



TNO innovation
for life



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

› **DWARSKRACHTCAPACITEIT EERSTE HEINENOORDTUNNEL**
GERRIT WOLSINK & HENCO BURGGRAAF

› INHOUD

DWARSKRACHTCAPACITEIT EERSTE HEINENOORDTUNNEL

01. PROBLEEMSTELLING

02. ONTWIKKELING NORMEN

03. EERSTE BEREKENINGEN

04. NIEUWE INZICHTEN PROEVEN

05. NIEUWE BEREKENINGEN TNO

06. SCHAALFACTOR

07. DETERMINISTISCHE ANALYSE

08. PROBALISTISCHE ANALYSE

09. VERBORGEN RESERVES

10. BEWEZEN STERKTE

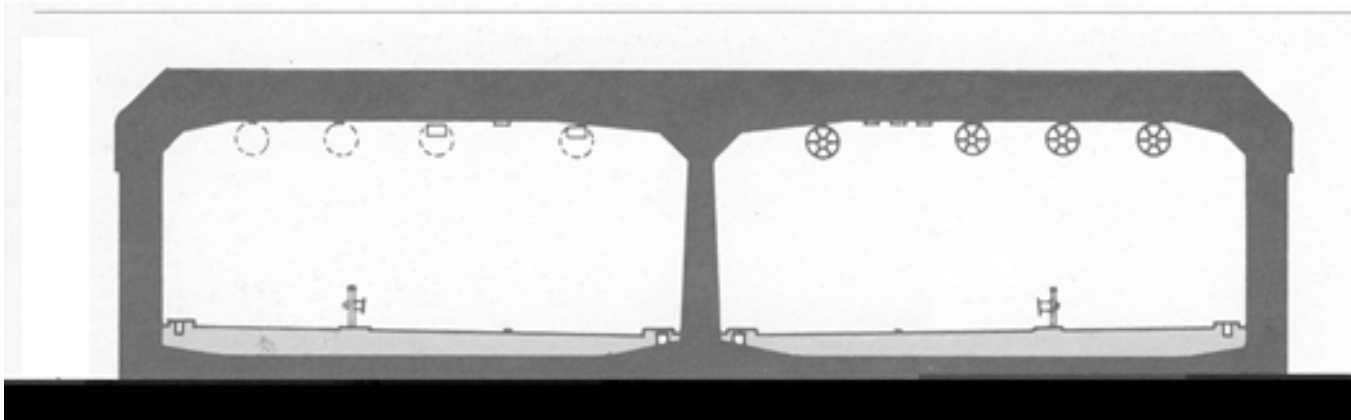
11. CONCLUSIES



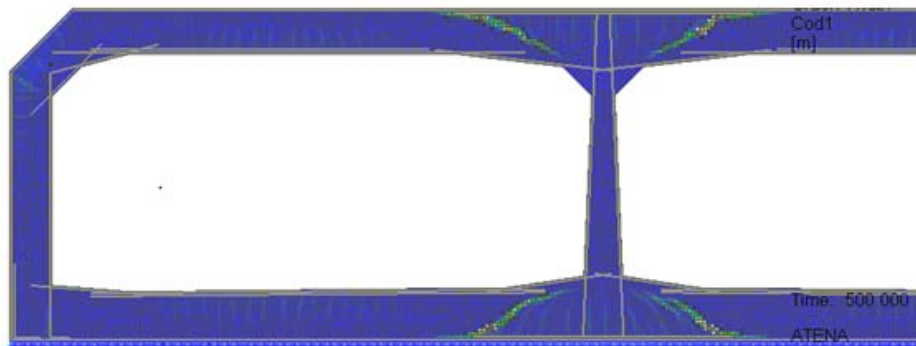
Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

TNO innovation
for life

› 1. PROBLEEMSTELLING

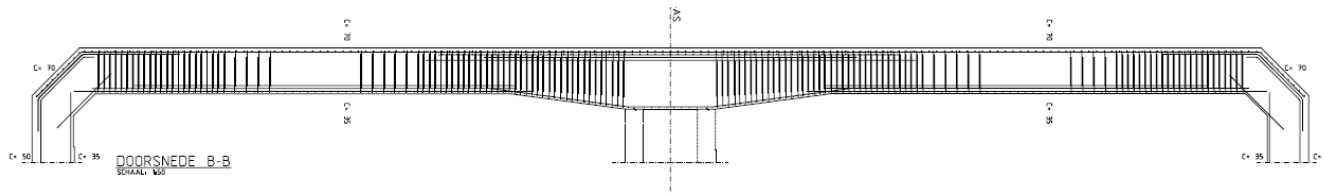


Dwarsdoorsnede 1^e Heinoortunnel (oudere tunnel met relatief grote overspanning)

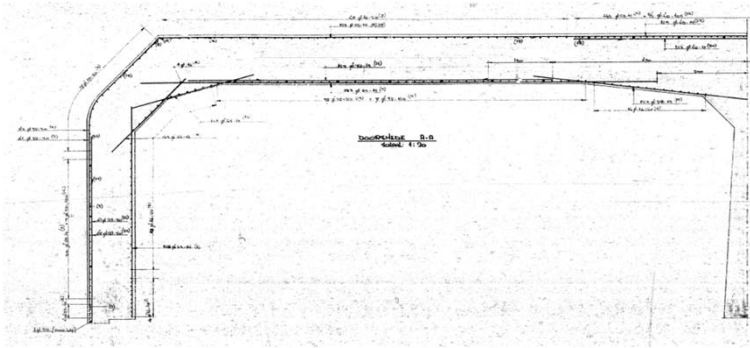


Potentieel bezwijken op dwarskracht

› 1. PROBLEEMSTELLING



Dak **Thomassentunnel** (geopend **2004**); **met** dwarskrachtwapening



2 voorbeelden van een **nieuwere**
en **oudere** tunnel

Dak **1^e Heinenoordtunnel** (geopend **1969**); **zonder** dwarskrachtwapening

Wat is de reden dat ongeveer vergelijkbare **oude tunnels niet** en **nieuwe tunnels wel** van dwarskrachtwapening zijn voorzien?

