InfraQuest
COMPETENCE CENTRE FOR ROADS & STRUCTURES

Beoordeling van de constructieve veiligheid van waterbouwkundige kunstwerken volgens het Bouwbesluit en de Waterwet

Natte Kunstwerken

InfraQuest-2014-25

Colofon

Uitgegeven door	InfraQuest Competence centre for roads and structures Pb 49, 2600 AA Delft
Informatie	J.H. Roebers J.D. Bakker
Telefoon	088 86 63201
Auteurs	Dr.Ir. R.B. Jongejan Prof.Dr.Ir. R.D.J.M. Steenbergen
Datum	mei 2015
Status	Definitief
Versie	

InfraQuest is een samenwerkingsverband van

Technical Sciences
Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO-rapport

TNO 2014 R11674

Beoordeling van de constructieve veiligheid van waterbouwkundige kunstwerken volgens het Bouwbesluit en de Waterwet

Datum	8 mei 2015
Auteur(s)	Dr.ir. R.B. Jongejan Prof.dr.ir. R.D.J.M. Steenbergen
Exemplaarnummer	2014.0100279902
Oplage	
Aantal pagina's	77 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	3
Opdrachtgever	
Projectnaam	IQ-2014-25 RBK-Nat Fase 2B / Veiligheidsfilosofie natte kunstwerken
Projectnummer	060.09420 / 060.09419

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.

© 2015 TNO

Inhoudsopgave

1 Inleiding ... 4
1.1 Achtergrond ... 4
1.2 Probleemstelling ... 4
1.3 Doelstelling voorliggende studie ... 5

2 Aanpak ... 6

3 Wettelijke kaders voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van kunstwerken ... 9
3.1 Bouwbesluit ... 9
3.2 Waterwet, Wettelijk Toetsinstrumentarium en Ontwerpinstrumentarium ... 10
3.3 Overzicht van overeenkomsten en verschillen ... 12

4 De algemene formulering van een betrouwbaarheidseis ... 13

5 De grondslagen van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet ... 15
5.1 Grondslagen algemeen ... 15
5.2 Economisch risico en optimalisatie ... 17
5.3 Individueel risico ... 29
5.4 Groepsrisico ... 31
5.5 Overzicht van overeenkomsten en verschillen ... 33

6 De betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet in de praktijk ... 35
6.1 De omgang met de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit ... 35
6.2 De betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet in de praktijk ... 41
6.3 Overzicht van overeenkomsten en verschillen betrouwbaarheidseisen ... 45

7 De (non-)equivalentie van betrouwbaarheidseisen voor verschillende referentieperiodes ... 47
7.1 De grondslagen van de overstromingskansnormen en de referentieperiode ... 47
7.2 Algemene uitgangspunten bij vertaling van de normen uit de Waterwet naar betrouwbaarheidseisen aan constructie-onderdelen ... 48
7.3 Het omrekenen van een door de MKBA gedicteerde norm naar grotere referentieperiodes ... 48
7.4 Omrekenen naar grotere referentieperiodes bij een door het LIR gedicteerde norm ... 52
7.5 De referentieperiode in de huidige waterbouwkundige praktijk ... 54
7.6 Conclusie en discussie ... 55

8 De praktische betekenis van grotere referentieperiodes ... 56
8.1 De vaststelling van rekenwaarden: theorie ... 56
8.2 De vaststelling van rekenwaarden: van theorie naar praktijk ... 57
8.3 Conclusie en discussie ... 63

9 Integratie betrouwbaarheidseisen Bouwbesluit en Waterwet ... 64
9.1 Uitgangspunten ... 64
9.2 Bevindingen van deze studie ... 64

10 Referenties 67

11 Ondertekening 69

Bijlage(n)

A Ruimtelijke eenheden bij overstromingskansnormen
B De definitie van de faalkans per jaar
C Toelichting op de case study

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Woningwet stelt dat constructies dienen te voldoen aan de door het Bouwbesluit aangewezen normen en voorschriften; dit betreft de Eurocode (NEN-EN 1990) serie voor nieuwbouw en de NEN 8700 serie voor bestaande bouw. De Waterwet (met bijbehorende voorschriften) stelt specifiek eisen aan de constructieve veiligheid van waterkeringen. De Waterwet bevat normen ten aanzien van het waterkerend vermogen van primaire waterkeringen, waaronder waterbouwkundige kunstwerken. In dit rapport worden deze eisen behandeld en met elkaar vergeleken.

Ten behoeve van het ontwerp van waterbouwkundige kunstwerken worden de wettelijke normen uit de Waterwet en/of Bouwbesluit aangevuld met door Rijkswaterstaat geformuleerde eisen. Deze aanvullende eisen voor het ontwerp zijn vastgelegd in de Richtlijn Ontwerp Kunstwerken (ROK1.2, RTD 1001:2013, d.d. 1/1/2013).

Ten behoeve van de beoordeling van bestaande kunstwerken zijn aanvullende eisen vastgelegd in de Richtlijnen Beoordeling Kunstwerken (RBK). De RBK geven invulling aan het streven van Rijkswaterstaat naar een uniform beoordelingskader van de constructieve veiligheid van de bestaande kunstwerken. In de eerste versie van de RBK waren alleen de aanvullende eisen voor betonnen (droge) kunstwerken gegeven. Eind 2012 is hierop een aanvulling verschenen voor stalen (droge) kunstwerken. Beoogd wordt dat op den duur de RBK ook gelden voor waterbouwkundige (natte) kunstwerken. De RBK-Nat wordt gezien als een aanvulling op de RBK 1.2.

1.2 Probleemstelling

Rijkswaterstaat streeft naar een uniforme aanpak voor het ontwerp en de beoordeling van de constructieve veiligheid van de natte kunstwerken. Hiertoe is in 2012 het InfraQuest onderzoek "Richtlijn Beoordeling Natte Kunstwerken (RBK-Nat)” gestart. Momenteel gelden er voor het ontwerp van nieuwe en het beoordelen van bestaande natte kunstwerken zowel eisen uit het Bouwbesluit als eisen uit de Waterwet. Deze kunnen niet zondermeer in elkaar omgerekend worden, daarom is geen eenduidige normstelling beschikbaar.

Ook is speciale aandacht nodig voor het toetsen van bestaande constructies; hiervoor schrijft NEN 8700 een ten opzichte van nieuwbouw verlaagde betrouwbaarheidsindex voor. Dat leidt tot een situatie voor de toetser waarbij het niet op voorhand duidelijk is in welk geval de Waterwet of het Bouwbesluit maatgevend is omdat omrekenen niet zomaar mogelijk is.

Het beoogde onderzoek “Veiligheidsfilosofie Natte Kunstwerken” is er op gericht deze onduidelijkheid weg te nemen. Daartoe is er een uniforme set uitgangspunten benodigd, alsmede een aanbeveling voor concrete betrouwbaarheidsniveaus, omdat die de basis vormen voor de toetsing en het ontwerp van waterbouwkundige kunstwerken.

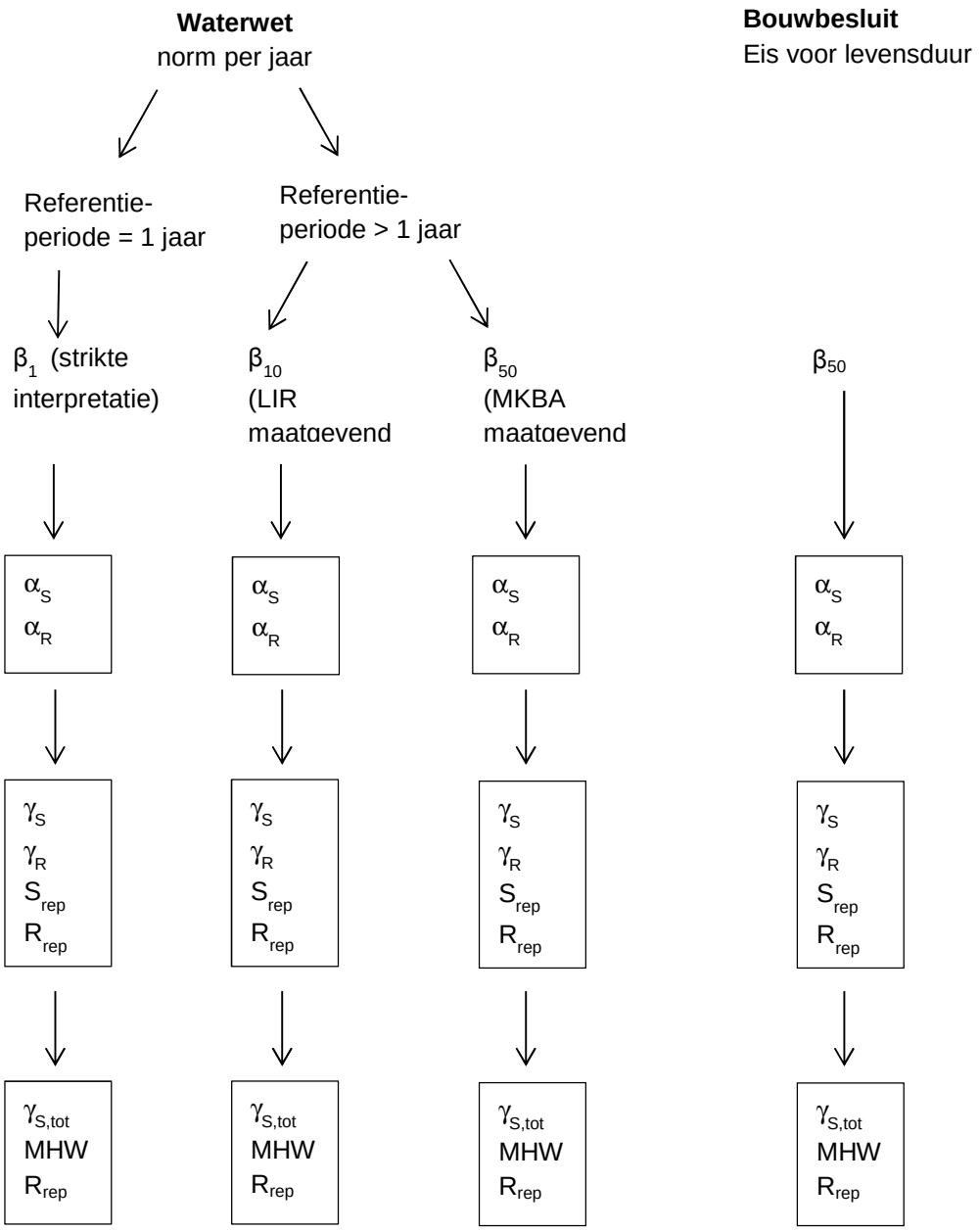
1.3 Doelstelling voorliggende studie

Doel van het onderhavige onderzoek aan “Veiligheidsfilosofie Natte Kunstwerken” is het uitwerken van een veiligheidsfilosofie voor constructieve veiligheid van waterbouwkundige constructies in primaire waterkeringen die als basis kan dienen voor het ontwikkelen van ontwerp- en toetsvoorschriften.

De uitwerking resulteert in een voorstel voor een consistente formulering van het vereiste betrouwbaarheidsniveau; i.e. de betrouwbaarheidsindices voor toetsing en ontwerp, voor kunstwerken die tevens zijn aangemerkt als primaire waterkering, afhankelijk van de vereiste (rest)levensduur.

2 Aanpak

In dit rapport staat de vraag centraal of de Waterwet of het Bouwbesluit maatgevend is voor het ontwerp van waterbouwkundige kunstwerken. Als dit bekend is, hoeven immers niet langer twee ontwerpen (o.b.v. Waterwet en Bouwbesluit) opgesteld en vergeleken te worden. Er kan dan direct worden ontworpen, uitgaande van de ontwerpregels, die horen bij het maatgevende wettelijk kader. In Figuur 1 is schematisch weergegeven hoe van de betrouwbaarheidseisen uit Waterwet en het Bouwbesluit tot representatieve waarden en partiële factoren gekomen kan worden. De begrippen in de figuur worden in de navolgende tekst toegelicht.



Figuur 1 Schematische weergave van de bepaling van veiligheidsfactoren met de Waterwet en het Bouwbesluit als vertrekpunt, voor een ontwerp met een levensduur van 50 jaar.

De normen uit de Waterwet hebben de eenheid “per jaar”. Volgens een strikte interpretatie moet de overstromingskans elk jaar kleiner zijn dan de norm. De normen uit de Waterwet kunnen ook worden vertaald naar eisen voor referentieperiodes groter dan 1 jaar, zoals het geval is in de Leidraad Kunstwerken. Bij deze vertaling wordt in dit rapport onderscheid gemaakt tussen gevallen waarin de norm wordt gedicteerd door een eis op basis van het lokaal individueel risico (LIR-eis) en gevallen waarin de norm wordt gedicteerd door de uitkomsten van een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA). In het eerste geval wordt uitgegaan van een referentieperiode van 10 jaar; in het tweede geval van een referentieperiode gelijk aan de levensduur, veelal 50 jaar. Bij een door de MKBA-gedicteerde norm dient wel rekening te worden gehouden met het tijdverloop van de faalkans, zoals dat in de MKBA is verondersteld. Dit wordt nader toegelicht in hoofdstuk 6.

In geval van een beoordeling van een constructie conform het Bouwbesluit wordt standaard uitgegaan van een referentieperiode gelijk aan de levensduur, veelal 50 of 100 jaar.

Bij elke betrouwbaarheidseis (Waterwet: β_1, β_{10}, β_{50}; Bouwbesluit: β_{50}) hoort een andere set probabilistische invloedscoëfficiënten (α-waarden) en een andere set rekenwaarden voor belasting en sterkte (representatieve waarden S_{rep} en R_{rep} en partiële veiligheidsfactoren γ_S en γ_R). Door de representatieve waarden steeds gelijk te stellen en de partiële factoren hierop aan te passen kunnen de partiële factoren onderling vergeleken worden. Opgemerkt wordt dat de formule voor de bepaling van partiële factoren uit de Leidraad Kunstwerken tot onjuiste resultaten kan leiden. Dat komt doordat de invloedscoëfficiënten in deze formule constant worden verondersteld en omdat geen rekening wordt gehouden met de in de praktijk aanwezige toename van de belasting tijdens de levensduur. Dit wordt nader toegelicht in hoofdstuk 7.

De vraag welke eis maatgevend is voor het ontwerp kan op de volgende twee manieren worden beantwoord:

1. door een vergelijking van de partiële factoren voor elk pad uit Figuur 1: de betrouwbaarheidseis waarvoor de totale belastingfactor ($\gamma_{S,tot} = \gamma_S \cdot \gamma_R$, zoals in de Leidraad Kunstwerken) het grootste is, is maatgevend (zie onderste rij in Figuur 1).
2. door een vergelijking van β-waarden. De betrouwbaarheidseisen β zijn vergelijkbaar als hun referentieperiodes gelijk zijn. Dat betekent dat alleen de β_{50}’s in Figuur 1 direct onderling vergelijkbaar zijn.

In hoofdstuk 7 wordt op grond van theorie en berekeningen aangetoond dat de drie mogelijke definities van de betrouwbaarheidseis bij de Waterwet (β_1, β_{10}, β_{50}) nagenoeg dezelfde totale belastingfactoren ($\gamma_{S,tot}$) opleveren. In bijzondere gevallen zijn afwijkingen mogelijk, maar dan gaat het om gevallen die weinig representatief zijn voor het merendeel van de constructies. Alleen bij faalkansen met zeer sterke correlaties tussen de jaren (een constructie belast met een dominante niet-tijdsafhankelijk belasting zoals een constant verval) kunnen er verschillen worden gevonden tussen de totale belastingfactoren bij de drie mogelijke definities van de betrouwbaarheidseis bij de Waterwet. Dat zijn echter gevallen die weinig relevant zijn voor de afleiding van veiligheidsfactoren die breed toepasbaar moeten zijn (als

deze uitzonderingsgevallen wel als representatief beschouwd zouden worden, dan zouden de veiligheidsfactoren vaak te klein zijn).

Het bovenstaande betekent dat de vergelijking tussen de Waterwet en het Bouwbesluit gedaan kan worden door:

1. door een vergelijking van de partiële factoren horend bij de β_{50} horend bij de Waterwet en de β_{50} uit het Bouwbesluit.
2. door een directe getalsmatige vergelijking van de β_{50} horend bij de Waterwet en de β_{50} uit het Bouwbesluit.

In hoofdstuk 8 wordt de uiteindelijke vergelijking tussen Bouwbesluit en Waterwet gepresenteerd en worden uiteindelijke betrouwbaarheidsindices voor de levensduur geadviseerd voor waterbouwkundige kunstwerken.

3 Wettelijke kaders voor de beoordeling van de constructieve veiligheid van kunstwerken

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de wet- en regelgeving rondom de constructieve veiligheid van hoogwaterkerende kunstwerken. Daarbij wordt zowel het gezichtspunt van het Bouwbesluit als dat van de Waterwet gehanteerd. In het Bouwbesluit staan afzonderlijke betrouwbaarheidseisen voor toetsing en ontwerp. De (nieuwe) Waterwet bevat één betrouwbaarheidseis die de basis vormt voor toetsing en ontwerp. In paragraaf 3.1 over het Bouwbesluit wordt eerst het ontwerp en daarna de toetsing behandeld; deze volgorde is omgedraaid in paragraaf 3.2 over de Waterwet.

3.1 Bouwbesluit

Het Bouwbesluit is een ministeriële regeling vallend onder de Woningwet. Het Bouwbesluit 2012 bevat voorschriften over het (ver)bouwen en slopen van bouwwerken, over de staat en het gebruik van bestaande bouwwerken, open erven en terreinen en over de veiligheid tijdens het bouwen en slopen. Dit zijn de voorschriften die de minimaal noodzakelijke kwaliteit van bouwwerken waarborgen.

3.1.1 Ontwerp: NEN-EN 1990/NB

Voor de betrouwbaarheidseisen voor het ontwerp van nieuwbouw verwijst het Bouwbesluit naar NEN-EN 1990. Daarin zijn veiligheidsklassen met bijbehorende betrouwbaarheid vastgesteld voor nieuwbouw (nieuwbouwniveau). Een betrouwbaarheidseis is strenger als de gevolgen van falen ernstiger zijn. Tevens geldt dat bij relatief lage meerkosten een hogere eis kan worden nagestreefd.

3.1.2 Toetsing van bestaande constructies: NEN 8700

Volgens artikel 1b, tweede lid, van de Woningwet mag een eigenaar een bouwwerk niet in een staat brengen of houden onder het afkeurniveau van het Bouwbesluit 2012; doet hij dat wel dan begaat hij een economisch delict. Het afkeurniveau, dat in vergelijking met het nieuwbouwniveau een gereduceerd veiligheidsniveau is, wordt ook wel aangeduid als het aanschrijfniveau. Komt een bouwwerk daaronder, dan moet de eigenaar worden aangeschreven door het bevoegd gezag, veelal de gemeente, om constructieve maatregelen te treffen. Voor het afkeurniveau verwijst het Bouwbesluit 2012 naar NEN 8700, waarin dit niveau is gekwantificeerd door middel van verlaagde partiële belastingfactoren en belastingen die horen bij een gereduceerde referentieperiode, beide afhankelijk van de gevolgklasse en de minimale restlevensduur. Kort samengevat moet een constructie publiekrechtelijk worden afgekeurd indien het veiligheidsniveau behorende bij afkeuren wordt onderschreden rekening houdend met:

- een restlevensduur van 1 jaar (bij afkeur worden alleen acuut onveilige situaties beoordeeld);
- belastingen horend bij een referentieperiode van 15 jaar , uitgezonderd gevolgklasse CC1A waar 1 jaar is toegestaan (zie paragraaf 6.1 voor een toelichting op deze referentieperiodes);
- de sterkte corresponderend met die van de werkelijke constructie.

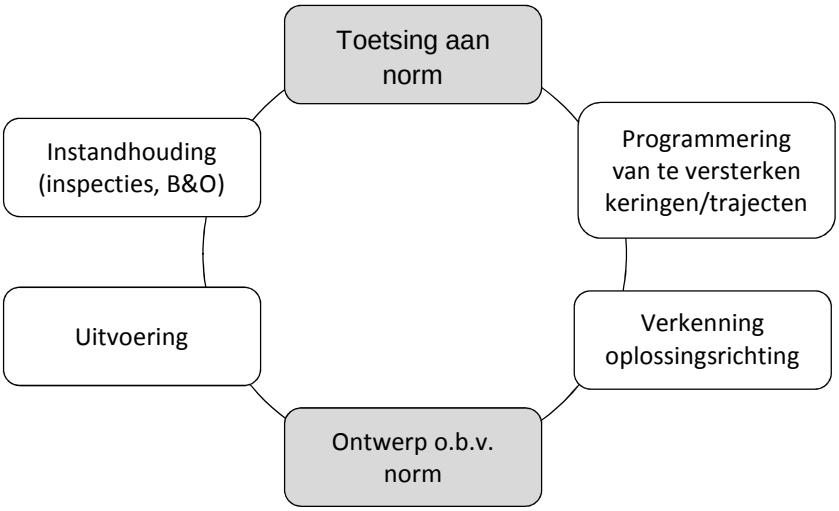
Bij maatregelen in de zin van verbouw van een constructie komt het verbouwniveau in beeld. Met de inwerkingtreding van het Bouwbesluit 2012 geldt niet langer dat publiekrechtelijk moet worden gestreefd naar het nieuwbouwniveau, waarvan mag worden afgeweken bij toestemming van bevoegd gezag. Sinds 2012 geldt een "vast" verbouwniveau, dat lager ligt dan het nieuwbouwniveau. Om de beleidsvrijheid van het bevoegd gezag te beperken is in het Bouwbesluit 2012 gekozen voor een eenduidig verbouwniveau. Vanuit de principes van de veiligheidsfilosofie voor bouwwerken verdient het echter aanbeveling om de onderstaande systematiek aan te houden hetgeen ook is aangegeven in NEN 8700 (Bijlage F.3):

- Verbouw vindt normaal gesproken plaats volgens vigerende nieuwbouweisen.
- Afwijking tot het niveau 'verbouw' is toegestaan in het geval van disproportionele kosten om aan het nieuwbouwniveau te voldoen. Een motivering waarom niet aan de nieuwbouweis wordt voldaan is verplicht.

3.2 Waterwet, Wettelijk Toetsinstrumentarium en Ontwerpinstrumentarium

3.2.1 Context

De bescherming tegen overstromingen vergt continu aandacht. Dit houdt verband met natuurlijke processen (bijv. klimaatverandering, bodemdaling, veroudering), veranderingen in de kosten van hoogwaterbescherming en de potentiële gevolgen van overstromingen, en veranderingen in maatschappelijke preferenties (zie ook TAW, 1998). Vanwege deze laatste twee aspecten wordt in het kader van het Deltaprogramma momenteel gewerkt aan een actualisatie van het waterveiligheidsbeleid. Hoewel het normtype zal wijzigen, zullen de wettelijke kaders en werkprocessen op hoofdlijnen ongewijzigd blijven.
Nederland is ingedeeld in dijkringen. Elke dijkring bestaat uit een aaneengesloten keten van zg. primaire waterkeringen (dijken, duinen en/of kunstwerken) en hoge gronden. De toetsing en het ontwerp van waterkeringen zijn onderdelen van een cyclus die is weergegeven in Figuur 2. Vaak worden ook nog andere cycli onderscheiden: een langjarige cyclus rond het evalueren en bijstellen van de wettelijke normen en een relatief korte cyclus rond het beheer en onderhoud.



Figuur 2 De cyclus waar toetsing en ontwerp deel van uitmaken.

De normen voor de toetsing en het ontwerp van primaire waterkeringen zijn vastgelegd in de Waterwet. Krachtens artikel 2.5 van de Waterwet kunnen ook aan secundaire keringen eisen worden gesteld, bij ministeriële regeling of provinciale verordening. Deze vallen echter buiten de scope van dit rapport.

De normen uit de Waterwet 2009 zijn gedefinieerd als overschrijdingskansen van waterstanden die de waterkeringen veilig moeten kunnen keren, rekening houdend met alle factoren die het waterkerend vermogen kunnen beïnvloeden. Deze benadering wordt in de Grondslagen voor Waterkeren van de TAW (heden: ENW) de overbelastingsbenadering genoemd (TAW, 1998).

Momenteel (2014) wordt gewerkt aan de overstap van overschrijdingskansnormen naar normen die zijn gedefinieerd als faalkanseisen. In de Grondslagen voor Waterkeren is dit de inundatiekansbenadering genoemd. De nieuwe normen zullen betrekking hebben op zogenaamde normtrajecten. Dat zijn kleinere ruimtelijke eenheden dan de huidige dijkringen, zodat kwetsbare gebieden gericht extra beschermd kunnen worden (zie Bijlage A). Vermoedelijk zullen de volgende normklassen worden gehanteerd: 1/100, 1/300, 1/1.000, 1/3.000, 1/10.000, 1/30.000 en 1/100.000 per jaar.

3.2.2 Toetsing van bestaande constructies: Waterwet en Wettelijk Toetsinstrumentarium

De Waterwet 2009 verplicht de beheerder om twaalfjaarlijks aan de Minister verslag uit te brengen over de “algemene waterstaatkundige toetsing van de primaire waterkering” (art. 2.12). De Minister brengt vervolgens verslag uit aan de Kamers der Staten Generaal. Ten behoeve van deze rapportages dienen de beheerders twaalfjaarlijks een toetsing van alle primaire waterkeringen uit te voeren. Daarbij dienen zij de waterkeringen te toetsen aan de normen uit Bijlage II van de Waterwet (ingevolge art. 2.2), gebruik makend van het wettelijk toetsinstrumentarium (WTI) dat bij Ministeriële regeling is aangewezen (ingevolge art. 2.3 en 2.6). Het WTI bestaat uit een voorschrift toetsen op veiligheid (VTV) en hydraulische randvoorwaarden (HR). Het WTI bevat verder verwijzingen naar ENW-technische rapporten voor de achtergronden van de toetsvoorschriften. Periodiek wordt het WTI bijgesteld op basis van nieuwe inzichten.

De wettelijke toetsing dient twaalfjaarlijks te worden uitgevoerd. Ook tussentijds kunnen de keringen worden aangemeld bij het hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), tenzij het gaat over tekortkomingen die in het kader van de actieve zorgplicht zouden moeten worden weggewerkt. Het HWBP zal, in elk geval tot 2050, het karakter van een voortrollend programma krijgen.

Voor de toetsing van bestaande kunstwerken verwijst het (huidige) WTI vooralsnog naar de Leidraad Kunstwerken, die primair voor het ontwerp van nieuwe kunstwerken is ontwikkeld.

3.2.3 Ontwerp: Waterwet en Ontwerpinstrumentarium

Bij het ontwerp van waterkeringen wordt gebruik gemaakt van dezelfde normen als bij de toetsing: keringen worden zodanig ontworpen dat zij in hun laatste levensjaar nog aan de normen zullen voldoen.
Voor het ontwerp van waterkeringen stelt de Minister ontwerpleidraden en technische rapporten beschikbaar (Waterwet art. 2.6). Deze leidraden strekken tot aanbeveling. Om het ontwerpen van waterkeringen op basis van de nieuwe normen mogelijk te maken, is voor de programmadirectie van het HWBP een zg. ontwerpinstrumentarium (OI2014) ontwikkeld. Met dit ontwerpinstrumentarium kan (in combinatie met de huidige leidraden en technische rapporten) worden beoordeeld of een ontwerp toereikend is. Beheerders zijn niet bij wet verplicht om het OI te volgen, maar het afwijken van het OI kan wel gevolgen hebben voor de subsidiëring van de versterking.

3.3 Overzicht van overeenkomsten en verschillen

De belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de wettelijke kaders zijn weergegeven in Tabel 1.

Tabel 1. De kenmerken van de wettelijke kaders

Aspect	**Bouwbesluit**	**Waterwet, WTI2017 en Ontwerpinstrumentarium**
Status	- Het Bouwbesluit (BB) is bij Ministeriële regeling aangewezen - De Eurocodes inclusief nationale bijlagen worden aangewezen door het BB. - Voor bestaande bouw geldt de NEN 8700 serie, aan-gewezen door Bouwbesluit	- Normen, toetsfrequentie, rollen en verantwoordelijkheden bij wet vastgelegd - Het WTI wordt bij Ministeriële Regeling aangewezen - Het Ontwerpinstrumentarium (OI) strekt tot aanbeveling
Betrekking op	- Alle bouwwerken	- Alleen primaire waterkeringen
Regels omtrent toetsproces	- Geen voorgeschreven toetsfrequentie - Actieve zorgplicht - Handhaving door Bouw en Woning Toezicht	- Wettelijk vastgelegde, twaalfjaarlijkse toetsronde met het dan vigerende WTI - Actieve zorgplicht.
Functies van de toetsing	- Beoordeling bouwvergunning - Beoordeling verbouw - Beoordeling wel of niet afkeuren, het onbewoonbaar/onveilig verklaren en het opleggen van onmiddellijke maatregelen	- Verantwoording afleggen aan Kamer: geven landsdekkend beeld conditie van de primaire waterkeringen - Afkeuring van een primaire waterkering vormt de basis voor aanmelding bij het Hoogwaterbeschermings-programma (HWBP) - De toetsing levert basis-gegevens voor de prioritering van versterkingen in HWBP - De toetsing levert basisgegevens voor de verkenningenfase in HWBP

Een waterbouwkundig kunstwerk dat als primaire waterkering is aangewezen dient zowel te voldoen aan de eisen uit het Bouwbesluit als de normen uit de Waterwet. De strengste eis is dus maatgevend.

4 De algemene formulering van een betrouwbaarheidseis

Een betrouwbaarheidseis aan een waterbouwkundig kunstwerk is een prestatie-eis die in algemene zin als volgt kan worden geformuleerd (JCSS, Joint Committee on Structural Safety):

"De constructie mag:
1. *de gedefinieerde uiterste grenstoestanden,*
2. *met de vastgelegde maten van betrouwbaarheid,*
3. *gedurende de vastgestelde referentieperiode*

niet overschrijden."

Ad. 1 Grenstoestanden
Constructies (of onderdelen daarvan) bezitten een of meer functies. Het niet langer vervullen van een functie wordt falen genoemd. De grenstoestand is de toestand waarin nog net geen sprake is van falen. In de praktijk wordt onderscheid gemaakt tussen de volgende typen grenstoestanden:
1. Uiterste grenstoestand (Ultimate Limit State)
2. Bruikbaarheidsgrenstoestand (Serviceability Limit State)

Soms wordt ook een vermoeiingsgrenstoestand (Fatigue Limit State) beschouwd. Deze is op te vatten als een uiterste grenstoestand.

Voor elk faalmechanisme zal een afzonderlijke grenstoestand geformuleerd moeten worden.

Bij overschrijding van de bruikbaarheidsgrenstoestand kan de constructie (of onderdelen daarvan) een gewenste gebruiksfunctie niet langer vervullen, bijvoorbeeld door grote vervormingen. Bij overschrijding van de uiterste grenstoestand bezwijkt de constructie, bijvoorbeeld door afschuiving. In deze studie wordt uitsluitend de uiterste grenstoestand beschouwd.

Een constructie faalt als de (onzekere) belasting groter is dan de (onzekere) sterkte. Een grenstoestandfunctie of Z-functie geeft aan of de belasting groter is dan de sterkte. Als de Z-functie kleiner is dan nul, dan is de belasting groter dan de sterkte en is sprake van falen. Vaak wordt een Z-functie als volgt geschreven:

$$Z = R - S \tag{4.1}$$

waarin R de (onzekere) sterkte is en S de (onzekere) belasting. Een onzekere grootheid wordt doorgaans als een stochastische variabele gemodelleerd.

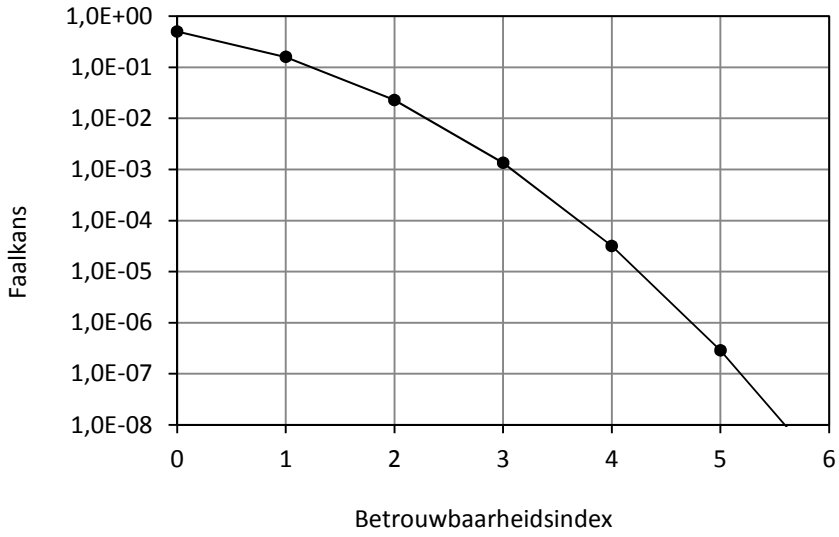
Ad. 2 Betrouwbaarheid
De betrouwbaarheid van constructies wordt normaliter uitgedrukt in termen van faalkansen. Een kleine faalkans betekent een grote betrouwbaarheid. In de praktijk wordt de betrouwbaarheid van constructies ook vaak uitgedrukt in termen van zg. betrouwbaarheidsindices (Hasofer & Lind, 1974).

Faalkansen en betrouwbaarheids-indices zijn als volgt aan elkaar gerelateerd:

$$P_f = \Phi(-\beta) \tag{4.2}$$

waarin P_f, de faalkans is, β de betrouwbaarheidsindex en $\Phi(\cdot)$ de standaard normale verdeling.

Uit vergelijking (4.2) volgt dat de relatie tussen faalkansen en betrouwbaarheidsindices sterk niet-lineair is. Een kleinere faalkans correspondeert met een grotere betrouwbaarheidsindex, zoals weergegeven in Figuur 3.



Figuur 3 De relatie tussen de betrouwbaarheidsindex en de faalkans.

Ad. 3 Referentieperiode

De referentieperiode is de periode waarop de getalswaarde van de betrouwbaarheidseis betrekking heeft. Een maximaal toelaatbare faalkans van 1/100 in een periode van 1 jaar is in de praktijk vaak een minder strenge eis dan een maximaal toelaatbare faalkans van 1/100 in een periode van 10 jaar. Alleen als alle onzekere grootheden in de tijd perfect zijn gecorreleerd, zijn beide eisen even streng. De kans op falen in een periode van 1 jaar is dan hetzelfde als de kans op falen in een periode van 10 jaar.

In de waterbouwkundige praktijk zijn er onzekere grootheden die niet of zwak in de tijd zijn gecorreleerd. Zo zijn de jaarmaxima van de waterstanden op de Noordzee onafhankelijk van elkaar (ongecorreleerd). Dit zorgt ervoor dat de kans op het falen van een waterkerende constructie in een periode van 10 jaar groter is dan in een periode van 1 jaar. Een maximaal toelaatbare faalkans van 1/100 in een periode van 10 jaar is dan dus een strengere eis dan een maximaal toelaatbare faalkans van 1/100 in een periode van 1 jaar. In hoofdstuk 6 wordt nader ingegaan op de vertaling van faalkanseisen voor referentieperiodes van een jaar naar faalkanseisen voor grotere referentieperiodes.

5 De grondslagen van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet

Het vaststellen van de hoogte van betrouwbaarheidseisen is ten principale een politieke kwestie. Ter onderbouwing van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet zijn vanuit verschillende perspectieven argumenten gegeven. Deze worden in dit hoofdstuk nader beschouwd.

In dit rapport worden de volgende definities gebruikt:

Levensduur	De periode waarin een nieuwe constructie of een versterking aan de eisen dient te voldoen of voldoet
Restlevensduur	De periode waarin een bestaande constructie nog aantoonbaar aan de eisen dient te voldoen of voldoet
Referentieperiode	De referentieperiode is de tijdseenheid van de faalkanseis.

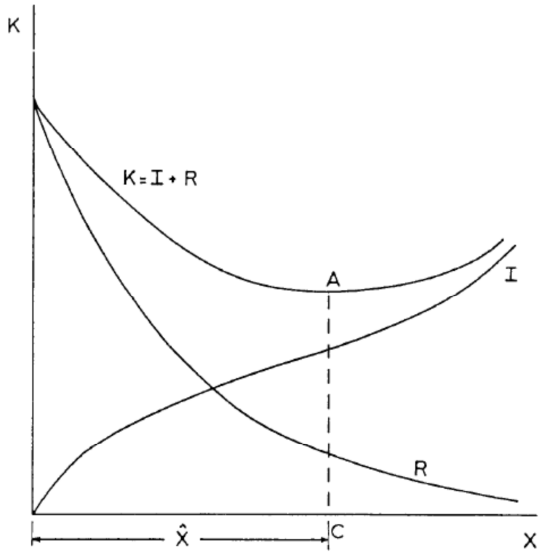
5.1 Grondslagen algemeen

Bij beoordelingen van de aanvaardbaarheid van risico's wordt doorgaans gekeken naar (Vrijling, 1998):

1. het economisch risico,
2. het groepsrisico,
3. het individueel risico.

Ad. 1 Economisch risico

In economische optimalisaties wordt gezocht naar de balans tussen de kosten van het verkleinen van het risico en de kosten van het dragen van het risico. De optimale betrouwbaarheid is de betrouwbaarheid waarbij de contante waarde van de totale kosten minimaal is.



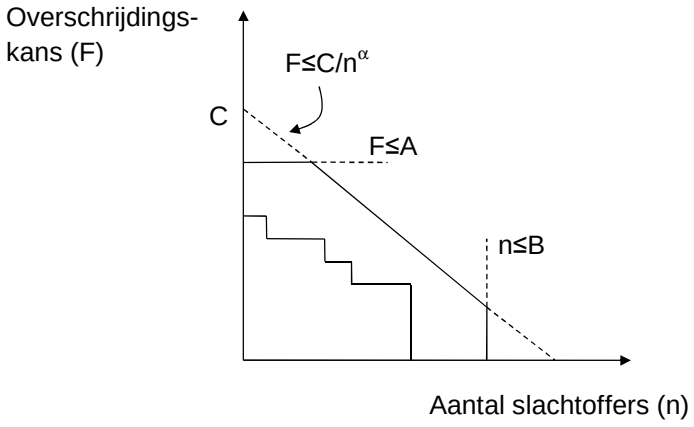
Figuur 4.3.1. Kosten K bij dijkverhoging met X meter

Figuur 4 Het basisprincipe van een economische optimalisatie. De totale kosten (K) zijn gelijk aan de kosten (I) van vergroting van de betrouwbaarheid (hier: dijkverhoging) en de contante waarde van het risico (R). Het optimum wordt gevonden waar de totale kosten (K=I+R) minimaal zijn (bron: Deltacommissie, 1960: pag. II.2-4.3).

Het basisprincipe van een economische optimalisatie is weergegeven in Figuur 4. In de kosten-batenstudies ter onderbouwing van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de nieuwe normen uit de Waterwet bestaat de schade uit de directe schade, de indirecte schade en het gemonetariseerde aantal slachtoffers. Economische optimalisaties voor nieuwe en bestaande constructies verschillen van elkaar en kunnen tot andere resultaten leiden.

Ad. 2 Groepsrisico

Als een faalkans vanuit economisch perspectief optimaal is, is het mogelijk dat de kans op een ramp met een aantal slachtoffers onaanvaardbaar wordt gevonden, ook al is het aantal slachtoffers in de kosten-batenstudie gemonetariseerd meegenomen bij de bepaling van de schade. Het groepsrisico wordt vaak weergegeven door middel van een zg. FN-curve (ook wel groepsrisicocurve genoemd), waarin de kansen op overschrijding van bepaalde slachtofferaantallen zijn weergegeven en waarbij op beide assen een logaritmische schaal gebruikt wordt. Een voorbeeld is gegeven in Figuur 5.



Figuur 5 Schematische weergave van een FN-curve en internationaal gangbare definities van een FN-criterium (schuine lijn met/zonder begrenzingen; A, B, C en α zijn constanten).

Door Jonkman et al. (2003) worden ook andere groepsrisicomaten besproken, zoals verwachtingswaarden van (niet-)lineair gewogen aantallen slachtoffers. Het groepsrisico kan op verschillende niveaus worden beschouwd, zo kan het gaan over het groepsrisico in een land of een regio, of het groepsrisico voor een bepaald object.

Ad. 3 Individueel risico

In economische optimalisaties en bij beoordelingen van het groepsrisico wordt niet gekeken naar de verdeling van het risico binnen de blootgestelde populatie. Door eisen te stellen aan de maximale blootstelling van individuen (een zg. basisveiligheidniveau) kunnen disproportioneel grote individuele risico's worden voorkomen. Veelgebruikte risicomaten zijn het plaatsgebonden risico (PR) en het lokaal individueel risico (LIR) (een goed overzicht kan worden gevonden in Jonkman et al., 2008). Het PR is de jaarlijkse overlijdenskans van een individu op één enkele locatie exclusief het effect van preventieve evacuatie. Het LIR is de jaarlijkse overlijdenskans van een individu op één enkele locatie inclusief het effect van preventieve evacuatie. Zowel het PR als het LIR zijn gebiedseigenschappen. De verblijftijd van personen per locatie wordt doorgaans niet meegenomen.

5.2 Economisch risico en optimalisatie

5.2.1 Economische optimalisatie en de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit

De betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit zijn niet direct terug te voeren op gedetailleerde economische optimalisaties. De eisen zijn veeleer gebaseerd op een grootschalige analyse van de betrouwbaarheden die horen bij in het verleden aangelegde bouwwerken. Hier is echter wel een economische gedachte in terug te vinden. De in het verleden gerealiseerde betrouwbaarheden zouden beschouwd kunnen worden als het eindresultaat van eeuwen trial and error voor honderdduizenden bouwwerken. Het eindresultaat daarvan geeft naar verwachting een goede indicatie van het economisch optimum.

In het navolgende worden de basisprincipes van een formele economische optimalisatie besproken, aan de hand van een voorbeeld. In dit voorbeeld is uitgegaan van een situatie zonder herhaalinvesteringen. Deze optimalisatie kan gezien worden als een bijzonder geval van de optimalisatie, zoals die ter onderbouwing van de normen voor de waterkeringen is uitgevoerd (met herhaalinvesteringen en een optimalisatie van de levensduur of het renovatie-interval).

In het voorbeeld hieronder is de levensduur geen variabele in de optimalisatie van de prestatie-eis aan de veiligheidsfunctie. Dat is een geschikt uitgangspunt als de optimalisatie van de prestatie-eis aan een andere, zwaarwegende functie tot een kortere optimale levensduur leidt en dus de levensduur bepaalt. Verder is aangenomen dat de faalkans per jaar constant is. Voor veel bouwwerken zullen dit redelijke aannames zijn. Zo wordt de levensduur van veel bouwwerken (zoals gebouwen en sluizen) veelal bepaald door de gebruiksfunctie en is de verandering in de belastingen (bijv. windbelasting) in de tijd doorgaans beperkt (verkeersbelastingen daargelaten).

De eis aan de veiligheidsfunctie van een bouwwerk kan economisch worden geoptimaliseerd door de contante waarde van de totale kosten (de kosten voor het verkleinen van het risico en het risico zelf) te minimaliseren. Voor de contante waarde van de totale kosten kan worden geschreven (zie ook Figuur 6):

$$K = I + R \tag{5.2.1}$$

waarin:

K	contante waarde van de totale kosten
I	totale investeringskosten
R	contante waarde van het economisch risico

In navolging van Vrouwenvelder (2012) kan vergelijking (5.2.1) als volgt worden uitgeschreven:

$$K = I_{vast} + I'x + \int_0^T P_f(x) \cdot q \cdot \mathrm{e}^{-\gamma t} dt \tag{5.2.2}$$

waarin:

I_{vast} vaste kosten
I' variabele kosten
x parameter die de sterkte van de constructie beschrijft
$P_f(x)$ faalkans per jaar (feitelijk wordt hier gedoeld op het voorwaardelijk faaltempo, di. de kans op falen in jaar i, gegeven niet gefaald in de voorgaande jaren; zie Bijlage B voor nadere toelichting)
q schade bij falen
γ discontovoet
T levensduur van de constructie

De faalkans per jaar en de gevolgen zijn in vergelijking (5.2.2) constant verondersteld (geen degradatie, belastingtoename of verandering in de schade). Dat betekent dat het economisch risico ook in de tijd constant is.

Veronderstel verder dat de relatie tussen de faalkans van de constructie en de sterkteparameter x exponentieel is (naar Vrouwenvelder, 2012):

$$P_f(x) = \mathrm{e}^{-\frac{x}{b}} \tag{5.2.3}$$

waarin:
b constante die de vorm van de exponentiële verdeling bepaalt

Een dergelijke exponentiële relatie kan worden verdedigd op basis van de veelal lineaire relatie tussen betrouwbaarheidsindices en veiligheidsfactoren. De relatie tussen betrouwbaarheidsindices en faalkansen is rond een betrouwbaarheidsindex van 3 á 4 bij benadering exponentieel (zie ook Figuur 3).

$$\frac{\partial K}{\partial x} = I' - \frac{1}{b}\mathrm{e}^{-\frac{x}{b}}\frac{q}{-\gamma}\left(\mathrm{e}^{-\gamma T} - 1\right) \tag{5.2.4}$$

Gelijkstellen aan nul geeft als optimale sterkte:

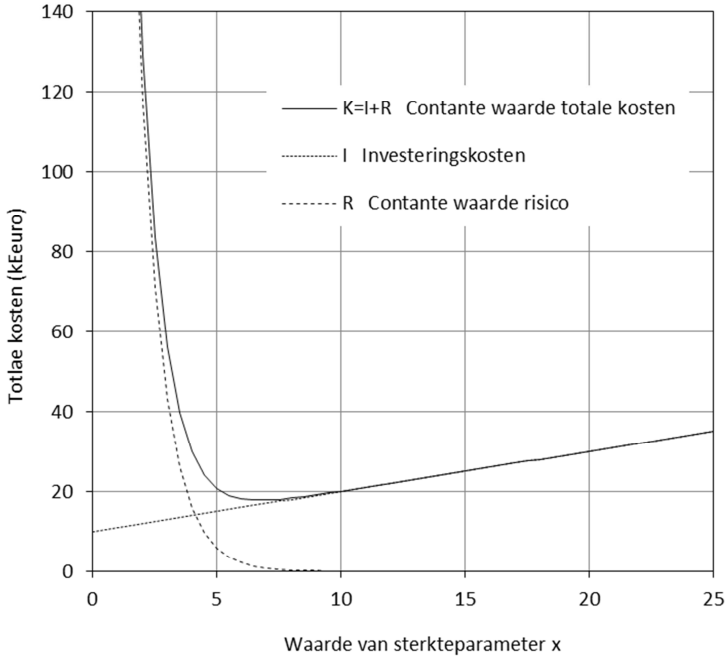
$$x = -b\ln\left(\frac{-bI'\gamma}{q\left(\mathrm{e}^{-\gamma T} - 1\right)}\right) \tag{5.2.5}$$

Door dit resultaat in te vullen in vergelijking (5.2.3) kan de bijbehorende optimale faalkans per jaar worden gevonden. Deze optimale faalkans per jaar is:

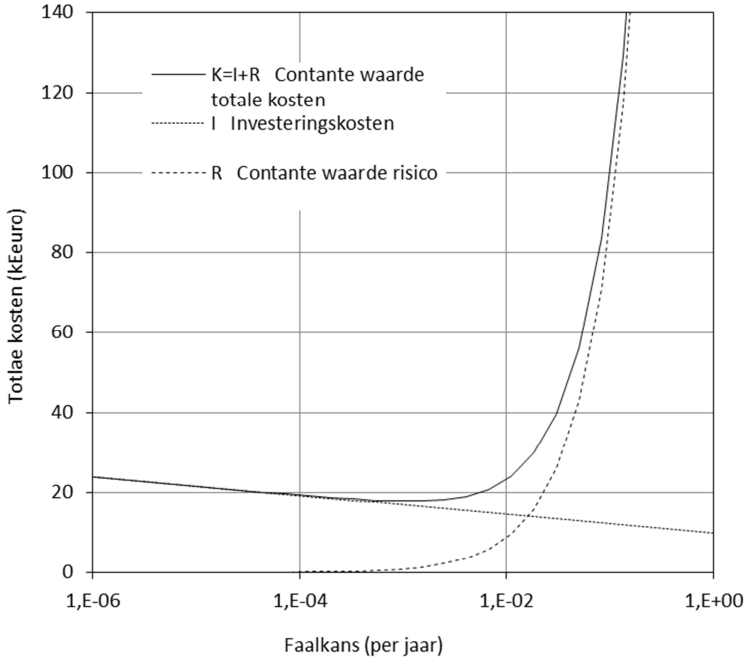
$$P_{f,opt} = \frac{-bI'\gamma}{q\left(\mathrm{e}^{-\gamma T} - 1\right)} \tag{5.2.6}$$

De relatie tussen de totale kosten en de waarde van de sterkteparameter x is weergegeven in Figuur 6, uitgaande van b=1, I_{vast}=10 kEuro, I'=1 kEuro, γ=0,02 per jaar, q=1000 kEuro en T=100 jaar (fictieve getallen). De relatie tussen de contante waarde van de totale kosten en de jaarlijkse faalkans is weergegeven in Figuur 7. Deze figuur is gemaakt op basis van de relatie tussen de sterkteparameter en de faalkans per jaar, zoals die is gegeven door vergelijking (5.2.3). Een kleinere faalkans per jaar correspondeert met een grotere sterkteparameter. Het bewerkstelligen van een kleinere faalkans per jaar gaat dus gepaard met hogere investeringskosten.

De optimale waarden van de sterkteparameter en de jaarlijkse faalkans kunnen in Figuur 6 en Figuur 7 worden gevonden waar de totale kosten minimaal zijn, rond *x*=7. Dit optimum is sterk afhankelijk van de gekozen parameterwaarden. Dit getallenvoorbeeld dient dan ook uitsluitend om het principe van de optimalisatie te verduidelijken.



Figuur 6 De relatie tussen de waarde van de sterkteparameter en de investeringskosten, de contante waarde van het risico en de contante waarde van de totale kosten. In het optimum is de contante waarde van de totale kosten minimaal.

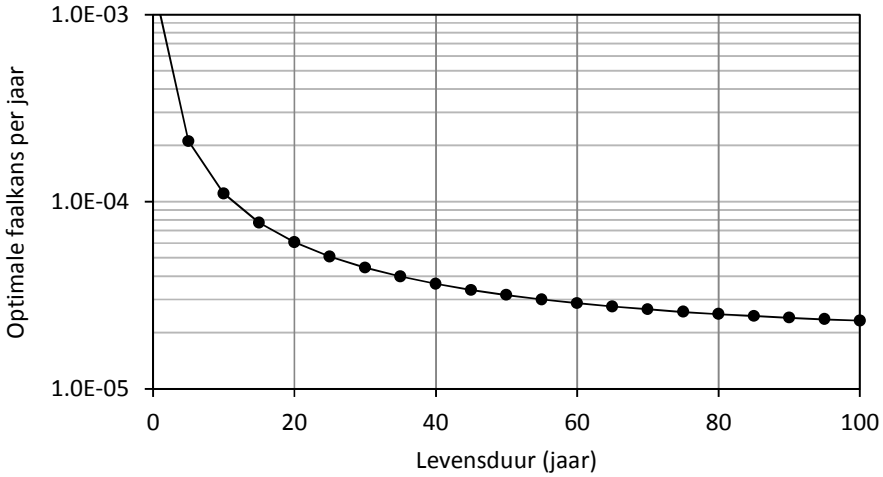


Figuur 7 Relatie tussen de totale kosten en de jaarlijkse faalkans. In het optimum is de contante waarde van de totale kosten minimaal.

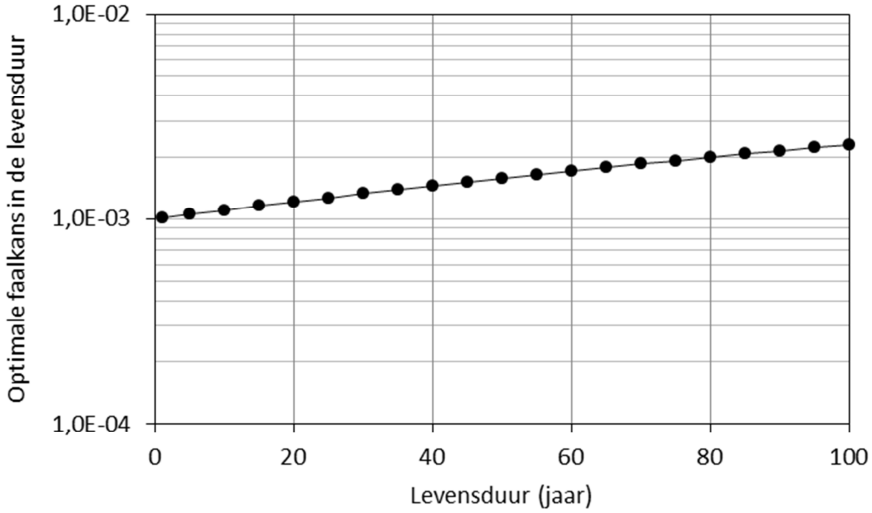
Uit Figuur 6 en Figuur 7 blijkt dat de contante waarde van totale kosten vrij ongevoelig is voor variaties van de sterkte/faalkans rond het optimum. Ook blijkt dat

het (significant) overinvesteren in veiligheid veel minder ongunstig is dan het (significant) onderinvesteren.

De optimale faalkansen zijn voor verschillende levensduren getoond in Figuur 8 en Figuur 9. De optimale faalkans in de levensduur is de kans dat de constructie ergens binnen de levensduur faalt als deze constructie economisch optimaal is ontworpen.



Figuur 8 Optimale faalkans per jaar voor de fictieve casus, voor verschillende levensduren berekend op basis van vergelijking (5.2.6).



Figuur 9 Optimale faalkans voor de gehele levensduur voor de fictieve casus, voor verschillende levensduren. De optimale faalkans voor de gehele levensduur is berekend op basis van de optimale faalkansen per jaar volgens $P_{f,n}=1-(1-P_{f,1})^n$ waarin n de levensduur in jaren voorstelt.

Uit het verschil tussen de curves en blijkt dat de optimale faalkans voor de gehele levensduur (Figuur 9) minder gevoelig is voor de gehanteerde levensduur dan de optimale faalkans per jaar (in Figuur 8). De optimale faalkans voor de gehele levensduur is bij een levensduur van 1 jaar hooguit 2x kleiner dan bij een levensduur van 80 jaar. Dit verschil wordt nauwelijks groter of kleiner bij de keuze voor (volstrekt) andere parameterwaarden dan in het voorbeeld.

Het bovenstaande betekent dat (zelfs bij onafhankelijkheid tussen de jaren) bij goede benadering kan worden uitgegaan van een maximaal toelaatbare faalkans voor de levensduur (of betrouwbaarheidsindex) waarvan de getalswaarde onafhankelijk is van de levensduur. Bij correlaties tussen de jaren zal deze benadering nog beter zijn, bij perfecte correlaties is het verschil tussen de faalkans per jaar en de faalkans voor de levensduur zelfs geheel afwezig.

Opgemerkt wordt dat de optimale faalkans in de levensduur zeer gevoelig is voor variaties van parameterwaarden. Zo leidt een 10x grotere schade tot een optimale faalkans die 10x kleiner is. Dit betekent ook dat het moeilijk is om in algemene zin/voor zeer uiteenlopende bouwwerken nauwkeurige uitspraken te doen over het economisch optimale betrouwbaarheidsniveau. De eigenschappen van de bouwwerken die binnen elke Consequence Class (uit NEN-EN 1990) vallen zijn immers zeer divers. De schades bij het instorten van een stadion of hoogbouw kunnen immers heel verschillend zijn, net zoals de variabele kosten om het risico te verkleinen. De voorgaande afleidingen tonen echter wel het volgende:

1. Als de schade bij het falen van een bouwwerk relatief groot is, dan zal het economisch optimaal zijn om relatief zware betrouwbaarheidseisen te stellen. Dit algemene principe is ook terug te zien in de consequence classes: aan eengezinswoningen (CC1) worden minder zware eisen gesteld dan aan hoogbouw (CC3).
2. Als er onduidelijkheid is over de betrouwbaarheidseis die gesteld moet worden, dan is het doelmatig om aan de veilige kant te gaan zitten. Het regret van onderinvesteren is namelijk aanzienlijk groter dan het regret van overinvesteren. Dit gegeven is ook terug te zien in de toewijzing van bouwwerken aan consequence classes: de betrouwbaarheidseis bij een consequence class zal voor de meeste bouwwerken binnen deze consequence class eerder te streng dan te soepel zijn.

Het Bouwbesluit noemt ook betrouwbaarheidseisen voor verbouwing en afkeuring.

1. Bij verbouwing zijn de variabele kosten doorgaans hoger dan bij nieuwbouw. Zo zijn de variabele kosten bij het toepassen van extra wapening meestal hoger als dit later moet worden gedaan. Uit vergelijking (5.2.6) volgt direct dat de optimale faalkans groter wordt naarmate de variabele kosten hoger zijn. De optimale betrouwbaarheidseis bij verbouw is dus ook lager dan bij nieuwbouw. Dit komt ook tot uitdrukking in de eisen bij het Bouwbesluit.
2. Bij het bepalen van de economische optimale betrouwbaarheid van nieuwbouw spelen de vaste kosten geen rol, zie ook vergelijking (5.2.6). Als eenmaal is besloten tot nieuwbouw zijn namelijk alleen de variabele kosten nog van belang. Voordat wordt besloten tot nieuwbouw zijn de vaste kosten echter wel van belang. Het besluit om een constructie af te keuren en te vervangen is pas optimaal als de contante waarde van het risico zonder ingreep groter is dan de som van de kosten van een ingreep plus de contante waarde van het risico na nieuwbouw. Ter illustratie: stel dat de contante waarde van het risico achter een oude zeesluis 100 miljoen euro bedraagt en dat deze contante waarde met een factor 1000 kan worden verkleind door een nieuwe zeesluis aan te leggen, voor een bedrag van 500 miljoen euro. De totale kosten bij het handhaven van de oude sluis zijn dan duidelijk lager dan bij vervanging. De optimale faalkans waarbij een bouwwerk wordt afgekeurd kan, in een puur economische beschouwing, vanwege de vaste kosten, vele malen groter zijn dan de optimale faalkans bij nieuwbouw of verbouwing.

5.2.2 Economische optimalisatie en de betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet

Ter onderbouwing van de nieuwe normen voor de primaire waterkeringen is een maatschappelijke kosten-batenanalyse (MKBA) uitgevoerd (Kind et al., 2011), gebruik makend van een geavanceerde optimalisatieprocedure die door het CPB is ontwikkeld. In de MKBA wordt uitsluitend de veiligheidsfunctie van de waterkeringen beschouwd. In de optimalisatie spelen twee aan elkaar gerelateerde aspecten een rol: de omvang en de timing van investeringen. Bij een grotere investering kan een herhaalinvestering langer worden uitgesteld. De tijdsintervallen tussen de investeringen zijn dus variabelen in de optimalisatie. In de optimalisatieprocedure wordt de optimale investeringsstrategie voor een oneindige tijdhorizon bepaald, d.w.z. de strategie die de contante waarde van de totale kosten (investeringskosten en risico) minimaliseert. Op basis van dit tijdverloop zijn maximaal toelaatbare faalkansen voor toetsing en ontwerp af te leiden (zie Figuur 11).

De uitgangspunten die ten grondslag liggen aan de optimalisatieprocedure die in deze paragraaf wordt besproken, wijken als volgt af van de uitgangspunten waarop de optimalisatieprocedure uit paragraaf 5.2.1 berust:

1. De levensduur van versterkingen is een expliciete variabele in de economische optimalisatie
2. De faalkans neemt in de tijd toe, bijv. door zeespiegelstijging en bodemdaling
3. De potentiële schade neemt in de tijd toe door economische groei

Het vinden van de optimale investeringsstrategie is zeer complex, een analytische oplossing is alleen voor bijzondere gevallen voorhanden. Voor de bepaling van optimale investeringsstrategieën is het programma OptimaliseRing ontwikkeld (Duits et al., 2011). In dit programma wordt rekening gehouden met het feit dat een normtraject uit delen kan bestaan waarvoor de kostenfuncties (relaties tussen investeringskosten en faalkans) verschillend zijn. Het voert te ver om het wiskundig model en de optimalisatieprocedure in detail te bespreken. Daarom worden in het onderstaande alleen de basisprincipes toegelicht.

Voor de contante waarde van de kosten (K) van een reeks herhaalinvesteringen en het bijbehorende overstromingsrisico kan worden geschreven (zie ook Figuur 4):

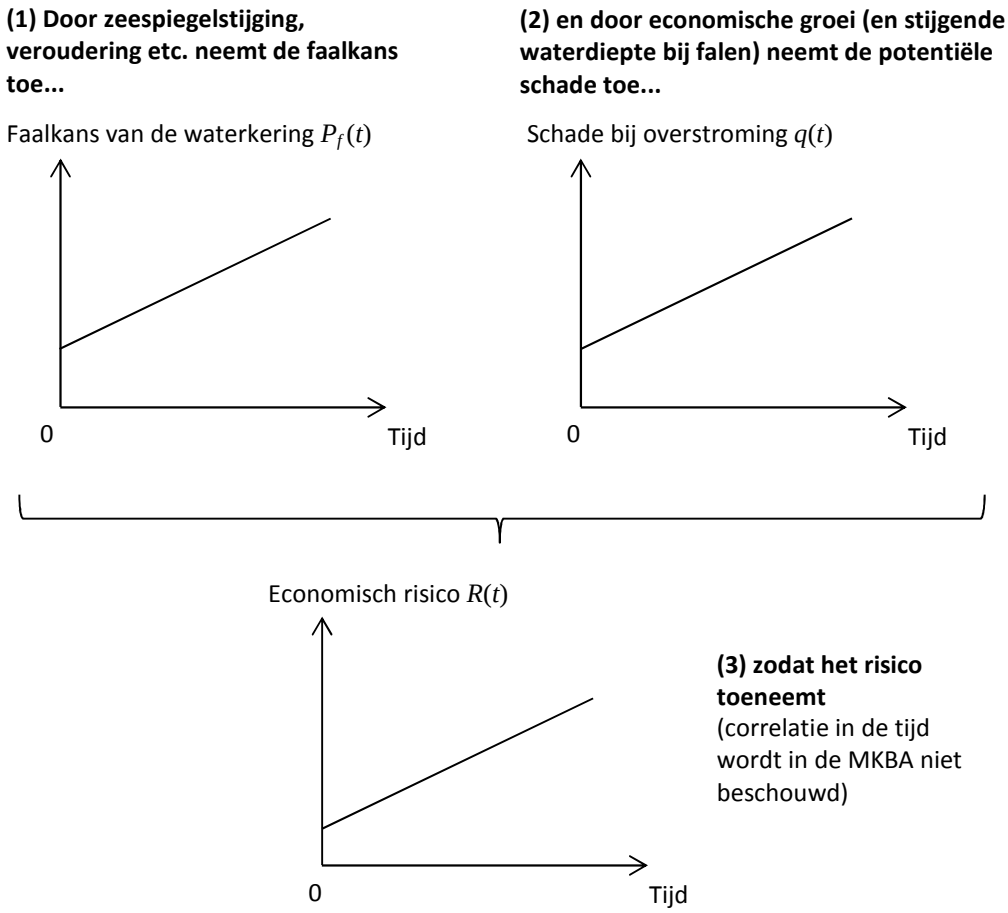
$$K = \left\{ \sum \frac{I_i}{(1+\gamma)^{T_i}} \right\} + \left\{ \int_0^\infty P_f(x,t) \cdot q(t) \cdot e^{-\gamma t} dt \right\} \qquad (5.2.7)$$

waarin:

I_i omvang van de i-de investering
T_i tijdstip waarop de i-de investering wordt uitgevoerd
$P_f(x,t)$ faalkans per jaar op tijdstip t als functie van een sterkteparameter x. Feitelijk wordt hier het voorwaardelijk faaltempo bedoeld (zie Bijlage B)
$q(t)$ schade bij falen op tijdstip t
γ discontovoet

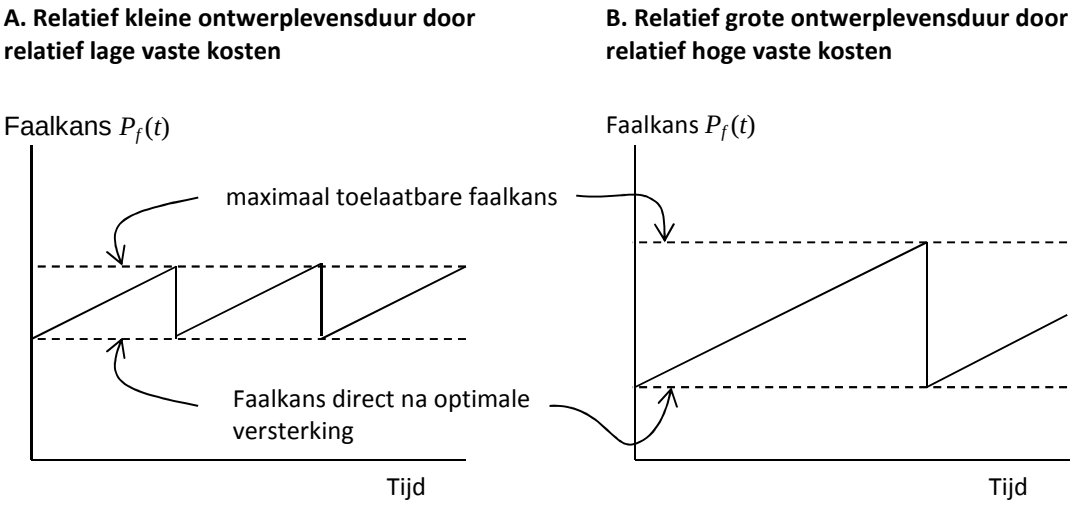
In de MKBA speelt tijdsafhankelijkheid een belangrijke rol. Ten gevolge van zeespiegelstijging, stijgende rivierafvoeren, zettingen e.d. worden de faalkansen van waterkeringen geleidelijk groter. Door economische groei worden de gevolgen van overstromingen steeds groter. Beide aspecten leiden ertoe dat het risico in de

tijd toeneemt. Dit is weergegeven in Figuur 10. Net zoals in de optimalisatie uit paragraaf 5.2.1 zijn correlaties in de tijd niet meegenomen in de MKBA.



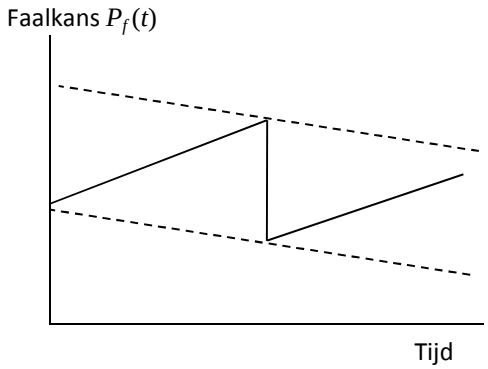
Figuur 10 Door de tijdafhankelijkheid van de belastingen en de gevolgen neemt het risico in de tijd toe, tenzij de kering wordt versterkt (verticale as op logaritmische schaal zodat de tijdverlopen door rechte lijnen kunnen worden weergegeven).

Als het risico in de tijd toeneemt, dan is het economisch optimaal om na verloop van tijd een versterking uit te voeren of een herhaalinvestering te doen. De faalkans en dus ook het risico nemen na iedere herhaalinvestering plotseling sterk af. De optimale tijdsintervallen tussen herhaalinvesteringen (de levensduren van versterkingen) zijn groter als het risico minder snel in de tijd stijgt en/of de vaste kosten van versterkingen groter zijn.
Bij een grotere ontwerplevensduur liggen de optimale faalkansen in het eerste en het laatste levensjaar verder uiteen. Dit is weergegeven in Figuur 11. In de figuur is getoond hoe de optimale faalkans zich in de tijd ontwikkelt: deze wordt steeds groter door bijv. zeespiegelstijging totdat het optimaal wordt om de kering weer te versterken. Deze opeenvolging van ontwerp en afkeuring leidt tot een zaagtandpatroon.



Figuur 11 De economisch optimale faalkans als functie van de tijd voor een geval waarin de vaste kosten relatief klein zijn (A) en een geval waarin de vaste kosten relatief groot zijn (B) (verticale as op logaritmische schaal).

Wanneer de gevolgschade in de tijd toeneemt (b.v. door economische groei), zullen de optimale eisen aan waterkeringen geleidelijk strenger worden. De optimale faalkansen in het eerste en laatste levensjaar van een toekomstig ontwerp zullen dus kleiner zijn dan die van een huidig ontwerp. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 12.



Figuur 12. De economisch optimale faalkans als functie van de tijd voor een geval waarin de schade in de tijd toeneemt (verticale as op logaritmische schaal).

Als het risico in de tijd constant zou zijn, dan hoefden herhaalinvesteringen niet beschouwd te worden in een economische optimalisatie (dit verklaart ook waarom herhaalinvesteringen en zaagtandpatronen in de voorgaande paragraaf niet aan bod zijn gekomen). Als het risico in de tijd constant is en de ontwerplevensduur niet gedicteerd wordt door andere functies dan de veiligheidsfunctie, dan gaat de optimale ontwerplevensduur naar oneindig. Dit is als volgt in te zien. Stel dat het risico werd verzekerd, dan zou de verzekeringspremie elk jaar hetzelfde zijn. Er zou dan nooit een moment aanbreken waarop de verzekeringspremie zo hoog zou worden dat een vervolginvestering rendabel zou zijn. Zonder tijdsafhankelijkheid zou er geen reden zijn waarom de verzekeringspremie in een later levensjaar kleiner zou moeten zijn dan in een eerder levensjaar.

Zonder tijdsafhankelijkheid gaat vergelijking (5.2.7) over in:

$$K = I_1 + \int_0^\infty P_f(x) \cdot q \cdot \mathrm{e}^{-\gamma t} dt \tag{5.2.8}$$

Stel dat de waterstandverdeling kan worden benaderd door een exponentiële kansverdeling en dat de waterkering faalt als de kerende hoogte wordt overschreden. Voor de (constante) faalkans per jaar kan dan worden geschreven:

$$P_f(h) = \mathrm{e}^{-\frac{h-a}{b}} \tag{5.2.9}$$

waarin *a* en *b* parameters zijn die de vorm van de exponentiële verdeling beschrijven. De parameter *b* is direct gerelateerd aan de decimeringhoogte: *b*=decimeringhoogte/ln(10).

Stel verder dat de investeringskosten kunnen worden ontleed in een vast en een variabel deel (resp. $I_{1,vast}$ en I_1'), waarbij de variabele kosten lineair afhankelijk zijn van de kerende hoogte. Vergelijking (5.2.5) kan dan als volgt worden uitgeschreven:

$$K = I_{1,vast} + I_1' \cdot h + \int_0^\infty \mathrm{e}^{-\frac{h-a}{b}} \cdot q \cdot \mathrm{e}^{-\gamma t} dt \tag{5.2.10}$$

Differentiëren naar de kerende hoogte (*h*) geeft:

$$\frac{\partial K}{\partial h} = I_1' - \frac{q}{-\gamma b} \mathrm{e}^{-\frac{h-a}{b}} \tag{5.2.11}$$

Gelijkstellen aan nul geeft als optimale kerende hoogte:

$$h = a - b \ln\left(\frac{\gamma b I_1'}{q}\right) \tag{5.2.12}$$

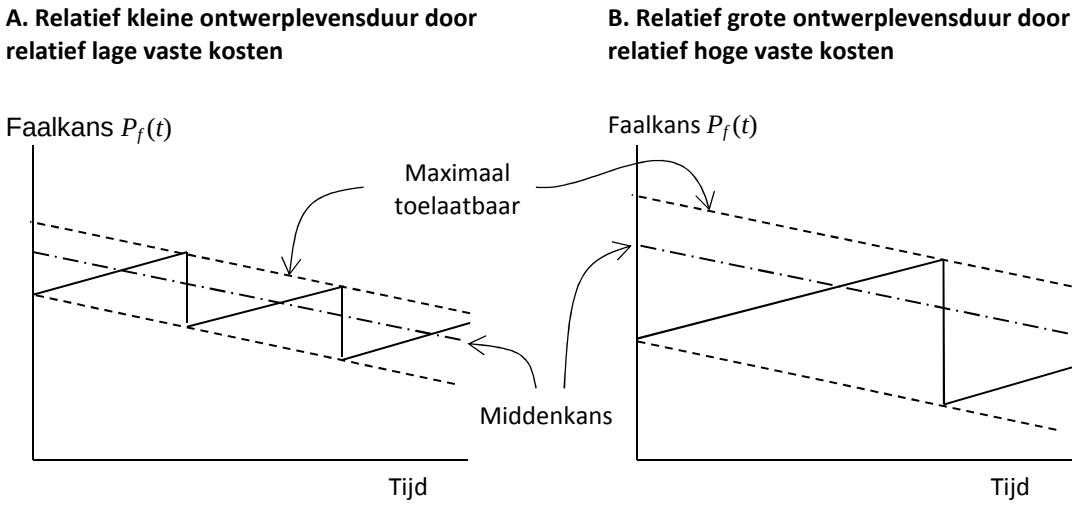
Door dit resultaat in te vullen in vergelijking (5.2.9) kan de bijbehorende optimale jaarlijkse faalkans worden gevonden. Deze is:

$$P_{f,opt} = \frac{\gamma b I_1'}{q} \tag{5.2.13}$$

Dit resultaat lijkt sterk op het resultaat dat is verkregen bij de optimalisatie van de betrouwbaarheidseisen bij het Bouwbesluit (paragraaf 5.2.1). Wanneer in vergelijking (5.2.6) (=optimale faalkans per jaar volgens bouwbesluit) wordt aangenomen dat de ontwerplevensduur naar oneindig gaat ($T \rightarrow \infty$), dan wordt precies hetzelfde resultaat verkregen.
Omdat in werkelijkheid sprake is van tijdsafhankelijkheden, kunnen de optimale normen niet volgens vergelijking (5.2.13) berekend worden. Het eerder genoemde programma Optimalisering maakt het mogelijk om voor elk onderdeel van elk normtraject optimale investeringspaden te bepalen, en dus ook optimale toets- en ontwerpeisen, rekening houdend met de lokale omstandigheden (ruimte voor grondoplossingen, versterkingskosten, decimeringhoogte, gevolgschade etc.).

Vanwege het zaagtandverloop van de optimale faalkans is door het CPB voorgesteld om de normen te baseren op de middenkans, een meer stabiele economische maat. De middenkans voor een tijdstip *t* is gedefinieerd als het gemiddelde van de verwachte schade gedurende een optimale levensduur, gedeeld door de schade op het tijdstip *t* (Eijgenraam, 2006; 2008). Als praktische benadering, vanwege de mogelijkheid dat er op tijdstip *t*=0 geen investering plaatsvindt, is voorgesteld om de middenkans te berekenen door het logaritmisch gemiddelde van de schade direct voor en na de investering aan het einde van de (rest)levensduur te delen door de schade op tijdstip *t*.

De middenkans ligt tussen de optimale faalkansen in het eerste en het laatste jaar van de optimale levensduur in (Figuur 13). Wanneer de faalkans gelijk is aan de middenkans kan het nog een tiental jaren duren voordat de maximaal toelaatbare faalkans wordt bereikt (CPB, 2008). De middenkans wordt daarom vaak gepresenteerd als een anticiperende norm/signaalwaarde. Een dergelijke norm mag nog enige tijd overschreden worden voordat de daadwerkelijk maximaal toelaatbare faalkans wordt bereikt.



Figuur 13. Illustratie van de betekenis van de middenkans. Bij relatief hoge vaste kosten duurt het langer voordat de maximaal toelaatbare faalkans wordt overschreden na een overschrijding van de middenkans.

De middenkansen zijn berekend voor het zichtjaar 2050. Dit is uiteindelijk gedaan met een zeer eenvoudige benaderingsformule die ook wel de “directe methode” wordt genoemd:

$$Norm = P_{2050}^{midden} = \frac{1}{38}\frac{I_{10}}{q(2050)} \qquad (5.2.14)$$

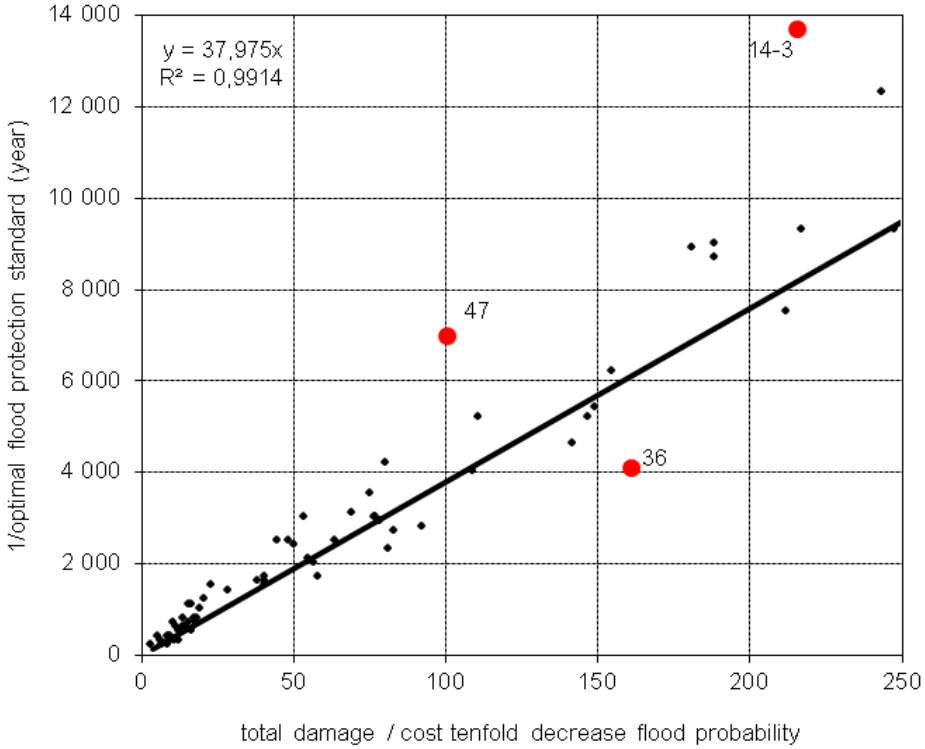
waarin:

P_{2050}^{midden} Middenkans (kans op jaarbasis) voor het jaar 2050

I_{10} Variabele kosten van een verkleining van de overstromingskans met een factor 10 (in de MKBA, waarin alleen de belasting onzeker is verondersteld, zijn dit de kosten voor een dijkverhoging met 1 decimeringhoogte)

$q(2050)$ Schade in het jaar 2050

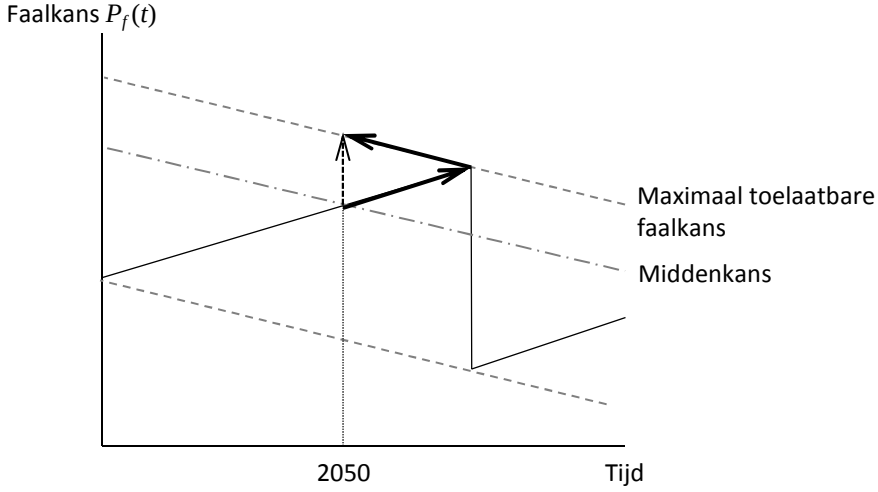
Vergelijking (5.2.14) is weinig anders dan het resultaat van een least squares fit op een aantal berekeningen van de middenkans (Figuur 14).



Figuur 14. Verband tussen midddenkans (verticale as) en benaderingsformule (5.2.14) op basis van Kind (2013), uit het Bijlagenrapport van de Technisch Inhoudelijke Uitwerking van het Deelprogramma Veiligheid. De rode punten zijn outliers.

De reden dat in vergelijking (5.2.14) de middenkans voor 2050 staat, is dat in de normeringsdiscussie het jaartal 2050 als zichtjaar is aangehouden. Door economische groei (waardevermeerdering) en bevolkingsgroei nemen de potentiële schade en het potentieel aantal slachtoffers in de tijd toe. Dit betekent dat het economisch optimale beschermingsniveau steeds hoger wordt. Omdat de norm een lange periode gebruikt zal worden, is besloten om bij de normstelling uit te gaan van de schade en het aantal slachtoffers voor het zichtjaar 2050.

Zowel door de toename van de faalkans in de tijd (stijging doorgetrokken lijn) als door de toename van de schade in de tijd (daling stippellijn) wordt een verschil tussen de middenkans voor 2050 en de maximaal toelaatbare faalkans voor 2050 geïntroduceerd. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 15. De middenkans voor het zichtjaar 2050 (berekend in een economische optimalisatie) zal doorgaans kunnen worden vertaald naar een maximaal toelaatbare overstromingskans voor datzelfde zichtjaar door de eerder genoemde middenkans met een factor ongeveer gelijk aan 3 te vermenigvuldigen. Uit een werkelijke berekening van de verschilfactor zouden overigens ook of kleinere of juist grotere waarden kunnen volgen. Zo zal de verschilfactor relatief groot zijn bij normtrajecten waar de vaste kosten relatief groot zijn. Daarnaast zijn er normtrajecten met relatief lage vaste kosten (bijv. zandige kust) waar de middenkans voor het jaar 2050 gelijk is aan de maximaal toelaatbare faalkans voor het jaar 2050.



Figuur 15. Van de middenkans voor 2050 naar de maximaal toelaatbare faalkans voor 2050 in twee stappen.

De betekenis van de norm (anticiperend of maximaal toelaatbaar) staat momenteel nog ter discussie. In het concept-wetsontwerp (april 2015) zijn signaalwaarden opgenomen evenals een artikel om deze om te rekenen naar maximaal toelaatbare waarden. Dit is een verwarrende situatie.

In paragraaf 6.2 wordt nader ingegaan op de praktische consequenties voor de toetsing en het ontwerp van primaire waterkeringen als de normen niet de betekenis van maximaal toelaatbare faalkansen bezitten, maar die van signaalwaarden.

5.2.3 *Belangrijkste overeenkomsten en verschillen economische optimalisatie*

Bij de bepaling van de optimale normen voor de primaire waterkeringen is gebruik gemaakt van locatiespecifieke kosten- en schadegegevens. Bij bouwwerken is dit niet het geval. Daar zijn veeleer de algemene principes van een economische optimalisatie terug te vinden in de betrouwbaarheidseisen, die op grote groepen bouwwerken van toepassing zijn.

De betrouwbaarheidseisen voor de waterkeringen vanuit economisch perspectief zijn direct terug te voeren op berekeningen (met een benaderingsformule voor de middenkans). Bij de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit is zowel gekeken naar economische optimalisaties en individueel risico als naar grootschalige analyses van de betrouwbaarheid van in het verleden ontworpen bouwwerken.

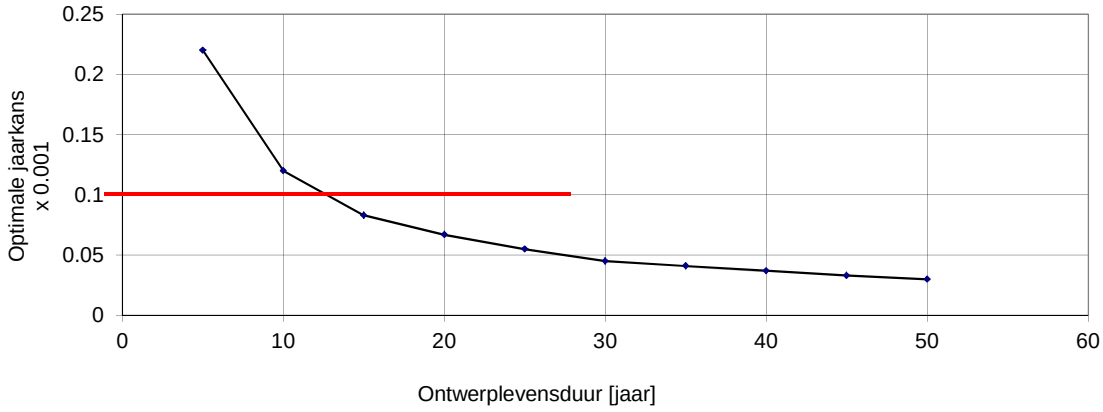
Het Bouwbesluit maakt expliciet onderscheid tussen betrouwbaarheidseisen voor nieuwbouw, verbouw en afkeur. De Waterwet doet dat niet en geeft steeds slechts één normgetal dat zowel bij toetsing als ontwerp gebruikt wordt. Waterkeringen worden zodanig ontworpen dat ze in hun laatste levensjaar aan de norm zullen voldoen, rekening houdend met o.a. zeespiegelstijging en veroudering (zie paragraaf 6.2 voor meer details).

5.3 Individueel risico

5.3.1 *Individueel risico en de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit*

Als de betrouwbaarheid in de levensduur onafhankelijk is van de ontwerplevensduur (bij een vaste betrouwbaarheidseis voor elke levensduur, zie paragraaf 5.2.1) zal de faalkans per jaar groter zijn als de levensduur korter is. Vanuit economisch perspectief is dit te rechtvaardigen, maar vanuit het perspectief van de menselijke veiligheid zou dit als onacceptabel gezien kunnen worden als er mensenlevens in het geding zijn, niettegenstaande dat mensenlevens (in geld uitgedrukt) meegenomen zijn in de schade.

Om disproportionele blootstellingen van individuen te voorkomen ligt het in de rede om een limiet te stellen aan de jaarlijkse faalkans, bijvoorbeeld 10^{-4} per jaar. Bij een mortaliteit van bijvoorbeeld 10% komt dit overeen met een individueel risico van 10^{-5} per jaar. Dit leidt tot de situatie in Figuur 16. De rode lijn geeft de waarde van de geaccepteerde jaarlijkse faalkans weer (elk jaar dezelfde eis); de zwarte lijn geeft de economisch optimale jaarkansen (zie ook Figuur 8). Het blijkt dat in het individueel risico dominant wordt voor kleinere ontwerplevensduren (in dit geval voor n < 12 jaar).



Figuur 16. Optimale jaarlijkse faalkans en argumenten voor menselijke veiligheid.

Bij de afleiding van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit is uitgegaan van een grenswaarde voor het individueel risico van 10^{-5} per jaar en een mortaliteit zoals beschreven in paragraaf 6.1. De mogelijkheden voor preventieve evacuatie worden niet meegenomen. Zo beschouwd gaat het om een eis ten aanzien van het plaatsgebonden risico (zie ook de definities in paragraaf 7.1).

5.3.2 *Individueel risico en de betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet*

Bij de vaststelling van de nieuwe normen wordt uitgegaan van een basisveiligheidsniveau. De faalkans van elk normtraject dient steeds zodanig te zijn dat het lokaal individueel risico (LIR) overal in beschermd gebied kleiner is dan 10^{-5} per jaar. Er is voor deze grenswaarde gekozen omdat een strengere grenswaarde relatief kostbaar zou zijn (Ministerie I&M en Ministerie EZ, 2014). Soms kunnen de eisen aan de waterkeringen worden verzacht door maatregelen te treffen in de sfeer van de ruimtelijke ordening en/of de rampenbestrijding. Dat is echter alleen in enkele uitzonderingsgevallen doelmatig.

De LIR-eis van 10^{-5} per jaar is bij de ontwikkeling van de normering steeds aangescherpt tot een eis van $0{,}5.10^{-5}$ per jaar om te zorgen voor betrouwbaarheidseisen met een anticiperend karakter, net zoals de middenkansen een anticiperend karakter bezitten (zie paragraaf 5.3.2). Deze verschilfactor is bij alle normtrajecten gehanteerd, ook al had dit bij de zandige kust niet gehoeven: de middenkans is daar gelijk aan de maximaal toelaatbare faalkans.

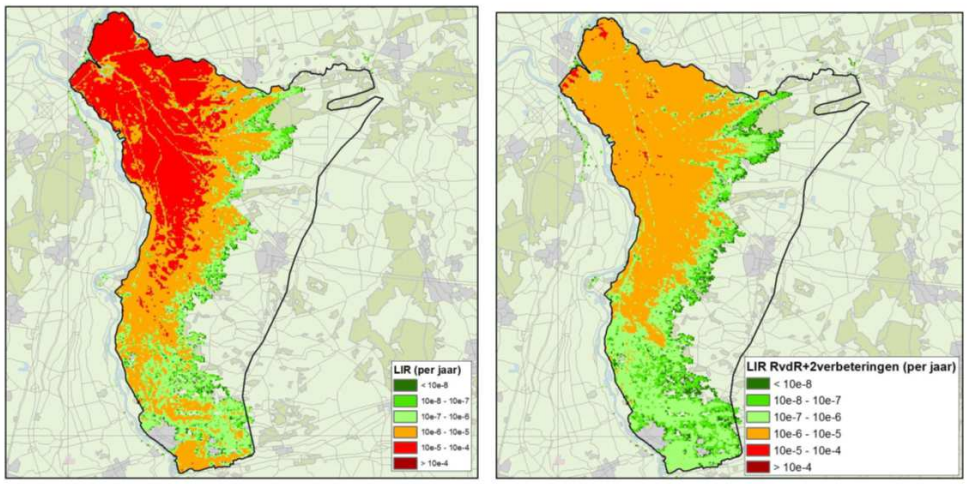
Het lokaal individueel risico (LIR) is gedefinieerd als de kans dat een persoon die continu op een bepaalde locatie aanwezig is (tot een dijkdoorbraak) door een overstroming komt te overlijden, tenzij deze persoon preventief is geëvacueerd. Het LIR wordt als volgt berekend (naar Thonus & Jongejan, 2009):

$$LIR(x,y) = \sum_{i=1}^{n} p_d(c_i(x,y)) \cdot p_i \cdot E(f_i(x,y)) \qquad (5.3.1)$$

waarin:

$LIR(x,y)$	lokaal individueel risico op locatie (x,y)
$p_d\ (c_i(x,y))$	overlijdenskans op locatie (x,y)bij het effect c (combinatie van maximale waterdiepte, stroomsnelheid, stijgsnelheid) ten gevolge van scenario i
p_i	kans op overstromingsscenario i.
$E(f_i)$	verwachtingswaarde van de evacuatiefractie op locatie (x,y) horend bij overstromingsscenario i.

In Figuur 17 is een voorbeeld gegeven van het resultaat van een LIR-berekening uit het project VNK2. Het voorbeeld betreft Salland (dijkring 53). Links is het LIR in de uitgangssituatie getoond. Rechts is het LIR getoond nadat maatregelen zijn getroffen om het LIR praktisch overal kleiner dan 10^{-5} per jaar te krijgen. De rechter figuur toont dat het LIR in grote delen van het dijkringgebied fors kleiner is dan 10^{-5} per jaar als aan de eis ten aanzien van het LIR is voldaan. Dit komt doordat de maximale waterdieptes, stroomsnelheden en stijgsnelheden vaak sterk locatieafhankelijk zijn.



Figuur 17. Voorbeeld van het LIR in de uitgangssituatie (links) en het LIR teruggebracht tot kleiner dan 10^{-5} per jaar door versterkingen en Ruimte voor de Rivier-maatregelen (rechts). Voorbeeld uit VNK2, dijkring 53.

Bij het vaststellen van de normen is niet direct gebruik gemaakt van de gedetailleerde LIR-berekeningen uit VNK2 maar is met een benaderingsmethode gewerkt. Daarbij zijn eerst de mortaliteitsgrids horend bij de overstromingsberekeningen voor de verschillende breslocaties binnen een normtraject samengevoegd volgens een vaste procedure. Op basis van het samengevoegde mortaliteitsgrid zijn de normhoogtes afgeleid waarbij wordt voldaan aan de LIR-eis. Daarbij is rekening gehouden met de eventuele gedeeltelijke overlap in het getroffen gebied als vanuit verschillende normtrajecten dezelfde locaties getroffen kunnen worden door een overstroming.

5.3.3 Belangrijkste overeenkomsten en verschillen omgang met individueel risico

Zowel bij de afleiding van de eisen uit het Bouwbesluit als bij de afleiding van de nieuwe overstromingskansnormen is uitgegaan van een maximaal individueel risico van 10^{-5} per jaar. In beide gevallen is bij de berekening van het individueel risico geen rekening gehouden met verblijftijden: personen worden geacht continu aanwezig te zijn.
Bij bijvoorbeeld bruggen kan dit overigens tot vreemde uitkomsten leiden; hier wordt verder niet op ingegaan, hier lopen afzonderlijke studies voor.

Bij het Bouwbesluit is bij de berekening van het individueel risico geen rekening gehouden met de kans op een succesvolle preventieve evacuatie (“plaatsgebonden risico). Dat is wel gedaan bij de berekeningen ter onderbouwing van de nieuwe overstromingskansnormen (“lokaal individueel risico”).

5.4 Groepsrisico

5.4.1 Groepsrisico en de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit

In NEN-EN 1990 is het groepsrisico niet expliciet beschouwd en beoordeeld met een groepsrisicocriterium. Eisen met betrekking tot het groepsrisico worden beschouwd in de keuze van de gevolgklasse verdisconteerd te zijn. In de beschrijvingen van de gevolgklassen komt het potentiële aantal slachtoffers ook steeds duidelijk terug (zie Tabel 4).

ISO 2394, die richtlijnen bevat voor het ontwerp van constructies, bevat ook een suggestie ten aanzien van de aanvaardbaarheid van het groepsrisico. Met betrekking tot de eisen aan het groepsrisico wordt in ISO 2394 aangegeven dat autoriteiten ongelukken wensen te vermijden waar grote aantallen mensen slachtoffer kunnen worden. Hierbij wordt de volgende maximale jaarlijkse faalkans gehanteerd:

$$P_f \leq A \cdot E\left(N \middle| F\right)^{-a} \qquad (5.4.1)$$

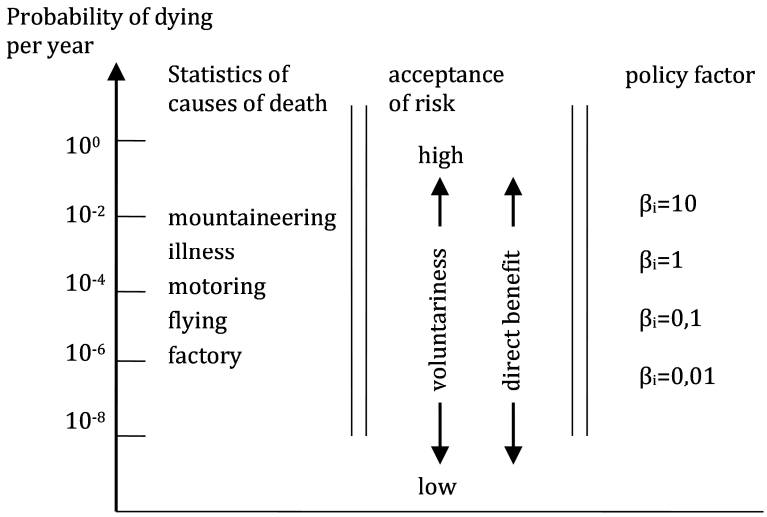
waarin:

$E(N\|F)$	is het verwachte aantal slachtoffers gegeven falen
A	is 0,01 of 0,1 (Nederland hanteert 0,01)
a	is 2

Hoewel vergelijking (5.4.1) lijkt op een FN-criterium zoals getoond in Figuur 5 is dit niet het geval. Zo staat in het linker lid niet de overschrijdingskans van een bepaald aantal slachtoffers maar de faalkans. Vergelijking (5.4.1) is alleen vergelijkbaar met een FN-criterium als er het aantal slachtoffers bij falen weinig variabel is.

5.4.2 Groepsrisico en de betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet

Bij de onderbouwing van de nieuwe normen wordt gekeken naar het groepsrisico. Bij de beoordeling van het groepsrisico wordt uitgegaan van het TAW-beoordelingskader uit 1985 (de TAW is de voorganger van het ENW). Dit stelt dat het groepsrisico primair op nationaal niveau dient te worden beoordeeld. De gedachte hierachter is dat het groepsrisico gaat over de kans op een ramp die in het gehele land tot grote maatschappelijke onrust leidt, ongeacht waar deze plaatsvindt. Het ENW-beoordelingskader berust op een vergelijking van de risico's in verschillende domeinen. Voor de overbrugging van de verschillen is een zogenaamde beleidsfactor geïntroduceerd (deze heet β maar moet niet verward worden met een betrouwbaarheidsindex). Deze beleidsfactor is afhankelijk van de mate van vrijwilligheid van de blootstelling aan het risico en de directe baten bij de risicovolle activiteit (Figuur 18).



Figuur 18. Waarden van de beleidsfactor (Vrijling et al., 1998).

Het ENW-beoordelingskader levert zowel een individueel risicocriterium als een groepsrisicocriterium.
Als maximaal individueel risico is voorgesteld:

$$P_{fi} < \frac{\beta \cdot 10^{-4}}{P_{d|fi}} \tag{5.4.1}$$

waarin:

P_{fi}	Maximaal toelaatbare overlijdenskans van een individu
β	Beleidsfactor (zie Figuur 18)
$P_{d\|fi}$	Kans op overlijden gegeven een ongeval

Voor het groepsrisico op nationaal niveau is het volgende criterium voorgesteld:

$$E(N) + k\sigma < \beta \cdot 100 \tag{5.4.2}$$

waarin:

$E(N)$	Verwachtingswaarde van het jaarlijkse aantal slachtoffers
σ	Standaardafwijking van het jaarlijkse aantal slachtoffers
k	Constante (k=3 volgens TAW, 1985)

Uitgaande van een FN-criterium van de vorm $P(N \geq n) = C/n^2$ en een Bernoulli-verdeling voor het aantal slachtoffers per locatie waar de risicovolle activiteit wordt uitgeoefend kan de voorwaarde uit vergelijking (5.4.2) worden benaderd door:

$$P(N \geq n) < \frac{\left(\frac{\beta \cdot 100}{k \cdot \sqrt{A}}\right)^2}{n^2} \qquad (5.4.3)$$

waarin:

A Aantal locaties waar de activiteit wordt ontplooid

Het bovengenoemde raamwerk heeft enige richting gegeven aan de discussie over het groepsrisico bij het vaststellen van de nieuwe overstromingskansnormen. Wanneer wordt voldaan aan de strengste van de betrouwbaarheidseisen die volgen uit de MKBA en LIR<10^{-5} per jaar blijkt het groepsrisico op landelijk niveau (voor alle dijkringgebieden samen) te voldoen aan het TAW-beoordelingskader bij β=1 en k=3. Bij de voorbereiding van het normenvoorstel speelt het (landelijke) groepsrisico zodoende een ondergeschikte rol. Wel zijn nog enkele “hot spots” aangewezen. Dat zijn normtrajecten waar relatief grote aantallen slachtoffers zouden kunnen vallen. De normen die volgen uit de MKBA en de LIR-eis zijn daar soms nog aangescherpt. Deze lokale aanscherpingen zijn lastig op het TAW-beoordelingskader terug te voeren. Ze zijn veeleer het resultaat van bestuurlijke discussies.

5.4.3 Belangrijkste overeenkomsten en verschillen omgang met groepsrisico

Bij de onderbouwing van de nieuwe overstromingskansnormen is gebruik gemaakt van een richtinggevend kader voor de beoordeling van groepsrisico’s.
Hoewel er bij de afleiding van de nieuwe overstromingskansnormen gebruik is gemaakt van een richtinggevend kader is er van een duidelijk groepsrisicocriterium, zoals bij het LIR, geen sprake. In de Eurocodes wordt het groepsrisico geïmplementeerd middels de gevolgklassen. ISO 2394 geeft weliswaar een groepsrisicocriterium (dat overigens afwijkt van het TAW-beoordelingskader), maar dit criterium is niet toegepast bij het vaststellen van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit.

5.5 Overzicht van overeenkomsten en verschillen

De belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de betrouwbaarheidseisen uit het bouwbesluit en de Waterwet zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2. De grondslagen van de betrouwbaarheidseisen uit het bouwbesluit en de Waterwet

Aspect	**Bouwbesluit**	**Waterwet (nieuwe overstromingskansnormen)**
Optimalisatie	Optimalisatie veelal uitgevoerd voor een vooraf gegeven levensduur, hetgeen een speciaal geval is van de benadering zoals hiernaast is gegeven voor de Waterwet.	Beschouwing van een reeks van investeringen met elk een optimale levensduur
Grondslag betrouwbaarheidseis	Globale, niet object-/gebiedsspecifieke beschouwing van: - Plaatsgebonden risico (<10^{-5} per jaar), maar kans op succesvolle evacuatie zeer klein (verschil tussen PR en LIR dus gering) - Groepsrisico - Kosten-baten	Relatief gedetailleerde, gebiedsspecifieke beschouwing van: - Lokaal individueel risico (<10^{-5} per jaar) - Groepsrisico - Kosten-baten
Grenstoestand waarop de betrouwbaarheidseis betrekking heeft	Alle uiterste grenstoestanden (met of zonder overstroming tot gevolg)	Alleen verlies van waterkerend vermogen (met overstroming tot gevolg)
Differentiatie in betrouwbaarheidseisen	3 consequence classes (CC1A niet relevant bij primaire waterkeringen)	Variabele normhoogte
Type betrouwbaarheidseisen	Afzonderlijke eisen voor ontwerp, verbouw en afkeur	Eén norm die in de praktijk zowel bij de toetsing als het ontwerp wordt gehanteerd. Keringen worden zodanig ontworpen dat ze in het laatste levensjaar nog aan de norm voldoen.

Zoals weergegeven in Tabel 2 zijn er belangrijke overeenkomsten tussen de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet: beide berusten op dezelfde grondslagen. Het belangrijkste verschil is gelegen in het hanteren van een verschillende referentieperiode. Ander punt is dat de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit zeer breed van toepassing zijn verklaard; hun onderbouwing is tamelijk generiek. De betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet zijn daarentegen specifiek voor de verschillende normtrajecten ontwikkeld.

6 De betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet in de praktijk

In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet worden gebruikt bij de toetsing en het ontwerp van constructies.

6.1 De omgang met de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit

6.1.1 Betrouwbaarheidseisen ontwerppraktijk Bouwbesluit

Voor de betrouwbaarheidseisen voor het ontwerp van nieuwbouw verwijst het Bouwbesluit naar Eurocode NEN-EN 1990. Daarin zijn veiligheidsklassen met bijbehorende betrouwbaarheid vastgesteld. Een betrouwbaarheidseis is strenger als de gevolgen van falen ernstiger zijn. Tevens geldt dat bij relatief lage meerkosten een hogere eis kan worden nagestreefd.

Opgemerkt wordt dat de veiligheidsnorm in het Bouwbesluit in beginsel van toepassing is op de gehele constructie. In NEN-EN 1990 wordt de eis in principe gesteld aan een enkel constructie-element (of snede) voor een enkel mechanisme. De faalkans van de gehele constructie als systeem kan afwijken van de faalkansen van de elementen. Meestal zal de veiligheid van de gehele constructie hoger zijn, omdat er normaliter een herverdeling van de inwendige krachtsverdeling mogelijk is zodra ergens lokaal de sterkte overschreden wordt. De mate waarin dit kan, hangt af van het statische systeem (mate van statisch onbepaaldheid) en van de taaiheidseigenschappen van de toegepaste materialen en verbindingselementen. Als regel kan men er van op aan dat het systeem dat op onderdelen voldoet ook als geheel de betrouwbaarheidseis haalt. Uitzonderingen zijn constructies met een uitgesproken seriesysteemgedrag. Hier kan een toeslag worden gehanteerd die volgt uit het verschil tussen de faalkans van het seriesysteem en de faalkans van een element.

In NEN-EN 1990 zijn drie gevolgklassen gedefinieerd. De eisen voor de gevolgklassen in NEN-EN 1990 zijn weergegeven in Tabel 3. Hierbij wordt opgemerkt dat voor wind en wind-gerelateerde belastingen een gereduceerde β geldt op grond van de Nederlandse Nationale Bijlage. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de gebruikelijke partiële factoren voor windbelasting leiden tot een ontwerp met een betrouwbaarheidsindex welke lager ligt dan de waarden in Tabel 3. Kennelijk leidt dit (impliciete economische optimalisatie) tot een lagere geaccepteerde veiligheid voor windbelasting. Het veiliger maken van constructies onder windbelasting is kennelijk te duur geacht.

Tabel 3. Betrouwbaarheidsindices in NEN- EN 1990/NB.

gevolgklasse	gevolgen van bezwijken		Betrouwbaarheids-index in de levensduur
	kans op levensgevaar	kans op economische schade	
CC3	zeer groot	zeer groot	β = 4,3
CC2	aanzienlijk	aanzienlijk	β = 3,8
CC1	uitgesloten/ klein	klein	β = 3,3

of

en

De waarden in Tabel 3 zijn opgesteld uitgaande van een ontwerplevensduur van 50 jaar en 100 jaar. Voorbeelden van toepassing van de verschillende gevolgklassen zijn weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4. Gevolgklassen in NEN-EN 1990/NB.

NEN-EN 1990+A1+A1/C2:2011/NB:2011

Tabel NB.21 – B1 — Voorbeelden van toepassingen gevolgklassen

Gevolg klasse	Voorbeelden van toepassingen voor gebouwen alsmede andere bouwwerken geen bruggen zijnde	Voorbeelden van toepassingen voor bruggen
CC3	Hoge gebouwen, die reiken tot meer dan 70 meter boven het aangrenzende maaiveld. Bouwwerken, waarvan de overspanning van de constructie in een draagrichting groter is dan 50 meter en waarbij in geval van bezwijken van die overspanning meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen (zoals bij grote tentoonstellings- en stationshallen). Bouwwerken met de bestemming publieksfunctie (bijv. onderwijsgebouwen stadions, concerthallen, tribunes), waarbij in geval van bezwijken meer dan 500 personen gelijktijdig gevaar lopen. Gebouwen met verminderd zelfredzame personen zoals ziekenhuizen, celgebouwen, verpleegtehuizen met 4 of meer bouwlagen.[2)] Gebouwen waar zeer vitale processen worden bestuurd, bijv. verkeerstoren Schiphol, verkeersleidingsgebouw. Industriegebouwen voor gevaarlijke stoffen en/of processen waarvoor een omgevingsvergunning voor het milieu noodzakelijk is.	Bruggen in en over hoofdwegen, hoofdvaarwegen en landelijke spoorwegen. Dit betreft bruggen: — in en over de hoofdinfrastructuur of over hoofdvaarwegen met intensieve industriële (zee)vaart of — waarbij het instorten maatschappij ontwrichtende gevolgen heeft; — met extreem risico op grote maatschappelijke of letselschade.
CC2	Voor zover niet opgenomen in CC1 of CC3: Eengezinswoningen[3] met 4 of meer bouwlagen Woongebouwen hotels en kantoorgebouwen Onderwijsgebouwen Winkels Ziekenhuizen Openbare gebouwen Industriegebouwen waarvoor noot a niet geldt of met 3 of meer bouwlagen Parkeergarages	Bruggen die niet zijn ingedeeld in CC 1 of CC 3
CC1	Eengezinswoningen[3] met 1, 2 of 3 bouwlagen Landbouwbedrijfsgebouwen [a] Tuinbouwkassen [a] Industriegebouwen met 1 of 2 bouwlagen [a]	Bruggen waarvoor gedurende de gehele ontwerplevensduur geldt: — de brug ligt niet in een economisch belangrijke route, — het aantal vrachtwagens is minder dan 2 000 per jaar per rijstrook en — er is een beperkt risico op grote maatschappelijke of letselschade. Bruggen in landwegen, woonwijken enz.

[a] Uitsluitend voor productiedoeleinden, waarbij het aantal personen binnen beperkt is.

Het is een ongeschreven regel dat voor kunstwerken in de primaire waterkering door RWS voor CC3 wordt gekozen. De vraag is of dit in sommige omstandigheden niet een te strenge eis is; zeker indien de Waterwet leidt tot lagere betrouwbaarheidseisen als gevolg van beperkte economische gevolgen of

gevolgen voor mensenlevens. Concreet wordt het volgende voorgesteld. Indien de standaard RWS werkwijze om CC3 generiek van toepassing te verklaren kostbaar blijkt, wordt een kunstwerk bij een norm van 1/300 per jaar in CC1 ingedeeld, bij normen van 1/1.000 of 1/3.000 per jaar in CC2 en bij normen van 1/10.000 of 1/30.000 per jaar in CC3. Onder een norm wordt hier een maximaal toelaatbare faalkans per jaar verstaan (geen middenkans of signaalwaarde).

Intermezzo:

Verwarrend is Tabel B2 van Eurocode EN 1990, Basis of Design waarin de betrouwbaarheidsindex voor de drie gevolgklassen niet alleen voor 50 jaar maar ook voor 1 jaar is gegeven. De relatie tussen de twee is (zie ook hoofdstuk 7):

$$\Phi\left(-\beta_1\right) \approx \Phi\left(-\beta_{50}\right) / 50 \qquad (6.1.1)$$

Voor CC2 is de betrouwbaarheidsindex 3.8 voor 50 jaar. De bovenstaande vergelijking levert dan de waarde 4.7 voor een referentieperiode van 1 jaar.

Tabel 5 Betrouwbaarheidsindex voor 1 jaar of 50 jaar uit EN 1990.

gevolgklasse	*betrouwbaarheidsindex β*	
	β T= 1 jaar	*β T= 50 jaar*
CC3	*5.2*	*4.3*
CC2	*4.7*	*3.8*
CC1	*4.2*	*3.3*

Soms interpreteert men Tabel 5 zo dat men een hogere betrouwbaarheidsindex zou moeten gebruiken bij een kortere ontwerplevensduur. Dit zou leiden tot grotere partiële factoren aan de materiaalkant, voor de permanente belastingen en de variabele belastingen.
Dit zou leiden tot het toenemen van de afmetingen van een constructie bij een kortere ontwerplevensduur bij dominante niet-variabele belasting; dit is oneconomisch en is ook niet de bedoeling in de Eurocode.
Bij dominante variabele belastingen leveren de twee eisen een vergelijkbaar resultaat. De referentieperiode neemt af, waardoor de (extreme) variabele belastingen afnemen. Dat betekent kleinere partiële factoren voor de belasting, wat weer gecompenseerd wordt door de grotere β.

Indien uitsluitend economische motieven in het spel zijn, is het economisch optimaal de waarden voor de betrouwbaarheidsindex voor 50 jaar ook te hanteren bij een kortere periode (zie ook Figuur 9). Het gevolg is dat bij een kortere ontwerplevensduur de faalkans per jaar groter wordt.

Afgezien van deze economische overwegingen schrijven autoriteiten een minimaal betrouwbaarheidsniveau voor om het persoonlijk risico (paragraaf 5.3.1) te beperken tot een niveau dat significant lager is dan risico's die mensen in het dagelijks leven lopen. In verband met menselijke veiligheid geldt een maximale faalkans per jaar, ongeacht de ontwerplevensduur van de constructie. De betrouwbaarheidsindex bij kortere ontwerplevensduren wordt dus groter, als de menselijke veiligheid in het geding komt.

In het geval van een kleinere ontwerplevensduur houdt de Eurocode (NEN-EN 1990 met Nederlandse Nationale Bijlage) de *β*-waarden en de partiële factoren gelijk. Echter aan de referentieperiode is een ondergrens gesteld. Het resultaat is voor CC2 en CC3 een grens aan de verlaging van de periode waarbij men de betrouwbaarheidsindex *β* en dus de partiële factoren constant kan houden. Voor perioden korter dan circa 15 jaar wordt de menselijke veiligheid maatgevend en moet formeel de geëiste betrouwbaarheidsindex en daarmee de partiële factor omhoog. Omdat het in de praktijk echter niet handig is gelijktijdig met een hogere partiële factor en een lagere representatieve belasting te rekenen is er in de Nationale Bijlage van EN 1990 voor gekozen een minimum in te voeren voor de te hanteren referentieperiode. Voor CC3 volgt bij wind een minimum van 15 jaar. Gemakshalve is die waarde aangehouden voor CC2 en CC3, ongeacht de belasting. Bij CC1 speelt menselijke veiligheid feitelijk nauwelijks een rol en daarom is daar geen beperking.

6.1.2 *Betrouwbaarheidseisen toetspraktijk Bouwbesluit*

Bij het vaststellen van de betrouwbaarheidseisen voor bestaande bouw gelden economische overwegingen en minimale eisen voor menselijke veiligheid:

1. Een economische overweging leidt tot een optimalisering van de som van de bouwkosten en het risico. Verbetering of reparatie van een bestaande constructie om een hoger veiligheidsniveau te bereiken is dikwijls veel moeilijker en duurder dan bij nieuwbouw. Daarom zal het optimum voor bestaande bouw bij een lagere *β* liggen.
2. Ook hier geldt, in verband met menselijke veiligheid, een constante streefwaarde van de bezwijkkans per jaar, ongeacht de ontwerplevensduur van de constructie. De *β* voor de gehele ontwerplevensduur wordt daarmee hoger bij kortere ontwerplevensduren.

Van beide overwegingen dient men steeds de strengste veiligheidsnorm aan te houden.

Voor de betrouwbaarheidseisen voor bestaande bouw verwijst het Bouwbesluit naar NEN 8700. Daarin wordt onderscheid gemaakt tussen een verbouwniveau en een afkeurniveau. In Tabel 6 is een samenvatting gegeven van de vereiste *β*-waarden voor afkeur van bestaande bouw en voor verbouw (reparatie). Gevolgklasse 1 is opgesplitst in een klasse 1A (menselijke veiligheid speelt geen rol) en een klasse 1B (menselijke veiligheid speelt wel een rol).

Tabel 6. Vereiste *β* -waarden voor de minimum referentieperiode, NEN 8700 In geval van een * is de ondergrens voor persoonlijke veiligheid maatgevend. wn=wind niet dominant; wd=wind dominant

gevolg-klasse	Minimum referentieperiode	verbouw β_v		Afkeuren β_a	
		wn	wd	wn	wd
CC1A	1 jaar	2,8	1,8	1,8	0,8
CC1B	15 jaar	2,8	1,8	1,8	1,1*
CC2	15 jaar	3,3	2,5*	2,5*	2,5*
CC3	15 jaar	3,8	3,3*	3,3*	3,3*

Zoals in hoofdstuk 5 aangegeven leidt een economische optimalisering tot een lager optimaal veiligheidsniveau voor bestaande bouw.
Voor bestaande bouwwerken kon niet aan vroegere voorschriften worden gekalibreerd, zoals bij nieuwbouw gedaan was, om betrouwbaarheidseisen af te leiden. Daarom is langs een andere weg gezocht naar uitgangspunten. In het TNO-achtergrondrapport bij de NEN 8700 is een aantal overwegingen opgenomen, die hebben geleid tot het volgende aanschrijf- of afkeurniveau gebaseerd op alleen een economische optimalisatie. Deze overwegingen zijn op hoofdlijnen :

$$\beta_a \geq \beta_n - 1.5 \qquad (6.1.2)$$

waarin β_a het afkeurniveau is en β_n het nieuwbouwniveau.
Dit niveau ligt iets lager dan het veiligheidsniveau voor de dominante windbelasting bij nieuwbouw. Kennelijk is daar impliciet een vergelijkbare economische reductie acceptabel geacht. Voor ook andere belastingtypen is dit niveau daarom geschikt om aan te houden als minimum veiligheidsniveau voor een korte periode betrokken op een klein aantal bouwwerken. Verder wordt dit niveau geacht in de meeste gevallen te voorkomen dat bouwconstructies direct moeten worden aangepast die in het verleden correct zijn ontworpen volgens de toenmalige voorschriften en die verder geen bijzondere gebreken kennen.

Voor verbouw is vanuit economisch oogpunt op basis van een schatting de volgende reductie vastgesteld (β_v is het verbouwniveau):

$$\beta_v \geq \beta_n - 0.5 \qquad (6.1.3)$$

Verwacht wordt dat dit niveau in veel gevallen ook compensatie biedt voor situaties waar de nieuwbouweisen iets strenger zijn geworden. Zo wordt voorkomen dat de verbouw-onderdelen van een constructie een systematisch hogere veiligheid zouden hebben dan de niet aangepaste bouwonderdelen.

In het achtergrondrapport behorende bij NEN 8700 wordt $P=10^{-5}$ per jaar gebruikt voor het plaatsgebonden risico. Voor de faalkans van de constructie geldt dan:

$$P_f = \frac{10^{-5}}{P_{d|f}} \text{ [1/jaar]} \qquad (6.1.4)$$

waarin $P_{d|f}$ de kans op overlijden is, gegeven constructief falen van het bouwwerk.
In Tabel 7 is voor de verschillende gevolgklassen volgende de Eurocode (Consequence Classes CC1, CC2 en CC3) de kans op overlijden gegeven, gegeven het falen van de constructie of een onderdeel daarvan.

Tabel 7. Kans op overlijden gegeven constructief falen

Consequence Class (CC)	**gevolgen m.b.t. overlijden**	**Kans op overlijden gegeven *constructief falen* $P_{d\|f}$ NEN 8700 achtergronddocument**
CC3	Hoog	0.3
CC2	Gemiddeld	0.03
CC1	Laag	0.001

De kans om te overlijden is kleiner dan 1, omdat “falen” het bezwijken van een doorsnede of element van de constructie betreft. De meeste constructies bezitten "*redundancy*" (herverdelend vermogen), zodat de overlevingskans redelijk is.

Per gevolgklasse kan dan de uit het oogpunt van veiligheid acceptabele bezwijkkans P_g voor een constructiedeel voor een jaar worden berekend, namelijk:

$$P_g \,.\, P_{d|f} < 10^{-5} \text{ [/jaar]} \qquad (6.1.5)$$

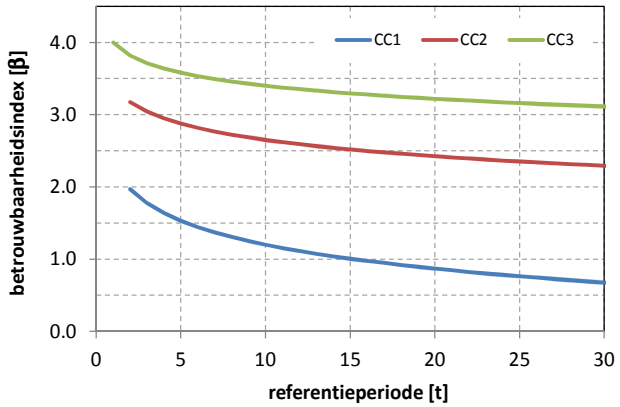
Gevolgklasse 1:	$P_g \leq 10^{-2}$	→	$\beta \geq 2.3$ [/jaar]
Gevolgklasse 2:	$P_g \leq 3.10^{-4}$	→	$\beta \geq 3.4$ [/jaar]
Gevolgklasse 3:	$P_g \leq 3.10^{-5}$	→	$\beta \geq 4.0$ [/jaar]

Het effect van een langere referentieperiode (t) kan als volgt verwerkt worden:

CC1:	$P_g \leq t \cdot 10^{-2}$	→	$\beta \geq \Phi^{-1}\{ t \,.10^{-2}\}$ [/t jaar]
CC2:	$P_g \leq t \cdot 3.10^{-4}$	→	$\beta \geq \Phi^{-1}\{ t \cdot 3.10^{-4}\}$ [/t jaar]
CC3:	$P_g \leq t \cdot 3.10^{-5}$	→	$\beta \geq \Phi^{-1}\{ t \cdot 3.10^{-5}\}$ [/t jaar]

Eisen met betrekking tot groepsrisico worden niet expliciet beschouwd en worden beschouwd in de keuze van de gevolgklasse verdisconteerd te zijn.

Dit leidt voor de drie beschouwde Consequence Classes tot een verloop van de betrouwbaarheidsindex als functie van de referentieperiode zoals geïllustreerd in Figuur 19.



Figuur 19. Betrouwbaarheidsindex gebaseerd op het individueel risico (10^{-5} per jaar). CC1 betreft hier CC1B omdat bij CC1A menselijke veiligheid geen rol speelt.

De resultaten met betrekking tot de betrouwbaarheidsindex voor een referentie-periode van 1 en 15 zijn tevens opgenomen in de tabel hierna (Tabel 8).

Tabel 8. Betrouwbaarheidsindices volgend uit individueel risico.

Consequence Class	**Referentieperiode**	
	1 jaar	**15 jaar**
CC3	4.0	3.3
CC2	3.4	2.5
CC1B	2.3	1.1

Bij gebruik van de waarden uit Tabel 6 wordt zeker voldaan aan de faalkanseis per jaar (zonder uitmiddeling over een periode > 1 jaar) vanwege het individueel risico, ook voor het geval met een dominante windbelasting (lagere β-waarden).

Door combinatie van de uitdrukkingen (6.1.2) en (6.1.3) voor economie en Tabel 8 voor menselijke veiligheid is Tabel 6 met de uiteindelijke betrouwbaarheidsindices tot stand gekomen. Tabel 6 vormt de basis voor de toetsing van bestaande constructies.

6.2 De betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet in de praktijk

6.2.1 De overstap naar faalkanseisen

De overschrijdingskansnormen uit de Waterwet 2009 zijn voor verschillende uitwerkingen vatbaar. Het begrip “voldoende veilig keren” kan immers op verschillende manieren worden ingevuld: het kan worden betrokken op dijkringen of dijkdoorsneden en hoe veilig “voldoende veilig keren“ is, is in de Waterwet niet nader gespecificeerd. Dit heeft ertoe geleid dat er tussen de voorschriften voor de verschillende faalmechanismen soms grote verschillen bestaan. Zo zijn de huidige voorschriften voor steenzettingen en asfaltbekledingen niet duidelijk aan faalkanseisen gerelateerd, terwijl dat voor het voorschrift voor bijvoorbeeld macrostabiliteit binnenwaarts wel het geval is.

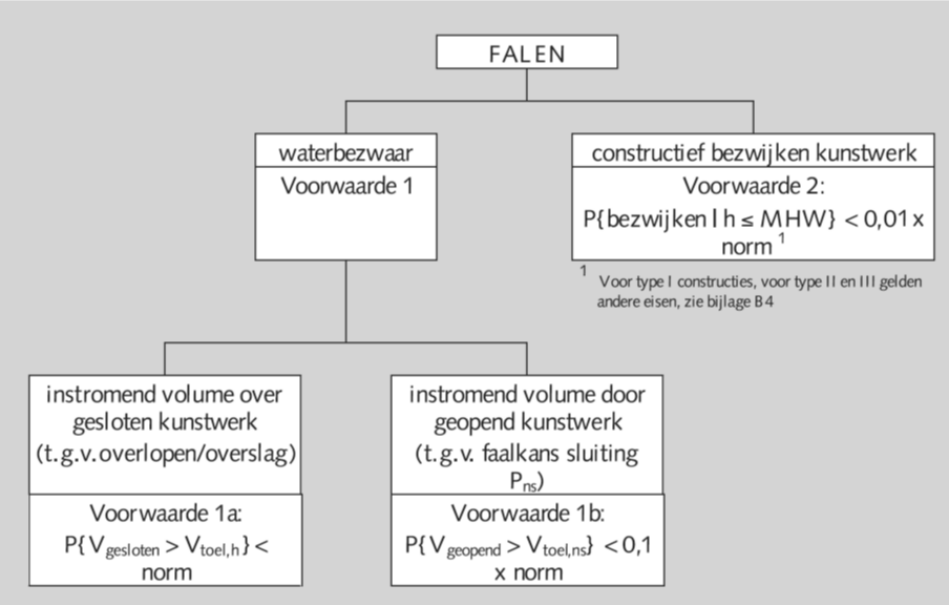
Met de overstap op overstromingskansnormen zal aan de bovengenoemde ruimte voor interpretatie een einde komen. Bovendien maakt een dergelijk normtype een directer verband mogelijk tussen de eisen aan de waterkeringen en overwegingen ten aanzien van de aanvaardbaarheid van risico’s. Om dit nauwere verband te realiseren, zijn de normen ook voor kleinere ruimtelijke eenheden gedefinieerd: de zg. normtrajecten. Deze zijn vaak kleiner dan de huidige dijkringen (zie Bijlage A).

De overstap op de nieuwe normen zal consequenties hebben voor de vorm en inhoud van het wettelijk toetsinstrumentarium (WTI) en het ontwerpinstrumentarium (OI). Zo worden probabilistische modellen ontwikkeld voor de toetsing en eventueel ook het ontwerp van waterkeringen. Ook zullen zg. semi-probabilistische toets- en ontwerpvoorschriften beschikbaar worden gesteld. Met dergelijke voorschriften kan de betrouwbaarheid van constructies worden beoordeeld op basis van relatief eenvoudige berekeningen met rekenwaarden (representatieve waarden en veiligheidsfactoren).

De huidige toets- en ontwerpvoorschriften zijn qua vorm al semi-probabilistisch, alleen is de relatie tussen de veiligheidsfactoren en maximaal toelaatbare faalkansen niet overal expliciet gelegd. De huidige voorschriften zullen op twee belangrijke onderdelen wijzigen. Ten eerste zullen ze worden geijkt aan maximaal toelaatbare faalkansen (“kalibratie”). Ten tweede zullen de model- en statistische onzekerheden in het belastingmodel tot uitdrukking worden gebracht in de rekenwaarden van de hydraulische belastingniveaus.

In theorie zouden de huidige voorschriften al een relatie met maximaal toelaatbare faalkansen moeten bezitten. In de Grondslagen voor Waterkeren (TAW, 1998) staat immers beschreven dat de kans op het falen van een dijk door een andere oorzaak dan golfoploop en golfoverslag maximaal 10% van de getalswaarde van de overschrijdingskansnorm mag zijn. Als de norm bijvoorbeeld 1/4.000 per jaar is, dan mag de totale faalkans voor alle andere faalmechanismen dan golfoverslag niet groter zijn dan 1/40.000 per jaar. Van deze faalkanseis zijn faalkanseisen per faalmechanisme af te leiden. Het resultaat kan worden vastgelegd in een zg. faalkansbegroting die per faalmechanisme een faalkanseis specificeert. Een eerste aanzet tot een faalkansbegroting is gegeven in de Leidraad voor het ontwerp van Rivierdijken (TAW, 1989).

Ook aan de voorschriften in de huidige Leidraad Kunstwerken ligt een faalkansbegroting ten grondslag (Figuur 20). Zo geldt voor constructief bezwijken een faalkanseis van 1% van de getalswaarde van de overschrijdingskansnorm (hoewel Figuur 20 anders suggereert, wordt in de praktijk geen voorwaardelijke faalkans beschouwd voor betrouwbaarheid sluiting en constructief falen).



Figuur 20. Faalkansbegroting Leidraad Kunstwerken (bron: TAW, 2003: pag. 72).

Ook in het WTI2017 en het OI2014 wordt een faalkansbegroting gehanteerd. Deze is niet nodig als er probabilistisch wordt getoetst of ontworpen. In dat geval kan de faalkans voor alle faalmechanismen samen immers direct worden vergeleken met de norm. Maar om semi-probabilistisch te kunnen toetsen en ontwerpen is een faalkanseis per faalmechanisme onontbeerlijk. De faalkansbegroting in het WTI2017 en het OI2014 is weergegeven in Tabel 9.

Tabel 9. De maximaal toelaatbare faalkansen als percentages van de overstromingskansnorm (Jongejan, 2014)

Type kering	**Faalmechanisme**	**Zandige kust**	**Overig (dijken)**
Dijk	Overloop en golfoverslag (dijken en kunstwerken)	0%	24%
	Opbarsten en piping	0%	24%
	Macrostabiliteit binnenwaarts	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%**

* *Bij normtrajecten die voor een gedeelte uit duinen bestaan, zal duinafslag vaak een relatief kleine faalkansbijdrage leveren. Voorgesteld is om in dergelijke gevallen 10% van de post 'overig' toe te wijzen aan duinafslag. Dit voorkomt dat er voor dergelijke situaties een geheel nieuwe faalkansbegroting moet worden gehanteerd.*

De percentages uit Tabel 9 tellen op tot 100%. Dit is een conservatieve benadering, omdat door het effect van correlaties de som van de faalkansen van de faalmechanismen kleiner is dan hun gecombineerde faalkans (dit effect is in de praktijk overigens ook klein).

De faalkansbegroting is opgesteld op basis van VNK2-resultaten (doorvertaald naar een situatie waarin aan de nieuwe normen wordt voldaan) en expert judgment. Er bleek geen sprake te zijn van een duidelijk onderscheid tussen bijvoorbeeld het boven- en het benedenrivierengebied. Daarom is alleen onderscheid gemaakt tussen de zandige kust en de overige (dijk)trajecten. De veiligheidsfactoren zijn overigens vrij ongevoelig voor variaties in de faalkansbegroting. Zo zouden de percentages in Tabel 9 een factor 2 groter of kleiner gekozen kunnen worden zonder dat dit wezenlijke consequenties zou hebben voor de aan te houden veiligheidsfactoren. In termen van betrouwbaarheidsindices en ontwerppuntwaarden is het effect van een verandering van een faalkans met een factor 2 immers marginaal. Dit betekent dat de faalkansbegroting uit Tabel 9 breed toepasbaar is. Desondanks zal het soms verstandig zijn om een afwijkende faalkansbegroting te hanteren, zoals bij het normtraject Zeetoegang IJmuiden dat qua opbouw sterk afwijkt van de andere normtrajecten. In principe staat het toetsers/ontwerpers vrij om een andere faalkansbegroting te hanteren als daardoor dichter op een probabilistische beoordeling kan worden aangesloten. De enige voorwaarde is dat de faalkansbegroting sluitend is op 100%.

Doordat de percentages uit de faalkansbegroting optellen tot 100% kan een slecht passende faalkansbegroting nooit leiden tot het onterecht goedkeuren van een waterkering of een ontwerp met een te grote faalkans. Hooguit kan een slecht passende faalkansbegroting leiden tot het onterecht afkeuren van een waterkering of een oneconomisch ontwerp. Bij een slecht passende faalkansbegroting gaat een te soepele eis aan een faalmechanisme immers altijd gepaard met een te strenge eis aan een andere faalmechanisme (en vice versa).

6.2.2 De betekenis van de overstromingskansnorm: anticiperende norm of maximaal toelaatbare faalkans

De momenteel circulerende normgetallen hebben de betekenis van signaalwaarden: het zijn normen met een anticiperend karakter. Wanneer deze normen worden overschreden kan het nog enige tijd duren voordat de maximaal toelaatbare faalkansen worden overschreden (zie ook paragrafen 4.2.2 en 4.3.2). Het gebruik van anticiperende normen sluit echter slecht aan op de huidige waterbouwkundige toets- en ontwerppraktijk:

1. Het anticiperende element in de normering kan bovenmatig zijn:
   - Het WTI bevat al enig conservatisme. Zo zal voor diverse faalmechanismen alleen een semi-probabilistische beoordeling mogelijk zijn en semi-probabilistische beoordelingen zijn minder scherp dan probabilistische.
   - Daarnaast worden er dikwijls conservatieve aannamen gedaan ten aanzien van schakels in het faalproces (negeren “reststerkte”).
   - Ook worden de hydraulische randvoorwaarden vastgesteld voor het einde van de toetsperiode van 12 jaar, terwijl keringen na een toetsing direct bij het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) kunnen worden aangemeld. Het HWBP krijgt een voortrollend karakter; er wordt niet langer gewacht met het programmeren van versterkingen totdat de landelijke rapportage gereed is.

2. De normen uit de Waterwet worden ook bij het ontwerp van keringen gehanteerd. Ontwerpen worden in de praktijk zodanig opgesteld dat zij in hun laatste levensjaar nog aan de maximaal toelaatbare overstromingskans voldoen, rekening houdend met bijv. relatieve zeespiegelstijging en veroudering. Voor het ontwerp is dus de getalswaarde van de maximaal toelaatbare overstromingskans van belang, omdat de ontwerplevensduur anders onnodig wordt verlengd. Vanwege de uitdrukkelijke wens van de Minister om niet te "majoreren" (geen onnodig conservatisme) is bij het Ontwerpinstrumentarium 2014 dan ook aangegeven dat de anticiperende normen nog moeten worden omgerekend naar maximaal toelaatbare faalkansen:

   "Beschermingsniveaus zijn hieronder uitgedrukt in zgn. middenkansen. M.b.v. het ontwerpinstrumentarium 2014 en een LCC benadering kunnen aan de hand hiervan optimale ontwerpkansen worden afgeleid. De economisch optimale ontwerpkans zal vaak een factor 2 maal groter zijn dan de middenkans. NB: er zullen gevallen zijn waarin de ontwerpkans sterker afwijkt van de middenkans. Dit is bijvoorbeeld het geval bij kunstwerken met zeer hoge tussentijdse aanpassingskosten/ grote beoogde levensduur." (bron: "Werkgetallen nHWBP versie 1.1 - april 2014, HWBP-website, 30-07-2014).

   Gebleken is dat deze omrekening op veel onbegrip stuit. Het is namelijk een unicum dat bij het ontwerp een getalsmatig soepelere faalkanseis gehanteerd mag worden dan bij de toetsing (ook al wordt bij het ontwerp een ander zichtjaar beschouwd en worden bij het ontwerp robuustheidstoeslagen gehanteerd). De nu opgelegde omrekenfactor 2 is overigens ook voor discussie vatbaar. Deze factor geldt namelijk voor de anticiperende normen die berusten op het LIR. Het verschil tussen de middenkansen uit de MKBA en de maximaal toelaatbare faalkansen vanuit economisch perspectief kan groter zijn dan een factor 2 en van geval tot geval anders zijn (zie ook paragraaf 5.2.2).

3. Het is de vraag of normen met een expliciet anticiperend karakter bij wet kunnen worden vastgelegd. Ook vervult de norm een rol bij de handhaving van vergunningen (bijv. definitie legger) en geschillen rondom toetsing en ontwerp (bijv. onteigening). Hiervoor zal een eenduidige grenswaarde wenselijk zijn. Wanneer het anticiperend karakter niet expliciet kan worden vastgelegd, zal er sprake zijn van een oneconomische aanscherping van de betrouwbaarheidseisen.

Benadrukt wordt dat het wetgevingstraject nog niet is afgerond. Het is dus goed mogelijk dat er nog over zal worden gegaan van normen met een anticiperend karakter naar normen met het karakter van grenswaarden.

6.2.3 *Toetsing en ontwerp op basis van de normen uit de Waterwet*

Bij het ontwerp van waterkeringen wordt gebruik gemaakt van dezelfde faalkanseisen (normen en faalkansbegroting) als bij de toetsing. Anders dan bij de toetsing wordt bij het ontwerp echter niet de werkelijke conditie van de waterkering beoordeeld, maar de verwachte conditie in het laatste jaar van de beoogde levensduur. Dit betekent dat bij de bepaling van ontwerpbelastingen rekening moet worden gehouden met zeespiegelstijging en veranderingen in de afvoer tijdens de ontwerplevensduur. Daarnaast dient nog een robuustheidstoeslag in acht te worden genomen. Deze zorgt voor een extra marge tussen toetsing en ontwerp; deze marge is alleen niet expliciet uitgedrukt in termen van faalkanseisen.

De robuustheidstoeslag is in 2007 ingevoerd in de Leidraad Rivieren. De introductie van de robuustheidstoeslag is het resultaat van een uitgebreide discussie geweest. Oorspronkelijk was de robuustheidstoeslag bedoeld om onzekerheden in langjarige trends af te dekken. In het verleden is besloten dat de robuustheidstoeslag niet toegepast hoeft te worden bij een dijkringbenadering, ook al staat de toeslag hier inhoudelijk los van. De omvang van de robuustheidstoeslag is in het Ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014) gemotiveerd op basis van de verwachte effecten van het verwerken van model- en statistische onzekerheden op de hydraulische belastingen. De robuustheidstoeslag lijkt dus op verschillende manieren te zijn/worden geïnterpreteerd. Gelet op de controverse rondom de robuustheidstoeslag is het te verwachten dat de discussie over de omgang met de/een robuustheidstoeslag in de komende jaren nog verder gevoerd zal worden.

Bij het ontwerp van waterkeringen wordt standaard uitgegaan van levensduren van 25, 50 of 100 jaar. Het staat ontwerpers echter vrij om een afwijkende ontwerplevensduur te hanteren. De ontwerplevensduur is het onderwerp van een (veelal impliciete) economische optimalisatie. Hoe groter de vaste kosten van aanleg/versterking zijn, des te groter de economisch optimale levensduur is. Het is bij relatief hoge vaste kosten immers gunstig om een volgende versterking relatief lang uit te kunnen stellen. Dit verklaart ook waarom bij kunstwerken veelal een ontwerplevensduur van 100 jaar wordt aangehouden en bij dijken van 50 jaar.

Het ontwerpinstrumentarium (OI) lijkt qua inhoud sterk op het wettelijk toetsinstrumentarium (WTI). Zo is het belastingmodel van het OI identiek aan het belastingmodel van het WTI (alleen wordt in het OI met klimaatscenario's rekening gehouden). Ook zijn de ontwerpregels inhoudelijk gelijk aan de toetsvoorschriften en kan gebruik worden gemaakt van dezelfde technische rapporten.

6.3 Overzicht van overeenkomsten en verschillen betrouwbaarheidseisen

De belangrijkste overeenkomsten en verschillen tussen de wijze waarop de betrouwbaarheidseisen uit het bouwbesluit en de Waterwet in de praktijk worden toegepast, zijn weergegeven in Tabel 10.

Tabel 10. De toepassing van de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet

Aspect	**Bouwbesluit**	**Waterwet (in combinatie met WTI2017 en Ontwerpinstrumentarium)**
Gebruik van de betrouwbaarheidseis	Van toepassing op alle constructie-onderdelen, belastingen en belastingcombinaties	Alleen van toepassing op de hoogwaterkerende functie van het kunstwerk
Gebruikelijke presentatievorm betrouwbaarheidseis	Betrouwbaarheidsindex (om te rekenen naar een faalkanseis)	Maximaal toelaatbare faalkans (om te rekenen naar een betrouwbaarheidsindex)

Bepaling eis per faalmechanisme en constructie-onderdeel	Geen vertaalstappen nodig: de gegeven betrouwbaarheidseis geldt per faalmechanisme en constructieonderdeel	Betrouwbaarheidseis heeft betrekking op normtraject (alle onderdelen en faalmechanismen daarbinnen) Benodigde vertaalstappen om te komen tot een faalkans voor een faalmechanisme op doorsnedeniveau: alle faalmechanismen, geheel normtraject → 1 faalmechanisme, geheel normtraject → 1 faalmechanisme, 1 kunst-werk → 1 faalmechanisme 1 constructieonderdeel NB: deze aanpak kan bij dezelfde normhoogte leiden tot verschillende betrouwbaarheidseisen aan constructie-onderdelen en faal-mechanismen bij normtrajecten met ongelijksoortige lengtes/opbouwen
Referentieperiode	Ontwerp: Normaliter gelijk aan ontwerplevensduur: 50 of 100 jaar Toetsing: >15 jaar (CC1A niet relevant bij primaire waterkeringen)	1 jaar bij toetsing (uitgangspunt WTI2017), nog geen besluit over aan te houden referentieperiode bij ontwerp (in huidige Leidraad Kunstwerken 10 jaar bij toetsing en ontwerp, in alle andere huidige leidraden 1 jaar)
Onderscheid tussen toetsing en ontwerp	Onderscheid gerealiseerd door middel van verschillende betrouwbaarheidseisen bij toetsing en ontwerp: andere betrouwbaarheidsindices en referentieperiodes	Dezelfde betrouwbaarheidseisen bij toetsing en ontwerp, maar bij de toetsing beschouwt men de faalkans in een nabijgelegen jaar en bij het ontwerp in het laatste jaar van de ontwerplevensduur. Bij het ontwerp moet ook een robuustheidstoeslag in acht worden genomen.
Ontwerp/restlevensduur	Keuze, meestal 50 of 100 jaar	Te bepalen op basis van economische optimalisatie, in de praktijk 50 of 100 jaar

7 De (non-)equivalentie van betrouwbaarheidseisen voor verschillende referentieperiodes

De referentieperiode is de tijdseenheid van de faalkanseis. In dit hoofdstuk wordt toegelicht hoe maximaal toelaatbare overstromingskansen op jaarbasis omgerekend kunnen worden naar eisen voor grotere referentieperiodes dan een jaar. Dat is nodig om de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit en de Waterwet onderling te kunnen vergelijken. Als bekend is welke eis maatgevend is, kan bij ontwerp en toetsing gebruik worden gemaakt van één set partiële factoren, waarbij de zekerheid bestaat dat er zowel aan het Bouwbesluit als aan de Waterwet wordt voldaan.

7.1 De grondslagen van de overstromingskansnormen en de referentieperiode

De nieuwe overstromingskansnormen worden gebaseerd op de uitkomsten van een kosten-batenanalyse en eisen ten aanzien van het slachtofferrisico. Afhankelijk van de vraag of de economische optimalisatie of de eis voor de menselijke veiligheid de normstelling dicteert, zal de norm (een kans per jaar) op een andere wijze vertaald moeten worden naar een betrouwbaarheidseis voor een grotere referentieperiode. Het gaat hierbij om:

1. De principiële vraag of er een grens gesteld moet worden aan de te houden referentieperiode.
2. De praktische vraag hoe de omrekening van de norm op jaarbasis naar een betrouwbaarheidseis voor een referentieperiode groter dan 1 jaar gemaakt dient te worden.

Ad. 1

Bij een economische optimalisatie over de levensduur is er geen principiële reden om de referentieperiode te begrenzen tot een tijdspanne korter dan de levensduur. Daarom wordt in het navolgende de betrouwbaarheidseis op jaarbasis die volgt uit de MKBA omgerekend naar een referentieperiode die gelijk is aan de levensduur. Wanneer het lokaal individueel risico (LIR) bepalend is voor de betrouwbaarheids-eis kunnen er echter principiële redenen zijn om de referentieperiode te begrenzen. Men zou kunnen stellen dat in elk willekeurig jaar moet worden voldaan aan de LIR-eis van 10^{-5} per jaar. In dat geval wordt de referentieperiode begrensd tot 1 jaar. In de huidige Leidraad Kunstwerken wordt echter een referentieperiode van 10 jaar gehanteerd, zodat enig gunstig effect van correlaties in de tijd (of variabele faalkansen) meegewogen kan worden. Een 10-jaarsperiode is nog altijd kort ten opzichte van een mensenleven.

Ad. 2

a) Bij de economische optimalisatie is rekening gehouden met een stijging van de jaarkansen (paragraaf 5.2.2). De mate waarin de jaarkansen in de tijd veranderen, is van invloed op het economisch optimum.
b) De eis ten aanzien van het lokaal individueel risico is op jaarbasis geformuleerd en is dezelfde in elk jaar van de levensduur.
Dit verschil tussen a) en b) betekent dat bij de omrekening van de eisen per jaar naar eisen voor grotere referentieperiodes verschillende aanpakken gevolgd moeten worden.

Omdat het voorstel voor nieuwe overstromingskansnormen vrijwel geheel berust op de MKBA-uitkomsten en de eis ten aanzien van het lokaal individueel risico (LIR) is het groepsrisico in dit hoofdstuk buiten beschouwing gelaten.

7.2 Algemene uitgangspunten bij vertaling van de normen uit de Waterwet naar betrouwbaarheidseisen aan constructie-onderdelen

De normen uit de Waterwet moeten worden omgerekend naar betrouwbaarheidseisen voor het constructief falen van constructie-onderdelen. Daarbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. De faalkanseis voor constructief falen op trajectniveau is 2% van de maximaal toelaatbare overstromingskans, conform de faalkansbegroting (Tabel 9).
2. De faalkanseis voor constructief falen van een individueel constructie-onderdeel is een factor 6 kleiner dan de faalkanseis op trajectniveau. Een dergelijke factor hoort bij bijvoorbeeld twee onafhankelijke, equivalente kunstwerken in één traject en 3 equivalente, onafhankelijke constructieonderdelen (bovenbouw, onderbouw en randconstructies).

Deze uitgangspunten staan geheel los van de referentieperiode.

In de praktijk kan falen optreden door óf het falen van de bovenbouw, óf het falen van de onderbouw, óf het falen van de randconstructies. Deze onderdelen vormen dus een seriesysteem. Hoewel de belasting op deze constructieonderdelen sterk gecorreleerd zijn, zijn hun sterktes zwak gecorreleerd. Hierdoor is de faalkans van het seriesysteem bij benadering gelijk aan de som van de faalkansen van de constructieonderdelen. De faalkansen van de bovenbouw, onderbouw en randconstructies liggen in de praktijk vaak ver uiteen, het is echter onpraktisch om de faalkansbegroting hierop af te stemmen. Daarom is voor alle constructieonderdelen uitgegaan van gelijke faalkanseisen.

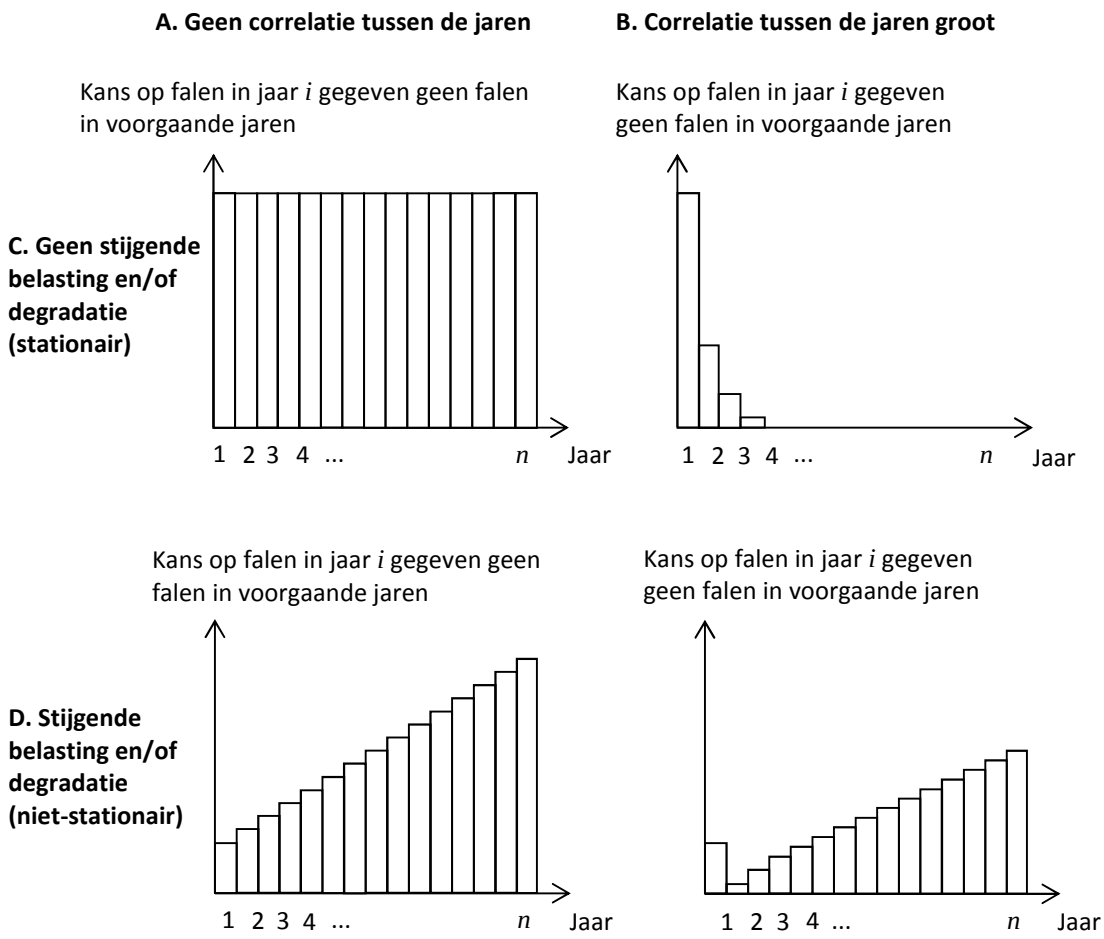
Om discussie te voorkomen over de aan te houden omrekeningsfactoren bij het omzetten van anticiperende normen naar maximaal toelaatbare overstromingskansen, wordt in dit hoofdstuk steeds direct gesproken over maximaal toelaatbare overstromingskansen.

Bij een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/3.000 per jaar volgt bij de bovengenoemde uitgangspunten een faalkanseis voor het constructief falen van een constructie-onderdeel van 1/3.000x0,02/6=$1{,}1.10^{-6}$ per jaar, ofwel een betrouwbaarheidsindex van 4,73 op jaarbasis. Op analoge wijze kunnen de betrouwbaarheidsindices op jaarbasis voor andere maximaal toelaatbare overstromingskansen worden bepaald.

7.3 Het omrekenen van een door de MKBA gedicteerde norm naar grotere referentieperiodes

Een economisch optimalisatie levert een economisch optimale constructie op, welke wordt gekenmerkt door een bepaalde ontwikkeling van de faalkans in de tijd. In de eerste levensjaren kan de faalkans van de economisch optimale constructie afnemen door correlaties in de tijd, vervolgens kan deze stijgen door de veroudering en toenemende belastingen (Figuur 23). Het economisch optimum is afhankelijk van deze invloeden. Opgemerkt wordt dat in de MKBA ter onderbouwing

van de normen geen rekening is gehouden met correlaties in de tijd (feitelijk wordt in economische optimalisaties verondersteld dat constructies instantaan na falen in exact dezelfde toestand worden teruggebracht als op het moment direct voorafgaand aan falen).



Figuur 21 De invloed van tijdsafhankelijkheid en stijgende belastingen en/of degradatie op de faalkans per jaar gegeven geen falen in voorgaande jaren (zie Bijlage B voor een toelichting op de betekenis van de kans op falen in jaar *i* gegeven geen falen in voorgaande jaren).

De kans op falen in periode i gegeven geen falen in voorgaande periode is bij goede benadering gelijk aan de kans op falen in periode i EN geen falen in voorgaande periode omdat het kleine faalkansen betreffen; hiermee wordt in het vervolg gerekend.

Voor de maximaal toelaatbare faalkans voor een referentieperiode van *n* jaar kan worden geschreven:

$$P_{eis,n} = \sum_{i=1}^{n} P_{opt,1,i} \qquad (7.3.1)$$

waarin:

$P_{eis,n}$ De maximaal toelaatbare faalkans voor een referentieperiode van *n* jaar

$P_{opt,1,i}$ De faalkans op jaarbasis (index 1) van de constructie in jaar *i* bij het volgen van een optimale investeringsstrategie. Deze faalkans is de kans op falen in jaar *i en* geen falen in de voorafgaande jaren (zie ook het bijschrift bij Figuur 21 en Bijlage B).

Vanuit een economisch oogpunt is het kiezen van een referentieperiode gelijk aan de levensduur het meest optimaal. Dit wordt daarom aangehouden in het vervolg van deze paragraaf.

In de MKBA's ter onderbouwing van zowel de oude normen van de Deltacommissie als de nieuwe normen is uitsluitend rekening gehouden met het effect van degradatie, toenemende belastingen en waardevermeerdering in het te beschermen gebied (zie ook paragraaf 5.2.2). Het effect van correlaties tussen de jaren is in geen van deze MKBA's beschouwd.

Het effect van klimaatverandering en bodemdaling op de benodigde kruinhoogte is in de MKBA's uitgedrukt als een vast aantal centimeters per jaar. Omdat de staart van de waterstandverdeling (bij benadering) exponentieel verdeeld is, leidt dit tot een exponentiële toename van de faalkans per jaar. Uitgaande van een exponentiële toename van de faalkans per jaar, totdat de maximaal toelaatbare faalkans vanuit economisch oogpunt wordt bereikt, kan voor de faalkanseis voor een referentieperiode van *n* jaar worden geschreven:

$$P_{eis,n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{P_{opt,1,n}}{(1+a)^{i-1}} \qquad (7.3.2)$$

Waarin:

$P_{eis,n}$ De maximaal toelaatbare faalkans is voor een referentieperiode van *n* jaar

$P_{opt,1,n}$ De faalkans van de constructie bij een geoptimaliseerd ontwerp op jaarbasis in het laatste levensjaar *n.* Dit is de faalkans in het laatste jaar van een zaagtand (zie Figuur 12).

a Groeivoet van de faalkans (per jaar)

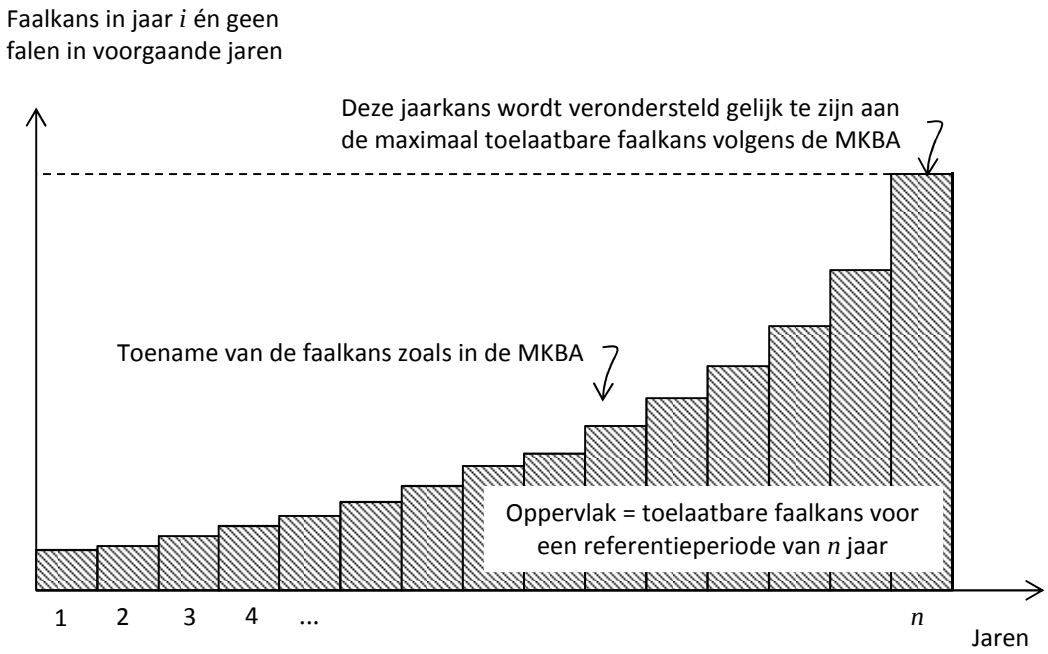
Wanneer de bovenstaande vergelijking wordt gebruikt voor de vertaling van de normen afkomstig uit de MKBA naar betrouwbaarheidseisen voor grotere referentieperiodes, zijn aannamen onontkoombaar. De norm is immers afgeleid voor een geheel traject, voor een bepaald zichtjaar. Dit zichtjaar hoeft niet samen te vallen met het laatste jaar van de bij het ontwerp beoogde levensduur. Ook kan een economische optimalisatie van een individueel object een uitkomst geven die afwijkt van de betrouwbaarheidseis die middels de faalkansbegroting en een inschatting van het lengte-effect is afgeleid van de norm.

In het navolgende worden de volgende aannamen gedaan bij het omrekenen van de faalkanseisen op jaarbasis naar betrouwbaarheidseisen voor grotere referentieperiodes:

1. De faalkans in het laatste levensjaar van een geoptimaliseerd ontwerp wordt verondersteld gelijk te zijn aan de maximaal toelaatbare faalkans per jaar volgens de MKBA. Dit impliceert dat de gekozen levensduur de economisch optimale levensduur.
2. Aangenomen is dat de faalkans elk jaar met een vaste factor toeneemt door degradatie en/of stijgende belastingen. Verder is het effect van correlaties tussen de jaren genegeerd, zoals dat ook in de MKBA's ter onderbouwing van

de oude en de nieuwe normen is gedaan. Beide aannamen zijn gedaan in de onderbouwing van de norm maar hoeven niet geheel conform werkelijkheid te zijn (b.v. degradatie treedt veelal pas op na een aantal jaren).

De betekenis van deze aannamen is schematisch weergegeven in Figuur 22. De maximaal toelaatbare faalkans voor de referentieperiode van *n* jaar is gelijk aan het gearceerde oppervlak.



Figuur 22 Schematische weergave van de maximaal toelaatbare faalkans voor een referentieperiode van *n* jaar als de faalkansen bij de optimale investeringsstrategie aanvankelijk relatief klein zijn en geleidelijk toenemen.

Opgemerkt wordt dat in de huidige Leidraad Kunstwerken impliciet soortgelijke aannamen zijn gedaan. De normen uit de Waterwet 2009 (voorheen Wet op de Waterkering 1996) hebben een economische grondslag en zijn immers ook als maximaal toelaatbare faalkansen geïnterpreteerd (geen objectspecifieke optimalisatie). Verder wordt in de huidige Leidraad Kunstwerken bij de toepassing van een referentieperiode van 10 jaar uitgegaan van een constante faalkanseis per jaar, hetgeen impliceert a=0 per jaar (zie ook paragraaf 8.2.1). Dit lijkt een onterecht optimistische aanname zoals geïllustreerd in Figuur 22. Vergelijking (7.3.2) geeft voor a>0 per jaar immers strengere betrouwbaarheidseisen dan voor a=0 per jaar, terwijl bij de economische optimalisatie van de normen wel degelijk met een stijgend faalkansverloop (a>0 per jaar) is gerekend (zie ook Van Dantzig, 1956).

In Tabel 11 is aangegeven welke betrouwbaarheidseisen volgen uit de voorgestelde aanpak bij normen die op de MKBA zijn gebaseerd. Dat is gedaan voor verschillende referentieperiodes (gelijk te stellen aan de (rest)levensduur). Bij het invullen van vergelijking 6.3.3 is uitgegaan van a=0,023 per jaar, hetgeen correspondeert met een toename van de faalkans met een factor 10 per eeuw (1 decimeringhoogte afname kerende hoogte). Voor de MKBA ter onderbouwing voor de nieuwe normen zijn voor alle trajecten inschattingen gedaan van afname van de kerende hoogtes van de waterkeringen in de tijd. Gemiddeld gaat het over 1,5 decimeringhoogte per eeuw, tot maximaal 3,5 decimeringhoogte per eeuw in

zettingsgevoelige gebieden. Bij kunstwerken zullen zettingen doorgaans echter gering zijn, zodat een kleinere waarde in de rede ligt. Opgemerkt wordt dat het hanteren van een grotere waarde dan *a*=0,023 per jaar nauwelijks van praktische betekenis is voor de eisen aan de constructieve sterkte.

Tabel 11. Betrouwbaarheidseisen (minimale betrouwbaarheidsindices) voor het constructief falen van constructieonderdelen, voor verschillende referentieperiodes, wanneer de norm is gebaseerd is op de MKBA

Referentieperiode (jaar)	**Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)**				
	1/300	**1/1000**	**1/3000**	**1/10000**	**1/30000**
1	4,24	4,50	4,73	4,97	5,18
10	3,72	4,01	4,27	4,53	4,75
15	3,63	3,93	4,19	4,45	4,68
30	3,49	3,80	4,06	4,34	4,57
50	3,41	3,72	3,99	4,27	4,51
100	3,33	3,65	3,92	4,21	4,45

Als voorbeeld is hier weergegeven hoe bij een referentieperiode van 50 jaar en een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/1000 per jaar de betreffende β-waarde (3.72) is berekend. Zie paragraaf 7.2 voor de omrekening van de maximaal toelaatbare overstromingskans naar de faalkanseis voor een constructie-onderdeel.

$$\beta_{50} = \Phi^{-1}\left\{P_{eis,n}\right\} \approx \Phi^{-1}\left\{\sum_{i=1}^{n}\frac{P_{opt,1,n}}{\left(1+a\right)^{i-1}}\right\} \approx \Phi^{-1}\left\{\sum_{i=1}^{50}\frac{\left(0{,}02/6\right)\cdot\left(1/1000\right)}{\left(1+0{,}023\right)^{i-1}}\right\} = \Phi^{-1}\left\{1{,}01\cdot 10^{-4}\right\} = 3{,}72 \tag{7.3.3}$$

7.4 Omrekenen naar grotere referentieperiodes bij een door het LIR gedicteerde norm

De eis ten aanzien van het lokaal individueel risico is per jaar geformuleerd en constant in de tijd. De hiervan afgeleide faalkanseis per jaar voor een constructie is dat dus ook. Als de constructie binnen de referentieperiode elk jaar een faalkans mag bezitten die gelijk is aan $P_{eis,1}$, dan geldt voor de maximaal toelaatbare kans op falen in de referentieperiode:

$$P_{eis,n} = 1-\left(1-P_{eis,1}\right)^{n} \tag{7.4.1}$$

Waarin:

$P_{eis,n}$ De maximaal toelaatbare faalkans voor een referentieperiode van *n* jaar

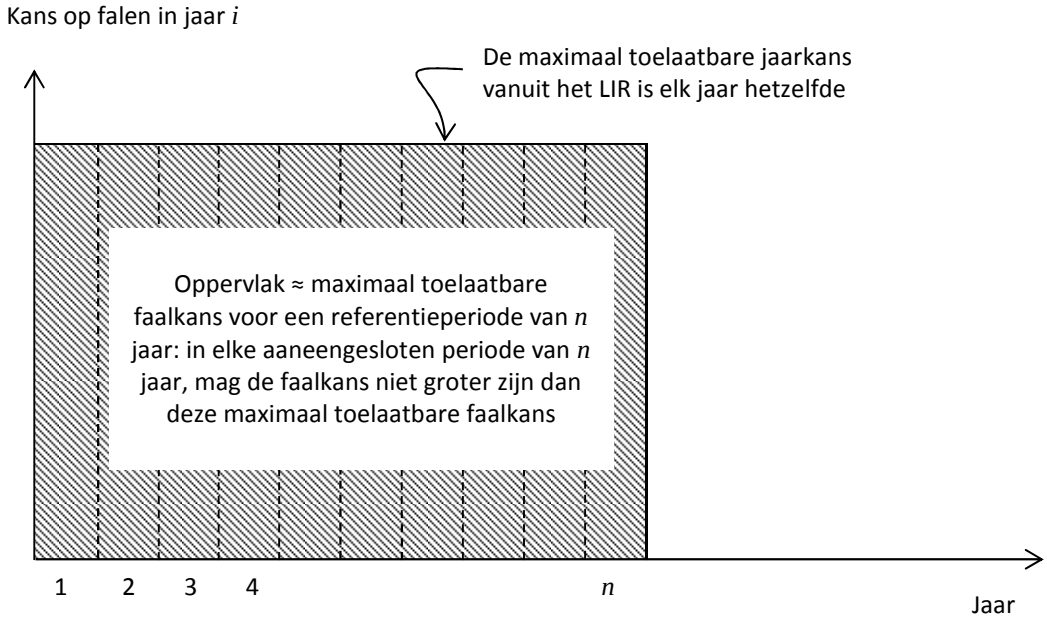
$P_{eis,1}$ De maximaal toelaatbare faalkans voor een referentieperiode van 1 jaar.

Opgemerkt wordt dat de faalkanseis op jaarbasis ($P_{eis,1}$) geheel los staat van eventuele correlaties in de tijd of veranderingen van de belasting of de sterkte, anders dan de economisch optimale faalkans per jaar.

Voor kleine faalkansen kan vergelijking (7.4.1) als volgt worden benaderd:

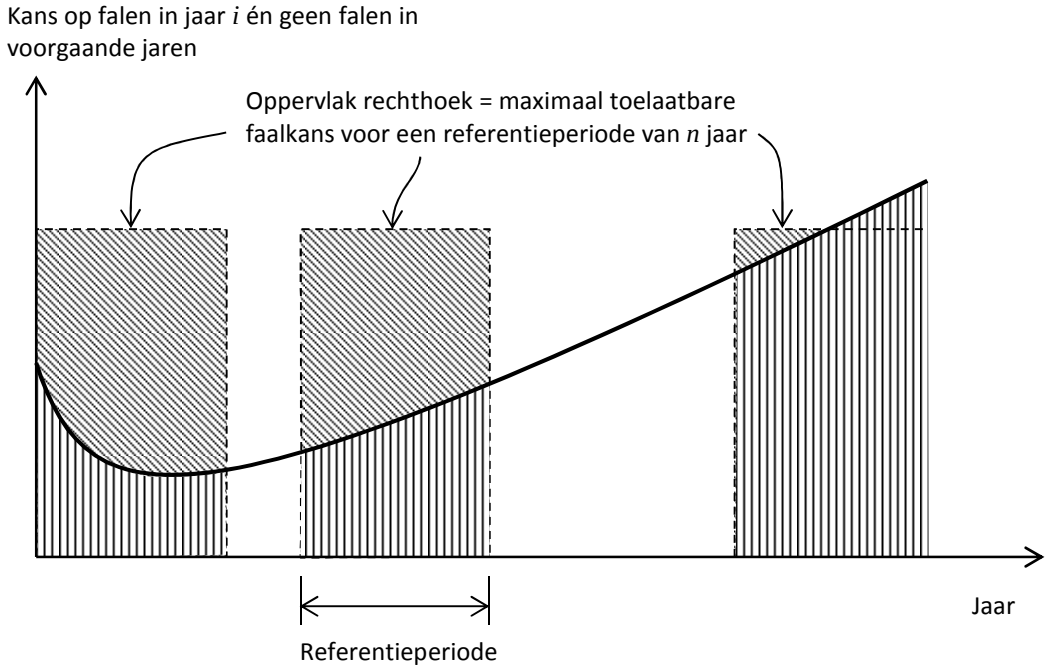
$$P_{eis,n} \approx n \cdot P_{eis,1} \tag{7.4.2}$$

De betekenis van deze faalkanseis is schematisch weergegeven in Figuur 23. De maximaal toelaatbare faalkans voor de referentieperiode van *n* jaar is bij zeer goede benadering gelijk aan het gearceerde oppervlak.



Figuur 23 De relatie tussen de maximaal toelaatbare faalkans per jaar en de maximaal toelaatbare faalkans voor een grotere referentieperiode bij betrouwbaarheidseisen die berusten op het LIR.

In elke aaneengesloten periode ter grootte van de referentieperiode moet de kans op falen kleiner zijn dan de faalkanseis. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 24 voor een geval waarin er sprake is van correlaties tussen de jaren en een in de tijd stijgende belasting en/of een afnemende sterkte (zie het kwadrant B-D in Figuur 21).



Figuur 24. Schematische weergave van de betekenis van een betrouwbaarheidseis voor een referentieperiode van *n* jaar (bijv. 10 jaar) bij een (rest)levensduur groter dan *n* jaar

(bijv. 50 jaar). Het verticaal gestreepte oppervlak is steeds gelijk aan de kans op falen in de bewuste periode. In dit voorbeeld is de faalkans in de laatste levensjaren maatgevend: in de eerdere levensjaren wordt ruimschoots aan de betrouwbaarheids-eis voldaan.

In Tabel 12 is aangegeven welke betrouwbaarheidseisen volgen uit de voorgestelde aanpak bij normen die op het LIR zijn gebaseerd. Dat is gedaan voor referentieperiodes van 1 en 10 jaar (zie paragraaf 7.1).

Tabel 12. Betrouwbaarheidseisen (minimale betrouwbaarheidsindices) voor het constructief falen van constructieonderdelen, voor verschillende referentieperiodes, wanneer de norm is gebaseerd is op het LIR

Referentieperiode (jaar)	**Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)**				
	1/300	**1/1000**	**1/3000**	**1/10000**	**1/30000**
1	4,24	4,50	4,73	4,97	5,18
10	3,69	3,99	4,24	4,50	4,73

Als voorbeeld is hier weergegeven hoe bij een referentieperiode van 10 jaar en een maximaal toelaatbare overstromingskans van 1/1000 per jaar de betreffende β-waarde (3.99) is berekend. Zie paragraaf 7.2 voor de omrekening van de maximaal toelaatbare overstromingskans naar de faalkanseis voor een constructie-onderdeel.

$$\beta_{10} = \Phi^{-1}\{P_{eis,n}\} \approx \Phi^{-1}\{10 \cdot (0{,}02/6) \cdot (1/1000)\} = 3{,}99 \qquad (7.4.3)$$

7.5 De referentieperiode in de huidige waterbouwkundige praktijk

In de toets- en ontwerppraktijk bij dijken en duinen wordt op dit moment gewerkt met betrouwbaarheidseisen op jaarbasis, ofwel: met een referentieperiode van 1 jaar. In de huidige Leidraad Kunstwerken is echter een levensduurfactor van 10 jaar opgenomen. Deze heeft de betekenis van een referentieperiode van 10 jaar.

De referentieperiode van 10 jaar is geïntroduceerd om de volgende redenen. Bij grote correlatie tussen de jaren, een stationaire belasting en een constante sterkte(zie Figuur 21, rechts bovenin) is de faalkans in de eerste paar jaren het grootst. Dit is vooral het geval bij een constructie die wordt belast door een dominante niet-tijdsafhankelijk belasting zoals het eigen gewicht of een constant verval. Deze constructie heeft alleen in het eerste jaar een wezenlijke faalkans maar de rest van de levensduur is de faalkans in ieder jaar zeer klein. Bezien voor een langere periode is de faalkans gemiddeld kleiner dan de faalkans in het eerste levensjaar.

Een norm uit de Waterwet kan worden geïnterpreteerd als een eis die voor ieder jaar afzonderlijk geldt en waaraan in elk jaar afzonderlijk moet worden voldaan. We komen dan echter op de volgende wonderlijke figuur:

- Constructie A heeft in jaar 1 een faalkans van 2 maal de norm en verder 49 jaar een faalkans 0.
- Constructie B heeft 50 jaar lang elk jaar een faalkans gelijk aan de norm.

In totaal heeft A dus een faalkans gelijk aan 2 x norm en B een faalkans gelijk aan 50 x norm. Maar constructie B mag wel en A niet volgens een strikte interpretatie van de Waterwet. Dit werd destijds in de TAW onlogisch en oneconomisch gevonden. Het lijkt beter het getal in de wet op te vatten als een maximaal aanvaardbaar gemiddelde en er vervolgens een toegestane middelingsperiode aan

te koppelen. Daar is uiteindelijk de periode van 10 jaar voor uit de bus gekomen. De achtergrond is dat de middelingsperiode relatief klein moet zijn ten opzichte van een mensenleven.
Bij de bepaling van een faalkanseis voor een referentieperiode van 10 jaar is in de huidige Leidraad Kunstwerken uitgegaan van gelijke jaarkansen en onafhankelijkheid tussen de jaren. Deze omrekenmethode is identiek aan de aanpak die in paragraaf 7.4 is geschetst, voor betrouwbaarheidseisen die berusten op het LIR.

Opgemerkt wordt dat het bovenstaande in deze studie opnieuw tegen het licht is gehouden op basis van volledig probabilistische berekeningen zonder gebruik van standaard α-waarden, zie hoofdstuk 8. Hierbij is gevonden dat, bij hoogwaterkerende constructies in de primaire keringen, de correlatie tussen de jaren niet zodanig groot is dat de invloed van de introductie van een referentieperiode van 10 jaar veel invloed heeft. Ook zal blijken dat juist de laatste jaren van de levensduur maatgevend zijn in verband met de in de praktijk gebruikelijke toename van de belasting en afname van de sterkte.

7.6 Conclusie en discussie

De wijze waarop een overstromingskansnorm op jaarbasis moet worden omgerekend naar een betrouwbaarheidseis voor een grotere referentieperiode is afhankelijk van de vraag of de norm wordt gedomineerd door de MKBA of het LIR. Ook de maximaal aan te houden referentieperiode is hiervan afhankelijk. De uitgangspunten bij de omrekening van een norm die is gebaseerd op het LIR (gelijke jaarkansen en onafhankelijkheid tussen de jaren; referentieperiode 1 of 10 jaar) zijn identiek aan die uit de Leidraad Kunstwerken.

Het belang van de verschillen tussen de uitgangspunten bij de omrekening van overstromingskansnormen per jaar naar betrouwbaarheidseisen voor grotere referentieperiodes blijkt uit de verschillen tussen Tabel 11 en Tabel 12. Vanwege deze verschillen is niet mogelijk om in algemene zin aan te geven hoe de normen uit de Waterwet moeten worden omgerekend naar faalkanseisen voor een referentieperiode groter dan 1 jaar. In theorie betekent dit dat er twee verschillende referentieperiodes beschouwd zouden moeten worden bij een ontwerp op basis van de Waterwet. Ter illustratie: Als de ontwerplevensduur 50 jaar is, dan volgt vanuit economisch oogpunt β_{eis}=3,72 voor een referentieperiode van 50 jaar (Tabel 11). Vanuit het oogpunt van het LIR volgt echter β_{eis}=3,99 voor een referentieperiode van 10 jaar. Welke van deze eisen maatgevend is, is niet direct te zeggen.

In het navolgende hoofdstuk wordt daarom onderzocht wat de praktische betekenis is van de verschillen tussen de betrouwbaarheidseisen uit Tabel 11 en Tabel 12. Er zal duidelijk worden gemaakt dat het voor de afleiding van partiële factoren in de praktijk niet uitmaakt of een overstromingskansnorm door de MKBA of door het LIR wordt gedicteerd. Dat betekent dat bij elke norm uit de Waterwet gedaan kan worden alsof de MKBA maatgevend is. De betrouwbaarheidseisen uit de Waterwet en het Bouwbesluit zijn dan voor dezelfde referentieperiodes te geven (nl. 50 of 100 jaar), zodat een directe getalsmatige vergelijking van de eisen uit de Waterwet en het Bouwbesluit mogelijk is. Op basis van dit gegeven wordt in hoofdstuk 9 een praktisch voorstel gedaan voor de aan te houden betrouwbaarheidseisen bij het afleiden van partiële factoren.

8 De praktische betekenis van grotere referentieperiodes

In hoofdstuk 7 is gesteld dat de wijze waarop een overstromingskansnorm op jaarbasis dient te worden omgerekend naar een grotere referentieperiode afhankelijk is van de vraag of de norm wordt gedicteerd door de MKBA of de LIR-eis. Ook de maximaal aan te houden referentieperiode is hiervan afhankelijk. In dit hoofdstuk wordt aangegeven in hoeverre dit onderscheid van praktische betekenis is. Dit wordt gedaan door de vertaling te maken naar een semi-probabilistisch voorschrift voor de beoordeling van de constructie-onderdelen, zoals dat eerder in de Leidraad Kunstwerken is gedaan.

8.1 De vaststelling van rekenwaarden: theorie

De faalkans voor een bepaalde referentieperiode wordt pas wezenlijk beïnvloed door correlaties in het tijdsdomein wanneer deze correlaties zeer sterk zijn. Dat is als volgt in te zien. Stel een constructie kan falen in jaar 1 of in jaar 2. Voor de kans op falen in de gehele periode van 2 jaar kan dan worden geschreven:

$$P(Z<0) = P(Z_1<0 \text{ of } Z_2 <0) \qquad (8.1.1)$$

Waarin:
Z_1 Grenstoestandfunctie voor jaar 1
Z_2 Grenstoestandfunctie voor jaar 2

Dit is vergelijkbaar met de faalkans van een seriesysteem dat bestaat uit twee elementen.

De faalkans voor de gehele periode van 2 jaar $P(Z<0)$ is bij benadering gelijk aan $P(Z_1<0)+P(Z_2<0)$, tenzij de correlatie tussen Z_1 en Z_2 zeer groot is. Pas als de correlatiecoefficient tussen Z_1 en Z_2 ($\rho_{Z1,Z2}$) groter is dan bijv. 0,85 kan de faalkans $P(Z<0)$ wezenlijk kleiner worden dan $P(Z_1<0)+P(Z_2<0)$. Dit wordt ook wel het “hockeystickeffect” genoemd.

Een correlatiecoëfficiënt groter dan 0,85 veronderstelt dat som van de gekwadrateerde invloedscoëfficiënten van de in de tijd gecorreleerde stochasten kleiner is dan 0,15. De invloedscoëfficiënt van de in de tijd variabele belasting zou dan kleiner moeten zijn dan $\sqrt{0,15}=0,39$. Hoewel dergelijk kleine invloedscoëfficiënten mogelijk zijn, zal dat niet overal gelden. Ter illustratie: in VNK2 zijn voor constructief falen veelal invloedscoëfficiënten voor de belasting rond 0,9 gevonden. Dat geeft aan dat de onzekerheid ten aanzien van de in de tijd variabele hydraulische belasting bij waterkerende constructies vaak dominant is.

Pas als het relatieve belang van de onzekerheid over de in de tijd variërende belasting zeer klein wordt, zal het hanteren van een grotere referentieperiode tot kleinere faalkansen en dus tot wezenlijk lagere veiligheidsfactoren leiden. Het zou echter weinig prudent zijn om op basis hiervan *in algemene zin* voor lagere veiligheidsfactoren te kiezen.

Het bovenstaande betekent dat het op grond van de betrouwbaarheidstheorie is te verwachten dat het voor de afleiding van partiële factoren weinig zal uitmaken of wordt gerekend met referentieperiodes van bijvoorbeeld 10 of 50 jaar (zoals is voorgesteld bij overstromingskansnormen die resp. door het LIR of de MKBA worden gedicteerd). In het navolgende wordt dit geïllustreerd aan de hand van enkele berekeningen.

8.2 De vaststelling van rekenwaarden: van theorie naar praktijk

8.2.1 Aanpak huidige Leidraad Kunstwerken

In de huidige Leidraad Kunstwerken is een totale belastingfactor gegeven die dient te worden toegepast op de waterstandsverschildruk bij de maatgevende hoogwaterstand (MHW) (recent is ook een werkwijze met ontwerpbelastingen voorgesteld, zie Calle, 2012b). Deze totale belastingfactor is opgebouwd uit de volgende twee componenten:

1. een correctie op de waterstandstandsverschildruk bij het MHW; deze correctie is gelijk aan het quotiënt van de ontwerppuntwaarde van de waterstandsverschildruk en de waterstandstandsverschildruk bij het MHW.
2. een correctie op de materiaalfactoren in NEN 6700; deze correctie is gelijk aan het quotiënt van de ontwerppuntwaarde van de sterkte en de rekenwaarde volgens NEN 6700. De sterkte is lognormaal verdeeld, met een variatiecoëfficiënt van 0,2.

Bij het kwantificeren van deze correcties zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. Bij de afleiding van de partiële factoren uit de Leidraad Kunstwerken is gebruik gemaakt van ISO-gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten: α_S=-0,7 en α_R=0,8. Deze waarden zijn niet gebonden aan een specifieke referentieperiode, hoewel dat in theorie wel zo zou moeten zijn.
2. Er is uitgegaan van een referentieperiode van 10 jaar (bij het toepassen van de eisen uit de Waterwet; nevenvoorwaarden uit de oude TGB normen of Eurocode zijn voor het betoog in dit hoofdstuk niet relevant).
3. Bij de afleiding van veiligheidsfactoren is uitgegaan van een stationaire belastingsituatie, die wordt gekenmerkt door de belastingsituatie in het laatste levensjaar. In de ontwerppraktijk wordt het MHW bepaald op basis van de belastingverdeling waarin de zeespiegelstijging tot het laatste levensjaar is verwerkt evenals een robuustheidstoeslag (=verhoging waterstand met een tiental centimeters en een verhoging van de golfbelasting met 10%).

Op basis van het bovenstaande geldt voor de totale belastingfactor (zie bijv. de huidige Leidraad Kunstwerken):

$$\gamma_{S,tot} = \gamma_S \gamma_{R,corr} = \frac{u - B\log\left(\Phi\left(\alpha_S \beta_N\right)/f_N\right) - h_{bi}}{u - B\log\left(P_{norm}\right) - h_{bi}} \mathrm{e}^{\left(\alpha_R(\beta_N - 3.8)\sqrt{\ln(1+V_R^2)}\right)} \tag{8.2.1}$$

ofwel (met $u'=u-h_{bi}$):

$$\gamma_{S,tot} = \frac{1 - \frac{B}{u'}\log\left(\Phi\left(\alpha_S \beta_N\right)/f_N\right)}{1 - \frac{B}{u'} - B\log\left(P_{norm}\right)} \mathrm{e}^{\left(\alpha_R(\beta_N - 3.8)\sqrt{\ln(1+V_R^2)}\right)} \tag{8.2.2}$$

met:

$$\beta_N = -\Phi^{-1}(f_N P_{norm}) \tag{8.2.3}$$

waarin:

$\gamma_{S,tot}$	Totale belastingfactor op de waterstandstandsverschildruk bij MHW
γ_S	Belastingfactor op de waterstandstandsverschildruk bij MHW
$\gamma_{R,corr}$	Correctiefactor op materiaalfactoren Eurocode
β_N	Vereiste betrouwbaarheidsindex voor een referentieperiode van *N* jaar
f_N	Referentieperiode
α_S	Invloedscoëfficiënt belasting
α_R	Invloedscoëfficiënt sterkte
B	Decimeringshoogte waterstand in het lage frequentiegebied
u	Liggingsparameter van de Gumbelverdeling. De liggingparameter is de waterstand die met een kans van 0,63 per jaar wordt overschreden. Er geldt: u=MHW + B*log(*norm*)
h_{bi}	Binnenwaterstand
P_{norm}	Overstromingskansnorm (deze is in Calle (2012a) getalsmatig gelijk gesteld aan de vigerende overschrijdingskansnorm)
V_R	Variatiecoëfficiënt sterkte

Bij een betrouwbaarheidseis voor een referentieperiode van 10 jaar moet de faalkans in elke aaneengesloten periode van 10 jaar kleiner zijn dan de eis. In de praktijk zullen de eerste en de laatste 10 jaar maatgevend zijn. Vergelijking (8.2.1) is gebaseerd op de pragmatische aanname dat de belasting stationair is en de belastingverdeling elk jaar gelijk is aan die in het laatste levensjaar. In dat geval zijn de eerste 10 jaar maatgevend omdat de belasting in het laatste levensjaar het grootst is. Hierdoor wordt het begin van de badkuipkromme (conservatief) omhoog gebracht.

8.2.2 Voorgestelde aanpak

In hoofdstuk 7 is gesteld dat de methode voor de omrekening van een faalkanseis per jaar naar een faalkanseis voor een grotere referentieperiode afhankelijk is van de vraag of de norm wordt gedicteerd door de MKBA of de LIR-eis:

1. Als de MKBA maatgevend is voor de normstelling, dan mag de referentieperiode gelijk worden gesteld aan de ontwerplevensduur, teneinde een zo groot mogelijk gunstig effect van correlaties in de tijd mee te kunnen nemen. Er dient rekening te worden gehouden met het tijdverloop van de optimale faalkans.
2. Als het LIR maatgevend is voor de normstelling, dan kan worden getwist of de referentieperiode gelijk aan 1 jaar moet zijn, of dat deze mag worden verruimd tot bijv. 10 jaar. In het navolgende wordt niet nader ingegaan op deze principiële discussie omdat zal worden getoond dat er in de praktijk nauwelijks verschillen optreden (bij waterkeringen met een dominante variabele belasting). Bij een referentieperiode groter dan 1 jaar dient te worden uitgegaan van gelijke jaarkansen.

Voor verdere details wordt verwezen naar hoofdstuk 7.

Voor elk van de bovengenoemde gevallen kunnen de rekenwaarden van de sterkte en de belasting worden bepaald. Dat dient te gebeuren op basis van de betrouwbaarheidsindex voor de referentieperiode en de bijbehorende invloedscoëfficiënten van de sterkte en de belasting. Desgewenst kan op basis van

deze rekenwaarden wederom een totale belastingfactor op de waterstandstandsverschildruk bij het MHW worden berekend, volgens:

$$\gamma_{S,tot} = \gamma_S \gamma_{R,corr} = \frac{S_d}{S_{MHW}} \frac{R_{d,EC}}{R_d} \tag{8.2.4}$$

waarin:

$\gamma_{S,tot}$	Totale belastingfactor op de waterstandstandsverschildruk bij MHW (in het MHW is de toename van de belasting tijdens de levensduur verwerkt)
γ_S	Belastingfactor op de waterstandstandsverschildruk bij MHW
$\gamma_{R,corr}$	Correctiefactor op materiaalfactoren Eurocode
S_d	Rekenwaarde van de belasting (idealiter gelijk aan de ontwerppuntwaarde)
S_{MHW}	Karakteristieke waarde van de belasting uitgaande van het MHW
R_d	Rekenwaarde van de sterkte (gelijk aan de ontwerppuntwaarde)
$R_{d,EC}$	Rekenwaarde van de sterkte volgens de Eurocode

De termen in bovenstaande formule zullen bepaald moeten worden middels een probabilistische berekening.

Het MHW wordt in bovenstaande formule bepaald in het laatste levensjaar.

8.2.3 *Case study: vergelijking aanpak Leidraad Kunstwerken met voorgestelde aanpak*

Voor verschillende gevallen is volgens de aanpak uit de Leidraad Kunstwerken en de voorgestelde aanpak de totale belastingfactor berekend. Ook is steeds de totale belastingfactor berekend als de kans $P(Z_i<0)$ in het laatste levensjaar gelijk is aan de van de norm afgeleide faalkanseis per jaar (dit is de ontwerppraktijk bij dijken). De toevoeging "$P(Z_i<0)$" dient om te benadrukken dat het hierbij *niet* gaat over de kans op falen in het jaar *i* èn (geen falen in de voorgaande jaren. Deze laatstgenoemde kans, de kans $P(Z_i<0 \cap Z_{i-1}>0 \cap Z_{i-2}>0 \cap Z_{i-...}>0)$, is de kans dat de constructie daadwerkelijk faalt in jaar *i* (zie ook bijlage B).

Bij het toepassen van de methode uit de Leidraad Kunstwerken en de voorgestelde aanpak is voor elke aaneengesloten periode (gelijk aan de referentieperiode) gekeken of de faalkans groter is dan de faalkanseis. De faalkans is steeds de kans op falen in de beschouwde periode èn geen falen in de daaraan voorafgaande periode (zie ook Figuur 21). Voor verdere details over de achtergronden van de berekeningen wordt verwezen naar bijlage C.

Bij de berekeningen zijn de volgende uitgangspunten gehanteerd:

1. Sterkte: lognormaal verdeeld met variatiecoëfficiënt van 0,2.
2. Belasting: exponentieel verdeeld (geeft dezelfde uitkomst als een Gumbelverdeling).
3. De materiaalfactoren uit de Eurocode zijn afgeleid bij een ISO-gestandaardiseerde invloedscoëfficiënt van 0,8, een basis-betrouwbaarheidsniveau β=3,8 en een variatiecoëfficiënt van 0,2.
4. De ontwerplevensduur is 50 jaar. Dit betekent dat bij de bepaling van het MHW met het effect van 50 jaar zeespiegelrijzing e.d. rekening gehouden is. Aangenomen is dat de overschrijdingskansen van de extreme waterstanden elk jaar met een factor 1,023 per jaar toenemen hetgeen correspondeert met 1 decimeringhoogte zeespiegelstijging over 100 jaar (zie ook paragraaf 7.3).

5. De maximaal toelaatbare faalkans per jaar voor een constructieonderdeel is een factor 6/0,02=300 kleiner dan de getalswaarde van de norm (zie ook paragraaf 7.2).

De berekeningen zijn toegelicht in Bijlage C.

De berekeningsresultaten zijn getoond in Tabel 13 en 14. De weergegeven α-factoren volgen uit de probabilistische berekeningen. Benadrukt wordt dat de getoonde veiligheidsfactoren alleen onderling vergeleken kunnen worden. Hun absolute waarden hebben geen betekenis; het gaat hier om de effecten van de verschillende eisen in relatieve zin. Er zal nog een aparte kalibratie van partiële moeten plaatsvinden.

De term *B/u'* (zie vergelijking 7.1.2) kan gezien worden als een maat voor de verhouding tussen het statische deel van de belasting (minimaal aanwezig verval) en het variabele deel (waterstandsverschillen).

Tabel 13. Bepaling totale belastingfactor voor B/u'=0.5, voor een decimeringhoogte (B) van 0,5m

Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)	Aanpak	Referentie-periode (jaar)	Betrouwbaarheids-index horend bij referentieperiode	Invloeds-coëfficiënt belasting α_S	Invloeds-coëfficiënt sterkte α_R	Belasting-factor γ_S	Correctiefactor op materiaal-factor $\gamma_{R,corr}$	Totale belastingfactor $\gamma_{S,tot}=\gamma_S\ \gamma_{R,corr}$
1/1.000	Methode Leidraad Kunstwerken	1	4,50	-0,7	0,8	1,02	1,12	**1,14** (1,140)
		10	3,99	-0,7	0,8	1,12	1,03	**1,15** (1,150)
	Voorgestelde aanpak bij MKBA-eis (oplopende jaarkans) zie Tabel 11	50	3,72	-0,75	0,67	1,21	0,90	**1,08** (1,080)
	Voorgestelde aanpak bij LIR-eis (constante jaarkans), zie Tabel 12	1	4,50	-*	-*	-*	-*	**1,08** (1,076)
		10	3,99	-*	-*	-*	-*	**1,07** (1,068)
	O.b.v. faalkans $P(Z_i<0)$ in laatste levensjaar	1	4,50	-0,82	0,57	1,20	0,91	**1,09** (1,087)
1/10.000	Methode Leidraad Kunstwerken	1	4,97	-0,7	0,8	0,93	1,20	**1,12** (1,124)
		10	4,50	-0,7	0,8	1,02	1,12	**1,14** (1,137)
	Voorgestelde aanpak bij MKBA-eis (oplopende jaarkans), zie Tabel 11	50	4,27	-0,75	0,65	1,11	0,95	**1,06** (1,060)
	Voorgestelde aanpak bij LIR-eis (constante jaarkans), zie Tabel 12	1	4,97	-*	-*	-*	-*	**1,06** (1,056)
		10	4,50	-*	-*	-*	-*	**1,05** (1,049)
	O.b.v. faalkans $P(Z_i<0)$ in laatste levensjaar	1	4,97	-0,82	0,58	1,10	0,97	**1,07** (1,065)

* Het berekenen van (equivalente) invloedscoëfficiënten, en dus ook van losse belastingfactoren en correctiefactoren op de materiaalfactoren, is niet gedaan bij een op het LIR gebaseerde norm. Het blijkt dat in dit geval het laatste jaar of de laatste 10 jaar maatgevend zijn voor de LIR eis. Het gaat dan om de kans op falen in een aaneengesloten periode van 1 of 10 jaar jaar EN geen falen in de voorgaande periode van 49 of 40 jaar. Bij de overige opties speelt deze "EN" geen rol omdat (1) bij de methode uit de Leidraad Kunstwerken is uitgegaan van gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten, (2) bij de voorgestelde aanpak bij MKBA-eisen de referentieperiode gelijk is aan de gehele levensduur (zodat er geen "voorgaande periode" is) en (3) bij de methode op basis van de faalkans $P(Z_i<0)$ uitsluitend wordt gekeken naar de kans op falen in individuele jaren.

Tabel 14. Bepaling totale belastingfactor voor B/u'=2, voor een relatief kleine decimeringhoogte (B) van 0,2m

Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)	Aanpak	Referentie-periode (jaar)	Betrouwbaarheids-index horend bij referentieperiode	Invloeds-coëfficiënt belasting α_S	Invloeds-coëfficiënt sterkte α_R	Belasting-factor γ_S	Correctiefactor op materiaal-factor $\gamma_{R,corr}$	Totale belastingfactor $\gamma_{S,tot}=\gamma_S\ \gamma_{R,corr}$
1/1.000	Methode Leidraad Kunstwerken	1	4,50	-0,7	0,8	1,03	1,12	**1,15**
		10	3,99	-0,7	0,8	1,17	1,03	**1,21**
	Voorgestelde aanpak bij MKBA-eis (oplopende jaarkans), zie Tabel 11	50	3,72	-0,83	0,56	1,42	0,83	**1,18**
	Voorgestelde aanpak bij LIR-eis (constante jaarkans), zie Tabel 12	1	4,50	-*	-*	-*	-*	**1,17**
		10	3,99	-*	-*	-*	-*	**1,17**
	O.b.v. faalkans $P(Z_i<0)$ in laatste levensjaar	1	4,50	-0,88	0,48	1,40	0,84	**1,18**
1/10.000	Methode Leidraad Kunstwerken	1	4,97	-0,7	0,8	0,91	1,20	**1,10**
		10	4,50	-0,7	0,8	1,02	1,12	**1,14**
	Voorgestelde aanpak bij MKBA-eis (oplopende jaarkans), zie Tabel 11	50	4,27	-0,83	0,56	1,26	0,88	**1,11**
	Voorgestelde aanpak bij LIR-eis (constante jaarkans), zie Tabel 12	1	4,97	-*	-*	-*	-*	**1,10**
		10	4,50	-*	-*	-*	-*	**1,10**
	O.b.v. faalkans $P(Z_i<0)$ in laatste levensjaar	1	4,97	-0,87	0,49	1,25	0,89	**1,11**

* Het berekenen van (equivalente) invloedscoëfficiënten, en dus ook van losse belastingfactoren en correctiefactoren op de materiaalfactoren, is niet gedaan bij een op het LIR gebaseerde norm. Het blijkt dat in dit geval het laatste jaar of de laatste 10 jaar maatgevend zijn voor de LIR eis. Het gaat dan om de kans op falen in een aaneengesloten periode van 1 of 10 jaar jaar EN geen falen in de voorgaande periode van 49 of 40 jaar. Bij de overige opties speelt deze "EN" geen rol omdat (1) bij de methode uit de Leidraad Kunstwerken is uitgegaan van gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten, (2) bij de voorgestelde aanpak bij MKBA-eisen de referentieperiode gelijk is aan de gehele levensduur (zodat er geen "voorgaande periode" is) en (3) bij de methode op basis van de faalkans $P(Z_i<0)$ uitsluitend wordt gekeken naar de kans op falen in individuele jaren.

Opgemerkt wordt dat er bij de vergelijking van de totale belastingfactoren conform de aanpak uit de Leidraad Kunstwerken en de voorgestelde aanpak op moet worden gelet dat de ISO-gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten niet gekwadrateerd optellen tot 1, terwijl de berekende invloedscoëfficiënten dat wel steeds doen. Dit verklaart mede waarom de totale belastingfactoren conform de aanpak uit de Leidraad Kunstwerken (LK) relatief groot zijn. Uit de getoonde resultaten mag dus *niet* geconcludeerd worden dat de voorgestelde aanpak tot lagere veiligheidsfactoren leidt. De berekende veiligheidsfactoren met de LK-aanpak kunnen alleen onderling vergeleken worden.

Tabel 13 en 14 bevatten een opvallend resultaat: de totale belastingfactoren die zijn berekend op basis van de LK-aanpak, met vergelijking (8.2.2), zijn voor de beschouwde gevallen *groter* bij *grotere* referentieperiodes; voor kleinere waarden voor B/u' zoals 0,1 of 0,2 zijn de waarden kleiner. Dit feit wordt veroorzaakt door het gebruik van (ISO-gestandaardiseerde) invloedscoëfficiënten die onafhankelijk zijn van de referentieperiode. Er bestaan hierdoor combinaties van het quotiënt *B/u'* en de normhoogte waarbij de totale belastingfactor groter wordt bij een grotere referentieperiode. Volgens de theorie zou dit onmogelijk moeten zijn omdat een grotere referentieperiode ("meer uitmiddeling") nooit ongunstig kan uitwerken. Dat een grotere referentieperiode ongunstig is, is duidelijk onterecht. Dit roept de vraag op of dat niet ook geldt voor eventuele besparingen bij het hanteren van een referentieperiode van 10 jaar in combinatie met gestandaardiseerde invloedscoëfficiënten.

Uit Tabel 13 en 14 blijkt dat de totale belastingfactoren bij de voorgestelde werkwijzen bij normen die worden gedicteerd door de MKBA en het LIR nauwelijks van elkaar verschillen. De vraag of de norm wordt gedicteerd door de MKBA of het LIR blijkt dus nauwelijks van praktische betekenis.

Uit Tabel 13 en 14 blijkt verder dat het ontwerpen op basis van de faalkans $P(Z_i<0)$ in het laatste levensjaar een vergelijkbaar resultaat oplevert als het ontwerpen op basis van referentieperiodes van 50 jaar (als de MKBA-eis maatgevend is) of 1 of 10 jaar (als de LIR-eis maatgevend is).

8.3 Conclusie en discussie

Wanneer rekening wordt gehouden met de veranderingen in invloedscoëfficiënten bij het rekenen met grotere referentieperiodes, dan blijkt de referentieperiode nauwelijks van praktische betekenis voor de afleiding van veiligheidsfactoren.

De volgende methoden voor het afleiden van betrouwbaarheidseisen leiden tot vergelijkbare veiligheidsfactoren/betrouwbaarheidsbeoordelingen:

1. De voorgestelde aanpak voor het bepalen van betrouwbaarheidseisen voor referentieperiodes die gelijk zijn aan de levensduur, er van uitgaande dat de norm door de MKBA wordt gedicteerd.
2. De voorgestelde aanpak voor het bepalen van betrouwbaarheidseisen voor referentieperiodes van 1 of 10 jaar, er van uitgaande dat de norm door de LIR-eis wordt gedicteerd.
3. De huidige aanpak bij dijken, volgens welke de kans $P(Z_i<0)$ in het laatste levensjaar niet groter mag zijn dan de op jaarbasis geformuleerde norm.

9 Integratie betrouwbaarheidseisen Bouwbesluit en Waterwet

9.1 Uitgangspunten

1. Voor de toetsing en het ontwerp van bouwwerken, waaronder waterbouwkundige kunstwerken, wordt in het Bouwbesluit gewerkt met referentieperiodes die groter zijn dan 1 jaar.
2. Over de aan te houden referentieperiode bij het ontwerp van waterkeringen op basis van de nieuwe normen uit de Waterwet is nog geen besluit genomen.
3. Bij de toetsing van alle primaire waterkeringen op basis van de Waterwet, waaronder waterbouwkundige kunstwerken, wordt in het WTI 2017 uitgegaan van een referentieperiode van 1 jaar. Het besluit hierover is reeds genomen.
4. Indien de standaard RWS werkwijze om CC3 generiek van toepassing te verklaren kostbaar blijkt, wordt voorgesteld dat een kunstwerk bij een norm van 1/300 per jaar in CC1 wordt ingedeeld, bij normen van 1/1.000 of 1/3.000 per jaar in CC2 en bij normen van 1/10.000 of 1/30.000 per jaar in CC3. Onder een norm wordt hier een maximaal toelaatbare faalkans per jaar verstaan (geen middenkans of signaalwaarde).

9.2 Bevindingen van deze studie

De hieronder besproken bevindingen en resulterende eisen zijn bedoeld voor het afleiden van veiligheidsfactoren die in brede zin toepasbaar zijn. Bij de afleiding is uitgegaan van tijdsafhankelijke variabele belastingen. Voor bijzondere gevallen, zoals situaties waarbij sterkte en belasting sterk in de tijd zijn gecorreleerd, kan het nodig zijn om terug te gaan tot de basisprincipes waarop de vermelde betrouwbaarheidseisen berusten.

1. Bij de omrekening van een norm op jaarbasis uit de Waterwet naar een betrouwbaarheidseis voor een grotere referentieperiode dient rekening te worden gehouden met de achtergrond van de normstelling:
    a. Als de MKBA maatgevend is, dan mag worden uitgegaan van een referentieperiode die gelijk is aan de levensduur. Er dient daarbij wel rekening te worden gehouden met de ontwikkeling van de optimale faalkans binnen de levensduur die in de MKBA is aangenomen.
    b. Als het LIR maatgevend is, dan dient te worden uitgegaan van een referentieperiode van 1 of 10 jaar en equivalente jaarkansen.
2. De betrouwbaarheidseisen ($\beta_{LIR,1jaar}$, $\beta_{LIR,10jaar}$ en $\beta_{MKBA,50jaar}$) die volgen uit 1a en 1b leveren nagenoeg dezelfde veiligheidsfactoren op binnen realistische parameterranges voor veel voorkomende waterbouwkundige constructies.
3. Gelet op het voorgaande punt mogen de betrouwbaarheidseisen uit het Bouwbesluit, voor een referentieperiode van 50 jaar, direct worden vergeleken met $\beta_{MKBA,\ 50jaar}$. Het resultaat van de vergelijking is getoond in Tabel 15. De betrouwbaarheidsindices voor de Waterwet zijn ontleend aan Tabel 11 en het uitgangspunt hierbij is de voorgestelde indeling in Eurocode gevolgklassen zoals vermeld onder punt 4 van bovenstaande paragraaf.

Tabel 15. Betrouwbaarheidseisen (minimale betrouwbaarheidsindices) voor het constructief falen van constructieonderdelen, voor een referentieperiode van 50 jaar

Oorsprong betrouwbaarheidseis	**Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)**				
	1/300	**1/1000**	**1/3000**	**1/10000**	**1/30000**
Waterwet, 50 jaar	3,4	3,7	4,0	4,3	4,5
Bouwbesluit, 50 jaar	3,3	3,8	3,8	4,3	4,3
Strengste van beide	**3,4**	**3,8**	**4,0**	**4,3**	**4,5**

Alleen bij een norm van 1/1000 per jaar blijkt het Bouwbesluit een fractie strenger te zijn. Voor het gemak kan worden gesteld dat de Waterwet altijd maatgevend is voor ontwerp. Omdat de toetseisen uit het Bouwbesluit aanzienlijk soepeler zijn dan de ontwerpeisen, is de Waterwet ook maatgevend voor de toetsing.

Bij vergelijking van de eisen uit de Waterwet met de betrouwbaarheidsindices voor nieuwbouw uit het Bouwbesluit voor 100 jaar (4,3; 3,8, 3,3 voor respectievelijk CC3, CC2 en CC1) zijn de Bouwbesluit-eisen iets strenger, echter deze verschillen zijn nauwelijks van praktische betekenis. Bij vergelijking van de eisen voor constructies met kortere levensduren dan 50 jaar (en corresponderende referentieperiodes) zijn de eisen vanuit de Waterwet maatgevend, dit geldt zeker voor de toetseisen.

Indien wordt uitgaan van generieke toepassing van CC3 blijven voor de toets van bestaande kunstwerken de eisen uit de Waterwet maatgevend; voor nieuwbouw wordt voor normen van 1/300, 1/1000 en 1/3000 voor langere referentieperiodes echter de CC3-nieuwbouweis uit het Bouwbesluit maatgevend.

4. Voor referentieperiodes die afwijken van 50 jaar (bijvoorbeeld omdat de restlevensduur korter is dan 50 jaar) kan gebruik worden gemaakt van de omrekenmethode voor normen die berusten op de MKBA (Tabel 16, zie ook Tabel 11). Uit punt 2 volgt dat in dat geval de eisen vanuit het LIR een nagenoeg vergelijkbare constructie zullen opleveren. Een aanvullende toets op de LIR-eis is dan ook niet nodig.

Tabel 16. Betrouwbaarheidseisen voor toetsing en ontwerp (minimale betrouwbaarheidsindices) voor het constructief falen van constructieonderdelen, voor verschillende referentieperiodes wanneer niet standaard CC3 van toepassing (zie paragraaf 9.1, punt 4) wordt verklaard.

Referentieperiode (jaar)	**Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)**				
	1/300	**1/1000**	**1/3000**	**1/10000**	**1/30000**
1	4,2	4,5	4,7	5,0	5,2
10	3,7	4,0	4,3	4,5	4,8
15	3,6	3,9	4,2	4,5	4,7
30	3,5	3,8	4,1	4,3	4,6
50	3,4	3,7	4,0	4,3	4,5
100	3,3	3,7	3,9	4,2	4,4

Indien generiek CC3 van toepassing wordt verklaard geldt nog steeds Tabel 16 voor toetsing van bestaande bouw, voor nieuwbouw geldt dan Tabel 17. Te zien is dat dan CC3 (β=4.3) dan vaak maatgevend wordt.

Tabel 17. Betrouwbaarheidseisen voor nieuwbouw (minimale betrouwbaarheidsindices) voor het constructief falen van constructieonderdelen, voor verschillende referentieperiodes als generiek minimaal CC3 van toepassing wordt verklaard

Referentieperiode (jaar)	**Maximaal toelaatbare overstromingskans (per jaar)**				
	1/300	**1/1000**	**1/3000**	**1/10000**	**1/30000**
1	4,3	4,5	4,7	5,0	5,2
10	4,3	4,3	4,3	4,5	4,8
15	4,3	4,3	4,3	4,5	4,7
30	4,3	4,3	4,3	4,3	4,6
50	4,3	4,3	4,3	4,3	4,5
100	4,3	4,3	4,3	4,3	4,4

5. Het toetsen en ontwerpen van constructies op basis van het uitgangspunt dat de faalkans $P(Z_i<0)$ in elk willekeurig jaar kleiner is dan de norm, is per definitie conservatief. Er wordt namelijk geen rekening gehouden met het feit dat in de jaren voorafgaand aan het beschouwde jaar geen falen is opgetreden én er is geen sprake van middeling van de faalkans over verschillende jaren. Bij realistische parameterranges voor veel voorkomende waterbouwkundige constructies is dit conservatisme echter zeer gering. Dit betekent dat het gunstige effect van een grotere referentieperiode in de praktijk zeer gering zal zijn. Als het economisch optimum de norm dicteert wordt het effect van een mogelijk grote referentieperiode (b.v. 50 of 100 jaar) gedempt door het stijgende verloop in de tijd van de economisch optimale faalkans. Als het LIR de norm dicteert mag weliswaar worden uitgegaan van gelijke jaarkansen maar is de referentieperiode begrensd tot 1 of 10 jaar. Het zal voor de afleiding van partiële factoren dus weinig uitmaken welke referentieperiode wordt gekozen.
6. Als de normen uit de Waterwet op bij punt 1 voorgestelde wijze worden omgerekend naar grotere referentieperiodes, dan zal het rekenen met een grotere referentieperiode alleen in uitzonderlijke gevallen een wezenlijke besparing opleveren. Het is, zo beschouwd, een kwestie van smaak of bij het ontwerp op basis van de Waterwet een referentieperiode van 1 jaar wordt aangehouden (zoals in het WTI2017) of een referentieperiode van 50 of 100 jaar (zoals in het Bouwbesluit). De resulterende sterkte zal bij verschillende referentieperiodes nagenoeg gelijk zijn.

Aanbeveling is om bovenstaande methode ook voor grondconstructies (dijken) uit te werken.

10 Referenties

Calle, E.O.F. (2012a). Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode. Activiteit 1: Belastingfactoren bij maatgevende waterstanden. Deltares. 1204875-002.

Calle, E.O.F. (2012b). Afstemming Leidraad Kunstwerken en Eurocode. Activiteit 3: Ontwerpwaarden buitenwaterstanden. Deltares. 1204875-002.

Eijgenraam, C.J.J. (2006). Optimal safety standards for dike-ring areas; CPB Discussion Paper
62, CPB, Den Haag, maart 2006.

Eijgenraam, C.J.J. (2008). Toetsnorm voor waterveiligheid op basis van kosten-batenanalyse. C. Eijgenraam. CPB Memorandum 195.

Deltacommissie (1960). Bijdrage II. Beschouwingen over stormvloeden en getijbeweging. Den Haag.

DPV (2014). Technisch-inhoudelijke uitwerking van eisen aan primaire keringen (DPV 2.2). Werkdocument Deelprogramma Veiligheid. Concept van 31 maart 2014.

Duits, M., Kind, J., Bak, C. (2011). Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21e eeuw. Bijlage C: Wiskundige achtergrond MKBA model. Deltares. 1204144-006-ZWS-0007.

Hasofer, A. M., Lind, N.C. (1974). Exact and Invariant Second-Moment Code Format. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE 100: 111-121.

JCSS Probabilistic Model Code,
http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx

Jongejan, R.B. (2008). How safe is safe enough? The government's response to industrial and flood risks. Proefschrift. Technische Universiteit Delft.

Jonkman, S.N., Jongejan, R.B., Maaskant, B., Kok, M., Vrijling, J.K. (1998). Verkenning Verkenning slachtofferrisico's in het hoogwaterbeschermingsbeleid. Royal Haskoning, HKV Lijn in water, Jongejan RMC.
9T2050.A0/R0002/BJON/SSOM/Rott. 26 juni 2008.

Jonkman, S.N., Van Gelder, P.H.J.M., Vrijling, J.K. (2003). An overview of quantitative risk measures for loss of life and economic damage. Journal of Hazardous Materials, 99(1): 1-30.

Kind, J. et al. (2011). Maatschappelijke kosten-batenanalyse Waterveiligheid 21e Eeuw. 1204144. Deltares, Delft.

Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Ministerie van Economische Zaken (2014). Deltaprogramma 2015. Werk aan de delta. De beslissingen om Nederland veilig en leefbaar te houden.

Steenbergen, R.D.J.M., Huibregtse, J.N. (2013). Intern InfraQuest Tussenrapport: Veiligheidsfilosofie voor ontwerp en toetsen van kunstwerken in waterkeringen. Project IQ-2013-17 RBK-Nat Fase2A: Cluster 1 / IQ-2013-17 RBK-Nat Fase2A. TNO-rapport 2013 R11301.

TAW (1985). Enkele gedachten aangaande een aanvaardbaar risiconiveau in Nederland. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

TAW (1998). Grondslagen voor Waterkeren. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

TAW (2003). Leidraad Kunstwerken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

Thonus, B., Jongejan, R.B. (2009). Berekening van het overstromingsrisico VNK2. Toetsing van methode en advies expertgroep. Projectbureau VNK2. 16 mei 2009.

Van Dantzig, D. (1956). Economic decision problems for flood prevention. Econometrica, 24: 276-287.

Vrijling, J.K., Hengel, W.v., Houben, R.J. (1998). Acceptable risk as a basis for design. Reliability Engineering and System Safety, 59: 141-150.

Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2012). Target reliability as a function of the design working life. International Forum on Engineering Decision Making, 6th IFED Forum, January 26-29, 2012, Lake Louise, Canada.

11 Ondertekening

Delft, 8 mei 2015

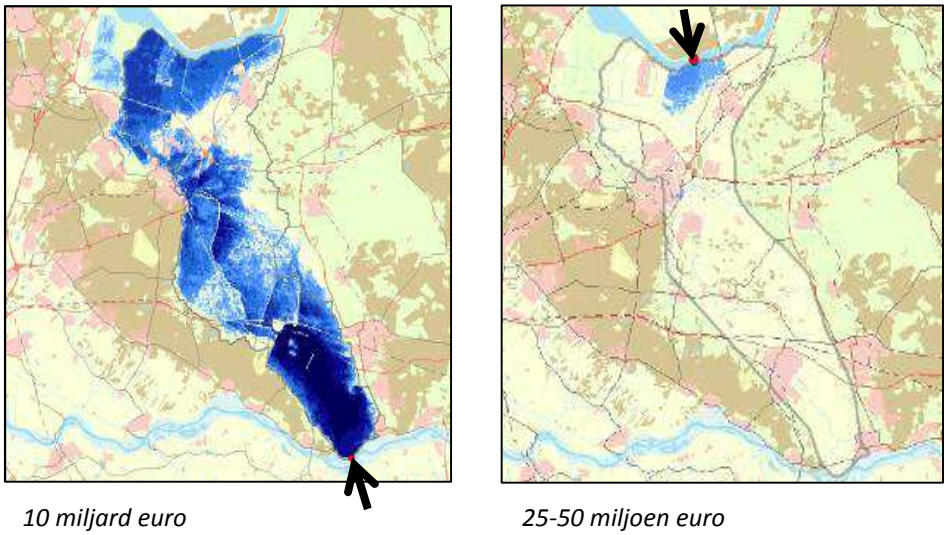
Prof. dr. ir. R.D.J.M. Steenbergen
Auteur

Prof. ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder
Reviewer

Ir. M.D. Stamm
Research manager
Structural Reliability

A Ruimtelijke eenheden bij overstromingskansnormen

De gevolgen van overstromingen zijn soms sterk afhankelijk van de doorbraaklocatie binnen de dijkring. Als dat het geval is, is het efficiënt om voor de verschillende delen van de dijkring verschillende normen te hanteren. Dat maakt het namelijk mogelijk om de kwetsbare delen gericht extra te beschermen, zodat niet overal strenge eisen gehanteerd hoeven te worden. Dit is bijvoorbeeld het geval in de Gelderse Vallei. Dit is momenteel één dijkring waarvoor één norm geldt. Door het hoogteverschil over het dijkringgebied (ca. 10m) zou een doorbraak aan de zuidzijde echter fors grotere gevolgen hebben dan een doorbraak aan de noordzijde (Figuur 25). De economisch optimale norm aan de zuidzijde is dan ook aanzienlijk strenger dan aan de noordzijde.



10 miljard euro *25-50 miljoen euro*

100-1.000 slachtoffers *0-5 slachtoffers*

Figuur 25. Door de helling van de Gelderse Vallei stroomt er bij een doorbraak van de Grebbedijk in het zuiden veel meer water het gebied in dan bij een dijkdoorbraak aan de noordzijde (bron: VNK2).

Bij het opstellen van de trajectindeling in het Deltadeelprogramma Veiligheid (DPV) is gekeken naar:

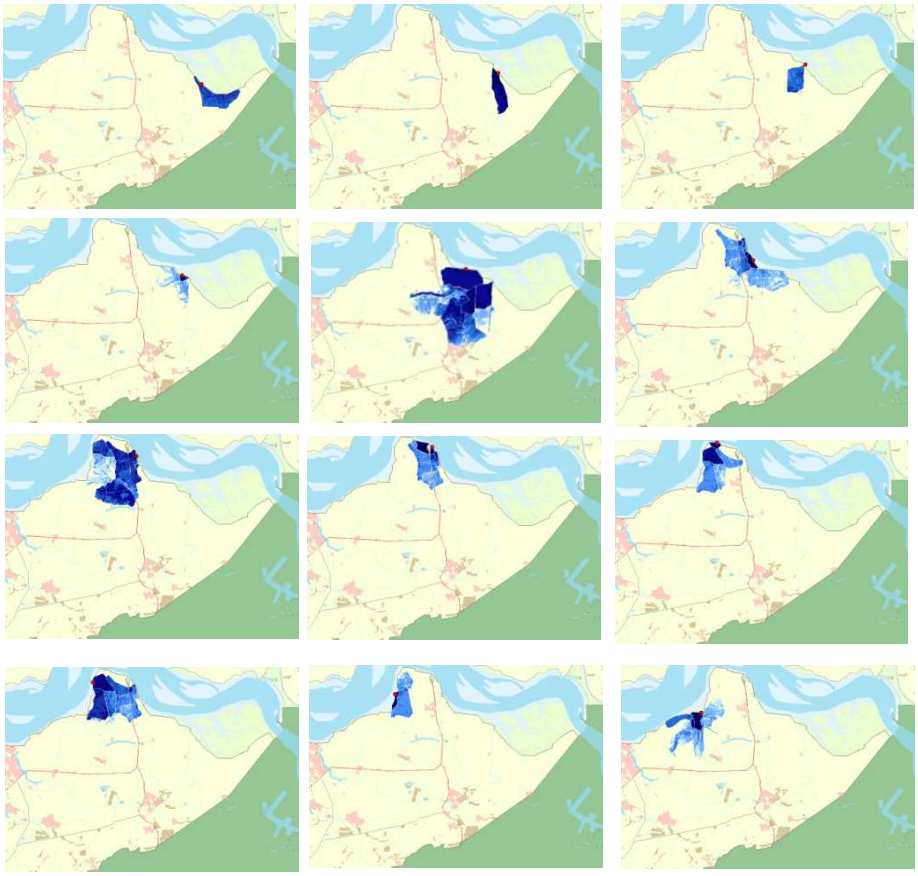
1. De omvang van de gevolgen bij een doorbraak
2. Het overstroomd gebied bij een doorbraak
3. De lengte van het normtraject
4. Het type waterkering: hard/zacht

Ad 1. De omvang van de gevolgen bij een doorbraak

Bij grote veranderingen in de economische schade bij een doorbraak (groter dan een factor 5) zijn trajectgrenzen gedefinieerd. Dergelijke verschillen zijn van wezenlijke invloed zijn op de economisch optimale normen volgens de MKBA (gesteld dat de versterkingskosten ongeveer gelijk zijn).

Ad 2. Overstroomd gebied bij een doorbraak
Soms is de schade bij twee doorbraaklocaties weliswaar (ongeveer) hetzelfde, maar wordt bij overstromingen een ander gebied getroffen. De relatie tussen het normtraject en het beschermde gebied is met name van belang voor de eis dat het LIR kleiner moet zijn dan 10^{-5} per jaar. Hoe duidelijker de relatie tussen een normtraject en het beschermde gebied is, des te gemakkelijker de eis ten aanzien van het LIR kan worden vertaald naar een norm voor het normtraject.

Ad 3. De lengte van het normtraject
Om een versnipperd beeld te voorkomen is afgezien van het definiëren van al te korte normtrajecten. In principe zou afgedaald kunnen worden tot het ruimtelijke schaalniveau dat in VNK2 wordt aangehouden. In VNK2 wordt zeer verfijnd gekeken naar de invloed van de breslocatie op het overstromingsrisico en worden de dijkringen onderverdeeld in gemiddeld 10 delen. Het hanteren van het schaalniveau uit VNK2 zou echter leiden tot een versnipperd beeld. Bovendien zou de normering dan steeds sterker leunen op aannamen in de berekeningen van de gevolgen van overstromingen. Door bij de normering van een groter schaalniveau uit te gaan, worden toevallige verstoringen minder belangrijk.



Figuur 26. Voorbeelden van verschillen in de getroffen gebieden in het oostelijk deel van dijkring Zeeuws Vlaanderen (maximale waterdieptes bij doorbraken bij het toetspeil).

Met name in de zuidwestelijke delta zou het strikt volgen van de vorige twee aspecten tot een zeer veel kleine normtrajecten leiden. In dit gebied zijn veel (oude)

keringen in de dijkringgebieden aanwezig zijn (Figuur 26). In dit soort gebieden fluctueert de schade en het getroffen gebied bij een doorbraak ook vaak sterk, waarbij er wel clusters van breslocaties zijn te onderscheiden waarvoor de gevolgen grosso modo groter zijn dan elders. Bij het opstellen van de trajectindelingen is naar dergelijke clusters gekeken om een al te grote versnippering te voorkomen.

Ad 4. Hard/zacht
De zandige kust is afgezonderd in aparte normtrajecten. Dit is enerzijds gedaan omdat de kosten van versterking van de zandige kust anders zijn dan van de harde keringen. Anderzijds wordt de veiligheid van de zandige kust geborgd in het kader van de kustlijnzorg. Door aparte normtrajecten te definiëren voor de zandige kust kan gemakkelijker de relatie met de kustlijnzorg worden gelegd.

De trajectindeling die op basis van de bovengenoemde vier criteria is opgesteld is weergegeven in Figuur 27. Benadrukt wordt dat het hier gaat om de trajectindeling zoals die is opgesteld in het kader van de zg. Technisch-inhoudelijke uitwerking van het Deltadeelprogramma Veiligheid (DPV, 2014; Ministerie I&M en EZ, 2014). Deze trajectindeling is nog niet formeel vastgesteld en kan mogelijk nog wijzigen.

Figuur 27. Trajectindeling uit Technisch-inhoudelijke uitwerking DPV (bron: DPV, 2014, versie maart 2014).

B De definitie van de faalkans per jaar

Onder een faalkans per jaar kunnen de volgende kansen worden verstaan:

1. De kans op falen in jaar *i en* geen falen in de jaren daarvoor, ofwel:

   $P_f = P\left(Z_i < 0 \cap Z_{0\text{-}i} > 0\right) = P(Z_i<0|Z_{0\text{-}i}>0).P(Z_{0\text{-}i}>0) = (\text{formule B2}).P(Z_{0\text{-}i}>0)$ (B1)

   Waarin:
   Z_i Grenstoestandfunctie voor jaar *i*
   $Z_{0\text{-}i}$ Grenstoestandfunctie voor de periode voorafgaand aan jaar *i*

2. De kans op falen in jaar *i gegeven* geen falen in de jaren daarvoor, ofwel:

   $$P_f = P\left(Z_i < 0 \middle| Z_{0\text{-}i} > 0\right) \quad \text{(B2)}$$

3. De kans op falen in jaar *i ongeacht* het al dan niet falen in de jaren daarvoor

   $$P_f = P\left(Z_i < 0\right) \quad \text{(B3)}$$

In de MKBA-procedures die zijn besproken in paragraaf 5.2 is steeds gerekend met de faalkansen per jaar zoals gegeven door vergelijking (B3). De impliciete, onderliggende aanname in de besproken optimalisatieprocedures is dat de schade na elk faalgeval (instorting of overstroming) wordt hersteld naar de situatie ten tijde van het faalgeval. In een langjarige periode kunnen zich dus meerdere faalgevallen voordoen.

Een badkruipkromme beschrijft het zg. voorwaardelijke faaltempo van een bepaalde constructie (vergelijking B2). Een constructie kan slechts 1 keer falen. Het oppervlak onder een badkuipkromme is niet precies gelijk aan de totale faalkans in de beschouwde periode.
Dat is wel zo voor een figuur waarin op de verticale as de kans op falen in jaar *i en* geen falen in voorgaande jaren (cf. vergelijking (B1). Deze jaarkans is namelijk de kans dat een bepaalde constructie in een bepaald jaar zal falen.

De verschillen tussen de bovengenoemde drie typen jaar kansen zal verwaarloosbaar klein zijn bij kleine jaarkansen en zwakke correlaties in het tijdsdomein. Bij alleen kleine jaarkansen kunnen de jaarkansen volgens (B3) sterk afwijken van de jaarkansen volgens vergelijkingen (B1) en (B2). Bij kleine jaarkansen zullen de verschillen tussen de jaarkansen volgens vergelijkingen (B2) en (B3) echter gering blijven.

C Toelichting op de case study

C.1 Rekenstappen

De getalswaarden uit Tabel 13 en 14 zijn als volgt bepaald:

1. De getallen horend bij de “Methode Leidraad Kunstwerken” zijn bepaald door het invullen van vergelijking (8.2.2) De getoonde invloedscoëfficiënten van de sterkte en de belasting zijn de ISO-gestandaardiseerde waarden: deze zijn niet berekend maar als uitgangspunt van de berekeningen gehanteerd.

2. De getallen horend bij “Voorgestelde aanpak bij MKBA-eis” zijn berekend volgens de volgende procedure:
   2.1. Bepaal de faalkanseis voor de referentieperiode van 50 jaar, rekening houdend met de faalkansbegroting, het lengte-effect en het tijdverloop van de optimale faalkans in de kosten-batenanalyse (zie ook Tabel 11) .
   2.2. Bepaal de kansverdeling van de grootste belasting in een periode van 50 jaar, rekening houdend met het effect van o.a. zeespiegelstijging. De wiskundige formuleringen zijn in paragraaf C2 gegeven.
   2.3. Selecteer een gemiddelde waarde van de sterkte. De kansverdeling van de sterkte ligt daarmee vast. Bereken met de deze kansverdeling en de extremewaardenverdeling van de belasting uit stap. 2.2 de faalkans voor een referentieperiode van 50 jaar.
   2.4. Vergelijk de faalkans uit stap 2.3 met de faalkanseis uit stap 2.1. Pas de gemiddelde waarde van de sterkte aan totdat de faalkans uit stap 2.3 gelijk is aan de faalkanseis uit stap 2.1. De kansverdeling van de sterkte waarbij net wordt voldaan aan de faalkanseis is dan bekend. De bijbehorende invloedscoëfficiënten en ontwerppuntwaarden volgen uit de faalkansberekening met FORM.
   2.5. Bereken, op basis van het MHW en de ontwerppuntwaarde van de belasting, de partiële factor voor de belasting, volgens vergelijking (8.2.4). Doe hetzelfde voor de sterkte, uitgaande van de rekenwaarde van de sterkte volgens de Eurocode en de ontwerppuntwaarde van de sterkte. Het product van deze twee partiële factoren is de totale belastingfactor.

3. De getallen horend bij “Voorgestelde aanpak LIR-eis” en een referentieperiode van 10 jaar zijn berekend volgens de volgende procedure (de procedure is vergelijkbaar voor een referentieperiode van 1 jaar):
   3.1. Bepaal de faalkanseis voor de referentieperiode van 10 jaar, rekening houdend met de faalkansbegroting en het lengte-effect (zie ook Tabel 12). Voor een referentieperiode van 1 jaar is de opzet van de procedure hetzelfde.
   3.2. Bepaal, rekening houdend met het effect van o.a. zeespiegelstijging, de kansverdeling van de grootste belasting voor:
      3.2.1. de eerste 10 jaar
      3.2.2. een periode van 50 jaar
      3.2.3. de eerste 50-10=40 jaar

3.3. Selecteer een gemiddelde waarde van de sterkte. De kansverdeling van de sterkte ligt daarmee vast. Bereken met de kansverdeling en de extremewaardenverdelingen van de belasting uit stap 3.2 de faalkans voor (1) de eerste 10 jaar, (2) de volledige levensduur van 50 jaar en (3) de eerste 50-10=40 jaar. De faalkans voor de laatste 10 jaar is gelijk aan het verschil tussen de berekende faalkans voor de volledige levensduur van 50 jaar en de faalkans voor de eerste 40 jaar (zie ook paragraaf C2).

3.4. Vergelijk de berekende faalkansen voor de eerste 10 jaar en de laatste 10 jaar met de faalkanseis uit stap 3.1. Geen van deze faalkansen mag groter zijn dan de faalkanseis uit stap 3.1. Pas de gemiddelde waarde van de sterkte aan totdat dit het geval is. De kansverdeling van de sterkte waarbij net wordt voldaan aan de faalkanseis is dan bekend.

3.5. Bepaal, uitgaande van de kansverdeling van de sterkte uit stap 3.4, de rekenwaarde van de sterkte volgens de Eurocode. Bereken vervolgens, de benodigde totale belastingfactor, uitgaande van het MHW (op basis van unity check=1).

De getallen horend bij “O.b.v. faalkans $P(Z_i<0)$ in laatste levensjaar” zijn berekend door de faalkans te berekenen uitgaande van de belastingverdeling voor het laatste levensjaar. De overige rekenstappen zijn zoals bij de “Voorgestelde aanpak bij MKBA-eis” (zie boven).

C.2 Wiskundige uitwerking faalkansberekeningen

Beschouw een geval waarin falen optreedt als de buitenwaterstand (*H*) een bepaalde kritieke waarde (H_{crit}) overschrijdt. De grenstoestandsfunctie is dus als volgt gedefinieerd:

$$Z = H - H_{crit} \tag{C1}$$

We kunnen deze grenstoestandsfunctie ook schrijven als:

$Z = R - S$

Hierin is *R* de sterkte van het keermiddel en is *S* de belasting door de buitenwaterstand *H* minus de binnenwaterstand h_{bi}.

Kans op falen voor een willekeurig jaartal, ongeacht het al dan niet falen in voorgaande jaren: $P(Z_i<0)$

In navolging van de MKBA is verondersteld dat de waterstanden exponentieel verdeeld zijn. Voor de kansverdeling van de belasting per jaar in het jaar *i* kan worden geschreven:

$$F_{H,1,i}(h) = \mathrm{Max}(1 - a^i \cdot \mathrm{e}^{-\frac{h-u}{b}}, \quad 0) \tag{C2}$$

waarin *u* en *b* parameters zijn die de vorm van de exponentiële verdeling (kansverdeling jaarmaxima) beschrijven en *a* een constante is die de jaarlijkse

verandering van de kansverdeling beschrijft. De parameter *b* is direct gerelateerd aan de decimeringhoogte: *b*=decimeringhoogte/ln(10).

De bijbehorende kansdichtheidsfunctie kan worden verkregen door middel van differentiatie:

$$f_{H,1,i}(h) = \frac{dF_{H,i}(h)}{dh} \tag{C3}$$

zodat voor de faalkans in jaar *i* jaar geldt (ongeacht wel/niet falen in voorgaande jaren):

$$P_{f1,i} = \int_0^{\infty} f_{H,1,i}(h) \cdot F_{Hcrit}(h) dh \tag{C4}$$

waarin $F_{Hcrit}(h)$ de kansverdeling van de kritieke waterstand is (ofwel: de kansverdeling van de sterkte).

Kans op falen in een aaneengesloten periode van *n* jaar, startend op *t*=0
Voor de kansverdeling van de buitenwaterstand voor een periode van *n* jaar geldt:

$$F_{H,n}(h) = \mathrm{Max}\left(\prod_{i=1}^{n} \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{h-u}{b}} a^i \right), \quad 0 \right) \tag{C5}$$

De bijbehorende kansdichtheidsfunctie kan wederom worden verkregen door middel van differentiatie:

$$f_{H,n}(h) = \frac{dF_{H,n}(h)}{dh} \tag{C6}$$

zodat voor de kans op falen in een periode van *n* jaar, startend op *t*=0, geldt:

$$P_{f,n} = \int_0^{\infty} f_{H,n}(h) \cdot F_{Hcrit}(h) dh \tag{C7}$$

Kans op falen in een bepaalde, aaneengesloten periode van *n* jaar, die niet noodzakelijkerwijs start op *t*=0
Het bepalen van deze faalkans is van belang bij een op het LIR gebaseerde norm, omdat de referentieperiode dan korter kan zijn dan levensduur. In elke aaneengesloten periode, ter grootte van de referentieperiode, moet de faalkans kleiner zijn dan de betrouwbaarheidseis. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 24 in paragraaf 7.4.

De kans dat een constructie faalt in een bepaalde, aaneengesloten periode van *n* jaar is de kans dat de constructie faalt in deze periode èn dat de constructie niet faalt in de daaraan voorafgaande periode.

Voor de kans op falen in een periode van *n* jaar, startend op *t*>0, geldt:

$$P_{f,t-(t+n)} = P\left(Z_{t-(t+n)} < 0 \cap Z_{0-t} > 0 \right) \tag{C8}$$

waarin:

$Z_{t\text{-}(t+n)}$ Grenstoestandsfunctie voor de beschouwde periode van *n* jaar, startend op tijdstip *t*

$Z_{0\text{-}t}$ Grenstoestandsfunctie voor de periode voorafgaand aan de beschouwde periode die aanvangt op tijdstip *t*

ofwel:

$$P_{f,t-(t+n)} = P\left(Z_{0-(t+n)} < 0\right) - P\left(Z_{0-t} < 0\right) \qquad \text{(C9)}$$

Beide delen van het rechter lid van vergelijking (C9) kunnen worden opgelost op basis van vergelijking (C7).

Met behulp van probabilistische berekeningen kan worden bepaald wanneer de sterkte voldoende is om aan een bepaalde faalkanseis te voldoen. Met de aldus berekende kansverdeling van de sterkte en de rekenwaarde van de belasting (het MHW) kan vervolgens een totale belastingfactor worden berekend.