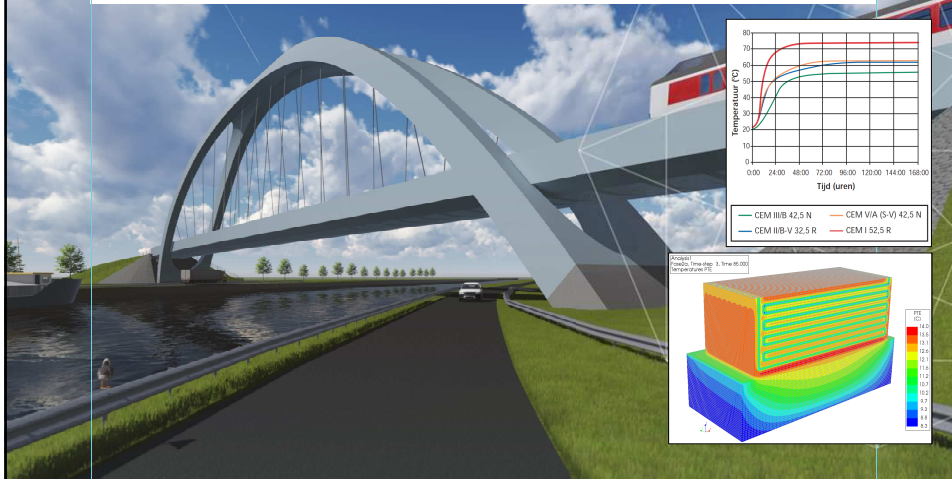


Hydratatiewarmte- en koelingsberekening funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

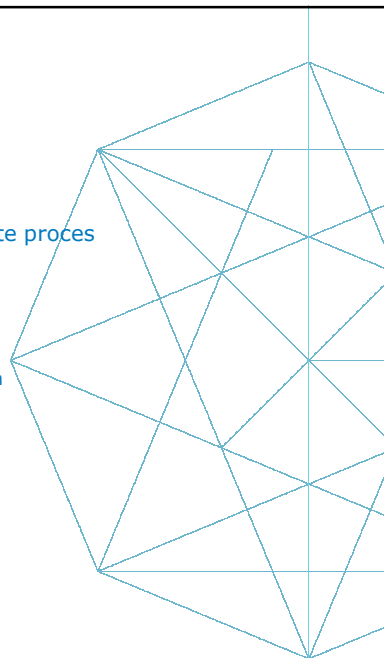


Wilfred Visscher | Kris Riemens

07-06-2017

Inhoud

- Projectbeschrijving
- Achtergrondinformatie hydratatiewarmte proces
- Modelling in DIANA
 - Modelling strategieën
 - Beschrijving model
 - Thermische randvoorwaarden en koelbuizen
 - Gefaseerde berekening
 - Mechanische randvoorwaarden
 - Materiaaleigenschappen
- Resultaten
- Praktijk
- Conclusie



Projectbeschrijving

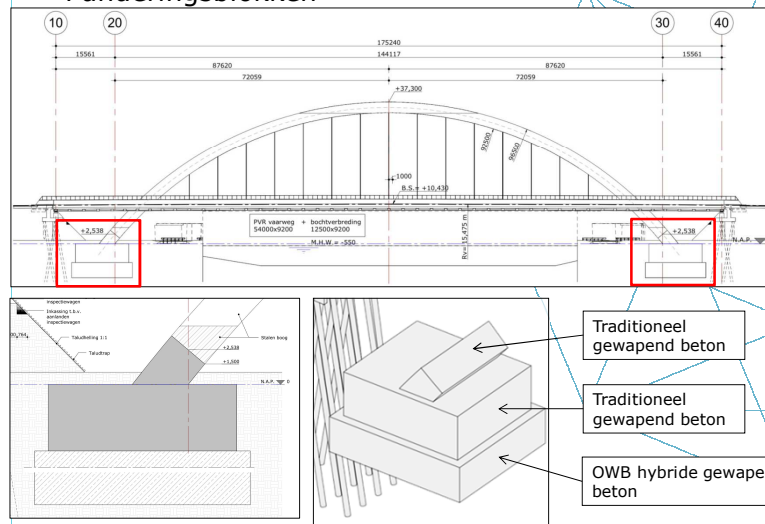
Algemeen



- Nieuwe spoorbrug over Van Starckenborghkanaal te Zuidhorn
- Stalen boogbrug, ca. 175 m lang
- Wens provincie Groningen opwaardering vaarweg Lemmer - Delfzijl
- Huidige spoorbrug voldoet niet meer aan de eisen

Projectbeschrijving

Funderingsblokken



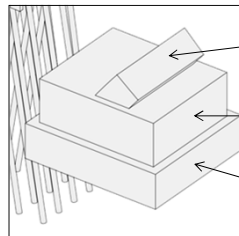
Projectbeschrijving

Toetsingscriterium

ROK 1.3:

Voor waterkerende delen van de betonconstructie mogen voor scheurbeheersing tijdens de verhardingsfase de volgende ontwerpmethoden worden gebruikt:

1. Voorkomen van scheurvorming door maatregelen tijdens de uitvoering (bijvoorbeeld door koelen en/of een aangepast betonmengsel);
2. Beperking van de scheurwijdte door middel van (extra) wapening.