Hamvraag: Is dat al of niet problematisch?

2. GESCHIEDENIS ONTWIKKELING NORMEN

1^e Heinenoordtunnel geopend in 1969

Art. 42 Inwendige spanningen

Spanningen door dwarskrachten (schuine trekspanningen)

2. De schuine trekspanningen mogen worden berekend volgens de formule:

$$\sigma_b = \frac{T}{b \cdot z} \quad \text{of} \quad \sigma_b = \frac{3}{2} \cdot \frac{T}{b \cdot h_t}$$

Hierin betekent:

σ_b = de schuine trekspanning in het beton;

T = de dwarskracht;

z = inwendige hefboomarm van de gescheurde doorsnede.

Onder b wordt bij platen en rechthoekige balken verstaan de liggerbreedte en bij T-balken de ribbreedte b_0 .

Toelaatbare spanningen;
zonder veiligheidscoëfficiënt

**Geen schaalfactor;
verwachtingswaarden**

Gewapend-Betonvoorschriften

GBV 1962

NEN 1009

december 1962

Art. 44 Toelaatbare spanningen

1. De toelaatbare spanningen zijn, behoudens het bepaalde in de leden 2 t/m 7, aangegeven in onderstaande tabel.

Tabel XIII

Belastingwijze	soort van de spanning	Toelaatbare spanning in (kgf/cm ² *)		
		K 160	K 225	K 300
<i>Centrische oplegdruk</i>	σ'_b	40	55	75
<i>Excentrische oplegdruk</i>	$\bar{\sigma}'_b$	55	75	100
<i>Buiging</i>				
voor beton	$\bar{\sigma}'_b$	55	75	100
voor staalsoorten:				
QR 22	$\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}'_a$	1200	1300	1300
QR 24	$\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}'_a$	1200	1400	1400
QR 32 en QRn 32	$\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}'_a$	1200	1800	1800
QR 40 en QRn 40	$\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}'_a$	1200	2200	2200
QR 48 en QRn 48	$\bar{\sigma}_a, \bar{\sigma}'_a$	1200	2600	2600
<i>Dwarskracht</i>				
zonder wapening	$\bar{\sigma}_b$	6	7	8
met wapening	$\bar{\sigma}_{b \max}$	14	17	20

2. GESCHIEDENIS ONTWIKKELING NORMEN

Art. E-504. DWARSKRACHT

504.1 Rekenwaarde voor de optredende schuifspanning

- a. De rekenwaarde voor de optredende schuifspanning τ_d moet, behalve bij geconcentreerde lasten op platen, worden bepaald uit:

$$\tau_d = \frac{T_d}{bh}$$

waarin:

T_d = de rekenwaarde voor de dwarskracht in de grenstoestand met betrekking tot bezwijken;

b = de breedte van de betondoorsnede. Bij I-, T-, L- en E-constructies moet hiervoor de minimale breedte b_0 van het lijf worden aangenomen;

h = de nuttige hoogte van de betondoorsnede.

504.2 Dwarskrachtwapening

504.2.1 Algemeen

Indien $\tau_d \leq \tau_1$, dan is geen berekende dwarskrachtwapening nodig. Is $\tau_d > \tau_1$, dan moet het verschil $\tau_d - \tau_1$ door dwarskrachtwapening worden opgenomen.

Tenzij anders vermeld, moet voor τ_1 worden aangehouden:

$$\tau_1 = 0,5 f_b$$

waarin:

f_b = de rekenwaarde voor de betontreksterkte (voor grindbeton zie art. A-204.5.3)

504.2.4 Buiging met druk

In constructies, waarin behalve een buigend moment ook een normaaldrukkracht N'_d moet worden overgebracht, mag de waarde van τ_1 worden verhoogd tot:

$$\tau_1 = 0,5 f_b + \frac{0,15 N'_d}{A_b}$$

waarin:

A_b = de oppervlakte van de bruto betondoorsnede.

Voorschriften Beton VB 1974

Deel E Gewapend beton Aanvullende bepalingen

De meningen over de grootte van de schuifsterkte van de buigdrukzone en de grootte van de treksterkte van de buigdrukzone, lopen nogal uiteen.

De geadviseerde τ_1 -waarden zijn echter over het algemeen lager dan de tot nu toe gebruikelijke, bovendien wordt de grootte van τ_1 veelal – behalve aan de betonkwaliteit – gekoppeld aan het hoofdtrekwapeningspercentage.

Op grond hiervan is de τ_1 -waarde verlaagd van globaal f_b (GBV 1962) tot $0,5 f_b$.

Trendbreuk !!!

204.5.3 Rekenwaarde voor de treksterkte

Voor grindbeton moet als rekenwaarde voor de treksterkte f_b worden aangehouden: $f_b = 0,7 f_{bk}$. Deze rekenwaarden zijn in tabel A-15 aangegeven.

