

Retouradres: Postbus 155, 2600 AD Delft

Rijkswaterstaat  
Water, Verkeer en Leefomgeving  
T.a.v. de heer A. Casteleijn  
Postbus 2232  
3500 GE UTRECHT



**Onderwerp**  
Briefrapport TNO 2018 R10541

Geachte heer Casteleijn,

Naar aanleiding van uw opdracht met betrekking tot het project "Kalibratie partiële factor voor eigengewichtsbelasting voor RBK-NAT" treft u hierbij onze rapportage aan in briefvorm.

Indien u over deze rapportage nog vragen heeft, neemt u dan gerust contact op met ondergetekende.

**Status**

Dit document heeft de status van een TNO-rapport, en is bij TNO bekend als TNO-rapport **TNO 2018 R10541**. Dit rapport mag niet worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO. Dit rapport is in opdracht opgesteld. Voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever wordt verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor onderzoeksopdrachten aan TNO. Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Met vriendelijke groet,

Ir. L.C. la Gasse  
Auteur

Dr. Ir. A.H.J.M. Vervuurt  
Reviewer

Stieltjesweg 1  
2628 CK Delft  
Postbus 155  
2600 AD Delft

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 20 00

**Datum**

16 mei 2018

**Onze referentie**

2018.100314479/GEL/SNA  
**Rapport TNO 2018 R10541**

**E-mail**

[liesette.lagasse@tno.nl](mailto:liesette.lagasse@tno.nl)

**Projectnummer**

060.32447/01.08.02

Op opdrachten aan TNO zijn de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, zoals gedeponeerd bij de Griffie van de Rechtbank Den Haag en de Kamer van Koophandel Den Haag van toepassing. Deze algemene voorwaarden kunt u tevens vinden op [www.tno.nl](http://www.tno.nl).  
Op verzoek zenden wij u deze toe.

Handelsregisternummer 27376655.

**Datum**  
16 mei 2018

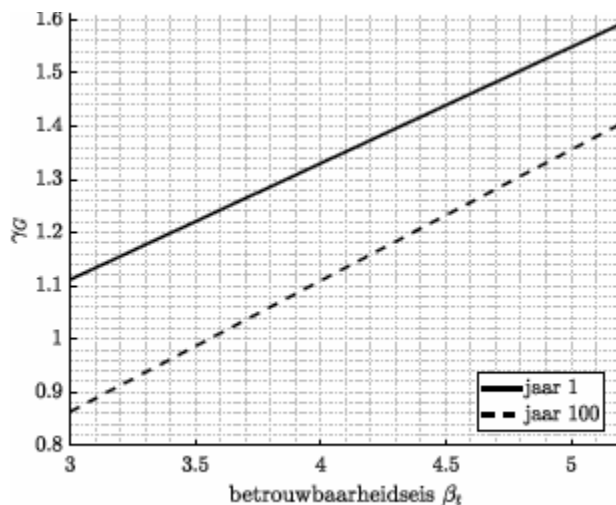
**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
2/9

## 1 Inleiding

In TNO-rapport R10778 (2017) is een voorstel voor het semi-probabilistische toetsvoorschrift constructief falen onder hoogwaterbelasting gegeven door de rekenwaarde van de belasting (eigengewicht en vervalbelasting) dusdanig te kalibreren opdat wordt voldaan aan de betrouwbaarheidseisen van zowel het Bouwbesluit als de Waterwet. Hierbij zijn de rekenwaarde van de vervalbelasting  $V_d$ , de belastingcombinatiefactor  $\Psi_0$  en de partiële factor voor permanente belastingen  $\gamma_G$  gekalibreerd. Voor de overige factoren in het toetsvoorschrift kon worden geconcludeerd dat de in NEN-EN 1990 gespecificeerde waarden in combinatie met de in de kalibratiestudie afgeleide waarden leiden tot voldoende betrouwbaarheid.

In de kalibratiestudie bleek dat de partiële factor voor eigengewichtsbelasting  $\gamma_G$  lineair toe neemt met een toenemende betrouwbaarheidseis op jaarbasis. Met name voor de hogere betrouwbaarheidseisen in het eerste levensjaar werd voor de situaties vallend binnen de scope van deze studie een vrij hoge waarde gevonden van maximaal  $\gamma_G = 1.61$  (zie Figuur 1).



Figuur 1: Partiële factor voor eigengewichtsbelasting (y-as) als functie van de betrouwbaarheidseis (x-as) voor toetsing van het eerste of honderdste levensjaar. Deze hoge waarde voor  $\gamma_G$  werd gevonden voor situaties met sterk dominante eigengewichtsbelasting (slechts 10% variabele belasting). Er werd echter ook geconcludeerd dat een nieuwe constructie tijdens de bouwphase nooit direct een hoogwaterkerende functie vervult. Als een constructie bezwijkt *voordat* deze de hoogwaterkerende functie vervult, dan is er nog geen sprake van falen in de zin van de Waterwet (falen = overstrooming). Wanneer de constructie de hoogwaterkerende functie wel vervult en er dus aan de eisen in de Waterwet moet worden voldaan, heeft de constructie al bewezen niet te falen onder eigen gewicht. In deze aanvullende studie is het effect van dit gegeven op de gevonden faalkans onderzocht en is nader bekeken wat het effect is van de gekozen scope in R10778 op  $\gamma_G$ .

**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
3/9

## 2 Kans op falen in het eerste levensjaar gegeven geen falen door permanente belasting

Wanneer de nieuwe constructie zijn hoogwaterkerende functie vervult en moet voldoen aan de eisen volgend uit de Waterwet, is al gebleken dat deze constructie niet gefaald is door permanente belasting voor ingebruikname van de constructie (in deze fase hoeft de constructie nog niet te voldoen aan de Waterwet, maar slechts aan het Bouwbesluit). In deze aanvullende studie is daarom gekeken wat het effect hiervan is op de gekalibreerde waarde van  $\gamma_G$ . Hiervoor is  $\gamma_G$  voor het eerste levensjaar dus gekalibreerd aan de hand van de eisen volgend uit de Waterwet voor de 'kans op falen, gegeven geen falen door permanente belasting'.

### 2.1 Methode

Voor de kalibratie van  $\gamma_G$  voor het eerste levensjaar aan de hand van de eisen volgend uit de Waterwet voor de 'kans op falen, gegeven geen falen door permanente belasting' is gebruik gemaakt van de methode van Hohenbichler. Deze methode is geschikt om de faalkans van een parallel systeem te bepalen. Met deze methode is het mogelijk de volgende voorwaardelijke kans te bepalen:

$$P(\text{falen in jaar 1} \mid \text{geen falen door permanente belasting}) \quad (1)$$

$$\text{ofwel } P(Z_1 < 0 \mid Z_G > 0) \quad (2)$$

waarin  $Z$  de grenstoestandsfunctie is. De methode van Hohenbichler maakt het in staat om aan de hand van de betrouwbaarheidsindices  $\beta$  en gevoeligheidsfactoren  $\alpha$  van de individuele grenstoestandsfuncties de  $\beta$  behorende bij deze voorwaardelijke kans te bepalen. Hierin zijn:

$$Z_1 = R - \theta_E (G + V) \quad (3)$$

$$Z_G = R - \theta_E G \quad (4)$$

Volgend uit het safety-format volgt dat in beide gevallen moet gelden dat:

$$R_d \geq E_d \quad (5)$$

Waarin  $E_d$  wordt bepaald aan de hand van 6.10a en 6.10b waarin in beide gevallen rekening gehouden wordt met de vervalbelasting. De karakteristieken van de stochastische variabelen zijn in beide grenstoestandsfuncties dus hetzelfde, waar er in (4) slechts een variabele is weggelaten.

### 2.2 Maatgevende situatie

In deze studie zijn in eerste instantie oriënterende berekeningen uitgevoerd voor de maatgevende situatie waaruit de relatief hoge partiële factor voor het eigen gewicht  $\gamma_G = 1.61$  volgde. Dit houdt in:  $B/h_{\min} = 0.5$  (relatief grote minimale vervalbelasting ten opzichte van het variabele deel),  $\beta_t = 5.2$ ,  $P(V > V_d) = 6.0 \cdot 10^{-6}$  en  $f(V_d/G_d) = 0.1$ . Omdat deze analyse alleen het eerste levensjaar betreft, zijn klimaatveranderingen niet meegenomen. Uit de analyse is gebleken dat het gebruik van de voorwaardelijke kans in de kalibratiestudie vrijwel geen effect heeft op de partiële factor  $\gamma_G$ . Hoewel de parameters in beide grenstoestandsfuncties (behalve de vervalbelasting  $V$ ) identiek zijn en de  $\alpha$ -waarden vrijwel gelijk zijn, is er toch een groot verschil in faalkans. De faalkans voor eigengewichtsbelasting  $P(Z_G < 0)$  is namelijk 10x kleiner dan  $P(Z_1 < 0)$ .

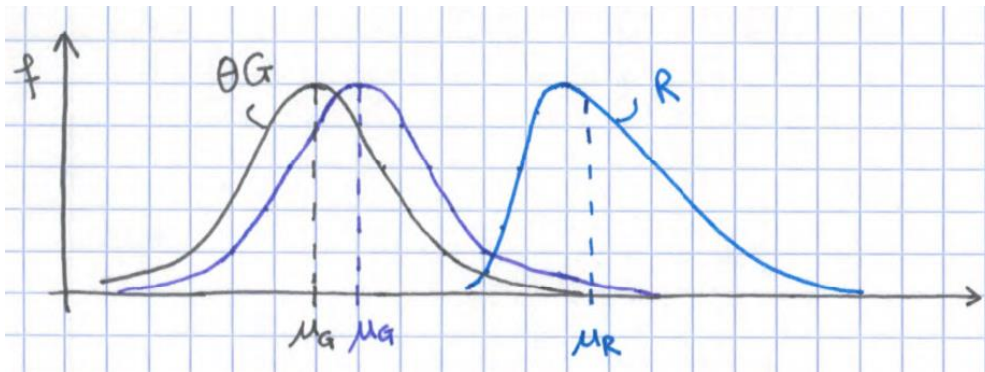
**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
4/9

Het beschouwen van een relatief kleine vervalbelasting ten opzichte van de eigengewichtsbelasting en met een kleine spreiding heeft dus toch een grote invloed op de faalkans bij de kleine faalkansen die in deze analyse beschouwd worden ( $\beta_t = 5.2$ ). Het systeem leert dus nauwelijks van het gegeven 'niet gefaald door eigengewichtsbelasting'.

De grote invloed van de vervalbelasting op de faalkans van de constructie kan worden vergeleken met de situatie waarbij grenstoestandsfunctie  $Z_G$  wordt geëvalueerd waarbij de eigengewichtsbelasting wordt opgehoogd met de minimale (constante) waarde van de vervalbelasting. Omdat we bij deze kleine faalkansen zo ver in de staart van de verdelingen zitten, heeft dit 'opschuiven' over een relatief klein stuk ten opzichte van het gemiddelde van de eigengewichtsbelasting toch een grote invloed op de faalkans (zie Figuur 2).



Figuur 2: Effect van 'verschuiven' van eigengewichtsbelasting met  $\mu_v$  op de faalkans

### 2.3 $\beta_t = 3.8$

Er is ook gekeken wat het effect van deze methode is bij een  $\beta_t = 3.8$ . Hier is  $\gamma_G = 1.28$  en  $P(V > V_d) = 2.5 \cdot 10^{-3}$ . Hoewel er hier dus sprake is van wat grotere faalkansen, is dit effect gering. Ook hier heeft het 'ophogen' aan de belastingkant van eigengewichtsbelasting naar eigengewichtsbelasting met een geringe vervalbelasting nog een aanzienlijk effect op de faalkans (de factor tussen de faalkansen voor  $Z_G$  en  $Z_1$  is in dit geval 7). De verhouding tussen beide  $\beta$ 's is  $3.83/3.88$ .

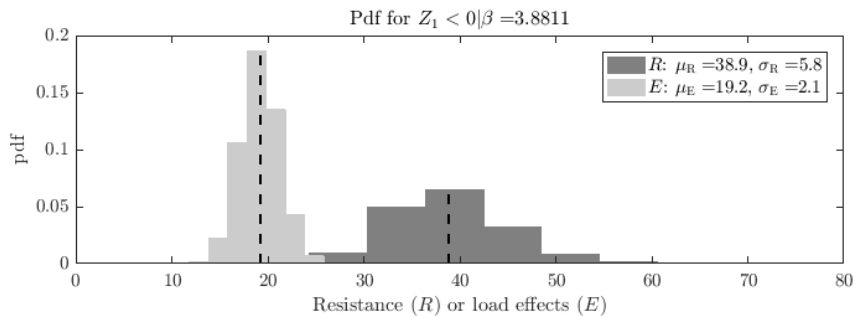
### 2.4 Controle via Monte Carlo

Voor  $\beta_t = 3.8$  is ook een controle berekening uitgevoerd door middel van een Monte Carlo simulatie. Hiervoor zijn  $N = 100\,000$  simulaties uitgevoerd wat uiteindelijk leidde tot  $\beta = 3.88$ . De uitwerking van  $P(Z_1 < 0 \mid Z_G > 0)$  leidt tot  $\beta = 3.95$ . Ook zo is het verschil dus gering. De resultaten zijn consistent met de methode van Hohenblicher. Ter illustratie zijn de verdelingsfuncties aan de belasting- en sterktekant in de volgende figuren voor verschillende situaties weergegeven.

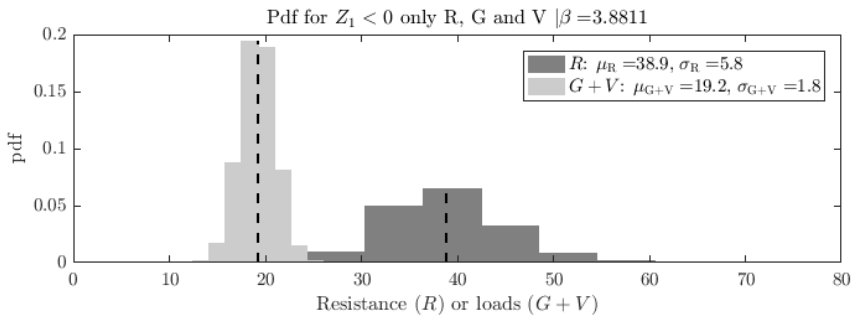
**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

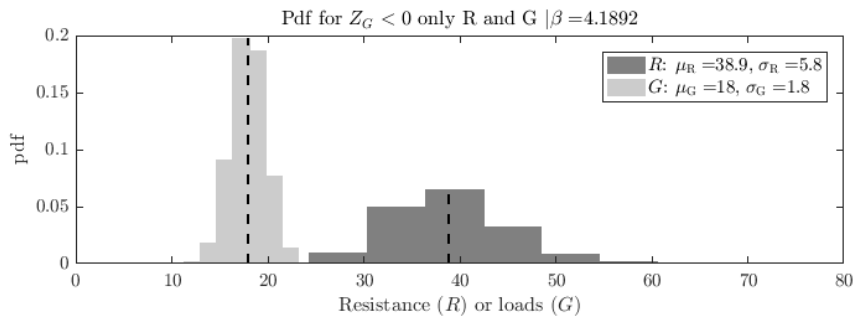
**Blad**  
5/9



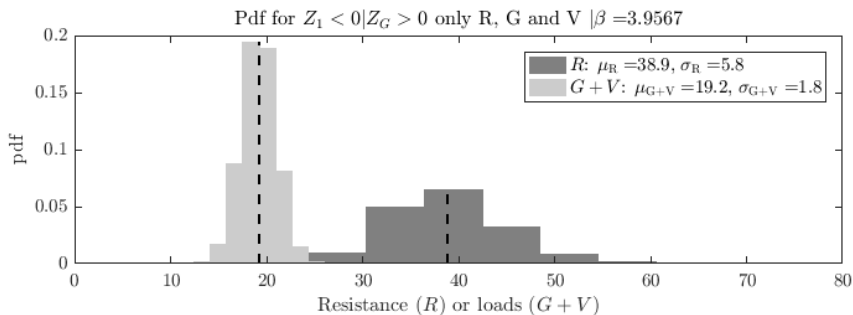
Figuur 3: Pdf van sterkte en belastingeffect na een MC-simulatie inclusief model onzekerheid  $\theta_E$



Figuur 4: Pdf van sterkte en belastingeffect voor  $Z_1$  na een MC simulatie exclusief model onzekerheid  $\theta_E$



Figuur 5: Pdf van sterkte en belastingeffect voor  $Z_G$  na een MC-simulatie exclusief model onzekerheid  $\theta_E$



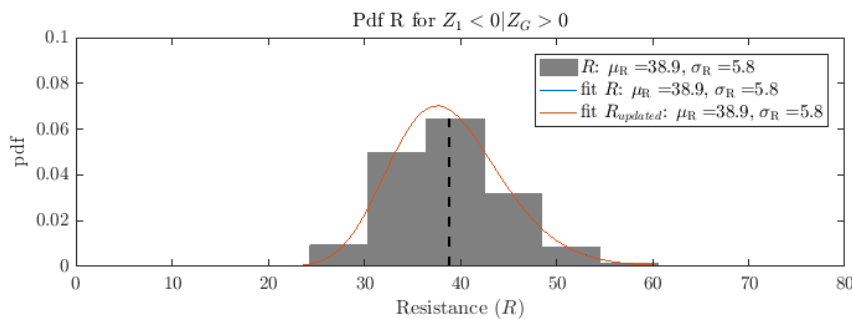
Figuur 6: Pdf van sterkte en belastingeffect voor  $Z_1 < 0 \mid Z_G > 0$  na een MC-simulatie exclusief model onzekerheid  $\theta_E$

**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
6/9

Gegeven dat de constructie niet gefaald is door alleen eigen gewicht kunnen een aantal simulaties verwijderd worden, namelijk die waarvoor geldt dat  $R < G$ . In de volgende figuur zijn beide verdelingsfuncties van  $R$  getoond. De blauwe lijn geeft de oorspronkelijke verdeling van  $R$  weer en de rode lijn de geüpdate verdeling. Zoals is te zien zijn beide verdelingsfuncties nagenoeg gelijk (het verschil zit hem in duizendsten). Dit omdat slechts een zeer gering aantal simulaties verwijderd kunnen worden aan de hand van het gegeven  $R > G$ . De spreiding van  $G$  en  $R$  zal niet veranderen onder deze conditionele kans aangezien de exacte constructie nog niet bekend is. Zowel het eigen gewicht als sterkte kunnen nog realisaties zijn van de complete originele verdeling.



Figuur 7: Posterior pdf van sterkte na bewezen sterkte onder eigen gewicht volgend uit de MC-simulatie

## 2.5 Conclusie

Het toepassen van de voorwaardelijke kans  $P(\text{falen in jaar 1} \mid \text{geen falen door permanente belasting})$  in de kalibratiestudie heeft dus nauwelijks een verlagend effect op de gevonden partiële factoren voor het eigen gewicht.

## 3 Kans op falen in het eerste levensjaar gegeven geen falen door permanente belasting en minimale vervalbelasting

Bij het toetsen van bestaande constructies is naast het gegeven dat zij niet gefaald zijn onder eigen gewicht ook bekend dat zij de minimale vervalbelasting, die altijd aanwezig is, ook overleefd hebben. In deze aanvullende studie is daarom gekeken wat het effect hiervan is op de gekalibreerde waarde van  $\gamma_G$ . Hiervoor is  $\gamma_G$  voor het eerste levensjaar dus gekalibreerd aan de hand van de eisen volgend uit de Waterwet voor de 'kans op falen, gegeven geen falen door permanente belasting en de minimale vervalbelasting'. Ook hiervoor is de methode van Hohenbichler toepast.

### 3.1 Grenstoestandfuncties

$P(\text{falen in jaar 1} \mid \text{geen falen door permanente en minimale vervalbelasting})$

(6)

$$\text{ofwel } P(Z_1 < 0 \mid Z_{G+h_{\min}} > 0) \quad (7)$$

$$Z_{G+h_{\min}} = R - \theta_E(G + h_{\min}) \quad (8)$$

**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
7/9

### 3.2 Maatgevende situatie

De methode is toegepast op dezelfde maatgevende situatie als bij de berekening bij gegeven niet gefaald door eigen gewicht:  $B/h_{\min}=0.5$ ,  $\beta_t = 5.2$ ,  $P(V>V_d) = 6.0 \cdot 10^{-6}$  en  $f (V_d/G_d) = 0.1$ . Omdat deze analyse alleen het eerste levensjaar betreft, zijn klimaatveranderingen niet meegenomen. Voor deze analyse is een verhouding  $B/h_{\min}$  niet voldoende en moeten de individuele waarden expliciet meegenomen worden. Dit maakt de eerder gekozen kalibratiemethode waarbij slechts gerekend wordt met een verhouding  $B/h_{\min}$  waardoor een groot scala aan mogelijke ontwerp-scenario's worden meegenomen, echter onmogelijk. Er is een gevoeligheidsstudie uitgevoerd naar verschillende waarden van  $B$  (0.5, 1.0, 2.0 m) en  $h_{\min}$  bij eenzelfde verhouding en er is gebleken dat dit voor de berekende faalkans nauwelijks effect heeft.

Met het gegeven dat de constructie niet gefaald is bij de minimale vervalbelasting, blijkt dat de  $\beta$ -waarde voor dit maatgevende punt verhoogd wordt van 5.2 naar 5.6 (met  $\gamma_G = 1.61$ ). Wanneer een partiële factor voor eigen gewicht van  $\gamma_G = 1.5$  wordt toegepast, wordt er nog steeds een  $\beta$ -waarde van 5.4 gehaald, welke ruim boven de geëiste 5.2 ligt. Er moet wel worden benadrukt dat dit alleen geldt voor bestaande constructies waarvan gegeven is dat deze de minimale vervalbelasting hebben overleefd.

## 4 Scope van het safety-format

Omdat de afgeleide parameters in de kalibratiestudie gebaseerd zijn op een keuze in te beschouwen toepassingsgebied, is ook gekeken wat het effect is van deze gekozen scope in R10778 op  $\gamma_G$ .

### 4.1 Analyse

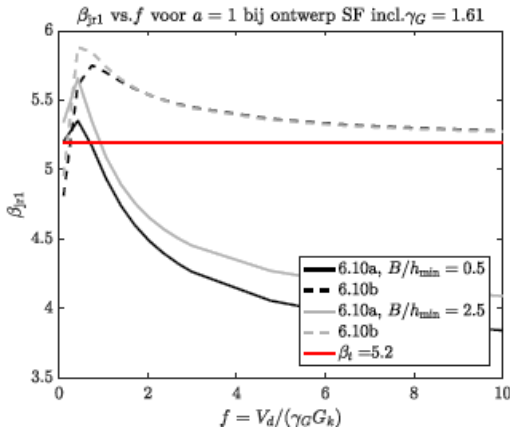
In R10778 is het een toepassingsgebied voor het safety-format gespecificeerd waarbij rekening gehouden wordt met constructies waarvoor de verhouding tussen de decimeringshoogte ( $B$ ) en het minimaal verval ( $h_{\min}$ ) tussen 0.5 en 2.5 ligt en waarvoor geldt  $0.1 < f \leq 10$ . De relatief hoge waarde voor  $\gamma_G = 1.61$  volgt uit de kalibratie waarvoor de resultaten zijn weergegeven in Figuur 8. Het is te zien dat hiervoor  $f = 0.1$  en  $B/h_{\min} = 0.5$  (relatief grote minimale vervalbelasting) maatgevend is (zwarte doorgetrokken lijn). Hiervoor wordt de betrouwbaarheidseis van  $\beta_t = 5.2$  net gehaald. Er moet hierbij worden gemeld dat wanneer er gekozen was voor een minimum van  $f = 0.05$ ,  $\beta_t = 5.2$  niet meer gehaald zou worden en een nog hogere waarde van  $\gamma_G$  nodig zou zijn om ook hier aan de eisen te voldoen.

Er valt ook te zien dat voor grotere waarden van  $f$  ( $f > 0.1$ ) de gevonden  $\beta$  boven de waarde 5.2 ligt tot een maximum van 5.7 (zie zwarte gestreepte lijn). Voor een groot deel van de beschouwde constructies is de gevonden  $\gamma_G$  dus zeer conservatief. Voor grotere waarden van  $f$  (dus bij dominante vervalbelasting) wordt gevonden  $\beta$  bijna volledig gedomineerd door de vervalbelasting  $V$  en heeft  $\gamma_G$  weinig invloed.

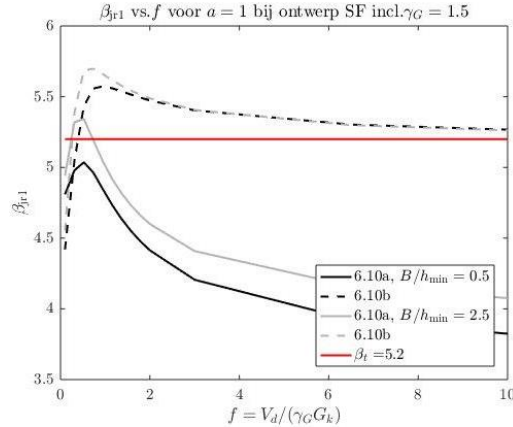
**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
8/9



Figuur 8: Waterwet ( $\beta_t = 5.2$ ) betrouwbaarheidslevels in het eerste levensjaar verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief  $\gamma_G = 1.61$ ) als functie van de ratio  $f$  voor de situatie zonder klimaatverandering



Figuur 9: Waterwet ( $\beta_t = 5.2$ ) betrouwbaarheidslevels in het eerste levensjaar verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief  $\gamma_G = 1.5$ ) als functie van de ratio  $f$  voor de situatie zonder klimaatverandering

Er is daarom ook gekeken wat het effect zou zijn van een lagere  $\gamma_G$ -waarde op de gevonden betrouwbaarheidsniveaus. Voor  $\gamma_G = 1.5$  zijn de resultaten weergegeven in Figuur 9. Hier is te zien dat voor  $f < 0.4$  de betrouwbaarheidseis van  $\beta_t = 5.2$  niet gehaald wordt.

Op het meest kritische punt scheelt dit een factor 10 in de faalkans. Of dit acceptabel geacht wordt, hangt af van de verdeling van de hoogwaterkerende constructies in Nederland over de beschouwde ratio's  $f$  en de hoeveelheid constructies die in de categorie  $f < 0.4$  vallen.

#### 4.2 Resultaten inclusief methode van Hohenbichler

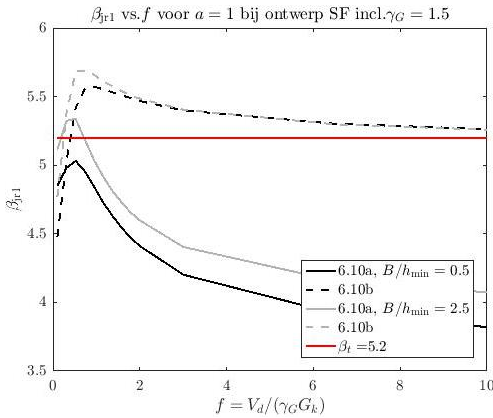
Figuur 9 is ook afgeleid na toepassing van de Hohenbichler methode voor kans op falen in het eerste levensjaar gegeven geen falen door permanente belasting (en minimale vervalbelasting). Dit is weergegeven in Figuur 10 en 11. Er valt te zien dat voor het gegeven geen falen door permanente belasting (Figuur 10) de verkregen betrouwbaarheidsniveaus iets hoger liggen dan in Figuur 9 in het gebied met dominante permanente belasting. Op het meest kritische punt bij  $f = 0.1$  gaat beta van 4.8 naar 4.85. Wanneer ook wordt beschouwd dat de constructie niet is gefaald door de minimale vervalbelasting (alleen toepasbaar bij bestaande kunstwerken) wordt voor nagenoeg alle ratio's  $f$  (zowel permanente belasting als vervalbelasting dominant) de betrouwbaarheidseis van  $\beta_t=5.2$  gehaald.



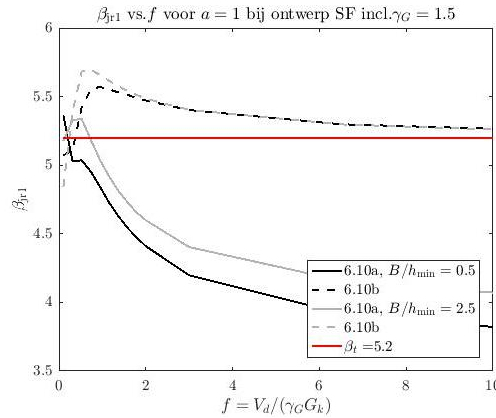
**Datum**  
16 mei 2018

**Onze referentie**  
2018.100314479/GEL/SNA  
Rapport TNO 2018 R10541

**Blad**  
9/9



Figuur 10: Waterwet ( $\beta_t = 5.2$ ) betrouwbaarheidslevels in het eerste levensjaar gegeven geen falen door permanente belasting verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief  $\gamma_G = 1.5$ ) als functie van de ratio  $f$  voor de situatie zonder klimaatverandering



Figuur 11: Waterwet ( $\beta_t = 5.2$ ) betrouwbaarheidslevels in het eerste levensjaar gegeven geen falen door permanente belasting en minimale vervalbelasting verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief  $\gamma_G = 1.5$ ) als functie van de ratio  $f$  voor de situatie zonder klimaatverandering

### 4.3 Conclusie

De grenzen van het gekozen toepassingsgebied in R10778 zijn van grote invloed op de gekalibreerde waarde voor  $\gamma_G$ . Voor een groot deel van het toepassingsgebied is de gevonden waarde van  $\gamma_G = 1.61$  zeer conservatief. Het verlagen van  $\gamma_G$  heeft dan ook slechts een nadelig effect voor een klein deel van de beschouwde situaties (ontwerp van nieuwe kunstwerken waarbij permanente belasting dominant is). Om te bepalen of dit risico acceptabel is, zou de verdeling van de hoogwaterkerende constructies in Nederland over de beschouwde situaties meegenomen kunnen worden. Er kan dan gekozen worden voor een  $\gamma_G$ , zodat het toetsvoorschrift voor het merendeel van de constructies veilig is.

Een andere optie is het toevoegen van een waarschuwing in het toetsvoorschrift om  $\gamma_G$  met een factor (bijvoorbeeld 1.2 t.o.v.  $\gamma_G = 1.35$ ) op te hogen wanneer de (nieuwe) constructie sterk gedomineerd wordt door permanente belasting.