

REALTIME METEN VAN BEKISTINGSDRUKKEN IN DE PRAKTIJK

DE DRUK WORDT LANGZAAM OPGEVOERD

Bij Zuidwestboog Meteren zijn voor een pergolaconstructie 24 pijlers gestort van bijna 10 m hoog. Om te voorkomen dat de bekistingsdrukken te hoog zouden worden, zou elke stort volgens de theoretische benadering ongeveer acht uur duren. Door gebruik te maken van druksensoren is de stortduur verkort tot vier uur. Van elke stort zijn alle parameters gemeten en de bekistingsdrukken opnieuw doorgerekend. Dit artikel laat zien dat de bepalingmethode voor bekistingsdrukken in NEN 8670 een goede karakteristieke bovengrens oplevert, maar ook dat 'tijdstip einde binding' niet goed te bepalen is, terwijl het een zeer belangrijke factor is.



PROJECTGEGEVENS

Project: Zuidwestboog Meteren

Aannemer: Van Hattum en Blankevoort

Opdrachtgever: ProRail

Leveranciers: ABC Betonmortel, Vemaventuri (sensoren), Construx (bekisting)

Dagelijks reizen er meer dan een miljoen mensen met de trein en jaarlijks wordt er zo'n 40 miljoen ton aan goederen over het spoor vervoerd. Hiermee heeft Nederland het meest intensief bereden spoorwegennet van de Europese Unie. Om klaar te zijn voor het huidige en toekomstige gebruik startte ProRail in 2010 het Programma Hoogfrequent Spoorvervoer (PHS) [1].

Als onderdeel van dat plan wordt bij Meteren een spoorverbinding gemaakt die de Rotterdamse haven via 's-Hertogenbosch zal verbinden met de Brabanneroute. De Brabanneroute (fig. 2) is de spoorlijn tussen Moerdijk en Vento en verbindt de havens van Rotterdam, Vlissingen en Antwerpen met het Duitse Roergebied. Door deze nieuwe verbinding worden steden als Breda en Tilburg ontlast en wordt het gebruik van de Betuweroute gestimuleerd [2]. De Betuweroute (fig. 2) wordt in Zuidwest-richting verbonden met het spoor tussen 's-Hertogenbosch en Amsterdam. Er worden twee trogbruggen met aanbruggen gerealiseerd over de A15 en een pergola-constructie over het huidige spoor Utrecht - 's-Hertogenbosch (fig. 2). Het werk is in 2023 gegund aan



Storten van een pijler bij zonsopkomst (foto: Aaike de Tender)



Van Hattum en Blankevoort. In dit project worden meerdere pijlers gestort waarbij de stijgsnelheid afhankelijk is van de bekistingsdrukken. Dit artikel gaat daar dieper op in.

PERGOLA-CONSTRUCTIE

Voor de realisatie van de ongelijkvloerse kruising wordt een nieuw spoorviaduct gebouwd over de noord-zuidverbinding. Dit kunstwerk wordt uitgevoerd als een pergola-constructie: een systeem van onderbalk, pijlers, bovenbalk, liggers en een druklaag waarover het spoor ligt.

In totaal worden 24 pijlers gebouwd, elk met een hoogte tussen de 8 en veelal 9,70 m, een breedte van 1,1 m en een variërende dikte

tussen 0,6 en 2,0 m. Het maximale volume bedraagt ongeveer 13 m³ per pijler, ongeveer de inhoud van één truckmixer, waardoor het storten in korte tijd gereed kan zijn.

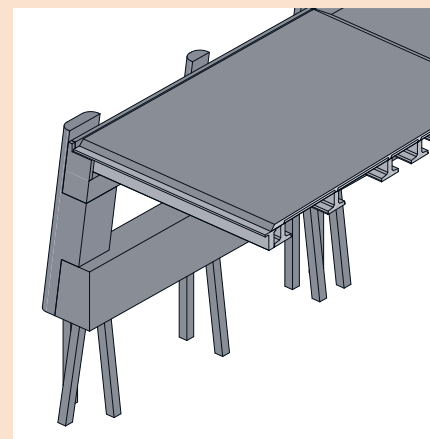
Voor beton met consistentieklassen tot en met F4 geldt een maximale gemiddelde stijgsnelheid van 7 m per uur (NEN 8670, B.2.4 e). Dit betekent dat een pijler in iets meer dan een uur volledig kan worden gestort. Tijdens de uitvoering vraagt dit echter aandacht voor de optredende bekistingsdrukken. Ten eerste voor de veiligheid¹ (zie kader) maar ook voor de kwaliteit van het eindresultaat.

¹ In het verleden zijn er ongelukken gebeurd, ook met dodelijke afloop, door het bezwijken van de bekisting

VEILIGHEID

Hogere bekistingsdrukken hebben niet alleen impact op de bekisting zelf, maar beïnvloeden ook de volledige (hulp)constructie. De stabiliteit, schoorstaven en verankeringen die in een eerdere stort zijn opgenomen. Elk onderdeel wordt zwaarder belast. In het verleden hebben dergelijke situaties meerdere ernstige ongevallen veroorzaakt, soms met dodelijke afloop. Het instorten van de bekisting tijdens de bouw van een pijler bij knooppunt Ridderkerk in 1995 is daarvan een tragisch voorbeeld: vijf medewerkers stortten vijftien meter naar beneden, één van hen overleed.

Zoals in dit artikel wordt toegelicht, worden bekistingsdrukken beïnvloed door diverse factoren die in de praktijk niet altijd nauwkeurig te voorspellen zijn. Denk aan een ongevraagd hogere consistentie van de betonspecie, lagere omgevingstemperaturen of de vertragende werking van hulpstoffen. Dit maakt het noodzakelijk om de bekistingsdrukken goed te beschouwen, vooral bij hoge wanden en pijlers.



3 Ontwerptekening pijler pergola-constructie (bron: Van Hattum en Blankevoort)



2 Kaart huidige goedertransport [2]



4 Realisatie pijlers (foto: Marc Oosterling)

BEKISTINGSDRUKKEN IN DE NORM

Betonspecie is plastisch en gedraagt zich als een soort vloeistof. Als de betonspecie is gestort in de bekisting, oefent de specie een zekere mate van horizontale druk naar buiten uit. De grootte van deze druk wordt bepaald door diverse factoren zoals consistentieklasse, temperatuur en stijgsnelheid (tabel 1). Zeer vloeibare mengsels kunnen zich zodanig als een vloeistof gedragen dat er een volledige hydrostatische betonspeciedruk optreedt. In dat geval is de druk in alle richtingen gelijk. In het geval van de pijlers voor de pergola zou de bekistingsdruk theoretisch kunnen oplopen tot:

$$\gamma_c \times h = 25 \times 10 = 250 \text{ kN/m}^2.$$

De meeste bekistingen zijn echter ontworpen voor drukken tussen de 50 en 90 kN/m² [4]. Het is dus duidelijk dat er iets aan de stijgsnelheid, mengsel of bekisting gedaan moet worden. Voor de bekisting is in dit geval gekozen voor een stalen kist vanwege de ronde vormen en het repetitief inzetten van de bekisting voor alle 24 pijlers. De bekisting is ontworpen op een maximale karakteristieke bekistingsdruk van 75 kN/m². Met de invoering van de Europese normen in 2009 is NEN 6722 *Voorschriften beton - uitvoe-*

ring (VBU) vervangen door NEN-EN 13670 *Het vervaardigen van betonconstructies*. Deze Europese uitvoeringsnorm bevatte echter geen bepalingmethoden voor bekistingsdrukken. In de praktijk werd daarom nog teruggegrepen op de voormalige VBU of op de Duitse norm DIN 18218.

In 2021 verscheen NEN 8670 met aanvullende nationale voorschriften op de NEN-EN 13670. In de normatieve Bijlage B is de Duitse bepalingmethode voor bekistingsdrukken overge-

nomen. Figuur 6 geeft de verdeling van de betonspeciedruk over de hoogte aan ².

In de beschreven methode wordt rekening gehouden met:

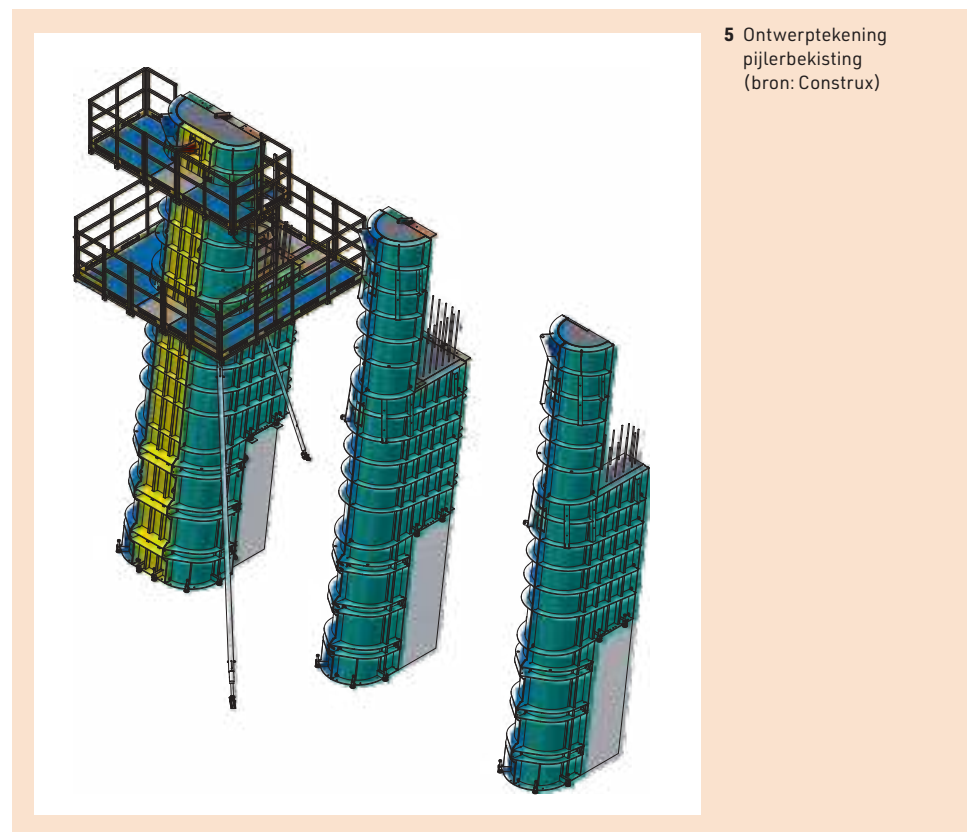
- Consistentieklasse
- Bindingsgedrag
- Specietemperatuur
- Omgevingstemperatuur
- Dichtheid betonspecie

Tabel 1. Invloedsfactoren op de betonspeciedruk [4]

INVLOEDSACTOR	HOGER	EFFECT OP DE BETONSPECIEDRUK
Volumieke gewicht	↑	↑
Consistentieklasse	↑	↑
Vertragende hulpstoffen	-	↑
Betonspecietemperatuur	↑	↓
Dormante periode	↑	↑
Bindtijd of opstijgingstijd	↑	↑
Storchoogte	↑	↑
Stijgsnelheid	↑	↑
Buitentemperatuur	↑	↓
Trilduur en trildiepte	↑	↑
Grootte van de stort	↑	↓
Koelen van de betonspecie	-	↑
Verwarmen van de bekisting*	-	↓
Grootte en vorm van de bekisting	-	↓ ↑
Wapening **	↑	↓

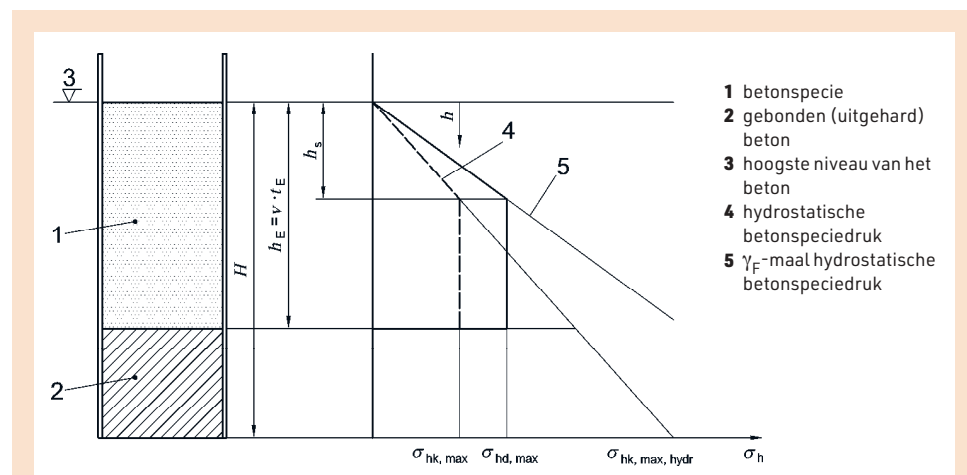
* Hier mag niet van worden uitgegaan (NEN 8670 B.3.3.4)

** Bij veel wapening kan de zijwaartse betonspeciedruk aanzienlijk lager zijn (NEN 8670 B.3.6)



5 Ontwerptekening pijlerbekisting (bron: Construx)

² De figuur komt uit de Duitse norm omdat er in het figuur in de NEN 8670 een fout is geslopen waarbij de aanduidingen (1) en (2) zijn verwisseld



6 Verdeling van de betonspeciedruk over de hoogte van de bekisting (bron: DIN 18218)

DE VOORBEREIDING

Maken uitvoeringsplan en bepalen stijgsnelheden

Samen met de uitvoering en werkvoorbereiding zijn ruim voor de realisatie uitvoeringsplannen opgesteld. De uitvoering van de pijlers is in de zomer van 2025 gestart en beslaat een periode van ongeveer een jaar. Voor het bepalen van de stijgsnelheid is gekeken naar de invloed van de consistentie en temperaturen op de bekistingsdrukken. Het uitgangspunt was één stijgsnelheid voor alle pijlers.

De randvoorwaarde van de stijgsnelheid is de horizontale ontwerpbelasting van 75 kN/m² van de bekisting. De gemiddelde omgevingstemperaturen en bijbehorende amplitudes voor de seizoenen zijn overgenomen van eis 0732 uit ROK 2.0. Dit was geen eis, maar is gehanteerd als realistisch handvat. De pijler moet gestort kunnen worden met consistentieklasse S3 of F4. Echter is voor de gevoelig-

heid ook één consistentieklasse hoger (F5) beschouwd omdat er in de praktijk regelmatig een hogere consistentie wordt geleverd dan vooraf afgesproken, al dan niet op verzoek van de uitvoering. Voor tijdstip einde binding is $t_E=7$ uur gekozen, overeenkomend met het advies van NEN 8670 voor beton met een gemiddelde en trage sterkteontwikkeling (zie kader). In figuur 7 zijn de berekende bekistingsdrukken weergegeven volgens de bepalingsmethode uit NEN 8670.

De pijlers kunnen qua hoeveelheid beton in zeer korte tijd gestort worden. Volgens BRL 1801:2025 moet de betonspecie na aankomst op de bouwplaats gedurende minimaal dertig minuten dezelfde consistentie behouden. Onder normale omstandigheden bedraagt de totale verwerkingstijd ongeveer twee uur, waarbij wel een zekere terugloop in consistentie zal optreden. Op basis hiervan zijn twee uitvoeringsstrategieën mogelijk.

A. Uitgaan van een stijgsnelheid van minimaal 5 m per uur wat resulteert in een totale storttijd van 1,5 tot 2 uur. In dit scenario overschrijden de bekistingsdrukken in alle omstandigheden de ontwerpwaarde van 75 kN/m², wat leidt tot aanpassingen aan de bekisting.

B. Uitgaan van een stijgsnelheid van 1 tot 1,5 m per uur om de speciedrukken onder de 75 kN/m² te houden. Voor consistentieklassen S3 en F4 resulteert dit in:

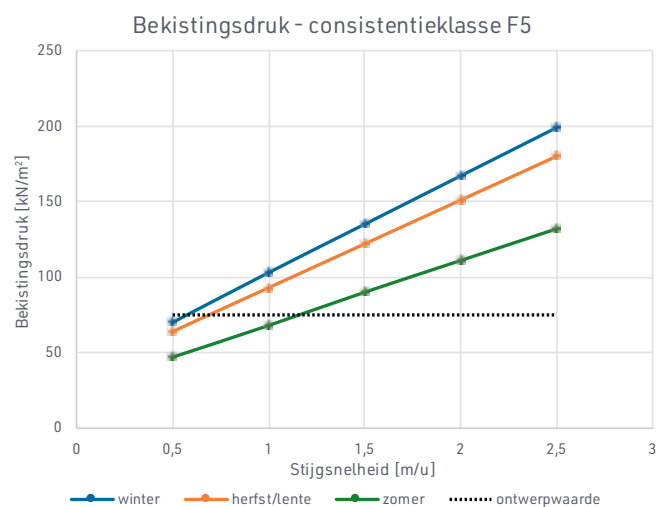
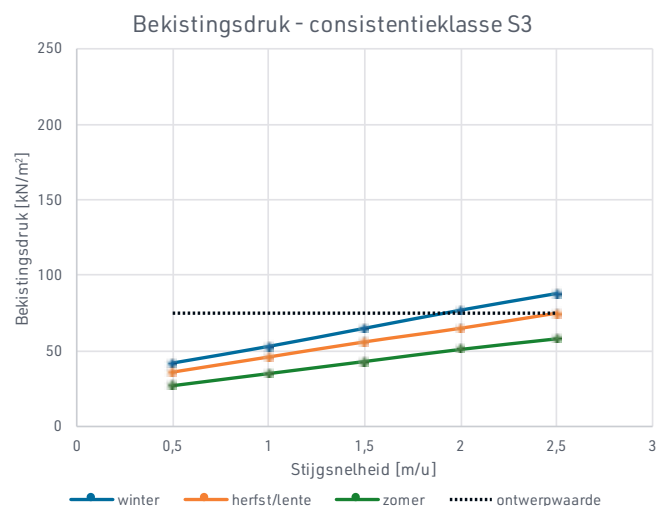
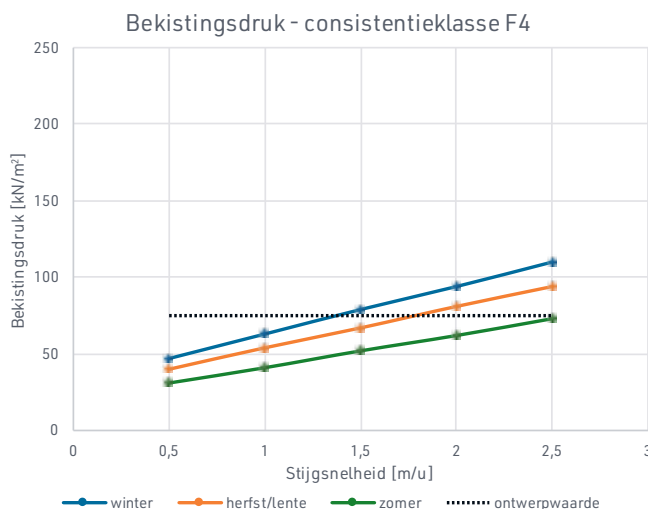
- Een lange stortduur van ongeveer 6 tot 10 uur
- Een langere benodigde verwerkbaarheid van de betonspecie met bijbehorende hogere kistdrukken, of kleinere betonvrachten per stortfase
- Consistentieklasse F5 leidt duidelijk tot te hoge bekistingsdrukken

7 Bekistingsdrukken voor drie consistentieklassen, bij verschillende seizoenen en verschillende snelheden

Onderstaande temperaturen zijn conform ROK 2.0. Per seizoen is de gemiddelde aangehouden als omgevingstemperatuur. Als specietemperatuur is de gemiddelde temperatuur + amplitude aangehouden, in de zomer dus 26 °C. De volumieke massa is 25 kN/m³.

SEIZOEN	TEMPERATUUR
Winter	gemiddeld 5 °C, amplitude 4 °C
Herfst / Lente	gemiddeld 12 °C, amplitude 6 °C
Zomer	gemiddeld 21 °C, amplitude 5 °C

Voor $t_E = 7$ uur aangehouden conform advies NEN 8670 voor beton met een gemiddelde en trage sterkteontwikkeling.



Uiteindelijk is gekozen voor optie B waarbij de bekistingsdrukken worden gemonitord zodat de stijgsnelheid geoptimaliseerd kan worden. Er worden lagen van telkens 1,5 m gestort waarna vijftien minuten wordt gewacht en als de drukken het toelaten wordt de stort vervolgd. Daarnaast zijn de stortfaseringen zo ingericht dat gelijktijdig andere objecten kunnen worden meegestort, om ondervrachten en langere verwerkingstijden te voorkomen.

SENSOREN

Voor het realtime monitoren van de bekistingsdrukken is gekozen voor het *PREMO Concrete Pressure Monitoring-systeem* van Vemaventuri. Afhankelijk van de hoogte van de pijler worden er drie of vier druksensoren verdeeld over de hoogte van de bekisting (foto 9). Door kleine ronde openingen in de bekisting te maken, komen de sensoren direct in contact met de betonspecie.

Tabel 2. Karakteristieke zijwaartse betonspeciedruk en factor K_1 (tabel B.1 en B.2 van NEN 8670)

CONSISTENTIEKLASSE	MAXIMALE ZIJWAARTSE BETONSPECIEDRUK $\sigma_{hk,max}$ [kN/m ²]	FACTOREN K_1 EINDE BINDING $t_E = 5h$	EINDE BINDING $t_E = 10h$	EINDE BINDING $t_E = 20h$
F1	$(5v + 21) K_1 \geq 25$	1,0	1,15	1,45
F2	$(10v + 19) K_1 \geq 25$	1,0	1,25	1,80
F3	$(14v + 18) K_1 \geq 25$	1,0	1,40	2,15
F4	$(17v + 17) K_1 \geq 25$	1,0	1,70	3,10
F5	$25 + 30vK_1 \geq 30$			
F6	$25 + 38vK_1 \geq 30$	1,0	2,00	4,00
ZVB	$25 + 33vK_1 \geq 30$			



BINDINGSTIJD

Voor het bepalen van de bekistingsdrukken is het 'tijdstip einde binding' (t_E) van groot belang. In tabel 2 zijn de tabellen B.1 en B.2 van NEN 8670 samengevoegd. Voor verschillende consistentieklassen is een factor K_1 gegeven voor tijdstip einde binding 5, 10 en 20 uur. Tussentijdse waardes kunnen worden geïnterpoleerd. Het tijdstip einde binding heeft direct invloed op de zijwaartse druk. Het effect hiervan is aanzienlijk: voor een F4 mengsel neemt de bekistingsdruk bij gelijke stijgsnelheid met 70% toe wanneer t_E verschuift van 5 naar 10 uur.

Het tijdstip van begin en einde binding geeft inzicht in het opstijfgedrag van betonspecie. De beproevingsmethode hiervoor is vastgelegd in NEN-EN 196-3. Het begin van de binding is het moment waarop een genormeerde cementpasta (een verhouding cement en water met gestandaardiseerde consistentie) voldoende is opgestijfd zodat de Vicat-naald (fig. 8) een bepaalde indringingsdiepte niet meer overschrijdt. Dit geeft aan hoe lang de specie verwerkbaar is. Bij het einde van de

binding dringt de Vicat-naald niet meer in de pasta [5].

Bij Heidelberg Materials, de cementleverancier van ABC Betonmortel, is navraag gedaan over het tijdstip einde binding van hun cementen. Het tijdstip einde binding van het snelste en langzaamste cement, respectievelijk de CEM 1 52,5 N en CEM III/C 32,5 N, ligt tussen de 133 en 311 minuten (is 5 uur en 11 minuten). Voor al deze cementen geldt dan bij alle consistentieklassen praktisch $K_1=1,0$. NEN 8670 meldt dat het einde van het binden bepaald moet worden op basis van de betonsamenstelling met de juiste water-cementfactor, type cement, vulstoffen en hulpstoffen. Belangrijk om te weten is dat hulpstoffen als vertragers en superplasticizers het bindproces aanzienlijk kunnen vertragen (zie hoofdstuk hulpstoffen). De invulling die aan het begrip 'tijdstip einde binding' wordt gegeven tussen NEN-EN 196-3 en NEN 8670 sluiten dus niet op elkaar aan. NEN-EN 196-3 beproeft een cementpasta zonder hulp- en vulstoffen en met een water-cementfactor

die hoort bij een voorgeschreven consistentie. Daarbij is de methode van de Vicat-naald in de basis al niet geschikt voor mengsels met toeslagmaterialen. NEN 8670 bedoelt 'tijdstip einde binding' van het gehele betonmengsel.

NEN 8670 geeft wel enkele suggesties voor 'tijdstip einde binding'. Voor beton met een gemiddelde sterkteontwikkeling geldt bijvoorbeeld $t_E=7$ uur bij temperaturen boven 15 °C. De classificatie van de sterkteontwikkeling is conform tabel 16 van NEN-EN 206 waarin de verhouding tussen de gemiddelde druksterkte na 2 dagen ($f_{cm,2}$) en na 28 dagen ($f_{cm,28}$) bepalend is. NEN 8670 gaat hier verder onvoldoende op in.

Een methode die wél invulling geeft aan tijdstip einde binding op het daadwerkelijke betonmengsel is de 'kneedzak'-methode zoals beschreven in Bijlage C van NEN 8670. Op basis van de mate van indeuken kan er iets over tijdstip einde binding gezegd worden³.

³ Hierin is een vertaalfout gesloten: bij de consistentie 'gebonden' in tabel C.1 moet de indeuking 'maximaal' 1,0 mm zijn in plaats van 'ten minste' 1,0 mm.



9 Bevestiging sensoren op de bekisting (foto: Aaike de Tender)



10 Op een handheld zijn realtime de drukken af te lezen (foto: Marc Oosterling)

De sensoren zijn geplaatst op hoogtes van 0,5, 2,5, 4,5 en 6,7 m. Deze niveaus zijn gekozen om een representatief beeld te krijgen van de speciedruk over de hoogte.

Alle sensoren zijn gekoppeld aan een centrale unit die de meetgegevens draadloos doorstuurt naar een web interface. Via een handheld console kunnen de actuele drukken live worden uitgelezen (foto. 10). Dit maakt het mogelijk om de stijgsnelheid nauwkeurig af te stemmen op de werkelijke omstandigheden.

HULPSTOFFEN

Hulpstoffen kunnen een aanzienlijke invloed hebben op de betonspeciedruk.

Hulpstoffen worden aan betonspecie toegevoegd om de eigenschappen van de specie of het verhard beton te wijzigen. Vertragers

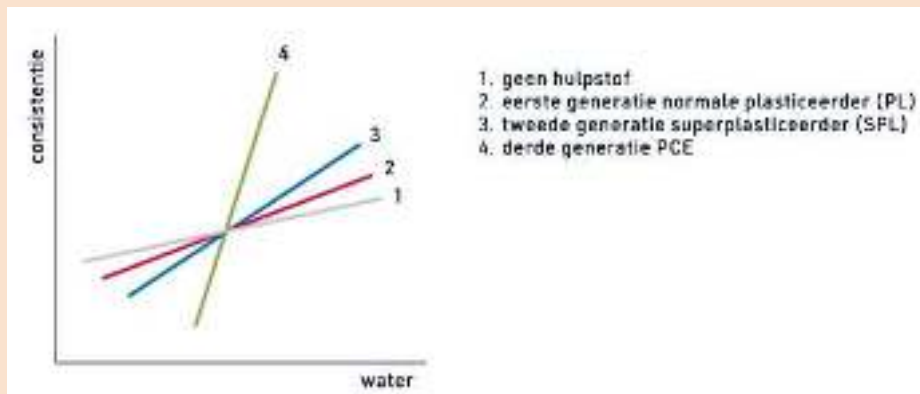
Voor het bepalen van de bekistingsdrukken is het 'tijdstip einde binding' van groot belang, maar blijkt in de praktijk niet goed te bepalen

beïnvloeden de hydratatiereactie door een dunne laag op de cementdeeltjes te vormen waardoor de toegang van water vertraagt. Hierdoor wordt de tijd uitgesteld dat het mengsel begint op te stijven [6]. Logischerwijs zal dan bij zekere hoogtes de bekistingsdruk toenemen. Aandachtspunt hierin is dat de betoncentrale niet hoeft te melden dat er een vertrager is gebruikt. Conform BRL 1801, art. 5.3.4, moet de betonspecie de overeengekomen consistentie nog 30 minuten behouden. Bij hogere temperaturen wordt dan ook vaak een vertrager toegevoegd waarbij dit

eerder zal gebeuren bij hogere beton-sterkteklassen. Vertragers zijn heel gevoelig voor eigenschappen van grondstoffen, speciën omgevingstemperaturen, cementsoorten en type en gehalte vulstoffen [7], hierdoor kan bij onvoldoende geschiktheidsonderzoek op het mengsel de werking anders uitvallen.

Plasticeerders hebben op twee manieren invloed op de speciedrukken: het mengsel wordt plastischer en deze hulpstoffen hebben in min- of meerdere mate ook een vertragend effect.

Tegenwoordig worden veelvuldig PCE's gebruikt, oftewel de derde generatie plasticeerders. Dit



11 Illustratieve impact van plasticizers op het vloeigedrag [8]

zijn zeer krachtige hulpstoffen. In figuur 11 is te zien wat de effectiviteit van een plasticizer in combinatie met het watergehalte is op de consistentie, vooral bij wisselend nat en droog weer fluctueert het vochtgehalte van het toeslagmateriaal. Ervaringen in het veld leren dat in zijn algemeenheid een deel van het geleverde beton niet voldoet aan de gevraagde consistentieklasse, zoals die op de afleverbon is vermeld. Vaak wordt er omwille van de tijd toch maar gestort, vooral als de consistentie wat hoger is, omdat dit door uitvoerend personeel vaak als prettig wordt ervaren. Dit heeft dus direct invloed op de bekistingsdrukken.

PRAKTIJK VS THEORIE

In de figuren 12 t/m 14 zijn voor drie pijlers de gemeten bekistingsdrukken weergegeven. De grafieken geven interessante inzichten in het stortproces. Allereerst blijven de bekistingsdrukken onder de ontwerpgrens van 75 kN/m^2 ondanks hogere stijgsnelheden. Dankzij de inzet van de sensoren is de stortduur teruggebracht naar ongeveer vier uur per pijler, een aanzienlijke versnelling.

De meetgegevens laten daarnaast duidelijk zien wanneer er gestort is en ongeveer tot welke hoogtes. Tijdens het storten en verdichten gedraagt de specie zich meer als een vloeistof en ontstaan er telkens drukpieken, deze pieken nemen vervolgens weer af zodra het beton met rust wordt gelaten. Wanneer er verder wordt gestort, is duidelijk een stabilisatie te zien van de zijwaartse drukken, wat betekent dat de voortgaande stort geen invloed meer heeft op de onderliggende drukken. Gedurende de werkzaamheden zijn alle relevante parameters vastgelegd om de gemeten bekistingsdrukken te kunnen vergelijken met de theoretische waarden. Hoewel de dataset beperkt is en er uiteraard onnauwkeurigheden in de meetgegevens zitten, zijn er wel duidelijke trends zichtbaar. In alle gevallen bleven de gemeten drukken onder de berekende rekenwaarde. In de drie weergegeven metingen betrof het beton met consistentie F4. In week 40 waren de omgevingstemperaturen hoger en de stijgsnelheid lager dan in week 47 en 48, wat zich vertaalde in lagere bekistingsdrukken. Tussen week 47 en 48 was het temperatuurverschil gering, maar voldoende om een lichte daling in de bekistingsdruk in week 48 te veroorzaken, precies wat de theorie aangeeft.

15 Pijlerbekisting (foto: Aaike de Tender)



Ten aanzien van het betonmengsel moet de volgende kanttekening worden gemaakt. De pijlers zijn uitgevoerd als zichtwerk, waarvoor uit architectonische overweging een eis gold van minimaal 180 l fijne fractie. Dit heeft geleid tot de toevoeging van veel kalksteenmeel. Als toeslagmateriaal is gekozen voor hard kalksteen om het risico op ijzerhoudende of zwellende bestanddelen te minimaliseren. Deze combinatie leidde tot een mengsel met een snelle terugloop in consistentie. Dit kan bijgedragen hebben aan de lagere gemeten bekistingsdrukken.

KARAKTERISTIEKE BEKISTINGSDRUKKEN

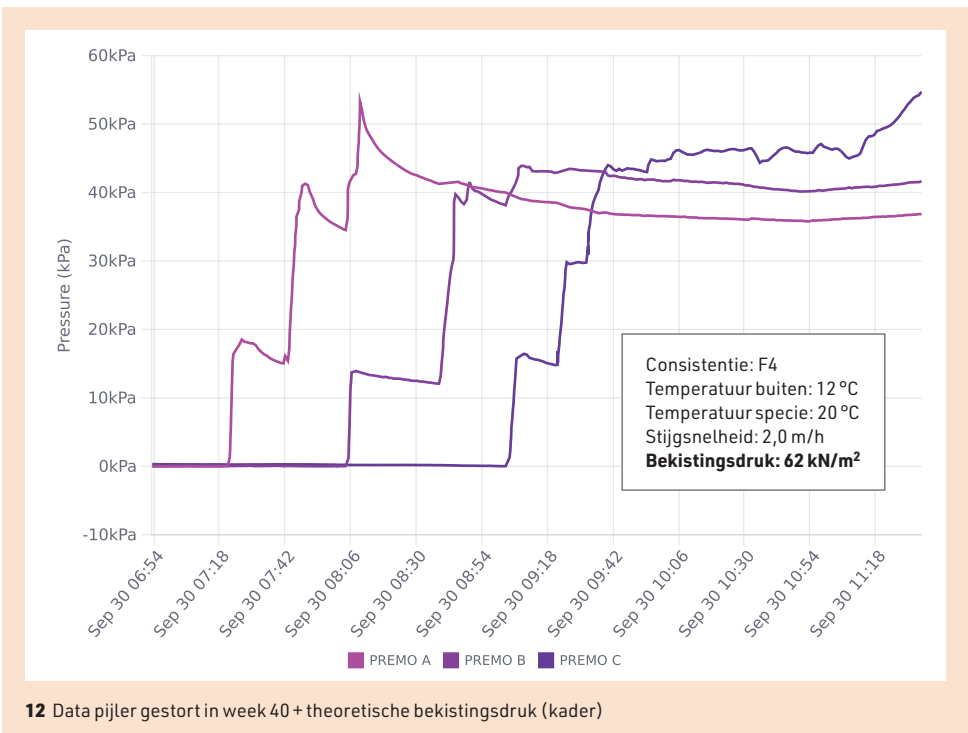
Er zijn verschillende parameters die invloed hebben op de bekistingsdrukken. De berekende waardes zijn soms tot wel 40% hoger dan wat er praktisch gemeten is. De bepalingmethode in NEN 8670 geeft een karakteristieke belasting weer, wat een representatieve bovengrens betekent. Om een idee te krijgen van de werkelijke karakteristieke bekistingsdrukken zijn zes meetresultaten met elkaar vergeleken. Bij elk meetresultaat is de theoretische druk bepaald op basis van de werkelijk gemeten parameters. Verhoudingsgewijs zijn de gemeten drukken verrekend met de waarde uit week 47 omdat in die week de hoogste bekistingsdruk is gemeten, hierbij wordt voor het gemak een lineaire verhouding verondersteld. Voor week 39 geldt dan een fictieve verrekende gemeten druk van

$$\sigma_{hk, \text{fic}} = \sigma_{hk, \text{week 47}} / \sigma_{hk, \text{week i}} \times \sigma_{optr, \text{week i}} = 93 / 66 \times 49 = 69 \text{ kN/m}^2$$

Op basis van deze zes fictief verrekende drukken komt de statistische 5% bovenbelasting uit op 85 kN/m² wat aardig overeenkomt met de theoretische karakteristieke zijwaartse druk van 93 kN/m².

Tabel 3. Bepaling fictieve druk

WEEK	GEMETEN DRUK σ_{optr} [kN/m ²]	THEORETISCHE DRUK σ_{hk} [kN/m ²]	FICTIEVE DRUK $\sigma_{hk, \text{fic}}$ [kN/m ²]
39	49	66	69
40	53	62	80
46-1	60	69	81
46-2	44	57	72
47	68	93	68
48	63	87	67
Gemiddeld			73 l
Standaarddeviatie			5,97
t-waarde			2,01
Karakteristieke bovengrens			85



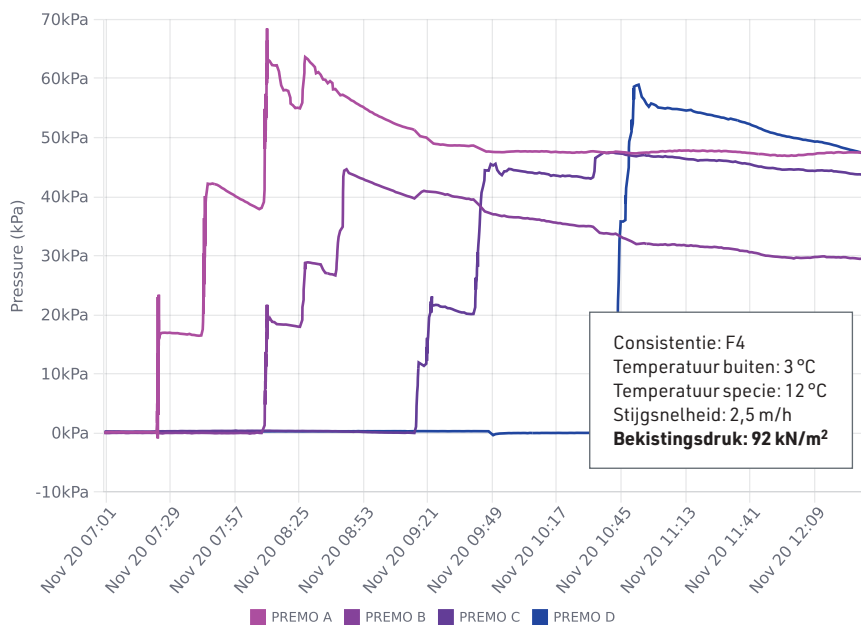
12 Data pijler gestort in week 40 + theoretische bekistingsdruk (kader)

Door gebruik te maken van druksensoren is de stortduur verkort van ongeveer acht uur volgens de theoretische benadering tot vier uur in de praktijk.

Uit tabel 3 volgt ook de meerwaarde van het meten van de actuele bekistingsdrukken. In week 47 en 48 waren de omstandigheden zodanig dat de theoretische bekistingsdrukken de ontwerpsterkte van de bekisting (75 kN/m²) overschreden. In week 40 en 46-1 waren de omstandigheden zodanig dat de theoretische druk aan de ontwerpsterkte voldeed, maar bij ongunstigere omstandigheden waren de theoretische drukken ook te hoog geweest. In vier van de zes gevallen werd in theorie de ontwerpsterkte van de bekisting (bijna) overschreden.

CONCLUSIE

Bij Zuidwestboog Meteren worden voor de pergola-constructie 24 pijlers gestort waarbij vanuit de uitvoering de wens was om één uniform stortplan te hanteren. Op basis van de theoretische benadering volgens NEN 8670 zou de stortduur per pijler tot 10 uur kunnen duren. Door gebruik te maken van realtime bekistingsdrukmetingen met druksensoren kon het proces aanzienlijk worden geoptimaliseerd. De stijgsnelheid kon omhoog waardoor de pijlers op een verantwoorde wijze in 4 uur gestort zijn, ondanks dat de theoretische drukken in enkele gevallen de ontwerpsterkte van de bekisting overschreden. Uiteindelijk heeft dit dus een substantiële tijdswinst opgeleverd. De realtime bekistingsdrukmetingen zijn hierin een essentieel waarschuwingsmechanisme voor de veiligheid, mochten er invloedparameters, zoals beschreven in dit artikel, toch afwijken van het vooraf bedachte plan. Deze resultaten zijn allesbehalve een indicatie dat de theoretische benadering té conservatief is. Op basis van de verkregen data is een simplistische statistische beschouwing uitgevoerd. Er zijn namelijk meerdere parameters van invloed op de bekistingsdrukken waardoor een



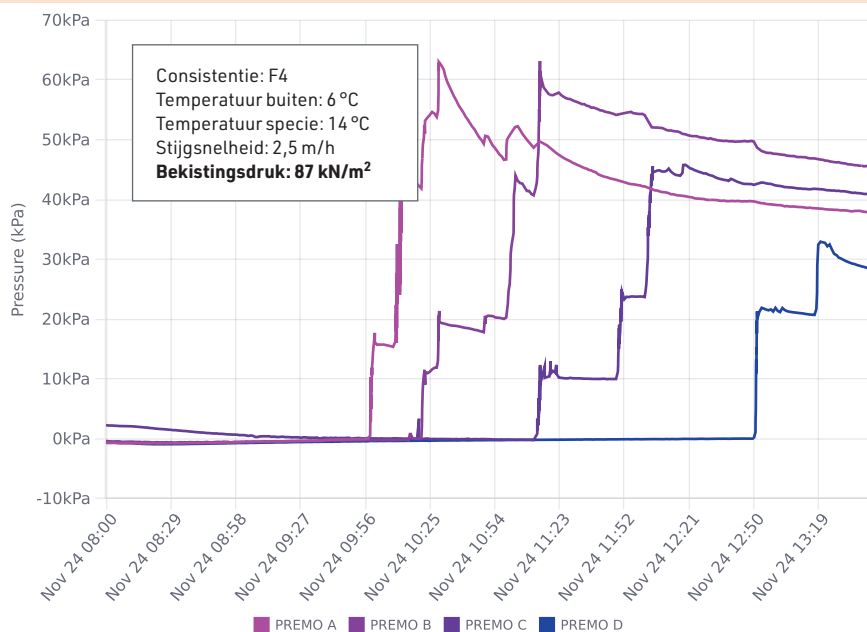
13 Data pijler gestort in week 47 + theoretische bekistingsdruk (kader)



zekere spreading op kan treden in de werkelijke drukken. Hoewel de berekende drukken tot circa 40% hoger uitvielen dan de gemeten waarden, laat een simplistische statistische analyse van zes pijlers zien dat de 5% gemeten bovengrens belasting (85 kN/m^2) goed aansluit bij de theoretische karakteristieke bekistingsdruk (93 kN/m^2). Dit bevestigt dat in dit geval de bepalingsmethode een realistische en veilige bekistingsdruk geeft. Wel verdient het tijdstip van einde binding bijzondere aandacht. De beschrijving in NEN 8670 sluit niet aan op de bepalingsmethode uit NEN-EN 196-3, waarbij de invloed van het betonmengsel en met name de invloed van hulpstoffen niet worden meegenomen. Dit is een belangrijk aandachtspunt bij hoge pijler- of wandstorten waarin zeer vloeibare mengsels worden toegepast, vooral omdat dit in het verleden al heeft geleid tot ernstige ongevallen, wat de noodzaak van het meten van de bekistingsdrukken onderstreept. Vanuit de uitvoering zijn de ervaringen zeer positief. De stijgsnelheid kon worden geoptimaliseerd, de meetgegevens gaven direct inzicht in het werkelijke gedrag van de specie en het gebruik van de sensoren bleek eenvoudig en betrouwbaar. Het optimaliseren was alleen mogelijk door de mate van repetitie. Bij eenmalig gebruik kan alleen worden gecontroleerd of de maximale druk niet overschreden wordt. Al met al zal deze meetmethode bij toekomstige projecten zeker vaker ingezet worden.

Literatuur

1. www.prorail.nl/programmas/programma-hoogfrequent-spoorvervoer
2. www.brabant.nl/onderwerpen/verkeer-vervoer/goederenvervoer/goederenvervoer-spoor/
3. www.prorail.nl/projecten/zuidwestboog-meteren
4. www.richtlijnbevestigingenondersteuning.nl/4-berekenen/4-3-rekenwijze-van-bekistingen-en-ondersteuning
5. www.betonlexicon.nl/B/Binding
6. Dictaat cursus Basiskennis beton
7. Betonpocket 2020, art. 8.4.3
8. Het ABC van een PCE, *Betoniek Standaard* 16/10, 2014



14 Data pijler gestort in week 48 + theoretische bekistingsdruk (kader)