Tabel A-15

betonkwaliteit	karakteristieke betontreksterkte f_{bk} na 28 dagen verharding in N/mm ² (kgf/cm ²)		rekenwaarde voor de betontreksterkte f_b in N/mm ² (kgf/cm ²)	
B 12,5	1,4	(14)	1,0	(10)
B 17,5	1,6	(16)	1,1	(11)
B 22,5	1,8	(18)	1,3	(13)
B 30	2,2	(22)	1,5	(15)
B 37,5	2,5	(25)	1,8	(18)
B 45	2,8	(28)	2,0	(20)
B 52,5	3,1	(31)	2,2	(22)
B 60	3,5	(35)	2,5	(25)

Geen schaalfactor; geen invloed langswapening; rekenwaarden

2. GESCHIEDENIS ONTWIKKELING NORMEN/REGELGEVING

rijkswaterstaat

directie sluizen en stuwen
postbus 20.000 ; 3502 LA utrecht
tel. 030-859111

RAPPORT B-84-522/62.5.0804

DWARSKRACHT

ibbc - tno

instituut tno voor bouwmaterialen en bouwconstructies
postbus 49 ; 2600 AA delft
tel. 015 - 138222

IBBC-TNO formules (1985)

Inclusief:

- Specifiek voor verdeelde belastingen
- Invloed betonsterkte
- Invloed langswapening
- Invloed normaalkracht
- Invloed afschuiningen
- Invloed statisch onbepaaldheid
- Invloed 'afsnuiten' dwarskrachtlijn
- **Invloed schaalfactor:**

$$\tau_u :: \sqrt[4]{h_o/h}$$

h_o =referentiehoogte=300 mm

dikte dak Heinenoordtunnel ca. 1200 mm

Dwarskracht formules specifiek voor tunnels

(t.o.v. VB 74 'voordeliger')

2. GESCHIEDENIS ONTWIKKELING NORMEN

NEN 6720

TGB 1990 - Voorschriften Beton - Constructieve eisen en rekenmethoden (**VBC 1995**)

8.2 Dwarskracht

8.2.1 Toetsingscriterium

Bij op dwarskracht belaste liggers en platen moet in iedere doorsnede vanaf de dag van de oplegging worden voldaan aan de voorwaarde:

$$\tau_d \leq \tau_u$$

waarin:

τ_d is de rekenwaarde van de schuifspanning volgens 8.2.2;

$$\tau_u = \tau_1 + \tau_v \geq \tau_2$$

τ_1 is de uiterst opneembare schuifspanning indien geen dwarskrachtwapening wordt toegepast, bij gewapend beton en/of voorgespannen beton volgens 8.2.3.1 tot en met 8.2.3.3 en bij ongewapend beton volgens 8.2.3.3;

8.2.2 Rekenwaarde van de schuifspanning

De rekenwaarde van de schuifspanning in op dwarskracht belaste doorsneden moet worden bepaald uit:

$$\tau_d = \frac{V_d}{bd}$$

waarin:

V_d is de rekenwaarde van de dwarskracht in de beschouwde doorsnede;

b is de breedte van de betondoorsnede; bij I-, T-, L- en [-profielen en dergelijke moet hiervoor de breedte b_w van het lijf worden aangehouden;

d is de nuttige hoogte van de beschouwde doorsnede, betrokken op het zwaartepunt van de totale buigtrekwapening;

8.2.3 Uiterst opneembare schuifspanning

8.2.3.1 Op buiging belaste doorsneden

De uiterst opneembare schuifspanning τ_1 in een doorsnede moet worden bepaald uit:

$$\tau_1 = 0,4 f_{tk} k_h \sqrt[3]{\omega_o} \leq 0,4 f_b$$

waarin:

$k_\lambda = \frac{12}{81} \sqrt[3]{\frac{A_o}{bd}} \leq 1$ voor consoles en voor liggerdelen met een vrije eindoplegging, waarbij tussen de belasting en de eindoplegging een drukdiagonaal kan worden gevormd;

waarin:

$$g_\lambda = 1 + \lambda_v^2 \quad \text{voor } \lambda_v \geq 0,6;$$

$$g_\lambda = 2,5 - 3 \lambda_v \leq 1,36 \quad \text{voor } \lambda_v < 0,6.$$

$k_\lambda = 1$ voor overige situaties;

λ_v is de dwarskrachtslankheid van een console of van een liggerdeel met een vrije eindoplegging waarin de beschouwde doorsnede is gelegen.

$$\lambda_v = \frac{M_{dmax}}{d V_{dmax}}$$

M_{dmax} is de maximale absolute waarde van M_d in het liggerdeel;

V_{dmax} is de maximale absolute waarde van V_d in het liggerdeel;

d is de nuttige hoogte, betrokken op het zwaartepunt van de totale buigtrekwapening; voor gedrongen liggers volgens 8.1.4 geldt: $d = h$;

$$k_h = 1,6 - h \leq 1,0 \text{ waarin } h \text{ in meters;}$$

$$\omega_o = \frac{100 (A_s + A_p)}{b d} \geq 2,0 \text{ en } \leq 0,7 - 0,05 \lambda_v \text{ is het aanwezig wapeningspercentage van de buigtrekwapening in de beschouwde doorsnede;}$$

b is de breedte als omschreven in 8.2.2;

Met schaalfactor; met invloed langswapening; rekenwaarden
Geen groot verschil meer met de IBBC-TNO formules

3. EERSTE HERBEREKENINGEN HEINENOORDTUNNEL

RESULTATEN ORIËNTERENDE DETERMINISTISCHE BEREKENINGEN (RWS 2005)

Nr.	Rekenmethodiek	Omschrijving berekeningsvariant	Laagste veiligheidscoëfficiënt dak		Laagste veiligheidscoëfficiënt vloer	
			Exclusief. beschermlaag	Inclusief beschermlaag	Exclusief ballastbeton	Inclusief ballastbeton
5	VBC 1995 met afsnuiten	B30**), gronddekking 1 m, GHW=1,2 m+NAP;	[0,92]	[1,00]	[0,98]	[1,19]
6		B30**), gronddekking 1 m, HHW=3,8 m+NAP;	[0,81]	[0,87]	[0,85]	[1,01]
7		B30**), gronddekking 3 m, GHW=1,2 m+NAP;	[0,85]	[0,91]	[0,96]	[1,16]
8		B30**), gronddekking 3 m, HHW=3,8 m+NAP;	[0,75]	[0,80]	[0,83]	[0,99]
13	IBBC-TNO formules	B30**), gronddekking 1 m, GHW=1,2 m+NAP;	[0,91]	[0,97]	[0,87]	[1,19]
14		B30**), gronddekking 1 m, HHW=3,8 m+NAP;	[0,81]	[0,85]	[0,77]	[1,04]
15		B30**), gronddekking 3 m, GHW=1,2 m+NAP;	[0,82]	[0,87]	[0,86]	[1,15]
16		B30**), gronddekking 3 m, HHW=3,8 m+NAP;	[0,73]	[0,77]	[0,76]	[1,01]

