad en gesloten is. Bijzondere zorg zal daarom nodig zijn bij het gladstrijken. Figuur 42 toont de referentiekromme voor een beton 0/12. Figuur 43 toont het te bekomen resultaat.

## Korrelverdelingskromme

Gekleurd beton 0/12  
Voetgangersvoorzieningen  
Manuele plaatsing  
Oppervlakbehandeling: uitwassen van het betonoppervlak



Figuur 42 – Referentie-  
kromme van het inerte  
skelet voor beton 0/12  
voor voetgangerszones



Figuur 43 – Uitzicht  
van een uitgewassen  
beton 0/12 voor  
voetgangerszones

## 5.2. GEFIGUREERD BETON (OF PRINTBETON)

Met de techniek van het printbeton wil men aan het oppervlak van het beton het uiterlijk geven van natuurstenen, betonstraatstenen of een ander motief. Om dit te bereiken wordt een kleurverharder (een gepigmenteerd bindmiddel onder poedervorm) over het betonoppervlak gestrooid, daarna wordt het beton ingedrukt met behulp van de geschikte drukvorm om het gewenste patroon te bekomen. Deze techniek wordt hoofdzakelijk in een stedelijke omgeving gebruikt en dan enkel voor bijzondere toepassingen, zoals oversteekplaatsen voor voetgangers, ronde punten, bushaltes, vluchtheuvels, enz.

Wat de samenstelling betreft, moeten de specifieke vereisten voor wegenbeton nageleefd worden (cementgehalte, W/C-factor, luchtgehalte, kwaliteit van zand en stenen, enz.). Deze betons worden zelden geplaatst met een glijbekistingsmachine omdat in dit geval de consistentie van het gebruikte beton te hoog ligt en zijn mortelgehalte te laag. Het wordt dan bijna onmogelijk om het beton te printen. Het gaat dus om een beton 0/20 dat verdicht wordt met trilnaalden en een trilbalk. Het gehalte zand (fractie 0/2) is licht hoger dan dat van een klassiek wegenbeton 0/20 zoals beschreven onder 4.1.2. Het zal 35 tot maximum 40 % van het inerte skelet van het beton vertegenwoordigen.



Figuur 44 – Het verdichten van een beton dat achteraf geprint zal worden



- |   |
|---|
| 1 |
| 2 |
| 3 |
| 4 |

Figuur 45 – Voorbeelden van verhardingen in printbeton  
1 & 2 – Bushalte in Doornik  
3 – Europaplein te Brussel  
4 – Voorplein van de Sint-Annakerk te Brussel

### 5.3. BETON BESTEMD VOOR HERSTELLING VAN WEGVERHARDINGEN

Hier worden enkel die herstellingen behandeld waarbij het wegdek over zijn volledige dikte wordt vervangen (gedeeltelijke herstelling van een betonplaat, herstelling van één of meer platen, herstelling van een verharding in doorgaand gewapend beton). Het herstellingsbeton moet voldoen aan één of meerdere van de volgende voorwaarden :

- het beton moet aangemaakt worden met materialen die voldoen aan de vereisten voor wegenbeton en die toelaten een uitzicht te bekomen dat zoveel mogelijk lijkt op dat van de te herstellen weg;
- het beton moet zeer verwerkbaar zijn en moet dat ook blijven gedurende een voldoende tijdspanne om geplaatst te worden onder moeilijke omstandigheden en met beperkte verdichtingsmiddelen;
- de onderbreking van het verkeer moet tot een minimum herleid worden op weggedeeltes die onderhevig zijn aan zwaar verkeer ; bijgevolg is een snelle uitharding van het beton een belangrijk criterium. In dit opzicht wordt algemeen aangenomen dat het verkeer opnieuw mag toegelaten worden als de druksterkte op kernen hoger is dan  $40 \text{ N/mm}^2$ . De overeenkomende druksterkte gemeten op kubus met zijde van 15 cm in geëxpandeerd polystyreen, dus een geïsoleerd proefstuk, bedraagt  $35 \text{ N/mm}^2$ ;
- de eindsterkte op 90 dagen moet bovendien voldoen aan de eisen in het typebestek dat van toepassing is.

#### 5.3.1. SAMENSTELLING VAN BETON VOOR HERSTELLINGEN WAARBIJ DE DUUR VAN ONDERBREKING VAN HET VERKEER ONBELANGRIJK IS

Wanneer de duur van de onderbreking van het verkeer op het te herstellen weggedeelte niet belangrijk is voor het project, zal men kiezen voor een beton met een “klassieke” samenstelling en dat voldoet aan de verschillende criteria zoals vermeld in de voorgaande hoofdstukken in functie van het betreffende soort wegdek.

Voor kleine herstellingen, of wanneer de verdichtingsmiddelen beperkt zijn (trilnaald en trilbalk), zal men een superplastificeermiddel toevoegen om de verwerkbaarheid van het beton aanzienlijk te verhogen zonder het gewenste watergehalte te veranderen. Op deze manier en met een beton met zorgvuldig bepaalde korrelverdeling, is het mogelijk de weg op een duurzame manier te herstellen.

### 5.3.2. SAMENSTELLING VAN EEN BETON DAT SLECHTS EEN ZEER KORTE ONDERBREKING VAN HET VERKEER BEHOEFT : SNELHARDEND BETON

Door gebruik te maken van bijzondere betons, is het mogelijk voldoende sterkte te behalen zodat het mogelijk wordt de rijweg terug open te stellen voor het verkeer na 3 dagen, 2 dagen en zelfs 24 uur na de plaatsing van het nieuwe wegdek. Deze techniek is beter gekend onder zijn internationale benaming van '(ultra) fast-track concrete paving'. Deze methode zal gebruikt worden voor herstellingswerken aan wegen met zeer druk verkeer met het oog op het maximaal beperken van hinder voor het verkeer en, meer algemeen, voor alle kleine herstellingen in doorgaand gewapend beton. In dit laatste geval immers is het gebruik van een beton dat snel een hoge mechanische sterkte ontwikkelt van groot belang. Tijdens de eerste krimp na de plaatsing van het beton (dat wil zeggen bij de afkoeling tijdens de eerste nacht na de plaatsing) dient de treksterkte van het beton immers voldoende groot te zijn om de horizontale trekkrachten op te vangen. Er wordt aangenomen dat deze treksterkte voldoende is wanneer de druksterkte van het beton na 10-12 uur ongeveer 20 N/mm<sup>2</sup> bedraagt.

Naast het gebruik van een snelhardend beton, wordt het bereiken van een grote mechanische sterkte op zeer korte termijn (na 10-12 uur) bevorderd door het betonneren 's morgens uit te voeren (het ideale uur is 10-11 uur) en dan onmiddellijk na de plaatsing het beton te isoleren met een plaat geëxpandeerd polystyreen met minimum dikte van 5 cm (figuur 46).

