Vlaams Ministerie van Mobiliteit en Openbare Werken
Departement Mobiliteit en Openbare Werken
Technisch Ondersteunende Diensten
Expertise Beton en Staal (EBS)

Graaf de Ferrarisgebouw, verdieping 6
Koning Albert II-laan 20 bus 6
1000 Brussel

tel. 02 553 73 56 fax 02 553 73 55
expertise.betonenstaal@vlaanderen.be

Cursus bruginspecteur

Hoofdstuk 1.5

Voorspansystemen en betontechnologie

Versie	Cursus 2012

INHOUDSTAFEL

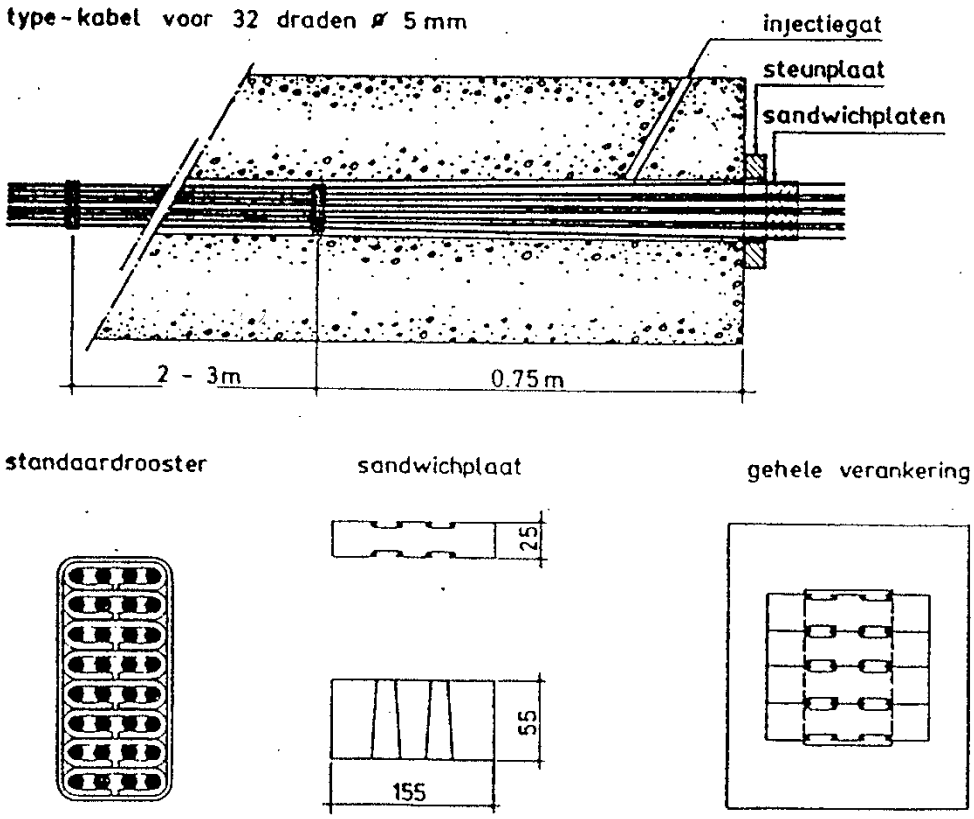
1 voorspansystemen (post-tensioning) 2
1.1 Het Blaton-Magnel-systeem 2
1.2 Het BBRV-systeem 2
1.3 Het oude Freyssinet-systeem 3
1.4 Moderne strengenkabels 4
1.5 Voorspanstaven 6
1.6 Mono-streng-systeem 7
1.7 Bijzondere schikkingen 8
2 Betontechnologie 9
2.1 Betonsamenstelling 9
2.1.1 Normale samenstellingen 9
2.1.2 Cementsoorten 9
2.1.3 Granulaten 11
2.1.4 Water 11
2.1.5 Hulpstoffen 12
2.1.6 Toevoegsels 12
2.2 De verwerking 12
2.3 Kenmerken verhardend en verhard beton 15
2.3.1 Binding en verharding 15
2.3.2 De druksterkte 16
2.3.3 De krimp 16
2.3.4 De bindingswarmte 17
2.3.5 De porositeit 17
2.3.6 De kruip 18

1 VOORSPANSYSTEMEN (POST-TENSIONING)

Hierna volgt een opsomming van meest gebruikte oude en nieuwe voorspansystemen.