- › De in de bovenstaande tabel weergegeven veiligheidscoëfficiënten dienen volgens de VBC 1995 een waarde $\geq 1,4$ te hebben (bij maatgevende extreme waterstanden)
- › Daar wordt duidelijk niet aan voldaan.
- › Deze conclusie leidde tot het uitvoeren van probabilistische berekeningen door TNO
- › **Opmerking: het verschil tussen de VBC 1995 en de IBBC-TNO formules is niet zo groot** (geldt ook voor de huidige Eurocode NEN-EN 1992-1-1)

3. EERSTE HERBEREKENINGEN HEINENOORDTUNNEL

RESULTATEN PROBABILISTISCHE ANALYSE DOOR TNO

- › Met behulp van toepassing IBBC-TNO formules

Tabel 6.4: Waarden van β en P_f bij verschillende kubusdruksterkten.

$\mu(f_{bm})$ [N/mm ²]	β [-]	P_f [-]
35	2,86	$2,1 \cdot 10^{-03}$
40	3,06	$1,1 \cdot 10^{-03}$
45	3,25	$5,8 \cdot 10^{-04}$
50	3,42	$3,1 \cdot 10^{-04}$
55	3,59	$1,7 \cdot 10^{-04}$
60	3,74	$9,2 \cdot 10^{-05}$
65	3,88	$5,2 \cdot 10^{-05}$

voor zout water $\beta=3,65$

- › Voor nieuwbouw is voor een CC3 constructie $\beta=4,3$ (=betrouwbaarheidsindex) vereist
- › Voor een bestaande constructie was de conclusie in 2009 dat aan het Bouwbesluit wordt voldaan ($\beta \geq 3,3$ à 3,4)
- › 'Rekenprobleem' definitief opgelost? Helaas niet.

4. NIEUWE INZICHTEN SCHAALEFFECTOR

PROEVEN TUD (2018)



Proeven op balken bij TUD Delft, tot een hoogte van 1200 mm

(2018-2019)

H123

- Key parameters $f_{cube,m} = 86.9$ MPa $\rho = 1.12\%$ $d = 1150$ mm $a = 4500$ mm

Aanzienlijk schaaleardeffect aanwezig



4. NIEUWE INZICHTEN SCHAAFFACTOR PROEVEN TUD

NEN-EN 1992-1-1

Eurocode 2: Ontwerp en berekening van
betonconstructies – Deel 1-1: Algemene regels
en regels voor gebouwen

(1) De rekenwaarde van de dwarskrachtweerstand $V_{Rd,c}$ is gegeven door:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \quad (6.2.a)$$

met een minimum van

$$V_{Rd,c} = (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) b_w d \quad (6.2.b)$$

waarin:

f_{ck} is in Mpa;

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \text{ met } d \text{ in mm;}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0,02;$$

A_{sl} is de oppervlakte van de doorsnede van de trekwapening, die $\geq (l_{bd} + d)$ voorbij de beschouwde doorsnede doorloopt (zie figuur 6.3);

b_w is de kleinste breedte van de dwarsdoorsnede in de zone onder trek (mm);

$\sigma_{cp} = N_{Ed}/A_c < 0,2 f_{cd}$ (MPa);

N_{Ed} is de normaalkracht in de dwarsdoorsnede ten gevolge van belasting of voorspanning (N) ($N_{Ed} > 0$ voor druk). De invloed van opgelegde vervormingen op N_E mag zijn verwaarloosd.

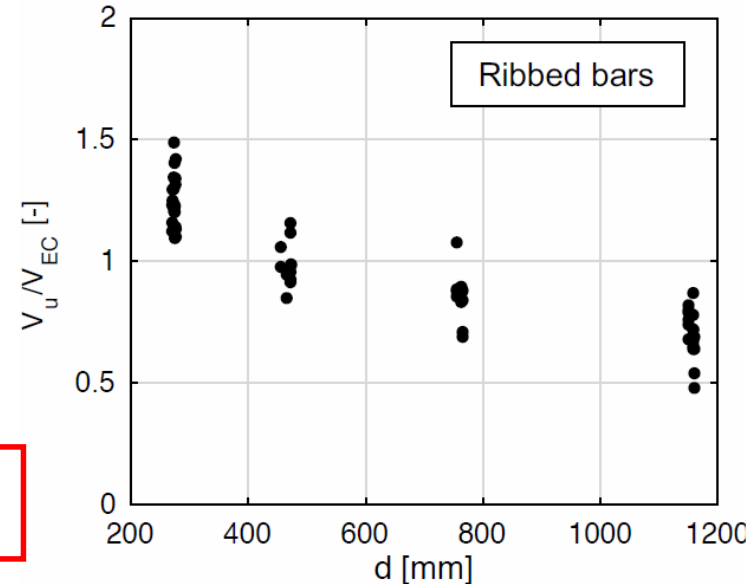
A_c is de oppervlakte van de betonddoorsnede (mm²);

Met schaalfactor; met invloed langswapening; rekenwaarden

› 4. NIEUWE INZICHTEN SCHAALFACTOR PROEVEN TUD

De Eurocode is een slechte en tevens **onveilige voorspeller voor hogere balken.**

De schaalfactor is, bij hogere balken, aanzienlijk groter dan de Eurocode aangeeft.