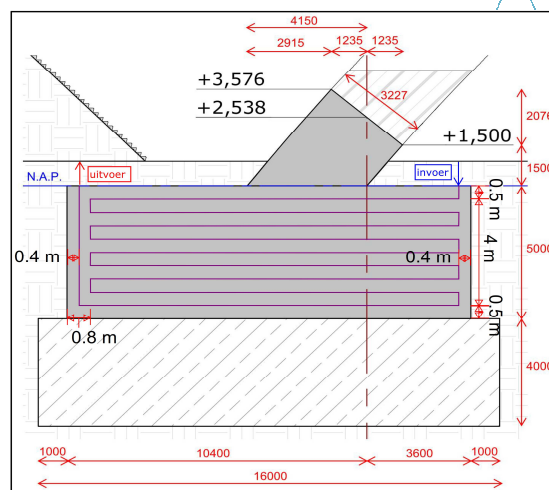
Traditioneel gewapend beton
→ beperking van scheurwijdte d.m.v. wapening

Traditioneel gewapend beton
→ voorkomen scheurvorming d.m.v. koeling

OWB hybridgewapend beton
→ beperking van scheurwijdte d.m.v. wapening

Projectbeschrijving

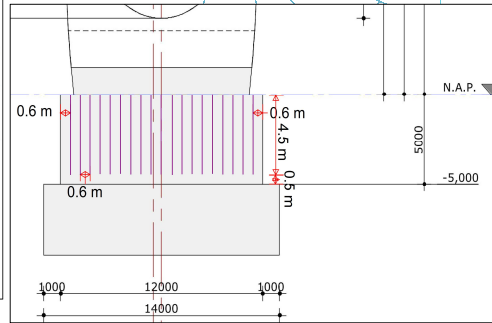
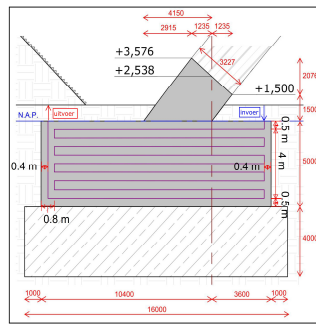
Koelingsontwerp



ABT / bouwen aan ambities / Hydratatiewarmte- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

6

Projectbeschrijving Koelingsontwerp



- Kunststof koelbuizen (PE) 32/28 mm
- 19 circuits h.o.h. 600 mm
- Lengte koelbuis per circuit ca. 125 m
- Temperatuur ingaand water: 6 °C (gebruik van water uit kanaal!)
- Debiet: 1,5 m³/h

ABT / bouwen aan ambities / Hydratatiewarmte- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

7

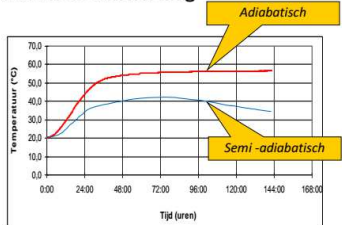
Achtergrondinformatie hydratatie proces

- Betonspecie: grind + zand + cement + water (+ evt. hulpstoffen)
- Na mengen treedt chemische reactie op die het mengsel 'versteent'.
- Deze chemische reactie, hydratatie genoemd, is een exotherme reactie, d.w.z. een reactie waar warmte bij vrij komt.

Hydratatiegraad

$$h = \frac{\text{hoeveelheid gehydrateerd cement}}{\text{de oorspronkelijke hoeveelheid cement}}$$

Warmteontwikkeling



Hydratatiewarmte

- **Adiabatisch:** Omstandigheden waarbij geen warmte-uitwisseling met de omgeving plaats heeft. Komt overeen met de maximaal te realiseren temperatuur in de kern van **massa beton**.
- **Semi-adiabatisch:** Omstandigheden waarbij een deel van de warmte afgegeven wordt aan de omgeving



ABT / bouwen aan ambities / Hydratatiewarmte- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

8

Achtergrondinformatie hydratatie proces

- Combinatie van:
- thermische uitzetting
 - krimp
 - verhinderde vervorming
- kan leiden tot ongewenste scheurvorming