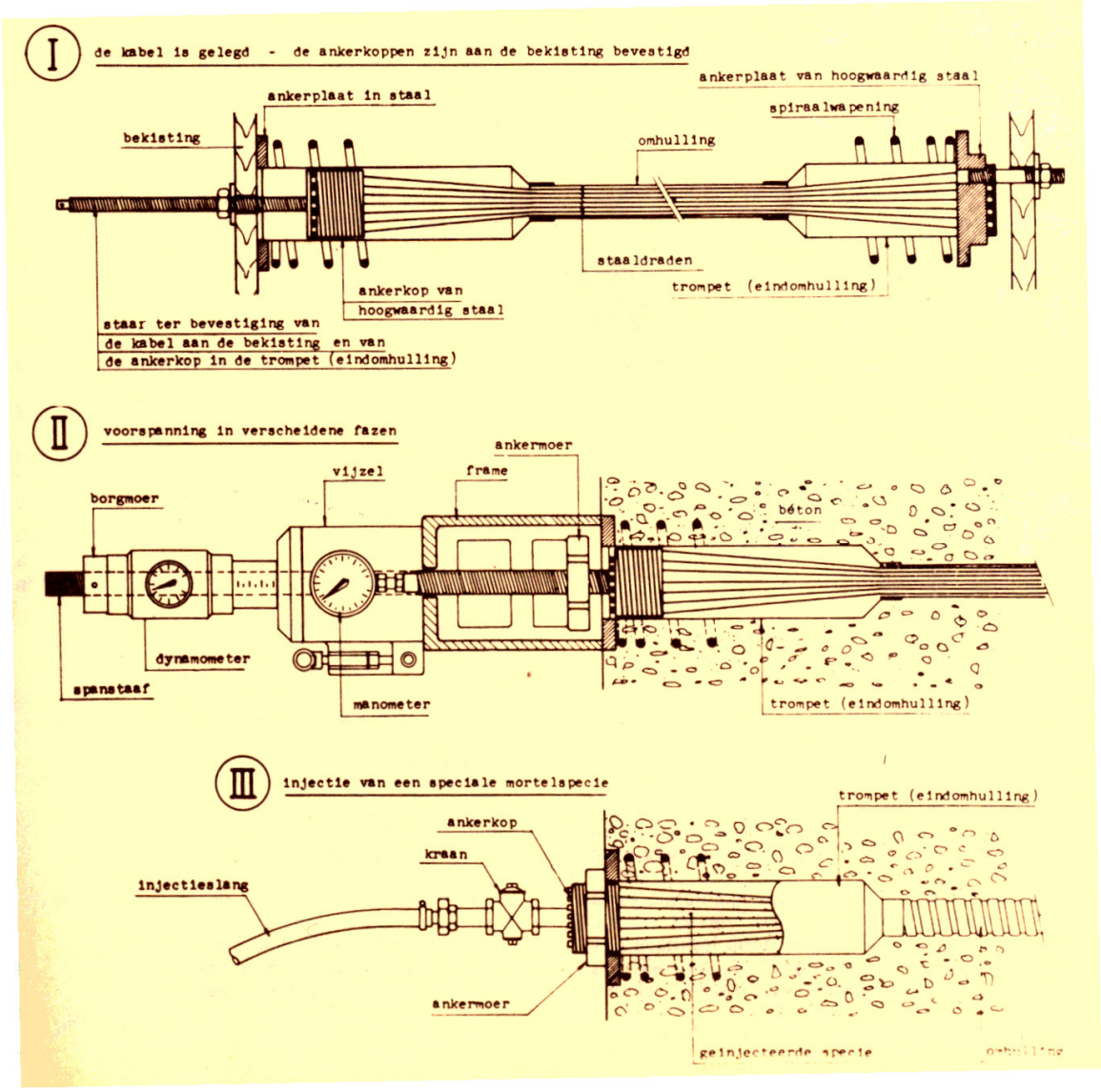
1.1 Het Blaton-Magnel-systeem

In dit systeem worden voorspandraden met diameter 5 mm of 7 mm twee aan twee gebundeld tot kabels. In onderstaande figuur zijn de voornaamste details te zien zoals de roosters waarmee de draden op afstand werden gehouden, en de zogenaamde sandwichplaten waarin de draden twee aan twee met wiggen verankerd werden. De kabels hebben steeds een rechthoekige doorsnede. De hulzen voor inwendig gebruikte kabels bestaan uit rechthoekige blikken dozen. Bij gebruik als uitwendige kabel werd de bescherming van het staal verkregen door de kabel in te bedden in een mortelbalk. Bij vele bruggen met uitwendige kabels werden deze reeds vervangen door moderne kabels omwille van corrosieproblemen.



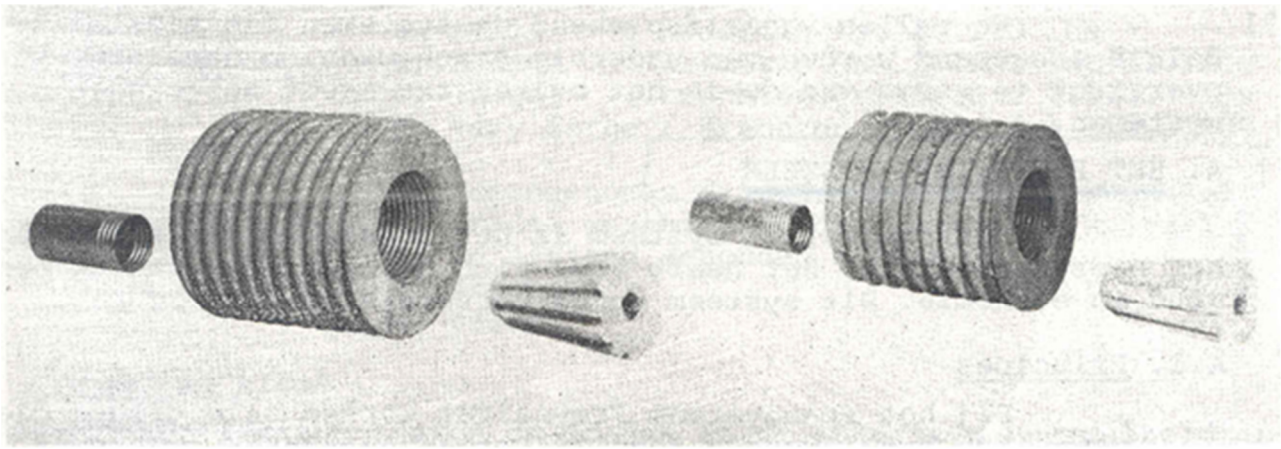
1.2 Het BBRV-systeem

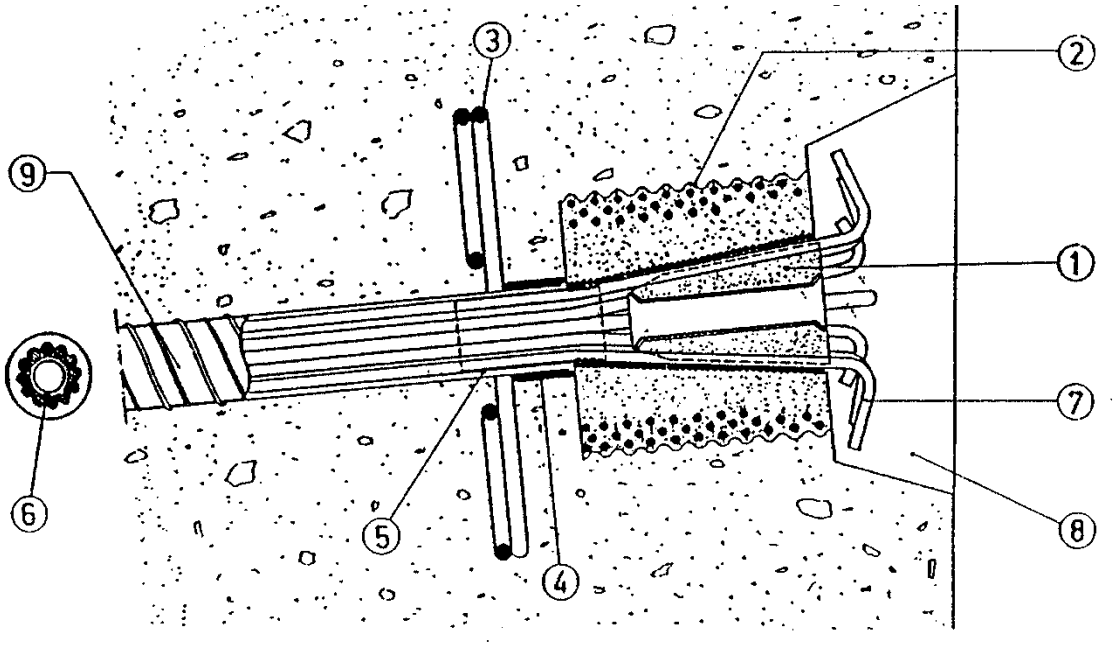
In dit systeem worden de kabels met hulzen en verankeringen vooraf klaargemaakt in het werkhuis en als dusdanig ingestort in het beton. De kabel kan tot 55 afzonderlijke draden diameter 7 mm bevatten. De afzonderlijke draden worden doorheen de ankerkop gevoerd en hun uiteinde wordt koud opgestuikt. Onderstaande figuur toont de voornaamste details. Bij het voorspannen wordt getrokken met een draadstang op de ankerkop. Nadat de gewenste kracht en verlenging bekomen zijn, wordt de ankerkop vastgezet met een borgmoer die steun neemt op de ankerplaat. Voordeel van dit systeem is dat alle draden even lang zijn en dat volgens wens gespannen en gelost kan worden.



1.3 Het oude Freyssinet-systeem

Onderstaande figuren tonen de voornaamste onderdelen van dit systeem. De kabels bestonden uit 12 draden van 5 mm, 7 mm of 8 mm, of uit 12 strengen van 7 draden diameter 4 mm. In de huls zijn de afzonderlijke draden of strengen geschikt rondom een centrale spiraalveer. Na het spannen worden zij verankerd door wrijving tussen een betonnen prop en een conus van beton of staal (nrs. 1 en 2 van de figuur).