Verhouding beproefde bezwijkwaarde en berekende waarde Eurocode
 ≥ 1 is veilig; < 1 is onveilig

Department of Design and Construction
Section of Structural and Building Engineering
Concrete Structures

Date October 2019
Status Draft
Version 0.02

Bron: **Shear behaviour of deep RC slab strips with low reinforcement ratio**

Y. Yang

Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

TNO innovation
for life

› 5. NIEUWE PROBABILISTISCHE BEREKENINGEN DOOR TNO

- › Probabilistische berekening uit ca. 2009 herhalen, maar dan incl. de nieuwe inzichten betreffende de schaalfactor.
- › Kunnen er nog verborgen reserves in rekening worden gebracht? Welke?
- › De 1e Heinoordtunnel functioneert al ruim 50 jaar. In die tijd heeft deze tunnel al vrij hoge waterstanden doorstaan. Hoe beïnvloedt deze 'bewezen sterkte' de faalkans ($\beta = ??$)

ZIE VERDER DE PRESENTATIE DOOR HENCO BURGGRAAF (TNO)

› 6. SCHAALFACTOR

METHODEN VOOR BEPALING GEMIDDELTE AFSCHUIFCAPACITEIT

- 1) TNO-IBBC methode met originele schaalfactor:

$$\tau_{11;m;k} = 0,263(1 + 0,0125f'_{cm})(1 + \omega_o) \left(1 + 1,213 \left|\frac{1}{\lambda}\right|\right) \left(\frac{d}{d_o}\right)^{-0,25} f_1$$

- 2) TNO-IBBC methode met nieuwe schaalfactor:

$$\tau_{11;m;k} = 0,263(1 + 0,0125f'_{cm})(1 + \omega_o) \left(1 + 1,213 \left|\frac{1}{\lambda}\right|\right) \left(\frac{100\rho_1 d_{dg}}{k_p \sqrt[3]{\frac{a_{cs}^2 d}{16}}}\right)^{\frac{3}{7}} f_1$$

- 3) Voorstel TU Delft voor nieuwe Eurocode met nieuwe schaalfactor:

$$v_{Rm} = 0,87 \left(\frac{100\rho_1 d_{dg}}{k_p \sqrt[3]{\frac{a_{cs}^2 d}{16}}}\right)^{\frac{3}{7}} f_{cm}^{2/7}$$

6. SCHAALFACTOR

KALIBRATIE MET PROEVEN TU DELFT

Proef	$f_{c,cube}$ [MPa]	d [mm]	M/Vd [-]	ρ [%]	V_u [kN]	τ_u [MPa]	Methode 1		Methode 2		Methode 3	
							τ_{IBBC} [MPa]	τ_u/τ_{IBBC} [-]	$\tau_{IBBC-kd}$ [MPa]	$\tau_u/\tau_{IBBC-kd}$ [-]	τ_{ECN} [MPa]	τ_u/τ_{ECN} [-]
H301A	86.58	1160	3.45	0.27	136.0	0.39	0.67	0.58	0.12	3.31	0.37	1.06
H302A	87.05	1160	3.45	0.27	126.7	0.36	0.67	0.54	0.12	3.09	0.37	0.99
H351A	87.32	1160	3.88	0.36	104.7	0.30	0.70	0.43	0.13	2.24	0.40	0.75
H352A	89.28	1160	3.88	0.36	116.9	0.34	0.71	0.47	0.13	2.49	0.40	0.84
H401A	81.25	1158	3.88	0.42	144.3	0.42	0.70	0.59	0.15	2.81	0.43	0.96
H402A	84.12	1158	3.88	0.42	172.4	0.50	0.72	0.69	0.15	3.32	0.43	1.15
H403A	81.67	1158	3.88	0.42	191.7	0.55	0.71	0.78	0.15	3.73	0.43	1.28
H404A	82.04	1158	3.45	0.42	157.0	0.45	0.73	0.62	0.16	2.86	0.45	1.01
H601A	86.40	1158	3.89	0.57	172.4	0.50	0.80	0.62	0.19	2.63	0.49	1.01
H602A	86.08	1158	3.89	0.57	173.9	0.50	0.80	0.62	0.19	2.66	0.49	1.02
H603A	86.08	1158	2.59	0.57	185.9	0.54	0.90	0.60	0.24	2.26	0.55	0.97
H604A	86.08	1158	3.02	0.57	159.1	0.46	0.86	0.53	0.22	2.12	0.53	0.87
H851C	82.99	1150	3.91	0.85	226.8	0.66	0.93	0.71	0.26	2.50	0.59	1.12
H852A	82.99	1150	3.91	0.85	224.0	0.65	0.93	0.70	0.26	2.47	0.59	1.11
H853A	82.99	1150	2.61	0.85	188.2	0.55	1.04	0.53	0.33	1.66	0.66	0.83
H121A	84.12	1151	2.60	1.14	236.3	0.68	1.21	0.57	0.43	1.58	0.75	0.92
H122A	84.12	1151	2.60	1.14	230.6	0.67	1.21	0.55	0.43	1.54	0.75	0.89
H123A	82.99	1150	3.91	1.14	242.9	0.70	1.07	0.66	0.34	2.04	0.67	1.06
Gem							0.60		Gem	2.52	Gem	0.99
Sd							0.09		Sd	0.61	Sd	0.13
COV							0.145		COV	0.244	COV	0.132