- Temperature / flux / coolant temperature
- Degree of reaction $r = \frac{\int_0^t q_v(\tau) d\tau}{\int_0^t q_v(\tau) d\tau}$
- Maturity (equivalent age)
 - Arrhenius $t_{eq} = \int_0^t \exp\left[c_A \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T(\tau)}\right)\right] d\tau$

Heat storage Heat source

$$c(T, r) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} \left(k(T, r) \text{grad } T \right) + q_V(T, r)$$

Heat transport

Modellering in DIANA

Modellering strategieën

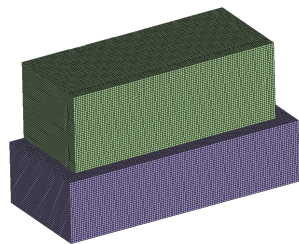
- 2D vs 3D?
- Fijn mesh (lange rekentijd) vs grof mesh (kortere rekentijd)?
- Tijdstapgrootte?
- Gefaseerde berekening?
- Interpretatie resultaten?



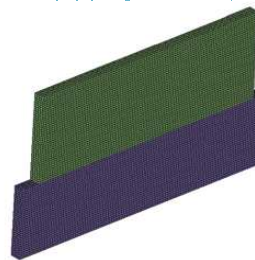
→ Geen specifieke richtlijn beschikbaar voor toepassing FEM bij Hydratatiewarmte- en koelingsberekeningen

Modellering in DIANA

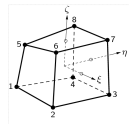
Beschrijving model



Volledig 3D volume model t.b.v. temperatuur berekening



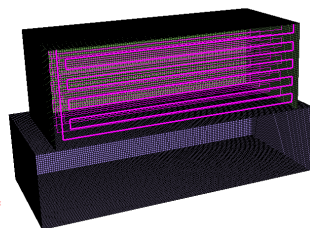
Mootmodel (600 mm breed) met volume elementen met één koelcircuit t.b.v. structurele berekening



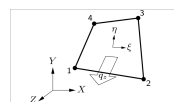
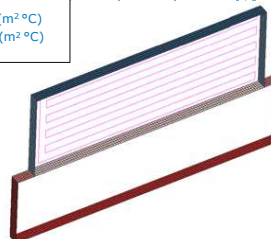
8-knoops *solid* elementen (type HX24L)
Gemiddelde elementgrootte: 125 mm

Modellering in DIANA

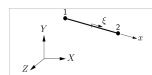
Thermische randvoorwaarden en koelbuizen



Warmte overgangscoefficienten:
 Met bekisting: 5,6 W/(m²°C)
 Bekisting + extra isolatie: 2,0 W/(m²°C)
 Zonder bekisting/isolatie: 17,6 W/(m²°C)



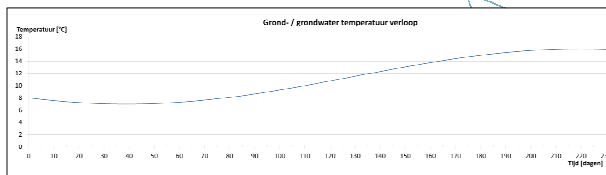
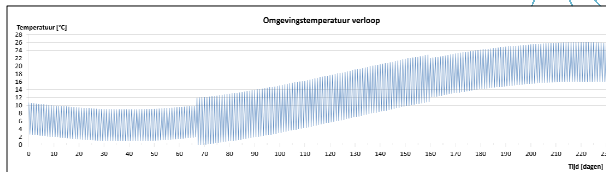
4-knoops *heatflow boundary* elementen (type BQ4HT)



2-knoops *cooling pipe* elementen (type BQ4HT)

Modellering in DIANA

Thermische randvoorwaarden en koelpijpen



Omgevingstemperaturen
De omgevingstemperaturen bedragen conform ROK 1.3:

- Winter: 5 °C met een amplitude van 4 °C
- Lente: 12 °C met een amplitude van 6 °C
- Zomer: 21 °C met een amplitude van 5 °C
- Herfst: 12 °C met een amplitude van 6 °C

Grond- en grondwatertemperaturen
De grond- en grondwatertemperaturen bedragen conform ROK 1.3:

- Winter: 7 °C
- Lente: 12 °C
- Zomer: 16 °C
- Herfst: 12 °C

Aangepaste storttemperatuur: 10 °C

Modellering in DIANA

Thermische randvoorwaarden en koelbuizen

Warmte overgangscoefficient

O.b.v. formule:

$$\frac{1}{\alpha_{res}} = \frac{1}{\alpha_m} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i}$$

met:

α_m = warmte overdrachtscoëfficiënt tussen stromend water en buis, kan variëren van 500 tot 5000 W/(m² · °C)

d = dikte van de buis is 2 mm

λ = geleidingscoëfficiënt PE is 0,17 W/(m · °C)

=> α_{res} = resulterende warmteoverdrachtscoëfficiënt ≈ 80 W/(m² · °C)

Product van debiet en warmtecapaciteit

Debiet: 1,5 m³/h

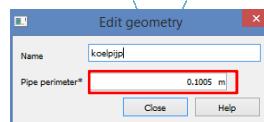
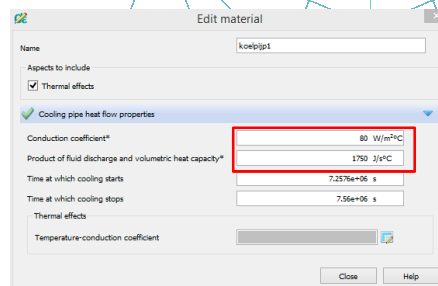
Soortelijke massa water: 1000 kg/m³

Specifieke warmtecapaciteit water: ca. 4200 J/(kg · °C)

=> 1,5 / 3600 x 1000 x 4200 = 1750 J/(s · °C)

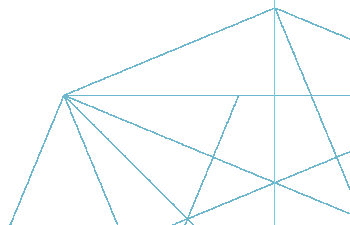
Perimeter

$\pi \times d_{\text{uitwendig}} = \pi \times 0,032 \text{ m} = 0,1005 \text{ m}$



Modellering in DIANA

Gefaseerde berekening

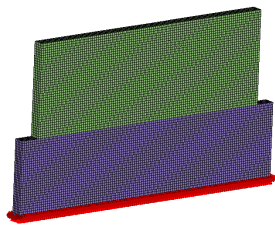
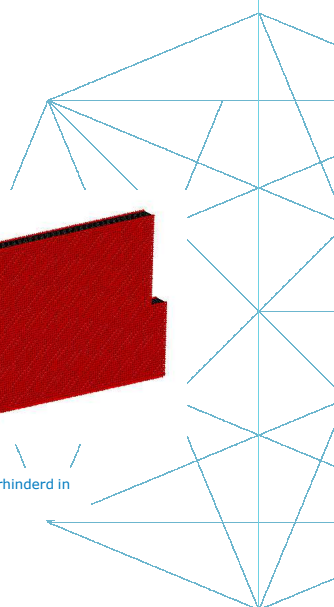


Fase	t [dagen]	Actie
Fase 1	0	Start OWB
	18	Leegpompen put
Fase 2a	84	Start poer = koeling
Fase 2b	87,5	Debet halveren
Fase 2c	91	Koeling uit
	96	Onkisten poer voor verdere isolatie
	105	Grond aanvullen tussen damwand poer
	224	Eind berekening

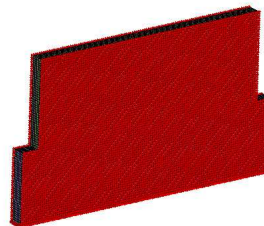
	Fase1	Fase2a	Fase2b	Fase2c
Element sets				
heatflow_owb_bovenkant_1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
heatflow_owb_bovenkant_1.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
heatflow_owb_bovenkant_2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_owb_bovenkant_2.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_owb_ouderkant	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_owb_zijkant	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_owb_zijkant.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_poer_bovenkant_1.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_poer_bovenkant_2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_poer_bovenkant_2.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_poer_zijkant	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
heatflow_poer_zijkant.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
koelpp1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
owb	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
poer1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
poer2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Support sets				
bc_owb_ouderkant	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bc_owb_symmetrie	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
bc_poer_symmetrie	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Modellering in DIANA

Mechanische randvoorwaarden



Mootmodel onverhinderd in dwarsrichting

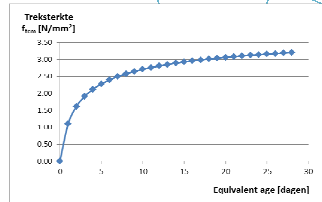
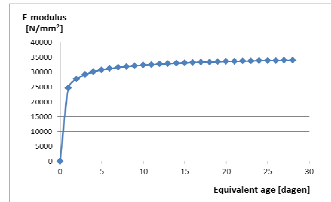
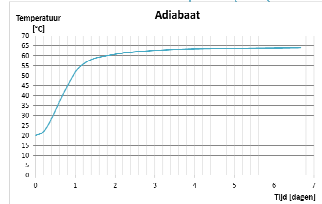


Mootmodel verhinderd in dwarsrichting

Modellering in DIANA

Materiaaleigenschappen beton

Eigenschap	Poer
Sterkteklasse	C35/45
Dichtheid ρ	2400 kg/m ³
E-modulus (ongescheurd) E_{cm}^*	34000 MPa
Druksterkte f_{cm}^*	43 N/mm ²
Treksterkte f_{ctm}^*	3,2 N/mm ²
Dwarscontractiecoëfficiënt ν	0,20
Thermische uitzettingscoëfficiënt α	1,2x10 ⁻⁵ °K ⁻¹
Warmtegeleidingscoëfficiënt λ	2,60 W/(m·°K)
Soortelijke warmte c	1,1 kJ/(kg·°K)
Cementtype en hoeveelheid	CEM III/B (270 kg) CEM I (70 kg)

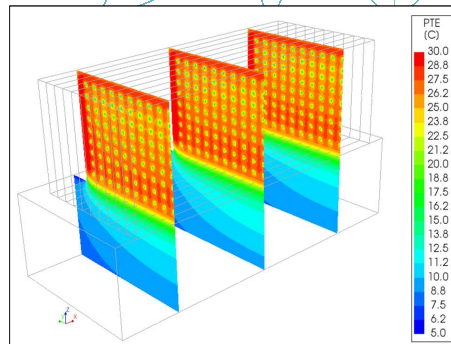
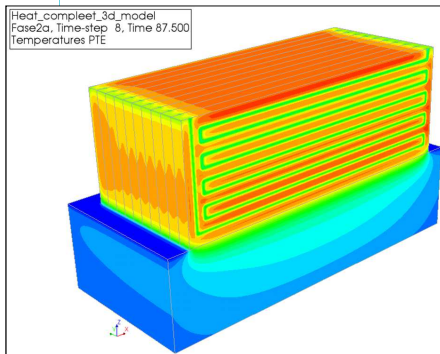


ABT / bouwen aan ambities / Hydratiewarme- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

17

Resultaten

Temperaturen

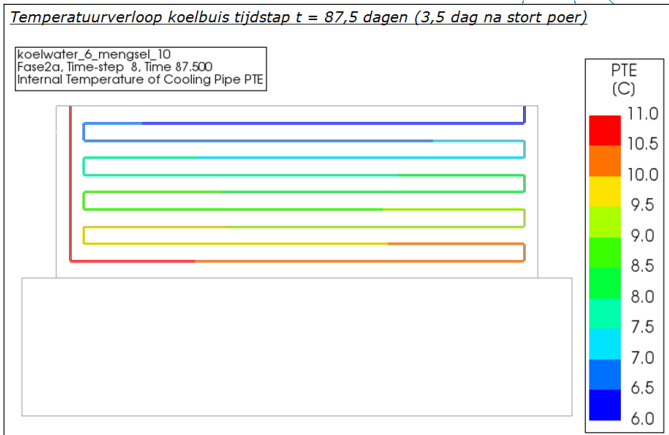


ABT / bouwen aan ambities / Hydratiewarme- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

18

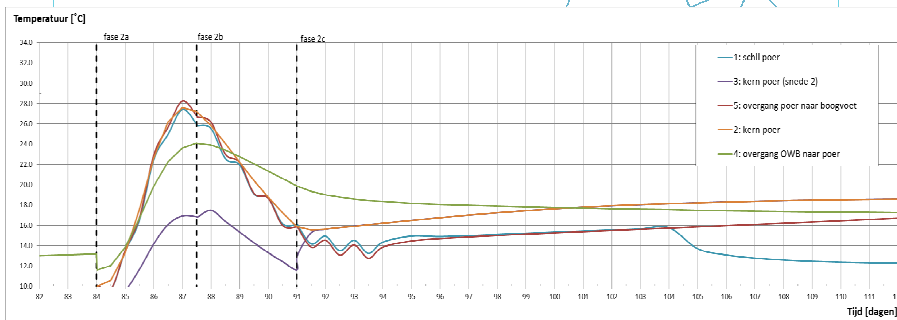
Resultaten

Temperaturen



Resultaten

Temperaturen



Resultaten

FTu waarden

ROK 1.3:

Toelaatbare trekspanningen bij kunstmatige koeling van verhardend beton
Bij de toetsing moet worden uitgegaan van een sterktecriterium van 0,5 maal de gemiddelde treksterkte ($0,5 f_{ctm}$). Voor lokale trekspanningen over 10% van de doorsnede mag een verhoogd criterium tot 0,7 maal de gemiddelde treksterkte van het beton worden gehanteerd, onder voorwaarde dat over de doorsnede een 'gemiddeld' sterktecriterium van 0,5 maal de gemiddelde treksterkte geldt.