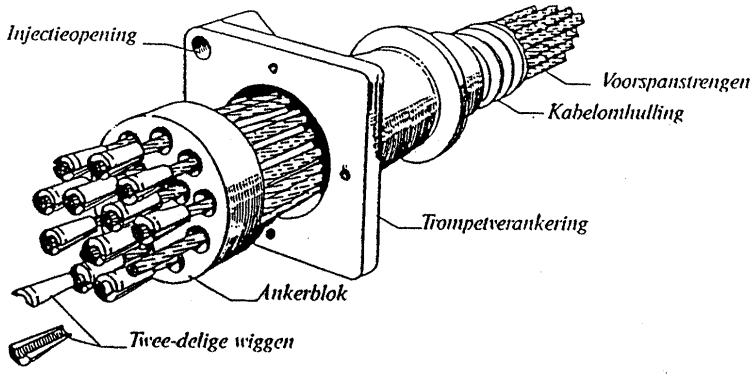
1 prop
2 conus
3 netwapening
4 kleefband
5 mof
6 centrale spiraalveer
7 uitwaaierende en omgebogen draden
8 uitsparing
9 koker van geribd bandstaal

1.4 Moderne strengenkabels

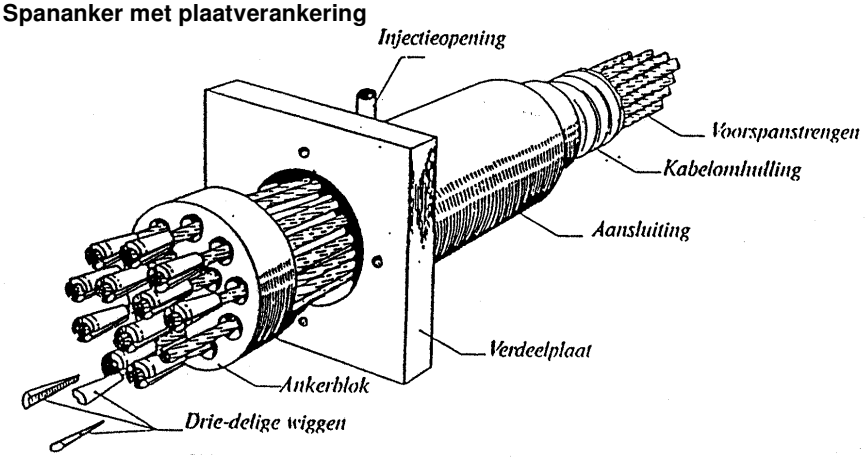
De leveranciers van de huidige voorspansystemen brengen strengenkabels op de markt die alle zeer sterk op elkaar gelijken (Freyssinet, Dywidag Systems International, VSL, BBRV, …).

De afzonderlijke strengen worden na voorspanning met stalen wiggen vastgezet in de ankerkop. Sommige systemen gebruiken twee wiggen per streng, andere drie. De ankerkop neemt steun op een verdeelplaat die de voorspankracht gelijkmatig aan het beton overdraagt. Aan de verdeelplaat zit een trompetvormige verbreding van de huls bevestigd. Volgende figuren verduidelijken dit alles.

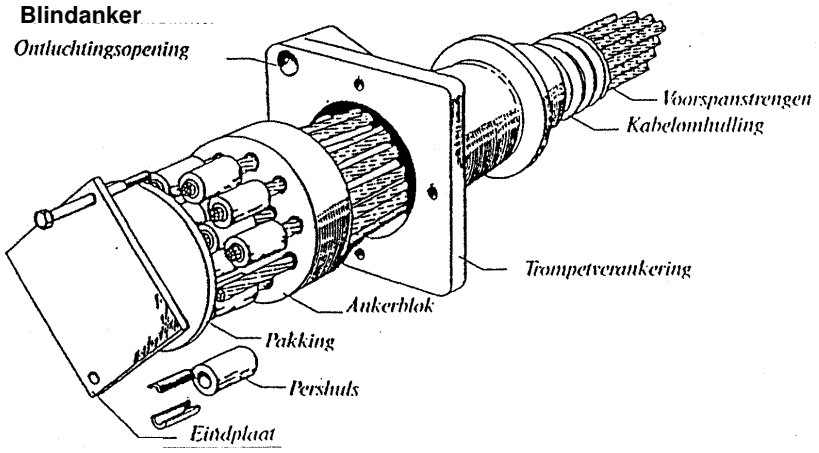
Spananker met trompetverankering

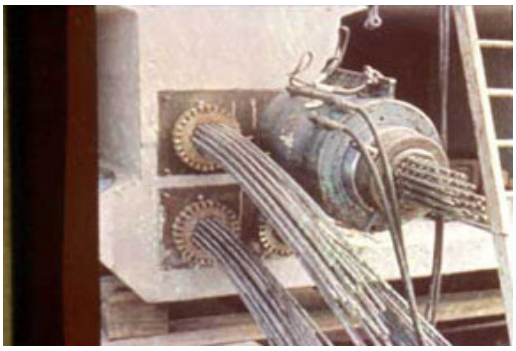


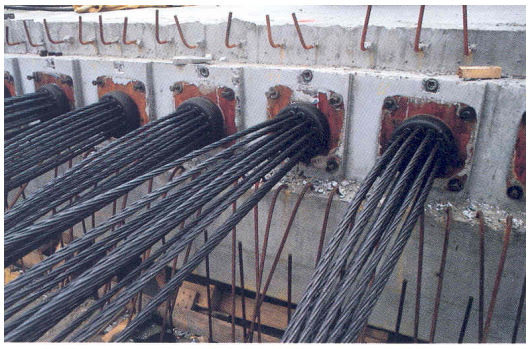
Spananker met plaatverankering



Blindanker

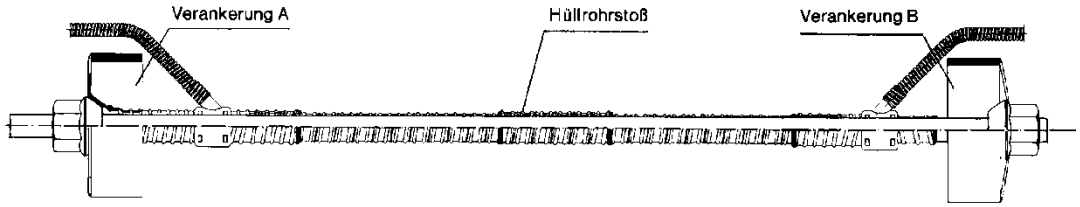




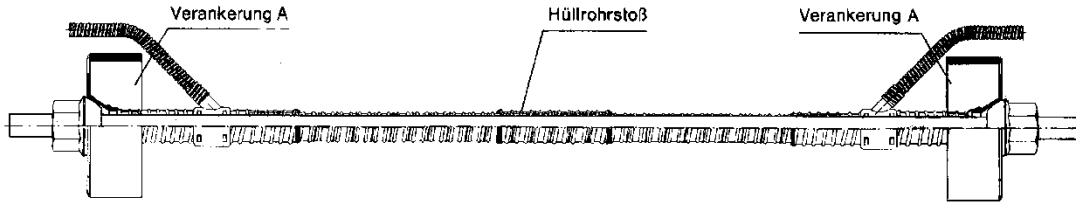


1.5 Voorspanstaven

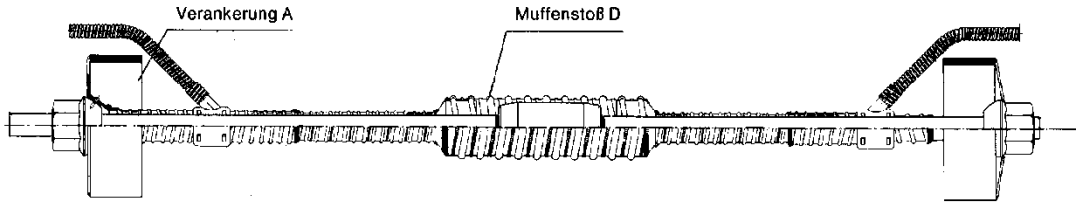
Bij dit systeem worden afzonderlijke gladde of geribde staven van hoogwaardig staal voorgespannen. De doorsnede van de staven situeert zich tussen 5 cm² en 10 cm². Door de beperkte lengte van de staven is dit voorspansysteem geëigend voor constructies in vrije voorbouw waar de staven moot per moot doorgekoppeld worden met moffen. Bij belangrijke dwarskrachten kan men de beugels met goed gevolg vervangen door voorspanstaven. Onderstaande figuur geeft enkele typische onderdelen van het systeem. In ons land zijn vooral de Dywidag-staven en in mindere mate de McAlloy-staven bekend.



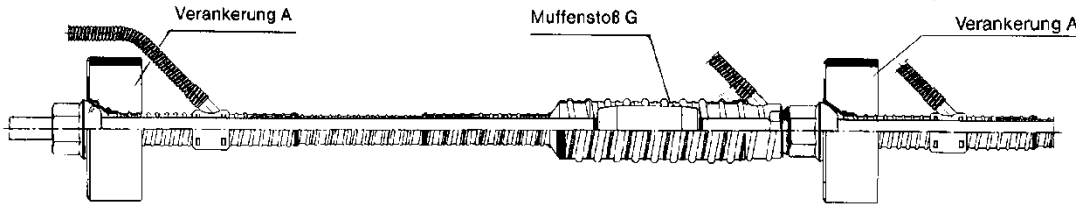
Spannglied mit Spannanker (Verankerung A) und Festanker (Verankerung B)



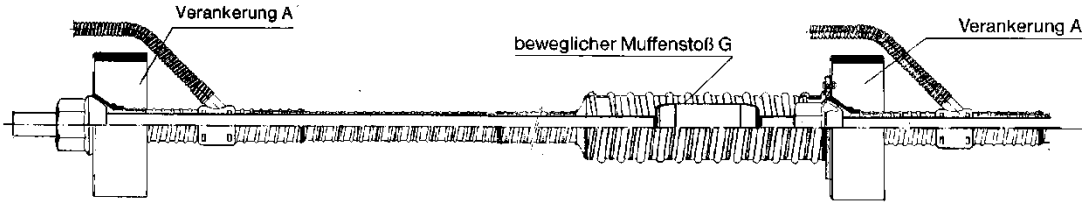
Spannglied mit zwei Spannankern (Verankerung A)



Spannglied mit Muffenstoß D

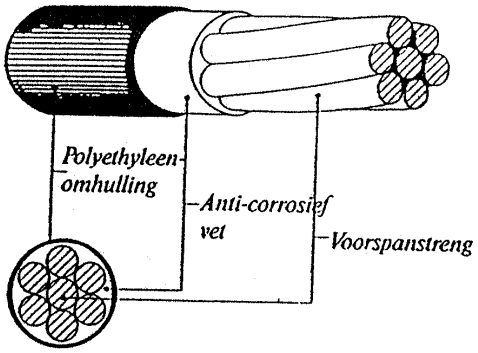


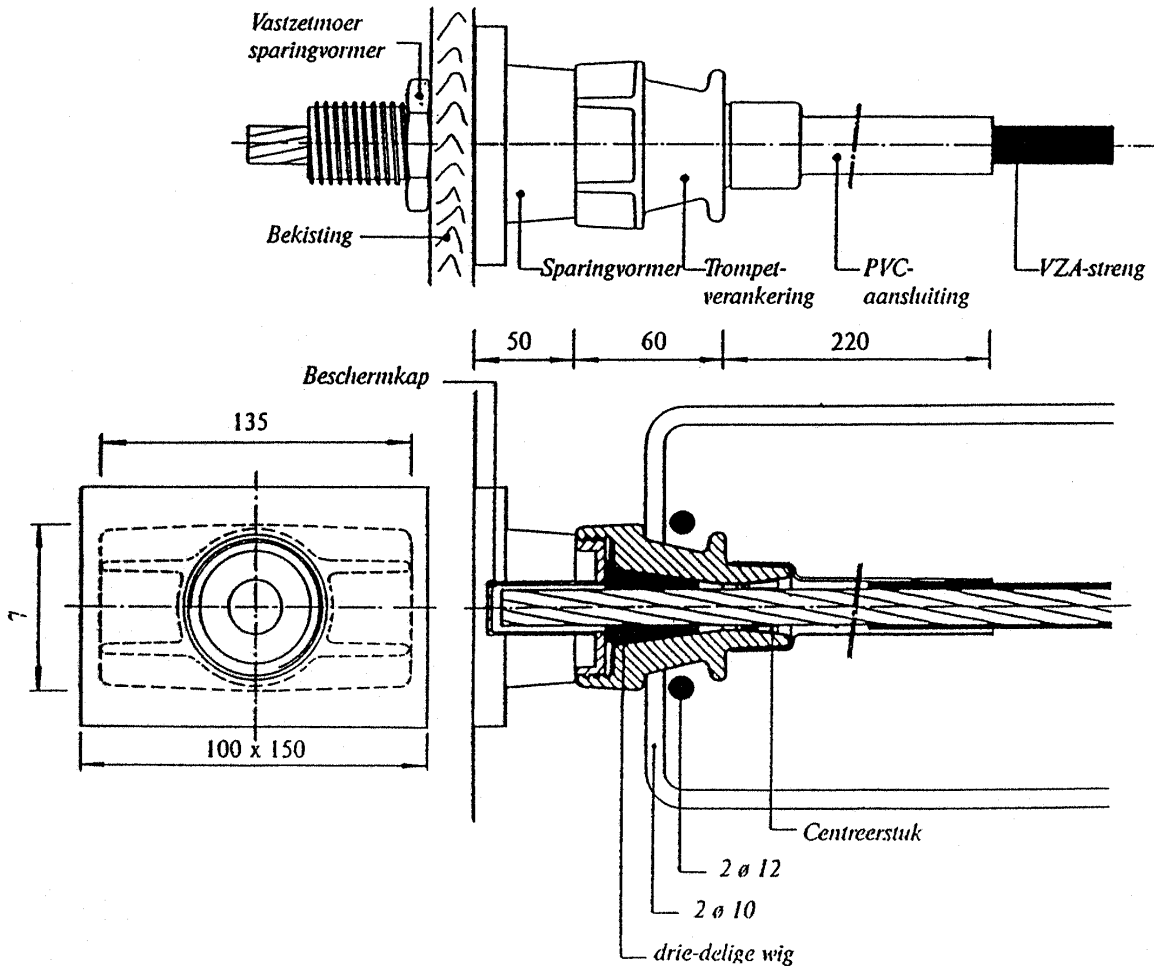
Spannglied mit Muffenstoß G



1.6 Mono-streng-systeem

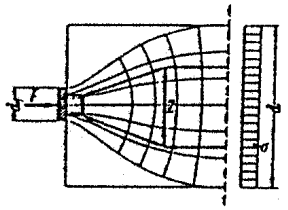
Het gaat hier om afzonderlijk in het beton gestorte strengen die ook afzonderlijk voorgespannen worden. De streng bevindt zich in een huls van kunststof die gevuld is met vet; er is bijgevolg geen aanhechting. Bijzondere zorg dient besteed aan de bescherming van de verankeringen aan de uiteinden tegen corrosie. Dit verklaart waarom deze toepassing populair wordt in de gebouwensector. Bij bruggen kan dit systeem aangewend worden voor tijdelijke versterking in afwachting van een definitieve oplossing. De afkorting VZA betekent voorspanning zonder aanhechting; in het Engels spreekt men van unbonded tendons.



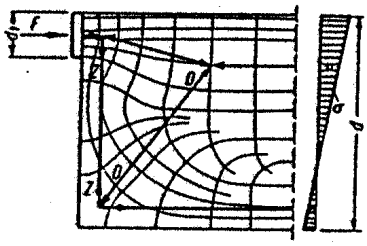


1.7 Bijzondere schikkingen

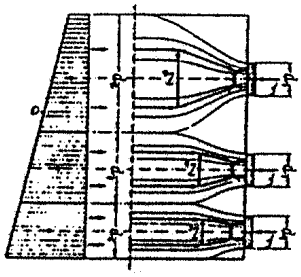
- Bij post-tensioningsystemen zorgt de verdeelplaat van de verankering voor de overdracht van de voorspankracht op het beton. Deze kracht moet zich openspreiden naar de volledige dwarsdoorsnede en hiermee gaan belangrijke trekspanningen (spatkrachten) in het beton gepaard. Om deze reden zijn de meeste systemen voorzien van spiraalwapening bevestigd aan de trompetten, en zijn de eindblokken zwaar voorzien van passief staal. Betonschade en corrosie in de nabijheid van de verankeringen is dus steeds als ernstig te beschouwen.



Kraftfluß bei mittiger Lage der Ankerplatte

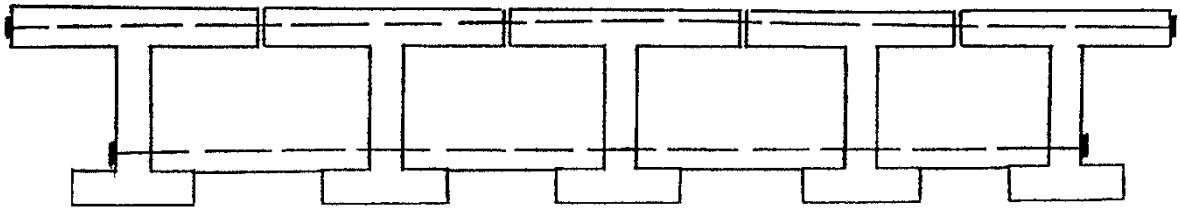


Kraftfluß bei Lage der Ankerplatte am Querschnittsrand



Kraftfluß bei mehreren, ungünstig verteilten Ankerplatten

- Naast de langse voorspanning werd in ons land sporadisch gebruik gemaakt van dwarse voorspanning. Hierbij wordt een dubbel doel nagestreefd : enerzijds het zijdelings verbinden van afzonderlijk vervaardigde brugelementen (liggers), en anderzijds het verstevigen van de dwarsdragers met het oog op het verdelen van de lasten in dwarszin. In de praktijk maakt men gebruik van kabels met kleine doorsnede, of van afzonderlijke draden diameter 9 mm. De verankeringen van dit actief staal bevinden zich ter plaatse van de randen van de brugdekplaat, of in de lijven van de randliggers ter plaatse van de dwarsdragers. Delicate punten hierbij zijn de overgangen tussen de brugelementen en de verankeringen omdat deze plaatsen vaak blootgesteld zijn aan insijpelend vocht of regen. Onderstaande figuur illustreert dit.



2 BETONTECHNOLOGIE

2.1 Betonsamenstelling

2.1.1 Normale samenstellingen

De betonnorm, NBN EN 206-1:2001 en NBN B15-001:2004, definieert beton als volgt :

"Materiaal dat wordt gevormd door het mengen van cement, grof en fijn granulaat en water, met of zonder de toevoeging van hulpstoffen en toevoegsels en dat zijn eigenschappen ontwikkelt door de hydratatie van het cement ".

De bestanddelen van beton zijn dus : cement, granulaten, aanmaakwater en eventueel hulpstoffen en/of toevoegsels. In de regel wordt beton samengesteld uit 70 tot 80% granulaten, 10 tot 15% cement, 15 tot 20% water en 2 tot 5% lucht.

Naargelang de volumieke massa onderscheidt men drie types beton :

- Normaalbeton: beton met een ovendroge volumieke massa groter dan 2000 kg/m³, maar niet meer dan 2600 kg/m³; dit is het beton van de meeste van onze kunstwerken;
- Lichtbeton: beton met een ovendroge volumieke massa van niet minder dan 800 kg/m³ en niet meer dan 2000 kg/m³. Het wordt vervaardigd door het gebruik van licht granulaat ter vervanging van een deel of van al het granulaat;
- Zwaarbeton: beton met een ovendroge volumieke massa groter dan 2600 kg/m³.

Wanneer de maximale nominale grootste korrelafmeting van het granulaat verwerkt in het beton kleiner is dan 4 mm spreekt men van mortel.

Ons bruggenbestand bevat enkele bruggen in licht beton. Licht beton is vervaardigd op basis van lichte granulaten van gebakken geëxpandeerde klei- of schistekorrels (Agral of Argex). In tegenstelling met normaal beton wordt bij licht beton het skelet gevormd door de mortel en niet door de granulaten. Bovendien dient vermeld dat lichte granulaten poreus zijn en bijgevolg veel water kunnen opslorpen.

Zwaar beton wordt uitzonderlijk gebruikt in tegengewichten van beweegbare bruggen, of als tegengewicht zonder meer.

2.1.2 Cementsoorten

De gebruikte cementsoorten hebben in de loop der tijden grote wijzigingen ondergaan. Na het "kunstmatig" Portlandcement wordt hoogovencement op de markt gebracht. De energiecrisis van de 70-er jaren leidde tot wijziging in de productieprocessen (overgang van het natte naar het droge procédé, kleinere maalfijnheid). Ook werden vliegassen toegevoegd.

Eveneens is er in de loop der jaren een evolutie geweest in de benamingen en in de afkortingen, onder andere ingevolge het invoeren van Europese normen.

De cementsoorten conform aan NBN EN 197-1 zijn onderverdeeld in hoofdtypes :

- CEM I: Portlandcement
- CEM II: Samengesteld Portlandcement
- CEM III: Hoogovencement
- CEM IV: Puzzolaancement
- CEM V: Composietcement

Niet alle cementsoorten worden in België geproduceerd. De samenstelling van de courant geproduceerde cementsoorten moet conform zijn aan deze in de tabel hierna (gehalten in massapercentages).

Types	Aanduiding		Hoofdbestanddelen				Neven-bestand-delen
			K	S	V	L of LL	
I	Portlandcement	CEM I	95-100	-	-	-	0-5
II	Portlandvliegascement	CEM II/A-V	80-94	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	21-35	-	0-5
	Portland-kalksteencement	CEM II/A-L of LL	80-94	-	-	6-20	0-5
	Portland-composietcement	CEM II/A-M	80-94	6-20			0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35			0-5
III	Hoogovencement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	0-5
V	Composietcement	CEM V/A	40-64	18-30	18-30	-	0-5

K = klinker
S = hoogovenslak
V = Siliciumhoudende vliegas
L of LL = Kalksteen

De benaming van de cementsoorten wordt aangevuld met een getal dat de sterkteklasse aangeeft. De genormaliseerde sterkteklassen zijn 32,5; 42,5 en 52,5. Verder wordt een N of en R toegevoegd om aan te geven dat een cement op jonge ouderdom een normale of een hoge druksterkte heeft.