Het cementgehalte van deze betons ligt tussen 425 en 450 kg/m<sup>3</sup>. Wat de 'ultra-fast' herstelling betreft, kan een Portlandcement (CEM I 52,5 N of R LA of CEM I 42,5 N of R LA) aangewend worden. Voor een uithardingstijd van 72 uur, kan men een hoogovencement (CEM III/A 42,5 N LA) gebruiken samen met 20 tot 25 % cement CEM I 42,5 of 52,5 N of R. Deze beperking op de hoeveelheid Portlandcement is nodig om het gehalte aan alkalische stoffen binnen de opgelegde grenzen te houden. Het gebruik van cement

CEM III/A 42,5 N LA maakt het mogelijk om een meer verwerkbaar beton te verkrijgen en bijgevolg een beton dat gemakkelijker te plaatsen is.

De korrelverdeling van het beton zal continu zijn en alleen de steenslagfracties 2/6 en 6/20 zullen gebruikt worden. De fractie 20/32 is meestal afwezig om de plaatsing van het beton gemakkelijker (niet te verzwaren) te laten verlopen. Bijgevolg komt het inerte skelet van het beton overeen met dat voorgesteld in figuur 26 voor het beton 0/20 dat voor gewest- en gemeentewegen wordt gebruikt (zie 4.1.2.).

De W/C-factor wordt bepaald in functie van de gewenste maximale uithardingstijd, maar moet steeds onder 0,40 blijven. Niet alleen heeft deze lage W/C-factor een gunstige invloed op de ontwikkeling van de sterkte, maar ook op de duurzaamheid en de scheur-gevoeligheid van het beton, niettegenstaande het hoge cementgehalte. Het toevoegen van een bepaalde hoeveelheid superplastificeerder is nodig om de W/C-factor onder 0,40 te houden en gebeurt deels in de betoncentrale en deels rechtstreeks in de truckmixer op de werf. Een luchtbelvormer wordt nooit gebruikt voor deze betons omwille van zijn invloed op de mechanische sterkte enerzijds en de reeds door de lage W/C-factor gewaarborgde duurzaamheid anderzijds.

Hier moet men vermelden dat alvorens de werf te starten, men steeds oriënteringsproeven dient te voorzien om de parameters van de samenstelling van het beton goed te bepalen die nodig zijn om de gewenste sterkte te bekomen bij de te verwachten temperatuur. De tabel 21 groepeerde de aanbevelingen inzake betonsamenstelling in functie van de omgevingstemperatuur en dit voor de wachttijden van respectievelijk 36 en 72 uur vooraleer de weg terug kan opengesteld worden voor het verkeer. Enkele voorbeelden van op de werf behaalde resultaten worden hierna gegeven.



Figuur 46 – Om de ontwikkeling van de mechanische sterkte op korte termijn te bevorderen, wordt het beton dat voor de herstelling gebruikt wordt, onmiddellijk tegen uitdroging beschermd door verstuiving van een curing compound en daarna afgedekt met een paneel in geëxpandeerd polystyreen met minimum dikte van 5 cm

**TABEL 21 – AANBEVELINGEN VOOR DE SAMENSTELLING VAN SNELHARDEND BETON**

| Wachttijd tot openstelling | Omgevings-temperatuur | Type bindmiddel                    |  |                       |
|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|--|-----------------------|
|                            |                       | CEM I LA<br>42,5 of 52,5<br>N of R | Mengsel CEM III/A<br>42,5 N LA + 20 tot 25 %<br>CEM I 42,5 R of 52,5 R | CEM III/A 42,5 N LA   |
| 36 uur                     | ≤ 15°C                | 450 kg/m <sup>3</sup>              | niet aanbevolen  | niet aanbevolen       |
|                            | > 15°C                | 425 kg/m <sup>3</sup>              | 450 kg/m <sup>3</sup>  | niet aanbevolen       |
| 72 uur                     | ≤ 15°C                | 425 kg/m <sup>3</sup>              | 450 kg/m <sup>3</sup>  | niet aanbevolen       |
|                            | > 15°C                | 425 kg/m <sup>3</sup>              | de 425 tot 450 kg/m <sup>3</sup>                                       | 450 kg/m <sup>3</sup> |

- Opmerkingen:
- 450 kg/m<sup>3</sup> cement is een maximum
  - voor een mengsel van cement, is ofwel het cement CEM I van het type LA, ofwel is het gehalte Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> van het mengsel CEM III/A – CEM I ≤ 0,90 % en het slakkegehalte van het mengsel groter dan 36 %
  - de W/C-factor van het beton is steeds ≤ 0,40

Figuur 47 – Snelhardend beton wordt gekenmerkt door een hoge cohesie dankzij het hoge cementgehalte in combinatie met het lage watergehalte ( $W/C\text{-factor} \leq 0,40$ ) en het gebruik van een superplastificeerder. In tegenstelling tot deze foto's, moet dit beton geplaatst worden met behulp van belangrijke middelen (mechanische schop, een trilnaald per meter breedte van de te betonneren strook, een krachtige trilbalk langer dan de te betonneren breedte)



### Voorbeeld nr. 1 : N2 te Veltem

Herstelling van een wegverharding in gedevelde betonplaten in oktober 2005

#### Samenstelling van het beton

- Porfiersteenslag,  $D_{\max} = 20 \text{ mm}$  ;
- Cement :  $450 \text{ kg/m}^3$  CEM I 52,5 R LA.

#### Plaatsen van het beton

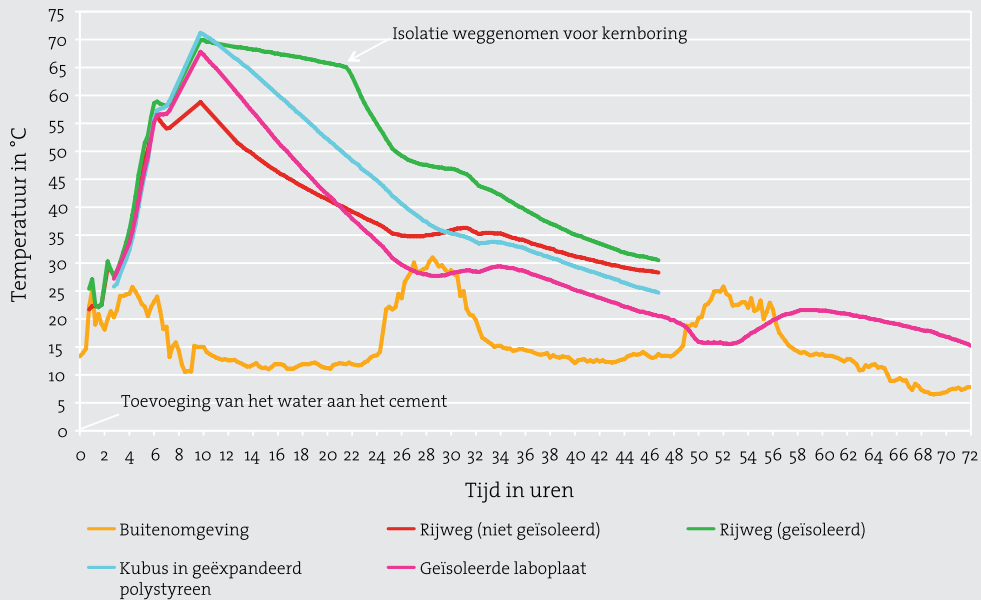
- Plaatsing met een glijbekistingsmachine;
- Oppervlakbehandeling : gebezemd;
- Isoleren van een deel van het oppervlak om de ontwikkeling van de mechanische sterkte te bevorderen, en het niet isoleren van een ander gedeelte (experimentele sectie).