In DIANA:

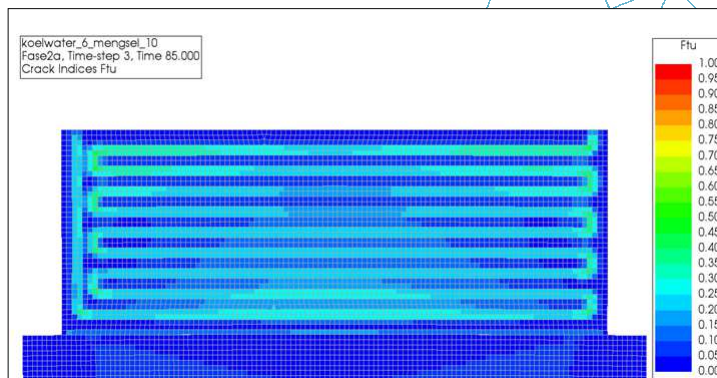
$$F_{tu} = \frac{\text{hoofdtrekspanning}(t)}{\text{gemiddelde treksterkte}(t)} = \frac{\sigma_1(t)}{f_{ctm}(t)}$$

Resultaten

FTu waarden

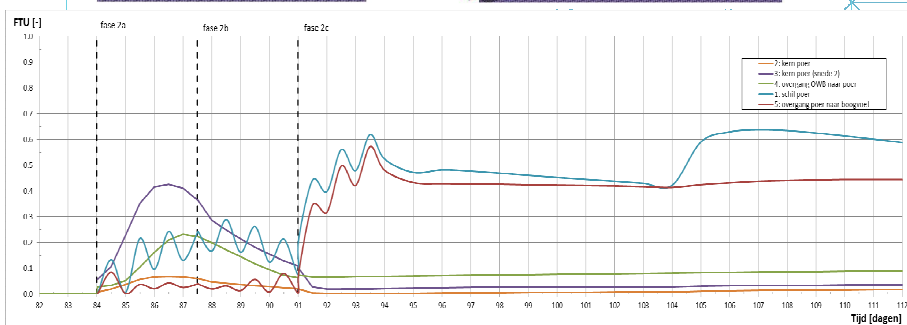
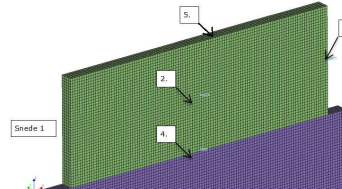
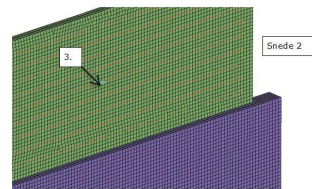
$$F_{tu} = \frac{\text{hoofdtrekspanning}(t)}{\text{gemiddelde treksterkte}(t)} = \frac{\sigma_1(t)}{f_{ctm}(t)}$$

koelwater_6_mengsel_10
Fase2a, Time-step 3, Time 85.000
Crack Indices Ftu



Resultaten

FTu waarden



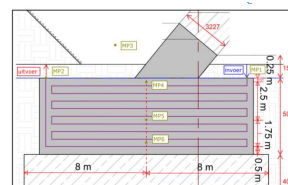
ABT / bouwen aan ambities / Hydratatie- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

23

Praktijk

Berekening vs. praktijk

- Koelingsberekening bevat veel parameters gebaseerd op aannames die invloed hebben op de resultaten
- Wegens onzekerheden in deze parameters:
 - Gevoeligheidsanalyses uitvoeren om de invloed van de verschillende parameters te onderzoeken
 - Gedegen uitvoeringsplan opstellen
- Uitvoeringsplan:
 - Temperatuurmetingen uitvoeren tijdens en na de stort
 - Criteria en maatregelen opstellen om o.b.v. meetresultaten het koelproces bij te sturen

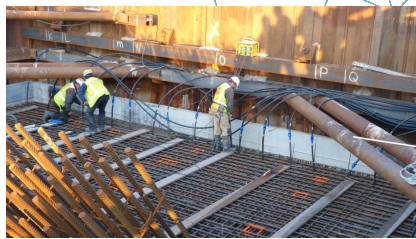
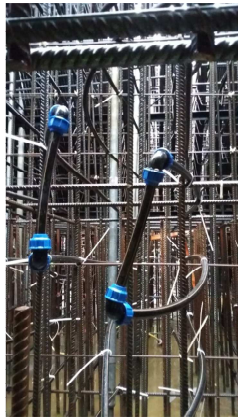