7. DETERMINISTISCHE ANALYSE

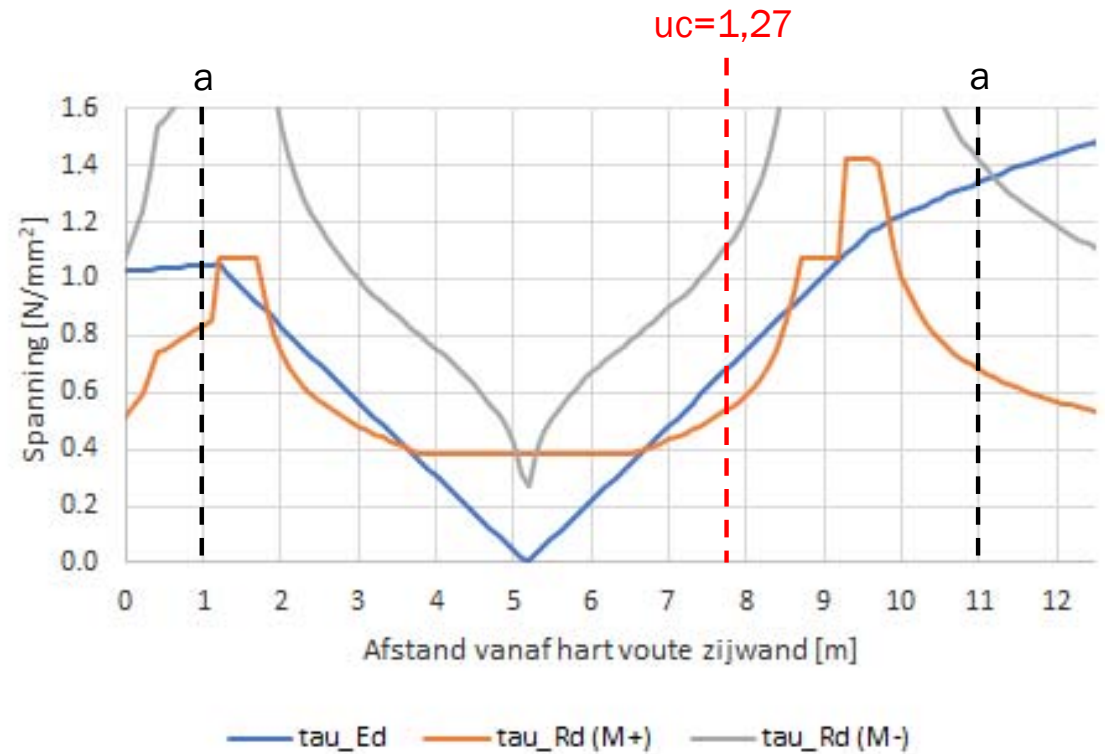
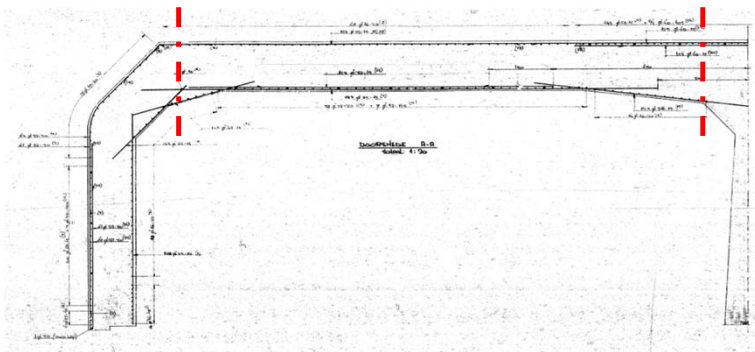
BEPALING KRITISCHE DOORSNEDE

Gemiddelde waarde afschuifcapaciteit:

$$v_{Rm} = 0,99 \cdot 0,87 k_d f_{cm}^{2/7}$$

Rekenwaarde afschuifcapaciteit:

$$v_{Rd} = 0,99 \cdot 0,87 k_d f_{ck}^{2/7} / 1,5$$



› 8. PROBABILISTISCHE ANALYSE

FAALKANSMODEL (GRENSTOESTANDSFUNCTIE)

› Grenstoestandsfunctie:

$$Z = v_R - \tau_{hw}$$

Waarin:

v_R = Afschuifcapaciteit

τ_{hw} = Dwarskrachtbelasting

› Faalkans:

$$P_f = P(Z < 0)$$

› Betrouwbaarheidsindex:

$$\beta = \Phi^{-1}(P_f)$$

8. PROBABILISTISCHE ANALYSE

FAALKANSMODEL (AFSCHUIFCAPACITEIT)

› Afschuifcapaciteit:

$$v_R = facM \cdot facT \cdot v_{Rm}$$

Waarin:

$$facM = 1 + uV$$

$$v_{Rm} = 0,99 \cdot 0,87 \left(\frac{100\rho_1 d_{dg}}{k_p \sqrt[3]{\frac{a_{cs}^2 d}{16}}} \right)^{\frac{3}{7}} f_{cm}^{2/7}$$

$$a_{cs} = f\left(\frac{M}{V}, N\right)$$

$$N = facN(C_1 + C_2 h_w)bd$$

Variabele	Omschrijving	Waarde	μ	σ	Verdelingstype	Eenheid
u	Modelonzekerheid afschuifcapaciteit	-	0	1	Normaal	[-]
V	Variatiecoëfficiënt afschuifcapaciteit	0,132	-	-	Deterministisch	[-]
$facT$	Langeduurfactor	1,0	-	-	Deterministisch	[-]
ρ_1	Wapeningspercentage	0,79	-	-	Deterministisch	[-]
d_{dg}	Ruwheid dwarskrachtsscheur	40	-	-	Deterministisch	[mm]
k_p	Reductiefactor type wapening	1,0	-	-	Deterministisch	[-]
M/Vd	Dwarskrachtsslankheid	1,67	-	-	Deterministisch	[-]
d	Nuttige hoogte	1094	-	-	Deterministisch	[mm]
$facN$	Modelfactor drukspanning	-	0,9	0,05	Normaal	[-]
C_1	Constante permanente normaalspanning	-	0,2751	0,016506	Lognormaal	[MPa]
C_2	Constante variabele normaalspanning	0,0487	-	-	Deterministisch	[MPa/m]
h_w	Waterstand t.o.v. bovenkant tunneldak	Statistiek 2017 (HydraRing versie 17.3.0.0)				[m]
f_{cm}	Gemiddelde cilinderdruksterkte	-	58,8	8,2	Lognormaal	[MPa]

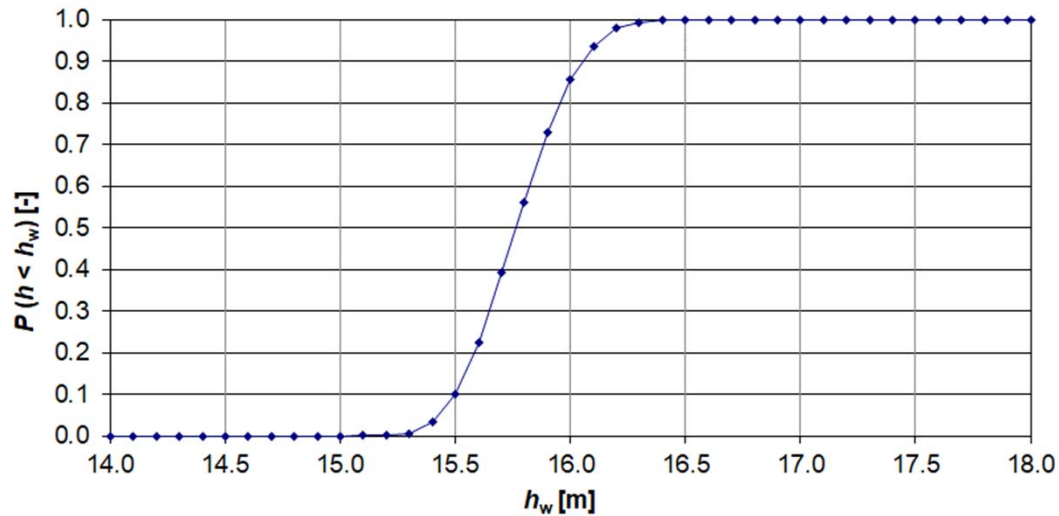
8. PROBABILISTISCHE ANALYSE

FAALKANSMODEL (DWARSKRACHTBELASTING)

› Dwarskrachtbelasting:

$$\tau_{hw} = facS(C_3 + C_4 h_w)$$

Variabele	Omschrijving	Waarde	μ	σ	Verdelingstype	Eenheid
<i>facS</i>	Modelfactor schuifspanning	-	1	0,05	Normaal	[-]
<i>C₃</i>	Constante permanente schuifspanning	-	0,1712	0,010272	Lognormaal	[MPa]
<i>C₄</i>	Constante variabele schuifspanning	0,024	-	-	Deterministisch	[MPa/m]
<i>h_w</i>	Waterstand t.o.v. bovenkant tunneldak	Statistiek 2017 (HydraRing versie 17.3.0.0)				[m]



› 8. PROBABILISTISCHE ANALYSE

RESULTAAT FAALKANSBEREKENING

- › FORM-berekening met de probabilistische toolbox Prob2B™ geeft betrouwbaarheidsindex $\beta = 2,52$
- › Relevante betrouwbaarheidsniveaus:
 - › NEN 8700 afkeurniveau: $\beta = 3,1$
 - › RBK gebruikniveau: $\beta = 3,3$
 - › NEN 8700 verbouwniveau (terugvaloptie): $\beta = 3,6$
- › Met nieuwe schaalfactor wordt rekenkundig niet voldaan aan NEN 8700 afkeurniveau

› 9. VERBORGEN RESERVES RESERVES

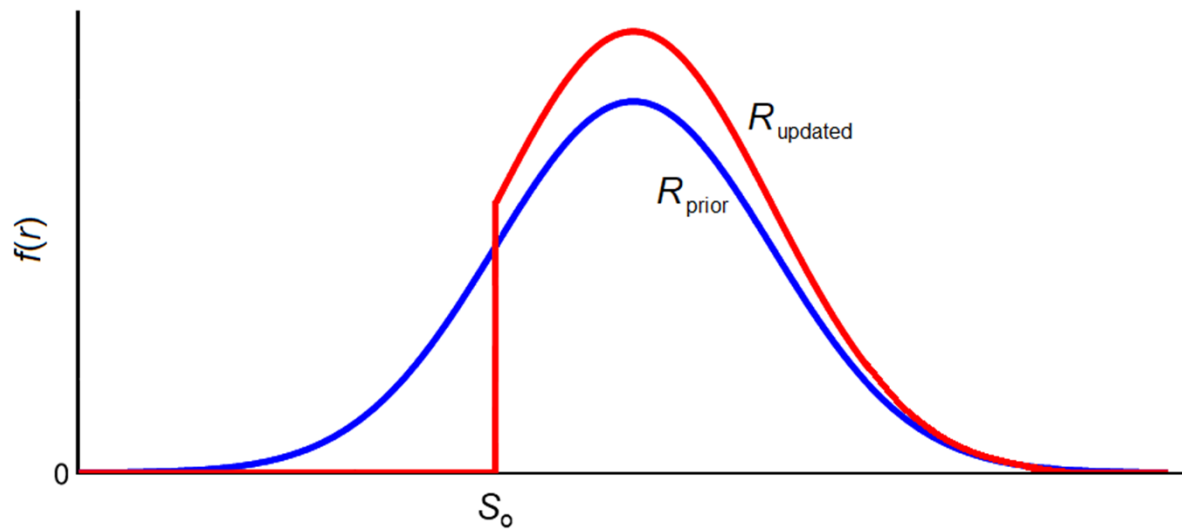
- › Modelfactor drukspanning alleen op variabel deel van waterstand
- › Plaatteffect:
 - › Platen vertonen ten opzichte van balken een gunstiger effect qua herverdeling van spanningen bij zwakke plekken
 - › Platen vertonen ten opzichte van balken minder spreiding in proeven, wat gunstig is voor de rekenwaarde van de sterkte
 - › Op basis van een analyse van proeven is een plaatfactor 1,15 aangehouden

› 9. VERBORGEN RESERVES

RESULTAAT FAALKANSBEREKENING

- › FORM-berekening met de probabilistische toolbox Prob2B™ geeft betrouwbaarheidsindex $\beta = 3,23$
- › Relevante betrouwbaarheidsniveaus:
 - › NEN 8700 afkeurniveau: $\beta = 3,1$
 - › RBK gebruikniveau: $\beta = 3,3$
 - › NEN 8700 verbouwniveau (terugvaloptie): $\beta = 3,6$
- › Met nieuwe schaalfactor en verborgen reserves wordt rekenkundig voldaan aan NEN 8700 afkeurniveau

› 10. BEWEZEN STERKTE METHODIEK



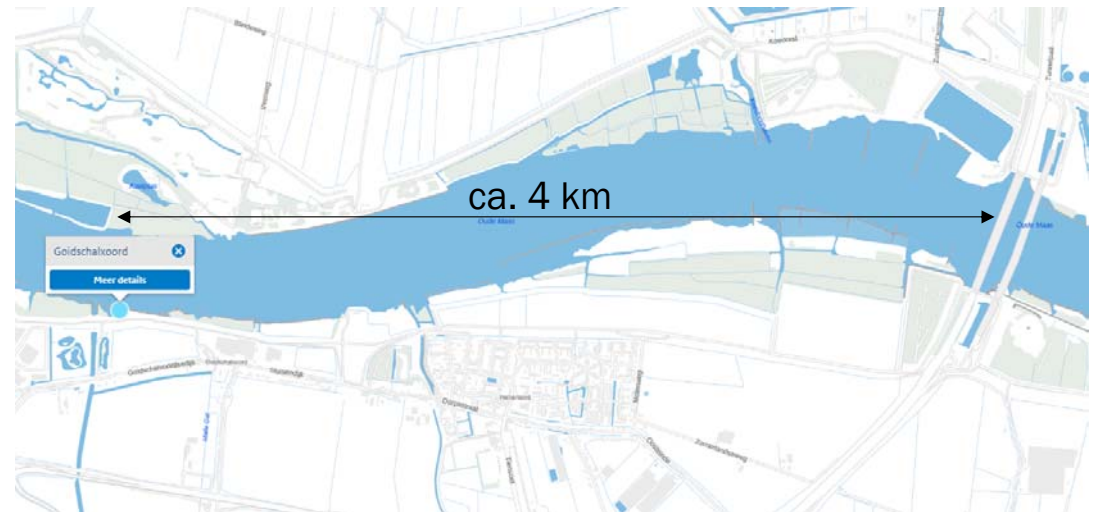
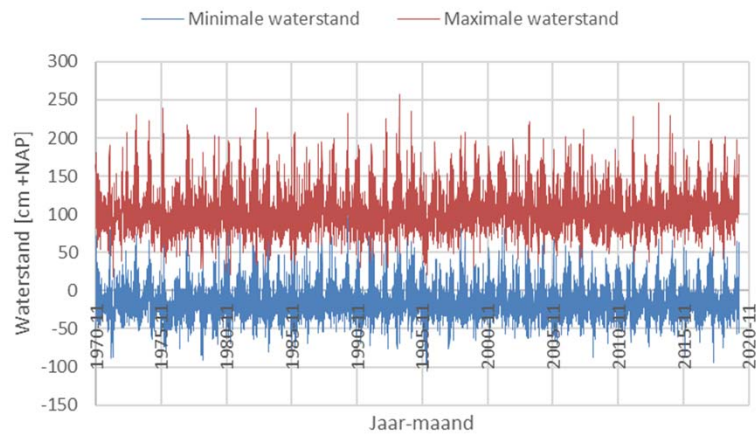
S_0 = opgetreden belasting

R_{prior} = originele verdeling van dwarskrachtsterkte R

R_{updated} = getrunceerde verdeling van dwarskrachtsterkte R

› 10. BEWEZEN STERKTE OPGETREDEN WATERSTAND

- › Meetpunt Goidschalxoord:
- › Gegevens beschikbaar vanaf 01-11-1970
- › Hoogste waterstand: 2,57 m +NAP (28-01-1994)



› 10. BEWEZEN STERKTE

RESULTAAT FAALKANSBEREKENING

› Monte Carlo analyse met 10^7 trekkingen geeft volgende resultaten:

Plaatfactor	Betrouwbaarheidsindex β
1,00	3,22
1,02	3,30
1,15	3,74

› Relevante betrouwbaarheidsniveaus:

- › NEN 8700 afkeurniveau: $\beta = 3,1$
- › RBK gebruikniveau: $\beta = 3,3$
- › NEN 8700 verbouwniveau (terugvaloptie): $\beta = 3,6$

› Met bewezen sterkte wordt rekenkundig voldaan aan NEN 8700 afkeurniveau. Om te voldoen aan gebruikniveau is minimaal een plaateffect van 2% benodigd.

› 11. CONCLUSIES

› Berekeningsresultaten:

Berekening	Betrouwbaarheidsindex β
Nieuwe schaalfactor	2,52
Nieuwe schaalfactor en plaatfactor 1,15	3,23
Nieuwe schaalfactor en bewezen sterkte	3,22
Nieuwe schaalfactor, bewezen sterkte en plaatfactor 1,02	3,30
Nieuwe schaalfactor, bewezen sterkte en plaatfactor 1,15	3,74

› Om te voldoen aan gebruikniveau is minimaal een plaaffect van 2% benodigd. Omdat platen minder spreiding in de proeven vertonen dan balken, wordt verwacht dat deze reserve aanwezig is en wordt rekenkundig voldaan aan gebruikniveau.

› **BEDANKT VOOR
UW AANDACHT**

TNO innovation
for life



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat