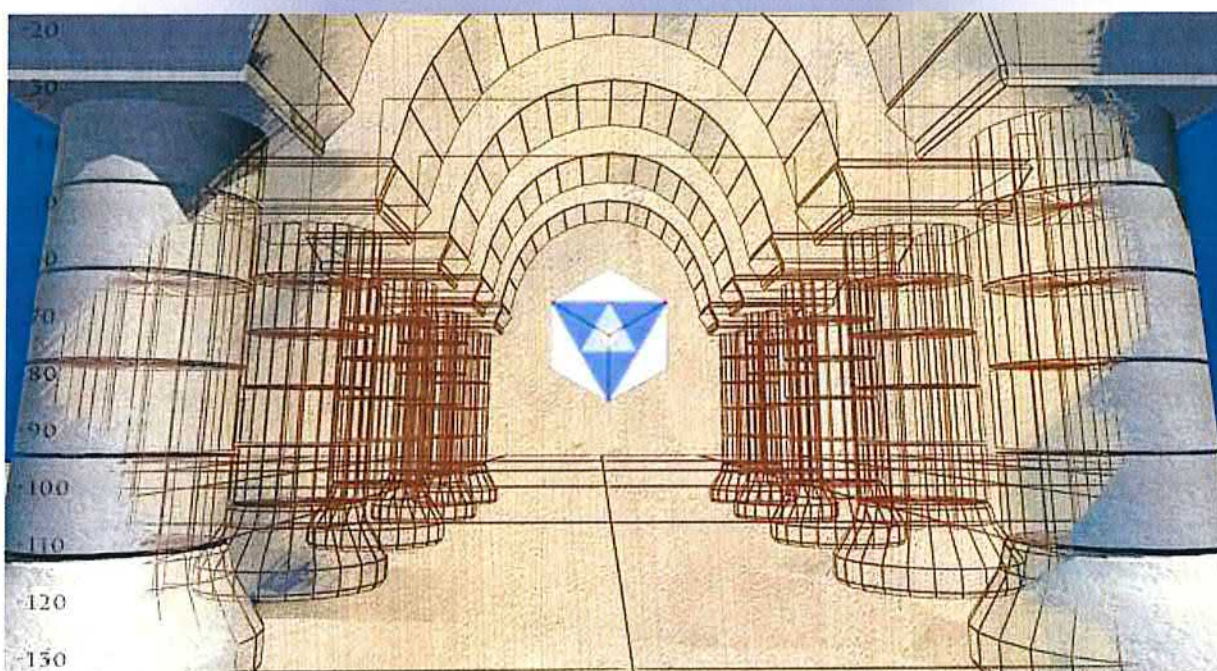


BEKISTINGDRUK BIJ NIEUWE BETONSPECIESOORTEN



STUBECO STUDIECEL A 04

Bekistingdruk bij nieuwe betonspeciesoorten

Definitieve versie, november 2005

Stubeco studiecel A 04

ing. C.J. Tol
ing. Th.J.A. Paap
ing. E. Freriks
ing. A. Hoogstraten
C. van't Slot
ing. B. Tims
ing. G.A. Waayer

De Studievereniging Uitvoering Betonconstructies (Stubeco) en degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, hebben een zo groot mogelijke zorgvuldigheid betracht bij het verwerken van de in deze publicatie vervatte gegevens. Nochtans moet niet de mogelijkheid worden uitgesloten dat er zich toch onjuistheden in deze publicatie kunnen bevinden. Degene die van deze publicatie gebruik maakt, aanvaardt daarvan het risico. De Stubeco sluit, mede ten behoeve van al degenen die aan deze publicatie hebben meegewerkt, iedere aansprakelijkheid uit voor schade die mocht voortvloeien uit het gebruik van deze gegevens.

Gehele of gedeeltelijke overname van de inhoud is alleen toegestaan met schriftelijke toestemming van het Stubeco-bestuur.

*Deze publicatie is verkrijgbaar bij:
Stubeco, Büchnerweg 3, Postbus 411, 2800 AK Gouda
tel.nr. (0182) 53 92 33, fax (0182) 53 75 10
e-mail: info@stubeco.nl - website: www.stubeco.nl*

Inhoudsopgave

1.	Inleiding	4
2.	Studiegebied en uitgangspunten	6
	2.1. Studiegebied	6
	2.2. Invloedsfactoren stortbelasting	6
	2.3. Indeling speciesoorten	7
3.	Huidige richtlijnen	10
	3.1. Beschikbare richtlijnen betreffende speciedrukken	10
	3.2. Voorschriften – NEN 6722	10
	3.3. CIRIA Report 108	12
	3.4. Toepassingsmogelijkheden	14
4.	Onderzoeken en ervaringen	16
	4.1. Onderzoeken	16
	4.1.1. CUR-Aanbeveling 93 (TU Delft)	16
	4.1.2. B35 versus SCC (VOC Betonbouw, VOBN, TU-Delft)	17
	4.1.3. Zelfverdichtende beton, druk op de bekisting en het vermogen tot ontluichten (TU Darmstadt).	18
	4.1.4. Bekistingdruk bij zelfverdichtende beton (Zwitsers onderzoek)	18
	4.1.5. SCC (GTM Construction (Frankrijk) i.s.m. NCC (Zweden) en Sika)	20
	4.1.6. Horizontale betonspeciedrukken bij toepassing van SCC	20
	4.2. Publicaties, overige onderzoeken en ervaringen	21
5.	Eigen onderzoek	23
	5.1. Inleiding	23
	5.2. Betonspecie met hoogvloeibaar karakter, 3 ^e Lekbrug Vianen	23
	5.2.1. Algemeen	23
	5.2.2. Opzet onderzoek	23
	5.2.3. Metingen	26
	5.2.4. Conclusies metingen 3 ^e Lekbrug Vianen	31
	5.3. Zelfverdichtende betonspecie, Bouwdok Barendrecht	32
	5.3.1. Algemeen	32
	5.3.2. Opzet onderzoek	32
	5.3.3. Metingen	34
	5.3.4. Conclusies metingen Bouwdok Barendrecht	40
6.	Tot zover	41
-	Literatuurlijst	43
-	Verklarende woordenlijst	45
-	Bijlagen	46
	• Gegevenstabel speciedrukmeting 3 ^e Lekbrug Vianen	47
	• Grafieken bekistingdrukverloop meting 3 ^e Lekbrug Vianen	49
	• Gegevenstabel speciedrukmeting Bouwdok Barendrecht	50
	• Grafieken bekistingdrukverloop meting Bouwdok Barendrecht	52
	• Gegevenstabel verzamelde speciedrukmetingen	54

1. Inleiding

De huidige ontwikkelingen op betonspeciegebied hebben als gevolg dat er vele relatief nieuwe betonsoorten op de markt zijn gekomen die in hoofdzaak aangeduid kunnen worden met hoogvloeibare beton, verdichtingsarme, zelfverdichtende beton en hoge sterkte beton.

De bestaande regelgeving en normering sluit nog onvoldoende aan op deze ontwikkelingen. Hierdoor bestaat onder andere ook onduidelijkheid over de aan te houden horizontale stortbelastingen bij het verwerken van deze nieuwe betonsoorten. Nader onderzoek, dat kan leiden tot duidelijke richtlijnen hiervoor, is dan ook gewenst.

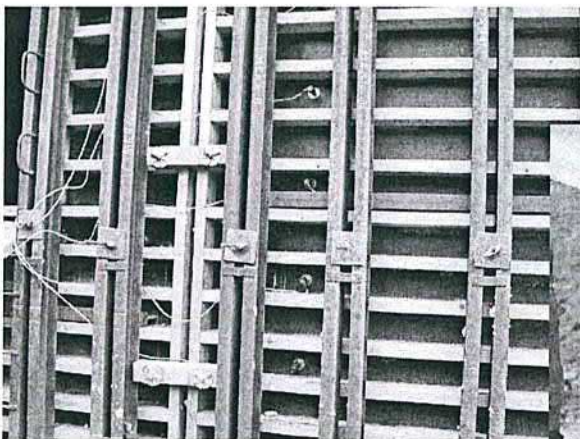
De **Stubeco** (**ST**udievereniging **Uit**voering **BE**ton **CO**nstructies) heeft dit onderkend en heeft hiervoor een studiecél opgestart, die het aspect stortbelastingen bij nieuwe betonsoorten verder moet onderzoeken.

Deze studiecél kreeg als doel-/taakstelling:

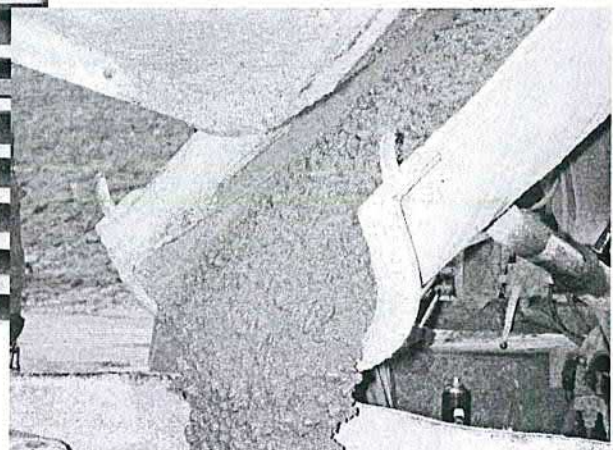
- een inventarisatie en evaluatie maken van hetgeen al is onderzocht en bekend is op dit gebied,
- een eerste aanzet geven voor het benodigde onderzoek om tot eenduidige richtlijnen te kunnen komen m.n. op het gebied van bekistingdrukken bij nieuwe betonsoorten.

Vanuit deze doelstelling is het onderzoek dan ook opgedeeld in drie hoofdonderdelen:

- Analyse van de huidige regelgeving op het gebied van stortbelasting.
Wat is er aan regelgeving en in hoeverre kan deze worden gebruikt voor de nieuwe betonsoorten.
- Een inventarisatie van gegevens en rapporten die reeds zijn onderzocht en/of uitgebracht op dit gebied.
Uit de vele onderzoeken die op dit gebied zijn uitgevoerd, zijn er een aantal genomen die nader zijn beschouwd. Daarnaast zijn de bevindingen uit andere rapporten en artikelen over ervaringen met nieuwe betonsoorten geïnventariseerd.
- Drukproefmetingen op twee verschillende projecten.
Dit onderzoek richt zich specifiek op horizontale betonspeciedrukken



Figuur 1 - Druksensoren in de bekisting



Figuur 2 - Zelfverdichtende betonspecie

In dit rapport worden de termen consistentiegebied en consistentieklasse door elkaar heen gebruikt. Dit is het gevolg van het feit dat tijdens de totstandkoming van dit rapport per juli 2005 NEN-EN 206-1 in combinatie met NEN 8005 van kracht zijn geworden en de VBT 1995 (NEN 5950) daarmee is komen te vervallen. NEN-EN 206-1 hanteert voor de indeling van de consistentie de term consistentieklasse en de oude VBT'95 en NEN 6722 (VBU 2002) de term consistentiegebied. De studiecél heeft getracht hierin zo duidelijk mogelijk te zijn.

Bijzondere dank is de studiecél verschuldigd aan:

- de bouwcombinatie Strukton - Max Bögl voor de medewerking verleend aan het uitvoeren van de metingen op de 3^e Lekbrug Vianen
- de Bouwcombinatie HSL Drechtse Steden v.o.f. gevormd door een samenwerkingsverband van Ballast Nedam Infra, HBG Civiel, Strukton Betonbouw, Van Hattum en Blankevoort, Van Oort ACZ Waterbouw en Maasdiep v.o.f. voor de medewerking verleend aan het uitvoeren van de metingen in het Bouwdok Barendrecht.
- TU Delft; Faculteit der Civiele Techniek; Stevin Laboratorium, voor het uitvoeren van de metingen door E.M. Horeweg.
- M. van der Wolf (Ballast Nedam Infra) en R. Braam (TU Delft) voor de deskundige beoordeling van de ruwe versie van deze rapportage en de daaruit voortkomende aanvullingen en opmerkingen.
- Hr. F. Jansen (Heijmans Beton- en Waterbouw) voor zijn inbreng in de laatste fase van de studie betreffende speciedrukproeven met lage stijgsnelheden, uitgevoerd door Heijmans Beton- en Waterbouw.

2. Studiegebied en uitgangspunten

2.1. Studiegebied

Dit onderzoek betreft de stortbelasting bij nieuwe betonsoorten. Met nieuwe betonsoorten wordt in dit kader bedoeld betonspeciesoorten die niet vallen in de consistentieklassen C0 t/m F4 (c.g. 1 t/m 4, volgens VBT 1995). Deze soorten worden aangeduid met hoogvloeibare, verdichtingsarme of zelfverdichtende betonspecie. De betonspecie voor hoge-sterkte-beton valt ook onder deze benamingen. Daarnaast wordt onderzocht of het mogelijk is de speciesoorten zo in te delen dat een eenduidige relatie is te leggen naar de stortbelasting.

2.2. Invloedsfactoren stortbelasting

De stortbelasting is afhankelijk of mogelijk afhankelijk van de volgende factoren:

De betonspeciesamenstelling en soort

- volumieke massa
- specietemperatuur
- zetmaat
- verwerkbaarheid
- toeslagstoffen
- vulstoffen
- hulpstoffen
- type en sterkteklasse cement
- dormante periode
- bindtijd of opstijvingstijd

De uitvoeringswijze en -omstandigheden

- storthoogte
- stijgsnelheid
- triltijd
- trildiepte
- trilapparatuur
- stootbelasting
- samenstelling van de bekisting
- luchttemperatuur

Het te storten onderdeel

- wand- of kolomdikte
- silo-, boog- of brugwerking
- wand- of kolomhoogte
- vorm van het te storten onderdeel
- wapening

Voor een goede bepaling van de te verwachten stortbelasting en met name de betonspeciedruk, zouden deze factoren nader moeten worden beschouwd op hun invloed daarop. Ondanks de vele onderzoeken met nieuwe betonspeciesoorten heeft men echter niet van alle factoren de invloed kunnen vaststellen of is gewoon niet onderzocht.

2.3. Indeling speciesoorten

Omdat de bepaling van de stortbelasting in Nederland plaatsvindt mede op basis van consistentiegebieden (NEN 6722), kan het van belang zijn de nieuwe soorten op basis van die consistentiegebieden of -klassen eenduidig in te delen. Zowel de oude indeling van consistentiegebieden volgens de VBT'95 als de nieuwe consistentieklassen indeling volgens NEN-EN 206-1 zijn daarvoor niet toereikend en daarom zijn er aanvullende richtlijnen gekomen die hierin voorzien.

Het lastige is wel dat er verschillende richtlijnen zijn. De twee belangrijkste zijn: de nationale beoordelingsrichtlijn betonmortel (BRL 1801), uitgegeven door de Certificatie-instelling BMC, en de CUR-Aanbeveling 93 zelfverdichtend beton, uitgegeven door het Civieltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving. Beide geven nieuwe consistentiegebieden aan, maar verschillen daarin in aanduiding en daaraan gestelde eisen. Beide indelingen worden respectievelijk gegeven in tabel 1 en 2.

Verder heeft de KIWA een aanvulling uitgebracht op Criteria 73/04 (t.b.v. certificering van elementen van vooraf vervaardigd constructief beton). Hierin staan aanvullende eisen en bepalingen voor zelfverdichtend beton die betreffende de verwerkbaarheid ook weer andere uitgangspunten geeft. Deze worden hier verder niet genoemd.

tabel 1

Indeling consistentiegebieden volgens BRL 1801			
Consistentiegebied	5 hoogvloeibare betonmortel	6 verdichtingsarme betonmortel	7 zelfverdichtende betonmortel
Uitvloeimaat	470 – 570 mm	540 – 660 mm	630 – 800 mm ¹⁾
Trechtertijd	3 – 5 sec	5 - 9 sec	9 - 25 sec ¹⁾
Stabiliteit	< 3 sec	< 3 sec	< 3 sec
BOX-test	-	-	< 20mm binnen 25 sec.
Vessel-test	-	-	> 90%
Grootste korrelafmeting toeslagmateriaal	8 of 16 mm	8 of 16 mm	8 of 16 mm
¹⁾ Afwijkende specificaties zijn mogelijk indien deze zijn overeengekomen met de afnemer en uit eerdere toepassingen c.q. een vooronderzoek de geschiktheid van de betonmortel voor de betreffende toepassing is gebleken.			

De BRL stelt dat de specie tot minimaal 2 uur na aanmaak nog aan bovenstaande eisen moet voldoen. De eisen die de BRL stelt zijn kwaliteitseisen, waaraan de specie moet voldoen, als deze wordt geleverd onder het KOMO-productcertificaat voor hoogvloeibare, verdichtingsarme en zelfverdichtende betonmortel.

De CUR-Aanbeveling 93 geeft twee nieuwe consistentiegebieden. In tabel 2 zijn de nieuwe gebieden opgenomen. Deze indeling wijkt af van de BRL 1801.

De aanbeveling geeft verder aan dat zelfverdichtend beton valt in consistentiegebied 6 (zie tabel 2).

tabel 2

Indeling consistentiegebieden volgens CUR-Aanbeveling 93			
Consistentiegebied	5	6	
Verwerkbaarheid	Vloeibaar	zeer vloeibaar	
Verdichtingsmaat	-	-	
Zetmaat	> 220 mm	-	
Schudmaat	560 – 620 mm	> 630 mm	
Trechtertijd	-	5 – 15 sec	
In overleg met de opdrachtgever van de eisen ten aanzien van vloeimaat en trechtertijd mag worden afgeweken, mits met onderzoek is aangetoond dat het mengsel geschikt is voor de bedoelde toepassing en verwerkwijze.			

De controle op eigenschappen van de hoogvloeibare betonspecie kan niet tot nauwelijks worden uitgevoerd met de gebruikelijke meetmethoden. Van een zetmaat kan niet meer worden gesproken, de betonspecie vloeit uit en blijft niet staan. De schudmaat is een uitvloeimaat, want zodra men zou gaan 'schudden' loopt de specie van de tafel. Daarom zijn andere meetmethoden overgenomen uit Japan, te weten de V-funnel of trechtertest, de Boxtest en de Vesseltest. De CUR-Aanbeveling betreft de laatste twee niet in het beoordelen van de specie. Dit zijn beide testen waarmee de zelfverdichtendheid wordt gemeten. De V-funnel of trechtertest is voor het bepalen van de viscositeit en stabiliteit.

Voor het vaststellen van de horizontale druk door betonspecie op de bekisting heeft de studiecél nog geen directe en bewezen koppelingen kunnen leggen naar consistentiegebieden of -klassen. Geen van de reeds uitgevoerde proefnemingen legt namelijk deze directe koppeling, omdat ten tijde van de meeste proefnemingen hiervoor nog geen eenduidige richtlijnen voorhanden waren.

Ook bij de eigen metingen, verricht voor deze studie, is deze koppeling niet gelegd. De metingen zijn slechts ter indicatie en betroffen slechts twee mengsels en geven onvoldoende basis om een koppeling te kunnen leggen tussen een indeling van consistentiegebieden of -klassen en daarbij behorende speciedrukken. Deze eventuele koppeling is dan ook een onderwerp voor nader te verrichten onderzoek, te meer omdat de bestaande Nederlandse normen juist die koppeling gebruiken voor het bepalen van optredende speciedrukken en andere richtlijnen juist niet.