Wanneer bovendien ook de aanduiding LH toegevoegd wordt, dan betekent dit dat het cement een geringe hydratatiewarmte heeft (vooral gebruikt voor massabeton).

Deze eigenschappen worden verklaard binnen de wettelijk verplichte CE-markering op cement.

VOORBEELD
- Een Portlandcement van sterkteklasse 42,5 met een hoge druksterkte op jonge ouderdom, wordt aangeduid als CEM I 42,5 R CE.
- Een hoogovencement met een slakgehalte tussen 66 en 80% van sterkteklasse 32,5 met een normale aanvangssterkte en een lage hydratatiewarmte wordt aangeduid als :
  CEM III/B 32,5 N – LH CE.

Voor bijzondere toepassingen zijn er ook speciale cementsoorten waarvan de voornaamste zijn :

- cement met hoge bestandheid tegen sulfaten (HSR) voor beton in een vochtig, sulfaathoudend milieu (zeewater, calciumsulfaathoudend water, …);
- cement met begrensd alkaligehalte (LA) voor beton met alkaligevoelige granulaten in een vochtig milieu;
- cement met hoge aanvangssterkte (HES);
- wit cement.

Voor deze cementsoorten worden de hiervoor vermelde afgekorte aanduidingen aangevuld met de tussen haakjes vermelde afkortingen. Deze eigenschappen kunnen gecertificeerd worden onder het vrijwillig Benor-merk.

VOORBEELD:
Portlandcement van sterkteklasse 42,5 met een hoge druksterkte op jonge ouderdom en met een begrensd alkaligehalte wordt aangeduid met CEM I 42,5 R CE LA BENOR.

Ingevolge de problemen met het optreden van de alkali-silicareactie (ASR) werd het gebruik van LA-cementen verplicht gesteld voor nieuwe kunstwerken.

2.1.3 Granulaten

Onder granulaten verstaat men het geheel van inerte (natuurlijke en kunstmatige) materialen die het betonskelet uitmaken.

Een granulaat wordt gekarakteriseerd door d en D, waarbij d de kleinste en D de grootste korrelgrootte zijn die te vinden zijn in het granulaat.

Naar grootte onderscheidt men grof granulaat met d ≥ 2mm en zand met d = 0mm en D ≤ 4mm.

Bij de zanden maakt men onderscheid tussen natuurlijk zand en breekzand.

Bij de natuurlijke grove granulaten zijn de meest voorkomende grind, ontgonnen in of naast rivieren of op zee, kalksteen en porfier.

Bij de kunstmatige grove granulaten onderscheiden we onder andere puingranulaten, slakken en lichte granulaten.

2.1.4 Water

Het aanmaakwater voor beton mag geen schadelijke stoffen bevatten die een nadelige invloed uitoefenen op de binding, de verharding en de duurzaamheid van het beton. Het water mag evenmin stoffen bevatten die corrosie van de wapening zouden kunnen veroorzaken.

Drinkbaar water is geschikt voor het aanmaken van beton. Water van andere oorsprong dient beproefd te worden.

2.1.5 Hulpstoffen

Een hulpstof is een product dat in kleine hoeveelheden ten opzichte van de cementmassa (tussen 0 en 5 %) toegevoegd wordt, voor of tijdens het mengen of gedurende een extra menging, en dat bepaalde eigenschappen van het beton wijzigt zoals gewenst.

De op de markt beschikbare hulpstoffen worden onderscheiden naar hun functie. Sommige hulpstoffen kunnen tegelijkertijd meerdere functies vervullen.

De meest voorkomende hulpstoffen zijn :

- plastificeerder / waterreduceerder;
- superplastificeerder /sterk waterreduceerder;
- watervasthoudende hulpstof;
- luchtbelvormer;
- bindingsversneller;
- verhardingsversneller;
- bindingsvertrager;
- waterdichtingsmiddel in de massa;
- colloïdale hulpstof.

2.1.6 Toevoegsels

Een toevoegsel wordt gedefinieerd als een fijn verdeeld materiaal dat toegevoegd kan worden aan beton om bepaalde eigenschappen te verbeteren of om speciale eigenschappen te bekomen.

Er zijn twee soorten toevoegsels : nagenoeg inerte toevoegsels (type I) en puzzolane of latent hydraulische toevoegsels (type II).

Voorbeelden van type I toevoegsels: kalksteenfiller, pigmenten, …
Voorbeelden van type II toevoegsels: vliegas, gemalen hoogovenslak, microsilica, …

Sommige van de type II-toevoegsels zijn reeds aanwezig in sommige cementtypes. Ze kunnen verder ook afzonderlijk toegevoegd worden aan het mengsel ter vervanging van een gedeelte van de cementhoeveelheid. De normen beschrijven de eisen die van toepassing zijn wanneer type II-toevoegsels toegevoegd worden.

2.2 De verwerking

Van zodra het droog mengsel in aanraking komt met het aanmaakwater, treedt een scheikundige reactie op tussen het cement en het water. Deze reactie levert in eerste instantie de binding op en later de verharding. Beton dient verwerkt te worden vooraleer de binding optreedt.

Theoretisch is dit onmogelijk want de binding start onmiddellijk na het mengen. Praktisch gezien moet, om de vermindering van de verwerkbaarheid tot een minimum te beperken, het beton zo snel mogelijk na het mengen gestort worden en in ieder geval binnen de door de betoncentrale opgegeven gegarandeerde verwerkingstermijn.

De water-cementfactor (W/C-factor) is de verhouding tussen de totale hoeveelheid water in het mengsel en het cementgewicht van het mengsel. De hoeveelheid water omvat het eigenlijke aanmaakwater verhoogd met het vochtgehalte van de granulaten en met de hoeveelheid water in de vloeibare hulpstoffen.

Wanneer type II-toevoegsels toegevoegd worden, dan kan in combinatie met bepaalde cementen een deel van het gewicht ervan opgeteld worden bij het cementgewicht voor het berekenen van de water-bindmiddelfactor.

De betonnorm voorziet een maximale W/C-factor naargelang de omgevings- of milieuklasse van de constructie. Voor beton zonder ingebrachte lucht, zijn de waarden hieronder weergegeven.

Omgevingsklasse		**Maximale W/C-factor**	
Symbool	**Omschrijving**	**Ongewapend beton (OB)**	**Gewapend of voorgespannen beton (GB of VB)**
E0	**Niet schadelijk**	1,00	NVT
EI	**Binnenomgeving**	1,00	0,65
EE	**Buitenomgeving**		
EE1	Geen vorst	1,00	0,60
EE2	Vorst, geen contact met regen	0,55	0,55
EE3	Vorst, contact met regen	0,55	0,50
EE4	Vorst en dooizouten (aanwezigheid van ter plaatse ontdooid of opspattend of aflopend dooizouthoudend water	0,45	0,45
ES	**Zeeomgeving**		
	Geen contact met zeewater; wel contact met zeelucht (tot 3km van kust) en/of brak water		
ES1	Geen vorst	0,60	0,50
ES2	Vorst	0,55	0,50
	Contact met zeewater		
ES3	Ondergedompeld	0,55	0,45
ES4	Getijden- en spatzone	0,45	0,45
EA	**Agressieve omgeving**		
EA1	Zwak agressieve chemische omgeving	0,55	0,55
EA2	Middelmatig agressieve chemische omgeving	0,50	0,50
EA3	Sterk agressieve chemische omgeving	0,45	0,45

Zoals verder nog aan bod zal komen is de W/C-factor een zeer belangrijk element in verband met de duurzaamheid van beton. Voordien was de druksterkte het enige criterium dat gebruikt werd om de betonkwaliteit te controleren.

De consistentie van een vers betonmengsel is een maat voor de verwerkbaarheid. De norm voorziet 4 methoden om de consistentie te bepalen. Voor de praktijk bij ons zijn alleen de zetmaatproef en de schokmaatproef van belang. Tussen beide methoden bestaat er geen eenduidig verband.

De gewenste consistentie wordt vermeld bij de betonbestelling en hangt af van de vorm van de bekisting, van de hoeveelheid wapening, van de wijze van verdichten, enz.

Het verdichten van het vers gestort mengsel is een bewerking met de bedoeling luchtinsluitsels zo veel als mogelijk uit te drijven. Dit kan gebeuren met de trilnaald, door te trillen op de bekisting, of door te schokken. Te lang verdichten leidt tot ontmenging.

Bij onze kunstwerken verwachten we in verband met de duurzaamheid dat ook de oppervlaktezone van het beton van goede kwaliteit is. Daartoe zijn een goede nabehandeling en bescherming van het verse en jonge beton tijdens een voldoende lange tijdsspanne noodzakelijk. De nabehandeling is een maatregel tegen vroegtijdig uitdrogen, vooral bij zonnestraling en wind. Bescherming is een maatregel tegen uitwassing door regen, snelle afkoeling, hoge inwendige temperatuurverschillen, lage temperaturen of vorst en trillingen of stoten.

Nabehandeling en bescherming moeten zo snel mogelijk na het verdichten starten.

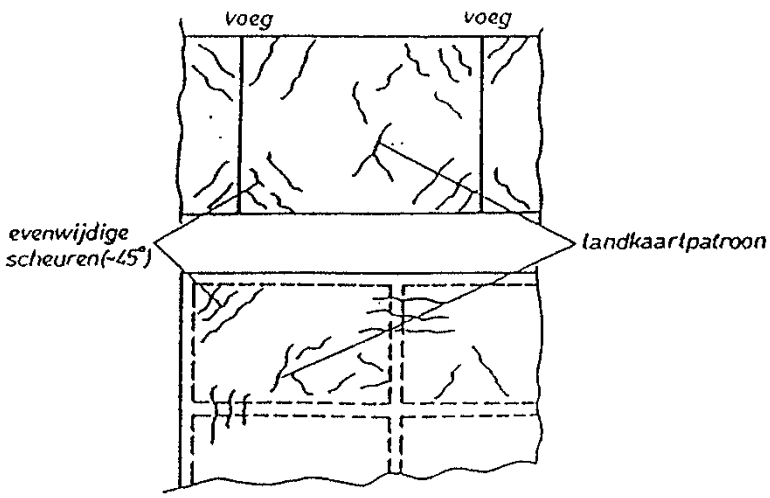
Het tijdelijk behoud van de bekisting is als een methode van nabehandeling te beschouwen vermits het vroegtijdig uitdrogen tegengaat.

Wat zijn nu de meest voorkomende fouten tijdens de verwerking ?

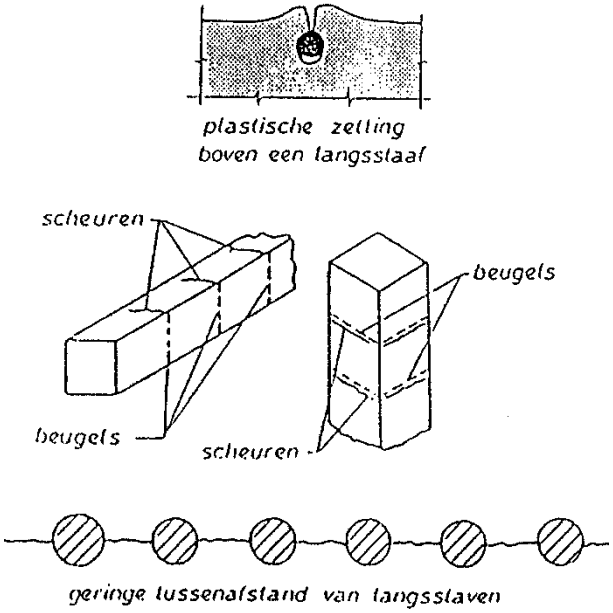
- onvoldoende betondekking op de wapeningen door slordig vlechtwerk of door verplaatsing of vervorming tijdens het storten;
- betonstaven die te dicht bij elkaar liggen door een slecht ontwerp of door slechte plaatsing, zodat zij onvoldoende omhuld zijn met beton;
- bekisting onvoldoende stijf en/of niet dicht. Dit geeft een ongelijkmatig oppervlak en/of zones waar cementpasta of mortel ontbreken;
- fouten in de betonsamenstelling : te weinig cement of granulaten, te veel water, verkeerd gedoseerde hulpstoffen, verkeerd cement, …;
- segregatie of ontmenging door bv. het storten van een te grote hoogte, door te lang trillen, door een te hoge consistentie;
- waterverlies aan het betonoppervlak door het opzuigen van het aanmaakwater door de bekisting, of door slechte of onvoldoende nabehandeling;
- grindnesten door onvoldoende trillen, omdat de ingesloten lucht niet kon verdwijnen, of door te lage consistentie;
- onvoldoende verzorgde stortnaden : vergeten wegnemen van loszittend vuil, vergeten ruw maken, vergeten voorbevochtigen zodat het oude beton het verse beton heeft leeggezogen, …;
- onvoldoende nabehandeling en bescherming van het jonge beton met als gevolg een poreuze oppervlaktelaag of bleedingverschijnselen.

Bleeding is plastische scheurvorming, d.w.z. scheurvorming in jong beton. Men onderscheidt de plastische krimp, en de plastische zetting.

Plastische krimp treedt op tussen 2 en 4 u na het mengen wanneer de hoeveelheid verdampend water de hoeveelheid uitzwetend water overtreft. De scheuren liggen op 45° nabij de hoeken en vertonen een landkaartpatroon in de velden. Aan het oppervlak kan de scheurwijdte oplopen tot 3 mm.



Plastische zetting treedt op bij zeer vloeibaar beton door de graviteit. De zetting wordt verhinderd door de wapeningen alwaar zich scheuren manifesteren. De scheuren bevinden zich bijgevolg op de wapeningen.



Scheurvorming door plastische zetting

2.3 Kenmerken verhardend en verhard beton

2.3.1 Binding en verharding

Zoals hoger reeds vermeld, reageert het cement met het aanmaakwater, hierbij wordt een gedeelte van het water gebonden. Men noemt dit hydratatie. De hydratatie kenmerkt zich door twee belangrijke verschijnselen:

- de binding die de cementbrij doet verstarren
- de verharding die na de binding volgt en het mengsel cement - water omzet in cementsteen

Bij het mengen van beton omhult elke cementkorrel zich met een laagje water met een dikte van 1 micron. Tijdens de binding reageren de buitenste moleculen van de cementkorrel met dit laagje water; tijdens de verharding hydrateren de meer naar binnen gelegen moleculen.

Hieruit kan men begrijpen dat de binding vrij snel optreedt, terwijl de verharding meerdere weken vergt.

2.3.2 De druksterkte

De druksterkte is de meest gebruikte eigenschap, en vroeger de enige, om de kwaliteit van beton te omschrijven. Zij is gemakkelijk te meten door een eenvoudige drukproef op een referentiekubus met zijde 15 cm, vroeger was dit 20 cm. Resultaten bekomen via anders gevormde proefstukken moeten met een omzettingscoëfficiënt vermenigvuldigd worden.

De ontwikkeling van de druksterkte hangt af van de ontwikkeling van de hydratatie. Zij wordt versneld door de omgevingstemperatuur tijdens de verharding, door de maalfijnheid van het cement, en eventueel door de werking van een versnellende hulpstof.

Te snel verhardend beton kan echter nadelig zijn voor de uiteindelijke drukweerstand. Dit komt omdat tijdens de hydratatie kristallen gevormd worden rond het cement; een te snelle kristalgroei geeft grote grove kristallen met weinig weerstand, trage groei geeft vele kleine kristallen die goed in elkaar grijpen.

2.3.3 De krimp

In een betonmengsel is er omwille van de verwerkbaarheid steeds meer water aanwezig dan nodig voor de hydratatie. Dit overtollige water vormt toegankelijke poriën tussen de kristallen zodat hydraulische bewegingen (krimpen en zwellen) mogelijk worden ten gevolge van wisselende oppervlaktespanningen tussen de kristallen.

Tijdens het verdampen van het overtollig water ontstaat er dus een nadelig krimpverschijnsel.

Beton dat onder water verhardt, kan niet uitdrogen en vertoont bijgevolg geen krimp.

Voor een klassiek beton mag men rekenen op een krimp van 0,4 tot 0,6 promille.

Krimp hangt af van de volgende factoren:

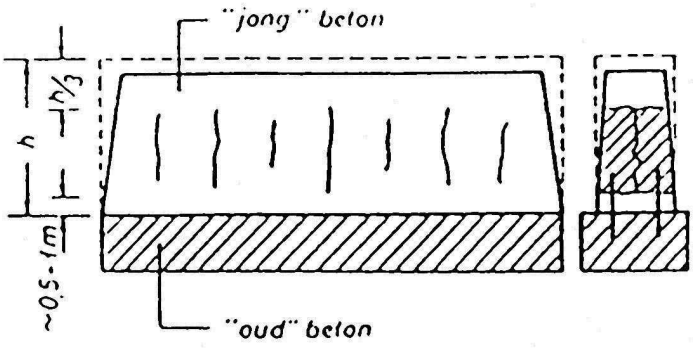
- van de vochtigheidsgraad van de omgeving;
- van de W/C-factor; bij een lage waarde is de krimp ook lager; voor de waarde 0,30 zou de krimp nagenoeg nul zijn;
- van de hoeveelheid cement;
- van de vorm van het betonelement: dunne elementen drogen sneller uit en krimpen bijgevolg meer.

Uitdroging van jong beton is nadelig om volgende redenen :

- de uitdroging gaat sneller aan het oppervlak dan in het inwendige ; hierdoor ontstaat een verschil in krimp waardoor scheuren optreden; deze scheuren zijn veelal weinig diep;

- omdat de krimpbeweging bijna altijd geheel of gedeeltelijk verhinderd wordt, ontstaan krimpspanningen in het beton die al of niet opgenomen kunnen worden door de aanwezige wapening;

- wanneer jong beton op oud beton gestort wordt, wordt de krimp in het contactvlak verhinderd; een typisch voorbeeld hiervan zijn de verticale scheuren in vollewandpijlers en -landhoofden.



In al deze gevallen spreekt men van krimpscheuren.

2.3.4 De bindingswarmte

De hydratatie van cement is een exotherme reactie, d.w.z. dat zij gepaard gaat met een warmteontwikkeling, de zogenaamde bindingswarmte. Deze warmte doet de reactiesnelheid van de hydratatie toenemen ten nadele van de druksterkte, en doet overtollig water snel verdampen hetgeen krimpspanning opwekt. Ook door temperatuurverschillen tussen het warmere beton in de massa en het koelere beton aan het oppervlak is scheurvorming mogelijk. Dit fenomeen noemt men warmtescheuren.

Bij massabeton gebruikt in stuwdammen en sluizen bv. zal men hiermede rekening houden door een cement te kiezen dat traag verhardt of dat een lage bindingswarmte opwekt, of door het beton inwendig te koelen.

2.3.5 De porositeit

In hetgeen voorafgaat, is er reeds de nadruk op gelegd dat overtollig aanmaakwater zeer nadelig is voor de duurzaamheid van beton. Samengevat kan men stellen dat dit overtollig water verantwoordelijk is voor toegankelijke poriën tussen de cementsteenkristallen.

Dit heeft als gevolgen :

- dat bij het verdampen van het overtollig water aan het betonoppervlak krimpscheuren kunnen optreden;
- dat na het verdampen toegankelijke poriën overblijven langswaar nadien schadelijke gassen en vocht het beton kunnen aantasten.

Uiteraard leidt een overmaat aan poriën in de cementsteen ook tot een lagere druksterkte van het beton.

Een lage W/C-factor en een goede nabehandeling zijn bijgevolg van het grootste belang.

2.3.6 De kruip

Het vergroten van de vervorming onder constante langdurige last noemt men de kruip. Beton is, zoals andere materialen, onderhevig aan dit verschijnsel. Het is echter wel gevoeliger omdat het belast wordt op een ogenblik dat het rijpingsproces nog aan de gang is. Een betonnen structuur wordt inderdaad bijna altijd belast voordat de hydratatie beëindigd is. Kruip gaat bijgevolg steeds gepaard met krimp zodat het totaal effect vergroot wordt.

Kruip is vooral afhankelijk van de vochtigheidsgraad van de omgeving, van de W/C-factor, en van de ouderdom bij belasting.

De hinder die kruip veroorzaakt op de onderbouw van onze bruggen is verwaarloosbaar. Op de bovenbouw echter is hij van groot belang.

Bij bruggen in gewapend beton neemt het aandeel van het eigengewicht en de permanente lasten toe naarmate de overspanning toeneemt. Bij balkenbruggen wordt dit belangrijk boven de 15 m, bij volleplaatbruggen boven de 10 m. Het eigengewicht en de permanente lasten zorgen voor permanente trekspanningen onderaan en permanente drukspanningen bovenaan in de doorsnede (althans bij een eenvoudig opgelegde structuur), zodat door de kruip de brug zal gaan "doorhangen" in de tijd.

Bij bruggen in spanbeton met klassieke overspanningen worden de trekspanningen van het eigengewicht en de permanente lasten weggedrukt door de drukspanning vanwege de voorspanning. Deze resulterende permanente drukspanningen geven door het kruipverschijnsel in de tijd een verkorting van de brug en daaruitvolgend een verlies aan voorspankracht.

Bij bruggen in spanbeton met grote overspanningen wordt het aandeel van het eigengewicht en de vaste overlasten weer relatief belangrijk t.o.v. de mobiele overlasten. De kruip in de meest gedrukte zones is groter (bovenaan in het midden van de overspanningen, onderaan in de zone van de pijlers bij doorlopende liggers) dan in de minder gedrukte zones waardoor de doorbuiging toeneemt.

Bij bruggen die in vrije voorbouw gerealiseerd werden, is vastgesteld dat er een blijvende evolutie is in de doorbuiging. Hierbij spelen de ingewikkelde spanningstoestanden tijdens het bouwproces eveneens een rol.

Samengevat : de kruip geeft aanleiding tot doorbuiging en verkorting; bij normale bruggen neemt het fenomeen af in de tijd, bij grote bruggen kan het blijven evolueren.