#### Kenmerken van het beton

- Zetmaat (slump) =  $25 \text{ mm}$  ;
- VeBe-tijd =  $5,0 \text{ s}$
- Volumemassa van het beton =  $2395 \text{ kg/m}^3$ ;
- Totaal watergehalte =  $193 \text{ l/m}^3$  ;
- Evolutie van de temperatuur door ingebrachte thermokoppels : figuur 48 ;
- Evolutie van de druksterkte : tabel 22.

De druksterkte na 24 uur op kern gemeten is groter dan  $40 \text{ N/mm}^2$ . De weg kon dan ook snel terug opengesteld worden voor het verkeer.





Figuur 48 – Evolutie van de temperatuur door ingebrachte thermokoppels

**TABEL 22 – ONTWIKKELING VAN DE DRUKSTERKTE GEMETEN OP KUBUS MET ZIJDE VAN 15 CM IN GEËXPANDEERD POLYSTYREENVORM EN OP KERN MET SECTIE VAN 100 CM<sup>2</sup> EN HOOGTE VAN 10 CM**

| Ouderdom van het beton | Kubussen 15 cm in geëxpandeerd polystyreen | Druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )                              |   |                                      |
|------------------------|--|---|---|--------------------------------------|
|                        |  | Kernen met sectie van 100 cm <sup>2</sup> en hoogte van 10 cm |   |                                      |
|                        |  | genomen uit geïsoleerde laboplaat                             | genomen uit de weg (niet-geïsoleerd deel) | genomen uit de weg (geïsoleerd deel) |
| 24 uur                 | 38,0                                       | 41,5  | 47,5                                      | 47,9                                 |
| 30 uur                 | 39,7                                       | 42,0  | /   | /                                    |
| 7 dagen                | 44,5                                       | 45,9  | /   | /                                    |
| 28 dagen               | 52,0                                       | 58,8  | /   | /                                    |

### Voorbeeld nr. 2 : Autosnelweg E40 Brussel-Luik te Waremmes

Herstelling van een wegverharding in doorgaand gewapend beton in juli 2006

#### Samenstelling van het beton

- Gebroken grind,  $D_{\max} = 20 \text{ mm}$  ;
- Cement : mengsel CEM III/A 42,5 N LA – CEM I 52,5 N,  $425 \text{ kg/m}^3$ .

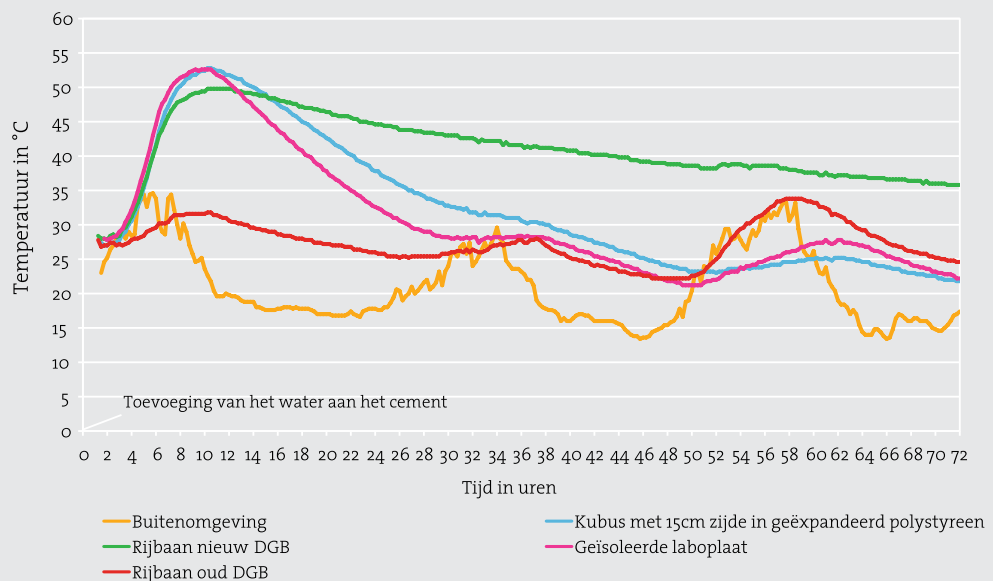
#### Plaatsen van het beton

- Plaatsing met trilnaalden en trilbalk ;
- Oppervlakbehandeling : gebezemd ;
- Isolatie van het oppervlak om de ontwikkeling van de mechanische sterkte te bevorderen.

#### Kenmerken van het beton

- Zetmaat (slump) =  $45 \text{ mm}$  ;
- Volumemassa van het beton =  $2370 \text{ kg/m}^3$  ;
- Totaal watergehalte =  $207 \text{ l/m}^3$  ;
- Evolutie van de temperatuur door ingebrachte thermokoppels: figuur 49 ;
- Evolutie van de druksterkte : tabel 23.

Hier is te zien dat na 10-12 uur, de druksterkte gemeten op kubus met zijde van 15 cm in geëxpandeerd polystyreen, een hoge waarde bereikt ( $\pm 20 \text{ N/mm}^2$ ), hetgeen essentieel is voor het herstellen van doorgaand gewapend beton. Tijdens de eerste krimp na het plaatsen van het beton (dat wil zeggen bij de afkoeling tijdens de eerste nacht na de plaatsing) dient de treksterkte van het gewapend beton immers voldoende groot te zijn om de horizontale trekkrachten op te vangen.



Figuur 49 – Evolutie van de temperatuur door ingebrachte thermokoppels

**TABEL 23 - ONTWIKKELING VAN DE DRUKSTERKTE GEMETEN OP KUBUS MET ZIJDE VAN 15 CM IN GEËXPANDEERD POLYSTYREENVORM EN OP KERNEN MET SECTIE VAN 100 CM<sup>2</sup> EN HOOGTE VAN 10 CM**

| Ouderdom van het beton | Druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )           |   |
|------------------------|--|---|
|                        | Kubussen 15 cm in geëxpandeerd polystyreen | Kernen met sectie van 100 cm <sup>2</sup> en hoogte van 10 cm genomen uit geïsoleerde laboplaat |
| 10 uur                 | 19,4                                       | /   |
| 14 uur                 | 25,1                                       | /   |
| 24 uur                 | 35,0                                       | 37,4  |
| 4 dagen                | 41,0                                       | 51,1  |
| 28 dagen               | 56,2                                       | 64,3  |
| 91 dagen               | /  | 72,3  |

#### 5.4. WEGENBETON OP BASIS VAN GERECYCLEERDE BETONPUINGRANULATEN

In het globale kader van milieubescherming en duurzame ontwikkeling, dient het hergebruik van materialen en de herwinning van afval aangemoedigd te worden. Om deze reden worden, gaandeweg, proeven op “secundaire” grondstoffen uitgevoerd. Er worden betonverhardingen gebouwd op basis van beton met een bepaald gehalte aan granulaat afkomstig van sloopbeton. Dit kunnen dubbellagig aangelegde verhardingen zijn waarvan, omwille van de specifieke sterkte-eisen, enkel de onderlaag gerecycleerde granulaten bevat, of verhardingen voor wegen die niet blootgesteld zijn aan intensief verkeer (landbouwwegen, fietspaden, enz.)

Gerecycleerde betongranulaten moeten, in principe, voldoen aan de voorschriften voor natuurlijke granulaten (zie hoofdstuk 2) en bovendien voldoen aan de voorschriften uiteengezet in tabellen 24 en 25. Hier gaat het dus zeker over gerecycleerde betongranulaten en niet over zachtere materialen zoals afbraakproducten die bijvoorbeeld baksteen bevatten. Zodoende is het beste gerecycleerde granulaat dat men kan gebruiken voor het aanleggen van betonwegen, een materiaal afkomstig van de selectieve afbraak van een oude betonverharding.

Op het vlak van watergehalte mogen er geen gerecycleerd zand en stenen van gemiddelde grootte (b.v. steenslag 2/8) gebruikt worden, dit om een relatief lage W/C-factor te kunnen behouden. Deze kunnen immers al te veel kleine bestanddelen met een grootte onder de 250 µm en zelfs 63 µm bevatten waardoor het volume water nodig om het beton te bevochtigen aanzienlijk zal toenemen. Bovendien is dit soort zand gebroken en niet rond.

**TABEL 24 – AANBEVELINGEN VOOR DE SAMENSTELLING VAN GERECYCLEERDE GRANULATEN BESTEMD VOOR WEGENBETON**

| Bestanddelen  | Gerecycleerde betongranulaten |                                |
|---|-------------------------------|--------------------------------|
|   | Voorschrift                   | Categorie volgens NBN EN 12620 |
| Gehalte aan beton, betonproducten, mortel, betonmetselwerk (% massa)  | $\geq 90$                     | $Rc_{90}$                      |
| Gehalte aan beton, betonproducten, mortel, betonmetselwerk en ongebonden granulaat, natuursteen, hydraulisch gebonden granulaat (% massa) | $\geq 95$                     | $Rcu_{95}$                     |
| Gehalte aan bestanddelen in gebakken klei, in kalksilicaat of in cellenbeton (% massa)  | $\leq 10$                     | $Rb_{10}$                      |
| Gehalte aan bitumineuze materialen (% massa)  | $\leq 5$                      | $Ra_5$                         |
| Gehalte aan andere materialen (% massa)   | $\leq 0,5$                    | $XRg_{0,5}$                    |
| Gehalte aan drijvende materialen (% massa)  | $\leq 1$                      | $X_{1}$                        |
| Gehalte aan drijvende materialen ( $cm^3/kg$ )  | $\leq 0,2$                    | $FL_{0,2}$                     |

**TABEL 25 – OPGELEGDE WAARDEN VOOR GERECYCLEERDE GRANULATEN BESTEMD VOOR WEGENBETON**

| Karakteristiek                                  | Voorschrift               | Categorie volgens NBN EN 12620 | Opmerking   |
|---|---------------------------|--------------------------------|---|
| Korrel diameter (mm)                            | $d \geq 6$<br>$D \geq 10$ | /                              | Gerecycleerd zand en granulaat van gemiddelde grootte (bv 2/8) zijn verboden omdat ze veel fijne bestanddelen ( $< 0,063$ mm) kunnen meebrengen en bijgevolg de waterbehoefte doen toenemen |
| Werkelijke volumieke massa ( $kg/m^3$ )         | $\geq 2200$               | Gemelde waarde                 | /   |
| Waterabsorptiecoëfficiënt                       | /                         | Gemelde waarde                 | De waterabsorptiecoëfficiënten na 30 minuten en 24 uur onderdompeling moeten opgegeven worden   |
| Gehalte aan in het water oplosbaar sulfaten (%) | $\leq 0,2$                | $SS_{0,2}$                     | /   |
| Totaal zwavelgehalte (%)                        | $\leq 1$                  | $S_1$                          | /   |



Figuur 50 – Een eerste belangrijke toepassing in België van beton op basis van gerecycleerde granulaten voor de aanleg van een wegverharding vond plaats in 2007-2008 bij de vernieuwing van een sectie van 3 km van de N49/E34 ter hoogte van Zwijndrecht/Melsele. Het gaat hier om een tweelaags wegdek in doorgaand gewapend beton met gebruik van gerecycleerde granulaten in de onderste laag. In dit geval werden alle granulaten 6/20 en 20/32 vervangen door gerecycleerd beton 6/20 en 20/32 afkomstig van het selectieve opbreken van de bestaande verharding waardoor een recyclagepercentage van ongeveer 60 % van het totale inerte skelet van het beton 0/32 werd bereikt

Bij het uitwerken van de samenstelling en de bereiding van het beton, dient men bijzondere aandacht te besteden aan het feit dat het gebroken beton meestal een grotere porositeit vertoont dan natuurlijke granulaten. Dit zal enerzijds een belangrijke invloed hebben op het totale watergehalte van het beton en anderzijds op de waterabsorptie door onderdompeling. Niettemin heeft men vastgesteld dat de verhoging van de waterabsorptie door onderdompeling van beton op basis van stenen uit gebroken beton geen nadelige invloed heeft op het gedrag bij vorst/dooi in aanwezigheid van dooizouten.

Het gebruik van gerecycleerde steenslag leidt eveneens tot een kleine daling van de druksterkte. Onderzoeken hebben nochtans uitgewezen dat de treksterkte van beton op basis van gerecycleerd steenslag veel minder beïnvloed wordt dan de druksterkte. Dit kan verklaard worden door de zeer goede aanhechting tussen de nieuwe verharde mortel en het oude beton van goede kwaliteit.

Hierna worden voorbeelden van resultaten gegeven. Het gaat om een laboratoriumonderzoek naar de bereiding van wegebeton 0/32 voor een gemeenteweg : er werd tot 37 % (hoeveelheid uitgedrukt in volume van de totaliteit van het inerte skelet van het beton) gerecycleerde steenslag 2/20 gebruikt. De hoeveelheden steenslag worden berekend als volgt :

$$\frac{R}{100} (S_{20/32} + S_{6/20} + S_{2/6} + Z_{0/4}) = GB$$

Waarbij:

- R, de toe te voegen hoeveelheid gerecycleerde stenen, in % van het totale volume van het inerte skelet van het beton ;
- $S_{20/32}$ , de hoeveelheid gebroken zandsteen 20/32 van het getuigebeton in  $l/m^3$  ;
- $S_{6/20}$ , de hoeveelheid gebroken zandsteen 6/20 van het getuigebeton in  $l/m^3$  ;
- $S_{2/6}$ , de hoeveelheid gebroken zandsteen 2/6 van het getuigebeton in  $l/m^3$  ;
- $Z_{0/4}$ , de hoeveelheid rivierzand 0/4 van het getuigebeton in  $l/m^3$  ;
- GB, de toe te voegen hoeveelheid gebroken beton in  $l/m^3$ .

De hoeveelheid af te wegen gerecycleerde beton wordt bekomen door GB te vermenigvuldigen met 2,320 (reële volumieke massa van het gebroken beton).

De door gerecycleerd steenslag vervangen hoeveelheden gebroken zandsteen worden berekend door volgende verhoudingen. Men dient te noteren dat enkel de fracties 2/6 en 6/20 vervangen worden vermits de gerecycleerde steenslag zelf een materiaal is waarvan de korrelgrootte varieert van 2 tot 20 mm.

$$\text{Hoeveelheid zandsteen 6/20 vervangen door steenslag van gebroken beton in } l/m^3 = S_{6/20} \cdot \frac{GB}{S_{6/20} + S_{2/6}}$$

en :

$$\text{Hoeveelheid zandsteen 2/6 vervangen door steenslag van gebroken beton in } l/m^3 = S_{2/6} \cdot \frac{GB}{S_{6/20} + S_{2/6}}$$



Figuur 51 – Producten afkomstig van het selectief opbreken van betonverhardingen zijn recycleerbaar. De economische druk maar ook milieuoverwegingen pleiten voor een edeler gebruik dan enkel voor funderingen

**TABEL 26 – VOORBEELDEN VAN DE SAMENSTELLING VOOR WEGENBETON  
0/32 DAT GERECYCLEERDE STEENSLAG BEVAT**

| Materialen  | Gebroken zandsteen   |                             | Gebroken beton  |                             |                     |                             | Rivierzand  |                             |                     |                      |
|---|--|-----------------------------|---|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---|-----------------------------|---------------------|----------------------|
|   | Reële volumieke massa :<br>2690 kg/m <sup>3</sup><br>Waterabsorptiecoëfficiënt<br>door onderdompeling na 24<br>uur : 0,8 % |                             | Reële volumieke massa :<br>2320 kg/m <sup>3</sup><br>Waterabsorptiecoëfficiënt<br>door onderdompeling na 30<br>minuten : 5,8 %<br>Waterabsorptiecoëfficiënt<br>door onderdompeling na 24<br>uur : 6,0 % |                             |                     |                             | Reële volumieke massa :<br>2650 kg/m <sup>3</sup> |                             |                     |                      |
| Samenstelling   | Getuige  | 20 % vol.<br>recyclage 6/20 |   | 26 % vol.<br>recyclage 2/20 |                     | 29 % vol.<br>recyclage 2/20 |   | 37 % vol.<br>recyclage 2/20 |                     |                      |
|   | in l/m <sup>3</sup>  | in kg/m <sup>3</sup>        | in l/m <sup>3</sup>   | in kg/m <sup>3</sup>        | in l/m <sup>3</sup> | in kg/m <sup>3</sup>        | in l/m <sup>3</sup>                               | in kg/m <sup>3</sup>        | in l/m <sup>3</sup> | in kg/m <sup>3</sup> |
| Gebroken zandsteen 20/32  | 240  | 645                         | 238   | 640                         | 236                 | 635                         | 234   | 630                         | 232                 | 625                  |
| Gebroken zandsteen 6/20   | 138  | 370                         | 0   | 0                           | 41                  | 110                         | 30  | 80                          | 0                   | 0                    |
| Gebroken zandsteen 2/6  | 117  | 315                         | 115   | 310                         | 35                  | 95                          | 25  | 65                          | 0                   | 0                    |
| Gebroken beton 2/20   | -  | -                           | -   | -                           | 179 (26%)           | 415                         | 200 (29%)   | 465                         | 255 (37%)           | 590                  |
| Gebroken beton 6/20   | -  | -                           | 138 (20%)   | 320                         | -                   | -                           | -   | -                           | -                   | -                    |
| Rivierzand 0/4  | 194  | 515                         | 194   | 515                         | 192                 | 510                         | 191   | 505                         | 189                 | 500                  |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA  |  | 375                         |   | 375                         |                     | 375                         |   | 375                         |                     | 375                  |
| Effectief water   |  | 160                         |   | 155                         |                     | 150                         |   | 155                         |                     | 150                  |
| Door granulaten<br>geabsorbeerd water   |  | 10                          |   | 20                          |                     | 25                          |   | 25                          |                     | 35                   |
| Totaal water  |  | 170                         |   | 175                         |                     | 175                         |   | 180                         |                     | 185                  |
| Plastificeermiddel  |  | 0,75                        |   | 0,75                        |                     | 0,56                        |   | 0,75                        |                     | 0,74                 |
| Luchtbelvormer  |  | 0,38                        |   | 1,12                        |                     | 1,67                        |   | 1,79                        |                     | 2,41                 |
| <b>Totaal</b>   |  | <b>2391</b>                 |   | <b>2337</b>                 |                     | <b>2316</b>                 |   | <b>2302</b>                 |                     | <b>2278</b>          |
| <b>Consistentie</b>   |  |                             |   |                             |                     |                             |   |                             |                     |                      |
| Slump (mm)  | 35   |                             | 35  |                             | 40                  |                             | 50  |                             | 55                  |                      |
| VeBe-tijd (s)   | 4,5  |                             | 4,0   |                             | 4,0                 |                             | 4,0   |                             | 3,0                 |                      |
| <b>Luchtgehalte (%-v)</b>   |  |                             |   |                             |                     |                             |   |                             |                     |                      |
|   | 3,3  |                             | 3,3   |                             | 3,0                 |                             | 3,5   |                             | 3,4                 |                      |
| <b>Druksterkte in N/mm<sup>2</sup> op kern (S = 100 cm<sup>2</sup> - h = 10 cm)</b>           |  |                             |   |                             |                     |                             |   |                             |                     |                      |
| na 7 dagen  | 47,6   |                             | 39,8  |                             | 43,7                |                             | 37,3  |                             | 33,2                |                      |
| na 28 dagen   | 64,1   |                             | 55,4  |                             | 58,2                |                             | 50,0  |                             | 47,3                |                      |
| na 91 dagen   | 69,5   |                             | 63,6  |                             | 61,7                |                             | 55,3  |                             | 53,8                |                      |
| <b>Waterabsorptie door onderdompeling (%) op schijf (S = 100 cm<sup>2</sup> - h = 4,5 cm)</b> |  |                             |   |                             |                     |                             |   |                             |                     |                      |
|   | 5,9  |                             | 6,8   |                             | 7,0                 |                             | 7,7   |                             | 7,6                 |                      |
| <b>Verlies bij vorst/dooi in aanwezigheid van dooizouten in g/dm<sup>2</sup> na 30 cycli</b>  |  |                             |   |                             |                     |                             |   |                             |                     |                      |
|   | 11,6   |                             | 12,6  |                             | 12,6                |                             | 16,0  |                             | 8,9                 |                      |

Figuur 52 – Landbouwwegen in walsbeton te Diepenbeek



## 5.5. WALSBETON

Naast het gebruik als funderingslaag kan walsbeton (WB) ook gebruikt worden als wegverharding, zoals bijvoorbeeld in het geval van landbouwwegen of boswegen. Het gaat in feite om een hybride tussen schraal beton voor funderingen en rijk wegenbeton. Walsbeton wordt immers geplaatst op nagenoeg dezelfde wijze als schraal funderingsbeton maar heeft wel een hoger cementgehalte (minimum  $200 \text{ kg/m}^3$ ) en een steenslagkaliber beperkt tot 20 mm. De mechanische sterkte die men bereikt op dit soort beton ligt dus dicht bij rijk wegenbeton dan bij funderingsbeton. Bovendien biedt walsbeton het grote voordeel van de bijna onmiddellijke ingebruikname dankzij de stabiliteit van het korrelskelet na verdichting.

De algemene tendens bestaat erin om de maximum afmetingen van de granulaten te beperken tot 20 mm en soms zelfs minder, met als drievoudig doel : vermijden van ontmenging, vergemakkelijken van het mengen, het plaatsen, het verdichten en de effenheid van het oppervlak verbeteren.

De gebruikte granulaten dienen bij voorkeur gebroken te zijn met een maximum toegelaten afmeting van 20 mm. Het steenslag is conform de eisen in tabel 11. In geval het om gerecycleerd steenslag gaat, dient het bovendien conform te zijn aan de eisen van tabellen 24 en 25. Niettemin, wat betreft de korrelgrootte, bedraagt de minimum toegelaten afmeting 2 mm ( $d \geq 2 \text{ mm}$ ).

Het gebruikte zand is natuurlijk zand zoals voor rijk wegenbeton. Nochtans is ook gewassen breeksand uitstekend geschikt. Het gehalte aan fijne deeltjes dient beperkt te blijven tot 10 %. Zand afkomstig van de recyclage van afbraakproducten is niet toegestaan.



Figuren 53 en 54 geven de aanbevolen granulometrische bundels, en dit voor twee verschillende maximum diameters van het inerte skelet : respectievelijk 16 mm en 20 mm. Een korrelverdelingskromme die dicht bij de bovenste grens aanleunt, komt overeen met een beton dat iets beter verwerkbaar is en bestemd is voor plaatsing met de finisher. Indien het beton geplaatst wordt met trilwals of bandenwals dient men een korrelverdeling na te streven die dicht aanleunt bij de onderste curve van de bundel.

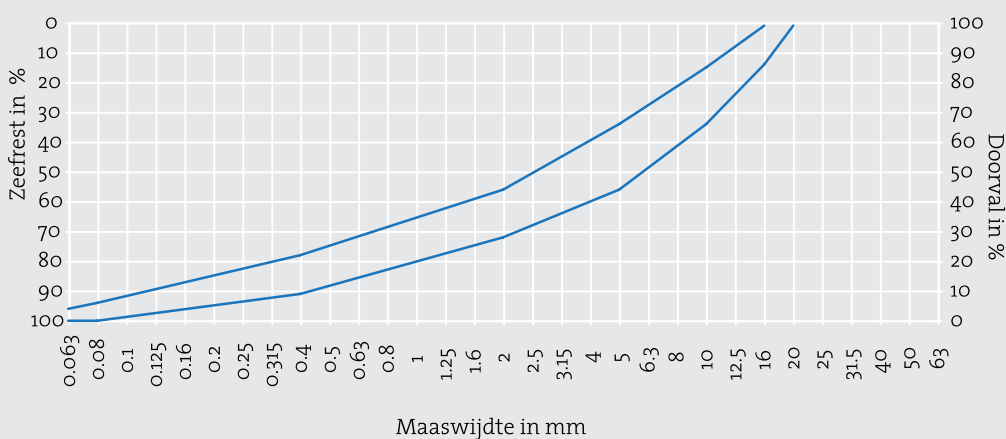
Om te kunnen voldoen aan de eisen inzake druksterkte, dient de hoeveelheid cement minimum 200 of 250 kg/m<sup>3</sup> te bedragen, respectievelijk voor walsbeton met een gemiddelde druksterkte van 20 N/mm<sup>2</sup> (WB 20) en 30 N/mm<sup>2</sup> (WB 30) gemeten op kern van 100 cm<sup>2</sup> na 90 dagen. Toevoeging van vliegias is toegestaan om de verwerkbaarheid te verbeteren en het risico op scheurvorming te verminderen. Deze toevoeging is beperkt tot maximum 5 % van de droge massa van het inerte skelet. Het blijft echter steeds noodzakelijk om krimpvoegen te voorzien (niet afgedicht) op een onderlinge afstand van maximum 5 tot 4 meter.

**TABEL 27 – AANBEVOLEN MINIMUM DRUKSTERKTE VOOR WALSBETON**

| Type beton   | WB 20 | WB 30 |
|--|-------|-------|
| Minimum gemiddelde druksterkte (N/mm <sup>2</sup> )  | 20    | 30    |
| Minimum individuele druksterkte (N/mm <sup>2</sup> ) | 15    | 25    |

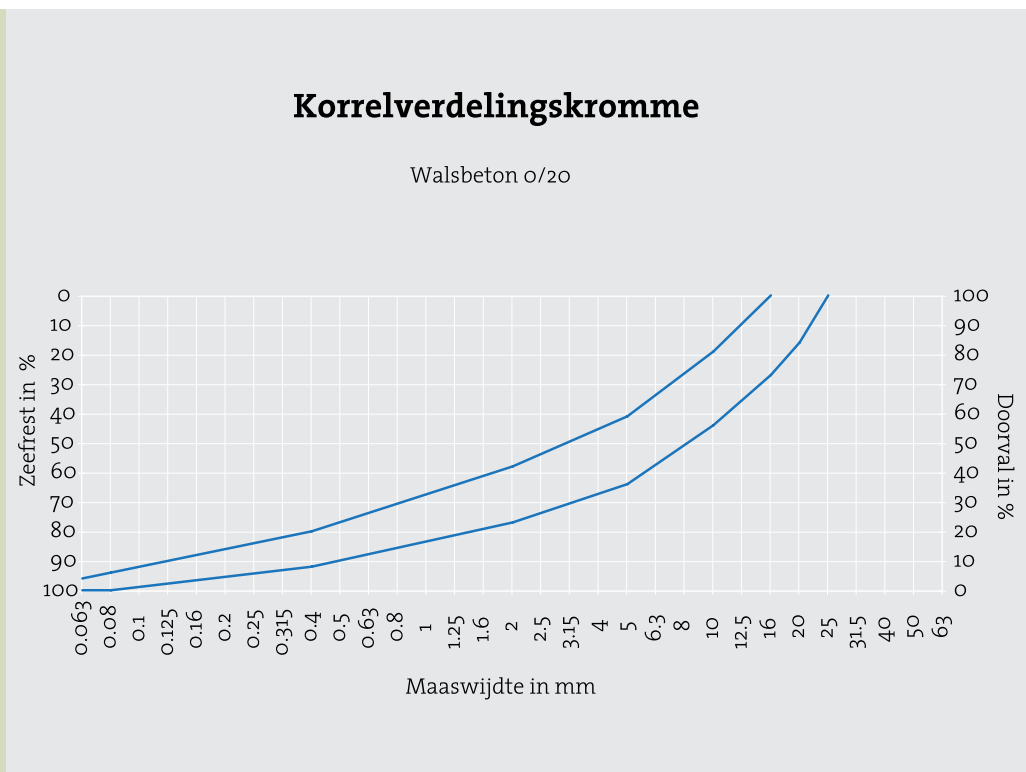
### Korrelverdelingskromme

Walsbeton 0/16



Figuur 53 – Granulometrische bundel voor walsbeton 0/16

Figuur 54 – Granulometrische bundel voor walsbeton 0/20



Het ideale watergehalte wordt bepaald aan de hand van de versterkte Proctor-proef ; het ligt meestal tussen 4 en 7 % van de massa droge materialen. Dit zeer lage watergehalte laat toe volumieke massa's en druksterkten te bereiken die zeer hoog zijn indien het beton op een correcte manier wordt geplaatst. Het beton dient geplaatst te worden in één enkele laag met behulp van een afwerkmachine of finisher. Het is aanbevolen om materieel te gebruiken dat een goede voorverdichting van het mengsel verzekert. Zo worden best afwerkmachines gebruikt die uitgerust zijn met een dubbele damplaat of glijbekistingsmachines uitgerust met krachtige trilplaten. De verdichting dient intensief te zijn om een droge volumieke massa te bekomen die hoger ligt dan 97% van het optimum van de versterkte Proctor. Het wordt aanbevolen om een trilwals te gebruiken met gladde velg waarvan de lijnbelasting minstens 30 kg/cm bedraagt in combinatie met een bandenwals met een massa van minstens 2,7 ton per band.

Tabel 28 geeft, bij wijze van voorbeeld, resultaten die bekomen zijn op versterkte Proctor-cylinders. Het gaat om een beton op basis van kalksteenslag waarvan het inerte skelet binnen de bundel 0/20 gelegen is. De resultaten tonen duidelijk aan dat het zeer belangrijk is het watergehalte te beheersen, teneinde de hoge sterkten te kunnen garanderen.

**TABEL 28 – VOORBEELD VAN SAMENSTELLINGEN EN MECHANISCHE PRESTATIES VAN WALSBETON**

**Samenstelling beton (kg/m<sup>3</sup>)**

|                                       |      |      |
|---------------------------------------|------|------|
| Gebroken kalksteen 8/20               | 835  | 815  |
| Gebroken kalksteen 2/8                | 520  | 510  |
| Gebroken kalksteenzand 0/2 (gewassen) | 730  | 710  |
| Cement CEM III/A 42,5 N LA            | 200  | 240  |
| Droge volumieke massa                 | 2285 | 2275 |

| <b>Versterkte Proctor-proef, verdichting bij wisselend watergehalte</b> | water (%) | DVM (kg/m <sup>3</sup> ) | fc 7 dagen (N/mm <sup>2</sup> ) | water (%) | DVM (kg/m <sup>3</sup> ) | fc 7 dagen (N/mm <sup>2</sup> ) |
|---|-----------|--------------------------|---------------------------------|-----------|--------------------------|---------------------------------|
| <b>Bepaling van de droge volumieke massa (DVM) en druksterkte (fc)</b>  | 1,8       | 2190                     | 5,1                             | 1,6       | 2170                     | 5,1                             |
|   | 3,6       | 2200                     | 12,1                            | 3,2       | 2195                     | 12,2                            |
|   | 4,2       | 2235                     | 22,2                            | 4,1       | 2235                     | 24,5                            |
|   | 5,2       | 2285                     | 24,6                            | 4,7       | 2270                     | 34,1                            |
|   | 7,1       | 2255                     | 21,6                            | 7,1       | 2225                     | 29,6                            |

## CONCLUSIES

De voornaamste aspecten die de kwaliteit van een goede betonsamenstelling bepalen zijn :

- de keuze van kwaliteitsgrondstoffen, in het bijzonder een goed rivierzand ;
- opteren voor een betonsamenstelling die een minimum aan holle ruimtes vertoont, m.a.w. een goede verhouding van de bestanddelen, een zo gering mogelijke hoeveelheid zand, de beperking van het watergehalte en van de W/C-factor.

De berekening van de mengverhouding van de verschillende bestanddelen kan gebeuren via de methode van de kleinste kwadraten maar wel op basis van een goede referentiekromme, aangepast aan de verwerkingsmiddelen (o.a. het vermogen van de machines waarmee het beton geplaatst wordt).

Zoals voor alle materialen dienen ook voor het plaatsen van het beton de regels van de kunst gerespecteerd te worden om het beoogde resultaat te bereiken. De kwaliteit van het verharde beton, meer bepaald de duurzaamheid van het oppervlak, is volledig afhankelijk van de bescherming van het verse beton tegen verdamping om een fatale uitdroging te vermijden. Deze nabehandeling dient zo snel mogelijk na de verdichting en afwerking op het beton aangebracht te worden. De bescherming mag in geen geval uitgesteld worden zoals men dit helaas soms vaststelt op de werf.

Door deze eenvoudige regels na te leven kan men duurzaam wegebeton bekomen waarmee veilige en comfortabele betonwegen kunnen gerealiseerd worden.



De keuze van kwaliteitsvolle materialen en een goed bestudeerde betonsamenstelling dragen bij tot een grotere duurzaamheid van bouwwerken

# NUTTIGE NORMATIEVE REFERENTIES

## 1. GRANULATEN

NBN EN 12620 - Granulaten voor beton

NBN 589-209 - Proeven op bouwzand – Chloorwaterstofzuurproef

NBN EN 932-1 - Beproevingmethoden voor algemene eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 1 : Methoden voor monsterneming

NBN EN 932-2 - Beproevingmethoden voor algemene eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 2: Methoden voor het delen van laboratoriummonsters

NBN EN 933-1 - Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 1 : Bepaling van de korrelverdeling - Zeefmethode

NBN EN 933-3 - Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 3 : Bepaling van korrelvorm - Vlakheidsindex

NBN EN 933-5 - Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 5 : Bepaling van het percentage aan gebroken oppervlakken in grove toeslagmaterialen

NBN EN 933-7 - Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 7: Bepaling van het gehalte aan schelpen - Percentage schelpen in grove toeslagmaterialen

NBN EN 933-8 - Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 8 : Beoordeling van fijn materiaal - Zandequivalentbeproeving

NBN EN 933-9 - Beproevingmethoden voor geometrische eigenschappen van granulaten - Deel 9: Beoordeling van fijn materiaal - Methyleenblauwproef

NBN EN 1097-1 - Beproevingmethoden voor de bepaling van fysische en mechanische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 1 : Bepaling van de weerstand tegen afslijting (Micro-Deval)

NBN EN 1097-2 - Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 2: Methoden voor de bepaling van de weerstand tegen verbrijzeling

NBN EN 1097-6 - Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van toeslagmaterialen - Deel 6: Bepaling van de dichtheid van de deeltjes en van de wateropname

NBN EN 1097-8 - Beproevingmethoden voor de bepaling van mechanische en fysische eigenschappen van granulaten - Deel 8: Bepaling van de polijstwaarde

NBN EN 1367-1 - Beproevingmethoden voor de thermische eigenschappen en verwerking van granulaten - Deel 1: Bepaling van de bestandheid tegen vriezen en dooien

NBN EN 1744-1 - Beproevingmethoden voor de chemische eigenschappen van granulaten - Deel 1: Chemische analyse

## 2. CEMENT

NBN EN 197-1 - Cement - Deel 1 : Samenstelling, specificatie en overeenkomstigheidscriteria voor gebruikelijke cementsoorten

NBN B12-109 - Cement - Cement met begrensd alkali-gehalte

## 3. WATER

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

## 4. HULPSTOFFEN

NBN EN 934-2 - Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel - Deel 2 : Hulpstoffen voor beton - Definities, eisen, conformiteit, markering en etikettering

## 5. PIGMENTEN

NBN EN 12878 - Pigmenten voor het kleuren van bouwmaterialen op basis van cement en/of kalk - Specificaties en beproevingsmethoden (+ AC)

## 6. BETON

NBN EN 206-1 - Beton - Deel 1 : Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit (+ A1 en A2)

NBN B 15-001 - Aanvulling op NBN EN 206-1 - Beton - Specificaties, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit

NBN EN 12350-1 - Beproeving van betonspecie - Deel 1: Monsterneming

NBN EN 12350-2 - Beproeving van betonspecie - Deel 2: Zetmaat

NBN EN 12350-3 - Beproeving van betonspecie - Deel 3: Vebe-proef

NBN EN 12350-6 - Beproeving van betonspecie - Deel 6 : Dichtheid

NBN EN 12350-7 - Beproeving van betonspecie - Deel 7: Luchtgehalte – Drukmethode

NBN EN 12390-1 - Beproeving van verhard beton - Deel 1 : Vorm, afmetingen en verdere eisen voor proefstukken en mallen (+AC)

NBN EN 12390-2 - Beproeving van verhard beton - Deel 2 : Vervaardiging en bewaring van proefstukken voor sterkteproeven

NBN EN 12390-3 - Beproeving van verhard beton - Deel 3 : Druksterkte van proefstukken

NBN EN 12390-7 - Beproeving van verhard beton - Deel 7 : Dichtheid van verhard beton

NBN B 15-215 - Proeven op beton - Wateropslorping door onderdompeling

NBN EN 480-11 - Hulpstoffen voor beton, mortel en injectiemortel - Beproevingmethoden - Deel 11: Bepaling van de eigenschappen van luchtbellen in verhard beton

ISO/DIS 4846.2 – Béton – Détermination de la résistance à l'écaillage des surfaces soumises à des agents chimiques dégivrants

CEN/TS 12390-9 – Testing hardened concrete – Part 9 : Freeze-thaw resistance - Scaling

## 7. CEMENTBETONVERHARDINGEN

Aflevering Proefmethodes 52.05 – Druksterkte van in situ genomen cementbetonkernen

CME 53.12 - Teneur en eau du béton frais

CME 53.13 - Absorption d'eau (sur la tranche supérieure d'une carotte de béton)

NBN EN 13036-1 - Oppervlakeigenschappen voor wegen en vliegvelden - Beproevingmethoden - Deel 1 : Meting van de macrotextuurdiepte van een verhardingslaag met een volumetrische methode

## BIBLIOGRAFIE

### 1. BELGISCHE BETONGROEPERING

Betontechnologie, uitgave 2006.

### 2. NEVILLE ADAM M.

Propriétés des bétons  
Editions Eyrolles, 2000

### 3. OPZOEKINGSCENTRUM VOOR DE WEGENBOUW

Handleiding voor de uitvoering van betonverhardingen, Aanbevelingen A 75/05, 2005.

### 4. OPZOEKINGSCENTRUM VOOR DE WEGENBOUW

Handleiding voor de toepassing van luchtbelvormers in wegbeton. Toepassing, mengselontwerp en keuring, Aanbevelingen A 73/02, 2002.

### 5. MINISTÈRE DE LA RÉGION WALLONNE, MINISTÈRE DE L'ÉQUIPEMENT ET DES TRANSPORTS.

Cahier des Charges-type RW 99 : 2004.

### 6. SERVICE PUBLIC DE WALLONIE.

Circulaire régionale DGO1-66-09-01 01/07/2009  
Cahier des Charges-type RW99 - Mises à jour - Chapitre G. – Revêtements.  
2009.

### 7. MINISTERIE VAN DE VLAAMSE GEMEENSCHAP.

Standaardbestek SB250 voor de wegenbouw, versie 2.1, 2006.

### 8. MINISTERIE VAN HET BRUSSELS HOOFDSTEDELIJK GEWEST, BESTUUR UITRUSTING EN VERKEER.

Typebestek TB 2000.

### 9. LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES.

Construire en béton – L'essentiel sur les matériaux  
2002.

### 10. DUTRON R.

Une méthode de détermination du dosage rationnel des bétons.  
Groupement Professionnel des Fabricants de Ciment Portland Artificiel de Belgique, Bulletin technique n° 39, 1945.

### 11. DEBROUX R ET DUMONT R.

Twin-layer continuously reinforced concrete pavement on the N511 at Estaimpuis (Belgium) : an investigation of the optimization of surface characteristics.  
Walloon Ministry of Equipment and Transport (MET), Mons, Belgium,  
8th International Conference on Concrete Pavements,  
Colorado Springs, Colorado, August 2005.

### 12. ONFIELD J-N.

Déviation de Saint-Pierre-la-Cour – Une section expérimentale de béton à faible granulométrie de surface.  
Route Actualité, n° 146, septembre 2005.



**13. SOMMER H.,**

Recycling of concrete for the reconstruction of the concrete pavement of the motorway Vienna-Salzburg.

7<sup>ème</sup> Symposium International des Routes en Béton.

Vienne, Octobre 1994

**14. JASIENSKI A., PLOYAERT C., DEBLIRE J., BOLETTE R.,**

Study of concrete crushed stone for the construction of an industrial road in Ouffet

8<sup>ème</sup> Symposium International des Routes en Béton.

Lisbonne, Septembre 1998.

**15. PLOYAERT C.**

Cementgebonden funderingen voor wegen, Eigenschappen en toepassingen.

Federatie van de Belgische Cementnijverheid, Dossier cement, bulletin nr. 33, 2004.







Belgische Beton Groepering



Een publicatie van :

**FEBELCEM**

Federatie van de Belgische Cementnijverheid

Vorstlaan 68 - 1170 Brussel

tel. 02 645 52 11 - fax 02 640 06 70

[www.febelcem.be](http://www.febelcem.be)

[info@febelcem.be](mailto:info@febelcem.be)

Auteur:

Ir. C. Ployaert

In samenwerking met P. Van Audenhove, CRIC-OCCN

Foto's:

Paul Van Audenhove, met uitzondering van :

- Figuren 9b, 43 en 50 : Luc Rens
- Figuren 5, 9a, 21 en conclusies : Claude Ployaert
- Figuur 13 : Sagrex HeidelbergCement Group
- Figuur 16b : TRBA s.a.
- Figuur 25 : SPW
- Cover en figuren 38 en 49 : AWV
- Figuren 40 en 48 : A. Nullens

Wettelijk depot : D/2010/0280/06

V. U : A. Jasienski

[infobeton.be](http://infobeton.be)

