

Spoorbrug Van Starckenborghkanaal - Poer Boogfundament Betontechnologisch Advies

Inhoudsopgave

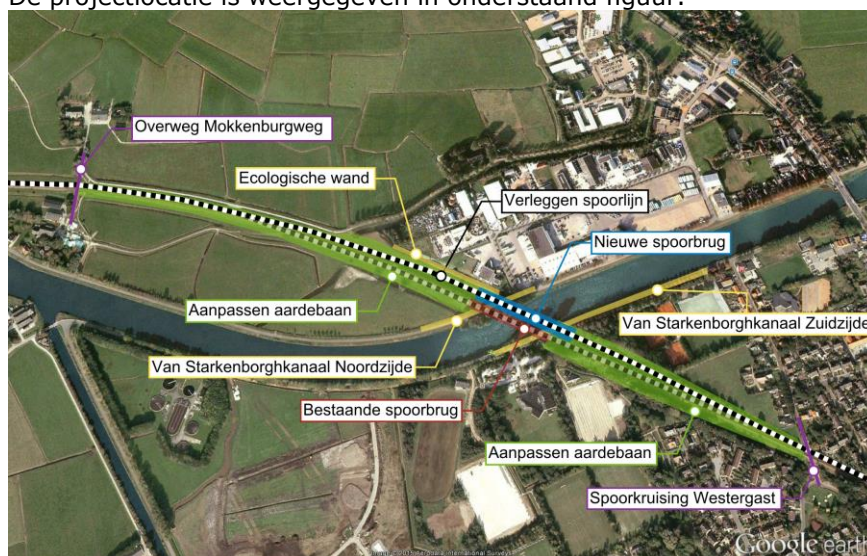
1	Inleiding	3
1.1	Projectomschrijving	3
1.2	Betrokken partijen	4
1.3	Doel	4
1.4	Leeswijzer	4
2	Uitgangspunten en gegevens	5
2.1	Documentatie	5
2.1.1	Projectdocumenten	5
2.1.2	Normen	5
2.1.3	Overige	5
2.2	Geometrie	6
2.3	Materiaalgegevens	9
2.4	Betonmengselsamenstelling	9
2.5	Bouw- en stortfasering	10
2.6	Thermische belastingen en randvoorwaarden	10
2.7	Bekisting en isolatie	10
2.8	Scheurvorming & scheurbeheersing	10
3	Beschouwing varianten/ maatregelen	11
3.1	Boogfundament zonder OWB	11
3.2	Stortfasering	11
3.3	Betonmengselsamenstelling	12
3.3.1	Cementkeuze	12
3.3.2	Temperatuur betonspecie	14
3.3.3	Geopolymeerbeton	14
3.4	Kistisolatie	14
3.5	Afweging	14
4	Conclusie en Advies	15
Bijlage 1	Betonmengsel samenstellingen	16
Bijlage 2	Richtwaarden gemiddelde normsterkte N veel gebruikte cementen	19
Bijlage 3	Indicatie hydratiewarmte ENCI-cementen	21
Bijlage 4	Krachtwerking boogfundament	22

1 Inleiding

1.1 Projectomschrijving

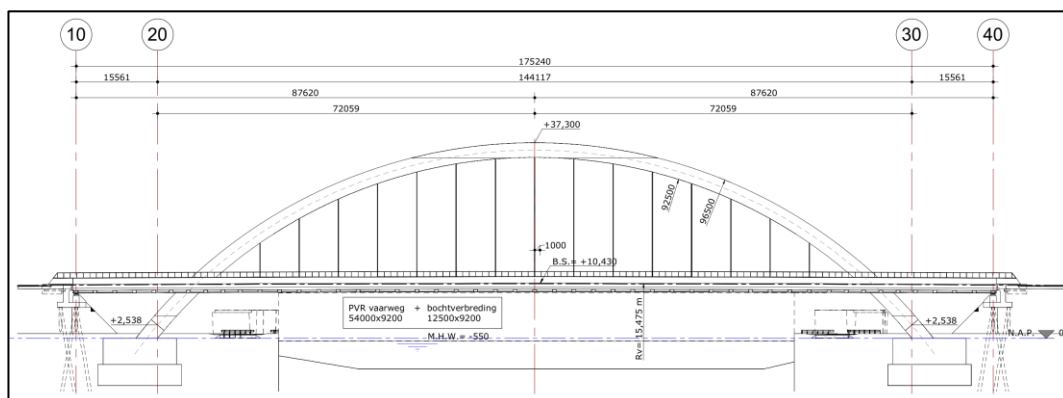
In 2017 was ABT betrokken bij het constructief ontwerp van een spoorbrug over het Van Starckenborgh kanaal bij Zuidhorn. In het kader van het project "Opwaardering vaarweg Lemmer – Delfzijl" is het kanaal geschikt gemaakt voor klasse V-a schepen, vierlaags containervaart en beperkte tweebaks duwvaart.

De projectlocatie is weergegeven in onderstaand figuur.



Figuur 1: Projectlocatie ZSS¹

De bestaande spoorbrug Zuidhorn is vervangen door aanzienlijk langere spoorbrug met een grotere doorvaarthoogte. De nieuw spoorbrug is een stalen boogbrug met een boogfundament aan beide zijden van het kanaal. Het boogfundament bestaat uit 4 meter dik onderwaterbeton (plaatfundering) waarna hierop een poer van 5 meter dik is gestort. Vervolgens is de aansluiting met de boogvoet door middel van flinke ankers gerealiseerd.



Figuur 2: Aanzicht spoorbrug Zuidhorn

¹ ZSS = Zuidhorn Spoorbrug over het Van Starckenborghkanaal

1.2

Betrokken partijen

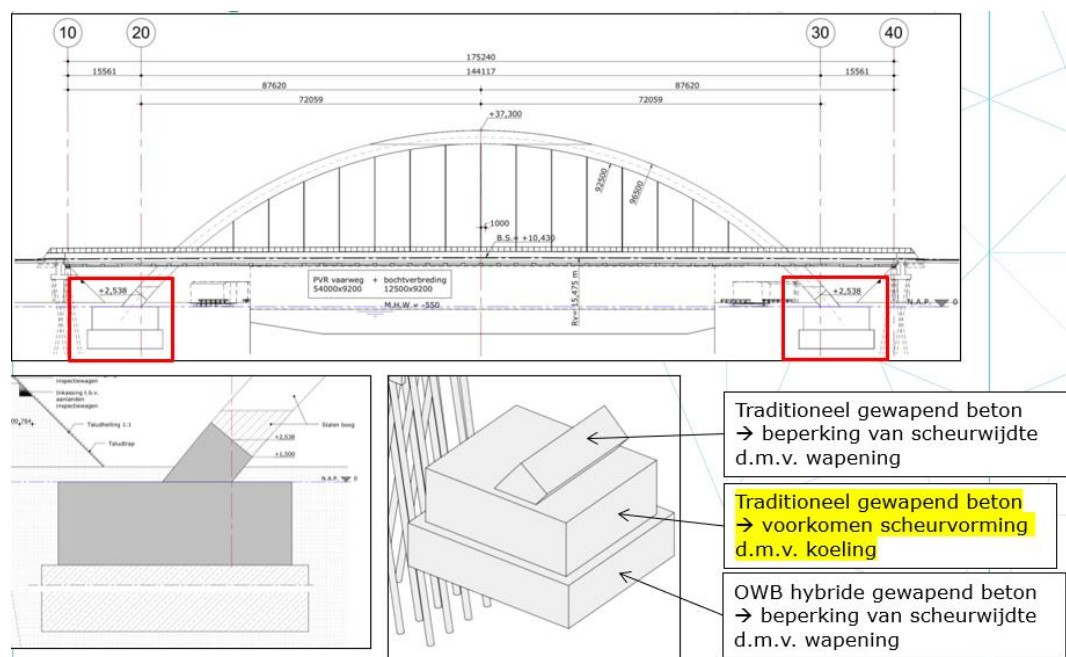
De volgende (hoofd)partijen waren betrokken bij het project:

Prorail	Opdrachtgever project
Max Bögl	Aannemer & opdrachtgever ABT
ABT	Hoofdconstructeur Constructief advies beton Geotechnisch advies Koelingsberekeningen
SSF Ingenieure	Constructief advies staal
Leverancier betonmortel	Heidelbergcement

1.3

Doel

Om de scheurwijdte van de poer van het boogfundament te beheersen is tijdens de verhardingsfase is in het huidig ontwerp gekozen om koeling toe te passen. Uit kostenoverweging vraagt de aannemer om advies zodat koeling van het beton achterwege kan blijven. Daarbij mag de impact op de planning slechts minimaal zijn. Door een haalbaarheidsonderzoek is georiënteerd op een kostenefficiënte en technisch goed alternatief voor de koeling.



Figuur 3: Overzicht constructieonderdelen van het boogfundament

1.4

Leeswijzer

in hoofdstuk 2 staan de relevante uitgangspunten en gegevens als basis voor het poerontwerp.

Hoofdstuk 3 is een verkenning van diverse varianten en maatregelen om koeling te voorkomen en geeft daarnaast een afweging tussen de varianten. Dit leidt tot een advies in hoofdstuk 4.

2 Uitgangspunten en gegevens

Hieronder zijn de meest relevante projectgegevens en uitgangspunten weergegeven.

2.1 Documentatie

2.1.1 Projectdocumenten

Hieronder zijn beknopt de projectdocumenten weergegeven.

Ref	Doc. nr.	Titel	Versie	Datum
[1]	ZSS-1.1.2-DO-UPR-2000_vC-3	ZSS – Uitgangspuntenpunten rapport constructie	vC-3	24-3-2016
[2]	ZSS-1.1.2-UO-BER-2000_vB-3	ZSS – Constructieberekeningen boogfundamenten	vB-3	13-1-2017
[3]	ZSS-1.1.2-UO-BER-2500_VC-3	ZSS – Koelingsberekening boogfundament	VC-3	2-6-2017

2.1.2 Normen

Ref	Doc. nr.	Titel	Versie	Datum
[11]	OVS 00030-1:	Ontwerpvoorschrift Kunstwerken, deel 1: Kunstwerken spoorverkeer	003	1-06-2012
[12]	ROK 1.2	Richtlijn Ontwerp Kunstwerken	1.2	01-01-2013
[13]	NPR9998	Grondslagen voor aardbevingsbelastingen: Geïnduceerde aardbevingen	Concept	01-02-2015
[14]	NEN-EN 206+NEN 8005:2017 nl	Beton - Specificatie, eigenschappen, vervaardiging en conformiteit + Nederlandse invulling van NEN-EN 206	Definitief	01-12-2017

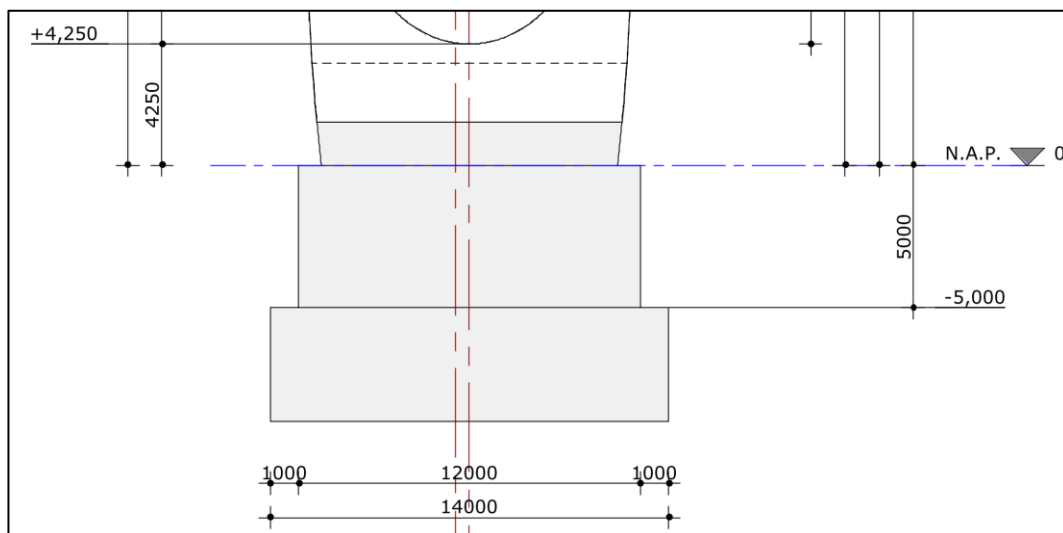
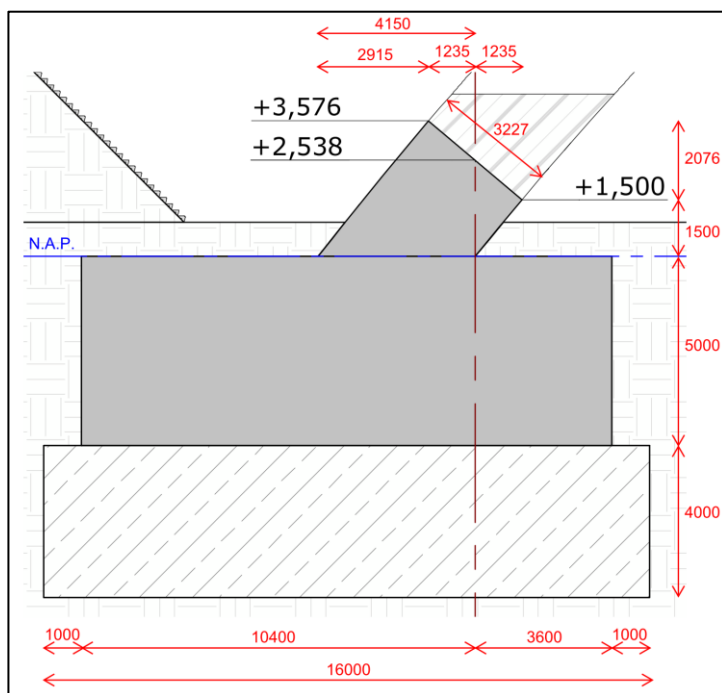
2.1.3 Overige

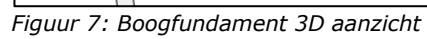
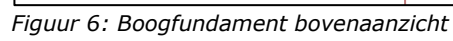
Ref	Titel	Auteur	Datum
[21]	Betonpocket 2020	Betonhuis	November 2019
[21]	Concrete Structures under Imposed thermal and Shrinkage Deformations	Braam, Van Breugel, Vander Veen, Walraven,	October 2017
[22]	Warmteontwikkeling van cement en beton	ENCI, productinformatieblad	December 2001
[23]	Gewapend geopolymeerbeton in de infrasector Artikel (Cement)	Artikel cement, Jos Kronemeijer, Felix Leenders, Kamel Arbi, Herman van den Noort	28 april 2021
[24]	Cursusdictaat Basiskennis Betontechnologie	Betonvereniging	Februari 2017
[25]	Betonlexicon www.betonlexicon.nl	Betonvereniging, Betonhuis, VWN, BR, Aeneas	

2.2

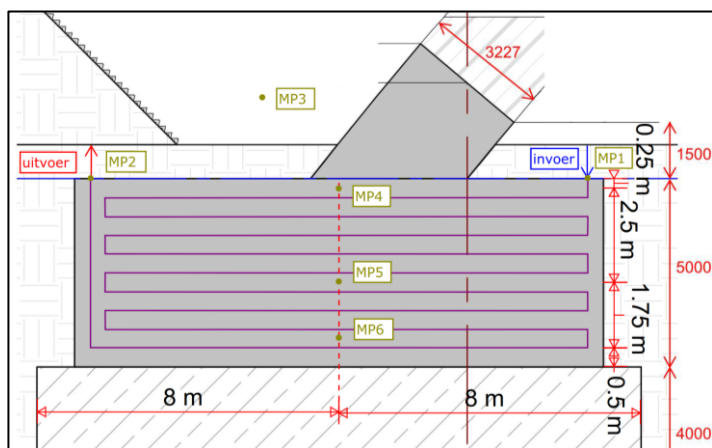
Geometrie

In onderstaande figuren zijn ter illustratie de afmetingen van het betonwerk weergegeven.

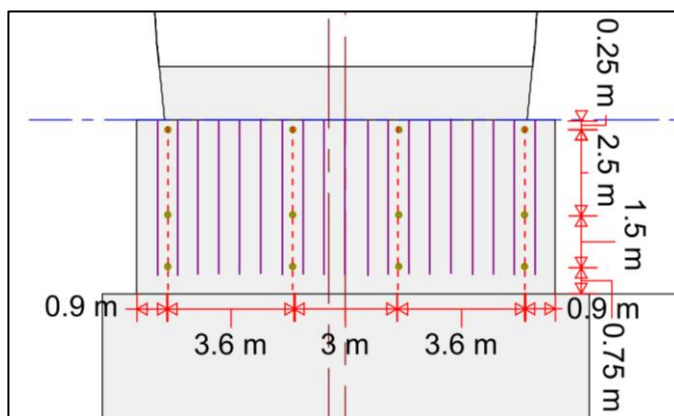




Tevens zijn in onderstaande figuren de koelingsleidingen weergegeven.



Figuur 8: Meetpunten uitgezet in langsdoorsnede



Figuur 9: Meetpunten uitgezet in dwarsdoorsnede

2.3

Materiaalgegevens

Betonsterkteklasse

Voor de verschillende onderdelen zijn de volgende betonsterkteklassen aangehouden:

- Poeren: C35/45
- OWB: C30/37
- Boogvoet: C45/55

Milieuklassen

De volgende milieuklassen zijn van toepassing:

- Poeren: XC2, XD2, XA2*
- OWB: XC2, XD2, XA2*
- Boogvoet: XC2, XD2, XF4, XA2*

*De bepaling van XA2 is voor ondergetekende niet te herleiden maar volgt waarschijnlijk uit het milieutechnisch bodemonderzoek. Aangezien SR-cement (zie §2.4) is toegepast, waarschijnlijk vanwege aanwezige sulfaten in de grond(water).

Toelaatbare scheurwijdte

Toelaatbare scheurwijdte in alle constructie onderdelen is 0,2 mm.

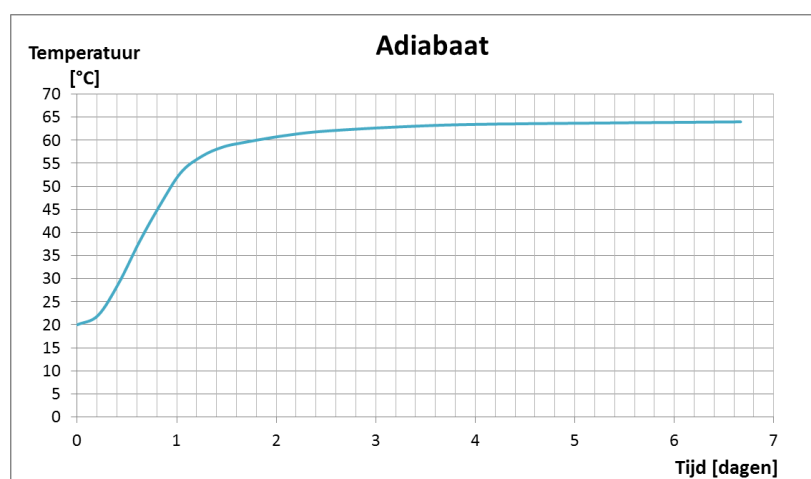
2.4

Betonmengselsamenstelling

In Bijlage 1 zijn voor de boogfundament onderdelen de betonmengselsamenstelling gegeven. Hieronder is per onderdeel de cementsamenstelling gegeven:

Onderdeel	Cementsamenstelling	Wbf/wcb	Consistentieklasse
OWB	CEM III/B 42,5 N LH SR (354 kg) Poederkoolvliegias (30 kg)	0,489 / 0,497	F5
Poer	CEM III/B 42,5 N LH SR (270 kg) CEM I 52,5 R (70 kg)	0,450 / 0,450	S3
Boogvoet	CEM III/B 42,5 N LH SR (236 kg) + CEMI 52,5 R(157 kg)	0,386 / 0,386	SF1

Door de betoncentrale is voor de poer onderstaande adiabaat versterkt.



Figuur 10: Verstreckte adiabaat van betonmengsel poer

2.5 *Bouw- en stortfasering*

Door de aannemer is volgende bouwfasering en stortfasering afgegeven.

Fase	Omschrijving	Uitvoeringsdatum	Globaal t
1	Stort OWB deel	19-12-2016	0
2	Leegpompen bouwkuip	10-01-2017	18
3	Stort poer	13-03-2017	84
4	Ontkisten poer	27-03-2017	98
5	Grond aanvullen tussen damwand en poer	04-04-2017	105
6	Stort boogvoet	31-07-2017	224
7	Ontkisten boogvoet	14-08-2017	238

2.6 *Thermische belastingen en randvoorwaarden*

De aangehouden thermische belastingen en randvoorwaarden zijn gebaseerd op hoofdstuk 6.1 van ROK 1.2. Voor de bepaling wordt uitgegaan van de uitvoeringsplanning zoals is weergegeven in paragraaf 2.5.

Storttemperaturen

- OWB: 10 °C
- Poer: 17 °C
- Boogvoet: 26 °C

2.7 *Bekisting en isolatie*

Systeemkist met 18mm houten beplating

Isolatie:

- Bovenkant en zijanten poer isoleren
- Aanbrengen direct na de stort
- Verwijderen 12 dagen na de stort
- Thermische overdrachtscoëfficiënt $2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ of warmteweerstand $0,5 \text{ (m}^2\text{K)/W}$

2.8 *Scheurvorming & scheurbeheersing*

Door de dimensies en gedrongenheid van de poer loopt als gevolg van het hydratatieproces de temperatuur in de poer flink op. Door afkoeling naderhand ontstaat thermische krimp die zowel extern als intern wordt verhinderd en daardoor spanning genereert die de treksterkte van het beton overschrijdt. Extern wordt deze thermische krimp verhinderd door het eerder gestorte OWB. Intern is dit de temperatuurgradiënt over de doorsnede waardoor scheuren ontstaan.

Om scheurvorming tijdens de hydratatiefase te beheersen is volgens de ROK mogelijk om twee ontwerpmethoden toe te passen:

- Voorkomen van scheurvorming door maatregelen tijdens de uitvoering (zoals koelen, keuze betonmengsel, etc.)
- Beperking van de scheurwijdte door middel van (extra) wapening.

De volgende krimpverschijnselen zijn niet verder beschouwd:

- Plastische krimp kan door een goede nabehandeling worden voorkomen; (hoewel dit voor dit soort grote kunstwerken extra aandacht behoeft)
- Chemische krimp geeft nauwelijks uitwendige vormveranderingen;
- Uitdrogingskrimp: Spanningen ten gevolge van uitdrogingskrimp treden relatief langzaam op in de tijd en zullen wegrelaxeren.
- Autogene krimp is behandeld in §3.3.1.

3 **Beschouwing varianten/ maatregelen**

Hieronder zijn diverse varianten/ maatregelen verkend, zodat koeling van het beton kan worden voorkomen.

3.1 *Boogfundament zonder OWB*

Het huidige boogfundament bestaat in totaal uit een dikte van 9 meter beton, waarvan 4 meter onderwaterbeton (OWB) met daarboven 5 meter traditioneel gewapend beton. De primaire functie van de poer is om de krachten van de boog over te brengen naar het OWB. Daarbij dient de OWB als plaatfundering van de poer en heeft daarmee vooral een geotechnische functie de afstand naar meer draagkrachtige lagen te overbruggen. Slappe grondlagen op de diepte van het OWB zijn weggegraven waarvoor in de plaats het OWB is gekomen.

Een mogelijk alternatief voor het huidige concept is om naar een poer op paalfundering te gaan. De koeling is deels noodzakelijk vanwege de verhinderde vervorming van poer op het OWB. Indien in plaats van het OWB een paalfundering is gekozen, treedt er door de relatief slappe palen (in laterale richting) nauwelijks verhinderde vervorming op.

Toepassen van paalfundering blijkt om echter verschillende redenen moeilijk toepasbaar:

- De belastingen van het treinverkeer leveren grote horizontaalkrachten, met name door rembelasting. De bovenste grondlagen zijn slap en bieden te weinig weerstand in horizontale zin.
- De spoorbrug ligt in de provincie Groningen en volgens de geldende NPR in een gebied waar ook rekeningen gehouden dient te worden met seismische belasting. Ook deze belasting resulteert in significante horizontale belastingen.

In plaats van een paalfundering zou mogelijk ook alleen grondverbetering kunnen worden toegepast in plaats van OWB. Als echter alleen grondverbetering onder de poer is gerealiseerd, zal de slappe grond naast de grondverbetering onder de grote horizontaalkrachten flinke vervormen. Nadeel is dus dan over een groot gebied grondverbetering toegepast moet worden, zodat de vervormingen binnen de perken blijft.

3.2 *Stortfasering*

Het huidige boogfundament wordt in separate delen gestort, namelijk het eerste deel van OWB en vervolgens de poer. Ter voorkoming van de verhinderde vervorming van de poer door het OWB is het alternatief om alles in stort uit te voeren. Dit betekent een uitdaging voor de gehele uitvoering en heeft daarnaast ook een flinke wisselwerking op de hele logistiek, zoals de aan- en afvoer van (grondstoffen van) beton en het materieel. Uitgaande van de bestaande dimensies komt de storthoeveelheid neer op ongeveer 2000 m³. Op basis van eerder projecten wordt dit als haalbaar geacht. Omdat niet gewacht hoeft te worden totdat het OWB is verhard, is een tijds winst in de bouwfasering mogelijk.

Bovenstaande aanpak betekent dat het OWB en de poer worden geïntegreerd. Dit houdt in dat ofwel dat het hele fundament in OWB wordt uitgevoerd, ofwel in traditioneel beton. Omdat er aanzienlijke wapening nodig is in het fundament, wordt het toepassen van alleen OWB niet haalbaar geacht. Het onder water aanbrengen, lassen van verschillen wapeningsdelen en/of ankers van de boogaansluiting is om meerdere redenen onwenselijk. In plaats daarvan zou alles in traditioneel beton uitgevoerd kunnen worden. Dit betekent dat in de bouwput droog moet kunnen worden gewerkt. Naast dat dit hoge eisen stelt aan de bemalingscapaciteit zal ook er toch een waterdichte werkvloer gerealiseerd moeten worden (een van de functies van het OWB). Afhankelijk van het bemalingsplan zal het opbarsten van de werkvloer een reëel risico blijven en hoge eisen stellen aan de werkvloer.

Daarnaast vraagt het storten van beton met 9 meter speciale aandacht voor de bekisting. De bekisting dient dermate sterk en stijf om weerstand te bieden aan de hoge bekistingsdruk. Tevens zijn flinke hulpconstructies voorzien die de bekisting moeten opvangen.

Hoewel de enkele stort de verwachte scheurvorming door extern verhinderde vervorming voorkomt, betekent de omvang van de poer dat de uitdaging op het gebied van interne verhinderde vervorming des te groter is geworden. De buitenste schil koelt sneller af dan de kern en de temperatuurgradiënt resulteert in mogelijke scheurvorming.

Door de dimensies van de poer en beperkte mogelijkheid om de hydratiewarmte kwijt te raken speelt ook het risico van Delayed Ettringite Formation (DEF) een rol. Ettringiet is een van de hydratieproducten die voorkomt in cementsteen en is een reactieproduct van C3A- (verbindingen) met sulfaten en water. Ettringietvorming gaat gepaard met swelling en indien het beton is verhard kan deze swelling tot schade leiden. Over het algemeen wordt een betontemperatuur van 70 °C gezien als de temperatuur waarop het risico op DEF groot is. Door het complete boogfundament uit te voeren in een stort, neemt het risico hierop toe.

3.3 *Betonmengselsamenstelling*

Om de hydratatiewarmte te reduceren zijn een aantal maatregelen beschouwd.

3.3.1 *Cementkeuze*

Zoals is weergegeven in §2.4 en Bijlage 1 is het betonmengsel van de poer op basis van 270 kg CEMIII/B en 70 kg CEM I, een aandeel van 20% van het portlandcement.

Om hydratatiewarmte zoveel mogelijk te beperken is nu onderzocht om alle Portlandcement te vervangen door Hoogovencement (met dezelfde toeslagmaterialen en hulpstoffen als uitgangspunt)

Als wederom de benodigde druksterkte C35/45 is genomen, volgt:

$$f_{cm,cube} = f_{ck,cube} + 8,0 = 37 + 8 = 45 \text{ N/mm}^2 \text{ (luchtpercentage} < 2\%, \text{ zie bijlage 1)}$$

$$f_{cm,cube} = a * N + \frac{b}{wcf} - c = 0,75 * 58 + \frac{18}{wcf} - 30 = 33 \rightarrow wcf = 0,456$$

$$a = 0,75$$

$$b = 18$$

$$c = 30$$

$$N = 58 \text{ N/mm}^2 \text{ (gebaseerd op tabel in bijlage 2, [ref. 24])}$$

Bovenstaande wcf factor voldoet ook aan de minimale water cement factor op basis de milieuklasse. Daarin is de milieufactor XA2 leidend met een minimale wcf van 0,50.

Op basis van watergehalte van 160 kg van bestaande mengsel (met invloed van de plastificeerders) komt het cementgehalte op $m_{cement} = \frac{m_{water}}{wcf} = \frac{160}{0,456} = 350 \text{ kg cement CEM III/b.}$

Op basis hiervan kan een inschatting worden gemaakt van de adiabatische temperatuurontwikkeling:

$$T_h = \frac{C * Q_h}{c * \rho}$$

Daarvoor zijn de specifieke hydratiewarmtes (Q_h) van de verschillende cementtypes gebruikt conform bijlage 3 (ref [22]). De specifieke warmte van beton (c) volgt uit [ref. 21] en bedraagt voor jong beton ongeveer 1,0 kJ/(kgK). De volumieke massa (ρ) volgt uit de mengselsamenstelling in Bijlage 1, waarbij een verschil tussen beide mengsels voor nu is verwaarloosd.

Op de volgende pagina is voor beide mengsels een inschatting van de temperatuurontwikkeling gegeven.

Mengsel	Adiabatische warmteontwikkeling
270 kg CEMIII/B 42,5 N LH SR + 70 kg CEM I 52,5 R	$270 * 250 / 2386 = 27,7^{\circ}\text{C}$ $70 * 350 / 2386 = 10,3^{\circ}\text{C}$ Som : 38°C (komt ongeveer overeen met opgegeven adiabaat, zie §2.4)
350 kg CEMIII/B 42,5 N LH SR	$350 * 250 / 2386 = 36,7^{\circ}\text{C}$

Hieruit volgt dat deze aanpassing de cement slechts een marginale reductie van 3,4% in hydratiewarmte oplevert.

Daarom wordt voorgesteld om de betonsamenstelling alleen aan de buitenkant van de poer te ontwerpen op de milieuklassen XA2 en C35/45 betonsterkteklassen. Zoals in bijlage 4 is weergegeven, is alleen bij de aansluiting met de boogvoet een aanzienlijke betonsterkte benodigd. Ook is er in de kern van de poer nauwelijks tot geen indringing van zowel sulfaten en chloriden. Voor de schil (buitenste meter) kan bovenstaand mengsel worden toegepast. Voor de kern is een minder cementrijk mengsel voorgesteld op basis van sterkteklasse C30/37 met milieuklasse XC2.

Op eenzelfde wijze als hierboven volgt hieruit een wcf van 0,571. Op basis van dezelfde waterbehoefte komt het cementgehalte dan op 280 kg/m³.

Op basis hiervan is gekeken naar verschil in de totale hydratiewarmte van de hele poer (dimensies: 14 x 12 x 5= 840 m³)

Mengsel	Adiabatische warmteontwikkeling
270 kg CEMIII/B 42,5 N LH SR + 70 kg CEM I 52,5 R	$270 * 250 * 840 = 56,7 \text{ GJ}$ $70 * 350 * 840 = 20,6 \text{ GJ}$ Som = $77,3 \text{ GJ}$
350 kg CEMIII/B 42,5 N LH SR (buitenste schil 1 meter) + 280 kg kg CEMIII/B 42,5 N LH SR	$350 * 250 * (840-572) = 23,5 \text{ GJ}$ $280 * 250 * 572 = 40,0 \text{ GJ}$ Som = $63,5 \text{ GJ}$

Dit betekent een reductie op de ontwikkelde hydratiewarmte van 17,8%. Daarnaast wordt het betonmengsel wat relatief minder warmte ontwikkelt in de kern geplaatst waardoor de temperatuurgradiënt over de doorsnede verder afneemt.

Enkele kanttekeningen die bij bovenstaande variant naar voren komen:

- De betondruksterkte is ook van invloed op de verankeringslengte van de boogvoet. Dit aspect zal verder onderzocht moeten worden.
- De toepassing van enkel CEMIII cement betekent dat het fenomeen van autogene krimp een grotere rol speelt dan is vastgelegd in de Eurocode. Dit betekent dat bij het uiteindelijke ontwerp van het mengsel aangetoond moet worden dat de autogene krimp binnen de aangehouden rekenwaarde van de autogene krimp valt. [12]
- De sterkteontwikkeling (en ontkistingstijd) is minder snel door toepassing van alleen Hoogovencement.

Overigens is ook bekend dat in hoogovencement met een slakgehalte > 65% geen gevaar bestaat voor expansieve ettringietvorming [ref. 25].

3.3.2 *Temperatuur betonspecie*

Naast het reduceren van de hydratiewarmte van het beton is ook het verlagen van de temperatuur betonspecie een optie. In wezen dient dit dan als een vervroegde koeling en door de lagere starttemperatuur zal de maximale temperatuur niet zo ver oplopen. Daarnaast betekent een lagere specietemperatuur ook een lagere hydratatiesnelheid, waardoor de temperatuursgradient afneemt in de doorsnede. Het nadeel is wel de langere verhardingstijd, waardoor mogelijk later ontkist kan worden. Een effectieve manier van om de specietemperatuur te reduceren is het koelen van het toeslagmateriaal.

3.3.3 *Geopolymeerbeton*

Recent is in het vakblad Cement een artikel geschreven over de toepassing van gewapende Geopolymeerbeton in de infrasector [ref. 23]. In een spooronderdoorgang in Heiloo is tussenwand uitgevoerd in geopolymeerbeton. Op diverse posities in het beton is de temperatuur gemeten in de wand, waaruit de conclusie is getrokken dat er geen stijging van de temperatuur tijdens het verharden (polymerisatie) heeft plaatsgevonden. Hoewel de dimensies en de hoeveelheid beton relatief beperkt zijn in vergelijking met de poer van Zuidhorn, zou dit in de toekomst een interessant alternatief kunnen zijn. Een van de nadelen van geopolymeerbeton is de onbekendheid. Het is voor Nederland een relatief nieuwe betonsoort; er zijn momenteel nog geen normen en er is geen regelgeving voor.

3.4 *Kistisolatie*

In het bestaande ontwerp is de zijkant en de bovenkant van de poer reeds geïsoleerd om de temperatuursgradiënt te beperken. Een mogelijk maatregel is de isolatie van de kist te verbeteren om zo de interne trekspanningen verder te reduceren. In het huidige ontwerp is een warmteweerstand van $R=0,5 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ aangehouden voor de isolatie. Toepassen van 50 mm EPS met een $\lambda=0,040 \text{ W/mK}$ geeft al R -waarde van $1,25 \text{ (m}^2\text{K)/W}$. Het verhogen van de isolatiewaarde van de bekisting is daarmee relatief makkelijk haalbaar.

Aandachtspunt is het dat men bij het verwijderen van de isolatie/bekisting bedacht moet zijn op temperatuurschokken met als gevolg scheurvorming in het oppervlak.

3.5 *Afweging*

In voorgaande paragrafen zijn een aantal varianten/ maatregelen beschouwd ter voorkoming van koeling van de poer. Daarbij is het toevoegen van (extra) kistisolatie in wezen een maatregel die voor elke variant van toepassing is. Daarom is hieronder afweging gemaakt tussen de drie overgebleven varianten op basis van een inschatting op gebied van:

- Technische haalbaarheid: constructieve, geotechnische, bouwtechnische haalbaarheid;
- Geld: impact op de kosten;
- Tijd: impact op de planning;
- Uitvoerbaarheid: Complexiteit van de maakbaarheid.

<i>Afweging o.b.v. --/ ++</i>	Haalbaarheid	Geld	Tijd	Uitvoerbaarheid
Boogfundament zonder OWB & extra kistisolatie	--	-/+	-/+	+
Enkele stort & extra kistisolatie	-	-	+	--
Aanpassing mengselontwerp & extra kistisolatie	+	+	-	++

Op basis van bovenstaande afweging is de variant van aanpassing van het mengselontwerp in combinatie met extra kistisolatie het meest veelbelovend om nader te onderzoeken.

4**Conclusie en Advies**

In voorliggend document zijn een aantal varianten/maatregelen verkend die koeling van de poer van het boogfundament kunnen voorkomen. Deze koeling hangt sterk samen met de ontwikkelde hydratiewarmte en de mate van verhinderings, zowel intern als extern. Uit de verkenning volgt dat een significante reductie van hydratiewarmte gerealiseerd kan worden door kritischer om te gaan met de bepaling van de benodigde hoeveelheid cement in de doorsnede. In de kern van de poer kan het cementgehalte worden verminderd, terwijl de hoeveelheid cement in de buitenste schil in stand blijft om aan de duurzaamheidseisen en sterkte eisen te voldoen. Om daarnaast de interne verhinderings te reduceren kan relatief eenvoudig de isolatiewaarde van de bekisting worden opgeschroefd, bijvoorbeeld door extra EPS bekleding aan de buitenkant van de kist.

Bijlage 1 **Betonmengsel samenstellingen**
OWB:

Zeefanalyses en Betonmengsel samenstelling

HEIDELBERGCEMENT
BENELUX

Vestiging Hoogkerk	Code 1MBZUIDH100	Omschrijving C37A2F516J	Datum berekend 2016-12-07 10:49:08	
Zeven volgens NEN 2560	Rivierzand 0/2 mm	Zeezand 0/4 mm	Zeegrind 4/16 mm	Mengsel
Toeleveringscode	8588	8218	8216	
C 22.4 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
C 16 mm	0,0%	0,0%	2,1%	1,2%
C 11.2 mm	0,0%	0,0%	36,5%	19,7%
C 8 mm	0,0%	0,0%	62,1%	33,4%
C 5.6 mm	0,0%	0,0%	89,4%	48,1%
C 4 mm	0,0%	4,1%	99,2%	55,2%
2 mm	2,0%	14,0%	99,7%	60,1%
1 mm	10,0%	28,6%	100,0%	67,0%
500 µm	36,0%	52,9%	100,0%	78,3%
250 µm	80,0%	89,2%	100,0%	95,0%
125 µm	89,0%	98,8%	100,0%	99,5%
63 µm	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Rest	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Fijnheidmodulus	2,17	2,88	6,63	4,90
Vocht	0,8%	0,5%	1,2%	
Absorptie	0,8%	0,5%	1,2%	
Verhouding toeslag	0,00%	100,00%	100,00%	
Fractie	0,00%	46,21%	53,79%	
Vol. massa	2,60kg/L	2,63kg/L	2,61kg/L	
Sterkte klasse C30/37				
Statistische milieu klasse XA2 Mild aggresieve omgeving				
Milieuklasse XA2 Mild aggresieve omgeving				
Consistentie Schudmaatklasse F5				
Gradering Gradering AB				
Maximale korrelgrootte DMax = 16				
Wapening Gewapend				
wbf / wcf 0,489 / 0,497				
Zand (t.o.v. toeslag) 46,21% V/V				
Chloridegehalte 0,12% M/M (tot bindmiddel)				
Alkaligehalte 2,17kg				
Luchtgehalte 15,0L				
Temperatuur: 15°C				
waterbehoefte 175,9L				
Aanmaakwater 175,9L				
Eff. aanmaakwater (zonder slib) 175,9L				
Geabsorbeerd water 15,5L				
Aanhangend vocht 15,5L				

Grondstoffen	producent	Te doseren		Volume fijn	ce
		massa	Droge massa		
CEM III/B 42,5 N LH/SR ENCI	ENCI	354kg	354kg	120,0L	
Rivierzand 0/2 mm	ROELOFS WEGENBOUW B.V.	0kg	0kg	0,0L	
Zeezand 0/4 mm	Harlingen	824kg	820kg	33,7L	
Zeegrind 4/16 mm	Spaansen zand en grind	958kg	946kg	0,0L	
Poederkoolvliegias (met K-factor)	Euroment	30kg	30kg	13,3L	
Cretoplast-Plastificeerder con. 35%	Cugla	0,708kg	0,708kg	0,0L	0,20%
CUGLA LR9400 CON 30%	Cugla	0,991kg	0,991kg	0,0L	0,28%
Cugla - MMV - Metselmortelvertrager con. 25%	Cugla	0,177kg	0,177kg	0,0L	0,05%
Oppervlaktewater	-	176kg	176kg	0,0L	
Warm oppervlaktewater	-	0kg	0kg	0,0L	
Lucht		15L	15L	0,0L	
Totaal		2343kg		167,0L	

Poer:

Zeefanalyses en Betonsamenstelling

HEIDELBERGCEMENT

BENELUX

Vestiging Hoogkerk	Code 1MBZUIDH200	Omschrijving C45F4S332J			Datum berekend 2017-03-06 13:10:08	
Zeven volgens NEN 2560	Rivierzand 0/2 mm	Zeezand 0/4 mm	Zeegrind 4/32 mm	Mengsel	Sterkte klasse C35/45	
Toeleveringscode	8588	8218	7741		Statistische milieu klasse XF4 Hoge water saturatie met dool.	
C 31.5 mm	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	Milieu klasse XF4 Hoge water saturatie met dool.	
C 22.4 mm	0,0%	0,0%	18,0%	10,1%	Consistentie Zetmaatklasse S3	
C 16 mm	0,0%	0,0%	57,0%	31,9%	Gradering Gradering AB	
C 11.2 mm	0,0%	0,0%	78,0%	43,7%	Maximale korrelgrootte DMax = 32	
C 8 mm	0,0%	0,0%	84,0%	47,0%	Wapening Gewapend	
C 5.6 mm	0,0%	0,0%	96,0%	53,8%	wbf / wcf 0,450 / 0,450	
C 4 mm	0,0%	4,1%	100,0%	57,4%	Zand (t.o.v. toeslag) 44,00% V/V	
2 mm	2,0%	14,0%	100,0%	60,9%	Chloridegehalte 0,09% M/M (tot bindmiddel)	
1 mm	10,0%	28,6%	100,0%	66,5%	Alkaligehalte 2,26kg	
500 µm	36,0%	52,9%	100,0%	77,4%	Luchtgehalte 15,0L	
250 µm	80,0%	89,2%	100,0%	94,2%	Temperatuur: 12°C	
125 µm	89,0%	98,8%	100,0%	98,4%	waterbehoefte 156,4L	
63 µm	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	Aanmaakwater 159,5L	
Rest	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	Eff. aanmaakwater (zonder slib) 159,5L	
Fijnheidmodulus	2,17	2,88	7,41	5,34	Geabsorbeerd water 18,2L	
Vocht	0,8%	0,5%	1,0%		Aanhangend vocht 15,1L	
Absorptie	0,8%	0,5%	1,3%			
Verhouding toeslag	25,00%	75,00%	100,00%			
Fractie	11,00%	33,00%	56,00%			
Vol. massa	2,60kg/L	2,63kg/L	2,61kg/L			

Grondstoffen	producent	Te doseren massa	Droge massa	Volume fijn	T.o.v. cement
CEM I 52,5 R ENCI MAASTRICHT	ENCI	70kg	70kg	28,3L	
CEM III/B 42,5 N LH/SR ENCI IJMUIDEN	ENCI	270kg	270kg	90,7L	
Rivierzand 0/2 mm	ROELOFS WEGENBOUW B.V.	204kg	203kg	15,6L	
Zeezand 0/4 mm	Harlingen	618kg	615kg	25,3L	
Zeegrind 4/32 mm	Harlingen	1046kg	1035kg	0,0L	
Cretoplast-Plastificeerder con. 35%	Cugla	0,357kg	0,357kg	0,0L	0,10% m/m
CUGLA LR9400 CON 30%	Cugla	0,713kg	0,713kg	0,0L	0,20% m/m
Cugla - MMV - Metselmortelvertrager con. 25%	Cugla	0,357kg	0,357kg	0,0L	0,10% m/m
Oppervlaktewater	-	160kg	156kg	0,0L	
Warm oppervlaktewater	-	0kg	0kg	0,0L	
Lucht		15L	15L	0,0L	
Totaal		2386kg		159,8L	

Boogvoet:

Zeefanalyses en Betonsamenstelling					HEIDELBERGCEMENT	
					BENELUX	
Vestiging	Code	Omschrijving			Datum berekend	
Hoogkerk	C55F4SF108J	C55F4SF108J			2017-03-01 16:02:16	
Zeven volgens NEN 2560	Zeezand 0/4 mm	Rivierzand 0/2 mm	Riviergrind 2/8 mm	Mengsel	Sterkte klasse	C45/55
Toeleveringscode	8218	8588	6658		Statistische milieuklasse	XF4 Hoge water saturatie met dooiz.
C 8 mm	0,0%	0,0%	13,6%	6,8%	Milieuklasse	XF4 Hoge water saturatie met dooiz.
C 5.6 mm	0,0%	0,0%	56,1%	28,0%	Consistentie	Vloeimaatklaas SF1
C 4 mm	4,1%	0,0%	89,3%	46,2%	Maximale korrelgrootte	DMax = 8
2 mm	14,0%	2,0%	99,1%	55,1%	Wapening	Gewapend
1 mm	28,6%	10,0%	99,8%	61,9%	wbf / wcf	0,386 / 0,386
500 µm	52,9%	36,0%	100,0%	74,4%	Zand (t.o.v. toeslag)	50,00% V/V
250 µm	89,2%	80,0%	100,0%	93,4%	Chloridegehalte (tot bindmiddel)	0,11% M/M
125 µm	98,8%	89,0%	100,0%	98,2%	Alkaligehalte	2,95kg
63 µm	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	Luchtgehalte	10,0L
Rest	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	Temperatuur:	12°C
Fijnheidmodulus	2,88	2,17	6,02	4,36	waterbehoefte	151,5L
Vocht	0,5%	0,8%	1,0%		Aanmaakwater	151,5L
Absorptie	0,5%	0,8%	1,0%		Eff. aanmaakwater (zonder slib)	151,5L
Verhouding toeslag	75,00%	25,00%	100,00%		Geabsorbeerd water	13,2L
Fractie	37,50%	12,50%	50,00%		Aanhangend vocht	13,2L
Vol. massa	2,63kg/L	2,60kg/L	2,64kg/L			
Grondstoffen		producent	Te doseren massa	Droge massa	Volume fijn	T.o.v. cement
CEM III/B 42,5 N LH/SR ENCI IJMUIDEN		ENCI	236kg	236kg	79,8L	
CEM I 52,5 R ENCI MAASTRICHT		ENCI	157kg	157kg	49,8L	
Zeezand 0/4 mm		Harlingen	633kg	629kg	25,8L	
Rivierzand 0/2 mm		ROELOFS WEGENBOUW B.V.	209kg	207kg	15,9L	
Riviergrind 2/8 mm		-	850kg	842kg	0,5L	
Kalksteenmeel		ENCI	185kg	185kg	67,8L	
Cugla HR Superplastificeerder con. 35%		Cugla	1,178kg	1,178kg	0,0L	0,30% m/m
CUGLA LR9400 CON 30%		Cugla	2,355kg	2,355kg	0,0L	0,60% m/m
Oppervlaktewater		-	151kg	151kg	0,0L	
Warm oppervlaktewater		-	0kg	0kg	0,0L	
Lucht		-	10L	10L	0,0L	
Totaal			2424kg		239,8L	

Bijlage 2 **Richtwaarden gemiddelde normsterkte N veel gebruikte cementen**

Cementsoort (AGB)	Codering	Normsterkte N (N/mm^2) na (j) dagen			
		1	2	3	28
Portlandcement	CEM I 32,5 R	10	17	25	48
	CEM I 42,5 R	19	30	35	58
	CEM I 52,5 R	29	39	44	63
Samengesteld Portlandcement	CEM II/B-V 32,5 R	13	22	25	49
	CEM II/B-S 52,5 N	21	33	40	65
Hoogoven cement	CEM III/A 32,5 N	7	14	19	46
	CEM III/A 42,5 N	8	17	22	59
	CEM III/A 52,5 N	18	28	35	74
	CEM III/B 32,5 N	5	10	14	48
	CEM III/B 42,5 N	8	17	25	58

Bijlage 3 **Indicatie hydratiewarmte ENCI-cementen**

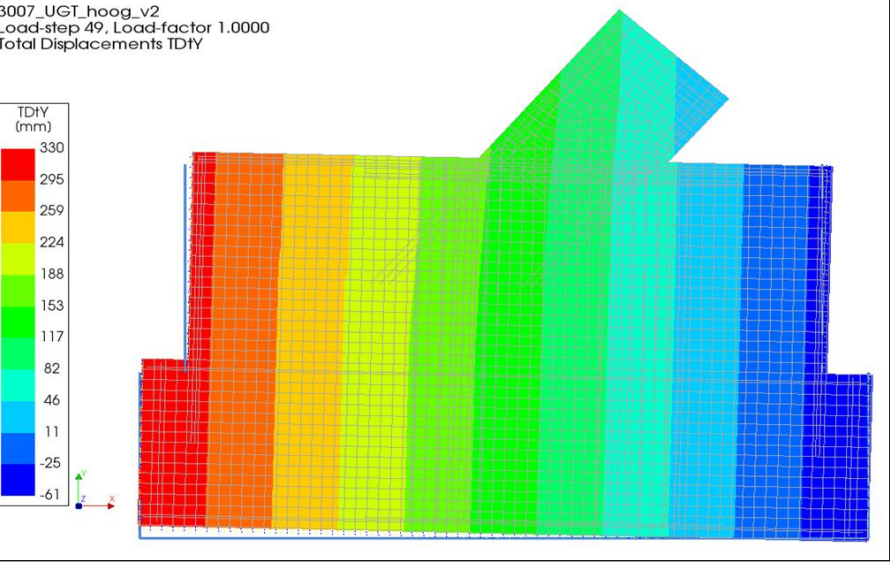
Tabel 1 Indicatie hydratatiewarmte ENCI-cementen

ENCI-cement	hydratatiewarmte J/g
Portlandcement	
• CEM I 52,5 N	345
• CEM I 52,5 R	350
Samengesteld portlandcement	
• CEM II/B-V 32,5 R	275
Hoogovencement	
• CEM III/B 42,5 N NEN 3550: LH/HS	245
• CEM III/B 42,5 N plus NEN 3550: LH/HS	255
• CEM III/A 52,5 N	350
Composietcement	
• CEM V/A (S-V) 42,5 N	260

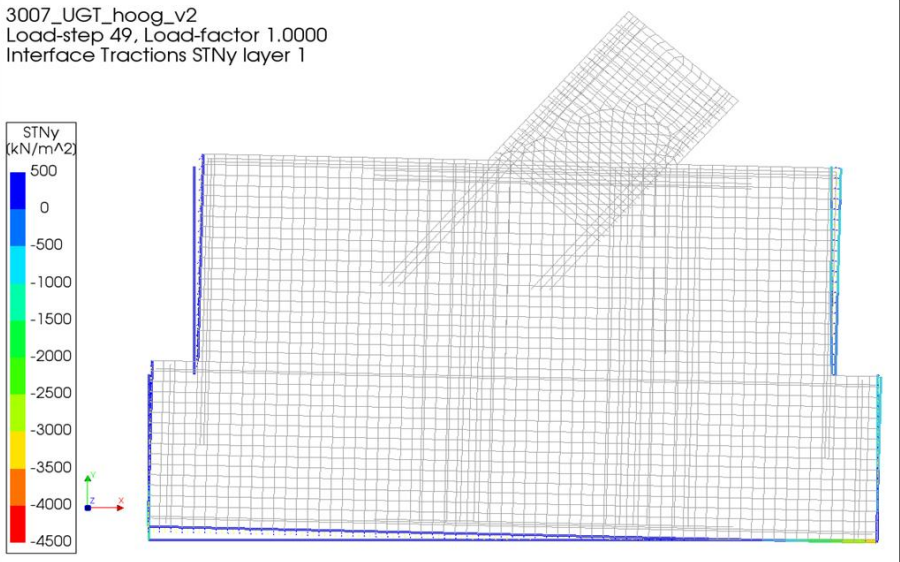
Bijlage 4 **Krachtwerking boogfundament**

2D-MODEL: COMBI 3007_V2_UGT-HOOG

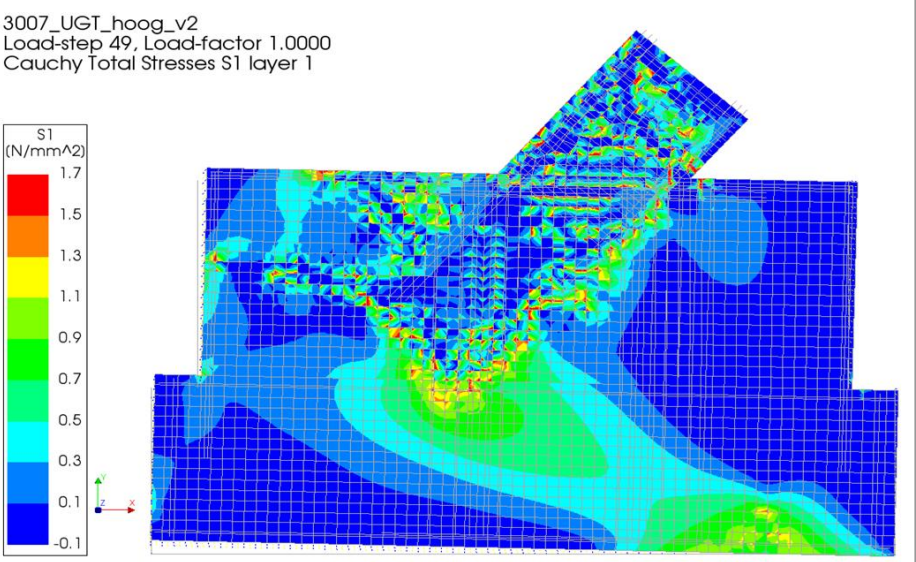
Verplaatsing UGT



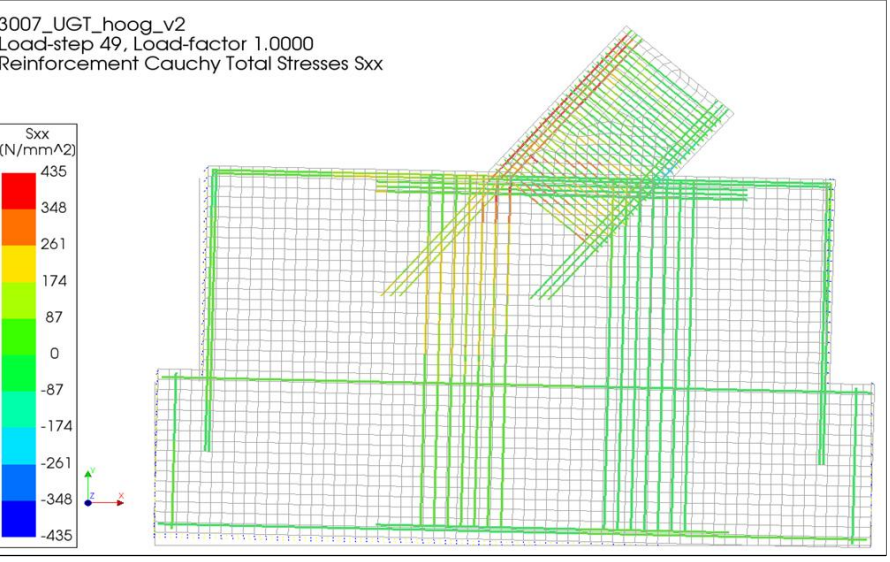
Spanningen interfaces UGT



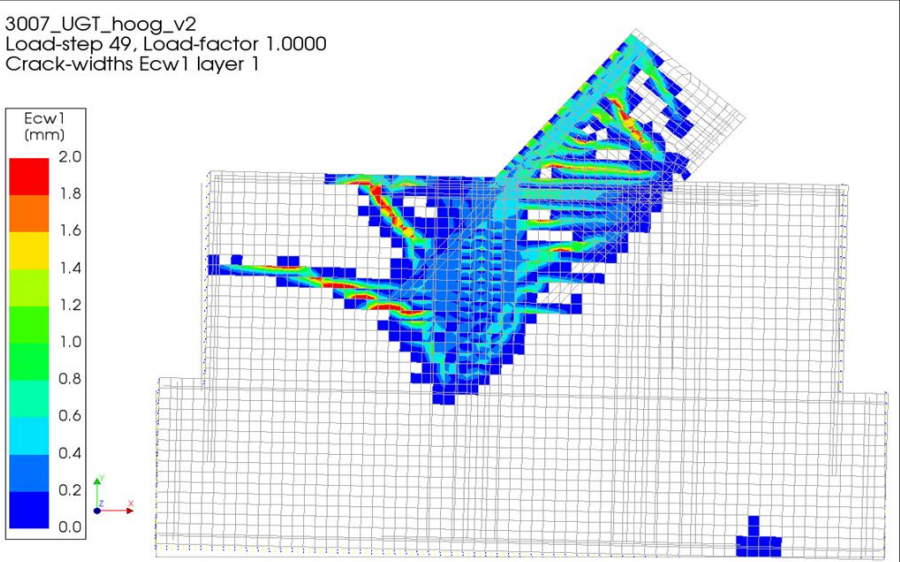
Hoofdtrekspanning S1



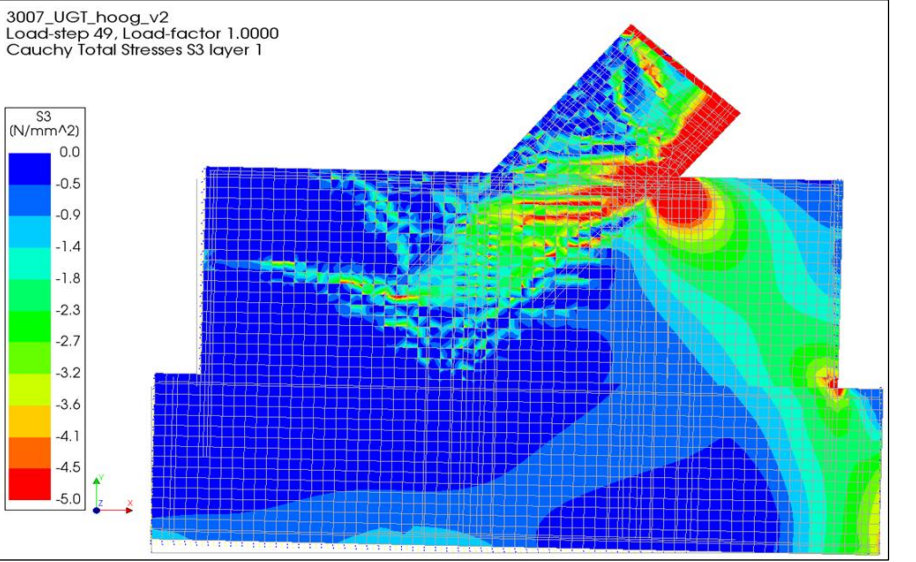
Staalspanning UGT



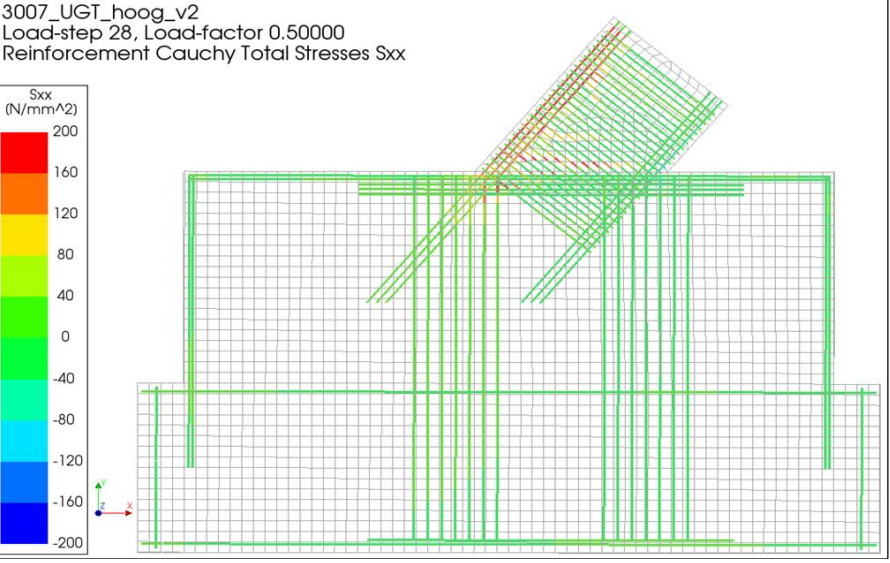
Scheurpatroon UGT



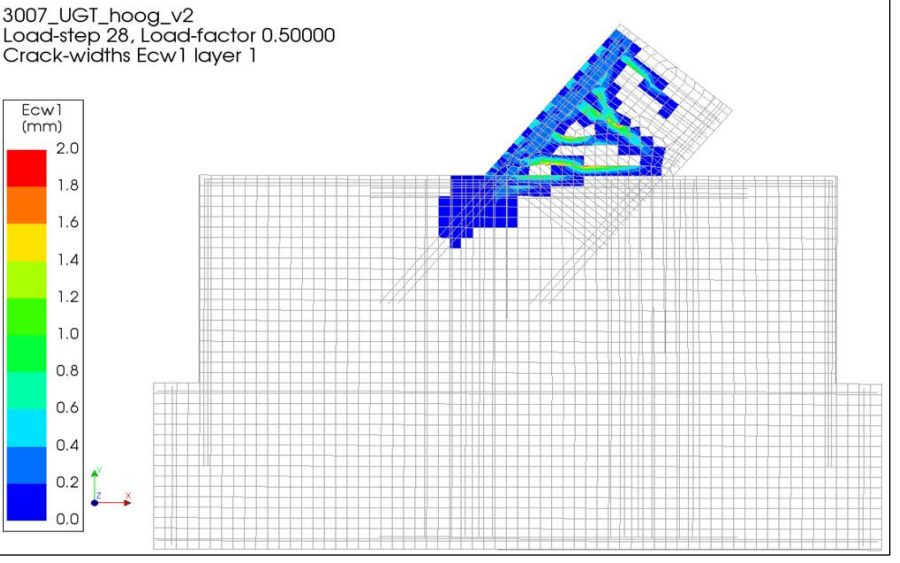
Hoofddrukspanning S3



Staalspanning BGT



Scheurpatroon BGT



Hoofddrukspanning S3