ABT / bouwen aan ambities / Warmtehydratie- en koelingsberekeningen fundamenteblokken spoorbrug Zuidhorn

24

Praktijk

Koelbuizen aangebracht



ABT / bouwen aan ambities / Hydratiewarme- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

25

Praktijk

Pompinstallaties en debietmeters



ABT / bouwen aan ambities / Hydratiewarme- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

26

Praktijk

Na stort



ABT / bouwen aan ambities / Hydratiewarmte- en koelingsberekeningen funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn

27

Conclusie

Eindresultaat

- Op basis van uitvoeringsplan is het koelproces goed weten bij te sturen
- Scheurvorming is goed beheerst gebleven
- Kanaalwater als koelwater was in dit geval een duurzame oplossing waarmee ca. 10.000 liter dieselolie bespaard is

ABT / bouwen aan ambities / Warmtehydratatie- en koelingsberekeningen fundamentsblokken spoorbrug Zuidhorn

28

Conclusie

Valkuilen / aandachtspunten

- Veel variabelen/onzekerheden → "bezint eer ge begint"
- Correcte materiaalgegevens is een must (adiabaat volgens leverancier etc.)
- Opletten dat aannames voor de berekening zo goed mogelijk zijn afgestemd op wat er werkelijk wordt uitgevoerd

→ Behoeftte aan richtlijn specifiek bedoeld voor gebruik FEM analyse bij dit type berekeningen

abt

www.abt.eu

Hydratatiewarmte- en koelingsberekening funderingsblokken spoorbrug Zuidhorn



Bijlage: Scheurwijdte berekening

Vereenvoudigde berekeningsmethode
(Hfdst. 5.8 Betonconstructies onder Temperatuur- en Krimpvervormingen)

Dikwandige constructie	Opgelegde vervormingen	Opgelegde vervormingen	Dikwandige constructie
	$N_{s,pr} = N_{s,pr}(A_{s,pr})$ (5.33)		
of:	$A_s \cdot \sigma_{s,pr} = \sigma_{s,pr} \cdot A_{s,pr}$ (5.34)	$w_{max} = 2 \cdot \left\{ \frac{0,4 \cdot \sigma_{s,pr} \cdot \sigma_{s,pr} \cdot \sigma_{s,pr} - n \cdot \sigma_{s,pr}}{E_{s,pr} - E_c} \right\}^{0,85}$ (5.38)	
waarin:	$N_{s,pr}$ = staafkracht in de primaire scheur $A_{s,pr}$ = staafdoorsnede in de trekband $\sigma_{s,pr}$ = staafspanning in de scheur (onverhoede scheurspanning) $\sigma_{s,pr}$ = bestendingsspanning op moment van scheuren $A_{s,pr}$ = effectief betonoppervlak trekband	Formule (5.38) is te herschrijven tot:	
Voor het effectief betonoppervlak $A_{s,pr}$ geldt (zie Fig. 5.14):	$A_{s,pr} = b \cdot h_{s,pr} = b \cdot (c + 2 \cdot \varnothing + \tan \alpha \cdot l_p)$ (5.35)	$\sigma_{s,pr} = \frac{N_{s,pr}}{A_{s,pr}} = \frac{N_{s,pr}}{b \cdot h_{s,pr}}$ (5.40)	
waarin:	b = beschouwde breedte (vaak 1000 mm) l_p = overdrachtelengte c = dekking \varnothing = staafdiameter α = hoek waaronder staafkracht in beton wordt geleid	Gecontroleerd moet worden of de berekende hoeverheid wapening niet leidt tot te kleine staafdiameters. Tenminste moet worden gecontroleerd of de opgelegde rek kleiner is dan de rek bij vertoed scheurspanning (formules (4.20a) of (4.20b)). Indien dit niet het geval is, dan zal men een kleinere staafdiameter moeten kiezen. Als het dan nog niet lukt, zal men of een meer gecompliceerde iteratieve berekening moeten uitvoeren met scheurwijdteformules voor het verhoede scheurspanning (formule (4.23a,b)), of men zal moeten terugvallen op een berekening met behulp van de dimensioneringsprogramma's.	
De hoogte $h_{s,pr}$ van de "trekband" wordt hier dus bepaald door de hoek α waaronder de spanningen in het beton worden geleid. Bij een spreidingshoek $\alpha = 50^\circ$ worden resultaten verkregen die redelijk overeenstemmen met de resultaten verkregen met behulp van de eerder behandelde dimensioneringsprogramma's. Voor de spreidingshoek $\alpha = 50^\circ$ geldt: $\tan \alpha = 1,2$. Daarmee wordt:	$h_{s,pr} = c + 2 \cdot \varnothing + 1,2 \cdot l_p$ (5.36)	Voor het bepalen van de hoeverheid wapening A_s om aan een gemiddelde scheurwijdte-eis te voldoen moeten de in tabel 5.1 aangegeven berekeningsstappen worden doorlopen.	
Voor de overdrachtelengte l_p geldt (formule (4.21)):	$l_p = \frac{1,2 \cdot w_{max} \cdot E_c}{\sigma_{s,pr}}$ (5.37)	Tabel 5.1 Rekenchema voor bepalen van randzonwapening om aan scheurwijdte-eis te voldoen.	
met w_{max} de gemiddelde kortdurende scheurwijdte in het onverhoede scheurspanningsvlak volgens formule (4.19b):		1. Bepaal staafspanning $\sigma_{s,pr}$ met formule (5.39). Hiervoor moet bekend zijn: • oriëntatie van het beton (betonstaafdikte f_{bet}) • bestendingsspanning op moment van scheuren ($\sigma_{s,pr} = 0,75 f_{bet}$, zie par. 4.3.6.2) • staafdiameter \varnothing • elasticiteitsmodulus van het staal ($E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$) • maximale toelaatbare scheurwijdte w_{max}	
		2. Bepaal overdrachtelengte l_p met formule (5.37).	
		3. Bepaal $h_{s,pr}$ met formule (5.36).	
		4. Bepaal A_s met formule (5.40).	
		5. Controleer of de opgelegde rek kleiner is dan de rek bij vertoed scheurspanning (formules (4.20a,b)).	

Fig. 5.14 Schema voor (horizontaal) evenwicht in een betonoortje tussen primaire en secundaire scheur op het moment van het ontstaan van de secundaire scheur.

Bijlage: Autogene krimp

ROK 1.4:

Voor de constructievloer op onderwaterbeton en overige situaties (zoals bijvoorbeeld later gestorte wanden op een vloer)

Adalabaat: volgens opgave betonleverancier

Soortelijke massa: $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$

Dwarscontractiecoëfficiënt: $\nu = 0,2$

Thermische uitzettingscoëfficiënt: $\alpha = 1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$

Warmtegeleidingscoëfficiënt: $\lambda = 4,0 \text{ W/(m K)}$ voor $t = 0$ dagen
 $\lambda = 2,6 \text{ W/(m K)}$ voor $t = 28$ dagen

Warmteconvectiecoëfficiënt: constructievloer op onderwaterbeton:
 $\alpha_{top} = 17,6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, bovenkant, windsnelheid (v) is 3,0 m/s
 $\alpha_{top} = 5,6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, onder- en zijkant, windsnelheid (v) is 0 m/s
wand op vloer:
 $\alpha_{top} = 17,6 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, zijkant, bovenkant, windsnelheid (v) is 3,0 m/s
 $\epsilon = 1,1 \text{ kJ/(kg K)}$

Soortelijke warmte: niet meenemen omdat:

Krimp (m.u.v. autogene krimp):

1. Plastische krimp kan door een goede nabehandeling voorkomen worden.
2. Chemische krimp nauwelijks uitwendige vormverandering tot gevolg heeft.
3. Spanningen ten gevolge van uittroingskrimp langzaam in de tijd optreden en daardoor zullen weglaxeren.

Voor constructies waarbij de hoeveelheid in het werk gestort beton 5000 m³ of meer bedraagt, moet de grootte van de autogene krimp bekend c.q. bepaald zijn. In het kader van de bepaling van de kans op scheurvorming moeten de bepaalde waarden voor de autogene krimp in rekening worden gebracht.

Toelichting:
Tot voor kort werd aangenomen dat autogene krimp geen significante rol speelt bij water-cement factoren groter dan 0,4. Uit recente ervaringen en onderzoek is echter gebleken dat bij het gebruik van CEM III ook bij water-cement factoren van 0,5 de grootte van de autogene krimp significant kan zijn. De in NEN-EN 1992-1-1, 3.1.4 (6) gegeven formules voor de bepaling van de grootte van de autogene krimp zijn volgens recent onderzoek geschikt bij gebruik van CEM I, maar onderschatten de grootte van de autogene krimp bij CEM III echter significant. Door de niet te verwaarlozen autogene krimp wordt, bij gebruik van CEM III, de kans op scheurvorming bij verhinderde temperatuurvervormingen als gevolg van het hydratatieproces significant vergroot. Gezien het voorgaande is het noodzakelijk het verschijnsel autogene krimp in de koelberekeningen mee te nemen. Daartoe moet de grootte van de autogene krimp door middel van beproeving op het betreffende betonmengsel worden bepaald.

Preadvies rapport
SBRUCRnet:

