

Stieltjesweg 1
2628 CK Delft
Postbus 155
2600AD Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00

TNO-rapport

TNO 2017 R10778

Kalibratie toetsvoorschrift constructief falen onder hoogwaterbelasting voor RBK-NAT

Datum	Juni 2017
Auteur(s)	Nadieh Meinen (TNO) Arnaud Casteleijn (RWS) Ruben Jongejan Raphaël Steenbergen (TNO)

Exemplaarnummer	0100306465
Aantal pagina's	75
Aantal bijlagen	4
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat
Projectnaam	RBK-NAT (fase 3)
Projectnummer	060.23917

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2016 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding.....	4
1.1	Achtergrond.....	4
1.2	Doel voorliggende studie.....	4
1.3	Leeswijzer	4
2	Basisbegrippen	6
2.1	Betrouwbaarheid van een constructie.....	6
2.2	Betrouwbaarheidseisen.....	7
2.2.1	Betrouwbaarheidseisen conform het Bouwbesluit.....	7
2.2.2	Betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet	7
2.3	Betrouwbaarheid van een constructie in de tijd	10
2.4	Toetsen van de betrouwbaarheid	11
3	Historie toetsen constructief falen	13
3.1	Leidraad Kunstwerken	13
3.1.1	Constructieve betrouwbaarheidseisen	13
3.1.2	Safety-format.....	13
3.1.3	Aandachtspunten bij kalibratie Leidraad Kunstwerken	16
3.2	Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode.....	18
3.2.1	Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode – Activiteit 1	18
3.2.2	Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode – Activiteit 3	19
4	Aanpak en uitgangspunten kalibratie	21
4.1	Uitgangspunten	21
4.2	Betrouwbaarheidseisen.....	22
4.2.1	Betrouwbaarheidseisen conform het Bouwbesluit.....	22
4.2.2	Betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet	23
4.3	Situatieschets hoogwaterbelasting	24
4.3.1	De vervalbelasting.....	24
4.3.2	Het totale belastingeffect.....	26
4.4	Grenstoestandsfunctie	26
4.5	Safety-format.....	27
4.5.1	Safety-format.....	27
4.5.2	Overzicht te kalibreren grootheden	28
4.5.4	Uitdrukking rekenwaarden	29
4.6	Beschrijving stochastische variabelen	29
4.6.1	De vervalbelasting.....	29
4.6.2	Sterkte van het constructieve element.....	31

4.6.3	Eigengewichtsbelasting.....	32
4.6.4	Modelfactor belastingeffect	33
4.6.5	Samenvatting	34
4.7	Aanpak kalibratie.....	35
4.7.1	Dummy-waarden voor decimeringshoogte en minimaal verval	35
4.7.2	Kalibratie voor het Bouwbesluit.....	35
4.7.3	Kalibratie voor de Waterwet.....	36
5	Resultaten kalibratieberekeningen	37
5.1	Resultaten kalibratieberekeningen Bouwbesluit	37
5.1.1	Kalibratiestap 1	37
5.1.2	Kalibratiestap 2	39
5.2	Resultaten kalibratieberekeningen Waterwet	40
5.2.1	Kalibratiestap 1	40
5.2.2	Kalibratiestap 2	42
5.3	Verdiscontering modelonzekerheid en correctie materiaalfactor in ontwerpwaarden belastingeffecten	44
6	Voorstel toetsvoorschrift	45
6.1	Scope	45
6.2	Voorstel voor betrouwbaarheidseis Waterwet	46
6.3	Safety-format.....	47
6.4	Invulling safety-format Bouwbesluit	48
6.5	Invulling safety-format Waterwet.....	48
6.6	Aanbevelingen voor toekomstige kalibraties.....	49
7	Referenties.....	51
8	Ondertekening	52

Bijlagen

A	Toelichting kalibratieberekeningen
B	Toelichting bij verhouding tussen decimeringshoogte en minimaal verval
C	Correlatie tussen constructief falen en falen door golfoverloop of golfoverslag
D	Resultaten kalibratieberekeningen

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Voor het ontwerp en beoordeling van waterkerende constructies moet zowel worden voldaan aan de vanuit het Bouwbesluit aangewezen normen en richtlijnen (NEN-EN1990, NEN 8700) als ook aan de vanuit de Waterwet aangewezen normen en richtlijnen (Leidraad Kunstwerken, WBI). Voor zover de eisen conform de Waterwet en het Bouwbesluit verschillen, is de strengste van de twee maatgevend.

Bovengenoemde normen en richtlijnen zijn aangevuld met door Rijkswaterstaat geformuleerde eisen. Ten behoeve van het ontwerp van waterkerende constructies zijn deze eisen vastgelegd in de Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK). Ten behoeve van de beoordeling van bestaande kunstwerken zijn deze eisen vastgelegd in de Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken (RBK).

Rijkswaterstaat streeft naar een uniforme aanpak voor het ontwerp en de beoordeling van waterkerende constructies. Hiertoe is in 2012-2014 het InfraQuest onderzoek "Richtlijn Beoordeling Natte kunstwerken (RBK-NAT)" uitgevoerd. In opdracht van RWS is in InfraQuest-verband voor de RBK-NAT in het onderhavige onderzoek gewerkt aan een nieuwe kalibratie-studie voor het semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor waterkerende constructies.

1.2 Doel voorliggende studie

Het doel van voorliggende studie is om voor het semi-probabilistisch toetsvoorschrift voor de hoogwatersituatie de rekenwaarde van de belasting (eigengewicht en vervalbelasting) dusdanig te kalibreren opdat voldaan wordt aan de betrouwbaarheidseisen van zowel het Bouwbesluit als de Waterwet.

Het gekalibreerde toetsvoorschrift zal zowel dienen voor het ontwerp alsmede voor de beoordeling van waterkerende constructies. De resultaten van voorliggende studie zullen dus tevens als input voor de verdere invulling van de ROK voor natte kunstwerken, het Ontwerpinstrumentarium (OI) en de opvolger van de Leidraad Kunstwerken 2003 [1].

1.3 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd. In hoofdstuk 2 worden de relevante basisbegrippen uit de betrouwbaarheidsleer toegelicht die veelvuldig gebruikt zullen worden in deze studie.

In hoofdstuk 3 wordt de historische context weergegeven voor de kalibratieberekeningen van de hoogwatersituatie. In hoofdstuk 4 worden de aanpak en de uitgangspunten van de voorliggende studie toegelicht. In hoofdstuk 5 worden de resultaten van voorliggende studie beschreven, waarna een voorstel voor een semi-probabilistisch safety-format wordt gegeven in hoofdstuk 6. Paragraaf 6.6 beschrijft de aanbevelingen voor verder onderzoek.

2 Basisbegrippen

In dit hoofdstuk worden enkele begrippen uit de betrouwbaarheidsleer toegelicht die veelvuldig gebruikt worden in dit rapport. In paragraaf 2.1 wordt ingegaan op de definitie van de betrouwbaarheid van een constructie. In paragraaf 2.2 worden de (constructieve) betrouwbaarheidseisen conform het Bouwbesluit en de Waterwet toegelicht. In paragraaf 2.3 wordt ingegaan op het verloop van de betrouwbaarheid in de tijd. In paragraaf 2.4 wordt toegelicht hoe de betrouwbaarheid van een constructie getoetst dient te worden.

2.1 Betrouwbaarheid van een constructie

Een constructie faalt indien de sterkte van de constructie lager is dan de belastingen op de constructie. Echter zijn zowel de sterkte als de belastingen onzeker en zijn deze bovendien functies van de tijd. De *betrouwbaarheid* van een constructie wordt daarom uitgedrukt in de *kans op falen* (P_f), gedurende een gekozen *referentieperiode* (N). De referentieperiode is daarbij de gekozen periode van tijd die wordt gebruikt als basis voor het toetsen van variabele (tijdafhankelijke) belastingen, zoals bijvoorbeeld wind- of hoogwaterbelastingen. De referentieperiode is vaak gerelateerd aan de beoogde levensduur van de constructie. De referentieperiode kan echter ook gelijk zijn aan een jaar, of enkele jaren.

Vaak wordt de betrouwbaarheid van een constructie uitgedrukt in termen van de *betrouwbaarheidsindex* (β). De relatie tussen de betrouwbaarheidsindex en de faalkans is:

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (2.1)$$

Waarin:

β is de betrouwbaarheidsindex voor een referentieperiode van N jaar

P_f is de kans op falen in N jaar

$\Phi(..)$ is de standaard-normale verdeling

De doelbetrouwbaarheid van een constructie (oftewel de betrouwbaarheidseis) wordt vaak aangeduid met β_t , zo ook in dit rapport. Hierin staat het subscript t voor het Engelse woord 'target'.

2.2 Betrouwbaarheidseisen

2.2.1 Betrouwbaarheidseisen conform het Bouwbesluit

Betrouwbaarheidseisen nieuwbouw

Voor de betrouwbaarheidseisen aan nieuwbouw verwijst het Bouwbesluit naar Eurocode NEN-EN 1990. Daarin zijn gevolgklassen met bijbehorende betrouwbaarheidseisen vastgesteld. Een betrouwbaarheidseis is strenger indien de gevolgen van falen ernstiger zijn. Tevens geldt dat bij relatief lage meerkosten een hogere eis kan worden nagestreefd. In NEN-EN 1990 zijn drie gevolgklassen gedefinieerd. De betrouwbaarheidseisen voor de ultimate limit state zijn weergegeven in Tabel 1 en corresponderen met een referentieperiode gelijk aan de levensduur van de constructie. Voor waterbouwkundige constructies wordt vaak een levensduur van 100 jaar aangehouden.

Betrouwbaarheidseisen bestaande bouw

Voor de betrouwbaarheidseisen aan bestaande bouw verwijst het Bouwbesluit naar NEN 8700. In deze studie wordt niet ingegaan op de betrouwbaarheidseisen aan bestaande bouw, daar deze nooit maatgevend zijn ten opzichte van de eisen van de Waterwet.

Tabel 1 - Betrouwbaarheidsindices in NEN- EN 1990/NB.

Gevolgklasse	Gevolgen van bezwijken		Betrouwbaarheidseis in de levensduur (β_t)
	kans op levensgevaar	kans op economische schade	
CC3	zeer groot	of zeer groot	4.3
CC2	aanzienlijk	aanzienlijk	3.8
CC1	uitgesloten/ klein	en klein	3.3

2.2.2 Betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet

De betrouwbaarheidseisen vanuit de Waterwet zijn gespecificeerd op drie verschillende niveaus; op het niveau van een dijktraject, op het niveau van een faalmechanisme, en op het niveau van de constructie. Hieronder zal worden toegelicht hoe de betrouwbaarheidseisen op elk niveau verkregen kunnen worden.

- *Niveau dijktraject*

In de Waterwet zijn normen opgenomen voor de primaire waterkeringen. De primaire keringen zijn onderverdeeld in strekkingen die elk een ander gebied beschermen.

In de Waterwet worden deze strekkingen aangeduid als *dijktrajecten*. Deze dijktrajecten bestaan uit het totaal van dijken, duinen of waterbouwkundige constructies (kunstwerken).

In de Waterwet zijn per dijktraject betrouwbaarheidseisen opgenomen. Deze betrouwbaarheidseisen beschrijven de maximaal toelaatbare *overstromingskans* gedurende een referentieperiode van één jaar (P_{max}). Deze maximaal toelaatbare overstromingskans wordt ook wel de *normfrequentie* genoemd. De volgende normfrequenties worden gehanteerd: 1/100; 1/300; 1/1.000; 1/3.000; 1/10.000; 1/30.000 en 1/100.000 per jaar.

- *Niveau faalmechanismen*

Een dijktraject kan falen door verschillende *faalmechanismen*. Het kan bijvoorbeeld falen door golfoverloop of golfoverslag, door constructief falen, etc. Aangenomen wordt dat deze faalmechanismen samen een seriesysteem vormen. Falen van één van deze elementen betekent falen van het systeem (het dijktraject). De maximaal toelaatbare faalkans per faalmechanisme wordt verkregen door de overstromingskans op dijktrajectniveau (P_{max}) uit te splitsen over de verschillende faalmechanismen. Deze uitsplitsing wordt ook wel de *faalkansbegroting* genoemd. De relatieve bijdrage aan de overstromingskans op dijktrajectniveau wordt de *faalruimtefactor* ω_i genoemd. Voor het WBI2017 en het OI2014v3 zijn default-faalkansbegrotingen opgesteld (zie Tabel 2). Het is toegestaan om van de default-faalkansbegroting af te wijken om onnodig knellende eisen voor bepaalde faalmechanismen te voorkomen.

De default-faalruimtefactor voor het faalmechanisme constructief falen (CF) is gelijk aan $\omega_{CF} = 0.02$. Het is praktisch uitgesloten dat de faalruimtefactor voor constructief falen kleiner is dan de default-waarde. Als dit percentage wordt verkleind, dan levert dit namelijk nauwelijks extra faalkansruimte op voor de andere faalmechanismen.

- *Niveau waterbouwkundige constructies*

Een dijktraject bestaat vaak uit meerdere waterbouwkundige constructies. Elk van deze waterbouwkundige constructies kan falen door een bepaald faalmechanisme. De gebeurtenis 'falen door faalmechanisme i ' kan dus worden gezien als een seriesysteem van meerdere elementen (de constructies). Deze elementen kunnen met elkaar gecorreleerd zijn. Deze correlatie wordt in rekening gebracht middels het *lengte-effect* N_i . Voor het bepalen van het lengte-effect kan een probabilistische berekening worden uitgevoerd of kan worden uitgegaan van default-waarden. Voor het faalmechanisme constructief falen schrijft het WBI2017 de default-waarde van $N_{CF} = 3$ voor.

De faalkanseis voor een bepaald faalmechanisme van een bepaalde waterbouwkundige constructie binnen een bepaald dijktraject kan dus als volgt worden bepaald:

$$P(F_i)_{max} = \frac{\omega_i \cdot P_{max}}{N_i} \quad (2.2)$$

En:

$$\beta_i = -\Phi^{-1}(P(F_i)_{max}) \quad (2.3)$$

Waarin:

- $P(F_i)_{max}$ is de maximaal toelaatbare kans per jaar op faalmechanisme i voor een bepaalde constructie binnen een bepaald dijktraject;
- P_{max} is de maximale overstromingskans per jaar op het niveau van het dijktraject (normfrequentie);
- ω_i is de faalruimtefactor voor faalmechanisme i ;
- N_i is de lengte-effect factor voor faalmechanisme i ;
- β_i is de minimale betrouwbaarheidseis per jaar voor faalmechanisme i voor een bepaalde constructie binnen een bepaald dijktraject.

Tabel 2 - Default-faalkansbegroting uit het WBI2017 en het OI2014.

Type kering	Faalmechanisme	Zandige kust	Overig (dijken)
Dijk of kunstwerk	Overloop of golfoverslag	0%	24%
Dijk	Opbarsten en piping	0%	24%
	Macroinstabiliteit	0%	4%
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	0%	10%
Kunstwerk	Niet sluiten	0%*	4%
	Piping	0%*	2%
	Constructief falen	0%*	2%
Duin	Duinafslag	70%	0% (10%)**
Overig		30%	30% (20%)**
Totaal		100%	100%

* Veel trajecten langs de zandige kust bevatten geen kunstwerken of dijken. Als dit wel het geval is, dan zal van de default-faalkansbegroting afgeweken moeten worden.

** Bij trajecten die voor slechts een gedeelte uit duinen bestaan, zal duinafslag vaak een relatief kleine faalkansbijdrage leveren. In de default-faalkansbegroting wordt bij dergelijke gevallen een deel van de post 'overig' toegewezen aan duinafslag. Hiermee is voorkomen dat er voor dergelijke situaties een geheel nieuwe default-faalkansbegroting moest worden geïntroduceerd.

2.3 Betrouwbaarheid van een constructie in de tijd

Door ontwikkelingen van de sterkte en de belastingen in de tijd wordt een constructie gekenmerkt door een bepaalde ontwikkeling van de faalkans in de tijd. Daarbij is men met name geïnteresseerd in de kans op falen in een jaar, gegeven geen falen in de voorgaande jaren. Het faalkansverloop in de tijd wordt beïnvloed door twee hoofdeffecten;

- De mate van *correlatie* tussen de jaren. Deze correlatie kan zowel voortkomen uit correlaties tussen de sterkte-parameters alsmede door correlaties tussen de belastingparameters.
- Het verloop van de gemiddelde sterkte- of belastingparameters in de tijd. Bijvoorbeeld door toedoen van veroudering kan de gemiddelde sterkte afnemen en door toedoen van klimaatverandering kan de gemiddelde belasting toenemen.

In theorie kunnen vier typerende situaties worden onderscheiden, die zijn afgebeeld in Figuur 1.

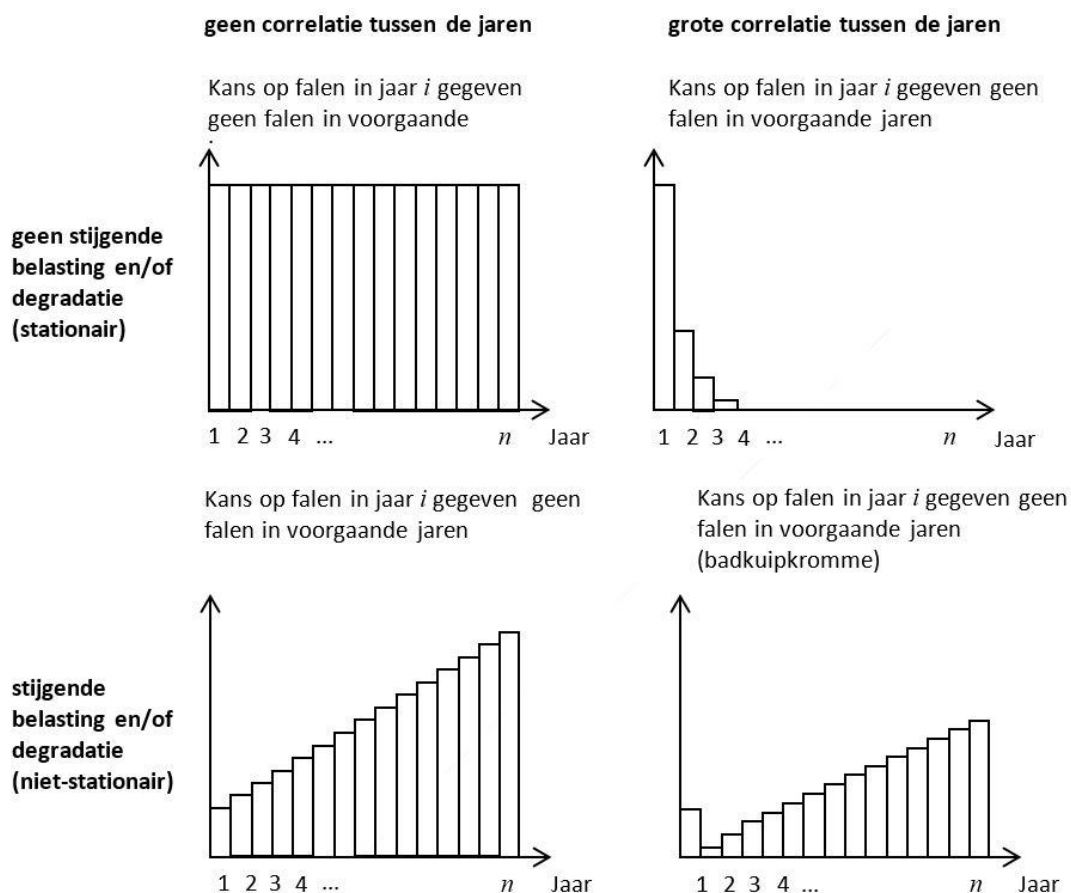
Figuur 1 – linksboven beschrijft de situatie zonder correlatie tussen de jaren en met gelijkblijvende sterkte en belastingen. In deze situatie zal de kans op falen in jaar i , gegeven geen falen in de voorgaande jaren, constant blijven over de tijd.

Figuur 1 – linksonder beschrijft tevens een situatie zonder correlatie tussen de jaren, maar met stijgende belasting en/of afnemende sterkte. In deze situatie zal de kans op falen in jaar i gegeven geen falen in de voorgaande jaren, stijgen.

Figuur 1 – rechtsboven beschrijft de situatie met sterke correlatie tussen de jaren en met gelijkblijvende sterkte en belastingen. In deze situatie zal de kans op falen in jaar i , gegeven geen falen in de voorgaande jaren, afnemen over de tijd. Dit wordt ook wel “bewezen sterkte” genoemd.

Figuur 1 – rechtsonder beschrijft de meest realistische situatie, waarbij de correlatie tussen de jaren groot is en met een stijgende belasting en/of afnemende sterkte. Daarbij neemt allereerst de faalkans af in de tijd door “bewezen sterkte”, maar neemt deze vervolgens toe in de tijd door een afname van de relatieve sterkte in de tijd. Deze curve wordt ook wel de badkuipkromme genoemd.

Opmerking: In het geval van de badkuipkromme bevindt de maximale jaarlijkse faalkans zich ofwel in het eerste levensjaar van de constructie, ofwel in het laatste levensjaar van de constructie. In geval van sterke klimaatverandering (toename van belasting in de tijd) zal dit veelal het laatste levensjaar zijn. In geval van constructies die gedomineerd worden door permanente belasting (zoals eigengewicht) zal dit veelal het eerste levensjaar zijn.



Figuur 1 – Het verloop van de faalkans in de tijd als gevolg van correlaties tussen de jaren en het verloop van de gemiddelde sterkte- en belastingparameters in de tijd.

2.4 Toetsen van de betrouwbaarheid

Toetsen conform het Bouwbesluit

Het Bouwbesluit stelt betrouwbaarheidseisen voor een referentieperiode gelijk aan de levensduur van de constructie. Voor waterbouwkundige constructies is deze levensduur gelijk aan 100 jaar. Voor het toetsen van de constructieve betrouwbaarheid van een waterbouwkundige constructie dient dus eenmaal een betrouwbaarheidsberekening te worden uitgevoerd voor een referentieperiode van 100 jaar. Een levensduurbeschouwing conform het Bouwbesluit betekent in de praktijk een middeling van de faalkans over de levensduur. Het exacte verloop van de betrouwbaarheid in de tijd zoals beschreven in voorgaande paragraaf is dus minder van belang.

Toetsen conform de Waterwet

De Waterwet stelt betrouwbaarheidseisen voor een referentieperiode van één jaar. Daarbij geldt dat gedurende de gehele levensduur van de constructie, in elk jaar de faalkans lager dient te zijn dan de gestelde betrouwbaarheidseis.

In het geval van waterbouwkundige constructies met een levensduur van 100 jaar betekent dat dus dat er 100 betrouwbaarheidsberekeningen uitgevoerd dienen te worden – een bewerkelijke opgave. Echter zullen de meeste constructies een faalkansverloop in de tijd hebben in de vorm van de badkuipkromme, zoals beschreven in d vorige paragraaf. Daarbij bevindt de maximale jaarlijkse faalkans zich dus ofwel in het eerste, ofwel in het laatste levensjaar van de constructie. Dit houdt in dat het afdoende is om slechts het eerste en het laatste levensjaar te toetsen.

3 Historie toetsen constructief falen

In dit hoofdstuk wordt de historische context weergegeven van het onderhavige onderzoek.

In Leidraad Kunstwerken 2003 [1] en daarop volgende aanvullende studies zijn partiële factoren voor sterkte en belastingparameters gekalibreerd voor de hoogwatersituatie. De daarbij gebruikte werkwijzen, uitgangspunten en aannamen zijn uiteengezet in dit hoofdstuk.

3.1 Leidraad Kunstwerken

3.1.1 Constructieve betrouwbaarheidseisen

De constructieve betrouwbaarheidseisen in de LK2003 [1] hebben zowel betrekking op de (toenmalige) Waterwet als op het (toenmalige) Bouwbesluit.

- De betrouwbaarheidseisen voor de toenmalige Waterwet waren uitgedrukt in de maximaal toelaatbare overstromingskans per jaar. De maximaal toelaatbare kans op constructief falen was daarbij gelijk gekozen aan 1% van de normfrequentie.
- De betrouwbaarheidseisen voor het Bouwbesluit betroffen de eisen gesteld conform NEN 6700. Hierin waren de eisen uitgedrukt in de kans op falen gedurende een referentieperiode gelijk aan de levensduur van de constructie.

3.1.2 Safety-format

De fundamentele basiseis uit de LK2003 [1] luidt dat de rekenwaarde van de sterkte (R_d) groter dient te zijn dan de rekenwaarde van de belasting-effecten (E_d). Daarbij worden zowel R_d als E_d uitgedrukt in meters verval, oftewel:

$$R_d > E_d \quad (2.4)$$

Waarin:

R_d is de rekenwaarde van de sterkte R [m];

E_d is de rekenwaarde van het belastingeffect E [m].

De rekenwaarde van de belastingeffecten (E_d) is daarbij gelijk genomen aan de rekenwaarde van de belastingen (S_d). Met andere woorden, de modelonzekerheden om van de belastingen naar belasting-effecten te komen zijn niet meegenomen. Dit houdt in dat:

$$E_d = S_d \quad (2.5)$$

Daarnaast is aangenomen dat de ontwerpwaarde van de belasting slechts een functie is van de binnenwaterstand h_{bi} en de buitenwaterstand H . De eigengewichtsbelasting en overige permanente of variabele belastingen zijn dus verwaarloosd:

$$S_d = \gamma_{S,tot} \cdot (H_{rep} - h_{bi,rep}) \quad (2.6)$$

Waarin:

- S_d is de rekenwaarde van de waterstandsverschilddruk op de waterkering [m];
- $\gamma_{S,tot}$ is de belastingfactor voor de waterstandsverschilddruk [-];
- H_{rep} is de representatieve waarde van de buitenwaterstand ten opzichte van NAP [m];
- $h_{bi,rep}$ is de representatieve waarde van de binnenwaterstand [m].

Opgemerkt wordt dat in de kalibratie is uitgegaan van een Gumbel verdeelde buitenwaterstand H en een Gumbel verdeelde de binnenwaterstand h_{bi} . Echter is de binnenwaterstand meegenomen als deterministische grootheid die is vastgezet op $h_{bi} = h_{bi,0.63} = h_{bi,rep}$ (de modus van de Gumbel-verdeling).

De ontwerpwaarde van de sterkte R_d wordt bepaald middels:

$$R_d = \frac{R_{rep}}{\gamma_R} = \frac{f(f_{rep}, a)}{\gamma_R} \quad (2.7)$$

Waarin:

- R_d is de sterkte van de waterkering [m];
- f_{rep} is de representatieve waarde van de sterkte-parameter;
- a zijn de nominale waarden van afmetingen [m];
- γ_R is de partiële factor voor de sterkte conform materiaal gebonden Eurocodes [-].

De totale belastingfactor op de waterstandsverschilddruk ($\gamma_{S,tot}$) is opgebouwd uit een partiële factor voor de belastingverschilddruk (γ_S) gecombineerd met de correctiefactor voor afwijkende betrouwbaarheidseisen ($\gamma_{R,corr}$), oftewel:

$$\gamma_{S,tot} = \gamma_S \cdot \gamma_{R,corr} \quad (2.8)$$

Waarin:

$$\gamma_S = \frac{H_d - h_{bi,0.63}}{MHW - h_{bi,0.63}} = \frac{u - B \cdot \log(\Phi(\alpha_s \beta_N) / f_N)}{u - B \cdot \log(\Phi(norm))} \quad (2.9)$$

Met:

- H_d is de ontwerpwaarde van de buitenwaterstand ten opzichte van NAP [m]
- $h_{bi,0.63}$ is de ontwerpwaarde van de binnenwaterstand ten opzichte van NAP met een overschrijdingskans van $P(h > h_{bi,0.63}) = 0.63$ per jaar [m]

MHW	is het maatgevend hoogwater / de representatieve buitenwaterstand H_{rep} ten opzichte van NAP [m]
u	is het waterstandsverschil dat met een kans van $P(u > u) = 0.63$ per jaar wordt overschreden [m];
B	is de decimeringswaarde van het waterstandsverschil in [m], ofwel de toename van het waterstandsverschil bij een factor 10 kleinere overschrijdingskans in het lage frequentiegebied per jaar;
α_s	is de invloedscoëfficiënt voor de onzekerheid van de belasting $\alpha_s = -0.7$ [-];
β_N	is de vereiste betrouwbaarheidsindex voor een (gekozen) referentieperiode van N jaar, welke minimaal gelijk is aan de volgens de NEN6700 vereiste waarde van $\beta = 3.6$ [-];
$\Phi(..)$	is de verdelingsfunctie voor de standaard-normale verdeling;
f_N	is de levensduurfactor [jaar];
$norm$	is de gestelde normfrequentie.

De correctiefactor voor afwijkende betrouwbaarheidseisen ($\gamma_{R,corr}$) corrigeert voor het feit dat de materiaalfactoren in de TGB zijn gekalibreerd voor een betrouwbaarheidsindex van $\beta_N = 3.6$, terwijl de betrouwbaarheidsindex in vergelijking (2.9) een variabele is. De correctiefactor kan bepaald worden middels:

$$\gamma_{R,corr} = \exp\left(\alpha_R(\beta_N - 3.6)\sqrt{\ln(1 + V_R^2)}\right) \quad (2.10)$$

Waarin:

α_R	is de invloedscoëfficiënt voor de onzekerheid van de sterkte gelijk aan $\alpha_R = 0.8$ [-];
β_N	is de vereiste betrouwbaarheidsindex voor een (gekozen) referentieperiode van N jaar, welke minimaal gelijk is aan de volgens de NEN6700 vereiste waarde van $\beta = 3.6$ [-];
V_R	is de variatiecoëfficiënt van de sterkte [-].

De belastingfactor op de waterstandsverschildruk ($\gamma_{S,tot}$) dient te worden toegepast in combinatie met de materiaalfactoren conform de materiaal gebonden TGB-normen. Voor de totale belastingfactor op de waterstandsverschildruk mag in beginsel een waarde van $\gamma_{S,tot} = 1.25$ worden gebruikt. Voor het gebied waarbinnen de factor voldoende veilig is te beschouwen wordt verwezen naar LK2003-Appendix B4.2 [1]. In andere gevallen kan de waarde van de totale belastingfactor worden bepaald middels de formules (2.8) tot (2.10).

3.1.3 Aandachtspunten bij kalibratie Leidraad Kunstwerken

1. **Eisen Bouwbesluit:** De kalibratie is uitgevoerd voor de betrouwbaarheidseisen conform NEN 6700 en nog niet voor de betrouwbaarheidseisen conform de NEN-EN 1990 en NEN 8700.
2. **Onzekerheden binnenwaterstand:** In de kalibratie is aangenomen dat de onzekerheid in de vervalbelasting slechts wordt bepaald door de onzekerheid in de buitenwaterstand (H); de binnenwaterstand (h_{bi}) is als een deterministische grootheid meegenomen.
3. **Eisen Waterwet:** In de kalibratie ontbreekt de relatie met de nieuwe overstromingskansnormen (normfrequenties).
4. **Belastingen:** In de kalibratie is slechts de vervalbelasting meegenomen als stochastische variabele. De onzekerheden in de overige variabele belastingen (zoals golfbelasting) en permanente belastingen (zoals eigengewichtsbelasting) zijn buiten beschouwing gelaten.
5. **Belastingcombinatiefactoren:** In de kalibratie zijn de belastingcombinatiefactoren (Ψ) voor het combineren van overige belastingen met hoogwaterbelasting niet gekalibreerd, zie hiervoor tabel 5.2 uit LK 2003 [1].
6. **Klimaatverandering:** In de kalibratie is de hoogwaterbelasting stationair verondersteld. Achteraf is een klimaattoeslag geïntroduceerd.
7. **Invloedscoëfficiënten:** In de kalibratie is uitgegaan van ISO-gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten $\alpha_R = 0.8$ en $\alpha_S = -0.7$ om tot ontwerpwaarden te komen. Deze gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten zijn onafhankelijk gesteld van de referentieperiode; dit is echter niet het geval. Berekening van de totale belastingfactor met deze invloedscoëfficiënten op basis van vergelijkingen (2.8) tot (2.10) kan er soms ten onrechte voor zorgen dat de totale belastingfactor groter wordt bij een grotere referentieperiode.
8. **Safety-format:** In het safety-format wordt de totale belastingfactor ($\gamma_{S,tot}$) toegepast op de waterstandverschildruk bij $H_{rep} = MHW$, zie hiervoor vergelijking (2.6) en Figuur 2. Er wordt dus in principe gerekend met een veiligheidsfactor op het eigengewicht van water ('zwaar water'). Dit heeft gevolgen op het aangrijpingspunt van de resultante belasting. Er had echter ook gekozen kunnen worden voor een alternatief safety-format, waarbij wordt gewerkt met een ontwerpwaarde voor de buitenwaterstand (H_d) en een correctiefactor ($\gamma_{R,corr}$) op de materiaalfactoren, zie hiervoor Figuur 3.
9. **Modelonzekerheid belasting(effecten):** In de kalibratie is de modelonzekerheid in de belasting (effecten) niet meegenomen.
10. **Grenstoestandsfuncties:** In de kalibratie is slechts een lineaire grenstoestandsfunctie beschouwd, oftewel een grenstoestandsfunctie waarbij de belastingen (en belastingeffecten) lineair evenredig zijn met de optredende vervallen over de waterkering.

Er zijn echter gevallen waarin het belastingeffect evenredig is met het kwadraat of de derde macht van het optredende verval, zoals bijvoorbeeld de dwarskracht of het moment aan de voet van de kering.

11. **Golfbelasting:** In de kalibratie is de golfbelasting niet expliciet meegenomen. Wel is erkend dat de golfbelasting in rekening moet worden gebracht. In Bijlage B4.4.4.2 van de LK2003 [1] wordt als eerste benadering een partiële factor op de golfbelasting (γ_{golf}) van 1.25 voorgesteld.

$$H_{max,d} = \gamma_{golf} \cdot H_{max,rep}$$

met:

$$H_{max,rep} = 2.2 \cdot H_{s,rep}$$

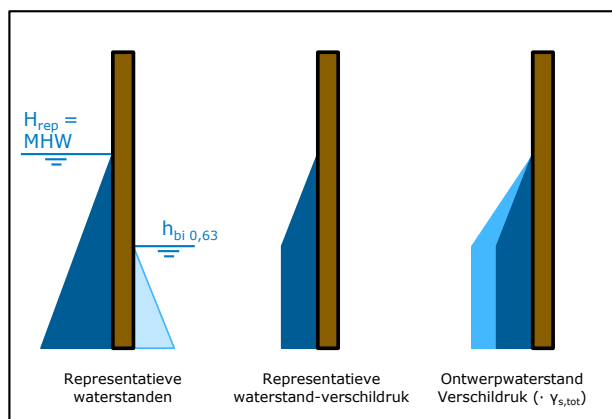
Waarin:

- $H_{max,d}$ is de ontwerpwaarde van de maximale golfhoogte;
- $H_{max,rep}$ is de representatieve waarde van de maximale golfhoogte;
- $H_{s,rep}$ is de significante representatieve golfhoogte.

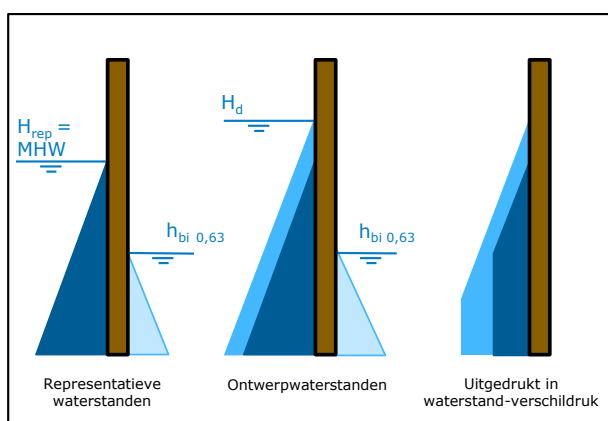
Uitgaande van een Rayleigh-verdeling voor de golfhoogten, correspondeert de factor 2.2 met een overschrijdingskans van 10% tijdens een storm. Deze factor is overgenomen uit vergelijking (B5.3) van de LK2003 [1].

In Bijlage B4.4.4.2 van de LK2003 [1] wordt verwezen naar de formule voor de bepaling van de totale belastingfactor ($\gamma_{s,tot}$) voor de bepaling van $\gamma_{s,golf}$.

Theoretisch is het echter onzuiver om de belastingfactoren voor de buitenwaterstand en de golfhoogte afzonderlijk te bepalen, daar zij gezamenlijk de hydraulische belasting bepalen. Tot heden ontbrak het ontwerpers aan een (software)instrument om een hydraulische belasting inclusief golven bij een bepaalde overschrijdingskans te bepalen. Recent is echter in Hydra-Ring de Goda-formule geïmplementeerd waarmee dit wel mogelijk is.



Figuur 2 – Safety-format LK2003 [1]



Figuur 3 - Alternatief safety-format: direct bepalen van rekenwaarden waterstanden

3.2 Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode

Met de introductie van de Eurocodes NEN-EN1990 en NEN 8700 volgde tevens de introductie van een nieuw safety-format alsmede de introductie van nieuwe betrouwbaarheidseisen voor waterbouwkundige constructies. Ten behoeve van de afstemming tussen de LK2003 [1] en de Eurocodes zijn er diverse studies uitgevoerd, waarvan de belangrijkste hieronder worden toegelicht.

3.2.1 Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode – Activiteit 1

In de eerste studie, 'Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode – Activiteit 1' [2] is de totale belastingfactor voor de waterstandverschildruk ($\gamma_{s,tot}$) gekalibreerd voor de betrouwbaarheidseisen conform NEN-EN1990 (zie punt 1 paragraaf 3.1.3). In de aanpak en uitgangspunten zijn er geen wezenlijke wijzigingen ten opzichte van die voor de LK 2003 [1]. De kalibratie leidde tot een belastingfactor op de waterstandsverschildruk van $\gamma_{s,tot} = 1.5$.

3.2.2 Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode – Activiteit 3

In de derde studie, 'Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode – Activiteit 3' [3], zijn meerdere verfijningen doorgevoerd ten opzichte van de kalibraties voor LK2003 [1].

Allereerst werd een nieuw safety-format gespecificeerd, waarbij wordt gewerkt met een ontwerpwaterstand H_d en een correctiefactor $\gamma_{R,corr}$ op de materiaalfactoren (zie punt 8 paragraaf 3.1.3). Daarbij is de ontwerpwaarde voor buitenwaterstand als volgt gedefinieerd:

$$H_d = MHW + c \cdot B \quad (2.11)$$

Waarin:

- H_d is de rekenwaarde van de buitenwaterstand ten opzichte van NAP [m];
- MHW is de waterstand met overschrijdingskans gelijk aan de normfrequentie [m];
- c is een constante, afhankelijk van de overschrijdingskans, welke in [3] is gekalibreerd voor de verschillende betrouwbaarheidseisen voor Waterwet en Bouwbesluit;
- B is de decimeringshoogte [m].

Evenals in de kalibratieberekeningen voor LK2003 [1] is in de kalibratie aangenomen dat de onzekerheid in de vervalbelasting slechts bepaald wordt door de onzekerheid in de buitenwaterstand (zie punt 2 paragraaf 3.1.3). Echter in [3] wordt een voorstel gedaan om ook de onzekerheid over de binnenwaterstand h_{bi} mee te nemen, gegeven dat de statistiek hiervan bekend is. In dat geval moet H_d gecombineerd worden met de volgende rekenwaarde van de binnenwaterstand:

$$h_{bi,d} = \mu_{bi} - 0.7 \cdot 0.4 \cdot \beta_{eis} \cdot \sigma_{bi} \quad (2.12)$$

Waarin:

- $h_{bi,d}$ is de rekenwaarde van de binnenwaterstand ten opzichte van NAP [m];
- μ_{bi} is het gemiddelde van de momentane binnenwaterstand ten opzichte van NAP [m];
- σ_{bi} is de standaarddeviatie van de momentane binnenwaterstand opzichte van NAP [m];
- β_{eis} is de gestelde betrouwbaarheidseis op jaarbasis.

Tevens is gepoogd de modelonzekerheid in de belasting (effecten) te verdisconteren in het safety-format (zie punt 9 paragraaf 3.1.3). Hiervoor zijn twee alternatieven gegeven:

- toevoeging van een additionele veiligheidsfactor op de ontwerpbelasting, of;
- indien de decimeringshoogte B kleiner is dan $0.08 \cdot (MHW - h_{bi})$, dan moet worden gerekend met $B = 0.08 \cdot (MHW - h_{bi})$.

In de kalibraties van de rekenwaarden voor de buitenwaterstand H_d is de golfbelasting op grond van vereenvoudigde aannamen meegenomen (zie punt 11 paragraaf 3.1.3). In geval van sterke correlatie tussen de buitenwaterstand en de golfbelasting wordt voorgesteld om voor uit te gaan van een waarde met een gelijke overschrijdingskans als de ontwerpwaterstand. In geval van onafhankelijk tussen de buitenwaterstand en de golfbelasting wordt een combinatie-waarde voorgesteld die volgt uit $\alpha_{golf} = 0.4 \cdot (-0.7)$.

4 Aanpak en uitgangspunten kalibratie

In dit hoofdstuk worden de aanpak en de uitgangspunten van voorliggende studie behandeld. Paragraaf 4.1 beschrijft de uitgangspunten van deze kalibratie ten opzichte van de eerder uitgevoerde kalibraties. Paragraaf 4.2 beschrijft de betrouwbaarheidseisen op basis waarvan is gekalibreerd. Paragraaf 4.3 beschrijft de situatieschets voor de hoogwaterbelasting. Paragraaf 4.4 beschrijft de grenstoestandsfunctie onderliggend aan de kalibraties. Paragraaf 4.5 presenteert het voorgestelde safety-format voor de hoogwatersituatie. Paragraaf 4.6 geeft de stochastische beschrijvingen voor elk van de stochastische variabelen die worden meegenomen in de kalibratieberekeningen. Paragraaf 4.7 geeft een beschrijving van de uitgevoerde kalibratie-procedure.

4.1 Uitgangspunten

Het doel van deze studie is om voor het semi-probabilistisch safety-format voor de hoogwatersituatie de rekenwaarde van de belasting (eigengewicht en hoogwaterbelasting) dusdanig te kalibreren zodat voldaan wordt aan de betrouwbaarheidseisen vanuit het Bouwbesluit en de (huidige) Waterwet. De volgende uitgangspunten zijn daarbij gehanteerd:

1. **Eisen Bouwbesluit:** Evenals in de eerdere kalibratie [3] is uitgegaan van de betrouwbaarheidseisen uit de NEN-EN1990.
2. **Onzekerheden binnenwaterstand:** Evenals in de eerdere kalibraties is aangenomen dat de onzekerheid in de vervalbelasting slechts bepaald wordt door de onzekerheid in de buitenwaterstand.
3. **Eisen Waterwet:** In tegenstelling tot eerdere kalibraties is middels de faalkansbegroting expliciet een relatie gelegd tussen de faalkanseisen van de constructie en de nieuwe normfrequenties.
4. **Belastingen:** In de kalibratie zijn slechts de onzekerheden in de eigengewichtsbelasting en de vervalbelasting beschouwd. Overige permanente en variabele belastingen zijn niet meegenomen, wat in de meeste gevallen reëel is in de hoogwaterbelasting-situatie. Dit geldt echter niet voor de golfbelasting, zie punt 11.
5. **Belastingcombinatiefactoren:** In de kalibratie zijn de belastingcombinatiefactoren (Ψ_0) voor het combineren van eigengewichtsbelasting met hoogwaterbelasting gekalibreerd. De belastingcombinatiefactoren voor overige belastingen (zoals golfbelasting) met hoogwaterbelasting zijn niet gekalibreerd (zie tevens combinatie-waarden in Tabel 2 uit LK2003 [1]).
6. **Klimaatverandering:** In tegenstelling tot eerdere kalibraties, is de hoogwaterbelasting niet langer stationair verondersteld; klimaatverandering is expliciet meegenomen.

7. **Invloedscoëfficiënten:** In tegenstelling tot eerdere kalibraties is niet langer uitgegaan van ISO-gestandaardiseerde invloedcoëfficiënten om tot ontwerpwaarden te komen, maar zijn deze bepaald middels volledig probabilistische berekeningen.
8. **Safety-format:** De kalibratie zal worden uitgevoerd voor het safety-format waarbij wordt gewerkt met een ontwerpwaterstand H_d , zie hiervoor Figuur 3. De correctiefactor voor de materiaalfactoren ($\gamma_{R,corr}$) zal worden verdisconteerd in de ontwerpwaterstand.
9. **Model onzekerheid belasting(effecten):** In tegenstelling tot eerdere kalibraties is de modelonzekerheid in de belasting (effecten) expliciet meegenomen.
10. **Grenstoestandsfunctie:** Evenals in de eerdere kalibraties, is slechts een lineaire grenstoestandsfunctie beschouwd.
11. **Golfbelasting:** Evenals in eerdere kalibraties is de golfbelasting niet meegenomen.

4.2 Betrouwbaarheidseisen

De rekenwaarden voor de belastingen zullen worden gekalibreerd voor beide de betrouwbaarheidseisen conform het Bouwbesluit almede de betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet. Voor een algemene uitleg over deze betrouwbaarheidseisen wordt verwezen naar paragraaf 2.2. Hieronder volgt een korte samenvatting.

4.2.1 Betrouwbaarheidseisen conform het Bouwbesluit

Betrouwbaarheidseisen nieuwbouw

Voor de betrouwbaarheidseisen aan nieuwbouw verwijst het Bouwbesluit naar NEN-EN 1990. Deze onderscheidt drie verschillende gevolklassen CC1, CC2, CC3 met bijbehorende betrouwbaarheidseisen. Voor de ultimate limit state en een referentieperiode gelijk aan de levensduur van de constructie zijn deze betrouwbaarheidsindices gelijk aan $\beta_t = 3.3$, $\beta_t = 3.8$ en $\beta_t = 4.3$ respectievelijk. In de kalibratie wordt uitgegaan van een levensduur van 100 jaar. De kalibratie zal plaatsvinden voor alle drie de gevolklassen.

Betrouwbaarheidseisen bestaande bouw

Voor de betrouwbaarheidseisen voor bestaande bouw verwijst het Bouwbesluit naar NEN 8700. In deze studie wordt niet ingegaan op de betrouwbaarheidseisen aan bestaande bouw, daar deze nooit maatgevend zijn ten opzichte van de betrouwbaarheidseisen van de Waterwet.

4.2.2 Betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet

Default betrouwbaarheidseisen

De Waterwet stelt betrouwbaarheidseisen voor een referentieperiode van één jaar. Daarbij geldt dat gedurende de gehele levensduur van de constructie, in elk jaar de faalkans lager dient te zijn dan de gestelde betrouwbaarheidseis. De betrouwbaarheidseisen zijn gespecificeerd op drie verschillende niveaus; op het niveau van een dijktraject, op het niveau van een faalmechanisme en op het niveau van de constructie. De maximaal toegelaten faalkans voor constructief falen per individuele constructie is daarbij afhankelijk van de maximaal toegelaten overstroomingskans op het niveau van het dijktraject (P_{max}), de faalruimtefactor (ω_{CF}) en de lengte-effect factor (N_{CF}).

Uitgaande van de default-waarden voor de faalruimtefactor ($\omega_{CF} = 0.02$) en de lengte-effect factor ($N_{CF} = 3$) en gegeven dat de overschrijdingskansnorm ligt tussen $1/100 < P_{max} \leq 1/100.000$, kan berekend worden dat de betrouwbaarheidseis voor constructief falen per individuele constructie ligt tussen de $3 \leq \beta_t < 5.2$. De kalibratie zal plaatsvinden voor al deze betrouwbaarheidseisen.

Aanpassing betrouwbaarheidseisen in geval van dominante hoogwaterbelasting

Een dijktraject kan falen door verschillende faalmechanismen. Twee van deze faalmechanismen zijn de mechanismen constructief falen (F_{CF}) en falen door golfoverloop of golfoverslag (F_{HT}). Het eerste faalmechanisme is een gevolg van een (te hoge) vervalbelasting op de kering. Het tweede faalmechanisme is een gevolg van erosie of onvoldoende kombergend vermogen.

In het geval van dominante hoogwaterbelasting is de vervalbelasting die voor 'constructief falen' van belang is vrijwel dezelfde als de vervalbelasting die voor 'golfoverloop of golfoverslag' van belang is. Dit heeft als gevolg dat deze faalmechanismen sterk met elkaar zijn gecorreleerd. Echter, in het herleiden van de (default-) betrouwbaarheidseisen is uitgegaan van onafhankelijkheid. Dit maakt de default-betrouwbaarheidseisen voor constructief falen onnodig conservatief. Dit conservatisme heeft twee nadelige gevolgen;

- het zou kunnen leiden tot (onnodig) hoge ontwerpwaarden van de buitenwaterstand H_d wat resulteert in een (onnodig) dure constructie;
- het zou kunnen leiden tot ontwerpwaarden van de buitenwaterstand (H_d) die hoger zijn dan de fysieke hoogte van de waterkerende constructie. Bij dergelijke belastingen zou een kering al door golfoverloop of golfoverslag gefaald kunnen zijn. Er zou in de praktijk ook verwarring kunnen ontstaan bij de constructeur.

In bijlage C zijn de effecten van de (verwaarlozing van de) correlatie tussen de faalmechanismen 'constructief falen' en 'falen door golfoverloop of golfoverslag' kwantitatief onderzocht in geval van dominante hoogwaterbelasting. Er kan geconcludeerd worden dat de maximaal toegelaten faalkans voor het faalmechanisme constructief falen voor een bepaalde constructie met een factor 2 verhoogd kan worden ten opzichte van de default-faalkanseis. Deze factor 2 is een conservatieve omhullende voor een groot scala aan ontwerpsituaties. Voor een specifieke situatie, met name bij lagere normfrequenties, kan deze waarde hoger zijn.

4.3 Situatieschets hoogwaterbelasting

4.3.1 De vervalbelasting

Figuur 4 toont een waterbouwkundige constructie met bijbehorende waterstanden. De vervalbelasting V over de constructie beschrijft het verschil tussen de buitenwaterstand h_{bu} en de binnenwaterstand h_{bi} en is een maat voor de hoogwaterbelasting:

$$V = h_{bu} - h_{bi} \quad (3.1)$$

Evenals in de LK2003 [1] en de daarop volgende studies wordt in deze studie de onzekerheid in de vervalbelasting volledig bepaald door de onzekerheid in de buitenwaterstand h_{bu} . De binnenwaterstand h_{bi} wordt deterministisch verondersteld.

In tegenstelling tot de eerdere kalibraties, wordt in deze studie aangenomen dat de buitenwaterstand h_{bu} is opgebouwd uit een constant (deterministisch) deel $h_{bu,c}$ en een variabel (stochastisch) deel $h_{bu,v}$, oftewel:

$$h_{bu} = h_{bu,c} + h_{bu,v} \quad (3.2)$$

Het minimale (altijd aanwezige) verval over de kering h_{min} kan dan worden geschreven als:

$$h_{min} = h_{bu,c} - h_{bi} \quad (3.3)$$

De vervalbelasting is dus gelijk aan:

$$V = h_{bu,v} + h_{min} \quad (3.4)$$

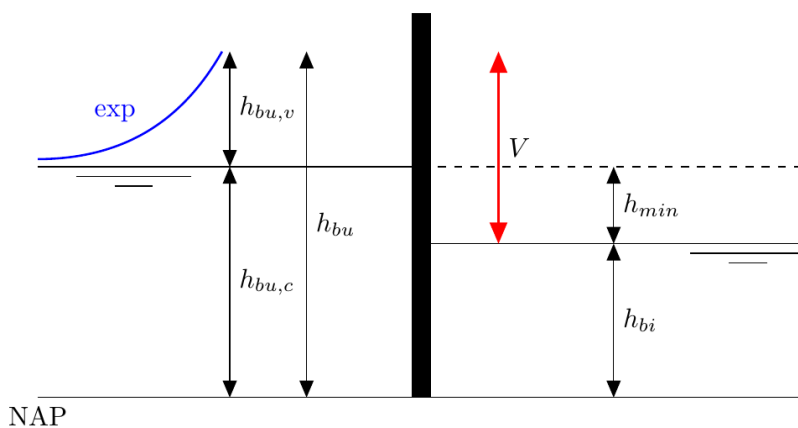
De opdeling van de buitenwaterstand in een constant deel ($h_{bu,c}$) en een variabel deel ($h_{bu,v}$) staat het toe om een constructie te typeren middels de *verhouding* tussen het variabele en het constante deel van de buitenwaterstand, oftewel middels de *verhouding* B / h_{min} .

Door te werken met dit verhoudingsgetal, kan binnen de kalibratie een groot scala aan mogelijke ontwerpscenario's worden meegenomen.

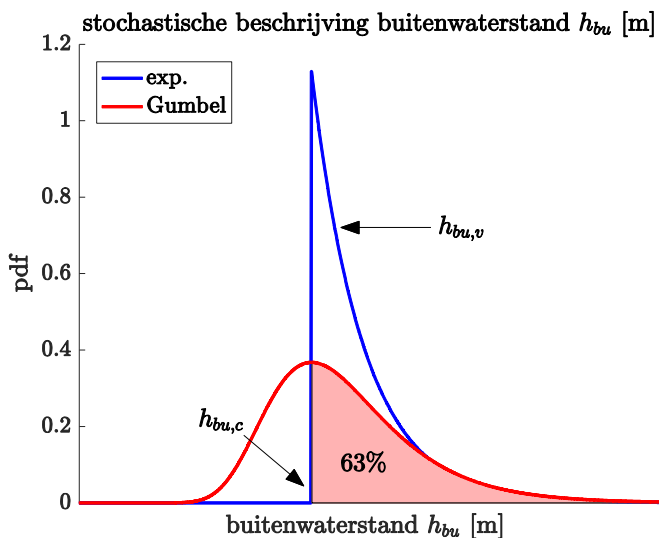
Een maat voor de spreiding van de buitenwaterstand is de decimeringshoogte B , die de hoogte beschrijft waarbij de overschrijdingskans van de buitenwaterstand met een factor 10 afneemt. In eerdere kalibratiestudies werd de buitenwaterstand h_{bu} Gumbel-verdeeld verondersteld met de modus gelijk aan $h_{bu} = h_{bu,0.63}$. In deze studie is aangenomen dat het constante deel van de vervalbelasting ($h_{bu,c}$) gelijk is aan de modus van de Gumbel-verdeling. Het variabele deel van de buitenwaterstand ($h_{bu,v}$) is benaderd middels een exponentiële verdeling met een shift van $h_{bu,c} = h_{bu,0.63}$. De motivatie voor de toepassing van een exponentieel verdeelde variabele buitenwaterstand is tweevoud;

- allereerst is bij het opstellen van de normfrequenties uitgegaan van exponentieel verdeelde belastingen. Op deze manier kan dus naadloos worden aangesloten op de wijze waarop de effecten van klimaatveranderingen op de belastingen in rekening zijn gebracht bij het vaststellen van de normering;
- daarnaast is de exponentiële verdeling een goede benadering voor de staart van de Gumbel-verdeling voor kleine overschrijdingskansen, zie hiervoor Figuur 5.

Voor de exacte definitie van de verdelingsfunctie voor de vervalbelasting V wordt verwezen naar paragraaf 4.6.1.



Figuur 4 – Situatieschets



Figuur 5 – Benadering van de buitenwaterstand middels een constant en een variabel deel

4.3.2 Het totale belastingeffect

Het totale belastingeffect op de waterbouwkundige constructie E is in deze studie beperkt tot een functie van de vervalbelasting V en de eigengewichtsbelasting G van de constructie en kan worden geschreven als:

$$E = \theta_E (G + V) \quad (3.5)$$

waarin:

E is het belastingeffect;

θ_E is de modelonzekerheid voor de vertaling van belasting naar belastingeffecten;

G is de eigengewichtsbelasting;

V is de vervalbelasting, zie hiervoor vergelijking (3.4).

4.4 Grenstoestandsfunctie

In deze studie zal de volgende grenstoestandsfunctie worden gehanteerd:

$$\begin{aligned} Z &= R - E \\ &= R - \theta_E (G + V) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Waarin R de sterkte is van het constructieve element. Voor de overige parameters wordt verwezen naar paragraaf 4.3.

4.5 Safety-format

Het safety-format dat in deze studie wordt gekalibreerd is identiek voor het Bouwbesluit en de Waterwet, met als verschil dat in beide gevallen verschillende grootheden zullen worden gekalibreerd. In paragraaf 4.5.1 wordt het gekozen safety-format toegelicht. In paragraaf 4.5.2 wordt toegelicht welke grootheden worden gekalibreerd.

4.5.1 Safety-format

Uitgangspunt van het voorgestelde safety-format is de fundamentele basiseis van NEN-EN1990 dat de rekenwaarden van de sterkte (R_d) gelijk of hoger dient te zijn dan de rekenwaarde van de belastingeffecten (E_d), oftewel:

$$R_d \geq E_d \quad (3.7)$$

Voor het bepalen van de belastingeffecten wordt uitgegaan van de fundamentele belastingcombinaties voor blijvende of tijdelijke ontwerpsituaties zoals voorgesteld in NEN-EN1990 formules 6.10a en 6.10b, ingevuld voor de hoogwatersituatie. Dit leidt tot de volgende bepalingen:

$$E_{d,a} = k_{FI} \gamma_G G_k + \Psi_0 V_d \quad (6.10a)$$

$$E_{d,b} = k_{FI} \gamma_G \xi G_k + V_d \quad (6.10b)$$

$$E_d = \max(E_{d,a}; E_{d,b})$$

Waarin:

- k_{FI} is de factor die in geval van de toetsing conform het Bouwbesluit afhangt van de gekozen gevolgklasse CC1, CC2, of CC3 en in geval van toetsing conform de Waterwet gelijk gesteld is aan 1;
- γ_G is de partiële factor voor permanente belastingen;
- ξ is de reductiefactor voor ongunstige eigengewichtsbelasting;
- V_d is de rekenwaarde van de vervalbelasting;
- Ψ_0 is de belastingcombinatiefactor.

Verificatieformule (6.10a) is relevant indien de eigengewichtsbelasting dominant is. Verificatieformule (6.10b) is relevant indien de vervalbelasting dominant is.

In het safety-format is de rekenwaarde van de vervalbelasting (V_d) direct gespecificeerd, dus zonder toepassing van een partiële factor. De combinatiewaarde van de vervalbelasting (V_{com}) is niet direct gespecificeerd, maar volgt uit:

$$V_{com} = \Psi_0 V_d \quad (3.8)$$

De rekenwaarde van de eigengewichtsbelasting (G_d) volgt uit de combinatie van de partiële factor γ_G en de representatieve waarde G_k , oftewel:

$$G_d = \gamma_G G_k \quad (3.9)$$

In de te kalibreren grootheden zit dus zowel de modelonzekerheid om van belastingen naar belastingeffecten te komen (θ_ε), evenals de correctiefactor voor de materiaalfactor ($\gamma_{R,corr}$). Zie hiervoor tevens paragraaf 5.3.

4.5.2 Overzicht te kalibreren grootheden

Tabel 3 toont welke van de grootheden binnen het voorgestelde safety-format in deze studie gekalibreerd zullen worden. De waarden in de tabel gemarkeerd met een asterisk zijn advieswaarden conform NEN-EN1990. In deze studie wordt geverifieerd in hoeverre deze advieswaarden resulteren in voldoende betrouwbaarheid.

Tabel 3 – Overzicht van de (te kalibreren) grootheden uit het voorgestelde safety-format

Parameter	Bouwbesluit	Waterwet	Opmerking
γ_G	1.35 *	te kalibreren in kalibratiestap 2, zie paragraaf 4.7.3	
k_{FI}	CC1: 0.9 * CC2: 1.0 * CC3: 1.1 *	1	
ξ	0.89 *	0.89 *	
Ψ_0	te kalibreren in kalibratiestap 2, zie paragraaf 4.7.2	keuze voor gekalibreerde waarde in kalibratiestap 1, Bouwbesluit.	
G_k	toepassing materiaalgebonden Eurocodes	toepassing materiaalgebonden Eurocodes	
V_d	te kalibreren in kalibratiestap 1, zie paragraaf 4.7.2	te kalibreren in kalibratiestap 1, zie paragraaf 4.7.3	uitgedrukt in overschrijdingskans in betreffend levensjaar

4.5.4 Uitdrukking rekenwaarden

Bouwbesluit

In het geval van de kalibratieberekeningen ten behoeve van het Bouwbesluit zullen de rekenwaarden voor de vervalbelasting V_d worden gegeven als functie van de overschrijdingskans in het honderdste levensjaar. Deze kans wordt vervolgens door de constructeur gebruikt om de rekenwaarde van de vervalbelasting (V_d) af te lezen uit het vigerende belastingmodel (bijvoorbeeld Hydra-NL). De rekenwaarden van de combinatiewaarde van de vervalbelasting (V_{com}) worden tevens gegeven als functie van de overschrijdingskans in het honderdste levensjaar. De waarde kan echter ook bepaald worden middels toepassing van $V_{com} = \Psi_0 V_d$.

Waterwet

In het geval van de kalibratieberekeningen ten behoeve van de Waterwet vinden de kalibratieberekeningen zowel plaats voor het eerste als voor het honderdste levensjaar, zie hiervoor paragraaf 4.7.3. In geval van het eerste levensjaar, zullen de rekenwaarden voor de vervalbelasting V_d worden gegeven als functie van de overschrijdingskans in het eerstelevensjaar, dus in termen van $P(V > V_d)_{j1}$. In geval van het honderdste levensjaar, zullen de rekenwaarden voor de vervalbelasting V_d worden gegeven als functie van de overschrijdingskans in het honderdste levensjaar, dus in termen van $P(V > V_d)_{j100}$.

De rekenwaarden van de combinatiewaarde van de vervalbelasting V_{com} worden tevens gegeven als functie van de overschrijdingskans in het eerste of honderdste levensjaar. De waarden kunnen echter ook bepaald worden middels toepassing van $V_{com} = \Psi_0 \cdot V_d$.

4.6 Beschrijving stochastische variabelen

4.6.1 De vervalbelasting

4.6.1.1 Stochastische beschrijving

De vervalbelasting V wordt beschreven als een exponentieel verdeelde stochastische variabele met een shift van h_{min} , zie tevens paragraaf 4.6.1. Rekening houdend met klimaatverandering is de verdelingsfunctie voor V in levensjaar i te schrijven als:

$$F_{V, \text{jaar } i}(v) = \max \left[1 - \exp \left(- \frac{v - h_{min}}{b} \right) \cdot a^i; 0 \right] \quad (3.10)$$

Waarin:

- V is de vervalbelasting [m];
- h_{min} is het minimaal (altijd aanwezige) verval over de kering [m];
- b is een schaalparameter [-], direct gerelateerd aan de decimeringhoogte B door $b = B / \ln(10)$;

- B is de decimeringshoogte [m], welke de hoogte beschrijft waarbij de overschrijdingskans van de vervalbelasting met een factor 10 afneemt;
- a is de klimaatfactor [-];
- i is het beschouwde levensjaar [-];

De N - jaar extremen van het verval op de constructie kan worden geschreven als:

$$F_{V,N\text{ jaar}}(v) = \prod_{i=1}^N F_{V,\text{jaar } i}(v) \quad (3.11)$$

Voor zowel de kalibratieberekeningen voor de Waterwet alsmede de kalibratieberekeningen van het Bouwbesluit wordt gebruik gemaakt van de formule voor de N - jaar extremen.

4.6.1.2 Verhouding decimeringshoogte en het minimaal verval

Een waterbouwkundige constructie kan worden getypeerd middels de *verhouding* tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval (B / h_{min}), zie hiervoor paragraaf 4.3.1. Door te werken met dit verhoudingsgetal, kan binnen de kalibratie een groot scala aan mogelijke ontwerpscenario's worden meegenomen.

Om rekening te houden met alle watersystemen in Nederland zullen de kalibratieberekeningen worden uitgevoerd voor de alle ratio's tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval liggend tussen $0.5 < B / h_{min} \leq 2.5$.

Opgemerkt wordt dat de overschrijdingskans van de ontwerpwaarde van de vervalbelasting $P(V > V_d)$ onafhankelijk is van de *exacte specificatie* van B en h_{min} en slechts afhankelijk is van de *verhouding* tussen B / h_{min} . Dit wordt aangetoond in paragraaf B.3.

Voor het bepalen van de ontwerpwaarden van de vervalbelasting zou in principe dus slechts een definiëring van de verhouding B / h_{min} voldoende zijn. Echter is voor het uitvoeren van de kalibratieberekeningen wel een *exacte specificatie* van beide parameters nodig. In de kalibratieberekeningen wordt daarom gewerkt met dummy-waarden voor de decimeringshoogte (B_δ) en het minimaal verval ($h_{min,\delta}$). De resultaten van de kalibratie zijn onafhankelijk voor de keuze van deze dummy-waarden.

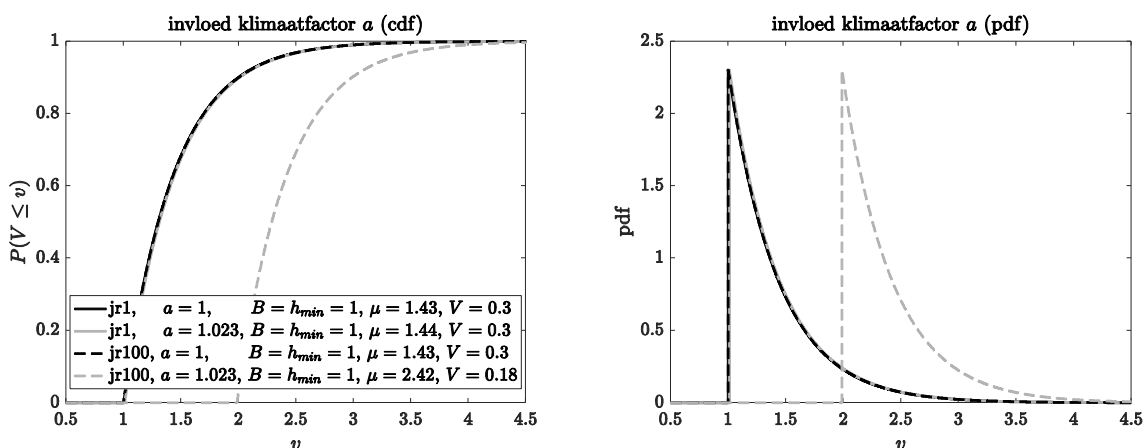
4.6.1.3 Klimaatscenario's

De kalibratieberekeningen zijn uitgevoerd voor twee klimaatscenario's;

- het scenario waar klimaatverandering als verwaarloosbaar wordt beschouwd ($a=1$) ;
- het scenario waar klimaatverandering zorgt voor een toename van (kleine) overschrijdingskansen met een factor 10 per eeuw ($a=1.023$) .

Figuur 6 toont de verdelingsfunctie van de vervalbelasting voor de situatie met ($\alpha=1.023$) en de situatie zonder ($\alpha=1$) klimaatverandering en voor zowel het eerste en het honderdste levensjaar van de constructie. De waarden van B en h_{min} zijn vastgezet op $B=h_{min}=1$ [m]. In het eerste levensjaar is de verdelingsfunctie voor de vervalbelasting identiek voor de situatie met en de situatie zonder klimaatverandering. Voor de situatie zonder klimaatverandering is de verdelingsfunctie in het honderdste levensjaar gelijk aan de verdelingsfunctie in het eerste levensjaar. Dit geldt echter niet voor de situatie met klimaatverandering, waarbij de verdelingsfunctie verschoven is met een waarde gelijk aan $\ln(\alpha^N) \cdot b$. Zie hiervoor vergelijking (3.12).

$$\begin{aligned}
 1 - \exp\left(-\frac{v-h_{min}}{b}\right) \cdot \alpha^N &= 1 - \exp\left(-\frac{v-h_{min}}{b}\right) \cdot \exp(\ln(\alpha^N)) \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{v-h_{min}}{b} + \ln(\alpha^N)\right) \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{v-h_{min}}{b} + \frac{\ln(\alpha^N) \cdot b}{b}\right) \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{v-h_{min} - \ln(\alpha^N) \cdot b}{b}\right)
 \end{aligned} \tag{3.12}$$



Figuur 6 – Verdelingsfuncties (cdf, links) en kansdichtheidsfuncties (pdf, rechts) voor de vervalbelasting voor zowel het eerste als het 100^e levensjaar van de constructie en voor zowel het scenario met (grijs) als het scenario zonder (zwart) klimaatverandering.

4.6.2 Sterkte van het constructieve element

De sterkte van het constructieve element wordt aangenomen als een lognormaal verdeelde stochastische variabele met een variatiecoëfficiënt van $V_R = 0.15$. Dit komt overeen met de in [4] voorgestelde probabilistische beschrijving voor een groot aantal sterkte-parameters. Aangenomen wordt dat de rekenwaarde van de sterkte (R_d) overeenkomt met de niveau I rekenwaarde van de sterkte volgens NEN-EN1990 Annex C:

$$P(R > R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta_t) \tag{3.13}$$

Waarbij:

- R_d is de rekenwaarde van de sterkte, bepaald volgens het safety-format in paragraaf 4.5;
- $\Phi(..)$ is de cumulatieve verdelingsfunctie van een standaard normaal verdeelde variabele;
- α_R is de gestandaardiseerde invloedscoëfficiënt voor de sterkte, gelijk gesteld aan $\alpha_R = 0.8$ volgens NEN-EN1990 Annex C;
- β_t is de betrouwbaarheidseis.

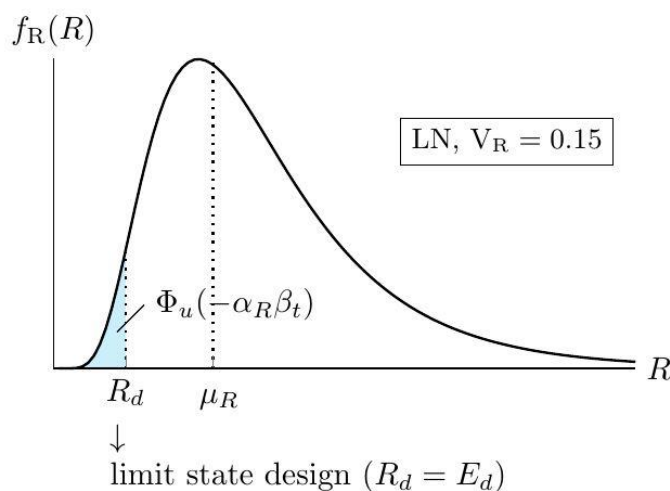
Volgens NEN-EN1990 Tabel C3 kan vergelijking (3.13) voor kleine variatiecoëfficiënten worden benaderd middels:

$$R_d = \mu_R \exp(-\alpha_R \beta_t V_R) \quad (3.14)$$

Oftewel:

$$\mu_R = R_d \exp(\alpha_R \beta_t V_R) \quad (3.15)$$

In de kalibratieberekeningen wordt de betrouwbaarheidseis vastgesteld op $\beta_t = 3.8$, ongeacht de betrouwbaarheidseis waarvoor de kalibratie plaatsvindt. Correcties voor andere betrouwbaarheidseisen vinden plaats via de rekenwaarde van de belastingeffecten. Voor een visualisatie van de stochastische beschrijving van de sterkte zie Figuur 7.



Figuur 7 - Verdelingsfunctie van de sterkte

4.6.3 Eigengewichtsbelasting

De eigengewichtsbelasting wordt aangenomen als een normaal verdeelde stochastische variabele met een gemiddelde van μ_G variatiecoëfficiënt $V_G = 0.1$.

Om rekening te houden met alle watersystemen binnen Nederland, dient te worden gevarieerd in de ratio tussen de eigengewichtsbelasting G en de vervalbelasting V . Een dergelijke ratio kan op verschillende manieren worden gespecificeerd, bijvoorbeeld de ratio tussen de gemiddelden, of de ratio tussen de karakteristieke waarden etc. In deze studie is de ratio gespecificeerd op basis van de rekenwaarden. Daarbij wordt de rekenwaarde van de eigengewichtsbelasting geschreven als:

$$G_d = V_d / f \quad (3.16)$$

Waarin:

G_d is de rekenwaarde van de eigengewichtsbelasting

V_d is de rekenwaarde van de vervalbelasting

f is de ratio tussen de rekenwaarde van de vervalbelasting en de rekenwaarde van de eigengewichtsbelasting.

De karakteristieke waarde van de eigengewichtsbelasting wordt bepaald met behulp van de partiële factor voor permanente belastingen:

$$G_k = G_d / \gamma_G \quad (3.17)$$

De karakteristieke waarde van de eigengewichtsbelasting is gelijk aan de gemiddelde waarde van de eigengewichtsbelasting [4], dus:

$$\mu_G = G_k \quad (3.18)$$

Indien $f \rightarrow 0$ is de eigengewichtsbelasting dominant en indien $f \rightarrow \infty$ is de vervalbelasting dominant. Toepassing van de ratio $f = \infty$ correspondeert met de situatie zonder eigengewichtsbelasting. Immers, substitutie van $f = \infty$ in vergelijkingen (3.16), (3.17) en (3.18) resulteert in $\mu_G = \sigma_G = 0$.

De kalibratieberekeningen worden uitgevoerd voor alle verhoudingen tussen de ontwerpwaarde van de vervalbelasting en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting liggend tussen $0.1 \leq f \leq 10$. Dit is een ruim gekozen range die op een later stadium beter bekeken dient te worden.

4.6.4 Modelfactor belastingeffect

De modelfactor voor het belastingeffect θ_E beschrijft de onzekerheden in de mechanica-berekening bij het transformeren van de belastingen naar de belastingeffecten. De modelonzekerheid θ_E wordt aangenomen als een normaal verdeelde stochastische variabele met een gemiddelde waarde $\mu_{\theta_E} = 1.0$ en een variatiecoëfficiënt $V_{\theta_E} = 0.05$.

Dit correspondeert met de in [4] voorgestelde probabilistische beschrijving voor de model-onzekerheid voor spanningen in 2D-solids.

4.6.5 Samenvatting

Tabel 4 presenteert een samenvatting van de verdelingstypen, de gemiddelden en de variatiecoëfficiënten van de stochastische variabelen uit grenstoestandsfunctie zoals beschreven in paragraaf 4.4. Tabel 5 presenteert de scenario's die zijn meegenomen in de kalibratie.

Tabel 4 – Karakteristieken stochastische variabelen

variabele	beschrijving	verdeling	gemiddelde	variatiecoëfficiënt
R	sterkte constructieve element	LOG	$R_d \exp(\alpha_R \beta_t V_R)$	0.15
V	de verval-belasting	EXP	functie van de referentieperiode N , de verhouding B / h_{min} en klimaatfactor a	functie van de referentieperiode N , de verhouding B / h_{min} en klimaatfactor a
G	Eigengewichts belasting	NOR	$\frac{V_d}{f \cdot \gamma_G}$	0.10
θ_E	factor voor modelonzekerheid belasting-effect	NOR	1.00	0.05

Tabel 5 – Overzicht van de scenario's die zijn meegenomen in de kalibratie

variabele	beschrijving	te beschouwen waarden
B / h_{min}	verhouding tussen de decimeringshoogte B en het minimaal aanwezige verval h_{min}	alle waarden tussen: $0.5 \leq B / h_{min} \leq 2.5$
a	klimaatfactor	beide waarden: $a = [1 \quad 1.023]$
f	de verhouding tussen de rekenwaarde van de vervalbelasting V_d en de rekenwaarde van de eigengewichtsbelasting G_d	alle waarden tussen $0.1 \leq f \leq 10$

4.7 Aanpak kalibratie

4.7.1 Dummy-waarden voor decimeringshoogte en minimaal verval

Als genoemd is de overschrijdingskans van de ontwerpwaarde van de vervalbelasting $P(V > V_d)$ onafhankelijk van de exacte specificatie van B en h_{min} en slechts afhankelijk is van de verhouding tussen B/h_{min} . Echter is voor het uitvoeren van de kalibratieberekeningen wel een exacte specificatie van beide parameters nodig. In de kalibratieberekeningen wordt daarom gewerkt met dummy-waarden voor de decimeringshoogte (B_δ) en het minimaal verval ($h_{min,\delta}$). Voor de keuze van de dummy-waarden wordt verwezen naar Bijlage A. De resultaten van de kalibratie zijn echter onafhankelijk voor de keuze van deze dummy-waarden.

4.7.2 Kalibratie voor het Bouwbesluit

Volgens Tabel 3 dienen voor het Bouwbesluit de volgende parameters te worden gekalibreerd:

- de ontwerpwaarde van de vervalbelasting V_d
- de belastingcombinatiefactor Ψ_0

De kalibratie is opgedeeld in twee stappen. Voor een gedetailleerde beschrijving van elk van de stappen wordt verwezen naar bijlage A.

- *Kalibratiestap 1*

In kalibratiestap 1 wordt de minimaal benodigde rekenwaarde voor de vervalbelasting (V_d) gekalibreerd voor situaties zonder eigengewichtsbelasting. Daarbij wordt de ratio tussen de ontwerpwaarde van de vervalbelasting (V_d) en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting (G_d) gelijk gesteld op $f = V_d / G_d = \infty$. Dit houdt in dat slechts de in het safety-format gepresenteerde formule (6.10b) (variabele belasting dominant) gekalibreerd.

Kalibratiestap 1 wordt uitgevoerd voor alle ratio's $0.5 < B/h_{min} \leq 2.5$ en voor zowel het scenario met als het scenario zonder klimaatverandering.

- *Kalibratiestap 2*

Gegeven de in kalibratiestap 1 bepaalde ontwerpwaarde voor de vervalbelasting (V_d) wordt in kalibratiestap 2 wordt de minimaal benodigde waarde voor de belastingcombinatiefactor Ψ_0 gekalibreerd voor situaties met eigengewichtsbelasting. Focus van deze kalibratiestap ligt dus op de in het safety-format gepresenteerde formule (6.10a) (eigengewichtsbelasting dominant). Gezocht wordt naar een algemeen toepasbare waarde voor Ψ_0 die, gecombineerd met het voorgestelde safety-format zoals beschreven in paragraaf 4.5, voor alle de consequentieklassen CC1, CC2 en CC3 voor voldoende betrouwbaarheid zorgt. Kalibratiestap 2 wordt uitgevoerd voor alle ratio's $0.1 < f \leq 10$, de twee uiterste ratio's van $B/h_{min} = [0.5 \quad 2.5]$ en voor zowel het scenario met klimaatverandering als het scenario zonder klimaatverandering.

4.7.3 Kalibratie voor de Waterwet

Volgens Tabel 3 dienen voor de Waterwet de volgende grootheden te worden gekalibreerd:

- de ontwerpwaarde voor de vervalbelasting V_d
- de partiële factor voor eigengewichtsbelasting γ_G

In de kalibratie wordt de waarde voor de belastingcombinatiefactor Ψ_0 wordt gelijk genomen aan de in kalibratiestap 2 – Bouwbesluit bepaalde waarde.

Evenals bij de kalibratie voor het Bouwbesluit is de kalibratie voor de Waterwet opgedeeld in twee stappen. Deze stappen zijn nauw gerelateerd aan de stappen voor het Bouwbesluit. Een groot verschil is echter dat ditmaal de kalibratie tweemaal wordt uitgevoerd; eenmaal voor het eerste levensjaar van de constructie en eenmaal voor het honderdste levensjaar van de constructie. Voor een gedetailleerde beschrijving van elk van de stappen wordt verwezen naar bijlage A.

- *Kalibratiestap 1*

Kalibratiestap 1 is geheel identiek aan kalibratiestap 1 – Bouwbesluit, met als uitzondering dat de kalibratie eenmaal wordt uitgevoerd voor het eerste levensjaar van de constructie en eenmaal voor het honderdste levensjaar van de constructie.

- *Kalibratiestap 2*

Gegeven de in kalibratiestap 1 bepaalde ontwerpwaarde voor de vervalbelasting (V_d), wordt in kalibratiestap 2 wordt de minimaal benodigde partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G) gekalibreerd voor situaties met eigengewichtsbelasting. Focus van deze kalibratiestap ligt dus op de in het safety-format gepresenteerde formule (6.10a) (eigengewichtsbelasting dominant). Gezocht wordt naar die γ_G die, gecombineerd met het voorgestelde safety-format zoals beschreven in paragraaf 4.5, voor voldoende betrouwbaarheid zorgt.

Kalibratiestap 2 wordt uitgevoerd voor alle ratio's $0.1 < f \leq 10$, de twee uiterste ratio's van $B/h_{min} = [0.5 \quad 2.5]$, voor zowel het scenario met klimaatverandering en het scenario zonder klimaatverandering en voor zowel het eerste levensjaar van de constructie en het honderdste levensjaar van de constructie.

5 Resultaten kalibratieberekeningen

In het voorgaande hoofdstuk zijn de aanpak en de uitgangspunten beschreven voor de uitgevoerde kalibratieberekeningen. In dit hoofdstuk worden de (tussen)resultaten van de uitgevoerde kalibratieberekeningen toegelicht. Voor het onderliggende safety-format wordt nogmaals verwezen naar paragraaf 4.5 - Safety-format. Voor de aanpak van de kalibratie wordt nogmaals verwezen naar paragraaf 4.7 - Aanpak kalibratie en bijlage A – Toelichting kalibratieberekeningen.

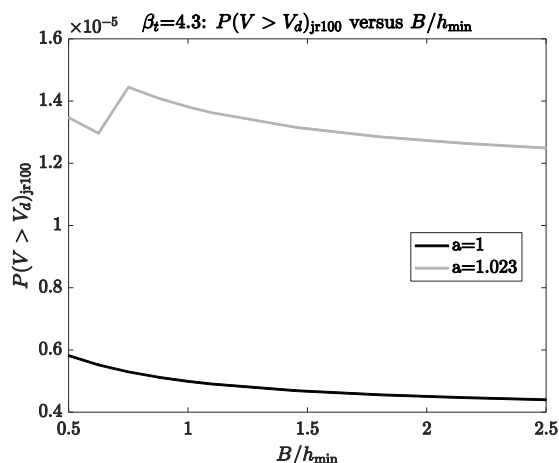
5.1 Resultaten kalibratieberekeningen Bouwbesluit

In geval van het Bouwbesluit zijn de kalibraties uitgevoerd voor alle drie de gevolgklassen CC1, CC2 en CC3, met bijbehorende betrouwbaarheidsindices $\beta_t = 3.3$, $\beta_t = 3.8$ en $\beta_t = 4.3$ voor de ultimate limit state en een referentieperiode gelijk aan honderd jaar. Ter illustratie worden in deze paragraaf de (tussen)resultaten beschreven voor de kalibratieberekeningen van CC3. Voor de (tussen)resultaten van CC2 en CC1 wordt verwezen naar bijlage D.

5.1.1 Kalibratiestap 1

In kalibratiestap 1 is de minimaal benodigde rekenwaarde voor de vervalbelasting gekalibreerd voor situaties zonder eigengewichtsbelasting. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 8, welke de minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting (y-as) presenteert als functie van de verhouding tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval (x-as). De minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting is uitgedrukt in de kans van overschrijden in het honderdste levensjaar van de constructie. De sprongen in de overschrijdingskansen het gevolg zijn van numerieke afrondingen. De sprongen vallen echter binnen de gewenste precisie. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat:

- de overschrijdingskansen afneemt met toenemende verhouding tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval;
- de overschrijdingskansen hoger is voor het scenario met klimaatverandering dan voor het scenario zonder klimaatverandering. Dit betekent echter niet dat de absolute waarde van de vervalbelasting lager is voor het scenario met klimaatverandering dan het voor scenario zonder klimaatverandering;



Figuur 8 – Bouwbesluit, CC3 ($\beta_t = 4.3$): minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting (y-as) als functie van de verhouding tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval (x-as), uitgedrukt in de kans van overschrijden in het honderdste levensjaar van de constructie.

Om praktische redenen is het ongewenst om in het safety-format voor elke verhouding van B/h_{min} waarden voor $P(V > V_d)_{jr100}$ te specificeren. Dit zou immers afbreuk doen aan het karakter van een alom toepasbaar semi-probabilistisch safety-format. Er is daarom een omhullende voor $P(V > V_d)_{jr100}$ gespecificeerd die elke verhouding B/h_{min} dekt. Uit Figuur 8 kan worden afgeleid dat, in geval van CC3 is deze omhullende gelijk aan $P(V > V_d)_{jr100} \approx 4 \cdot 10^{-6}$ voor het scenario zonder klimaatverandering en $P(V > V_d)_{jr100} \approx 1 \cdot 10^{-5}$ voor het scenario met klimaatverandering.

Eenzelfde exercitie is uitgevoerd voor de consequentieklassen CC1 en CC2. Een overzicht van de resultaten is weergegeven in Tabel 6. Uit de tabel blijkt dat de overschrijdingskansen afnemen met toenemende doelbetrouwbaarheid, oftewel dat de minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting toeneemt met toenemende doelbetrouwbaarheid.

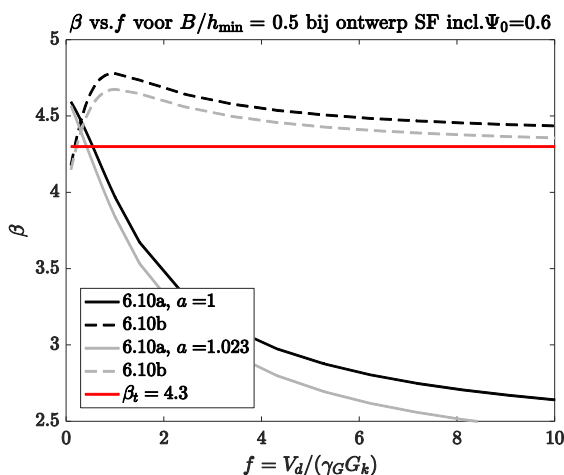
Tabel 6 – Bouwbesluit: omhullende overschrijdingskansen van de rekenwaarde van de vervalbelasting in het honderdste levensjaar, als functie van de gevolgklasse CC1 / CC2 / CC3.

Gevolgklasse	Betrouwbaarheidseis levensduur (β_t)	Overschrijdingskansen in honderdste levensjaar $P(V > V_d)_{jr100}$	
		geen klimaatverandering	wel klimaatverandering
CC1	3.3	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
CC2	3.8	$3 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$
CC3	4.3	$4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$

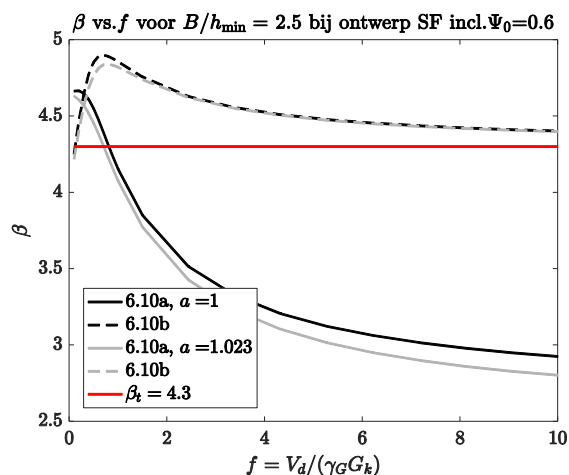
5.1.2 Kalibratiestap 2

In kalibratiestap 2 is de minimaal benodigde waarde voor de belastingcombinatiefactor Ψ_0 gekalibreerd voor situaties met eigengewichtsbelasting. Daarbij is gezocht naar een algemeen toepasbare waarde voor Ψ_0 die, gecombineerd met het voorgestelde safety-format zoals beschreven in paragraaf 4.5, voor alle de consequentieklassen CC1, CC2 en CC3 voor voldoende betrouwbaarheid zorgt. Uit de berekeningen volgt dat toepassing van de waarde $\Psi_0 = 0.6$ leidt tot voldoende betrouwbaarheid.

Ter illustratie presenteren Figuur 9 en Figuur 10 de verkregen betrouwbaarheidsniveaus in geval van ontwerp volgens het safety-format (SF) en bij gebruik van $\Psi_0 = 0.6$ voor alle ratio's $0.1 < f \leq 10$ en voor de ratio's $B/h_{min} = 0.5$ en $B/h_{min} = 2.5$ respectievelijk. Inderdaad ligt in beide gevallen het maximum van de verificatieformules (6.10a) en (6.10b) boven de gestelde betrouwbaarheidseis van $\beta_t = 4.3$.



Figuur 9 – Bouwbesluit, CC3 ($\beta_t = 4.3$): betrouwbaarheidsniveaus verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief $\Psi_0 = 0.6$) voor de verhouding $B/h_{min} = 0.5$, als functie van de ratio f .



Figuur 10 - Bouwbesluit, CC3 ($\beta_t = 4.3$): betrouwbaarheidsniveaus verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief $\Psi_0 = 0.6$) voor de verhouding $B/h_{min} = 2.5$, als functie van de ratio f .

Eenzelfde exercitie is uitgevoerd voor de overige gevolgklassen CC1 en CC2. In alle gevallen was toepassing van de belastingcombinatiewaarde $\Psi_0 = 0.6$ voldoende. De gevonden waarden zijn weergegeven in Tabel 7. Er wordt opgemerkt dat de combinatiewaarde van de vervalbelasting (V_{com}) ofwel bepaald kan worden middels toepassing van de formule $V_{com} = \Psi_0 V_d$ ofwel middels de gespecificeerde overschrijdingskansen in het honderdste levensjaar

$$P(V > V_{com})_{jr100}.$$

Tabel 7 – Bouwbesluit: omhullende overschrijdingskansen van de combinatiewaarde van de vervalbelasting en corresponderende belastingcombinatiefactoren als functie van de gevolgklasse CC1 / CC2 / CC3.

Gevolg- klasse	Betrouwbaar- index levensduur (β_t)	Belastingcombinatie- factor (Ψ_0)	Overschrijdingskans in honderdste levensjaar $P(V > V_{com})_{jr100}$	
			geen klimaatverandering	wel klimaatverandering
CC1	3.3	0.6	$7 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$
CC2	3.8	0.6	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
CC3	4.3	0.6	$9 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3}$

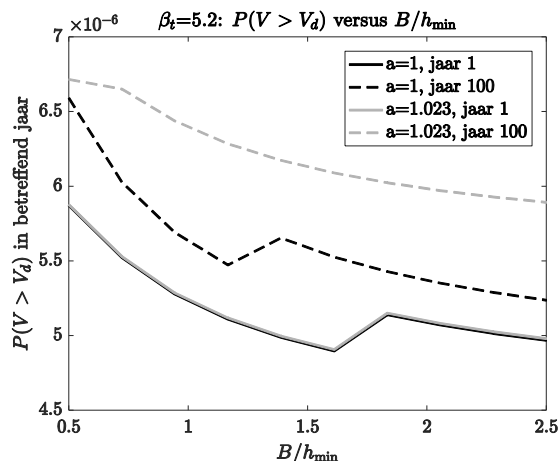
5.2 Resultaten kalibratieberekeningen Waterwet

In geval van de Waterwet zijn de kalibraties uitgevoerd voor betrouwbaarheidseisen liggend tussen $3 \leq \beta_t \leq 5.2$ op jaarbasis. In deze paragraaf worden de (tussen)resultaten beschreven voor de kalibratieberekeningen voor $\beta_t = 5.2$. Voor de (tussen)resultaten van de overige betrouwbaarheidseisen wordt verwezen naar bijlage D.

5.2.1 Kalibratiestap 1

In kalibratiestap 1 is de minimaal benodigde rekenwaarde voor de ontwerpwaarde van de vervalbelasting gekalibreerd voor situaties zonder eigengewichtsbelasting. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 11, welke de minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting (y-as) presenteert als functie van de verhouding tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval (x-as). De minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting is uitgedrukt in de kans van overschrijden in het eerste of honderdste levensjaar. Opgemerkt wordt opgemerkt dat de sprongen in de overschrijdingskansen het gevolg zijn van numerieke afrondingen. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat:

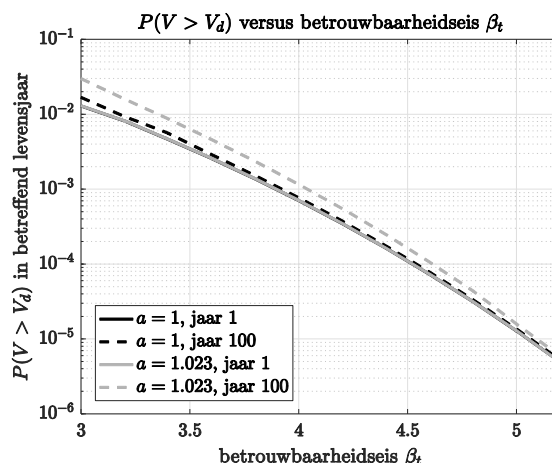
- de overschrijdingskans afneemt met toenemende verhouding tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval;
- in het eerste levensjaar de overschrijdingskansen identiek zijn voor het scenario met en het scenario zonder klimaatverandering;
- in het honderdste levensjaar de overschrijdingskans hoger is voor het scenario met klimaatverandering dan voor het scenario zonder klimaatverandering. Dit betekent echter niet dat de absolute waarde van de vervalbelasting hoger is in het scenario zonder klimaatverandering dan het scenario met klimaatverandering.



Figuur 11 – Waterwet ($\beta_t = 5.2$): minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting (y-as) als functie van de verhouding tussen de decimeringshoogte en het minimaal verval (x-as), uitgedrukt in de kans van overschrijden in het betreffende levensjaar van de constructie (1^e of 100^e levensjaar).

Om praktische redenen is het ongewenst om in het safety-format voor elke verhouding van B/h_{min} waarden voor $P(V > V_d)$ te specificeren. Dit zou immers afbreuk doen aan het karakter van een alom toepasbaar semi-probabilistisch safety-format. Er is daarom een omhullende voor $P(V > V_d)$ gespecificeerd die elke verhouding B/h_{min} dekt. In het eerste levensjaar is deze omhullende gelijk aan $P(V > V_d)_{jr1} \approx 5 \cdot 10^{-6}$ voor zowel de situatie met als zonder klimaatverandering. In het honderdste levensjaar is deze waarde gelijk aan $P(V > V_d)_{jr100} \approx 5 \cdot 10^{-6}$ in de situatie zonder klimaatverandering en $P(V > V_d)_{jr100} \approx 6 \cdot 10^{-6}$ in de situatie met klimaatverandering.

Eenzelfde exercitie is uitgevoerd voor de overige betrouwbaarheidseisen liggend tussen $3 \leq \beta_t \leq 5.2$. Een overzicht van de resulterende envelopwaarden is weergegeven in Figuur 12. Uit de figuur blijkt dat de overschrijdingskansen afnemen met toenemende doelbetrouwbaarheid, oftewel dat de minimaal benodigde rekenwaarde van de vervalbelasting toeneemt met toenemende doelbetrouwbaarheid.



Figuur 12 – Waterwet: omhullende overschrijdingskansen van de rekenwaarde van de vervalbelasting in het betreffende levenslevensjaar (x-as), als functie van de betrouwbaarheidseis op jaarbasis (y-as).

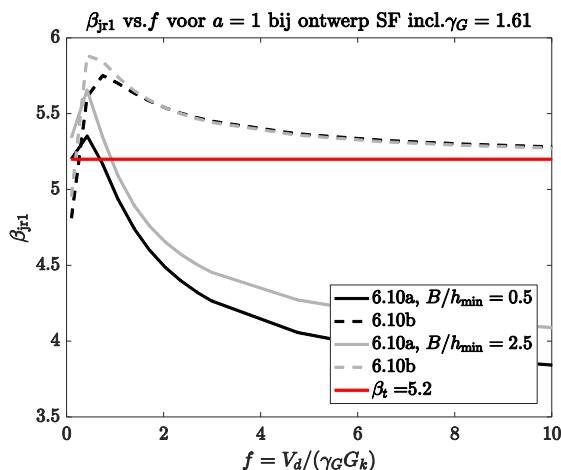
5.2.2 Kalibratiestap 2

In kalibratiestap 2 is de minimaal benodigde waarde voor de partiële factor voor de eigengewichtsbelasting (γ_G) gekalibreerd voor situaties met eigengewichtsbelasting. Er is daarbij gezocht naar die waarde voor γ_G die, gecombineerd met het voorgestelde safety-format zoals beschreven in paragraaf 4.5, zorgt voor het behalen van de betrouwbaarheidseis $\beta_t = 5.2$. Een onderscheid wordt gemaakt tussen het scenario met klimaatverandering en het scenario zonder klimaatverandering en voor zowel het eerste levensjaar van de constructie en het honderdste levensjaar van de constructie.

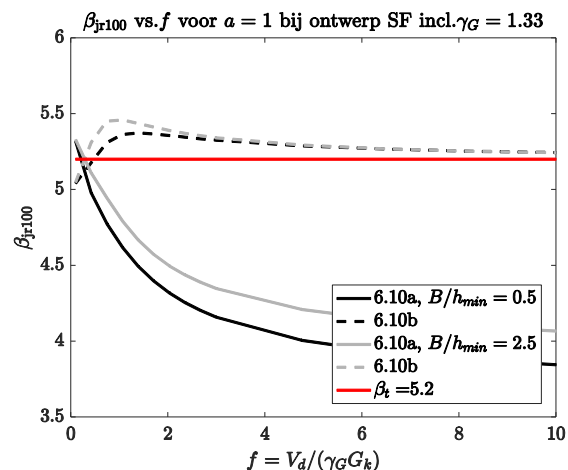
In het geval van de betrouwbaarheidseis $\beta_t = 5.2$ zijn de minimaal benodigde waarden voor de partiële factor voor eigengewichtsbelasting samengevat in Tabel 8. Figuur 13 t/m Figuur 16 tonen dat de gevonden waarden voor γ_G inderdaad tot voldoende hoge betrouwbaarheidsniveaus leiden.

Tabel 8 – Waterwet ($\beta_t = 5.2$): minimaal benodigde partiele factor voor eigengewichtsbelasting ten behoeve van behalen betrouwbaarheidseis.

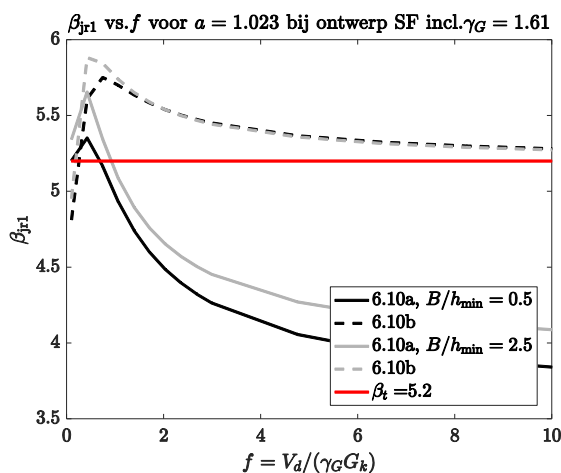
	jaar 1	jaar 100
geen klimaatverandering	1.61	1.33
wel klimaatverandering	1.61	1.40



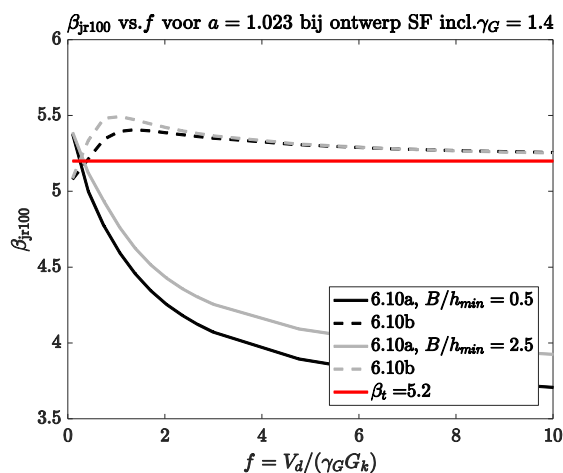
Figuur 13 – Waterwet ($\beta_t = 5.2$): betrouwbaarheidslevels in het eerste levensjaar (y-as) verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief $\gamma_e = 1.61$) als functie van de ratio f (x-as) voor de situatie zonder klimaatverandering.



Figuur 15 – Waterwet ($\beta_t = 5.2$): betrouwbaarheidslevels in het honderdste levensjaar (y-as) verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief $\gamma_e = 1.33$) als functie van de ratio f (x-as) voor de situatie zonder klimaatverandering.



Figuur 14 - Waterwet ($\beta_t = 5.2$): betrouwbaarheidslevels in het eerste levensjaar (y-as) verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief $\gamma_e = 1.61$) als functie van de ratio f (x-as) voor de situatie met klimaatverandering.

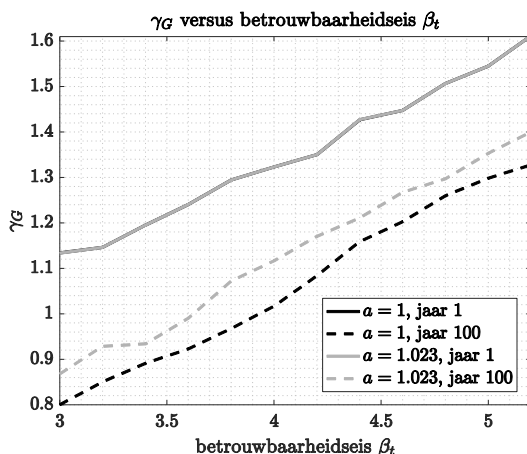


Figuur 16 – Waterwet ($\beta_t = 5.2$): betrouwbaarheidslevels in het honderdste levensjaar (y-as) verkregen bij ontwerp middels voorgesteld safety-format (inclusief $\gamma_e = 1.33$) als functie van de ratio f (x-as) voor de situatie met klimaatverandering.

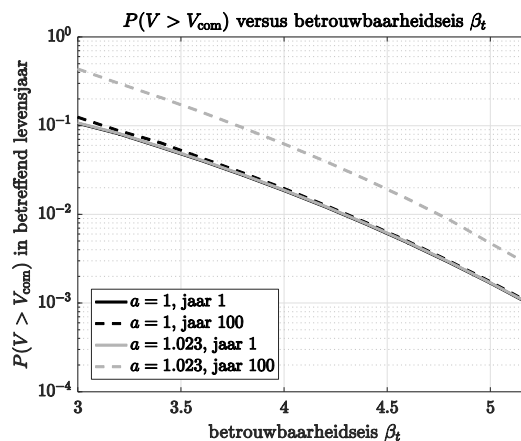
Eenzelfde exercitie is uitgevoerd voor de overige betrouwbaarheidseisen liggend tussen $3 \leq \beta_t \leq 5.2$. De waarde voor de belastingcombinatiefactor is te alle tijden gelijk aan $\Psi_0 = 0.6$. Voor het gemak van de constructeur zijn de overschrijdingskansen van de combinatiewaarden $P(V > V_{com})$ gegeven in Figuur 18. De minimaal benodigde waarden voor de partiële factor γ_G zijn weergegeven in Figuur 17. Uit de figuur kan het volgende worden geconcludeerd:

- De minimaal benodigde partiële factor γ_G neemt (lineair) toe met een toenemende betrouwbaarheidseis op jaarbasis.

- In enkele gevallen is de minimaal benodigde partiële factor γ_G kleiner dan 1.
- In het eerste levensjaar is de benodigde partiële factor voor eigengewichtsbelasting gelijk voor de situaties met klimaatverandering en zonder klimaatverandering.



Figuur 17 – Waterwet; omhullende partiële factor voor eigengewichtsbelasting (y-as) als functie van de betrouwbaarheidseis (x-as)



Figuur 18 - Waterwet; omhullende overschrijdingskansen van de combinatie waarde van de vervalbelasting (y-as) als functie van de betrouwbaarheidseis (x-as), uitgedrukt in kans van overschrijden in het betreffende levensjaar.

5.3 Verdiscontering modelonzekerheid en correctie materiaalfactor in ontwerpwaarden belastingeffecten

De rekenwaarde van de vervalbelasting en/of eigengewichtsbelasting bevatten zowel de effecten van de modelonzekerheid (θ_E) evenals de correctiefactor voor de materiaalfactor ($\gamma_{R,corr}$). In de kalibratie van de ontwerpwaarde van de vervalbelasting (V_d) zijn deze effecten verwaarloosbaar:

- de invloedscoefficiënt voor de sterkte die volgt uit de probabilistische berekeningen is aanzienlijk kleiner is dan de ISO-standaardwaarde van $\alpha_R = 0.8$, zie hiervoor bijlage D. Dit houdt in dat zelfs bij zeer hoge betrouwbaarheidseisen het product van $\alpha_R \cdot \beta_t$ kleiner is dan de in de Eurocode aangehouden $\alpha_R \cdot \beta_t = 0.8 \cdot 3.8 = 3.04$. Met andere woorden, de correctie op de materiaalfactor is kleiner dan 1, wat geen verhogend effect heeft op de ontwerpwaarde van de vervalbelasting.
- de invloedscoefficiënt voor de modelonzekerheid $\alpha(\theta_E)$ is dusdanig klein dat deze slechts in zeer beperkte mate bijdraagt.

Echter, in de kalibratie van de partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G) spelen deze effecten een significante rol. Dit leidt tot relatief hoge waarden voor de partiële factor, zie bijvoorbeeld Figuur 17 voor betrouwbaarheidseis $\beta_t = 5.2$.

6 Voorstel toetsvoorschrift

Het doel van voorliggende studie was om voor het semi-probabilistische toetsvoorschrift voor de hoogwatersituatie de rekenwaarde van de belasting (eigengewicht en vervalbelasting) dusdanig te kalibreren opdat wordt voldaan aan de betrouwbaarheidseisen van zowel het Bouwbesluit als de Waterwet.

In dit hoofdstuk wordt op basis van de in hoofdstuk 4 gepresenteerde uitgangspunten van de kalibratieberekeningen en de in hoofdstuk 5 gepresenteerde resultaten van de kalibratieberekeningen een concreet voorstel voor dit toetsvoorschrift gegeven.

In paragraaf 6.1 wordt de scope van het voorgestelde toetsvoorschrift beschreven. In paragraaf 6.2 wordt een voorstel gegeven voor het bepalen van de betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet. In paragraaf 6.3 wordt het safety-format toegelicht. In paragraaf 6.4 en 6.5 wordt een voorstel gegeven voor de numerieke invulling van het safety-format voor een toetsing conform het Bouwbesluit en de Waterwet respectievelijk. In paragraaf 6.6 worden aanbevelingen gedaan voor toekomstige kalibraties.

6.1 Scope

In onderhavige kalibratie is het relevante toepassingsgebied afgedekt door middel van de keuze van onderstaande scope:

- alle waterbouwkundige constructies met een levensduur tot 100 jaar;
- alle waterbouwkundige constructies waarbij de verhouding tussen de decimeringshoogte (B) en het minimaal verval (h_{min}) ligt tussen $0.5 < B / h_{min} \leq 2.5$;
- alle waterbouwkundige constructies waarbij de verhouding tussen de ontwerpwaarde van de vervalbelasting (V_d) en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting (G_d) ligt tussen $0.1 < V_d / G_d \leq 10$;
- alle situaties waarvoor geldt dat de effecten van klimaatverandering zorgen voor een toename van (kleine) overschrijdingskansen van de vervalbelasting met een factor 10 per eeuw.

Het safety-format is gekalibreerd voor:

- alle mogelijke gevolklassen conform het Bouwbesluit, oftewel voor CC1, CC2 en CC3;
- alle mogelijke constructieve betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet op het niveau van de constructie liggend tussen $3 < \beta_t \leq 5.2$ op jaarbasis.

6.2 Voorstel voor betrouwbaarheidseis Waterwet

De betrouwbaarheidseisen conform de Waterwet zijn gespecificeerd op drie verschillende niveaus; op het niveau van een dijktraject, op het niveau van een faalmechanisme en op het niveau van de constructie. In de default-faalkansbegroting zoals voorgesteld door het OI2014 en het WBI2017 wordt voor het bepalen van de betrouwbaarheidseisen op het niveau van de constructie geen rekening gehouden met correlaties tussen de verschillende faalmechanismen. Echter, in het geval dominante hoogwaterbelasting is de vervalbelasting die voor het faalmechanisme 'constructief falen' (CF) van belang is vrijwel dezelfde als de vervalbelasting die voor het faalmechanisme 'golfoverloop of golfoverslag' (HT) van belang is. Dit heeft als gevolg dat de twee faalmechanismen sterk met elkaar zijn gecorreleerd. Deze correlatie maakt de default-betrouwbaarheidseisen voor constructief falen onnodig conservatief. In deze paragraaf wordt daarom een voorstel gedaan voor het bepalen van de gewenste betrouwbaarheidseis voor constructief falen op het niveau van de constructie, die rekening houdt met de effecten van deze correlatie.

De maximaal toegelaten faalkans voor het faalmechanisme constructief falen op het niveau van de constructie kan bepaald worden middels:

$$\beta_t = -\Phi^{-1}(P(F_{CF})_{\max}) \quad (4.1)$$

Met:

$$P(F_{CF})_{\max} = \frac{c \cdot \omega_{CF} \cdot P_{\max}}{N_{CF}} \quad (4.2)$$

Waarin:

- $P(F_{CF})_{\max}$ is de maximaal toelaatbare kans per jaar op faalmechanisme 'constructief falen';
- $P_{\max}$ is de maximaal toelaatbare overstromingskans per jaar op dijktrajectniveau;
- ω_{CF} is de faalruimtefactor voor constructief falen
(default $\omega_{CF} = 0.02$ volgens WI2017);
- N_{CF} is de lengte-effectfactor voor constructief falen
(default $N_{CF} = 3$ volgens WI2017);
- c is de correctiefactor voor het meenemen van correlatie tussen constructief falen en golfoverloop en golfoverslag. Deze correctiefactor is gelijk aan 1 in geval van niet-dominante hoogwaterbelasting en gelijk aan 2 in geval van dominante hoogwaterbelasting.

6.3 Safety-format

Uitgangspunt van het voorgestelde safety-format is de fundamentele basiseis van NEN-EN1990/NB dat de rekenwaarden van de sterkte (R_d) gelijk of hoger dient te zijn dan de rekenwaarde van de belastingeffecten (E_d), oftewel:

$$R_d \geq E_d \quad (4.3)$$

Voor het bepalen van de belastingeffecten wordt uitgegaan van de fundamentele belastingcombinaties voor blijvende of tijdelijke ontwerpsituaties zoals voorgesteld in NEN-EN1990/NB formules 6.10a en 6.10b, ingevuld voor de hoogwatersituatie. Dit leidt tot de volgende bepalingen:

$$E_{d,a} = k_{FI} \gamma_G G_k + \Psi_0 V_d \quad (6.10a)$$

$$E_{d,b} = k_{FI} \gamma_G \xi G_k + V_d \quad (6.10b)$$

$$E_d = \max(E_{d,a}; E_{d,b})$$

Waarbij:

- k_{FI} is de factor die in geval van de toetsing conform het Bouwbesluit afhangt van de gekozen gevolgklasse CC1, CC2, of CC3 en in geval van toetsing conform de Waterwet gelijk gesteld is aan 1;
- γ_G is de partiële factor voor permanente belastingen;
- ξ is de reductiefactor voor ongunstige eigengewichtsbelasting;
- V_d is de rekenwaarde van de vervalbelasting;
- Ψ_0 is de belastingcombinatiefactor.

Verificatieformule (6.10a) is relevant indien de eigengewichtsbelasting dominant is. Verificatieformule (6.10b) is relevant indien de vervalbelasting dominant is.

In het safety-format is de rekenwaarde van de vervalbelasting (V_d) direct gespecificeerd, dus zonder toepassing van een partiële factor. De combinatie waarde van de vervalbelasting (V_{com}) is niet direct gespecificeerd, maar volgt uit:

$$V_{com} = \Psi_0 V_d \quad (4.4)$$

De rekenwaarde van de eigengewichtsbelasting (G_d) volgt uit de combinatie van de partiële factor γ_G en de representatieve waarde G_k , oftewel:

$$G_d = \gamma_G G_k \quad (4.5)$$

6.4 Invulling safety-format Bouwbesluit

Voor de invulling van het safety-format ten behoeve van de toetsing conform het Bouwbesluit wordt verwezen naar Tabel 9. Opgemerkt wordt dat de combinatie waarde van de vervalbelasting (V_{com}) ofwel bepaald kan worden middels toepassing van de formule $V_{\text{com}} = \Psi_0 V_d$ ofwel middels de gespecificeerde overschrijdingskans in het honderdste levensjaar $P(V > V_{\text{com}})_{\text{jr100}}$.

Er kan worden geconcludeerd dat het toepassen van de in NEN-EN 1990 gespecificeerde waarden voor k_{FI} , ξ en γ_G in combinatie met de in deze studie afgeleide waarden voor de ontwerpwaarden van de vervalbelasting (V_d) en combinatie waarde van de vervalbelasting (V_{com}) leidt tot voldoende betrouwbaarheid.

Tabel 9 – Invulling van het safety-format ten behoeve van de toetsing conform het Bouwbesluit

Gevolgklasse	β_t	$P(V > V_d)_{\text{jr100}}$	Ψ_0	$P(V > V_{\text{com}})_{\text{jr100}}$	k_{FI}^*	ξ^*	γ_G^*
CC1	3.3	$5 \cdot 10^{-4}$	0.6	$4 \cdot 10^{-2}$	0.9	0.89	1.35
CC2	3.8	$9 \cdot 10^{-5}$	0.6	$1 \cdot 10^{-2}$	1.0	0.89	1.35
CC3	4.3	$1 \cdot 10^{-5}$	0.6	$4 \cdot 10^{-3}$	1.1	0.89	1.35

* waarde conform NEN-EN 1990/NB

6.5 Invulling safety-format Waterwet

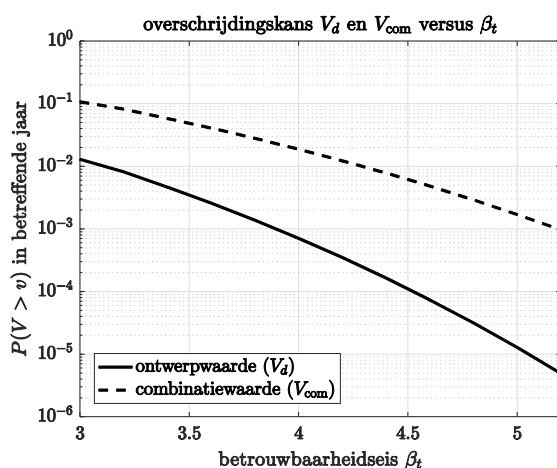
Ten behoeve van de Waterwet worden twee toetsingen voorgeschreven; één in het eerste levensjaar van de constructie en één in het honderdste levensjaar van de constructie. Indien de vervalbelasting sterk dominant is, zal de toetsing in het honderdste levensjaar maatgevend zijn. Indien de eigengewichtsbelasting sterk dominant is, zal de toetsing in het eerste levensjaar maatgevend zijn.

Voor de invulling van het safety-format voor beide toetsingen wordt verwezen naar Tabel 10. Opgemerkt wordt dat de combinatie waarde van de vervalbelasting ofwel bepaald kan worden middels toepassing van de formule $V_{\text{com}} = \Psi_0 V_d$ ofwel middels de gespecificeerde overschrijdingskans in het betreffende levensjaar $P(V > V_{\text{com}})$. Indien gekozen wordt voor de laatste optie zal dit leiden tot een (ietwat) conservatievere waarde.

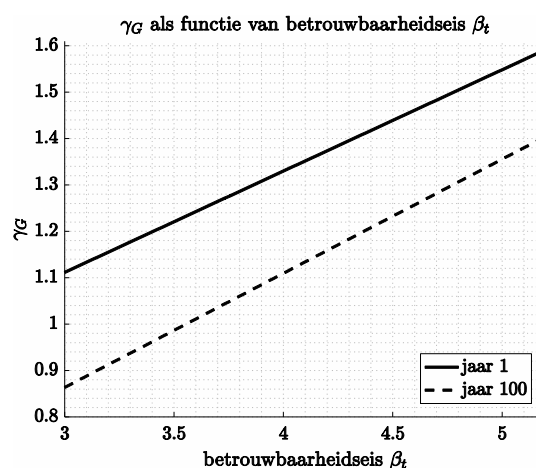
Tabel 10 – Invulling van het safety-format ten behoeve van de toetsing conform de Waterwet

	eerste levensjaar	honderdste levensjaar
k_{FI}	1.0	1.0
ξ^*	0.89	0.89
Ψ_0	0.6	0.6
γ_G	zie Figuur 20	zie Figuur 20
$P(V > V_d)$	zie Figuur 19	zie Figuur 19
$P(V > V_{com})$	zie Figuur 19	zie Figuur 19

* waarde conform NEN-EN 1990/NB



Figuur 19 – Ontwerpwaarde en combinatie waarde van de vervalbelasting voor toetsing van het eerste of laatste levensjaar (y-as) als functie van de betrouwbaarheidseis (x-as), uitgedrukt in de kans van overschrijden in het betreffende levensjaar



Figuur 20 - Partiele factor voor eigengewichtsbelasting (y-as) als functie van de betrouwbaarheidseis (x-as) voor toetsing van het eerste of honderdste levensjaar.

6.6 Aanbevelingen voor toekomstige kalibraties

Voor toekomstige kalibraties wordt aangeraden de volgende punten in acht te nemen:

- **Onzekerheden binnenwaterstand:** In de kalibratie is de binnenwaterstand als deterministische grootheid meegenomen. Het wordt aangeraden in een toekomstige kalibratie de binnenwaterstand als stochastische grootheid mee te nemen.
- **Golfbelasting:** In de kalibratie is de golfbelasting niet meegenomen. In een toekomstige kalibratie wordt aangeraden deze als stochastische grootheid mee te nemen.

- **Belastingcombinatiefactoren:** In de kalibratie zijn de belastingcombinatiefactoren (Ψ_0) voor het combineren van eigengewichtsbelasting met hoogwaterbelasting gekalibreerd. De belastingcombinatiefactoren voor overige belastingen (zoals golfbelasting) met hoogwaterbelasting zijn niet gekalibreerd.
- **Niet lineaire grenstoestandsfuncties:** In de kalibratie is slechts een lineaire grenstoestandsfunctie beschouwd. De resultaten zijn mogelijk anders bij een belasting-effect dat niet-lineair afhangt van het verval. Het wordt aangeraden dit in toekomstige kalibraties mee te nemen.
- **Golfbelasting:** In de kalibratie zijn golfbelastingen en de eventuele correlaties tussen de vervalbelasting en de golfbelasting niet meegenomen. Het wordt aangeraden dit in een toekomstige kalibratie mee te nemen.
- **Scope:** In de kalibratie zijn verschillende verhoudingen tussen de ontwerpwaarde van de vervalbelasting (V_d) en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting (G_d) meegenomen. De meegenomen situaties lopen van sterk dominante eigengewichtsbelasting tot sterk dominante vervalbelasting. Echter, een nieuwe constructie vervult tijdens de bouwphase nooit direct een hoogwaterkerende functie; standaard is sprake van een alternatieve of bestaande waterkering. 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 = overstroming). Dit betekent dat in de kalibratie van de voorschriften voor de Waterwet niet naar omstandigheden hoeft te worden gekeken waarin slechts sprake is van eigengewichtsbelasting. In toekomstige kalibraties kan worden overwogen de scope te verkleinen naar slechts situaties die relevant zijn in termen van de Waterwet.

7 Referenties

- [1] Leidraad Kunstwerken, TAW 2003
- [2] Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode, Activiteit 1: Belastingfactoren bij maatgevende waterstanden, Calle 2012.
- [3] Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode, Activiteit 3: activiteit 3: Rekenwaarden Waterstanden, Calle 2012.
- [4] JCSS, Probabilistic Model Code, 2001-2011

8 Ondertekening



N.E. Meinen
Auteur



Dr.Ir. A.J. Bigaj-van Vliet
Reviewer



Ir. E. Hagen
Research manager
Structural Reliability

A Toelichting kalibratieberekeningen

A.1 Kalibratiestap 1

In kalibratiestap 1 wordt de rekenwaarde van de vervalbelasting (V_d) bepaald voor situaties zonder eigengewichtsbelasting. Het stroomschema van kalibratiestap 1 is weergegeven in Figuur 21.

Ontwerpsituatie

De kalibratie start met het vaststellen van een ontwerpsituatie, die alle benodigde parameters bevat voor het uitvoeren van de kalibratieberekeningen. Deze parameters kunnen onderverdeeld worden in constante parameters, die gedurende kalibratiestap 1 gelijk blijven (weergegeven in blauw), en variabele parameters, die gedurende kalibratiestap 1 gevarieerd worden (weergegeven in geel).

De constante parameters betreffen:

- de beoogde levensduur van de constructie, die is gelijk gesteld aan $N = 100$ jaar.
- de ratio tussen de variabele belasting en de eigengewichtsbelasting f , welke in kalibratiestap 1 gelijk is gesteld aan $f = \infty$. Deze ratio zorgt ervoor dat het gemiddelde (μ_G), de standaarddeviatie (σ_G) en de karakteristieke waarde (G_k) van de eigengewichtsbelasting alle gelijk zijn aan 0. Met andere woorden, slechts situaties zonder eigengewichtsbelasting worden in de kalibratie beschouwd.

De variabele parameters betreffen:

- De betrouwbaarheidsindex β_t waarop wordt gekalibreerd.
In geval van het Bouwbesluit wordt gekalibreerd op betrouwbaarheidsindices $\beta_t = [3.3 \quad 3.8 \quad 4.3]$, die corresponderen met een referentieperiode gelijk aan de levensduur van de constructie (100 jaar), zie paragraaf 4.2.1.
In geval van de Waterwet wordt gekalibreerd voor de betrouwbaarheidsindices $3.0 < \beta_t \leq 5.2$, die corresponderen met een referentieperiode van 1 jaar, zie hiervoor paragraaf 4.2.2.
- De klimaatfactor a , welke de effecten van klimaatverandering incorporeert in de verdelingsfunctie van de vervalbelasting. De klimaatfactor is gelijk aan $a = 1$ in de situatie zonder klimaatverandering en gelijk is aan $a = 1.023$ in de situatie met klimaatverandering, zie hiervoor paragraaf 4.6.1.3.
- De verhouding tussen de decimeringhoogte en het minimaal aanwezige verval B / h_{min} , die de verhouding tussen het variabele deel van de belasting en het constante deel van de belasting karakteriseert, zie hiervoor paragraaf 4.3.1. De verhouding wordt gevarieerd tussen $0.5 < B / h_{min} \leq 2.5$.

Verdelingsfunctie vervalbelasting

Als tweede stap dient de verdelingsfunctie van de vervalbelasting (V) te worden gedefinieerd, welke een functie is van de klimaatfactor (α), de levensduur van de constructie (N), de decimeringshoogte (B) en het minimaal aanwezige verval (h_{min}). Reeds in de ontwerpsituatie zijn de klimaatfactor (α) en de levensduur (N) gespecificeerd. Tevens is in de ontwerpsituatie de *verhouding* tussen de decimeringshoogte en het minimaal aanwezige verval (B/h_{min}) gespecificeerd. Echter, hoewel de overschrijdingskans van de ontwerpwaarde van de vervalbelasting $P(V > V_d)$ onafhankelijk is van de exacte specificatie van B en h_{min} , is voor het uitvoeren van de kalibratieberekeningen een *exacte specificatie* van beide parameters nodig. In de kalibratieberekeningen wordt daarom gewerkt met dummy-waarden:

- de dummy-waarde van de decimeringshoogte (B_δ) wordt in alle berekeningen gelijk gesteld aan $B_\delta = 0.5$ m;
- de dummy-waarde van het minimaal verval ($h_{min,\delta}$) wordt vervolgens verkregen middels:

$$h_{min,\delta} = \frac{B_\delta}{B/h_{min}}$$

Opgemerkt wordt dat de resultaten van de kalibratieberekeningen onafhankelijk zijn voor de keuze van deze dummy-waarden. Zie hiervoor paragraaf B.3.

Keuze initiële waarde

Nadat de dummy-waarden voor de decimeringshoogte en het minimaal verval zijn bepaald zal de kalibratie starten. Doel daarbij is om dié waarde voor de vervalbelasting te vinden, die de minimaal gewenste betrouwbaarheid (β_t) waarborgt. Hiertoe wordt eerst een slim gekozen waarde voor de ontwerpwaarde van de vervalbelasting (V_δ) te worden gespecificeerd, die in volgende iteratiestappen zal worden vervangen.

Safety-format

Vervolgens wordt het safety-format ingevuld en wordt de ontwerpwaarde van de belastingeffecten (E_d) verkregen. Opgemerkt wordt dat, door de keuze van $f = \infty$, de karakteristieke waarde van de eigengewichtsbelasting gelijk is aan $G_k = 0$. De exacte waarden voor de partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G), de factor die zorgt voor betrouwbaarheidsdifferentiatie (k_{FI}) en de belastingcombinatiefactor (Ψ_0) zijn in kalibratiestap 1 dus niet van toepassing.

Verdelingsfunctie sterkte

Middels limit-state design wordt vervolgens de ontwerpwaarde van de sterkte (R_d) bepaald. Aan de hand van de ontwerpwaarde van de sterkte kan vervolgens het gemiddelde (μ_R) en de standaarddeviatie (σ_R) van de (lognormaal verdeelde) sterkte worden verkregen. Zie hiervoor tevens paragraaf 4.6.2.

Betrouwbaarheidsberekening

Vervolgens wordt het betrouwbaarheidsniveau (β) berekend, indien de constructie wordt ontworpen middels de initieel gekozen ontwerpwaarde voor de vervelbelasting (V_δ). De betrouwbaarheidsberekeningen worden uitgevoerd met behulp van de rekenmethode FORM zoals geïmplementeerd in het TNO-rekenprogramma Prob2B.

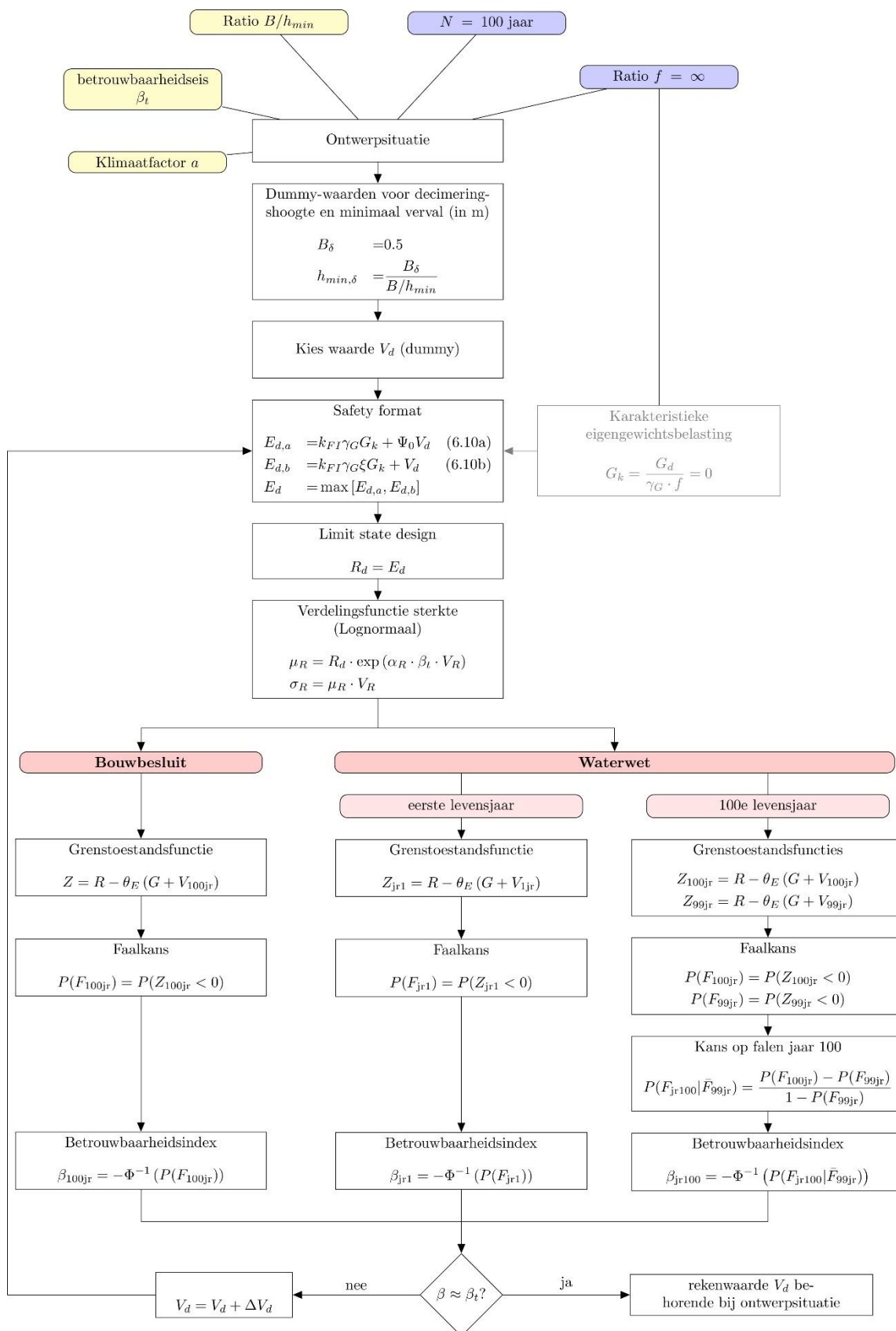
- In geval van het Bouwbesluit wordt de betrouwbaarheidsberekening uitgevoerd voor een referentieperiode gelijk aan de levensduur van de constructie (100 jaar). Dit houdt in dat de verdelingsfunctie voor de vervelbelasting gedefinieerd is voor een referentieperiode van 100 jaar, oftewel er wordt gewerkt met V_{100jr} bepaald middels vergelijking (3.11).
- In geval van de Waterwet dienen twee betrouwbaarheidsberekeningen te worden uitgevoerd; één in het eerste levensjaar van de constructie en één in het laatste levensjaar van de constructie. Voor de berekening van het eerste is de verdelingsfunctie van de vervelbelasting gedefinieerd voor een referentieperiode van 1 jaar, oftewel er wordt gewerkt met V_{1jr} bepaald middels vergelijking (3.10). Voor de berekening van het laatste levensjaar wordt gebruik gemaakt van:

$$P(F_{100jr} | \bar{F}_{99jr}) = \frac{P(F_{100jr}) - P(F_{99jr})}{1 - P(F_{99jr})}$$

Voor een toelichting van deze formule wordt verwezen naar Appendix A.3.

Toetsen van de betrouwbaarheid

Vervolgens wordt de verkregen betrouwbaarheidsniveau β vergeleken met de gestelde doelbetrouwbaarheid β_t . Indien het verkregen niveau voldoende dicht in de buurt van de gestelde eis ligt, is de kalibratie geslaagd en is de ontwerpwaarde voor de vervelbelasting V_d gevonden. Indien het verkregen betrouwbaarheidsniveau te ver van de doelbetrouwbaarheid afligt, wordt een nieuwe waarde voor V_δ gekozen en worden bovenstaande stappen herhaald.



Figuur 21 - Stroomschema kalibratiestap 1

A.2 Kalibratiestap 2

Bouwbesluit

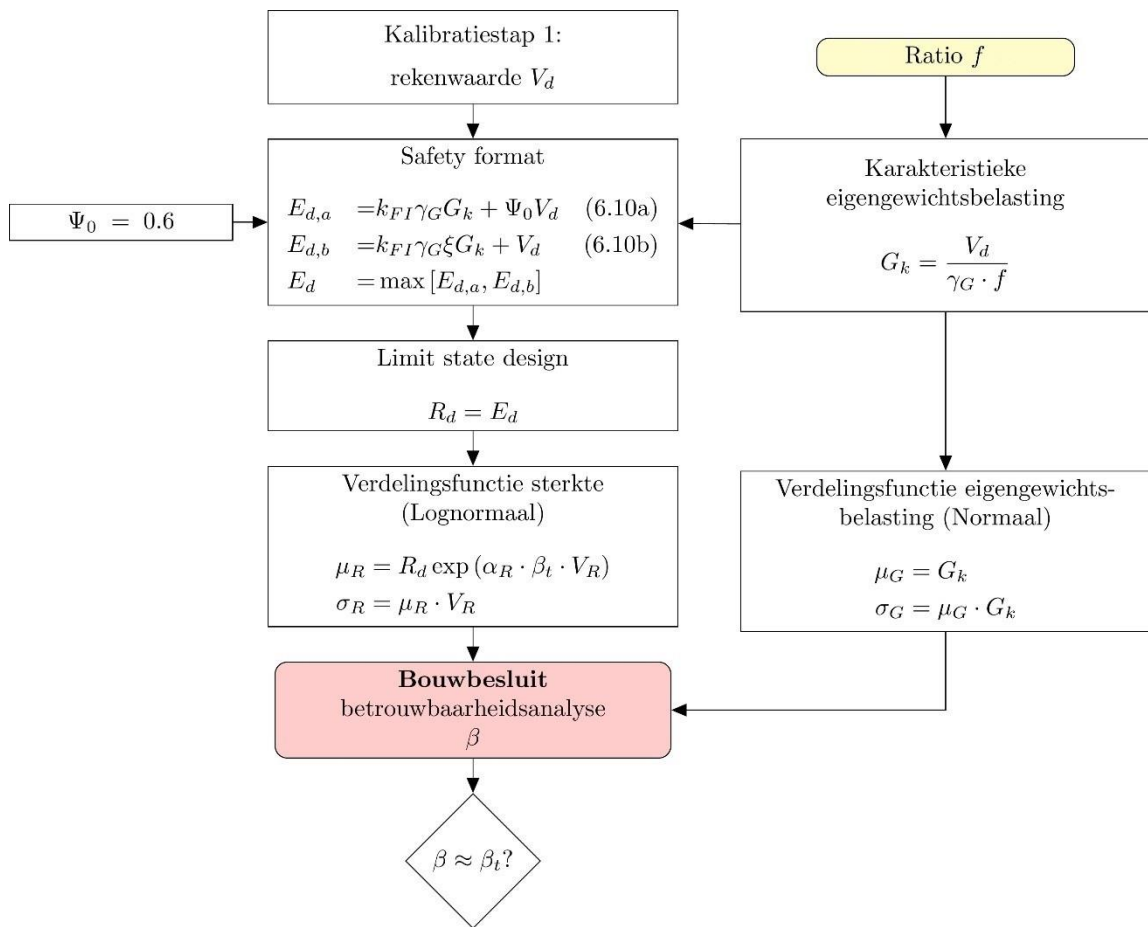
In geval van het Bouwbesluit wordt in kalibratiestap 2 gecontroleerd in hoeverre de toepassing van de belastingcombinatiefactor $\Psi_0 = 0.6$, gegeven een ontwerp middels de in kalibratiestap 1 verkregen ontwerpwaarde van de vervallbelasting (V_d) en het voorgestelde safety-format, leidt tot voldoende betrouwbaarheid voor situaties mét eigengewichtsbelasting ($f \neq 0$). Het stroom-schema van kalibratiestap 2 is weergegeven in Figuur 22.

Kalibratiestap 2 start met de bepaling van de ontwerpwaarde van de belasting effecten volgens het gespecificeerde safety-format, dat bestaat uit:

- de in kalibratiestap 1 verkregen ontwerpwaarde voor de vervallbelasting (V_d);
- de partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G), die voor de berekeningen van het Bouwbesluit is vastgezet op $\gamma_G = 1.35$;
- de factor die zorgt voor betrouwbaarheidsdifferentiatie (k_{FI}), die afhangt van de gekozen gevolgklasse CC1, CC2, of CC3;
- de karakteristieke waarde van de eigengewichtsbelasting (G_k), die een functie is van de in kalibratiestap 1 verkregen ontwerpwaarde voor de vervallbelasting (V_d), de ratio tussen de ontwerpwaarde van de vervallbelasting en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting (f) en de partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G);
- de initiële waarde voor belastingcombinatiefactor, die gelijk gesteld is aan $\Psi_0 = 0.6$.

Vervolgens wordt de verdelingsfunctie van de sterkte, de verdelingsfunctie van de eigengewichtsbelasting en de betrouwbaarheid bepaald. Zie hiervoor tevens kalibratiestap 1.

Er wordt gekeken in hoeverre het verkregen betrouwbaarheidslevel (β) hoger is dan de gestelde betrouwbaarheidseis (β_t). Bovenstaande berekeningen worden uitgevoerd voor alle verhoudingen tussen de ontwerpwaarde van de vervallbelasting en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting.



Figuur 22 - Kalibratiestap 2: Bouwbesluit

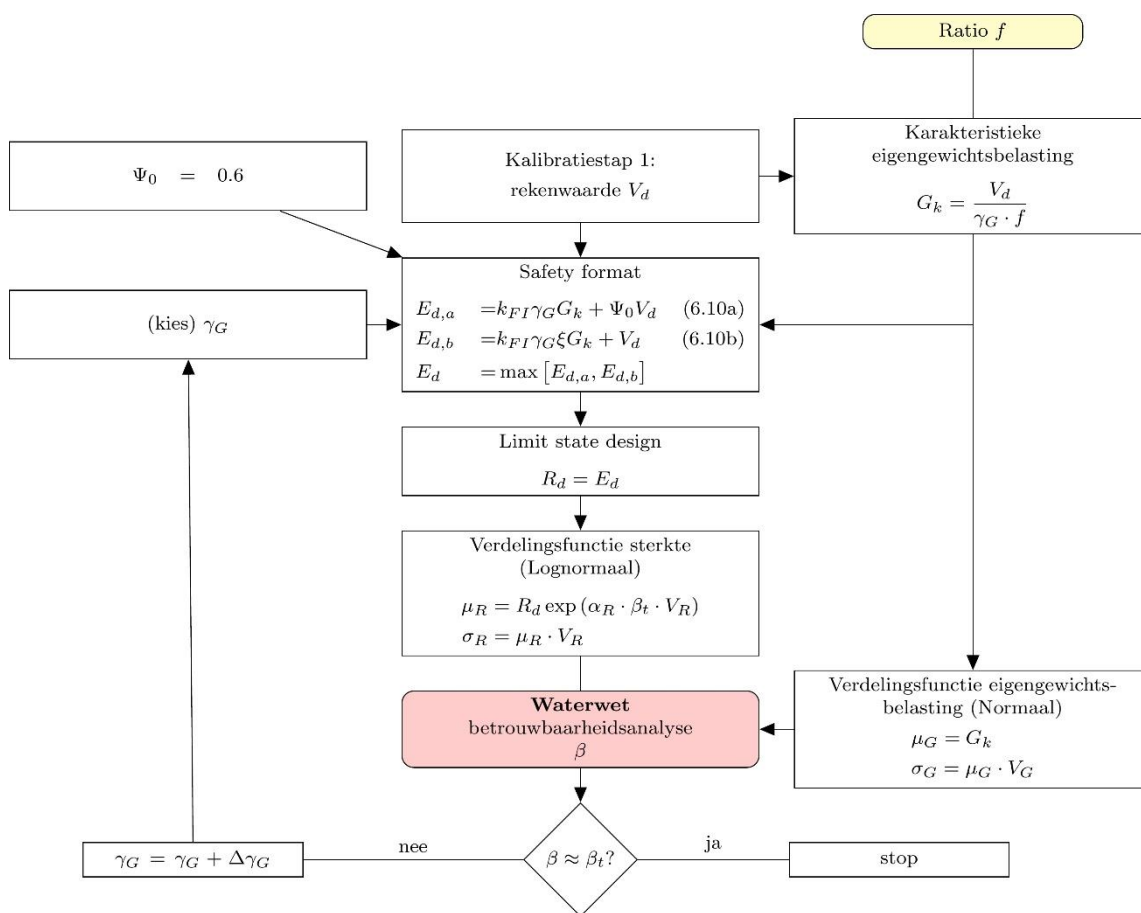
Waterwet

In geval van de Waterwet wordt in kalibratiestap 2 de minimaal benodigde waarde voor de partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G) gekalibreerd voor situaties mét eigengewichtsbelasting ($f \neq 0$), gegeven een ontwerp volgens het voorgestelde safety-format.

Het stroomschema van kalibratiestap 2 is weergegeven in Figuur 23. Het startpunt van kalibratiestap 2 is de bepaling van de ontwerpwaarde van de belastingeffecten volgens het gespecificeerde safety-format, dat bestaat uit:

- de in kalibratiestap 1 verkregen ontwerpwaarde voor de vervalbelasting (V_d);
- de factor die zorgt voor betrouwbaarheidsdifferentiatie (k_{FI}), die in geval van de Waterwetberekeningen gelijk is gesteld aan $k_{FI} = 1$ voor alle betrouwbaarheidseisen;
- de karakteristieke waarde van de eigengewichtsbelasting (G_k), die een functie is van de in kalibratiestap 1 verkregen ontwerpwaarde voor de vervalbelasting (V_d), de ratio tussen de ontwerpwaarde van de vervalbelasting en de ontwerpwaarde van de eigengewichtsbelasting (f) en de partiële factor voor eigengewichtsbelasting (γ_G);
- de belastingcombinatiefactor Ψ_0 , die gelijk wordt gesteld aan $\Psi_0 = 0.6$.
- Een (slimme) keuze voor de partiële factor voor de eigengewichtsbelasting.

Nadat middels het safety-format de ontwerpwaarde van de belastingeffecten (E_d) is bepaald, wordt vervolgens de verdelingsfunctie van de sterkte (R), de verdelingsfunctie van de eigen-gewichtsbelasting (G) en de verdelingfunctie van de vervalbelasting (V) ingevoerd in de betrouwbaarheidsanalyse. Zie hiervoor tevens kalibratiestap 1. Vervolgens wordt gekeken in hoeverre het verkregen betrouwbaarheidslevel (β) hoger is dan de gestelde betrouwbaarheidsseis (β_t). Indien het verkregen betrouwbaarheidsniveau te ver van de doelbetrouwbaarheid afligt, wordt een nieuwe waarde voor γ_G gekozen en worden bovenstaande stappen herhaald.



Figuur 23 - Kalibratiestap 2: Waterwet

A.3 Kans op falen in honderdste levensjaar, gegeven geen falen in voorgaande jaren

Daar het een voorwaardelijke kans betreft, kan voor de bepaling van de kans op falen in het honderdste levensjaar, gegeven geen falen in de voorgaande jaren, niet direct gebruik gemaakt worden van een FORM-betrouwbaarheidsberekening (FORM). Echter kan middels de axioma's van de kansrekening de voorwaardelijke kans worden omgeschreven in een functie van onvoorwaardelijke kansen, die afzonderlijk middels FORM bepaald kunnen worden.

In deze paragraaf wordt toegelicht hoe de voorwaardelijke kans wordt opgeschreven in een functie van onvoorwaardelijke kansen.

Neem de volgende definities aan:

A is falen in jaar 0-100

B is falen in jaren 0-99

Gegeven de regel van conditionele betrouwbaarheid geldt:

$$P(A|\bar{B}) = \frac{P(A \cap \bar{B})}{\bar{B}} \quad (4.6)$$

Dit kan worden omgeschreven als:

$$P(A \cap \bar{B}) = P(A \cup B) - P(B) \quad (4.7)$$

Tevens geldt:

$$P(\bar{B}) = 1 - P(B) \quad (4.8)$$

Substitutie van (4.7) en (4.8) in (4.6) levert:

$$P(A|\bar{B}) = \frac{P(A \cup B) - P(B)}{1 - P(B)} \quad (4.9)$$

Oftewel:

$$P(F_{100jr} | \bar{F}_{99jr}) = \frac{P(F_{100jr}) - P(F_{99jr})}{1 - P(F_{99jr})} \quad (4.10)$$

B Toelichting bij verhouding tussen decimeringshoogte en minimaal verval

B.1 Introductie

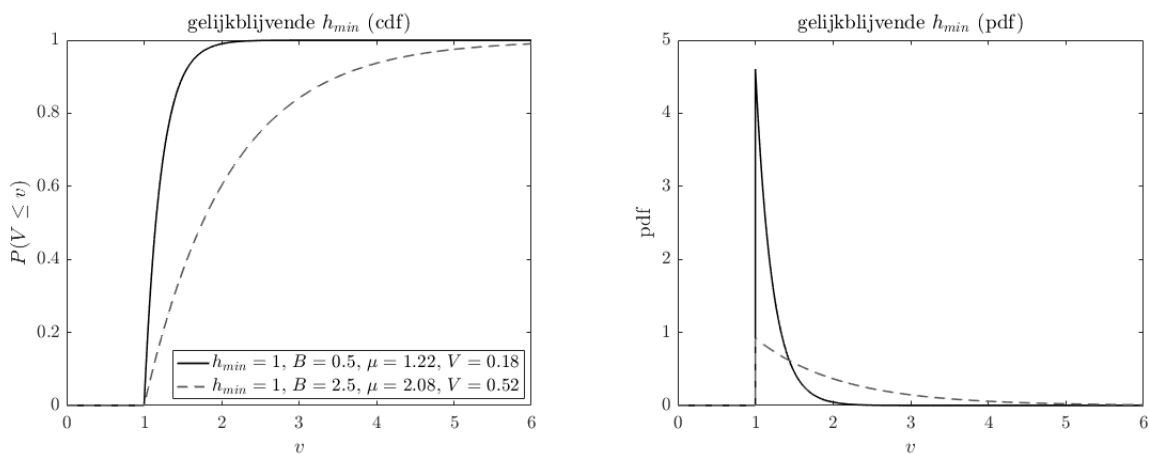
De kalibratieberekeningen zijn uitgevoerd voor verschillende verhoudingen tussen de Decimeringshoogte (B) en het minimaal aanwezige verval (h_{min}). In deze bijlage wordt toegelicht waarom, voor een gelijkblijvende ratio B / h_{min} , de rekenwaarde van de vervalbelasting (V_d) afhankelijk is van de precieze waarde voor de decimeringshoogte (B) of het minimaal aanwezige verval (h_{min}), maar waarom de overschrijdingskans van de rekenwaarde van de vervalbelasting $P(V > V_d)$ niet afhankelijk is van de precieze waarde van de decimeringshoogte (B) of het minimaal aanwezige verval (h_{min}).

B.2 Decimeringshoogte en minimaal aanwezig verval

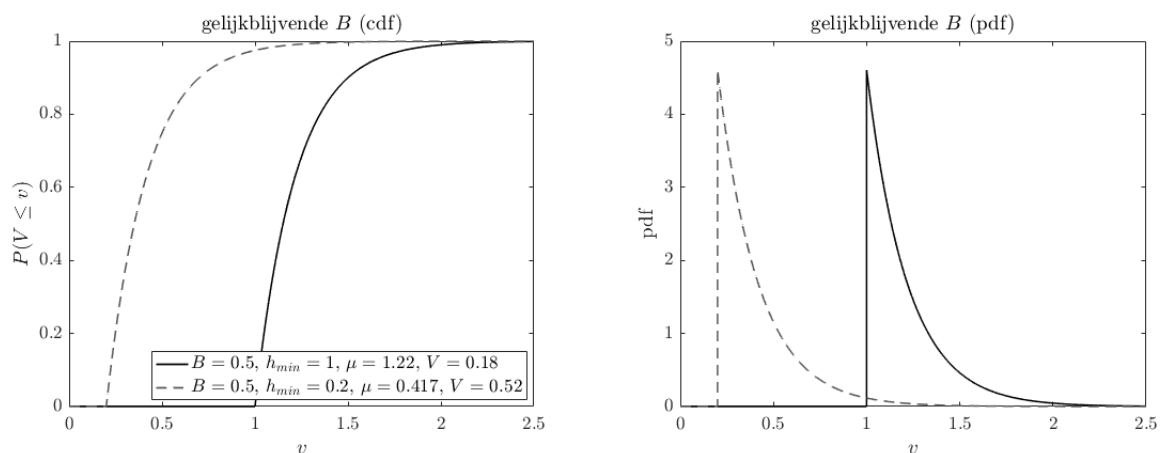
Praktijkwaarden voor de decimeringshoogte en het minimaal aanwezige verval

Bij een gelijkblijvend minimaal verval h_{min} resulteert een toename van de decimeringshoogte B in een toename van de gemiddelde vervalbelasting en een toename van standaarddeviatie van de vervalbelasting (zie Figuur 24). Anderzijds, bij een gelijkblijvende decimeringshoogte B resulteert een afname van het minimaal verval h_{min} in een toename van de gemiddelde en een gelijkblijvende standaarddeviatie van de vervalbelasting (zie Figuur 25).

Met andere woorden, afhankelijk van welke van de twee grootheden B of h_{min} wordt vastgezet, resulteert een toenemende verhouding B / h_{min} ofwel in een toename van de gemiddelde vervalbelasting (situatie waarbij h_{min} wordt vastgezet), ofwel in een afname van de gemiddelde vervalbelasting (situatie waarbij B wordt vastgezet).



Figuur 24 - Verdelingsfuncties voor de vervalbelasting in het eerste levensjaar, bij gelijkblijvend minimaal verval en verschillende waarden voor de decimeringshoogte



Figuur 25 - Verdelingsfuncties voor de vervalbelasting in het eerste levensjaar, bij gelijkblijvende decimeringshoogte en verschillende waarden voor het minimaal verval

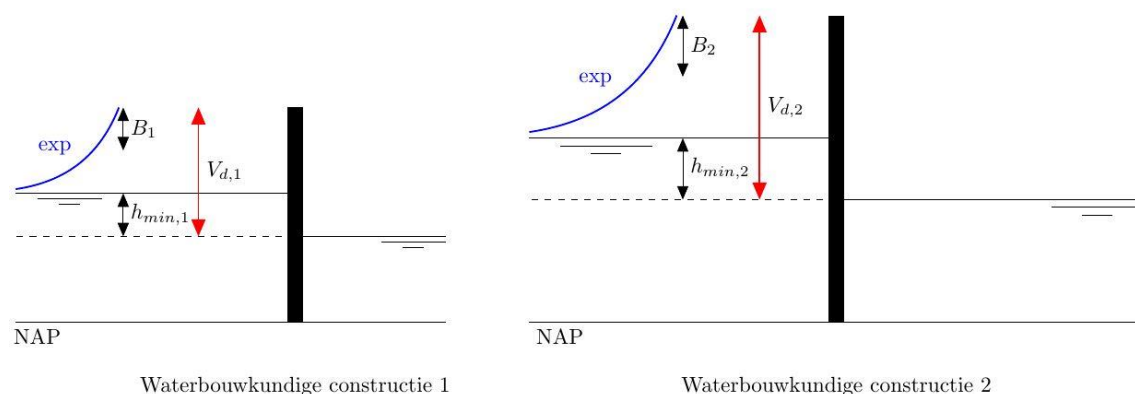
Verhouding tussen decimeringshoogte en minimaal aanwezige verval

In plaats van middels de precieze waarden voor B of h_{min} , kunnen waterbouwkundige constructies worden gekenmerkt middels slechts de verhouding tussen de waarden voor B en h_{min} . Reden hiervoor is dat de overschrijdingskans van de ontwerpwaarde van de vervalbelasting $P(V > V_d)$ slechts afhankelijk is van de ratio B / h_{min} , en niet van de precieze waarden voor B of h_{min} . Dit wordt toegelicht aan de hand van een voorbeeld. Figuur 26 (links) toont een waterbouwkundige constructie met een decimeringshoogte van B_1 , een minimaal aanwezig verval $h_{min,1}$ en een ontwerpwaarde voor de vervalbelasting gelijk aan $V_{d,1}$. Figuur 26 (rechts) toont een waterbouwkundige constructie met een decimeringshoogte van $B_2 = 2B_1$, een minimaal aanwezig verval $h_{min,2} = 2h_{min,1}$ en de ontwerpwaarde voor de vervalbelasting is gelijk aan $V_{d,2}$.

De ontwerpwaarden van de vervalbelasting van de constructie zijn ongelijk

($V_{d,1} \neq V_{d,2}$), immers $h_{min,2} > h_{min,1}$ en $B_2 > B_1$ en dus $\mu_{V,2} > \mu_{V,1}$. Echter is de overschrijdingskans van deze ontwerpwaarden wel gelijk, oftewel $P(V > V_{d,1} | B_1, h_{min,1}) = P(V > V_{d,2} | B_2, h_{min,2})$.

Voor een bewijs dat de overschrijdingskansen gelijk zijn wordt verwezen naar de volgende paragraaf.



Figuur 26 - Twee waterbouwkundige constructies met een gelijke verhouding tussen de decimeringhoogte en het minimaal verval, maar met een verschillende rekenwaarde voor de vervalbelasting.

B.3 Bewijs gelijke overschrijdingskansen

1. Beschouw de grenstoestandsfunctie $Z = R - S$, met R de sterkte en S de belasting
2. Stel $R = U_R \cdot c_R$ en $S = U_S \cdot c_S$ met U_R, U_S stochastische variabelen en c_R, c_S constanten
3. Stel nu dat U_R en U_S zodanig zijn dat de faalkans $P(Z < 0)$ precies voldoende klein is bij $c_R = c_S = 1$. De faalkans is dan ook precies voldoende klein voor andere waarden van c_R en c_S , zolang $c_R = c_S$ kunnen we immers schrijven:

$$Z = U_R \cdot c - U_S \cdot c \text{ met } c = c_R = c_S$$

en dus ook :

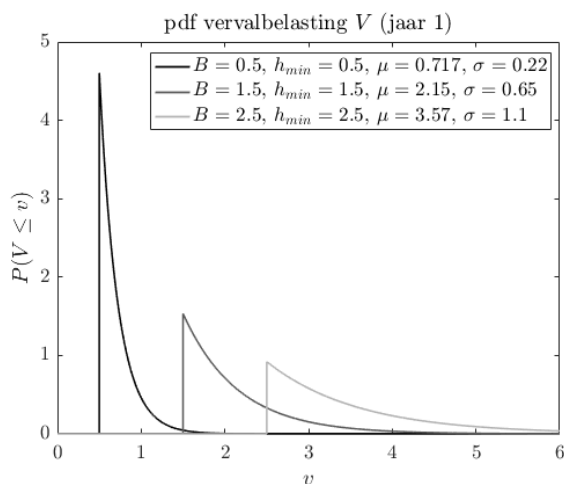
$$Z / c = U_R - U_S$$

We kunnen nu ook overstappen op (want $c > 0$) :

$$Z = U_R - U_S$$

4. Een vergroting van B met een bepaalde factor is conceptueel vergelijkbaar met een vergroting van de belasting U_s met een factor c (zie Figuur 27).

Om weer uit te komen op dezelfde betrouwbaarheid bij dezelfde B/h_{min} moet ook de oorspronkelijke sterkte met deze factor c worden vermenigvuldigd. Dit leidt dan weliswaar tot een grotere sterkte en een grotere belasting in het ontwerppunt ($U_R \cdot c$ en $U_s \cdot c$ nemen beide toe als c groter wordt), maar niet tot andere invloedscoëfficiënten.



Figuur 27 - pdf voor de vervalbelasting in jaar 1

C Correlatie tussen constructief falen en falen door golfoverloop of golfoverslag

C.1 Probleemformulering

Een dijkkring kan falen door verschillende faalmechanismen. Het falen van een dijkkring kan daarom worden gerepresenteerd als een seriesysteem bestaande uit meerdere elementen die elk een afzonderlijk faalmechanisme beschrijven. De maximaal toelaatbare faalkans van het dijkkringsysteem is gelijk aan P_{max} . In de default-faalkansberekening wordt aangenomen dat de afzonderlijke faalmechanismen onafhankelijk van elkaar zijn, m.a.w. de faalkans van het dijkkringsysteem wordt verkregen door sommatie van de faalkansen van de afzonderlijke faalmechanismen.

Twee van de faalmechanismen binnen het dijkkringsysteem zijn de mechanismen 'constructief falen' (F_{CF}) en 'falen door golfoverloop of golfoverslag' (F_{HT}). Dit laatste faalmechanisme is een gevolg van erosie of onvoldoende kombergend vermogen. De vervalbelasting die voor constructief falen van belang is, is vrijwel dezelfde als de vervalbelasting die voor golfoverloop of golfoverslag van belang is. Dit heeft als gevolg dat de faalmechanismen met elkaar zijn gecorreleerd. In de default-faalkansbegroting wordt geen rekening gehouden met deze correlatie. De default-faalkanseis voor constructief falen is dan onnodig conservatief (bij uitgangspunt seriesysteem met onafhankelijke elementen). Niet alleen dit conservatisme is ongewenst. Er zou in de praktijk ook gemakkelijk verwarring kunnen ontstaan als ontwerpers bij een semi-probabilistische beoordeling van de constructieve sterkte zouden moeten rekenen met hydraulische belastingen die fysisch niet mogelijk zijn vanwege de beperkte hoogte van het kunstwerk.

C.2 Probabilistische analyse en mogelijke oplossingen

De maximaal toelaatbare faalkans van het dijkkringsysteem is gelijk aan P_{max} . Uitgaande van een seriesysteem met onafhankelijke elementen kan voor elk van de faalmechanismen is een faalkanseis worden opgesteld. De maximaal toelaatbare faalkansen voor 'constructief falen' en 'falen door golfoverloop of golfoverslag' zijn:

$$P(F_{CF})_{max} = \frac{\omega_{CF} \cdot P_{max}}{N_{CF}}$$

$$P(F_{HT})_{max} = \frac{\omega_{HT} \cdot P_{max}}{N_{HT}}$$

Waarin:

$P(F_{CF})_{max}$	is de maximaal toelaatbare kans op 'constructief falen'
$P(F_{HT})_{max}$	is de maximaal toelaatbare kans op 'falen door golfoverloop of golfoverslag'
P_{max}	is de maximaal toelaatbare faalkans op dijkkringniveau
ω_{CF}	faalruimtefactor voor constructief falen (default $\omega_{CF} = 0.02$)
ω_{HT}	faalruimtefactor voor falen door golfoverloop of golfoverslag (default $\omega_{HT} = 0.24$)
N_{CF}	lengte-effectfactor voor constructief falen (default $N_{CF} = 3$)
N_{HT}	lengte-effectfactor voor falen door golfoverloop of golfoverslag (default $N_{HT} = 1-3$)

Uitgaande van een serie-systeem met onafhankelijke elementen, voldoet de kering ten aanzien van zowel constructief falen als falen door golfoverloop of golfoverslag indien geldt:

$$P(F_{CF} \cup F_{HT}) \leq P(F_{CF})_{max} + P(F_{HT})_{max}$$

De linkerhelft van deze vergelijking is gelijk aan:

$$P(F_{CF} \cup F_{HT}) = P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT}) + P(F_{HT})$$

Waarin $\bar{F}_{HT}$ staat voor de gebeurtenis 'geen falen door golfoverloop of golfoverslag'.

Zodoende kan de ontwerpverificatie ook worden uitgevoerd op grond van de volgende twee voorwaarden:

1) Voorwaarde m.b.t. golfoverloop of golfoverslag (reguliere beoordeling)

$$P(F_{HT}) \leq P(F_{HT})_{max}$$

2) Voorwaarde m.b.t. constructief falen indien geen golfoverloop of golfoverslag

$$P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT}) \leq P(F_{CF})_{max}$$

Als constructief falen apart wordt beschouwd, dan wordt feitelijk gekeken naar de faalkans $P(F_{CF})$. Omdat $P(F_{CF}) \geq P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$ is dit conservatief, zeker als er sprake is van een sterke afhankelijkheid tussen constructief falen en falen door golfoverloop of golfoverslag.

Feitelijk zou de kalibratie van het voorschrift voor constructief falen moeten berusten op een beschouwing van de faalkans $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$. Een complicerende factor is dat dan de correlatie met golfoverloop en golfoverslag moet worden meegenomen. Daarbij wordt aangenomen dat de vervallbelasting die voor golfoverslag van belang is vrijwel dezelfde is als de vervallbelasting die voor constructief falen van belang is. Hieronder worden drie manieren beschreven om hiermee om te gaan:

Tabel 11 - Methoden om om te gaan met correlatie faalmechanismen constructief falen en falen door golfoverloop of golfoverslag

Methoden	Voordelen	Nadelen
1. Volwaardige probabilistische analyses voor constructief falen en falen door golfoverloop of golfoverslag voor een groot aantal kunstwerken	Meest nauwkeurig	Relatief bewerkelijk, niet haalbaar binnen de projectmatige randvoorwaarden
2. Correctie van de faalkanseis op grond van het verwachte verschil tussen $P(F_{CF})$ en $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$	Gemakkelijk uitvoerbaar Reeds uitgevoerde kalibratieberekeningen kunnen worden gehandhaafd.	Benaderend (minder nauwkeurig dan aanpak 1) Bij de correctie van de faalkans(eis) worden de invloedscoëfficiënten niet aangepast.
3. Aftoppen van de kansverdeling van de buitenwaterstand om de faalkansbijdrage bij relatief hoge waterstanden te elimineren	Gemakkelijk uitvoerbaar Alle eerder uitgevoerde kalibratieberekeningen moeten opnieuw worden uitgevoerd.	Benaderend (minder nauwkeurig dan aanpak 1) De rekenwaarde van de belasting wordt gelijk aan het gekozen aftopniveau. De aannamen ten aanzien van het aftopniveau wordt dus direct bepalend. In werkelijkheid is het kritieke overslagdebiet ook onzeker. Geeft vertroebeling van de kalibratieberekeningen door een tamelijk onzuivere, bepalende aanname. De kalibratieberekeningen geven in huidige vorm veel inzicht.

Gelet op bovenstaande voor- en nadelen wordt vooralsnog de voorkeur gegeven aan de tweede optie.

C.3 Correctie van faalkanseis

Theorie

Om rekening te houden met de correlatie tussen de gebeurtenis constructief falen en falen door golfoverloop of golfoverslag is gekozen voor een correctie van de faalkanseis $P(F_{CF})_{max}$ op grond van het verwachte verschil tussen $P(F_{CF})$ en $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$ (zie methode 2 uit bijlage C.2). Hiervoor dient het quotiënt van de faalkansen $P(F_{CF})$ en $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$ te worden bepaald. De kans $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$ kan worden geschreven als $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT}) = P(Z_{CF} \leq 0 \cap Z_{HT} \geq 0)$. Dit is in wezen de kans op falen van een parallelsysteem met twee elementen zijnde Z_{CF} en Z_{HT} .

De betrouwbaarheid van de afzonderlijke elementen is gelijk aan:

$$\beta_{CF} = -\Phi^{-1}(P(F_{CF})_{max})$$

$$\beta_{HT} = -\Phi^{-1}(P(F_{HT})_{max})$$

Het is doelmatig de grenstoestandsfuncties van de afzonderlijke elementen te schrijven als:

$$Z_{CF} = \beta_{CF} - u$$

$$Z_{HT} = \beta_{HT} - v$$

Hierin zijn β_{CF} en β_{HT} de betrouwbaarheden van de afzonderlijke faalmechanismen en zijn de variabelen u en v standaard normaal verdeeld. De variabelen u en v zijn gecorreleerd. De correlatie tussen Z_{CF} en Z_{HT} wordt bepaald volgens:

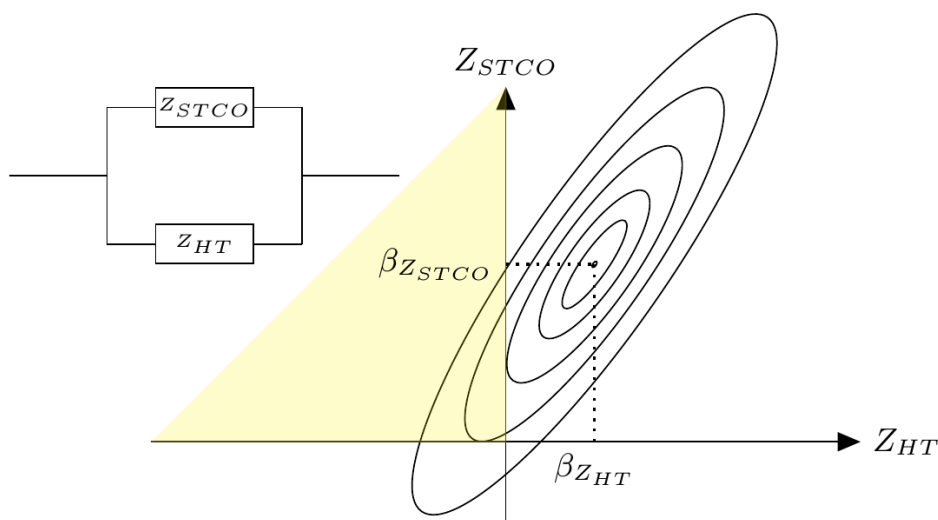
$$\rho_{Z_{CF}, Z_{HT}} = \alpha_{V,CF} \cdot \alpha_{V,HT}$$

Waarin:

$\rho_{Z_{CF}, Z_{HT}}$	is de correlatie tussen Z_{CF} en Z_{HT}
$\alpha_{V,CF}$	is de invloedscoëfficiënt van de vervalbelasting V in de grenstoestandsfunctie voor het faalmechanisme 'constructief falen'
$\alpha_{V,HT}$	is de invloedscoëfficiënt van de vervalbelasting V in de grenstoestandsfunctie voor het faalmechanisme 'falen door golfoverloop of golfoverslag'.

Aangenomen wordt dat de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van Z_{CF} en Z_{HT} bivariate normaal verdeeld is. In Figuur 28 is de gezamenlijke kansdichtheidsfunctie van Z_{CF} en Z_{HT} weergegeven. Het gebied dat bijdraagt tot $P(Z_{CF} \leq 0 \cap Z_{HT} \geq 0)$ is geel gearceerd.

Het oppervlak onder dit gebied wordt verkregen middels numerieke integratie in Matlab. Dit wordt gedaan door het verkrijgen van een gezamenlijke kansdichtheidsfunctie met gemiddeldes en correlatie zoals hierboven vermeld. Vervolgens kan het quotiënt van de faalkansen $P(F_{CF})$ en $P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$ worden verkregen.



Figuur 28 - Faaldomein voor een parallelsysteem met (gecorrleerde) elementen Z_{CF} en Z_{HT} .
Opmerking: STCO in de figuur staat voor constructief falen.

Invoer berekeningen

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de volgende parameters:

- Voor P_{max} zijn drie niveaus aangehouden, zijnde $P_{max} = [10^{-2} \ 10^{-3} \ 10^{-4}]$.
- Voor de invloedscoefficiënt van de vervalbelasting voor constructief falen ($\alpha_{V,CF}$) is uitgegaan van de resultaten van de probabilistische kalibratieberekeningen. De volgende waarden zijn hiervoor aangenomen: $\alpha_{V,CF} = [0,88 \ 0,90 \ 0,92 \ 0,95]$.
- De invloedscoefficiënt van de vervalbelasting voor golfoverslag $\alpha_{V,HT}$ heeft, zeker bij kunstwerken, een relatief hoge waarde. In de berekeningen is gekozen voor $\alpha_{V,HT} = [0,95 \ 0,98]$.
- Voor de lengte-effectfactor voor de faalmechanismen constructief falen en falen door golfoverslag zijn respectievelijk de waarden $N_{CF} = 3$ en $N_{HT} = 2$ aangehouden.

Resultaten

De resultaten van de berekeningen zijn weergegeven in Tabel 12. Op grond daarvan kan geconcludeerd worden dat de betrouwbaarheidseisen op niveau van de constructie voor constructief falen met een factor 2 verlaagd kunnen worden ten opzichte van de eisen die volgen uit de overstromingskansnorm, de faalkansbegroting en lengte-effectfactor. Deze factor 2 is een conservatieve omhullende voor een groot scala aan ontwerp situaties.

Voor een specifieke situatie (met name bij minder strenge eisen op dijkkringniveau) kan deze waarde hoger zijn. Dit maakt dat de betrouwbaarheidseis $\beta_{t,jr}$ voor constructief falen kan worden bepaald middels:

$$\beta_{t,jr} = -\Phi^{-1}(P(F_{CF}))$$

Met:

$$P(F_{CF}) = \frac{\omega_{CF} \cdot P_{max}}{c \cdot N_{CF}}$$

Waarin:

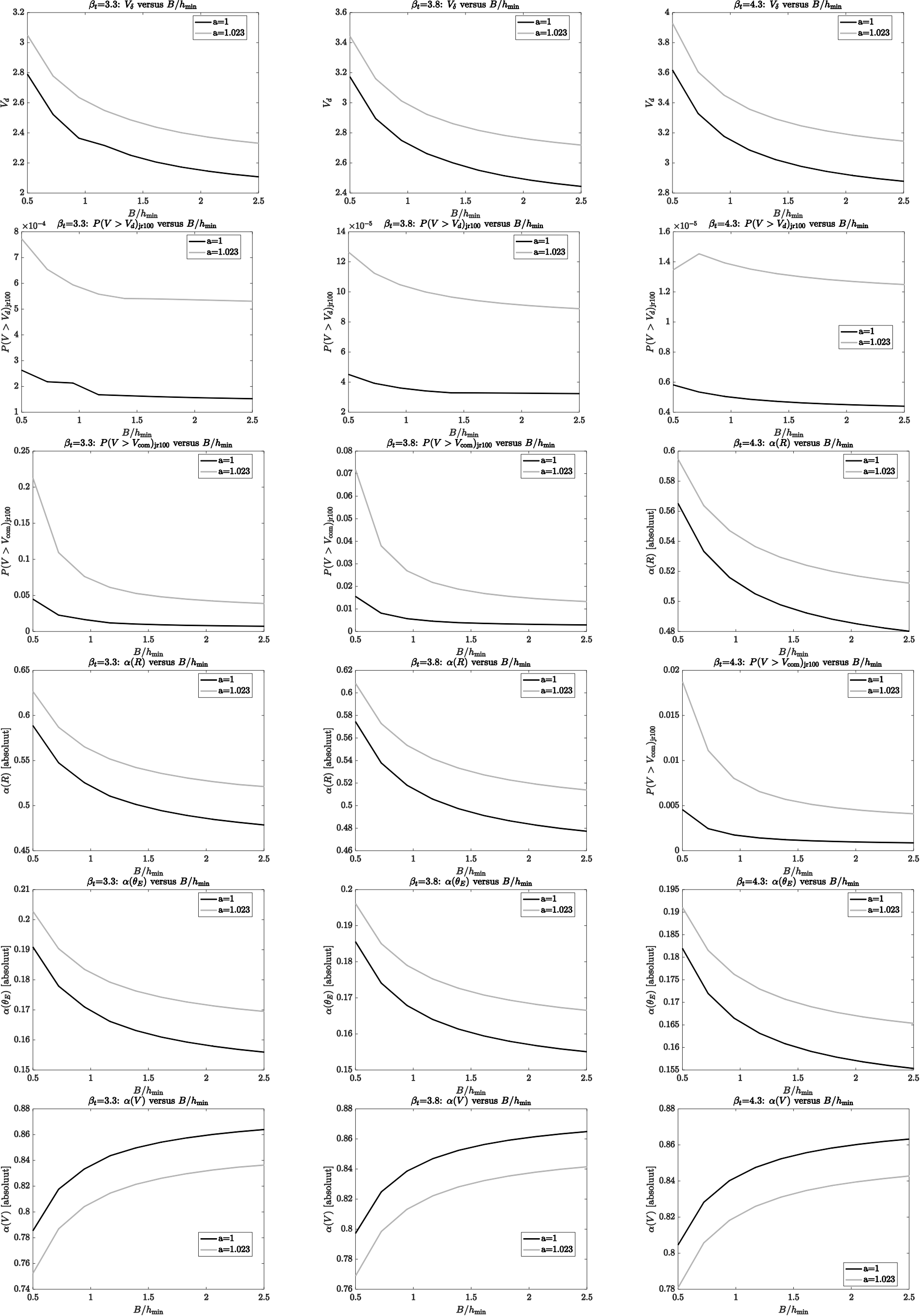
- $P(F_{CF})$ is de maximaal toelaatbare kans op 'constructief falen'
- P_{max} is de maximaal toelaatbare overstromingskans op dijkkringniveau
- ω_{CF} is de faalruimtefactor voor constructief falen (default $\omega_{CF} = 0.02$)
- N_{CF} is de lengte-effectfactor voor constructief falen (default $N_{CF} = 3$)
- c is de correctiefactor voor het meenemen van correlatie tussen constructief falen en golfoverloop en golfoverslag ($c = 2$ voor algemene toepassing).

Tabel 12 - Ratio faalkans door constructief falen versus constructief falen, gegeven geen falen door golfoverslag.

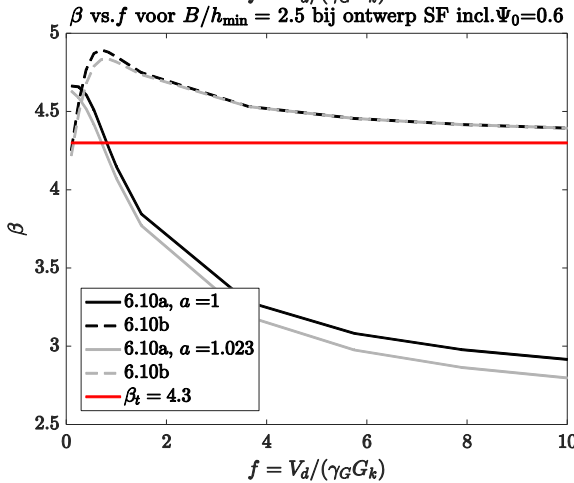
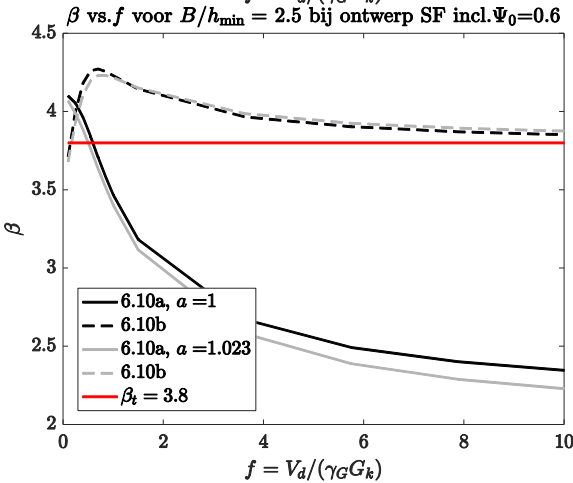
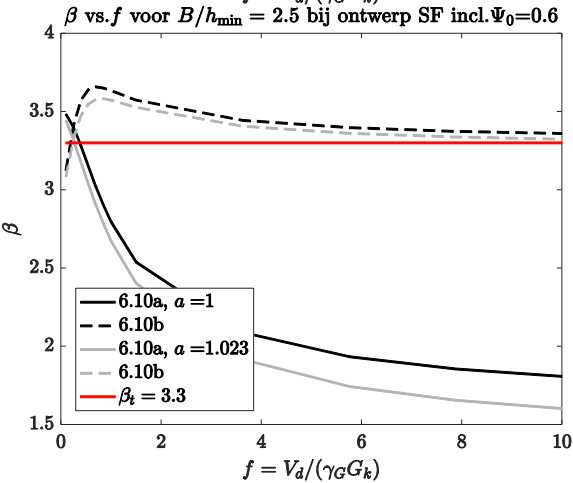
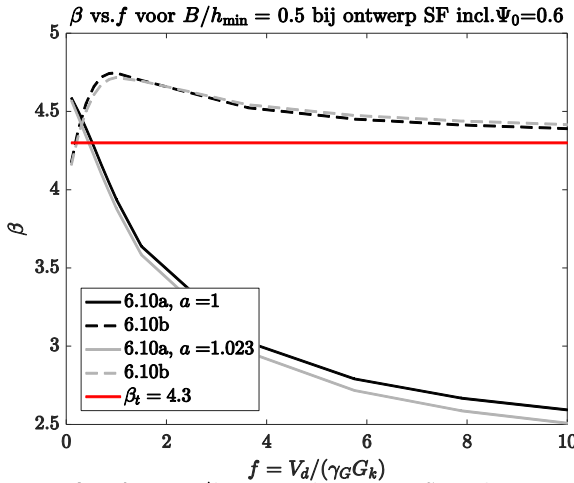
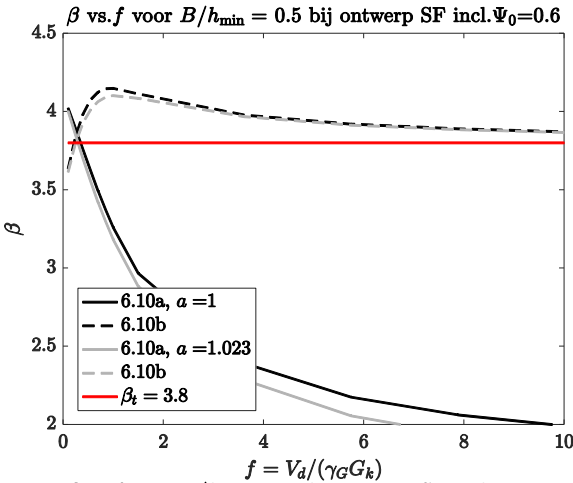
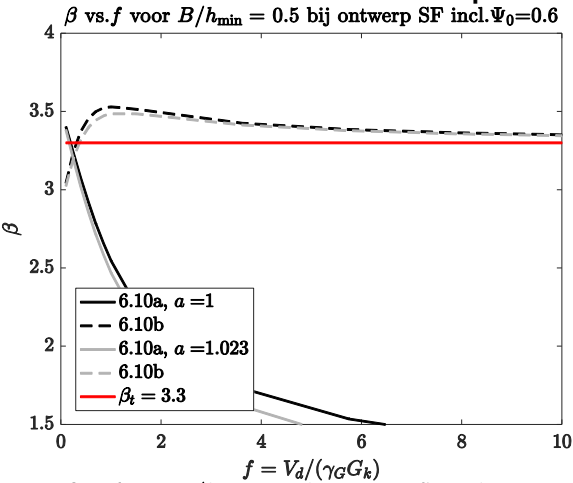
$\alpha_{V,CF}$	$\alpha_{V,HT}$	$P(F_{CF}) / P(F_{CF} \cap \bar{F}_{HT})$		
		$P_{max} = 10^{-2}$	$P_{max} = 10^{-3}$	$P_{max} = 10^{-4}$
0.88	0.95	3.7	2.5	1.9
0.88	0.98	5.1	3.2	2.4
0.9	0.95	4.6	3.0	2.2
0.9	0.98	7.0	4.1	2.9
0.92	0.95	6.1	3.7	2.7
0.92	0.98	10.7	5.8	3.9
0.95	0.95	10.9	5.9	4.0
0.95	0.98	29.8	13.3	7.9

D Resultaten kalibratieberekeningen

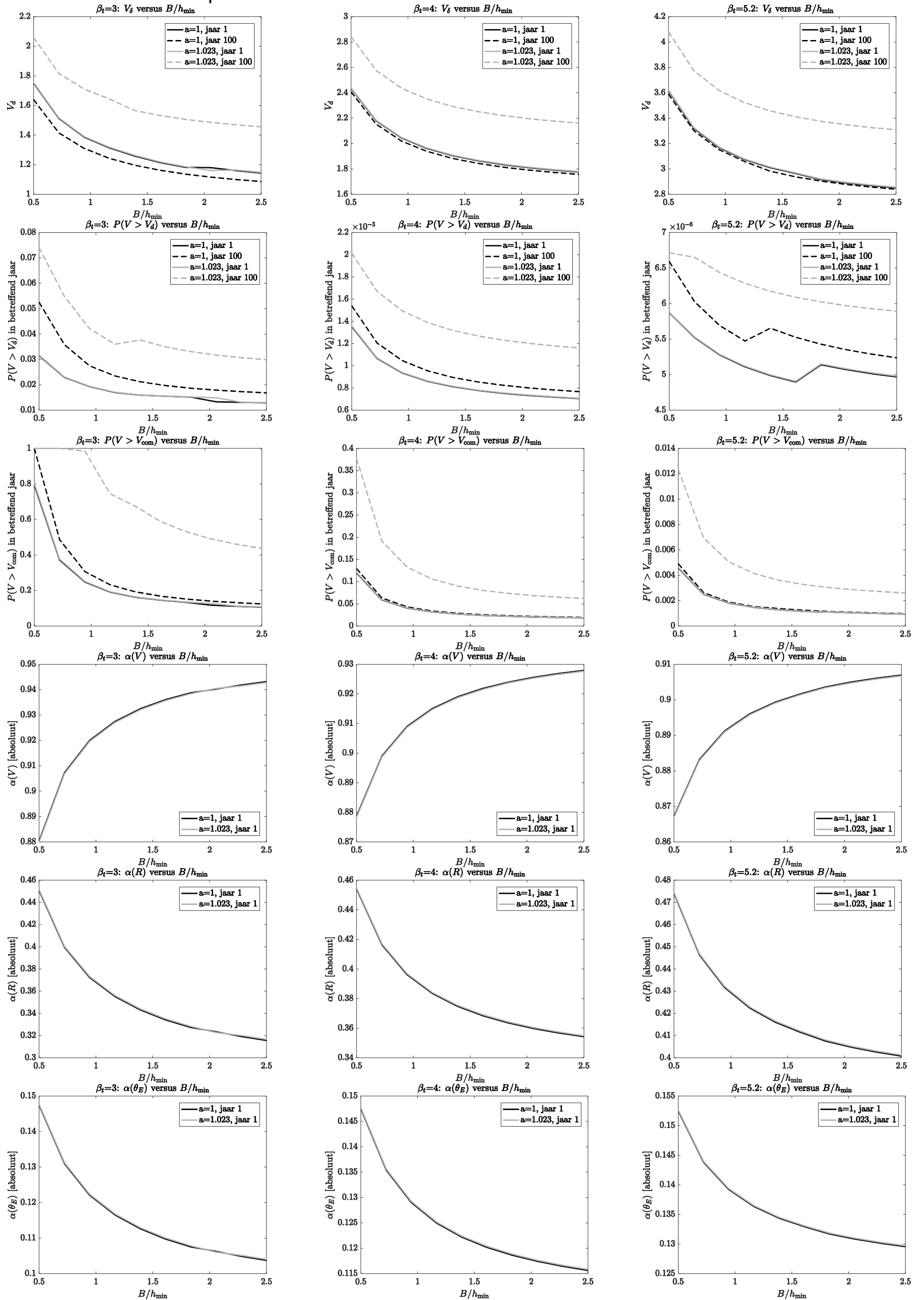
Bouwbesluit – kalibratiestap 1



Bouwbesluit – kalibratiestap 2



Waterwet – kalibratiestap 1



Waterwet – Kalibratiestap 2