Het is wel aan te bevelen om tot één indeling van consistentieklassen te komen. Het naast elkaar bestaan van meerdere indelingen die van elkaar verschillen werkt verwarrend. Het voorstel van de studiecél is om naast de consistentieklassen uit de nieuwe NEN-EN 206-1 voor de hierbuiten vallende betonspeciesoorten de indeling te hanteren uit de BRL 1801. De indeling van de CUR-aanbeveling is wat algemener en baseert deze voor de nieuwe gebieden alleen op de schudmaat, die eigenlijk geen schudmaat meer is. Bovendien geeft de CUR-aanbeveling aan dat, indien de betonspecie wordt geproduceerd met toepassing van een certificatiesysteem, de bepaling van het consistentiegebied volgens de specificaties in het betreffende certificaat moet worden toegepast. Dit geeft ruimte aan het toepassen van de BRL 1801.

De voorgestelde indeling wordt dan zoals is aangegeven in tabel 3.

Andere nieuwe betonspeciesoorten, zoals bijvoorbeeld de specie voor hoge-sterkte-beton, kunnen worden ondergebracht in de aangegeven consistentieklassen.

tabel 3

Voorgestelde indeling consistentieklassen									
	Consistentieklassen volgens NEN-EN 206-1 m.i.v. 1 juli 2004						Volgens BRL 1801 F6 (zeer vloeibaar) volgens NEN-EN 206-1		
Consistentie klasse	C0	C1	S2	S3	F4	F5	F6-1	F6-2	F6-3
Oude benaming	VB'T '95 - 0	VB'T '95 - 1	VB'T '95 - 2	VB'T '95 - 3	VB'T '95 - 4	CUR A93 - 5	BRL1801 - 5	BRL1801 - 6	BRL1801 - 7
Verwerkbaarheid	droog	aardvochtig	half plastisch	plastisch	zeer plastisch	vloeibaar	hoogvloeibaar	verdichtings-arm	zelfverdichtend
Verdichtingsmaat	> 1,46	1,45-1,26	(1,25-1,11)	(1,10-1,04)	-	-	-	-	-
Zetmaat mm	-	(10 - 40)	50 - 90	100 - 150	(160 - 210)	(> 220)	-	-	-
Schudmaat mm	-	(< 340)	(350 - 410)	(420 - 480)	490 - 550	560 - 620	(> 630)	-	-
Uitvloeimaat mm	-	-	-	-	-	-	470 - 570	540 - 660	630 - 800 ¹⁾
Trechtertijd sec.	-	-	-	-	-	-	3 - 5	5-9	9-25 ¹⁾
Stabiliteit sec.	-	-	-	-	-	-	< 3 sec	< 3 sec	< 3 sec
BOX-test	-	-	-	-	-	-	-	-	< 20mm binnen 25 sec.
Vessel-test	-	-	-	-	-	-	-	-	> 90%
Grootste korrelafmeting toeslagmateriaal	-	-	-	-	-	-	8 of 16 mm	8 of 16 mm	8 of 16 mm
¹⁾ Afwijkende specificaties zijn mogelijk indien deze zijn overeengekomen met de afnemer en uit eerdere toepassingen c.q. een vooronderzoek de geschiktheid van de betonmortel voor de betreffende toepassing is gebleken.									

Met ingang van 1 juli 2005 is NEN 5950, Voorschriften Beton - Technologie 1995 vervangen door NEN-EN 206-1 en NEN 8005. De oude consistentiegebieden 1 t/m 4 zijn daarmee vervallen en vervangen door de hierboven aangegeven consistentieklassen gebaseerd op een verdichtingsmaat (C), een zetmaat (F), of een schudmaat (S). De meeste nieuwe betonspeciesoorten vallen echter ook buiten deze nieuwe consistentieklassen. Voor deze kan men dan de BRL 1801 hanteren.

3. Huidige richtlijnen

3.1. Beschikbare richtlijnen betreffende speciedrukken

Voor het bepalen van de te verwachten optredende horizontale speciedruk zijn een paar richtlijnen voorhanden voor de normale betonsoorten. Ook kan men in bepaalde gevallen de normale rekenregels uit de vloeistofmechanica hanteren. De uitgangspunten en toepassingsgebieden van de rekenregels volgens de voorhanden zijnde richtlijnen worden hierna nader besproken.

De in Nederland bekende en gehanteerde richtlijn is:

- NEN 6722 (VBU 2002), artikel 9.3

Daarnaast wordt ook gebruik gemaakt van de richtlijnen gegeven in :

- CIRIA Report 108

De Duitse norm DIN 18 218 hanteert nagenoeg dezelfde uitgangspunten en berekeningwijze als de Nederlandse norm NEN 6722 en wordt daarom ook niet apart besproken.

3.2. Voorschriften – NEN 6722

De bepaling van de horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie volgens NEN 6722 – art. 9.3, is gebaseerd op met name uitvoeringsomstandigheden en de verwerkbaarheid (consistentiegebied of -klasse) van de betonspecie.

Uitgaande van het consistentiegebied van de betonspecie en de stijgsnelheid wordt de maximaal optredende horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie bepaald. Deze is gebaseerd op een aantal uitgangspunten betreffende verdichtingwijze, temperatuur van de specie, de buitentemperatuur, geen toepassing vertragers of hulpstoffen met vertragende werking en de volumieke massa. Concreet zijn deze de volgende:

- Verdichten met behulp van trilnaalden tot op max.1 meter diepte.
- Temperatuur van de betonspecie en de buitentemperatuur 15 °C.
- Geen toegevoegde vertragers of hulpstoffen met vertragende werking.
- Volumieke massa van 2400 kg/m³.

Voor elk van deze uitgangspunten zijn correctiefactoren aangegeven voor het geval deze afwijken van de basiswaarde.

Met een aan een specifiek consistentiegebied (volgens VBT'95) gekoppelde formule met als variabele de stijgsnelheid, wordt de maximaal optredende belasting bepaald met een maximum van 80 kN/m². Deze maximale belasting is gebaseerd op het opstijvingsgedrag van betonspecie (zie formule 1).

Voor kolommen mag de formule van Ertingshausen worden gebruikt en als deze kleiner zijn dan 450mm x 450mm mag met een reductie worden gerekend ten gevolge van de silowerking (zie formule 1).

Ook wordt gesteld dat voor de horizontale belasting nooit een grotere waarde dan de hydrostatische druk hoeft te worden aangehouden.

Voor betonspeciesoorten die buiten het toepassingsgebied vallen, dus voor soorten met een consistentie boven consistentiegebied 4, is de volgende opmerking opgenomen:

NEN 6722, Artikel 9.3.2.1., OPMERKING 2

Bij de toepassing van hoge-sterkte-beton en verdichtingvrije betonspecie is het mogelijk dat de uitgangspunten voor de berekening van de horizontale belasting moeten worden aangepast.

formule 1

Formules bepaling maximale horizontale belasting volgens NEN6722 – 9.3.2.1

Consistentiegebied 1 : $p_{max} = 5 v + 21$

Consistentiegebied 2 : $p_{max} = 10 v + 19$

Consistentiegebied 3 : $p_{max} = 14 v + 18$

Consistentiegebied 4 : $p_{max} = 17 v + 17$

Deze formules gelden als wordt verdicht met trilnaalden tot op max. 1m diepte, de temperatuur van de betonspecie en de buitentemperatuur 15°C is, er geen vertragers of hulpstoffen met vertragende werking zijn toegevoegd, de volumieke massa 2400 kg/m³ bedraagt. Voor correctiefactoren zie NEN 6722.

Hydrostatische druk : $p_{max} = \rho_m \cdot H$

p_{max} is maximaal 80 kN/m² (NEN6722, figuur 1)

Formule van Ertingshausen t.b.v. kolommen

$$p_{max} = 36 \cdot \sqrt[4]{v}$$

Aangepast formule van Ertingshausen t.b.v. kolommen kleiner dan 450mm x 450mm

$$p_{max} = 36 \cdot \sqrt[4]{v} - 0,1 (900 - (b_1 + b_2))$$

p_{max} - maximale horizontale belasting t.g.v. de betonspecie (kN/m²)

v - stijgsnelheid (m/uur)

ρ_m - volumieke massa van de betonspecie (kN/m³)

H - hydrostatische drukhoogte van de betonspecie (m)

b_1 en b_2 - afmetingen van de doorsnede van de kolom (mm)

Vanwege het toepassingsgebied voor de consistentiegebieden 1 t/m 4 (VBT'95) is het niet mogelijk om met behulp van de gegeven formules de optredende horizontale stortbelasting te bepalen voor betonspeciesoorten vallend in consistentiegebieden hoger dan 4. Hoge-sterkte-beton, zelfverdichtende, verdichtingsarme en hoogvloeibare betonspecie vallen alle in consistentiegebieden hoger dan 4 en terecht wordt dan ook de opmerking geplaatst dat bij toepassing van deze speciesoorten de uitgangspunten van de berekening moeten worden aangepast. De NEN 6722 geeft echter niet aan hoe. Hoogstens kan de formule voor bepaling van de hydrostatische druk worden

toegepast om daarmee de maximaal horizontale belasting, die zou kunnen optreden, vast te stellen.

Ook moet worden opgemerkt dat de benaming hoge-sterkte-beton in principe niets zegt over de consistentie of verwerkbaarheid en alleen een aanduiding is voor de bijzondere sterkte van het verharde beton.

3.3. CIRIA Report 108

CIRIA staat voor Construction Industry Research and Information Association en stimuleert de uitwisseling van ervaringen in de constructieve sector. Het publiceren van praktische en kwalitatief hoogwaardige informatie o.a. in de vorm van rapporten is een van de activiteiten. Het CIRIA Report 108, Concrete pressure on formwork, betreft de bepaling van de horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie. Deze is met name gebaseerd op stijgsnelheid, cementsoort en specietemperatuur.

Voor het bepalen van de maximaal optredende horizontale belasting ten gevolge van de betonspecie is door de Cement en Concrete Association een formule ontwikkeld op basis van onderzoek, waarvan meer dan 350 meetresultaten beschikbaar zijn. Uit die praktijkonderzoeken met normale betonspeciesoorten, bleek ook dat geen hogere belastingen zijn gemeten dan 90 kN/m² voor wanden en 166 kN/m² voor kolommen.

In de ontwikkelde formule (zie formule 2) zijn, naast andere variabelen, twee coëfficiënten opgenomen. Eén coëfficiënt dient voor het onderscheid in wanden en kolommen. De andere houdt rekening met de effecten van de verschillende cementsoorten en mengselsamenstellingen. De waarden voor deze tweede coëfficiënt dekken de productenrange die beschikbaar was in 1985 in Groot Brittannië en bevat alleen mengsels waarin Portlandcement is toegepast en geen mengsels met alleen hoogovencement.

Opmerkelijk is dat geen rekening wordt gehouden met de verwerkbaarheid van de betonspecie (consistentieklasse). Volgens de CIRIA is dit vanwege drie redenen:

1. Aangenomen wordt dat stijvere betonspecie langer en intensiever getrild wordt dan beter verwerkbare specie.
2. Uit de onderzoeken is niet gebleken dat er een duidelijk verschil is in bekistingdrukken tussen betonspecies met een lage, middelmatige of hoge zetmaat.
3. De zetmaat is geen goede maatstaf voor de factoren die effect hebben op de bekistingdruk.

Het CIRIA rapport geeft de aanbeveling dat hoogvloeibare betonspeciesoorten moeten worden ondergebracht in de algemene indeling, zoals aangegeven in de tabel voor C₂ (tabel 4), en dat het niet noodzakelijkerwijs zo is dat de maximale horizontale belasting van de hoogvloeibare betonspeciesoorten hydrostatisch is. Met andere woorden wordt dus gesteld, dat niet de formule behoeft te worden aangepast voor nieuwe betonspeciesoorten, maar dat deze soorten elk een eigen waarde van de factor C₂ moeten krijgen. Welke dat dan moeten zijn wordt niet aangegeven. Daarom biedt het CIRIA-rapport ook niet de mogelijkheid om de maximale horizontale belasting te bepalen voor de nieuwe hoogvloeibare betonsoorten.

formule 2

Formule bepaling maximale horizontale belasting volgens CIRIA

$$\rho_{max} = C_1 \cdot \sqrt{v} + C_2 \cdot K \cdot \sqrt{(h - C_1 \cdot \sqrt{v})} \cdot \rho_m$$

of $\rho_{max} = \rho_m \cdot H$ (Hydrostatische druk)

Van de bovenstaande formules mag de laagste waarde worden aangehouden.

- ρ_{max} - maximale horizontale belasting t.g.v. de betonspecie (kN/m²)
 v - stijgsnelheid (m/uur)
 h - hoogte van de bekisting tot waar deze wordt gevuld (afstorthoogte) (m)
 K - temperatuurcoëfficiënt
 $K = (36 / (T + 16))^2$, waarin T de betonspecietemperatuur is tijdens storten (°C)
 C_1 - Wanden (lengte en/of dikte > 2m) $C_1 = 1,0$ / Kolommen (< 2x2m) $C_1 = 1,5$
 C_2 - Coëfficiënt afhankelijk van de samenstelling van de betonspecie (zie tabel 4)
 ρ_m - volumieke massa van de betonspecie (kN/m³)
 H - hydrostatische drukhoogte van de betonspecie (m)

tabel 4

C₂ - Coëfficiënt afhankelijk van de samenstelling van de betonspecie

GB – Ordinary Portland cement / NL – CEM I
 GB – Rapid-hardening Portland cement / NL – CEM I
 GB – SR Portland Cement / NL – CEM I

zonder of met hulpstoffen zonder vertragende werking
 met hulpstoffen met vertragende werking

0,30
 0,45

GB – Low heat Portland-blastfurnace cement / NL – CEM III/ -S en CEM II/B-S
 GB – Portland-blastfurnace cement / NL – CEM III/ -S en CEM II/B-S
 GB – Portland pulverised-fuel ash cement / NL – CEM III/ -V en CEM II/B-V
 GB – Mengsel met minder dan 70% 'ground granulated blastfurnace slag' / NL – CEM III/ -S en CEM II/B-S
 GB – Mengsel met minder dan 40% 'pulverised-fuel ash' / NL – CEM III/ -V en CEM II/B-V

zonder of met hulpstoffen zonder vertragende werking
 met hulpstoffen met vertragende werking

0,45
 0,60

GB – Mengsel met meer dan 70% 'ground granulated blastfurnace slag' / NL – CEM III
 GB – Mengsel met meer dan 40% 'pulverised-fuel ash' / NL – CEM III/ -V en CEM II/B-V

met of zonder hulpstoffen

0,60

De coëfficiënten zijn gegeven voor betonspeciesamenstelling zoals die in 1985 beschikbaar waren op de commerciële markt in Groot Brittannië. Toegevoegd zijn de Nederlandse benamingen zoals die in 2003 worden gebruikt voor gelijkwaardige Nederlandse betonspeciesamenstellingen.

Met het uitbrengen van het CIRIA rapport 108 wordt de vroegere CERA-formule (Civil Engineering Research Association) (zie formule 3) niet meer gehanteerd. Deze was slechts geldig voor species op basis van Portlandcement met een maximale zetmaat van 5 inch (ca.120mm).

formule 3

Formule bepaling maximale horizontale belasting volgens CERA

$$\rho_{max} = (\rho_m \cdot v \cdot t / (1 + C \cdot (t/t_{max})^4)) + 12 \cdot (8 - 3,28 \cdot v) \cdot 0,048$$

- ρ_{max} - maximale horizontale belasting t.g.v. de betonspecie (kN/m²)
 ρ_m - volumieke massa van de betonspecie (kN/m³)
 v - stijgsnelheid (m/uur)
 t - storttijd (uur)
 t_{max} - maximale opstijftijd van de specie (uur)
 C - factor voor mate van trillen en verwerkbaarheid van de specie.
Deze varieert van 0,05 voor een zetmaat van 120mm en zwaar trillen tot 0,40 voor een zetmaat kleiner dan 40mm en licht trillen

Alleen al vanwege het feit dat bij hoogvloeibare betonspeciesoorten geen sprake is van een zetmaat, maar alleen van een uitvloeimaat (zie figuur 3), biedt ook deze formule geen uitkomst voor het bepalen van de maximaal optredende betonspeciedruk.



Figuur 3 - Uitvloeimaat bij hoogvloeibare betonspecie

3.4. Toepassingsmogelijkheden

De huidige richtlijnen, zoals die in Nederland en de landen om ons heen bekend zijn, voor het bepalen van de maximale optredende horizontale speciedruk, zijn niet toepasbaar voor de nieuwe betonspeciesoorten met een hoogvloeibaar karakter. Het enige houvast zijn de hydrostatische rekenregels. In de praktijk is echter al wel gebleken dat niet altijd de hydrostatische druk optreedt en dienen er aanvullende richtlijnen te komen om te kunnen bepalen wat dan wel de maximaal optredende druk is.

NEN 6722 laat open hoe de horizontale belasting berekend zou moeten worden. In aanvulling daarop geeft de recent uitgebrachte CUR-Aanbeveling aan dat voor zelfverdichtende betonspeciesoorten de hydrostatische druk gehanteerd moet worden.

Het CIRIA rapport geeft aan dat de formules die gehanteerd wordt, ook toepasbaar kan zijn voor de hoogvloeibare betonspeciesoorten, mits voor die soorten een juiste factor wordt bepaald. Welke factor dat dan zou kunnen of moeten zijn, wordt niet vermeld.

Volgens de bestaande regelgeving en richtlijnen komt het er dus op neer, dat indien men wil afwijken van de hydrostatische drukk bepaling, aangetoond moet kunnen worden, waarom men daarvan wil afwijken en in welke mate.

Naast deze constatering is het opmerkelijk dat de bepaling van speciedrukken volgens de NEN 6722 duidelijk afwijkt van de bepaling volgens het CIRIA rapport. Over het algemeen is de berekende maximale speciedruk volgens de NEN 6722 lager dan de berekende speciedruk volgens het CIRIA rapport. Uit praktijkproeven is gebleken dat de volgens de CIRIA-formule bepaalde speciedruk, de optredende waarde in de meeste gevallen beter benadert, dan die bepaald volgens de NEN 6722. In verschillende gevallen blijkt zelfs dat de optredende druk bij de normale betonspeciesoorten hoger is dan de volgens de NEN 6722 bepaalde. Ook wordt de hierin aangegeven maximale waarde van 80 kN/m^2 (art.9.3.2.1, figuur 1) in praktijkproeven en metingen bij hogere stijgsnelheden regelmatig overschreden.

4. Onderzoeken en ervaringen

4.1. Onderzoeken

Op het gebied van de nieuwe betonsoorten is al zeer veel onderzoek verricht. Ook zijn er onderzoeken gedaan naar de optredende bekistingdrukken bij nieuwe betonsoorten, maar geconstateerd moet worden dat die onderzoeken niet talrijk zijn en dat deze onderzoeken niet altijd aansluiten bij de praktijk. Uit de beschikbare onderzoeken zijn er een paar uitgekozen die het beste leken aan te sluiten bij de praktijk en deze zijn nader beschouwd op punten die van belang kunnen zijn voor het juist bepalen van de maximaal optredende horizontale speciebelasting bij nieuwe betonspeciesoorten.

Het betreft de volgende onderzoeken:

- CUR-Aanbeveling 93
TU-Delft
- B35 versus SCC
VOC Betonbouw, VOBN, TU-Delft
- Zelfverdichtende beton, druk op de bekisting en het vermogen tot ontluichten
TU-Darmstadt, Darmstadt-Concrete
- Bekistingdruk bij zelfverdichtende beton
Zwitsers onderzoek
- SCC
GTM Construction (Frankrijk) i.s.m. NCC (Zweden) en SIK
- Horizontale betonspeciedrukken bij toepassen van SCC
(Heijmans B&W).

4.1.1. CUR-Aanbeveling 93 (TU-Delft)

De CUR-Aanbeveling 93 is opgesteld door de CUR-commissie B79. In opdracht van deze commissie heeft de TU-Delft onderzoek verricht naar optredende speciedrukken bij een vloeibetonmengsel in vergelijking met een 'gebruikelijk' mengsel beide in de sterkteklasse B35.

Het onderzoek, dat in het laboratorium werd uitgevoerd, bestond uit twee series metingen, waarbij in totaal 6 kolommen in vier sessies werden gestort. Er is geen wapening toegepast. Hiervoor werden twee stalen kolombekistingen gebruikt met een diameter van 650mm en een hoogte van 3,2 en 3,5m. De druksensoren werden geplaatst op 5 niveaus. Twee stortjes werden uitgevoerd met een stijgsnelheid van 2m/uur en twee met een stijgsnelheid van 10m/uur.

Bij het vloeibetonmengsel trad een nagenoeg hydrostatische druk op bij een stijgsnelheid van 10m/uur en bij een stijgsnelheid van 2m/uur was de maximale druk ca. 80% van de hydrostatische druk. Het storten met een stijgsnelheid van 2m/uur gaf bij het referentiemengsel een maximale druk van ca. 89% van de hydrostatische druk. Hoger dan de optredende druk bij het vloeibetonmengsel bij dezelfde stijgsnelheid. Dit is voornamelijk toe te schrijven aan het trillen van de specie.

Hieruit wordt afgeleid dat het voor vloeibeton raadzaam is de hydrostatische druk aan te houden, zeker bij hoge stijgsnelheden. Wel is gebleken dat de druk afneemt als de stijgsnelheid wordt teruggebracht, maar de mate waarin was vooraf niet te bepalen.

Ook blijkt dat de optredende druk bij het referentiebeton behoorlijk hoger is, dan kan worden vastgesteld volgens de NEN 6722. Deze geeft een ca.30% lagere waarde. De CERA en CIRIA formules geven een waarde die beter in de buurt komt. (CERA ca.4% lager en de CIRIA ca.2% hoger).

Hoewel geconstateerd wordt dat de maximaal optredende druk minder wordt bij lagere stijgsnelheden, wordt hier geen conclusie aan verbonden.

4.1.2. B35 versus SCC (VOC Betonbouw, VOBN, TU-Delft)

Het onderzoek betreffende B35 normaal grindbeton versus Self Compacting Concrete is uitgevoerd door:

- VOBN, vertegenwoordigd door Betonmortelbedrijven Cementbouw
- VOC Betonbouw, vertegenwoordigd door Ballast Nedam Infra en Van Hattum en Blankevoort.
- TU Delft

Het onderzoek betrof het vaststellen van speciedrukken en fysische eigenschappen van de species, het meten van temperaturen en registreren van ontkistingsmiddelen. Uitgelicht wordt het onderdeel aangaande de speciedrukken.

Voor het onderzoek zijn drie stortproeven uitgevoerd met ongewapende wanden van 5,0m hoog, 3,7m lang en 0,35m dik. De eerste werd gestort met een normaal B35 mengsel in consistentiegebied 4 en de tweede en derde met een zelfverdichtend mengsel. De stijgsnelheden liepen uiteen van 11 tot 13 m/uur. Gemeten zijn de optredende centerpenkrachten met zogenaamde drukdozen en de speciedrukken met druksensoren.

Ook bij dit onderzoek bleek dat het lastig is uit de gemeten centerpenkrachten de opgetreden speciedruk te bepalen. Dit o.a. doordat het moeilijk te bepalen is hoe en in welke mate de bekisting de optredende druk overbrengt in een centerpen. De hiermee bepaalde speciedruk had ten opzichte van de speciedruk gemeten met de druksensoren een verschil tussen de -17% en +9%. Opvallend is verder ook dat de gemeten centerpenkrachten bij de zelfverdichtende mengsels ca. 30% lager lagen dan bij de normale betonspecie. Hiervoor wordt geen verklaring gegeven. Waarschijnlijk is dat het trillen van de specie van invloed is, waardoor ook de bekisting extra wordt belast en deze extra belasting wordt afgedragen aan de centerpennen. Door het trillen blijft de specie langer vloeibaar.

Bij de derde stort met het zelfverdichtende mengsel werd een iets lagere druk dan de hydrostatische druk gemeten (ca.7% lager). Bij stort 1 met het normale mengsel en stort 2 met het zelfverdichtende mengsel werd de hydrostatische druk gemeten. Daarbij wordt opgemerkt dat het zelfverdichtende mengsel van stort 2 een iets hogere vloeimaat had dan bij stort 3.

De drie wandstorten geven dus de indruk dat het aanhouden van de hydrostatische druk voor een zelfverdichtende specie een goed uitgangspunt lijkt, maar wel moet worden opgemerkt dat de stijgsnelheden dermate hoog waren, dat ook bij de normale betonspecie een hydrostatische druk optrad. Op basis van gemeten temperatuurverlopen en het teruglopen van de speciedruk na beëindiging van het storten, wordt een indicatie gegeven dat de dormante periode van zelfverdichtende

species langer is dan die van het normale mengsel. Dit wordt toegeschreven aan de toegevoegde superplastificeers, die een vertragende werking hebben.

4.1.3. Zelfverdichtende beton, druk op de bekisting en het vermogen tot ontluchten (TU Darmstadt).

Door de TU van Darmstadt (D) is een onderzoek verricht naar bekistingdrukken bij toepassen van SCC (Self Compacting Concrete) en naar de ontluchtings-eigenschappen. Voor deze studie werden elf kolommen gestort van 0,3x0,3m met een hoogte van 4,0m. Tien daarvan waren gewapend. De metingen en resultaten ten behoeve van de ontluchtingseigenschappen worden buiten beschouwing gelaten.

In drie testseries zijn onder andere de optredende speciedrukken gemeten, waarbij voor elke testserie het accent op een ander aspect lag en wel:

- Invloed van de stijgsnelheid op de bekistingdruk
- Invloed van de zetmaat/uitvloeimaat in relatie met de stijgsnelheid
- Conventionele verdichting door trillen en de invloed van wapening

De stijgsnelheden liepen uiteen van 12,5 m/uur tot 160 m/uur, dus ook hier geen lage stijgsnelheden. Hierbij worden voor de speciedruk waarden gemeten die liggen tussen ca. 60% van de hydrostatische druk tot nagenoeg hydrostatisch.

Geconstateerd wordt dat het reduceren van de vloeimaat tot gevolg heeft dat de invloed van de stijgsnelheid op de speciedruk aanzienlijk toeneemt. Dus hoe lager de vloeimaat, hoe meer de optredende druk afneemt bij een lagere stijgsnelheid.

Op basis van de resultaten en de Duitse norm DIN 18 218 wordt een voorstel berekening gegeven voor het bepalen van speciedruk bij zelfverdichtende beton. Hierin is een factor opgenomen die een relatie legt tussen de horizontale en verticale druk bij aanvang van het storten (formule 4).

formule 4

Formule bepaling maximale horizontale belasting volgens TU Darmstadt

$$p_{max} = \rho_m \cdot v \cdot \lambda_0 \cdot t_E / 2$$

- | | |
|-------------|---|
| p_{max} | - maximale horizontale belasting t.g.v. de betonspecie (kN/m ²) |
| ρ_m | - volumieke massa van de betonspecie (kN/m ³) |
| v | - stijgsnelheid (m/uur) |
| λ_0 | - verhouding van de horizontale en verticale druk bij aanvang stort
bij ZVB is deze ongeveer 1,0 |
| t_E | - maximale opstijftijd van de specie (uur) |

Aangegeven wordt dat voor zelfverdichtend beton geen absoluut maximum gegeven kan worden voor de bekistingdruk.

4.1.4. Bekistingdruk bij zelfverdichtende beton (Zwitsers onderzoek)

In een onderzoek in Zwitserland werden vier mengsels van een zelfverdichtende specie en een conventionele specie met variërende verwerkbaarheid gestort. Voor dit

onderzoek werden in een laboratorium omgeving vier wandschijven (lengte 0,75m, hoogte 2,70m, dikte 0,20m) gestort en één (lengte 4,90m, hoogte 4,70m, dikte 0,25m) in een buitenopstelling.

De vier wanden in de laboratorium omgeving werden op normale wijze vanaf boven vol gestort met drie verschillende SCC-mengsels en één conventioneel mengsel. De stijgsnelheid was ca. 8m/uur.

Hierbij traden speciedrukken op tussen de 87 en 90% van de hydrostatische druk bij de SCC-mengsels. Bij het conventionele mengsels trad een speciedruk op van ca. 55% van de hydrostatische, maar deze nam toe tot hydrostatisch, zodra met verdichtend trillen werd begonnen. Bij alle speciemenmengsels begon de druk af te nemen, zodra deze niet meer in beweging was.

De specietemperatuur tijdens het storten van de speciemenmengsels was ca. 23 °C. De temperatuur van het conventionele mengsel begon na vier uur op te lopen en die van de SCC mengsels pas na tien uur. De afname van de speciedruk na de beëindiging van het storten, lag in de eerste twintig minuten tussen de 7 en 20%. Na twee uur liet het conventionele mengsel een veel snellere afname van de speciedruk zien dan de SCC-mengsels.

De wand in de buitenopstelling werd door een ventiel aan de onderzijde in het midden volgepompt met een zelfverdichtend mengsel. Hier trad wel de hydrostatische druk op en overschreed deze zelfs met 5% door de toegevoegde druk van de pomp. De stijgsnelheid was hier ongeveer 19m/uur. De specietemperatuur tijdens het storten was hier ca. 26 °C. De temperatuur begon na zes uur op te lopen.

Men trekt uit dit onderzoek o.a. de conclusie dat de verwerkbaarheid van de SCC-specie bij een bepaalde stijgsnelheid geen significante invloed heeft op de maximale optredende speciedruk. Zeker bij hogere stijgsnelheden is deze invloed gering. Wel houdt men de mogelijkheid open dat dit bij grotere verschillen in verwerkbaarheid anders zou kunnen zijn.

Een ander belangrijk aspect dat is geconstateerd, is dat de cemenhydratatie in toenemende mate de optredende speciedruk beïnvloedt naarmate de tijd verstrijkt. Door de vertragende werking van toegevoegde superplastificeerders bij SCC neemt daar de speciedruk langzamer af dan bij de normale specie, waarin veel minder hulpstoffen zitten met vertragende werking. Ook werd vastgesteld dat een gedeeltelijke vervanging van cement door vlieg-as of het toevoegen van een versneller de speciedrukafname bespoedigt.

Uit dit onderzoek werd ook de conclusie getrokken dat de stijgsnelheid van invloed was op de optredende druk en men geeft voor een bepaald bereik een formule voor de berekening van de hydrostatische drukhoogte gebaseerd op de Duitse norm DIN 18 218 (formule 5).

formule 5

Formule bepaling hydrostatische drukhoogte voor wanden met een hoogte tussen 2,55 en 5,00 m.

$$h_{hydro} = ((17 \cdot v + 17) / 25) \cdot 1,5$$

h_{hydro} - hydrostatische drukhoogte (m)
 v - stijgsnelheid (m/uur)

Op basis van de proef in de buitenopstelling, waar de zelfverdichtende specie door een ventiel van de onderzijde in de bekisting werd gepompt, geeft men een paar waarschuwingen. De druk op de bekisting kan hierbij hoog oplopen tot zelfs boven de hydrostatische druk en pauzes langer dan een paar minuten in het volpompen moeten worden voorkomen, omdat de kans op verstopping aanwezig is.

4.1.5. SCC (GTM Construction (Frankrijk) i.s.m. NCC (Zweden) en SIKA)

In Frankrijk en Zweden zijn proeven uitgevoerd met het doel de invloed te kunnen bepalen van de verschillende parameters op de oppervlaktekwaliteit en regels vast te stellen voor het adequaat ontwerpen van bekistingsystemen bij toepassing van zelfverdichtende betonspecie. Het rapport van deze proeven is opgesteld door GTM Construction (Frankrijk) met medewerking van NCC AB (Zweden) en SIKA S.A. (Spanje). Daarnaast waren er de volgende partners in de proefnemingen: Betongindustri AB (Zweden), Swedish Cement and Concrete Research Institute (Zweden), Lulea University of Technology (Zweden), LCPC (France), University of Paisley (Scotland), SIKA S.A. (Spanje) en N.V. Bekaert S.A. (België).

Een van de aspecten die werd onderzocht was de optredende bekistingdruk bij verschillende betonspeciesamenstellingen. Voor de serie proeven van GTM werden gewapende wandpanelen gestort van diverse afmetingen (hoogte 2,80 en 5,60m, lengte 1,25 en 2,50m, dikte 0,25 en 0,40m). Voor het storten werden verschillende stortmethoden en stijgsnelheden toegepast. De stijgsnelheden lagen tussen de 10m/uur en de 150 m/uur. Dus ook hier geen testen met lage stijgsnelheden. De optredende drukken werden gemeten met druksensoren. De specietemperatuur lag tussen 16,5 en 24 °C.

Geconstateerd werden drukken tussen de 83% en 105% van de hydrostatische druk. De overschrijding trad op bij de stortwijze, waarbij de specie vanaf onder in de kist werd gepompt. De laagste druk trad op bij een mengsel met een uitvloeimaat van ca. 590mm, maar ook bij een mengsel met een uitvloeimaat van 760mm. Hieruit zijn dus geen conclusies te trekken betreffende een relatie tussen uitvloeimaat en optredende speciedruk.

Een tweede serie proeven werd uitgevoerd door NCC in Zweden. Hiervoor werden acht 'woningbouw'wanden gestort (lengte 5,70m, hoogte 2,65m, dikte 0,16m) en twee wandpanelen (lengte 2,65, hoogte 5,30 en 8,00m, dikte 0,16m). Ook hier werden verschillende stortmethodes gehanteerd en verschillende stijgsnelheden uiteenlopend van 6 m/uur tot 120 m/uur. De druk werd hier gemeten met drukdozen op de centerpennen. Een meetmethode die voor het bepalen van de speciedruk wel minder geschikt blijkt te zijn.

Bij geen van de storten werden hier hydrostatische drukken gemeten. De optredende speciedrukken varieerden hier tussen de 30 en 75% van de hydrostatische druk. De temperatuur van de betonspecie was hier wel lager dan bij andere proeven en lag tussen de 10 en 13 °C.

4.1.6. Horizontale betonspeciedrukken bij toepassen van SCC(Heijmans B&W).

In januari 2004 is door "Heijmans Beton & Waterbouw" een proef uitgevoerd met zelfverdichtende beton met als doel meer inzicht te verkrijgen in de optredende betonspeciedrukken bij verschillende stijgsnelheden. Hiervoor zijn drie bekistingen

opgesteld, waarmee drie gewapende wandschijven werden gemaakt van 0,20m dik, 1,50m lang en 6,00m hoog. De drie schijven werden onder gelijke omstandigheden met hetzelfde mengsel volgestort, maar met verschillende stijgsnelheden. De specietemperatuur was vrij laag en lag tussen de 10 en 16 °C.

Ook hier werden de horizontale speciedrukken gemeten met druksensoren. De aangehouden stijgsnelheden waren 1, 2 en 3 m/uur. Bij een stijgsnelheid van 1m/uur is tot een storthoogte van 3m met deze snelheid gestort, maar gezien de zeer geringe drukken die werden gemeten, is de laatste 3m in één keer gevuld. Hieruit bleek dat de horizontale speciedrukken niet opliepen door het 'opstuwen' van de beton over een hoogte van 2m.

De gemeten speciedrukken waren allen lager dan hydrostatisch. Oplopend van 19% van de hydrostatische druk bij een stijgsnelheid van 1m/uur, 56% bij 2m/uur tot 88% van de hydrostatische druk bij 3m/uur. De optredende drukken waren zelfs lager, dan dat je op grond van de stortdrukbepalingen volgens NEN6722 had mogen verwachten. De invloed van de mogelijke gewelf- of brugwerking is niet onderzocht, maar kan zeker een rol spelen bij wanden en kolommen tot ca. 0,35m dik.

4.2. Publicaties, overige onderzoeken en ervaringen

Uit vele artikelen in vakbladen en van internet en eigen onderzoeken en metingen van o.a. aannemers en bekistingleveranciers komen evenzoveel ervaringen en wetenswaardigheden naar voren, maar ook misverstanden.

Zo komt regelmatig naar voren dat de bekisting voor zelfverdichtende betonspecie niet zwaarder of anders ontworpen hoeft te worden dan voor normale betonspecie. In artikelen uit voornamelijk de prefabindustrie, wordt zelfs gemeld dat de stortbelasting door zelfverdichtende betonspecie beduidend lager is dan de belasting bij normale betonspecie. Deze beweringen zijn op zichzelf niet onjuist, maar kunnen wel een verkeerde conclusie tot gevolg hebben, want het geldt zeker niet voor alle gevallen waar o.a. zelfverdichtend beton wordt toegepast.

Daar waar zelfverdichtende betonspecie wordt toegepast wordt niet meer verdichtend getrild. Het verdichtend trillen met trilnaalden verhoogt de stortbelasting op de bekisting en deze verhoging is nog groter bij het toepassen van bekistingtrillers, die in de prefabindustrie veel worden toegepast. Ook worden, met name in de woning- en utiliteitsbouw en in de prefabindustrie, betonnen onderdelen uitgevoerd, waarvan de grootte en constructiehoogte meestal beperkt is. De hiervoor benodigde bekisting wordt dan ook ontworpen op een hydrostatische stortbelasting, omdat de stijgsnelheden groot zijn en bij toepassen van normale betonspecies dan ook een hydrostatische stortbelasting zal optreden. Door de geringere constructiehoogte zal deze echter in absolute zin niet al te hoog zijn. Als bij het toepassen van zelfverdichtende betonspecie de belasting door verdichtend trillen vervalt, zal de optredende stortbelasting zelfs lager zijn dan bij het toepassen van normale betonspecie.

Als echter grotere onderdelen uitgevoerd moeten worden met constructiehoogten boven de 2,5 meter en de stijgsnelheden onder de drie meter per uur liggen, dan is er wel degelijk verschil in de optredende stortbelasting. Een voorbeeld maakt dat duidelijk. Als een 4 meter hoge wand wordt uitgevoerd met een normale betonspecie in consistentieklasse S3 (c.g. 3) en een specietemperatuur van 15 °C, dan zal bij een stijgsnelheid van 2 m/uur volgens de rekenregels van NEN 6722 een bekistingdruk optreden van 46 kN/m². Als dezelfde wand met een zelfverdichtende betonspecie wordt uitgevoerd, zou een stortbelasting gelijk aan de hydrostatische druk kunnen

optreden ter grootte van 96 kN/m^2 . Dit is meer dan twee maal zoveel! De bekisting moet hier dus wel degelijk veel sterker worden ontworpen.

Daarnaast moet bij toepassen van hoogvloeibare betonspecies veel meer aandacht worden besteed aan de vloeistof-/waterdichtheid van de bekisting. Elk klein gaatje of opening, bijv. ter plaatse van de aansluiting van de wandbekisting op de vloer/ondergrond, kan een lek zijn, waardoor de betonspecie wegloopt. Bovendien is elke oneffenheid in het bekistingoppervlak duidelijk terug te vinden in het daarmee gerealiseerde betonoppervlak.

Ook zijn een aantal metingen verricht door aannemers en leveranciers op verschillende projecten, waaruit bleek dat de optredende stortbelasting bij toepassen van zelfverdichtende beton lager was dan de hydrostatische belasting.

Daarnaast zijn er ook artikelen met voorbeelden waarbij de bekisting onvoldoende sterk bleek voor het toepassen van een zelfverdichtende betonspeciesoort.

Kortom, uit het de vele informatie die over dit onderwerp beschikbaar is, komen even zovele meningen en resultaten. Een eensluidende conclusie is hier dan ook niet uit te trekken.

5. Eigen onderzoek

5.1. Inleiding

Naast de literatuurstudie heeft de studiecél besloten om op enkele bouwplaatsen de bekistingdruk bij nieuwe betonsoorten te meten.

De betonspeciesoorten zoals de verdichtingsarme, zelfverdichtende, hoogvloeibare mengsels en de specie voor hoge-sterkte-beton, worden verkregen door aan de bekende toeslagmaterialen zand en grind, vulstoffen (zoals poederkoolvlieg-as, silica fume of kalksteenmeel) en hulpstoffen toe te voegen. De ontwikkeling van nieuwe betonsoorten wordt versterkt door het ter beschikking komen van een nieuwe generatie hulpstoffen: zoals de gemodificeerde (super)plastificeerders.

De verwachting is dat de vulstoffen en nieuwe hulpstoffen van grote invloed kunnen zijn op de hoogte van de betonspeciedruk. Bekistingconstructeurs zouden wel eens veel grotere drukken in hun ontwerpberekeningen moeten aanhouden, wanneer zij bekistingen ontwerpen voor de nieuwe betonsoorten.

5.2. Verdichtingsarme betonspecie, 3^e Lekbrug Vianen

5.2.1. Algemeen

De derde Lekbrug van Vianen wordt voor een deel gebouwd met beton B65. Dit is namelijk de besteis. De centrale levert een mengsel waar in de praktijk van de brug bij Vianen een sterkteklasse B85 mee wordt bereikt. Zelfs een B95 vormt geen uitzondering. Op grond van de ontwikkelde sterkte kan het toegepaste mengsel als een Hoge Sterkte Beton worden aangemerkt. Op dit project heeft de studiecél twee keer de optredende betonspeciedruk kunnen meten bij toepassen van een hoogvloeibare betonspecie.

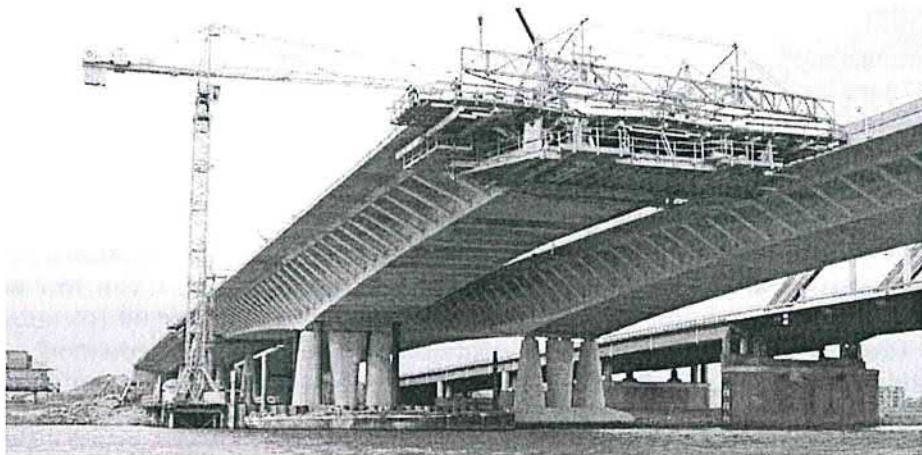


Figuur 4 - Derde Lekbrug Vianen in aanbouw

5.2.2. Opzet onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd bij de derde Lekbrug bij Vianen (zie figuur 4). De tweede en derde Lekbrug bij Vianen zijn identiek. Als een twee-eenheid vormen zij na gereedkomen een brede brugverbinding in de A2 tussen Utrecht en Den Bosch. De huidige tweede Lekbrug met zes smalle rijstroken en een invoeg- en uitvoegstrook wordt dan met de nieuwe brug opgewaardeerd tot een brug met zes brede rijstroken en twee stroken voor langzaam verkeer. Zowel de tweede als de derde lekbrug bij Vianen bestaan uit twee aanbruggen van 100 meter en twee uitkragende brugdelen van elk 165 meter. Dit geeft een totale lengte van landhoofd tot landhoofd van 530 meter. De 100 meter lange aanbruggen steunen op het landhoofd en twee 2-kolomspijlers in de uiterwaarden. Ieder 165 meter lang brugdeel rust op slechts één 3-kolomspijler op de scheiding tussen de rivier en de uiterwaarden. Ieder brugdeel kraagt dus naar twee

zijden 82,5 meter uit. Zowel de aanbruggen als de brugdelen zijn uitgevoerd als één, wel is waar zeer brede, kokerligger.



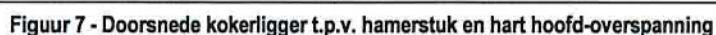
Figuur 5 – Een brugdeel

Ieder brugdeel bestaat uit een 18 meter lang hamerstuk en 2 x 20 uitbouwmoten van 3,60 m. Een koppelmoot van ongeveer 3 meter vormt de verbinding met de aanbrug of het andere brugdeel. De kokerligger is bij het hamerstuk 6,123 meter hoog. Door middel van een tweedegraads parabool verloopt de hoogte naar een kokerligger van 2,750 meter hoog (zie figuur 7). De kokerligger is overal 11,20 meter breed met aan weerszijden twee vleugels van 8,60 meter, wat de brug een totale breedte geeft van 28,40 meter. De uitkragende vleugels verlopen in dikte van 50 cm naar 26 cm. Om de verkeersbelasting te kunnen dragen worden de vleugels in het midden van elke moot ondersteund door middel van een betonschoor met een diameter van 400 mm. Dit maakt de twee lekbruggen bij Vianen tot een unieke brug in Nederland. Voor het bouwen van bruggen is de uitbouwmethode een bekende uitvoeringstechniek. Na het gereedkomen van het hamerstuk kan een begin worden gemaakt met het periodiek uitbouwen van de brug met wekelijks, twee moten van 3,60 meter. De bekisting voor deze moten is opgehangen aan twee uitbouwagens, die wekelijks een moot uit elkaar rijden. Vanzelfsprekend kan dit uitrijden pas plaatsvinden wanneer de betonspecie voldoende is verhard en is aangespannen door middel van voorspankabels.



Figuur 6 – Tweede uitbouwbrug, meting moot 5

De constructiehoogte/wandhoogte verloopt bij de vijfde uitbouwmoot van 4,931 meter naar 4,673 meter. De constructiehoogte van de zesde moot verloopt van 4,673 naar 4,432 meter. De dikte van de ondervloer verloopt bij de vijfde uitbouwmoot van 0,916 meter naar 0,843 meter. De zesde moot van 0,843 meter naar 0,775 meter. De dekdikte is in de langsrichting van de brug overal gelijk. In dwarsrichting verloopt de dekdikte van 0,361 meter, direct naast de betonwanden tot 0,260 meter in het midden van het brugdek. De langsvoorspanning ter plaatse van moot 5 en 6 bestaat uit 6 voorspankabels per wand. Iedere kabel is opgebouwd uit 13 strengen van 15,7 mm FeP 1.860. De dwarsvoorspanning per moot in het bovendek bestaat uit zes kabels van vier strengen 15,7 mm FeP 1.860. Naast de voorspanwapening is de moot gewapend met 15 ton betonstaal. Bij een betonhoeveelheid van 104 m³ geeft dit een wapeningsdichtheid van 147,9 kg per m³.



De betonspeciedruk kan op verschillende plaatsen worden gemeten. Bekend is dat metingen met druksensoren op het betonoppervlak de beste indicatie geven van de werkelijk optredende druk. Meten met rekstrookjes op de centerpen of met drukmeters onder de centerpenmoer geeft waarden, waarmee vaak lastig de werkelijk opgetreden betonspeciedruk is te bepalen. Stijfheid en krachtsverdeling van de bekisting spelen hierbij een rol. Bij de brug in Vianen is gemeten met sensoren tegen het betonoppervlak (figuur 8). Hiertoe waren de bekistingplaten van de wandschotten door de timmerlieden voorzien van sensorhouders met inwendige schroefdraad. De flens aan de sensorhouders maakt het mogelijk om de houders vanuit de buitenzijde vast te zetten op de bekisting. Met een bout kunnen de houders worden afgedicht. Tijdens de metingen zijn de bouten door de waarnemer vervangen door sensoren. De sensoren zijn door middel van 10 meter lange kabels verbonden met een ontvangstbox waarop vele kabels tegelijk kunnen worden aangesloten. Tevens bevindt zich hier de aansluiting voor de verbinding met de laptopcomputer. Dit maakt het mogelijk om in real time de opbouw van de betonspeciedruk te volgen. Op vooraf ingestelde cyclustijden kunnen de verschillende betonspeciedrukken in een datafile worden vastgelegd.



Figuur 8 - De sensor voor het meten van de betonspeciedruk

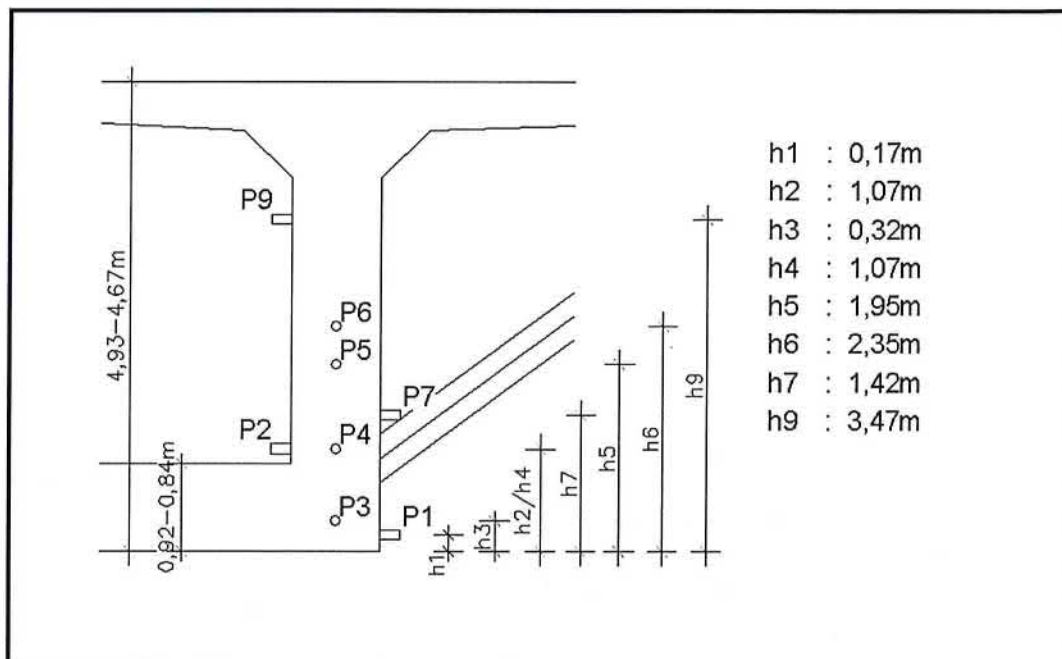
5.2.3. Metingen

De metingen hebben plaatsgevonden op de donderdagen 10 en 17 oktober 2002. Het storten en het meten is 's morgens gestart om 6.00 uur. Rond de middagschaft is de uitbouwmoot aan de zuidzijde gevuld en gaat de stortploeg over naar de noordzijde om daar het storten af te maken. Op 10 oktober zijn de metingen gestopt om 16.00 uur. Op 17 oktober zijn de metingen op 13.00 uur gestopt. Het bleek toen mogelijk om de sensoren te verwijderen en weer te vervangen door stoppen.

Enkele dagen voor de stortdag tijdens het bekisten van de uitbouwmoten zijn acht, respectievelijk zeven sensorhouders in de bekistingschotten geplaatst. Na het ontkisten kunnen de sensorhouders gebruikt worden bij volgende metingen.

Eerste meting 10-10-2002

In figuur 9 zijn de meetplaatsen aangegeven. Vier sensoren zijn geplaatst in het kopschot. De twee sensoren in het buitenwandschot zijn geplaatst onder en boven de prefab betonschoor. De laatste twee zijn geplaatst op het binnenwandschot. Uit de metingen blijkt dat de invloed van de betonschoor en het kopschot groot is. De gemeten betonspeciedrukken zijn belangrijk lager dan de betonspeciedrukken gemeten met de twee sensoren op het binnenwandschot. Zie figuren 10 en 11. Verondersteld kan worden dat bij het kopschot, met de daaraan bevestigde voorspankanalen, boogwerking een rol speelt, waarvan bekend is dat deze leidt tot lagere horizontale betonspeciedrukken. De betonschoor steekt met beton en stekwapening in de wanddoorsnede, wat kennelijk ook een lagere betonspeciedruk tot gevolg heeft.

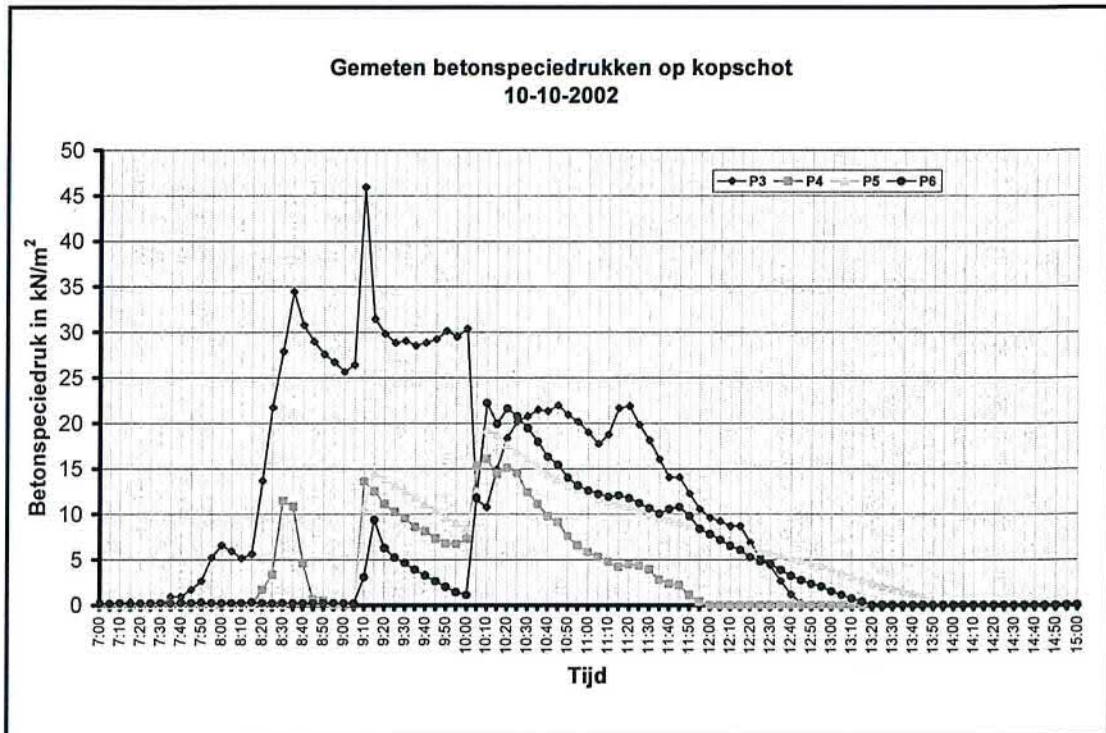


Figuur 9 - De meetplaatsen op de eerste waarnemingsdag 10-10-2002

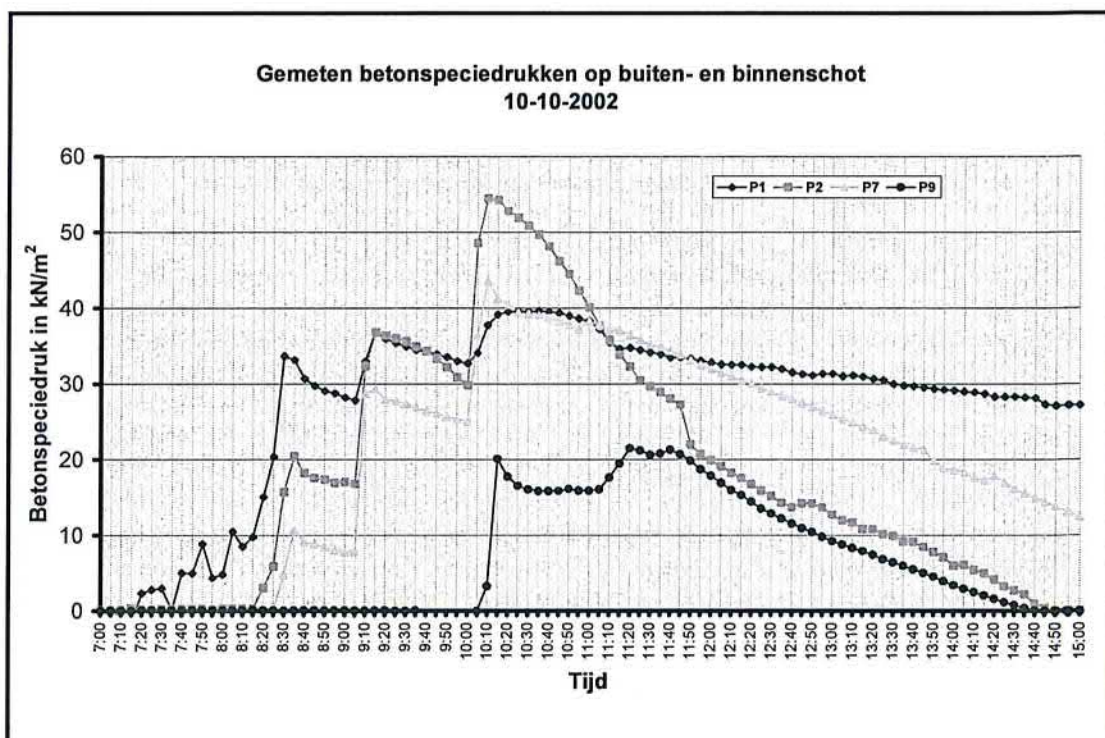
De twee sensoren in het binnenwandschot zijn aangebracht op een hoogte van 1,07 en 3,47 meter van de 4,50 meter hoge betonwand. De onderste sensor is geplaatst net boven de 850 mm dikke betonvloer. Om 10.10 uur wordt in de onderste sensor een maximale betonspeciedruk van 55 kN/m^2 gemeten. Op hetzelfde moment geeft de bovenste sensor een speciedruk van 20 kN/m^2 aan als belasting. Een uur loopt deze druk nog iets op tot 22 kN/m^2 . Deze drukverhoging wordt met de onderste sensor niet meer geregistreerd. Ongetwijfeld tengevolge van het opstijven van de betonspecie.

De bekisting is ontworpen op een betonspeciedruk van 90 kN/m^2 . Bij een hydrostatische druk vanaf de onderste sensor tot bovenkant wand/vloer had een betonspeciedruk van 85 kN/m^2 bekisting mogen worden verwacht. Opgetreden is slechts 55 kN/m^2 . Kennelijk door tussentijds opstijven wordt de hydrostatische betonspeciedruk niet bereikt. Dit opstijven is ook in de meetgrafiek zichtbaar. Tijdens de metingen is bijgehouden, wanneer de betonpomp heeft gepompt. Het blijkt dat de drukverhogingen die de sensor registreert, samenvallen met de periodes dat de betonpomp in actie is. Tussen deze pomptijden registreert de sensor een drukverlaging door het opstijven van de betonspecie. Worden de twee stortonderbrekingen, die zichtbaar zijn in de grafiek (figuur 11) van de onderste sensor, geëxtrapoleerd naar 11.00 uur, dan kan men concluderen, dat door het opstijven de betonspeciedruk 25 à 30 kN/m^2 is teruggelopen. Telt men daarbij de 5 kN/m^2 die zichtbaar is in de meetgrafiek van de bovenste sensor, dan is hiermee de 30 kN/m^2 speciedrukverlaging verklaard.

Na afloop van de metingen heeft de werkgroep geconcludeerd dat het storten niet vertraagd hoeft te worden vanwege het bereiken van de maximale betonspeciedruk. In overleg met het uitvoeringsteam is besloten om de meting te herhalen en daarbij de wand zoveel mogelijk in een keer te vullen. Mocht de betonspeciedruk in de buurt komen van de ontwerpdruk, dan zouden de stortploeg en het uitvoeringsteam door de waarnemer worden gewaarschuwd.



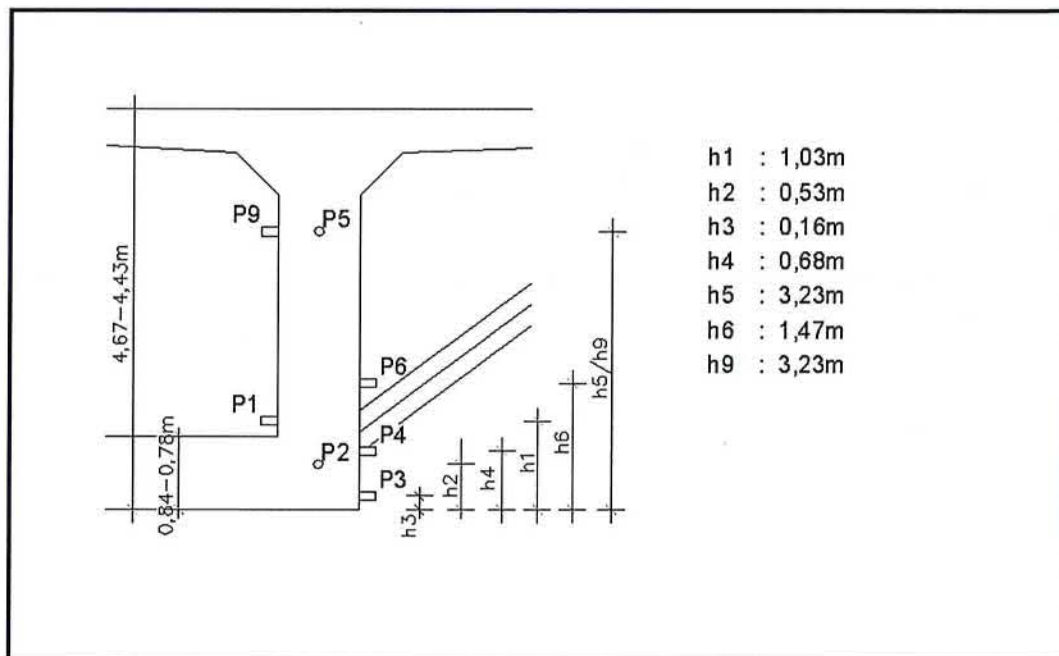
Figuur 10 - De gemeten betonspeciedrukken 10-10-2002 op kopschot



Figuur 11 - De gemeten betonspeciedrukken 10-10-2002 op buiten- en binnenschot

Tweede meting, 17-10-2002

Bij de tweede meting zijn drie sensoren geplaatst in het buitenwandschot; slechts twee sensoren in het kopschot en twee sensoren in het binnenschot. Zie figuur 12. De sensoren in het buitenschot zijn zodanig geplaatst dat de betonschoor geen invloed kan uitoefenen op de hoogte van de betonspeciedruk ter plaatse van de sensoren. Overeenkomstig het vooropgesteld plan is na het vullen van de betonvloer de wand nagenoeg ononderbroken gevuld. Tijdens het vullen van de wand is een stijgsnelheid bereikt van 12 meter per uur.

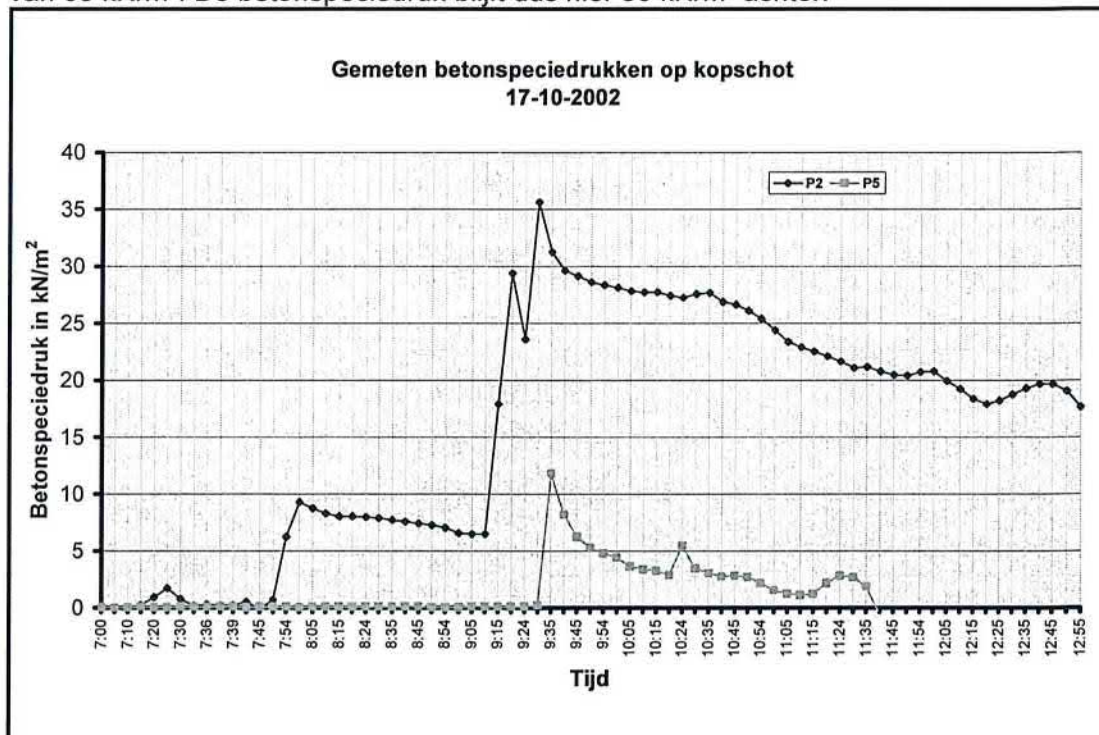


Figuur 12 - De meetplaatsen op de tweede waarnemingsdag 17-10-2002

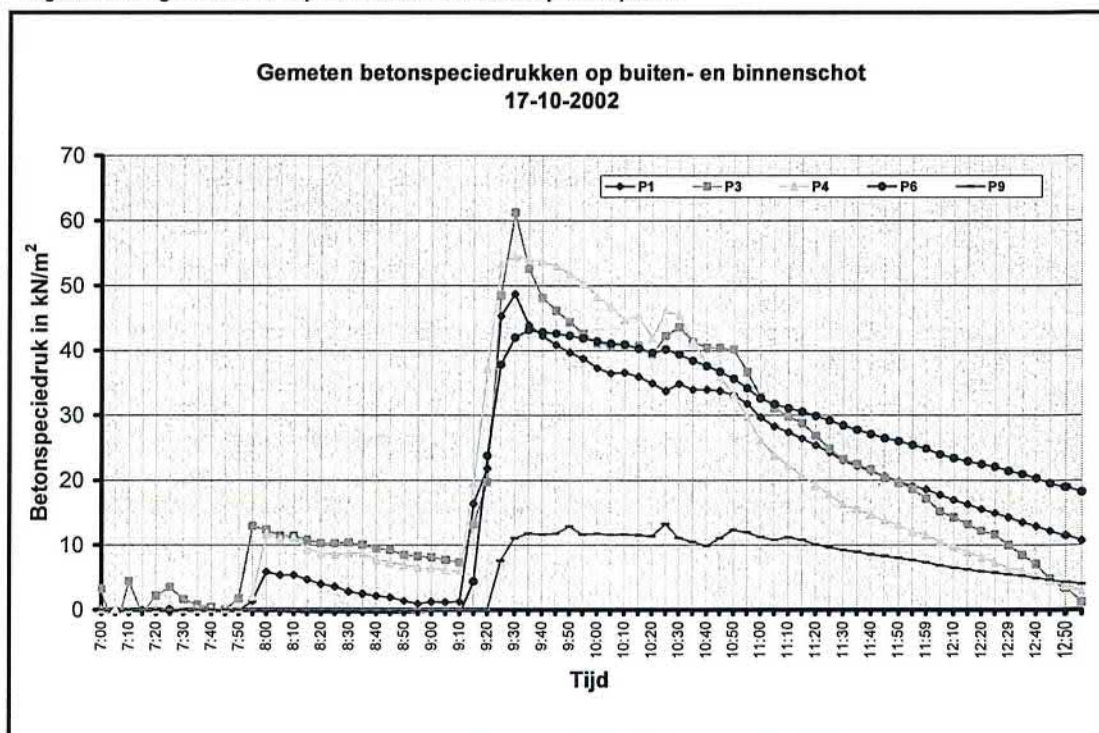
De twee sensoren in het kopschot hebben een maximale betonspeciedruk van 36 en 13 kN/m² geregistreerd (zie figuur 13). Duidelijk lager dan verwacht had mogen worden op basis van hydrostatische druk. De vijf sensoren in het binnen- en buitenwandschot registreren allen de hoogste druk op hetzelfde moment aan het eind van het vullen van de betonwand. De vijf sensoren laten een gelijklopend beeld zien waardoor de bespreking beperkt kan blijven tot de twee onderste sensoren in het buitenwandschot (zie figuur 14). De onderste sensor in het buitenwandschot op 18 cm boven onderkant wand registreert tot 7.45 uur het trillen van de betonspecie in andere delen van de bekisting. Om 7.45 uur bereikte de betonspecie de sensor en in tien minuten tijd wordt een betonspeciedruk van 13 kN/m² bereikt. Tot 9.15 neemt deze speciedruk af tot ongeveer 8 kN/m². Direct na het ochtendschaft start de stortploeg met het zo snel mogelijk vullen van de betonwand. Reeds om 9.30 uur wordt de maximale druk van 63 kN/m² bereikt, een toename van 55 kN/m².

Sensor P4 laat op de genoemde tijdstippen een afname zien van 16 kN/m² tot 7kN/m², waarna om 9.30 uur de maximale betonspeciedruk van 55 kN/m² wordt bereikt, een toename van 50 kN/m². Op basis van een hydrostatische druk vanaf onderkant vloer had een betonspeciedruk van 85 kN/m² mogen worden verwacht. De gemeten druk blijft hier 35 kN/m² op achter.

Op basis van hydrostatische druk vanaf niveau onderkant wand had een druk van 107 kN/m^2 mogen worden verwacht. Bezien we alleen het vullen van de betonwand met 3,40 meter betonspecie na het schaft, dan had een druk verwacht mogen worden van 85 kN/m^2 . De betonspeciedruk blijft dus hier 30 kN/m^2 achter.



Figuur 13 - De gemeten betonspeciedrukken 17-10-2002 op het kopschot

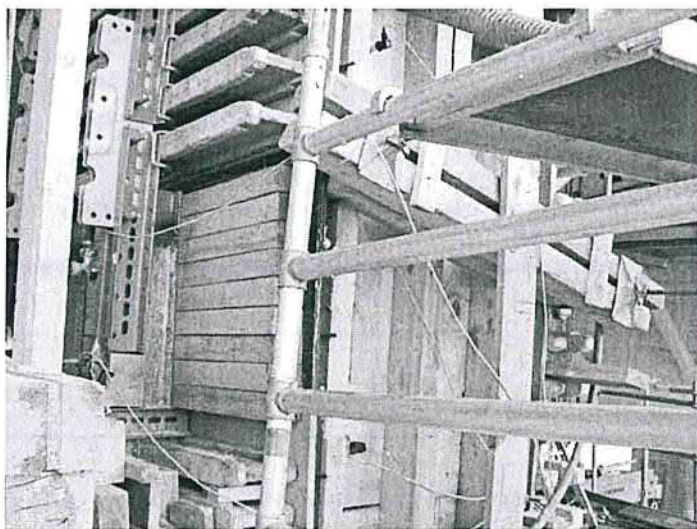


Figuur 14 - De gemeten betonspeciedrukken 17-10-2002 op buiten- en binnenschot

5.2.4. Conclusies metingen 3^e Lekbrug Vianen

Tijdens het storten van de vijfde en zesde uitbouwmoot op de derde Lekbrug bij Vianen is de betonspeciedruk gemeten bij de hoogvloeiabe betonspecie die door de ontwikkelde sterkte als Hoge Sterkte Beton (B85) kan worden aangemerkt. Uit deze metingen volgen als conclusies:

- De betonspeciedruk bereikt slechts 2/3 van de te verwachten hydrostatische druk.
- Met de gebruikte apparatuur is betonspeciedruk eenvoudig te meten, ook door aannemers zelf, mits men beschikt over de geschikte software.
- Met de metingen is aangetoond dat gecontroleerd storten met speciedruk-apparatuur zinvol is.

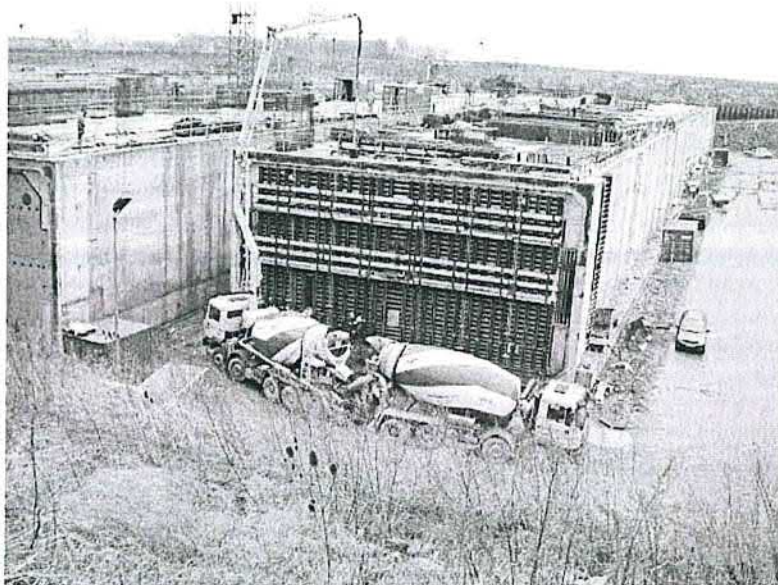


Figuur 15 - De sensor voor het meten van de betonspeciedruk

5.3. Zelfverdichtende betonspecie, Bouwdok Barendrecht

5.3.1. Algemeen

De twee afzinktunnels voor de hoge snelheidslijn zuid worden voor een deel gebouwd met zelfverdichtende beton. Het zelfverdichtende beton is bewust gekozen voor de tijdelijke kopwanden van de 14 afzinkelementen. De kopwanden binnen de tunneldoorsnede moeten deze volledig afdichten voor het opdrijvend vermogen dat nodig is om de tunnelementen naar de definitieve afzinkplaats te transporteren. Door het zelfverdichtende beton is het nu voor het eerst mogelijk geworden om de specie te storten door een kleine sparing door het tunneldek. Deze sparing is net groot genoeg om de stortpijp van de betonpomp doorgang te verlenen. Op dit project heeft de Stubeco Studiecél drie keer de optredende betonspeciedruk kunnen meten.



Figuur 16 - Stort kopschot van een tunnelmoot in het bouwdok Barendrecht

5.3.2. Opzet onderzoek

Het onderzoek is uitgevoerd in het Bouwdok Barendrecht, waar de afzinkelementen voor twee tunnels van de hoge snelheidslijn worden geprefabriceerd. De twee tunnels worden gebouwd onder de Dordtse Kil en de Oude Maas.

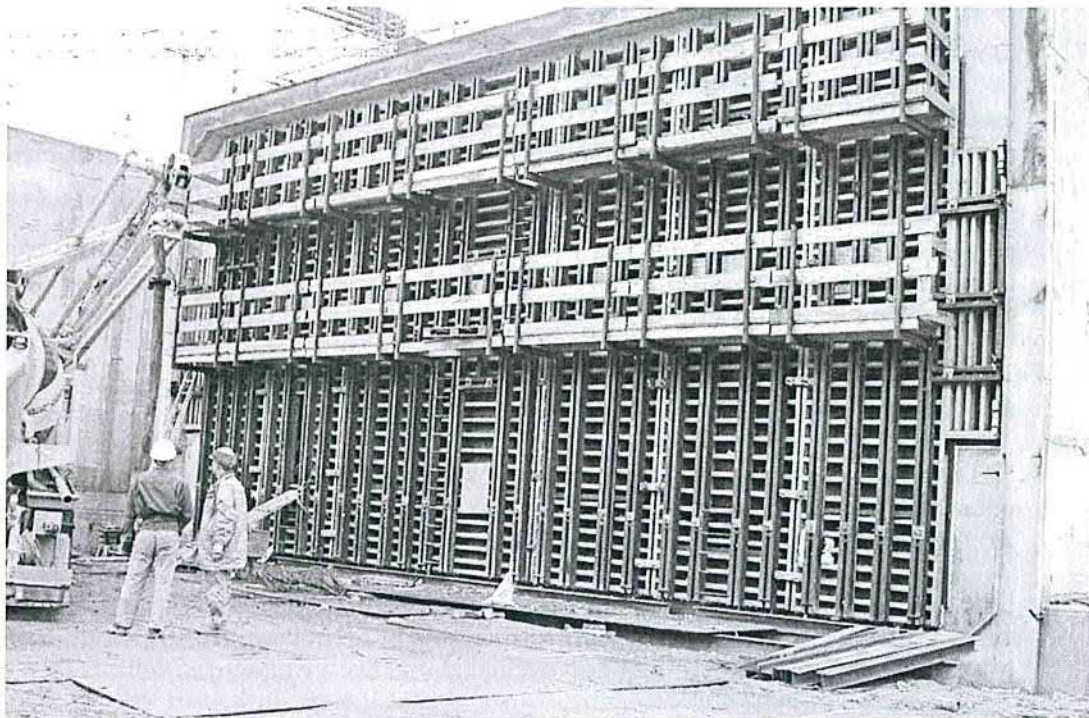
Elke tunnel bestaat uit zeven afzinkelementen van gemiddeld 150 m lang. Elk element wordt weer gevormd door zes moten van ongeveer 25 m lang. Deze elementmoten worden in vijf bouwstromen met een cyclustijd van twee weken geproduceerd.

Om de tunnelementen een drijvend vermogen te geven moeten de twee tunneleinden tijdelijk worden afgesloten. Voor deze afsluiting heeft de Bouwcombinatie gekozen voor een betonwand van ongeveer 0,28 m dikte. Om de grote waterdruk tegen deze relatief dunne betonwand op te kunnen vangen wordt deze wand met een afmeting van 15,50 m x 7,90 m gesteund door 14 HE800B profielen. Deze profielen dragen de belasting over aan de vloer en het dek van de afzinktunnel. De bekisting aan de binnenzijde wordt gevormd door kleine schotjes die tussen de staalprofielen worden geplaatst tegen de voorste flens. De schotjes worden afgestempeld tegen de achterste flens van de staalprofielen. Na het storten kunnen deze schotjes opnieuw worden gebruikt. Via een deuropening in de kopwanden kunnen deze schotjes uit de tunneldoorsnede worden gehaald.

De buitenzijde van de kopwanden wordt bekist met houten grootwandbekisting bestaande uit schotten van bekistingplaten met liggers van baddinghout, 150 mm en

dubbele UNP-profielen als gordingstaanders. Iedere gordingstaander wordt door middel van een drietal centerpenen verankerd aan de staalprofielen aan de binnenzijde.

De 14 afzinkelementen vergen 28 kopwanden. Hiervoor is een set bekistingen beschikbaar. Gebruikelijk is dat de betonspecie via stortluiken wordt gestort en getrild. Sinds enkele jaren is zelfverdichtende betonspecie voor de bouwbedrijven beschikbaar. Dit leidt tot allerlei innovatieve ontwikkelingen. In dit geval heeft de Bouwcombinatie een methode ontwikkeld om de specie door middel van een enkele relatief kleine sparing door het tunneldek te storten in de kopwanden. Deze sparing is voldoende om de stalen stortbuis van de betonpomp door te laten. Deze buis heeft een lengte van ongeveer 4 meter. Daarmee kan de valhoogte belangrijk beperkt worden. Bij zelfverdichtende betonspecie zijn ook geen openingen in het buitenschot voor het trillen van de betonspecie nodig. De pompbediende kan zelfstandig zonder hulp van de stortploeg de specie storten. Een kleine stortploeg controleert het stortproces onder andere op lekkages.



Figuur 17 - De buitenbekisting met gordingstaanders van dubbele UNP 160 profielen

De bekisting is ontworpen op een maximale betonspeciedruk van 100 kN/m^2 . De verwachting is dat de zelfverdichtende betonspecie een hydrostatische druk uitoefent. Bij een 8 m hoge wand zou dit neerkomen op ca. 190 kN/m^2 . Daarom heeft de bouwcombinatie ervoor gekozen de kopwand in twee keer te storten met een stortonderbreking van 1 dag. Benodigd is ongeveer 35 m^3 betonspecie per kopwand. Het eerste stort wordt uitgevoerd door twee truckmixers met elke 9 m^3 zelfverdichtende betonspecie. De truckmixers lossen de betonspecie in een mobiele betonpomp-installatie.

De betonspeciedruk bij de kopwanden van de twee afzinktunnels van de HSL is ook gemeten met sensoren tegen het betonoppervlak.



Figuur 18 – Vier van de vijf sensoren in het kopschot

5.3.3. Metingen

De meetresultaten van de drie metingen met een tijdverschil van twee maanden zijn per meting gerapporteerd:

- meting 1: woensdag 22 januari 2003, middag
- meting 2: dinsdag 25 maart 2003, middag
- meting 3: dinsdag 21 mei 2003, middag.

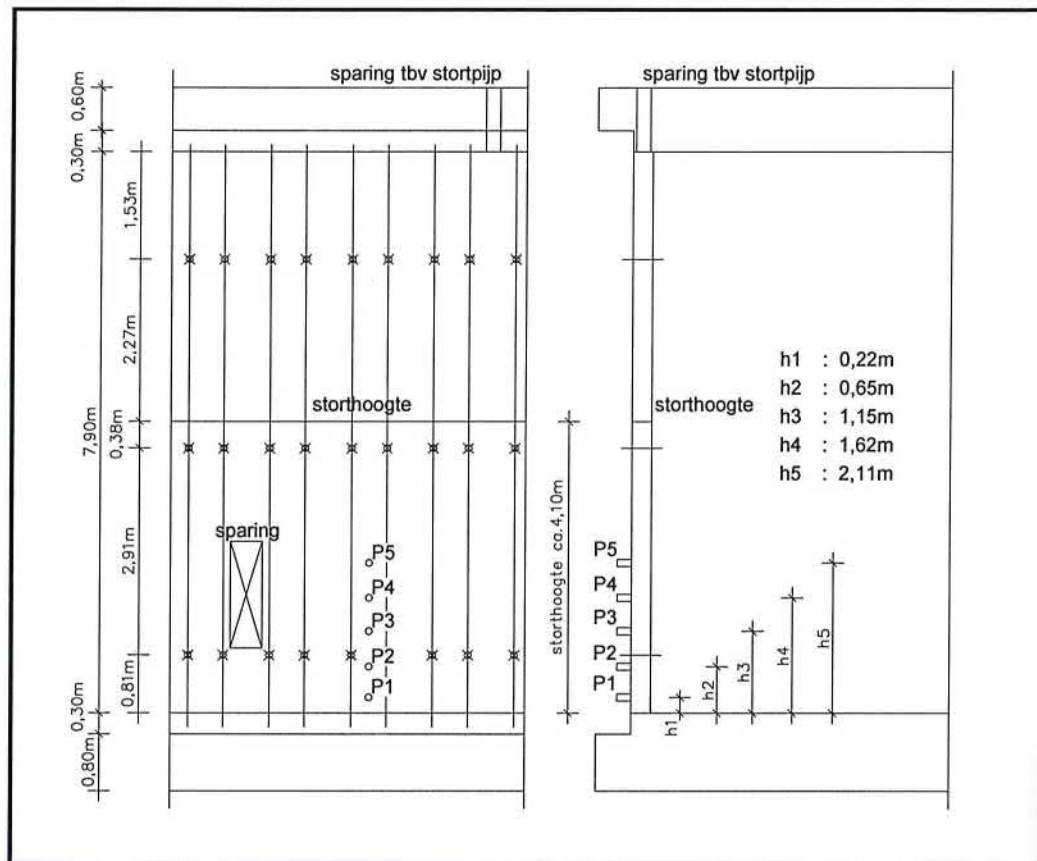
Meting 1: woensdag 22 januari 2003

De eerste meting heeft plaatsgevonden onder winterse omstandigheden met een buitentemperatuur van 6 à 7 °C. Nadat de betonpomp en de betonmixer zich in de nabijheid van het kopschot hadden opgesteld is het storten van de zelfverdichtende betonspecie gestart om 13.45 uur. Met een onderbreking van enkele minuten zijn achter elkaar twee mixers gelost binnen een storttijd van 1 uur.

De betonspecie had een aanvangstemperatuur van 12 à 13 °C. De 7,90 meter hoge wand met een dikte van ongeveer 0,28 m was na een uur tot ongeveer 4,10 à 4,15 m gevuld met betonspecie. De volgende ochtend is de wand volledig gevuld met betonspecie.

De resultaten uit de rijpheidscomputer laten zien dat de specietemperatuur nauwelijks omhoog loopt. Na 1,5 dag is de maximale temperatuur 16 °C. De gewenste eindrijpheid voor ontkisten van 1500 °Ch is dan nog lang niet bereikt. Anderhalve dag later om 09.00 uur is de rijpheid 650 °Ch.

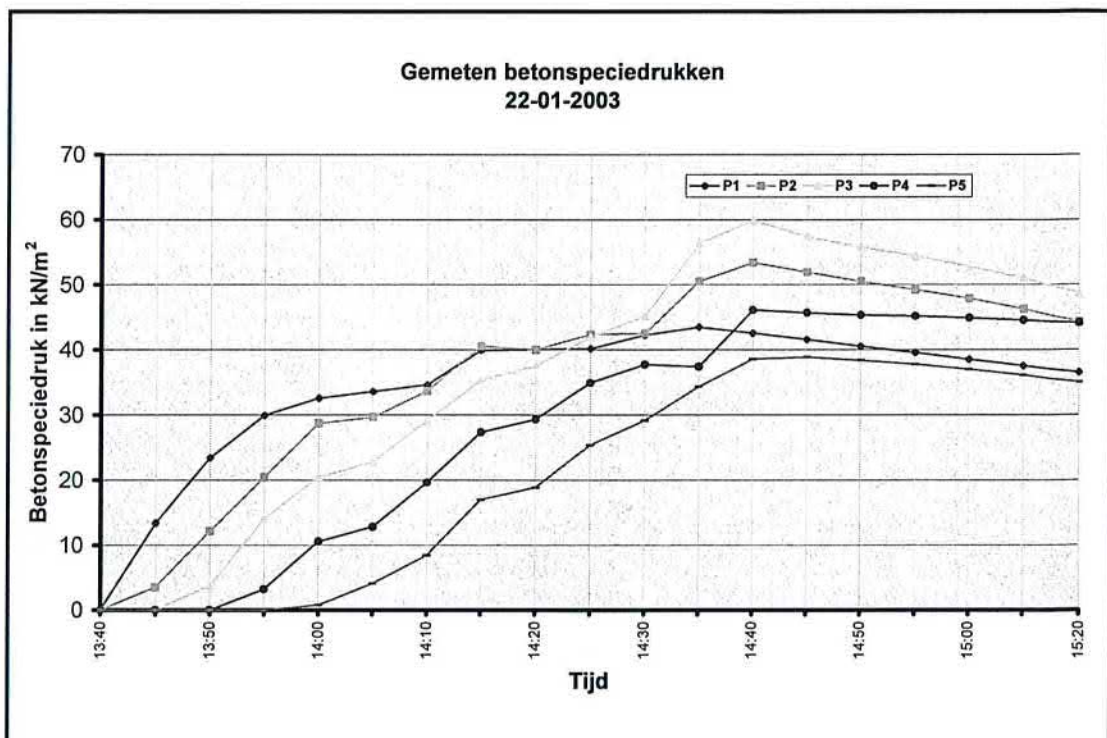
Enkele dagen voor de stortdag zijn tijdens het bekisten van de eindwanden vijf sensorhouders in de bekistingschotten geplaatst. Na het ontkisten kunnen de sensorhouders gebruikt worden bij volgende metingen. In figuur 19 zijn de meetplaatsen aangegeven.



Figuur 19 - De meetplaatsen voor de eerste meetdag 22-01-2003

Sensor P1 bevindt zich 0,22 m boven onderkant kopwand. Bij een vulhoogte van 4,10 m mag men bij een hydrostatische drukontwikkeling een druk van ca. 90 kN/m² verwachten. Met sensor P1 is echter een maximale betonspeciedruk van 43,4 kN/m² gemeten. De hydrostatische druk wordt maar voor de helft bereikt. Sensor P2 bereikt een druk van 53,4 kN/m². Dat is bijna 75% van de hydrostatische druk (79,4 kN/m²). Sensor P3 heeft een waarde bereikt van 60 kN per m² (zie figuur 20). Dat is bijna de hydrostatische druk (67,9kN/m²).

Het verloop van de lijnen geeft aan dat een half uur na het passeren van de eerste betonspecie het hydrostatische verloop afbuigt waardoor de maximale hydrostatische druk niet wordt bereikt. Dit effect zou het mogelijk maken de bekisting geheel te vullen, waarbij de maximale betonspeciedruk van 100 kN/m², waarop de bekisting is gedimensioneerd, niet wordt bereikt.



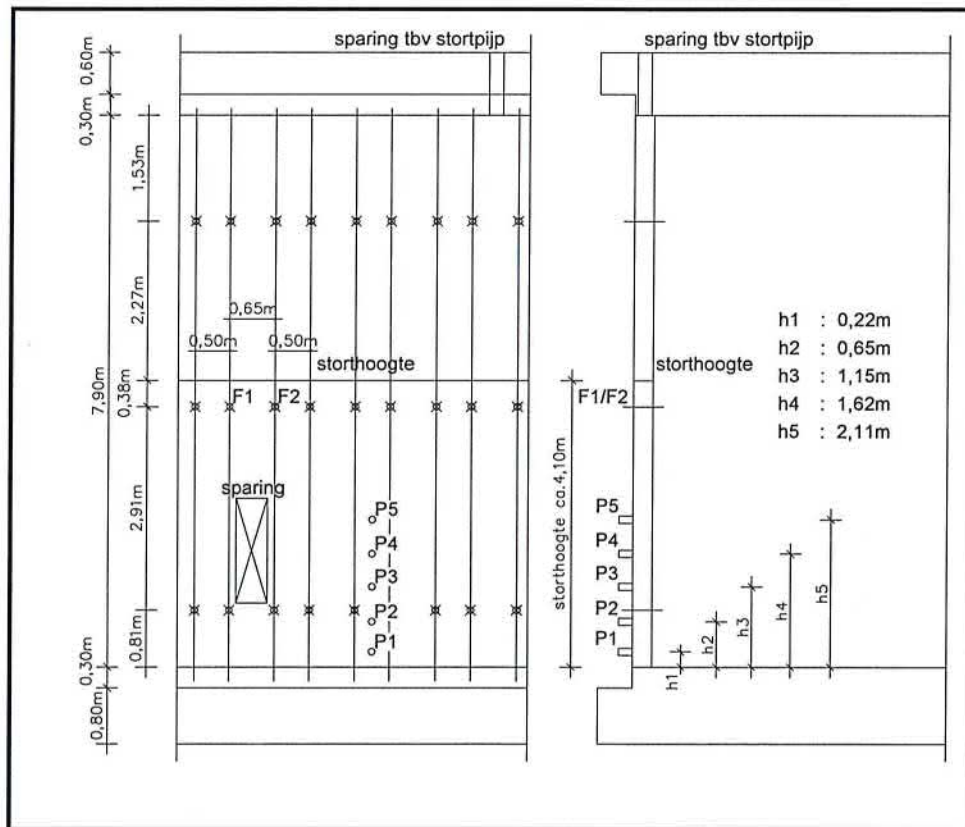
Figuur 20 - De gemeten betonspeciedrukken eerste meetdag 22-01-2003

Meting 2: dinsdag 25 maart 2003

In figuur 21 zijn de meetplaatsen aangegeven van de sensoren en centerpennen. Nadat de betonpomp de lange stalen stortpijp door de sparing boven in de wand heeft laten zakken, vangt het vullen van de wand even na 14.35 uur aan. De eerste mixer is binnen een half uur leeg. Na een wachttijd op de tweede mixer van 15 minuten is de wand even voor 16.00 uur gevuld. Bij dit stort is er geen stortpijp gebruikt. Hierdoor ontstond een grotere valhoogte van de specie.

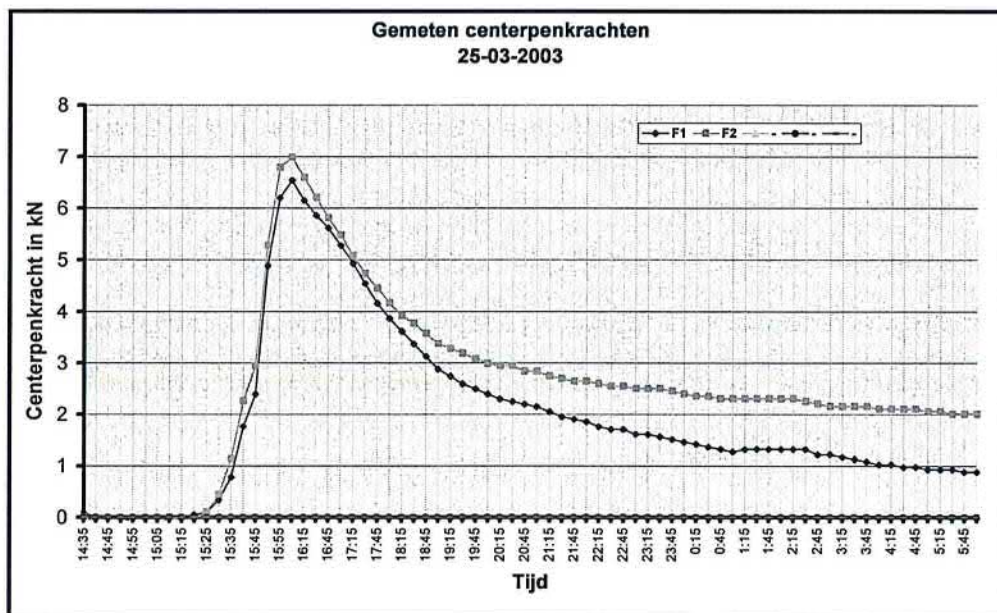
Het is de bedoeling, indien mogelijk, de wand te vullen met een derde mixer betonspecie. Als extra controle heeft het uitvoeringsteam gevraagd om drukmeters te plaatsen op twee centerpennen halverwege de wandhoogte. Bij het volledig vullen van de wand zullen dit namelijk de zwaarst belaste centerpennen zijn. Wanneer een hydrostatische drukverdeling wordt aangehouden kan op deze centerpennen bij de bereikte hoogte van 4,10 m een centerpenkracht van 12,3 kN worden verwacht. Gemeten wordt slechts 7 kN per centerpen waarbij moet worden aangetekend dat tijdens de stortpauze de centerpennen extra zijn aangeslagen (zie figuur 22). De waarnemers hebben de gemeten centerpenkrachten hierop gecorrigeerd. Deze lage centerpenkracht geeft aan dat het geen bezwaar zou zijn om de wand te vullen met een derde wagen betonspecie.

Omdat tijdens de stort wordt besloten de wand toch niet geheel te vullen, blijven de gemeten krachten laag. Besloten wordt dan ook de drukmeters op de centerpennen bij de volgende meting op de onderste centerpenrij te zetten.



Figuur 21 - De meetplaatsen voor de tweede meetdag 25-03-2003

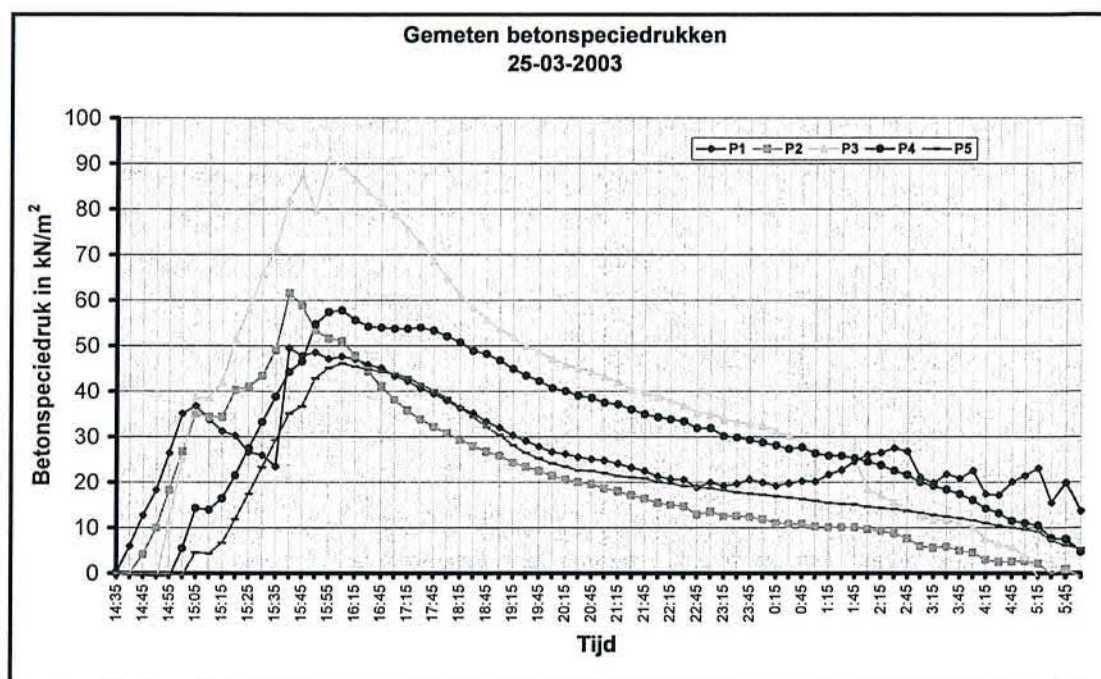
De plaats van de druksensoren is exact dezelfde als bij de eerste meting. De sensor P1 loopt geleidelijk op tot 38 kN/m², waarna de druk gaat afnemen tot 23 kN/m². Na een goed uur springt de druk plotseling omhoog tot 50 kN/m². Nog steeds belangrijk minder dan de hydrostatische waarde van ca.90 kN/m².



Figuur 22 - De gemeten betonspeciedrukken tweede meetdag 25-03-2003 met de centerpendrukmeters

Zowel uit de eerste meting als de tweede meting blijkt dat kleine stortonderbrekingen (10 à 15 minuten) bij het wisselen van de mixers een drukverlagend effect hebben. Sensor P2 bereikt een maximale betonspeciedruk van 62 kN/m² (zie figuur 23). Daarmee is deze betonspeciedruk gelijk aan die van de eerste meetdag en zou de wand met een derde wagen betonspecie kunnen worden gevuld.

Sensor P3 op 1,15 m hoogte, boven onderkant wand zou bij hydrostatische druk een maximale druk mogen aangeven van ca.68 kN/m². Gemeten is een druk van 91 kN/m²; een niet verklaarbaar resultaat. Op basis van deze sensor is op de bouwplaats besloten af te zien van het vullen van de wand met een derde mixer betonspecie.



Figuur 23 - De gemeten betonspeciedrukken tweede meetdag 25-03-2003 met de druksensoren

Meting 3: dinsdag 20 mei 2003

Omdat de middenwand van het afzinkelement doorloopt is de eindwandbekisting in twee delen uitgevoerd. Nadat de betonmixer en de betonpomp zich bij een van de twee kopwanden heeft opgesteld, is de 9 m³ betonspecie in een doorlopend proces van 12.10 tot 12.45 uur in de wand gepompt. Door de iets kleinere inhoud van de wand is een vulhoogte bereikt van 4,45 m. Dit resulteerde in een stijgsnelheid van ca. 8,0 m per uur. Dit is twee keer zo hoog als bij de eerste twee metingen. Na het wisselen van de betonmixer is de tweede wand gevuld. Hieraan is niet gemeten.

Een tweetal drukmeters zijn geplaatst op een tweetal centerpennen naast de rij sensoren (zie figuur 24). Figuur 25 laat zien dat de druk op de centerpennen gelijkmatig tijdens het storten is opgelopen tot de maximale waarde van 56 en 63 kN. Bij aanname van een hydrostatische drukverloop had een betonspeciedruk van ca.90 kN verwacht mogen worden. De gemeten centerpenkracht blijft hier belangrijk onder.

**Gemeten centerpenkrachten
20-05-2003**

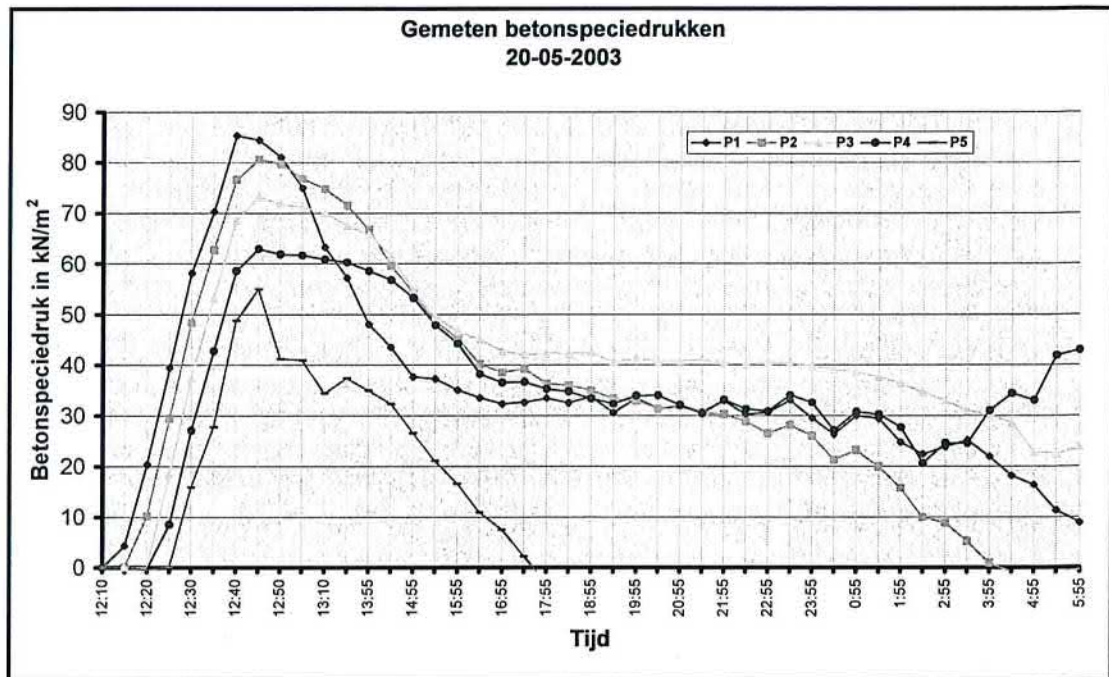
Centerpenkragt in kN

Tijd

Legend: F1 (solid line with circles), F2 (dashed line with squares)

Tijd	F1 (kN)	F2 (kN)
12:10	0	0
12:20	5	4
12:30	32	28
12:40	59	52
12:50	63	56
13:00	61	55
13:10	59	52
13:20	57	50
13:30	55	48
13:40	54	47
13:50	54	46
14:00	54	46
14:10	54	46
14:20	54	46
14:30	54	46
14:40	54	46
14:50	54	46
15:00	54	46
15:10	54	46
15:20	54	46
15:30	54	46
15:40	54	46
15:50	54	46
16:00	54	46
16:10	54	46
16:20	54	46
16:30	54	46
16:40	54	46
16:50	54	46
17:00	54	46
17:10	54	46
17:20	54	46
17:30	54	46
17:40	54	46
17:50	54	46
18:00	54	46
18:10	54	46
18:20	54	46
18:30	54	46
18:40	54	46
18:50	54	46
19:00	54	46
19:10	54	46
19:20	54	46
19:30	54	46
19:40	54	46
19:50	54	46
20:00	54	46
20:10	54	46
20:20	54	46
20:30	54	46
20:40	54	46
20:50	54	46
21:00	54	46
21:10	54	46
21:20	54	46
21:30	54	46
21:40	54	46
21:50	54	46
22:00	54	46
22:10	54	46
22:20	54	46
22:30	54	46
22:40	54	46
22:50	54	46
23:00	54	46
23:10	54	46
23:20	54	46
23:30	54	46
23:40	54	46
23:50	54	46
0:00	54	46
0:10	54	46
0:20	54	46
0:30	54	46
0:40	54	46
0:50	54	46
1:00	54	46
1:10	54	46
1:20	54	46
1:30	54	46
1:40	54	46
1:50	54	46
2:00	54	46
2:10	54	46
2:20	54	46
2:30	54	46
2:40	54	46
2:50	54	46
3:00	54	46
3:10	54	46
3:20	54	46
3:30	54	46
3:40	54	46
3:50	54	46
4:00	54	46
4:10	54	46
4:20	54	46
4:30	54	46
4:40	54	46
4:50	54	46
5:00	54	46
5:10	54	46
5:20	54	46
5:30	54	46
5:40	54	46
5:50	54	46
5:55	54	46

Pagina 39 van 55



Figuur 26 - De gemeten betonspeciedrukken derde meetdag 20-05-2003 met de druksensoren

5.3.4. Conclusies metingen Bouwdok Barendrecht

Bij drie van de 28 kopwanden van de 14 afzinkelementen voor twee tunnels is in het bouwdok Barendrecht de betonspeciedruk gemeten tijdens het storten met zelfverdichtende betonspecie. Uit deze metingen volgen als conclusies:

- Bij stijgsnelheden van 4 tot 8 m per uur kan een hydrostatisch drukverloop worden verwacht.
- Stortonderbrekingen hebben een drukverlagend effect.
- Met de gebruikte apparatuur is betonspeciedruk relatief eenvoudig te meten, ook door aannemers zelf, mits men beschikt over de geschikte software.
- Met de metingen is aangetoond dat gecontroleerd storten met speciedruk-apparatuur zinvol is.
- Speciedrukmetingen met drukdozen achter centerpenmoeren geven afwijkende waarden, dan die gemeten worden met sensoren tegen het specieoppervlak.

6. Tot zover

De studiecél heeft voor dit rapport vele onderzoeksrapporten, publicaties, ervaringen en artikelen uit binnen en buitenland geraadpleegd en heeft daarnaast zelf ook metingen uitgevoerd. Hieruit bleek dat er vele verschillende en soms zelfs tegengestelde aspecten, meningen, resultaten en conclusies betreffende de speciedrukken zijn. In dit stadium is het dan ook onmogelijk om sluitende rekenregels of richtlijnen te geven voor het vooraf bepalen van de speciedrukken die kunnen optreden bij het gebruik van met name hoogvloeibare, verdichtingsarme en zelfverdichtende speciesoorten. Wel zijn een aantal zaken duidelijker geworden en is bijvoorbeeld ook duidelijker geworden op welke wijze aanvullend onderzoek verricht moet worden om wel te kunnen komen tot eenduidige richtlijnen. Dat deze nodig zijn is een feit, want de huidige en aankomende regelgeving geeft deze richtlijnen niet. Zonder deze richtlijnen moeten we uitgaan van de enige zekerheid die de hydrostatische rekenregels ons geven en die leiden zeker niet altijd tot de meest economische oplossingen.

Hierna volgen een aantal aspecten die uit het onderzoek van de studiecél naar voren zijn gekomen en die gebruikt kunnen worden voor de huidige praktijk en tegelijk een aanzet kunnen geven voor verder onderzoek dat nodig is om tot de gewenste richtlijnen te kunnen komen.

- Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat zeker niet altijd een hydrostatische druk optreedt bij het toepassen van de betonspeciesoorten met een consistentieklasse hoger dan F4. Bij lage stijgsnelheden kan de druk zelfs onder de druk liggen, die optreedt bij normale getrilde betonspecie. Nu is nog onbekend hoe de horizontale betonspeciedruk van te voren kan worden vastgesteld.
- Hanteer voor het veilig ontwerpen van de bekisting voor betonspeciesoorten die vallen buiten de consistentieklassen C0 t/m F4 (VBT '95: c.g. 0 t/m 4) de hydrostatische druk, tenzij duidelijk kan worden aangetoond dat dit anders is. Dit houdt ondermeer in dat zeker voor constructies hoger dan 3 meter, de sterkte van de bekisting aanmerkelijk hoger zal moeten liggen dan voor normaal beton noodzakelijk is.
- Aan te bevelen is om bij uitvoering van constructiedelen met hoogvloeibare, verdichtingsarme of zelfverdichtende betonspecies, waarbij onbekende of kritische speciedrukken kunnen optreden, speciedrukmeetapparatuur toe te passen, zodat gecontroleerd gestort kan worden en de bekisting optimaal kan worden gebruikt.
- Uit verschillende onderzoeken is gebleken dat ook bij het toepassen van de betonspeciesoorten, die vallen in de consistentieklassen C0 t/m F4, hogere speciedrukken kunnen optreden, dan de drukken die volgens de NEN 6722 worden bepaald. Ook blijkt dat bij hogere stijgsnelheden en constructiehoogten hoger dan 3,5m, het in de NEN 6722 gegeven maximum van 80 kN/m² voor de horizontale belasting makkelijk kan worden overschreden (NEN 6722, art.9.3.2.1, Figuur 1).
- Uit proeven en uit de praktijk blijkt dat de relatie tussen speciedruk en consistentieklasse of verwerkbaarheid niet of nauwelijks is te leggen. Wel is er een relatie tussen opstijvingstijd en/of dormante periode en de speciedruk. De CIRIA formule houdt hiermee rekening o.a. middels een coëfficiënt, die wel bekend is voor de normale betonspecies, maar die (nog) onbekend is voor de hoogvloeibare betonspecies.
- Om tot richtlijnen te kunnen komen, moeten, binnen een nader op te stellen proefprogramma, zoveel mogelijk gestandaardiseerde metingen worden uitgevoerd bij verschillende betonspeciesoorten. Hiervoor zou de medewerking kunnen

- worden gevraagd aan een aantal aannemers en bekistingleveranciers /- onderaannemers om deze metingen te verrichten of de mogelijkheid te bieden deze metingen te laten verrichten. Hierbij moeten alle aspecten worden meegenomen die van invloed kunnen zijn op de betonspeciedrukken, zoals gegeven in paragraaf 2.2. van dit rapport.
- Speciedrukmetingen met zogenaamde drukdozen of rekstrookjes op de centerpennen kunnen een goed beeld geven van de optredende centerpenkrachten, maar geven geen goed beeld van de optredende speciedrukken. Gebleken is dat hierin aanmerkelijke afwijkingen kunnen optreden. Beter is het de speciedrukken te meten met druksensoren die de optredende druk direct op het betonoppervlak meten.
 - Onderzocht kan worden of door het eventueel toepassen van versnellers of andere hulpstoffen, of het toepassen van bepaalde vulstoffen (bijv. vliegashuis) de opstijftijd en/of de dormante periode kan worden bekort en de optredende speciedruk kan worden gereduceerd.

Literatuurlijst

- aanvulling BRL 1801, *Aanvulling op de Nationale Beoordelingsrichtlijn Betonmortel betreffende het KOMO-productcertificaat voor Hoogvloeibare, verdichtingsarme en zelfverdichtende betonmortel*, Certificatieinstelling BMC, Gouda, 2002.
- Bernabeau / GTM Construction, *Self Compacting Concrete – Final synthesis report*, Zweden, 2000.
- Betoniek 12/28 september 2003, *Hoogvloeibare betonproducten*, Enci Media, 's-Hertogenbosch, 2003.
- Betoniek 2/16 juni 1973, *Bekistingsdruk*, Enci Media, 's-Hertogenbosch, 1973.
- Bouwmeester, J., *Meting centerpenkrachten Gooiboog*, HBG Civiel 2003.
- Braam, C.R. en F.P.J. Schilperoort, *Laboratorium onderzoek 'Speciedrukken uitgeoefend op bekisting' t.b.v. CUR-commissie B79*, TU-Delft, Civiele Techniek, Stevinlaboratorium, Delft, 2001.
- BRL 5063, *Nationale Beoordelingsrichtlijn betreffende het KOMO-atteest met productcertificaat voor Hoge Sterkte Beton*, Certificatie-instelling BMC, Gouda, 1996.
- Clear, C. en T. Harrison / CIRI, CIRI Report 108 – Concrete pressure on formwork, CIRI, London, 1985.
- CUR- aanbeveling 93, *Zelfverdichtend beton*, CUR, Gouda, 2002.
- DIN 18 218 (1980): *Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen*, N Bau DIN Deutsches Institut für Normung 1980.
- Freiks, E. e.a., *B35 normaal grindbeton versus Self Compacting Concrete (SCC) in een 5 m hoge wand*, VOC Betonbouw/VOBN/TU-Delft, 2000.
- Heijboer, P.J. en J. van Eldik, *Geslaagd experiment met zelfverdichtend beton, artikel uit 'Cement 4 - 2001'*, ENCI Media, 's-Hertogenbosch, 2001.
- Kinnear, R.G., *The pressure of concrete on formwork*, CER (now CIRI) Report 1, april 1965.
- Krikhaar, H.M.M. e.a./ Enci, *Betonpocket 2003*, ENCI Media, 's-Hertogenbosch, 2002.
- Leemann, . en C. Hoffmann, *Schalungsdruck von selbstverdichtendem Beton, artikel uit Betonwerk+ Fertigteil-Technik (BFT) 11 – 2003*, Bauverlag, Güthersloh, 2003.
- NEN 6722: 2002, *Voorschriften Beton – Uitvoering*, NNI, Delft, 2002.

- NEN 3051: 1969, *Richtlijnen voor het trillen van beton*, NNI, Delft, 1969
- Ontw. NEN 8005: 2003, Nederlandse aanvulling op NEN-EN 206-1, NNI, Delft, 2003
- NEN-EN 206-1: 2001, Beton – Deel 1: Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit, NNI, Delft, 2001
- Obladen, B. en M. v.d. Wolf, *Praktijkproef Self Compacting Concrete (SCC) Zuid Tangent KW 8 (BBS)*, Ballast Nedam Infra/Strukton Betonbouw, 2001.
- Proske, T. en C.- . Graubner, *Self-Compacting Concrete – Pressure on formwork and ability to deaerate*, Darmstadt Concrete, Darmstadt, 2002.
- Stubeco, *Handboek bekistingen*, Stubeco, Gouda, 1991.
- Tims, B., *Bekistingdrukmetingen project Brug 466 Amsterdam*, Doka Nederland, 2003.
- Vandewalle, L., *Zelfverdichtend beton: Beton van de toekomst?*, artikel uit 'Cement 4 – 2001', ENCI Media, 's-Hertogenbosch, 2001.

Ook zijn voor dit rapport vele artikelen geraadpleegd uit verschillende nationale en internationale vakbladen en van het internet die verder niet bij name worden genoemd.

Verklarende woordenlijst

Bekistingdruk	Druk uitgeoefend door de betonspecie op de bekisting.
Beton	Verharde betonspecie.
Betonspecie	Een plastisch mengsel van grof en fijn toeslagmateriaal, cement, water en eventueel hulp- en/of vulstoffen.
Betonspeciedruk	Druk uitgeoefend door de (beton)specie
Bindtijd	De tijd in uren waarna de opstijving van de betonspecie zo ver is gevorderd dat bij verder storten geen verhoging van de bekistingdruk meer optreedt.
Brugwerking (ook 'Silowerking' of 'boogwerking')	In smalle wanden, kolommen of ander onderdelen kan de zogenaamde brugwerking optreden. Door de beperkte ruimte kan met name het grove toeslagmateriaal zich vast gaan zetten tussen de bekistingen of tussen bekisting en wapening. Er ontstaat een 'brug' waardoor de speciedruk onvolledig wordt doorgegeven aan de diepere lagen. Dit is hetzelfde effect waardoor een met zand gevulde trechter soms niet leegloopt. Een dicht wapeningsnet kan hetzelfde effect hebben in horizontale richting.
Consistentie	Plastisch gedrag van betonspecie. Consistentie is opgedeeld in consistentieklassen, afhankelijk van de gemeten waarde bij een bepaalde meetmethode.
Consistentiegebied	zie <i>consistentieklasse</i> .
Consistentieklasse	Indeling van de consistentie. (Voorheen consistentiegebied (VBT'95))
Dormante periode	De periode waarin nog absoluut geen sterkteopbouw plaatsvindt in de beton.
Hulpstoffen	Een hulpstof is een stof die, als regel bij een toevoeging in hoeveelheden gelijk aan of minder dan 5% van de cementshoeveelheid, een significante wijziging bewerkstelligt van één of meer eigenschappen van de cementpasta, de mortel- of betonspecie of het verharde product.
Hydrostatische druk	De druk die een vloeistofkolom uitoefent op een oppervlak 'waarde = massa vloeistof x vloeistofkolomhoogte'.
Hydrostatische drukhoogte	Het verschil in hoogte tussen de bovenzijde van het niveau van de betonspecie en de plaats waar de maximale horizontale druk (hydrostatisch) ten gevolge van de betonspecie wordt bereikt.
Opstijvingstijd	zie <i>bindtijd</i>
SCC	Self compacting concrete - zelfverdichtende beton.
Silowerking	zie <i>brugwerking</i>
Speciedruk	zie <i>betonspeciedruk</i>
Stijgsnelheid	De snelheid waarmee het stortoppervlak van de betonspecie in de bekisting stijgt. Wordt uitgedrukt in m/uur.
Stortbelasting	Veranderlijke belasting ten gevolge van betonstortwerkzaamheden
Storthoogte	Hoogte tot waar de betonspecie in de bekisting aangebracht dient te worden.
Stortsnelheid	De snelheid van verwerken van een hoeveelheid betonspecie. Wordt uitgedrukt in m ³ /uur.
Verwerkbaarheid	anduiding voor de eigenschappen van betonspecie bij het mengen, transporteren, verdichten en afwerken.
Vulstoffen	Een vulstof is een inerte dan wel puzzolane of (latent) hydraulische stof, meestal fijner dan 63 µm, die aan de betonspecie kan worden toegevoegd ter aanvulling van de hoeveelheid fijn materiaal.

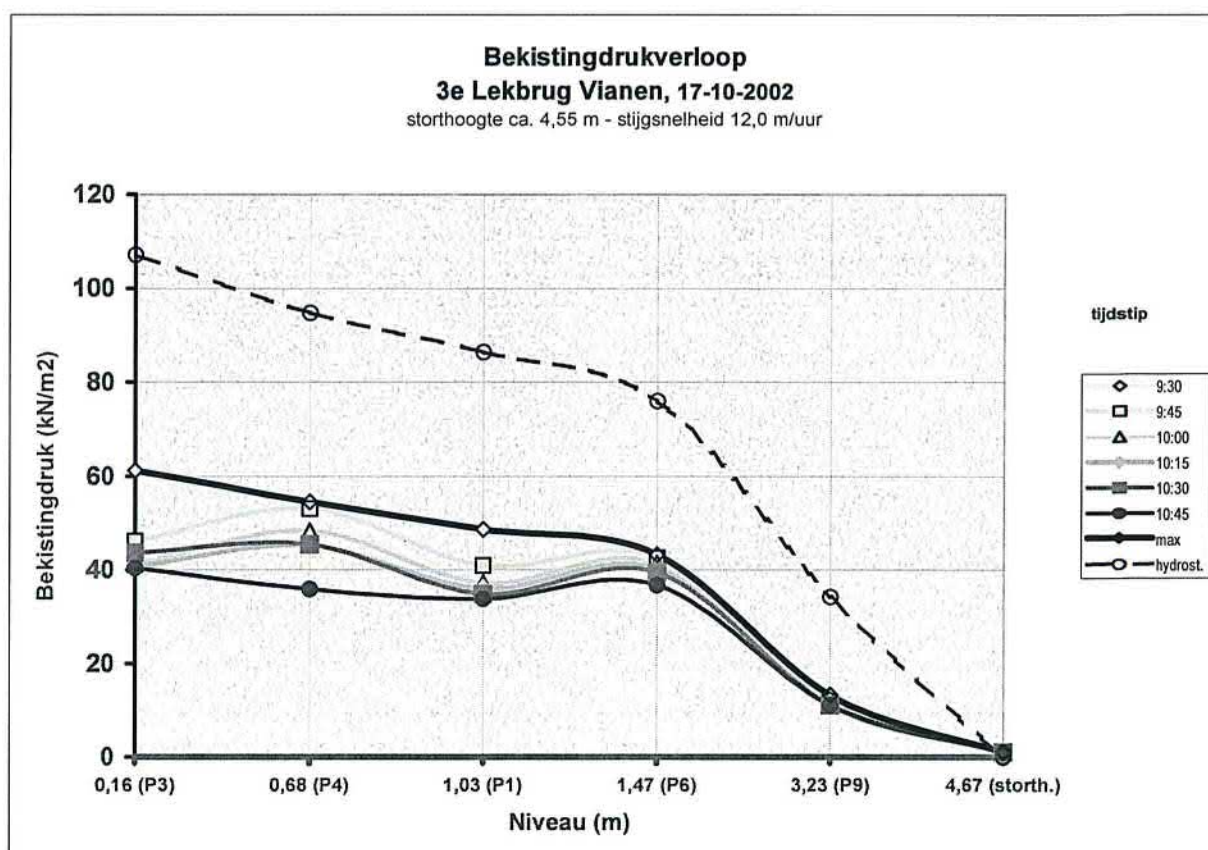
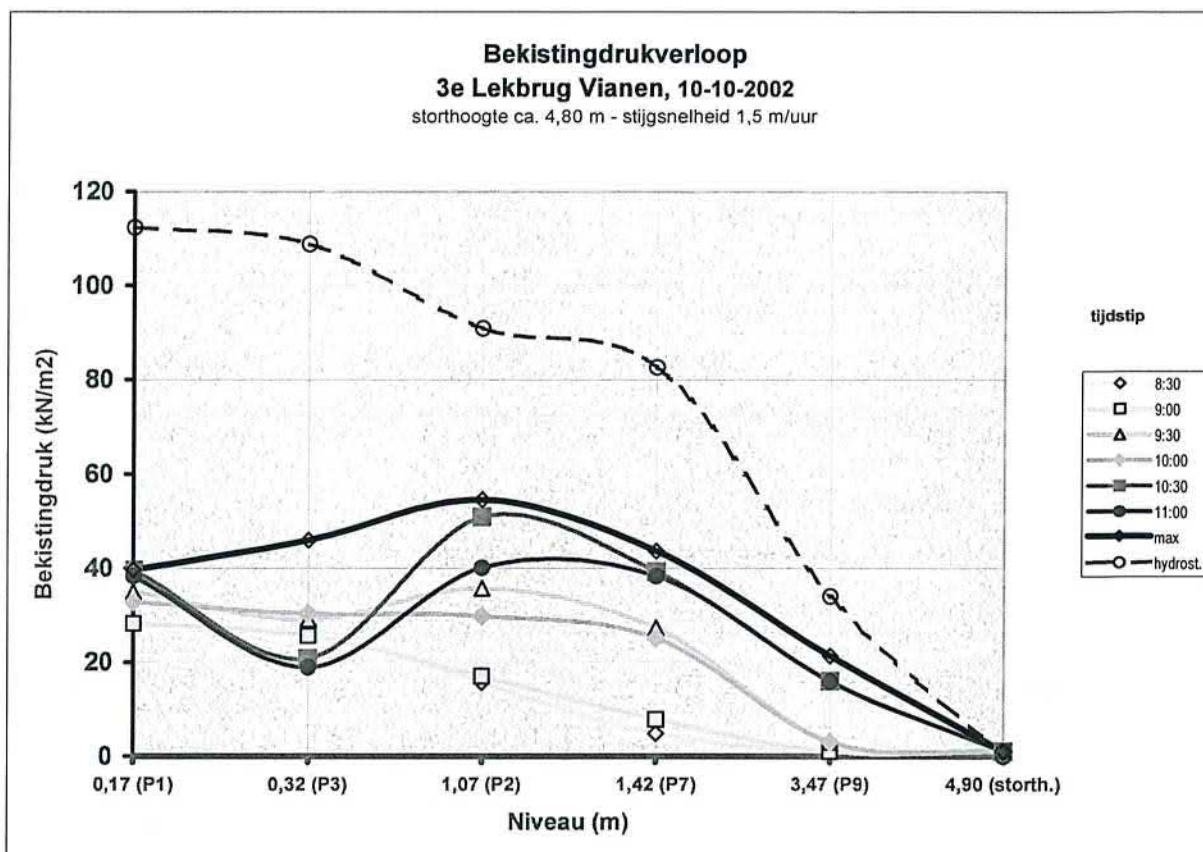
- **Bijlagen**

• Gegevenstabel speciedrukmeting 3 ^e Lekbrug Vianen	47
• Grafieken bekistingdrukverloop meting 3 ^e Lekbrug Vianen	49
• Gegevenstabel speciedrukmeting Bouwdok Barendrecht	50
• Grafieken bekistingdrukverloop meting Bouwdok Barendrecht	52
• Gegevenstabel verzamelde speciedrukmetingen	54

Gegevenstabel speciedrukmeting 3^e Lekbrug Vianen

Gegevenstabel speciedrukmeting					
Bouwlocatie / project		3e Lekbrug Vianen, Brugligger			
Algemeen					
Metingnummer		1	2		
Onderdeel		brugmoot 5	brugmoot 6		
Datum		10-10-2002	17-10-2002		
anvang stort	tijd	7:00	7:00		
anvang meting	tijd	6:40	7:00		
Einde stort	tijd	ca.11:45	ca.11:00		
Einde meting	tijd	16:25	12:55		
Beton / betonspecie					
Beton sterkteklasse		B65 / B85	B65 / B85		
Betonsoort		(HSB)	(HSB)		
Volumieke massa	kg/m ³	2375	2375		
Consistentieklasse (gebied)		F6-2 (6)	F6-2 (6)		
Verwerkbaarheid		verdichtingsarm	verdichtingsarm		
Zetmaat	mm	nvt	Nvt		
Schudmaat	mm	nvt	Nvt		
Uitvloeimaat	mm	560-670	560-670		
Trechtertijd	sec.	niet gemeten	niet gemeten		
Stabiliteit	sec.	niet gemeten	niet gemeten		
BOX-test		nvt	Nvt		
Vessel-test		nvt	Nvt		
Grootste korrelafmeting toeslagmat.	mm	16	16		
Specietemperatuur	°C	17,0	15,0		
Dormante periode	uur	niet bekend	niet bekend		
Cementsoort		CEM I (Seibel)	CEM I (Seibel)		
Cement sterkteklasse		42,5 N	42,5 N		
Hydratatie		LH	LH		
Bestandheid tegen sulfaten		HS	HS		
Cementhoeveelheid	kg/m ³	360	360		
wbf factor		0,40	0,40		
Hulpstoffen		-	-		
plastificeerder		Cugla HR 70/30	Cugla HR 70/30		
luchtbelvormer		-	-		
vertrager		-	-		
versneller		-	-		
overig		-	-		
Vulstoffen		KSM	KSM		
inerte vulstoffen (o.a. kalksteenmeel)		-	-		
met bindmiddelfunctie (o.a. silica fume)		-	-		

Uitvoeringswijze en omstandigheden		1	2		
Stortheogte	m	ca.4,9-4,6	ca.4,6-4,4		
Stijgsnelheid	m/uur	1,5	12,0		
Max.valhoogte	m	5,00	4,70		
Stortduur	uur	totaal 4,75	totaal 4,00		
Stortonderbrekingen	aantal	3	1		
Triltijd t.o.v. storttijd (100% = continue trillen)	%	100	100		
Trilapparatuur		trilnaald	trilnaald		
Stortwijze (kubel/pomp)		pomp	pomp		
Stortmethode (vrije val / stortpijp o.g./ via ventiel onderz.bekist., ed)		vrije val	vrije val		
Samenstelling bekisting					
plaatmateriaal		plex 21mm	plex 21mm		
dragers		Peri GT24	Peri GT24		
gordingen		Dubb.UNP100	Dubb.UNP100		
centering		B15	B15		
Buiten-/Luchttemperatuur	°C	5-10	5-10		
Neerslag		geen	Geen		
Te storten onderdeel					
Wanddikte	m	0,90	0,90		
Constructiehoogte	m	4,93	4,67		
Vorm onderdeel		recht	recht		
Wapeningsdichtheid	kg/m ³	148	148		
Metinggegevens					
Meethoogte vanuit onderzijde bekisting van meetpunt met hoogste druk	m	1,07	0,16		
Gemeten maximale speciedruk	kN/m ²	54,5	61,3		
Hydrostatische druk op meethoogte	kN/m ²	91,0	107,1		
Max.optr.speciedruk tov hydrost.druk	%	59,9	57,2		



Gegevenstabel speciedrukmeting Bouwdok Barendrecht

Gegevenstabel speciedrukmeting					
Bouwlocatie / project		Bouwdok Barendrecht, Kopschot tunnelelement			
Algemeen					
Metingnummer		1	2	3	
Onderdeel		kopwand	kopwand	kopwand	
Datum		22-1-2003	25-3-2003	20-5-2003	
anvang stort	tijd	13:45	14:30	13:15	
anvang meting	tijd	13:40	14:30	13:15	
Einde stort	tijd	14:45	15:55	13:45	
Einde meting	tijd	15:20	9:30 volg.dag	8:20 volg.dag	
Beton / betonspecie					
Beton sterkteklasse		B35	B35	B35	
Betonsoort		ZVB	ZVB	ZVB	
Volumieke massa	kg/m ³	2298	2337	2300	
Consistentieklasse (gebied)		F6-3 (7)	F6-3 (7)	F6-3 (7)	
Verwerkbaarheid		zelfverdichtend	zelfverdichtend	zelfverdichtend	
Zetmaat	mm	nvt	nvt	Nvt	
Schudmaat	mm	nvt	nvt	Nvt	
Uitvloeimaat	mm	720	740	niet bekend	
Trechtertijd	sec.	niet gemeten	niet gemeten	niet gemeten	
Stabiliteit	sec.	niet gemeten	niet gemeten	niet gemeten	
BOX-test		niet gemeten	niet gemeten	niet gemeten	
Vessel-test		niet gemeten	niet gemeten	niet gemeten	
Grootste korrelafmeting toeslagmat.	mm	16	16	16	
Specietemperatuur	°C	12,0	20,0	22,0	
Dormante periode	uur	Niet bekend	niet bekend	niet bekend	
Cementsoort		CEM III	CEM III	CEM III	
Cement sterkteklasse		42,5 N	42,5 N	42,5 N	
Hydratatie		LH	LH	LH	
Bestandheid tegen sulfaten		-	-	-	
Cementhoeveelheid	kg/m ³	niet bekend	niet bekend	niet bekend	
wbf factor		0,48	0,53	niet bekend	
Hulpstoffen		-	-	-	
plastificeerder		Cugla LR	Cugla LR	Cugla LR	
luchtbelvormer		-	-	-	
vertrager		-	-	-	
versneller		-	-	-	
overig		-	-	-	
Vulstoffen		PKV	PKV	PKV	
inerte vulstoffen (oa kalksteenmeel)		-	-	-	
met bindmiddelfunctie (oa silica fume)		-	-	-	

Uitvoeringswijze en omstandigheden		1	2	3	
Stortheogte	m	ca.4,10	ca.4,10	ca.4,45	
Stijgsnelheid	m/uur	4,0	3,5	8,0	
Max.valhoogte	m	3,00	7,90	7,90	
Stortduur	uur	1,00	1,50	0,50	
Stortonderbrekingen	aantal	1	1	0	
Triltijd t.o.v. storttijd (100% = continue trillen)	%	0	0	0	
Trilapparatuur		geen	geen	geen	
Stortwijze (kubel/pomp)		pomp	pomp	pomp	
Stortmethode (vrije val / stortpijp o.g./ via ventiel onderz.bekist., ed)		stortpijp	vrije val	vrije val	
Samenstelling bekisting					
plaatmateriaal		plex 18mm	plex 18mm	plex 18mm	
dragers		hout, badding	hout, badding	hout, badding	
gordingen		dubb.UNP160	dubb.UNP160	dubb.UNP160	
centering		B23	B23	B23	
Buiten-/Luchttemperatuur	°C	7,0	niet gemeten	niet gemeten	
Neerslag		geen	geen	geen	
Te storten onderdeel					
Wanddikte	m	0,28	0,28	0,28	
Constructiehoogte	m	7,90	7,90	7,90	
Vorm onderdeel		recht	recht	recht	
Wapeningsdichtheid	kg/m ³	niet bekend	niet bekend	niet bekend	
Metinggegevens					
Meethoogte vanuit onderzijde bekisting van meetpunt met hoogste gemeten druk	m	1,15	0,65 / 1,15	0,07 / 1,02	
Gemeten maximale speciedruk	kN/m ²	59,9	61,6 / (91,1)	85,3 / 73,3	
Hydrostatische druk op meethoogte	kN/m ²	67,8	80,6 / 68,9	100,7 / 78,9	
Max.optr.speciedruk tov hydrost.druk	%	88,3	76,4 / (132,2)	84,7 / 92,9	

