

VEILIGHEID NEDERLAND IN KAART

DE METHODE VAN VNK2 NADER VERKLAARD

DE TECHNISCHE ACHTERGRONDEN



VEILIGHEID NEDERLAND
IN KAART

**DE METHODE VAN VNK2
NADER VERKLAARD**

DE TECHNISCHE ACHTERGRONDEN

COLOFON

Dit is een publicatie van
Projectbureau VNK2

Document
HB 1267988

Datum
Maart 2011

Ontwerp
2D3D, Den Haag

Oplage
750 exemplaren

INHOUD

1	INLEIDING	5		
2	VNK2 IN DE PRAKTIJK: EEN GEZAMENLIJKE OPGAVE	6		
2.1	DE ORGANISATIE VAN HET PROJECT VNK2	6		
2.2	HET WERKPROCES	8		
3	DE METHODE OP HOOFDLIJNEN	10		
4	DE ONDERDELEN VAN DE METHODE	12		
5	DE ONDERDELEN VAN DE METHODE NADER VERKLAARD	18		
5.1	STAP A1. OPSTELLEN RINGDEELINDELING	18		
5.2	STAP A2. OPSTELLEN OVERSTROMINGSBEREKENINGEN	18		
5.3	STAP A3. DEFINITIE SCENARIO'S	21		
5.4	STAP A4. BEPALEN GEVOLGEN PER SCENARIO	21		
5.5	STAP B1. OPSTELLEN VAKINDELING	25		
5.6	STAP B2. VAKSCHEMATISATIE EN FAALKANSBEREKENING	26		
5.7	STAP B3. BEREKENEN SCENARIOKANSEN	35		
5.8	BEREKENEN OVERSTROMINGSRISICO	36		
6	HET LENGTE-EFFECT NADER VERKLAARD	42		
6.1	EEN INTUÏTIEVE BENADERING	42		
6.2	BASISBEGINSELEN	42		
6.3	WISKUNDIGE TOELICHTING OP HET LENGTE-EFFECT	46		
7	ONTWERPPUNTEN NADER VERKLAARD	52		
8	DE WETTELIJKE TOETSING EN VNK2	56		
9	AANVULLENDE INFORMATIE	60		
	BIJLAGE BEGRIPPENLIJST	62		

1 INLEIDING

In het project Veiligheid Nederland in Kaart 2 (VNK2) worden de overstromingsrisico's in Nederland in beeld gebracht. Daartoe worden zowel de kansen op mogelijke overstromingen berekend, als de gevolgen die dan zijn te verwachten. Waar zijn de overstromingsrisico's relatief groot of klein? Waar zijn de kansen op overstromingen relatief groot of klein? En waar bevinden zich de meest kwetsbare gebieden? Welke faalmechanismen dragen relatief veel bij aan de kans op een dijkdoorbraak? Hoe zou het overstromingsrisico effectief verkleind kunnen worden? De resultaten van VNK2 kunnen worden gebruikt om op deze en vele andere vragen antwoorden te geven.

Maar hoe komen de resultaten van VNK2 eigenlijk tot stand? Regelmatig worden vragen gesteld over de wijze waarop in VNK2 overstromingsrisico's worden bepaald. Deze vragen variëren van globaal tot zeer diepgaand. In het voorliggende document wordt op verschillende niveaus van diepgang uitleg gegeven over de berekening van overstromingsrisico's in VNK2. Zoals zal blijken kan er voor het geven van een beeld van het overstromingsrisico soms worden volstaan met vereenvoudigingen ten opzichte van de benadering die in de wettelijke toetsing wordt gehanteerd; soms moeten er echter juist aanvullende stappen worden gezet.

De toelichting is zodanig opgesteld dat eerst de hoofdlijnen en basisprincipes worden geïntroduceerd, waarna steeds dieper wordt ingegaan op de onderliggende rekentechnieken en uitgangspunten. De uitleg vereist dan ook een steeds grotere achtergrondkennis. Via de balk(en) aan de buitenzijde van iedere pagina is aangegeven voor welke doelgroepen de onderdelen van dit rapport zijn geschreven:

Bestuurders en beleidsmakers: technische kennis is niet vereist

Deskundigen op het gebied van waterveiligheid zonder achtergrondkennis van kwantitatieve risicoanalyse

Deskundigen op het gebied van waterveiligheid met enige achtergrondkennis op het gebied van kwantitatieve risicoanalyse

Deskundigen op het gebied van waterveiligheid met vergaande achtergrondkennis op het gebied van kwantitatieve risicoanalyse

Het is helaas onmogelijk om in een kort document uitgebreid in te gaan op alle details van de VNK2-methode en de onderzoeken in binnen- en buitenland die aan de modellen en rekentechnieken ten grondslag liggen. Voor een meer gedetailleerde toelichting op de modellen en rekentechnieken wordt dan ook verwezen naar de daarover opgestelde theoriehandleidingen en wetenschappelijke artikelen. Het document eindigt met een overzicht van aanbevolen literatuur per onderwerp. Dit overzicht is bedoeld voor de geïnteresseerde lezer die over bepaalde thema's meer te weten wil komen. Uiteraard is het Projectbureau VNK2 graag bereid om eventueel resterende vragen te beantwoorden.

2 VNK2 IN DE PRAKTIJK: EEN GEZAMENLIJKE OPGAVE

2.1

De organisatie van het project VNK2

Het project VNK2 is een initiatief van het ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M), de Unie van Waterschappen (UvW) en het Interprovinciaal overleg (IPO). Voor de uitvoering van het project is een projectbureau opgericht. Het Projectbureau VNK2 werkt samen met de waterschappen en provincies, en wordt daarbij ondersteund door ingenieursbureaus en kennisinstituten.

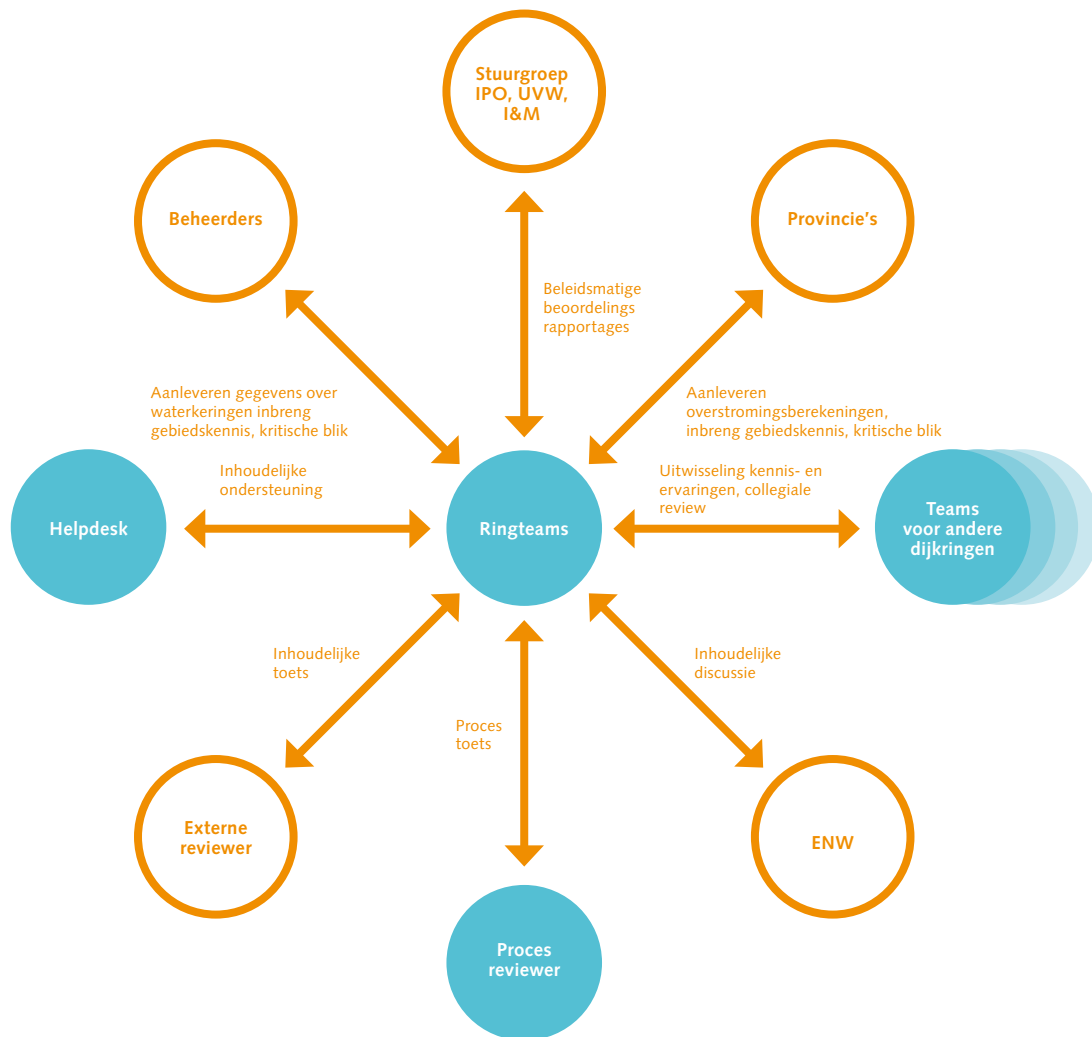
De uitvoering van de risicoanalyses wordt verzorgd door het Projectbureau VNK2 en de aangesloten bureaus. De beheerders leveren een essentiële bijdrage aan het project VNK2 door gegevens ter beschikking te stellen en de plausibiliteit van invoer en berekeningen te bespreken. De provincies stellen de overstromingsberekeningen ter beschikking die ten grondslag liggen aan de inschattingen van de gevolgen per overstromingsscenario. Bij een risicoanalyse voor een dijkkringgebied zijn dan ook veel partijen betrokken (Figuur 1).

Tijdens de uitvoering van een risicoanalyse vindt regelmatig overleg plaats tussen het Projectbureau VNK2 en de betrokken waterschappen en provincies in zogenaamde ringteams. Daarnaast wordt intensief met de beheerders opgetrokken bij het bepalen van de invoer van de faalkansberekeningen en het controleren/duiden van de resultaten. Dit contact is cruciaal voor de kwaliteit van de risicoanalyses.

In de praktijk is het niet goed mogelijk om vooraf precies te weten welke bijzonderheden men zal tegenkomen bij een risicoanalyse voor een dijkkringgebied. Voor de consistentie en kwaliteit van de producten wordt er binnen het Projectbureau

veel aandacht besteed aan het uitwisselen van kennis en ervaringen. Wekelijks vindt er een Technisch Managementoverleg plaats waarin ervaringen worden uitgewisseld en problemen worden besproken. Voor de lastige vragen is een Helpdesk met specialisten ingericht. Bij de zeer specialistische vragen worden experts van kennisinstituten ingeschakeld.

De uitgevoerde risicoanalyses worden zowel intern getoetst als extern. Intern worden alle analyses beoordeeld door de projectleiders en collegiale toetsers. Daarnaast beoordeelt een externe reviewer alle deelproducten op compleetheid en inhoudelijke kwaliteit. Ook wordt getoetst of alle processtappen aan de daaraan gestelde eisen voldoen. Ten slotte worden de resultaten van de risicoanalyses besproken met het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) en wordt de kwaliteit van de rapportages door het ENW steekproefsgewijs gecontroleerd.



Figuur 1. De betrokken partijen bij de uitvoering van een risicoanalyse voor een dijkkringgebied. De blauwe actoren zijn onderdeel van het Projectbureau VNK2.

2.2

Het werkproces

In Figuur 2 is een overzicht gegeven van de verschillende activiteiten bij het verrichten van een risicoanalyse voor een dijkkringgebied. Gedurende het proces vindt regelmatig overleg plaats tussen de diverse betrokkenen. Ook worden de procesgang en de inhoudelijke kwaliteit van de deelproducten tussentijds getoetst, zodat er tijdig kan worden bijgestuurd. Een complete risicoanalyse duurt ongeveer 7 maanden per dijkkringgebied.

Screening (ca. 1,5 maand): inventariseren van beschikbare gegevens, bepalen aandachtspunten met de beheerder(s), opstellen vakindeling

RINGTEAMOVERLEG

Oplevering en toetsing verslag screening

Schematisatie (ca. 2,5 maand): het verrichten van faalkansberekeningen per vak/kunstwerk en per faalmechanisme (incl. gevoeligheidsanalyses). In- en uitvoer worden in principe wekelijks besproken met de beheerder(s).

RINGTEAMOVERLEG

Oplevering en toetsing databases met in- en uitvoer van de faalkansberekeningen en bijbehorende rapportage

Bepalen scenariokansen (ca. 2 weken)

RINGTEAMOVERLEG

Oplevering en toetsing databases met in- en uitvoer van de scenariokansberekeningen en bijbehorende rapportage

Berekenen overstromingsrisico (ca. 2 weken): het combineren van de scenariokansen met de gevolgen per scenario.

RINGTEAMOVERLEG

Oplevering en toetsing databases met in- en uitvoer van de risicoberekeningen en bijbehorende rapportage

Gevoeligheidsanalyses (ca. 1 maand): het tonen van de gevoeligheid van de uitkomsten voor gehanteerde uitgangspunten en aannamen. Ook het effect van maatregelen kan in beeld worden gebracht.

RINGTEAMOVERLEG

Oplevering en toetsing databases met in- en uitvoer van de gevoeligheidsanalyses en bijbehorende rapportage

Rapportage (ca. 1 maand)

RINGTEAMOVERLEG

Oplevering en toetsing hoofdreport; diverse commentaarrondes

Figuur 2. Overzicht van de activiteiten bij een risicoanalyse voor een dijkkringgebied.

Hoofdreport, achtergrondreport en diverse databases

3 DE METHODE OP HOOFDLIJNEN

Een risico is een combinatie van kansen en gevolgen. Om overstromingsrisico's te bepalen is het dus van belang om te weten wat de kans is dat zich ergens een overstroming voordoet en wat dan de gevolgen zijn. Het overstromingsrisico wordt in VNK2 per dijkkringgebied (conform de Waterwet) in beeld gebracht. Daartoe wordt voor de diverse onderdelen van de waterkering (verschillende dijkvakken, duinvakken en kunstwerken) bepaald wat de bezwijkkans is. Ook wordt bepaald wat de gevolgen zijn (economische schade en slachtoffers) als de waterkering ergens bezwijkt. De bezwijkkansen en de gevolgen van doorbraken zijn niet overal langs een dijkkring hetzelfde. Het overstromingsrisico kan daarom binnen een dijkkringgebied soms sterk variëren.

Bij het berekenen van de bezwijkkansen van waterkeringen spelen onzekerheden een belangrijke rol. Zo is de hoogte van de maximale belasting in een jaar op voorhand onbekend. Ook de sterkte-eigenschappen van de waterkeringen zijn zelden precies bekend. Wel kan op basis van statistiek en expert judgment doorgaans een kans van voorkomen worden toegekend aan de mogelijke waarden van de belastingen en de sterkte-eigenschappen. De totale kans van alle combinaties van belastingen en sterktes waarbij een waterkering bezwijkt, is de bezwijkkans ('faalkans') van de kering. Met name als de werkelijke waarden van de belastingen en de sterkte-eigenschappen onzeker zijn, is deze aanpak geschikt. Het is dan immers lastig om één set invoerwaarden te kiezen. De probabilistische aanpak stelt ons in staat om de onzekerheden ten aanzien van de werkelijke waarden van belastingen en sterkte-eigenschappen expliciet mee te nemen in de beschouwing van de veiligheid van een waterkering.

DE GEVOLGEN VAN OVERSTROMINGEN

Bepaal de gevolgen (schade en slachtoffers) die optreden als de waterkering ergens bezwijkt.

DE KANSEN OP OVERSTROMINGEN

Bepaal per onderdeel van de dijkkring wat de kans op bezwijken ('faalkans') is.

RISICOBEREKENING

Combineer per onderdeel van de dijkkring de bezwijkkans met de optredende gevolgen wanneer het bewuste onderdeel van de dijkkring bezwijkt. Door dit voor alle onderdelen van de dijkkring te doen kan een beeld worden gegeven van het totale overstromingsrisico in het dijkkringgebied.

4 DE ONDERDELEN VAN DE METHODE

In VNK2 wordt zowel gekeken naar de kansen op, als de gevolgen van overstromingen. Een risico is immers een combinatie van kansen en gevolgen. Vervolgens worden de kansen en gevolgen gecombineerd tot een overstromingsrisico. Door middel van gevoeligheidsanalyses wordt een beeld gegeven van de invloed van gehanteerde uitgangspunten en mogelijke maatregelen.

Binnen het gevolgenspoor worden achtereenvolgens de volgende stappen gezet:

Stap A1. Opstellen ringdeelindeling

In werkelijkheid kunnen zich overal bressen voordoen. Het is echter praktisch onmogelijk om voor elke mogelijke breslocatie de gevolgen van overstromingen in beeld te brengen. Dat is voor een voldoende nauwkeurige risicoanalyse ook niet nodig. Het is namelijk mogelijk om een dijkkring te verdelen in zogenaamde ringdelen waarvoor het overstromingspatroon en de schade bij een overstroming vrijwel gelijk zijn, ongeacht de precieze ligging van de breslocatie binnen het ringdeel. Elke dijkkring wordt onderverdeeld in maximaal 13 ringdelen. Per ringdeel wordt een doorbraak gemodelleerd (stap A2).

Stap A2. Opstellen overstromingsberekeningen

Om een beeld te krijgen van het overstromingspatroon, de waterdieptes en de stroom- en stijgsnelheden bij doorbraken worden er per ringdeel overstromingsberekeningen uitgevoerd. Behalve met de invloed van breslocaties op het verloop van overstromingen (zie stap A1) wordt in VNK2 ook rekening gehouden met de belastingcondities (waterstand, duur van het hoogwater) waarbij de overstroming zich voordoet. Als een dijk bezwijkt bij een hoge buitenwaterstand zal er meer water

het dijkkringgebied in stromen dan wanneer de dijk bezwijkt bij een lagere waterstand. Per ringdeel worden daarom overstromingsberekeningen uitgevoerd voor verschillende belastingniveaus: het toetspeil minus één decimeterhoogte (TP-1D), het toetspeil (TP), TP+1D en TP+2D. Langs de kust is soms ook het rekenpeil (TP+2/3D) beschouwd.

Stap A3. Definitie scenario's

Als er na een doorbraak geen sterke daling van de buitenwaterstanden is te verwachten, is het mogelijk dat zich tijdens één hoogwater op meerdere locaties doorbraken voordoen. Elk overstromingsscenario beschrijft een bepaald karakteristiek verloop van een overstroming die wordt ingeleid door bressen in één of meer ringdelen. Alleen als de buitenwaterstand na een doorbraak sterk daalt en er daardoor geen doorbraken in andere ringdelen meer zijn te verwachten, is het aantal scenario's gelijk aan het aantal ringdelen.

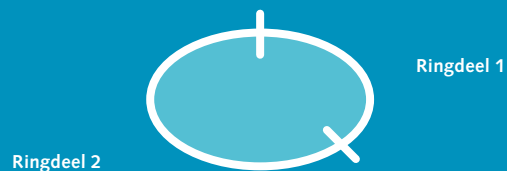
Stap A4. Bepalen gevolgen per scenario

Op basis van de overstromingsberekeningen per ringdeel worden de overstromingskenmerken (getroffen gebied, waterdieptes, stroom- en stijgsnelheden) van de verschillende overstromingsscenario's bepaald. Daarbij bestaat er een relatie met het kansenspoor: als de dijken waarschijnlijk pas bij zeer extreme waterstanden bezwijken, dan worden overstromingsberekeningen geselecteerd die horen bij een dergelijk hoog belastingniveau. Na het selecteren van de overstromingsberekeningen wordt op basis van de overstromingskenmerken voor elk scenario de economische schade en het aantal slachtoffers berekend.

GEVOLGENSPOOR

STAP A1

Verdeel de dijkkring (cf. Waterwet) in ringdelen waarvoor de gevolgen ongeacht de breslocatie (vrijwel) gelijk zijn.



STAP A2

Bereken het overstromingspatroon, de waterdiepte en de stroom- en stijgsnelheid in geval van een doorbraak op basis van overstromingsberekeningen



Scenario 1 (zie stap A3)



Scenario 2 (zie stap A3)

STAP A3

Definieer scenario's: een scenario wordt gevormd door een unieke combinatie van falende en niet falende ringdelen. De scenarioset bevat alle mogelijke overstromingsverlopen.

SCENARIO	RINGDEEL 1	RINGDEEL 2
1	faalt	faalt niet
2	faalt niet	faalt
3	faalt	faalt

STAP A4

Bereken de economische schade en het aantal slachtoffers per scenario op basis van de overstromingsberekeningen per ringdeel (zie stap A2). Per scenario zullen de gevolgen anders zijn.

SCENARIO	SCHADE	SLACHTOFFERS
1	E_1	N_1
2	E_2	N_2
3	E_3	N_3

Binnen het kansenspoor worden achtereenvolgens de volgende stappen gezet:

Stap B1. Opstellen vakindeling

Een dijkkring bestaat uit verschillende typen waterkeringen, zoals dijken, kunstwerken en soms ook duinen. Per type waterkering kunnen er grote verschillen bestaan in de sterkte-eigenschappen. Zo kunnen de geometrie en ondergrondeigenschappen van dijken sterk uiteenlopen. De dijkkring wordt daarom eerst onderverdeeld in elementen (dijkvakken, duinvakken en kunstwerken) waarbinnen de sterkte-eigenschappen en belastingen homogeen mogen worden verondersteld. Vervolgens kunnen per element faalkansen worden berekend. De dijkvakken hebben doorgaans lengtes van rond de 750 meter maar variëren, afhankelijk van de lokale omstandigheden, van ongeveer 150 meter tot ruim twee kilometer.

Stap B2. Vakschematisatie en faalkansberekening

Per element (dijkvak, duinvak of kunstwerk) wordt een faalkans berekend (in VNK2 is falen gedefinieerd als het optreden van een overstroming). Daartoe worden per element en per faalmechanisme schematisaties opgesteld. Elke schematisatie beschrijft de kenmerken van de waterkering die voor het bepalen van de faalkans van het element relevant zijn. Zo zijn voor het faalmechanisme overloop/overslag bij dijken ondermeer de geometrie van het dijklichaam, de kwaliteit van de grasbekleding op het binnentalud en de effectieve strijklengte per windrichting van belang.

Op basis van de berekende faalkansen per vak en per faalmechanisme kan een gecombineerde faalkans voor alle vakken en faalmechanismen samen worden bepaald.

Dit is de kans dat er ergens in de dijkkring een vak faalt: de overstromingskans. Deze kans is niet simpelweg gelijk aan de som van de berekende faalkansen per vak en faalmechanisme. Door afhankelijkheden is de overstromingskans kleiner dan de som van de faalkansen. De overstromingskans (gecombineerde faalkans op ringniveau) is dus steeds ten minste zo groot als de grootste faalkans op vakniveau en maximaal zo groot als de som van de faalkansen op vakniveau.

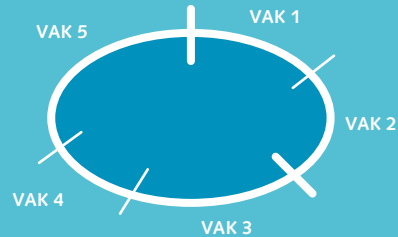
Voor sommige faalmechanismen, zoals overloop/overslag, zijn de afhankelijkheden veelal groot en is de faalkans op ringniveau vaak vrijwel gelijk aan de grootste faalkans op vakniveau. Voor faalmechanismen waarbij de onzekere en ruimtelijk sterk fluctuerende ondergrondeigenschappen belangrijk zijn, is de mate van afhankelijkheid tussen de vakken (en binnen de grote vakken) juist klein. Omdat de faalkans dan oploopt met de lengte van de beschouwde dijkstrekking, wordt hierbij ook wel gesproken over het lengte-effect.

De opgestelde schematisaties en berekende faalkansen per vak en faalmechanisme worden steeds gecontroleerd door deze te spiegelen aan historische ervaringen (zoals het voorkomen van zandmeevoerende wellen) en de gebiedskennis en ervaring van de beheerder. Ook wordt door de schematisatieteams gekeken naar de ervaringen uit de wettelijke toetsing. Hoewel de wettelijke toetsing en het project VNK2 op andere uitgangspunten berusten en hun resultaten zodoende niet zondermeer kunnen worden vergeleken, worden in de toetsing en VNK2 wel dezelfde waterkeringen beschouwd. Een vergelijking van de in de toetsing opgestelde schematisaties en het daarbij behorende beeld van de veiligheid levert dus wel degelijk een houvast voor de controle van schematisaties en de duiding van resultaten van VNK2 op hoofdlijnen (en vice versa).

KANSENSPOOR

STAP B1

Verdeel de dijkkring (cf. Waterwet) in vakken waarin de sterkte-eigenschappen en belastingen homogeen zijn. De grens van een ringdeel valt samen met een vakgrens.



STAP B2

Bereken per vak een faalkans voor de verschillende faalmechanismen. Uit de combinatie van de kansen per faalmechanisme per vak volgt de kans op een overstroming ergens in het dijkringgebied. Bij het combineren van de faalkansen wordt rekening gehouden met afhankelijkheden tussen faalmechanismen en vakken.

VAK	FAALKANS PER FAALMECHANISME		FAALKANS PER VAK
	Overloop	Piping	
1	$Kans_{over,1}$	$Kans_{pip,1}$	$Kans_1$
2	$Kans_{over,2}$	$Kans_{pip,2}$	$Kans_2$
3	$Kans_{over,3}$	$Kans_{pip,3}$	$Kans_3$
4	$Kans_{over,4}$	$Kans_{pip,4}$	$Kans_4$
5	$Kans_{over,5}$	$Kans_{pip,5}$	$Kans_5$
Gecombineerd	$Kans_{over}$	$Kans_{pip}$	Overstromingskans

STAP B3

Bepaal de kansen op het optreden van de scenario's (zie stap A3). Dit wordt gedaan door op basis van de kansen per vak te berekenen wat de kans is dat er in bijv. ringdelen 1 en 2 tegelijk een bres optreedt. De scenariokansen zijn nodig om de koppeling tussen kansen en gevolgen te kunnen maken.

SCENARIO	SCENARIOKANS
1	Scenariokans ₁
2	Scenariokans ₂
3	Scenariokans ₃
4	Overstromingskans

Omdat de scenarioset alle mogelijke overstromingsverlopen omvat, is de som van de scenariokansen gelijk aan de eerder berekende kans op een overstroming ergens in het dijkringgebied.

Stap B3. Berekenen scenariokansen

Een dijkkringgebied kan op zeer veel manieren overstromen. De gevolgen per overstromingsscenario zijn dan ook verschillend. Hiermee moet rekening worden gehouden in de risicoberekening. Er moet daarom voor elk mogelijk overstromingsscenario een kans worden uitgerekend. Deze kansen worden ook wel scenariokansen genoemd.

Elke scenariokans wordt berekend op basis van de berekende faalkansen per vak. Bij de berekening van de scenariokansen spelen de ringdelen (die bestaan uit één of meer vakken) een belangrijke rol. Het overstromingsbeeld is per ringdeel vrijwel onafhankelijk van de vraag waar (in welk vak) de doorbraak zich voordoet. Als een bepaald scenario optreedt bij een doorbraak in bijvoorbeeld ringdeel 1, dan is de kans op dit scenario gelijk aan de kans dat ringdeel 1 ergens faalt, terwijl alle overige ringdelen nergens falen. Ofwel: deze scenariokans is gelijk aan de kans dat ten minste één van de vakken in ringdeel 1 faalt, terwijl alle overige vakken niet falen.

In VNK2 wordt wel met meervoudige doorbraken rekening gehouden (bij één hoogwater kunnen er doorbraken zijn in verschillende ringdelen) maar per ringdeel wordt steeds één doorbraak gemodelleerd. Dit heeft vooral een praktische reden. Met elke extra mogelijke doorbraaklocatie neemt het aantal combinaties van doorbraaklocaties namelijk sterk toe (zie ook paragraaf 5.3). Dit heeft grote nadelige consequenties voor de rekentijden en het is vaak de vraag of het toevoegen van mogelijke breslocaties nog veel toevoegt aan het beeld van het overstromingsrisico. Praktisch gezien zou het modelleren van twee mogelijke doorbraaklocaties in een ringdeel neerkomen op het splitsen van het ringdeel in twee nieuwe ringdelen (met één doorbraaklocatie per nieuw ringdeel).

In VNK2 wordt een dijkkring maximaal onderverdeeld in 13 ringdelen (13 mogelijke breslocaties). In dat geval kan er in een dijkkring maximaal sprake zijn van een dertienvoudige doorbraak.

Omdat de scenario's samen alle mogelijke overstromingen karakteriseren, is de som van alle scenariokansen gelijk aan de in stap B2 berekende kans op een overstroming ergens in het dijkkringgebied.

Berekenen overstromingsrisico

Het overstromingsrisico wordt berekend op basis van de kansen en gevolgen per scenario. Elk scenario levert een bijdrage aan het overstromingsrisico. De som van deze bijdragen is gelijk aan het totale overstromingsrisico. De scenario's karakteriseren samen immers alle mogelijke overstromingen in het dijkkringgebied.

GEVOLGENSPOOR

KANSENSPOOR

RISICOBEREKENING

Bereken op basis van de scenariokansen en de gevolgen per scenario de verwachtingswaarde van de schade en de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers. Een verwachtingswaarde is een gewogen gemiddelde van alle mogelijke uitkomsten, met als gewichten de kansen op die waarden. Op basis van de scenariokansen en de gevolgen per scenario kunnen ook het groepsrisico (FN-curve), de economische schadecurve (FS-curve), het lokaal individueel risico (LIR) en het plaatsgebonden risico (PR) worden bepaald.

SCENARIO	SCENARIOKANS X SCHADE	SCENARIOKANS X SLACHTOFFERS
1	Scenariokans ₁ x E ₁	Scenariokans ₁ x N ₁
2	Scenariokans ₂ x E ₂	Scenariokans ₂ x N ₂
3	Scenariokans ₃ x E ₃	Scenariokans ₃ x N ₃
Som	Verwachtingswaarde schade	Verwachtingswaarde slachtofferaantal

5 DE ONDERDELEN VAN DE METHODE NADER VERKLAARD

5.1 Stap A1. Opstellen ringdeelindeling

In VNK2 wordt rekening gehouden met de invloed van de locatie(s) van bressen op het verloop van overstromingen. Daartoe wordt een dijkkring onderverdeeld in ringdelen: dit zijn delen waarvoor het overstromingspatroon en de economische schade bij een overstroming vrijwel gelijk zijn, ongeacht de ligging van de breslocatie binnen het ringdeel. In VNK2 worden in elk geval ringdelen gedefinieerd in geval van:

- Aansluitende compartimenteringsdijk;
- Aansluitende hoge lijnelementen;
- Overgang van bedreiging (bijv. rivier naar zee);

- Splitsingspunt of samenvloeiing;
- Ruimtegebruik direct achter de kering.

In de praktijk blijkt de definitie van ringdelen op basis van de bovenstaande uitgangspunten te leiden tot ca. 5-13 ringdelen per dijkkring. Een voorbeeld van een ringdeelindeling is gegeven in Figuur 3.

5.2 Stap A2. Opstellen overstromingsberekeningen

De gevolgen van een overstroming worden bepaald door de karakteristieken van de overstroming (waterdiepte, stroom- en stijgsnelheden) en de kwetsbaarheid van de getroffen objecten of personen. De kenmerken van overstromingen worden in



Figuur 3. Voorbeeld van een onderverdeling van de dijkkring in ringdelen: de onderverdeling van dijkkring 36 Land van Heusden/de Maaskant in 12 ringdelen.

beeld gebracht door middel van overstromingsberekeningen. Deze worden door de provincies opgesteld en vervolgens aan het projectbureau VNK2 beschikbaar gesteld.

Behalve met de invloed van breslocaties op het verloop van overstromingen (zie stap A1) wordt in VNK2 rekening gehouden met de belastingcondities waarbij een overstroming zich voordoet. Als een dijk bezwijkt bij een hoge buitenwaterstand zal er meer water het dijkkringgebied instromen dan wanneer de dijk bezwijkt bij een lagere waterstand. Per ringdeel worden daarom overstromingsberekeningen uitgevoerd voor verschillende belastingniveaus: het toetspeil minus één decimeterhoogte (TP-1D), het toetspeil (TP), TP+1D en TP+2D. Langs de kust is soms ook een simulatie voor het rekenpeil (TP+2/3D) beschikbaar. In aanvulling daarop worden nog gevoeligheidsanalyses verricht, waarbij bepaalde uitgangspunten van de overstromingsberekeningen worden gevarieerd, zoals de bresbreedte, de standzekerheid van een secundaire kering en de duur van het hoogwater.

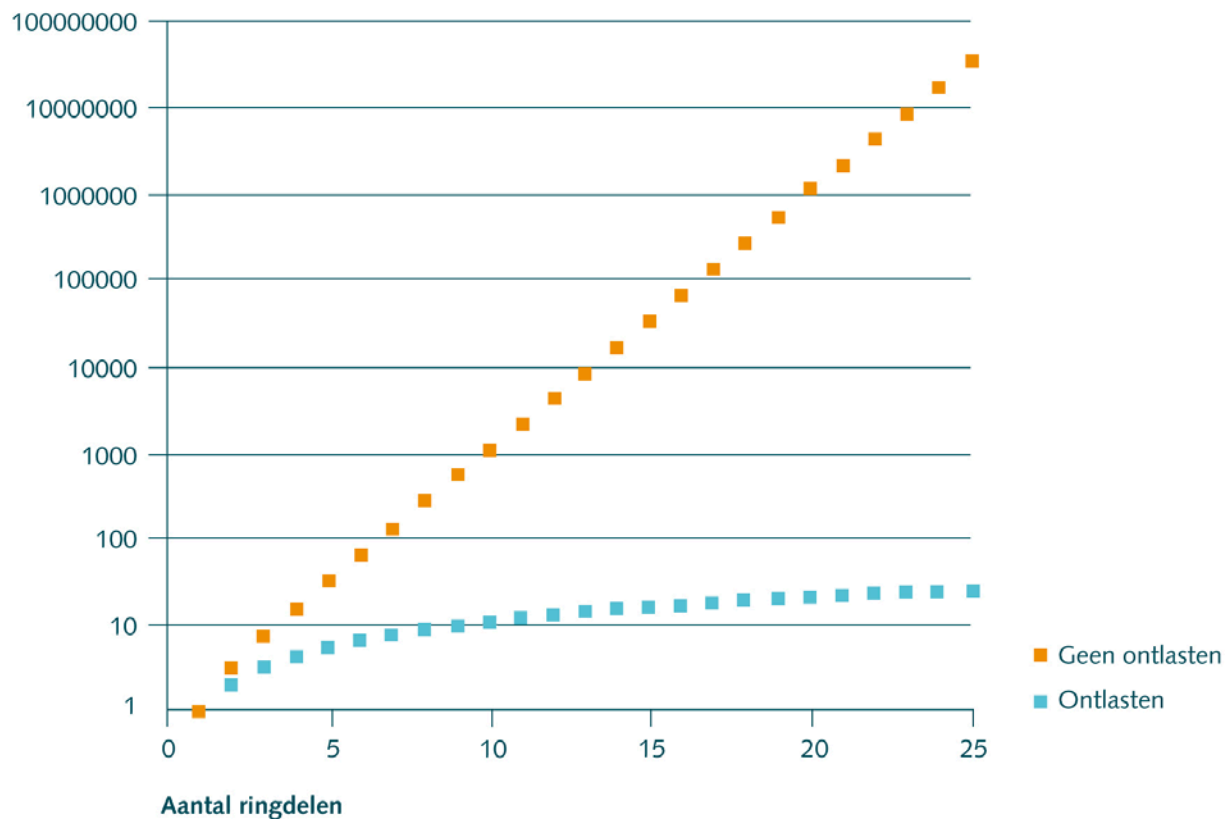
Enkele belangrijke uitgangspunten in de overstromingsberekeningen zijn:

- Regionale waterkeringen worden standaard standzeker verondersteld, tenzij de provincie van oordeel is dat hierdoor een vertekend beeld zou ontstaan. In dat geval wordt van de standaard afgeweken. Hoge lijnelementen zoals wegen en spoorbanen worden standzeker geacht voor zover de verhogingen een kerende functie kunnen vervullen. Doorgangen worden meegenomen in de overstromingsberekeningen. Het effect van de aanname van standzekerheid van regionale keringen op de berekende economische schade en het aantal slachtoffers is afhankelijk van het gecombineerde effect van de omvang

van het getroffen gebied en andere waterdieptes, stroomsnelheden en stijgsnelheden. Bij een standzekere regionale kering kan er sprake zijn van hogere stijgsnelheden en grotere waterdieptes in het getroffen compartiment, waardoor het aantal slachtoffers en de economische schade daar sterk kunnen toenemen. Buiten het getroffen gebied vallen er dan echter geen slachtoffers en treedt er geen schade op.

- Binnen VNK2 wordt het moment van doorbreken van een waterkering gelijk gesteld aan het moment van de top van de hoogwatergolf. Dit leidt tot een onderschatting van het gevolg als de waterkering voor de top van het hoogwater bezwijkt en een overschatting als de waterkering na de top bezwijkt.
- De breedte van de bres is voor de meeste dijkkringgebieden bepaald op basis van een in het overstromingsmodel aanwezige bresgroeiformule. Bij het bepalen van de breedte van de bres wordt rekening gehouden met de erosiebestendigheid van de dijk. Deze is sterk afhankelijk van het materiaal waaruit de kering is opgebouwd (zand of klei). Voor dijkkringen in het bovenrivierengebied kan de bresbreedte oplopen tot enkele honderden meters. Voor dijkkringen aan de kust zijn de bresbreedtes vaak kleiner.
- De maximale diepte van een bres wordt gelijk verondersteld aan de hoogte van het voorland indien de breedte van het voorland loodrecht op de kering groter is dan 50 meter. In andere gevallen wordt de bresdiepte maximaal gelijk verondersteld aan de hoogte van het maaiveld achter de kering.

Aantal scenario's



Figuur 4. Relatie tussen het aantal ringdelen en het aantal scenario's bij ontlasten en geen ontlasten.

5.3 Stap A3. Definitie scenario's

Ringdelen kunnen gelijktijdig falen: er is dan sprake van een meervoudige doorbraak. Het falen van een ringdeel kan soms ook leiden tot een verlaging van de hydraulische belastingen op een ander ringdeel. In dat geval is sprake van ontlasten. Dergelijke relaties tussen het faalgedrag van ringdelen zijn van belang voor het overstromingsrisico omdat meervoudige doorbraken zullen leiden tot andere overstromingspatronen en andere gevolgen dan enkelvoudige doorbraken. In VNK2 worden drie basisgevallen onderscheiden:

1. Geen ontlasten bij doorbraak.
2. Ontlasten bij doorbraak waarbij het zwakste vak als eerste faalt.
3. Ontlasten bij doorbraak waarbij het eerst belaste vak het eerste faalt.

In geval van geen ontlasten (meervoudige doorbraken zijn dan mogelijk) is het aantal scenario's bij n ringdelen gelijk aan $2^n - 1$. Het aantal scenario's loopt dus sterk op bij een groter aantal ringdelen (Figuur 4). Zo is het aantal scenario's bij geen ontlasten en 13 ringdelen gelijk aan 8.191. Bij 25 ringdelen (ofwel: 25 mogelijke breslocaties) zou het aantal scenario's gelijk zijn aan 33.554.431. In geval van ontlasten (alleen enkelvoudige doorbraken) is het aantal scenario's gelijk aan het aantal ringdelen.

Om de rekentijd in te perken, wordt in VNK2 gerekend met maximaal 13 ringdelen. Het maximale aantal scenario's is dan 8.191. Om dit maximum niet te overschrijden moeten soms meerdere ringdelen worden samengevoegd. Feitelijk wordt dan een deel van de verfijning die in de ringdeeldefinitie is aangebracht opgeheven. Opgemerkt wordt dat er bij een set van honderden tot enkele duizenden scenario's al sprake is van

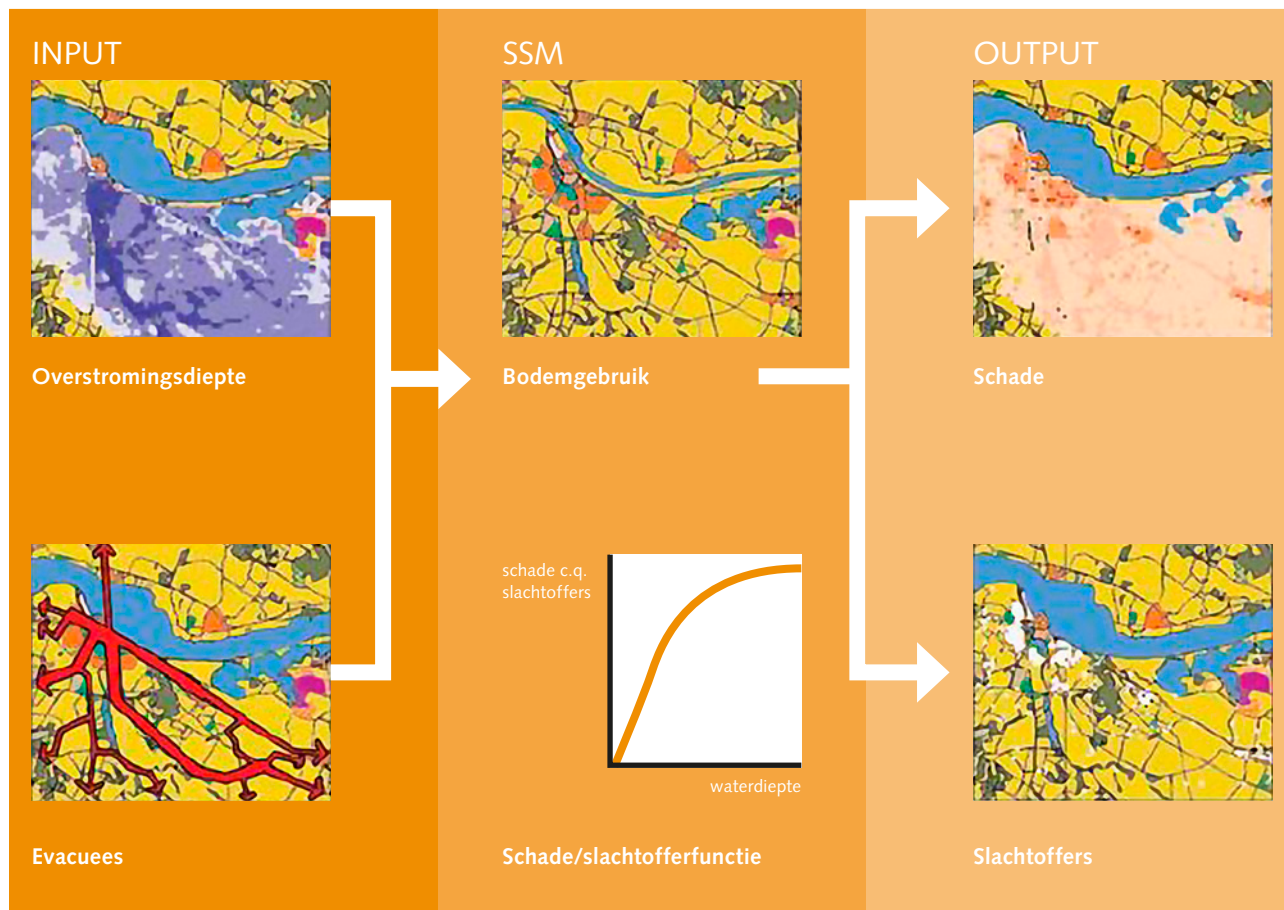
een zeer grote mate van verfijning ten opzichte van het werken met een enkel (worst case) scenario.

5.4 Stap A4. Bepalen gevolgen per scenario

De berekening van schade en slachtoffers

De economische schade van een overstroming is afhankelijk van de waterdiepte, het totaal overstroomde oppervlak en het landgebruik c.q. de gebiedsinrichting. Het aantal slachtoffers is ook afhankelijk van de stijgsnelheid en de stroomsnelheid, alsook de mogelijkheden voor preventieve evacuatie. Per overstromingsscenario worden de schade en slachtofferaantallen berekend met behulp van de HIS - Schade- en Slachtoffermodule (HIS-SSM), versie 2.5. De hierin opgenomen kentallen van de geïnvesteerde waarde en het aantal inwoners in het dijkkringgebied zijn gebaseerd op gegevens uit 2001, geïndexeerd naar 2006. De werking van HIS-SSM is schematisch weergegeven in Figuur 5.

DE WERKING VAN HET SSM SCHETSMATIG WEERGEGEVEN



Figuur 5: Schematische weergave schade- en slachtoffermodule.

De economische schade van overstromingen bestaat uit schade aan kapitaalgoederen, zoals woningen en infrastructuur, en schade door bedrijfsuitval. De in VNK2 berekende economische schade betreft de netto schade voor geheel Nederland. In de berekening van de economische schade wordt het effect van verplaatsing van economische activiteit binnen de landsgrenzen meegenomen: bedrijfsuitval in het door overstroming getroffen gebied leidt tot verhoogde bedrijvigheid buiten dit gebied. De totale economische schade voor Nederland als geheel is zodoende kleiner dan de schade in het direct getroffen gebied. Hoe groot het verschil is tussen de economische schade in het getroffen gebied en de economische schade voor geheel Nederland is onzeker en afhankelijk van de getroffen productiemiddelen. In de berekening van de economische schade wordt geen monetaire waardering voor slachtoffers aangehouden (overigens kan dit handmatig eenvoudig worden toegevoegd door het aantal slachtoffers te vermenigvuldigen met een geldbedrag per slachtoffer).

Preventieve evacuatie

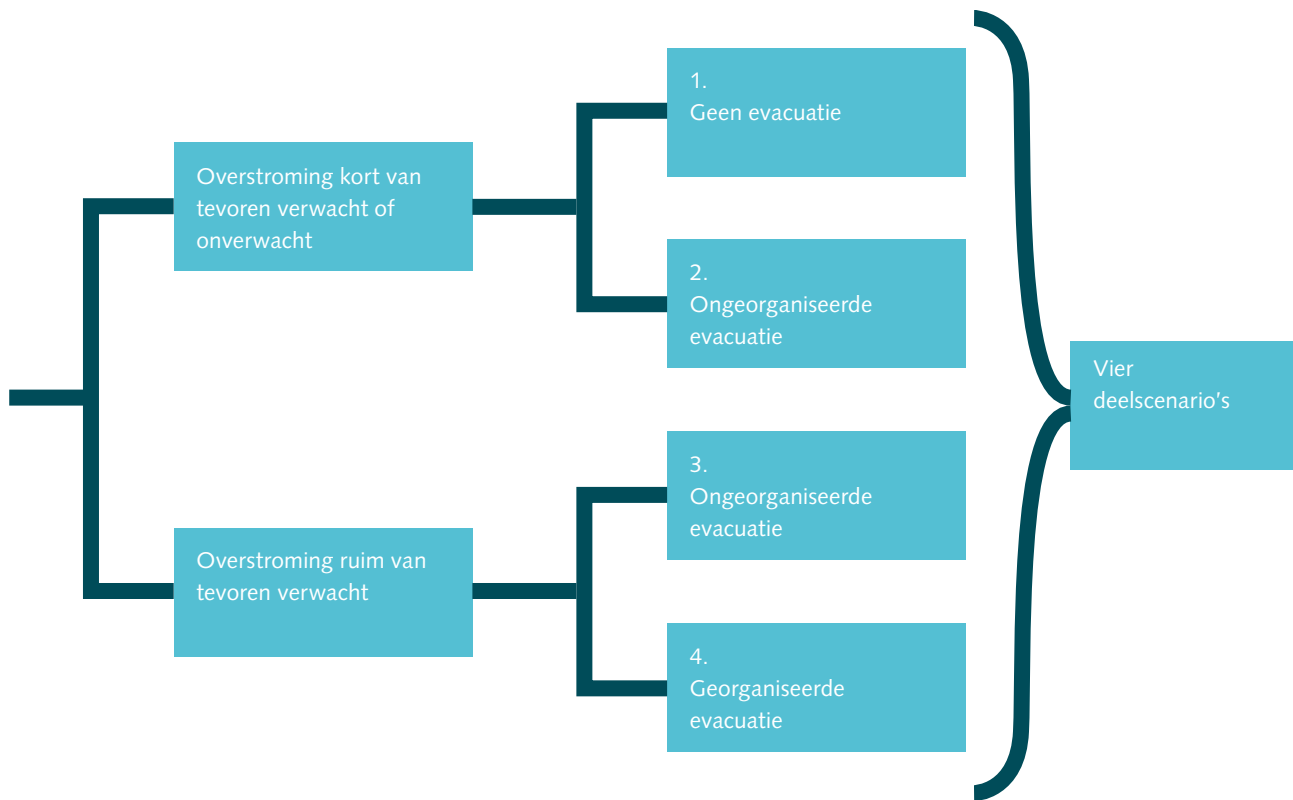
Anders dan de economische schade, kan het aantal slachtoffers sterk worden beïnvloed door preventieve evacuatie (evacueren voor de dijkdoorbraak). In VNK2 wordt het effect van preventieve evacuatie daarom meegenomen. Het effect van vluchten tijdens een overstroming wordt niet afzonderlijk gemodelleerd maar wordt meegenomen via de slachtofferfuncties. De slachtofferfuncties leggen de relatie tussen overstromingskarakteristieken en overlijdenskansen.

Preventieve evacuatie wordt in de risicoanalyses meegenomen door elk overstromingsscenario onder te verdelen in vier deelscenario's. De definitie van de deelscenario's berust op de volgende twee aspecten:

1. De nog aanwezige tijd tussen het moment dat er wordt voorspeld dat er een overstroming zal plaatsvinden en het daadwerkelijk optreden van de overstroming.
2. Het al dan niet georganiseerd verlopen van de evacuatie. Elke combinatie van deze aspecten heeft een eigen conditionele kans¹ en een eigen uitkomst (zie ook Figuur 6). Elke uitkomst is een percentage van de bevolking dat in het dijkkringgebied aanwezig is ten tijde van de overstroming. In het kader van het project Waterveiligheid 21ste eeuw (WV21) is een studie gedaan waarin conditionele kansen en evacuatiefracties zijn bepaald². Een evacuatiefractie is het percentage van de bevolking dat het dijkkringgebied naar verwachting heeft verlaten als de overstroming optreedt. De aanpak en getalswaarden (conditionele kansen en percentages geëvacueerden) die in het project VNK2 worden gehanteerd zijn afgeleid van de resultaten van deze studie. De verwachtingswaarden van de evacuatiefracties per dijkkringgebied zijn in WV21 en VNK2 aan elkaar gelijk.

¹ De kansen zijn conditioneel: het zijn kansen gegeven het optreden van een overstroming.

² Maaskant, B. et al. (2009). Evacuatieschattingen Nederland. PR1718.10. HKV lijn in water.



Figuur 6. De vier evacuatiedeelscenario's: elk deelscenario heeft een eigen conditionele kans en uitkomst.

Een mislukte preventieve evacuatie kan leiden tot een vergroting van het aantal slachtoffers. Zo is het mogelijk dat het aantal slachtoffers door filevorming in laaggelegen gebieden stijgt als er preventief wordt geëvacueerd. Door niet te evacueren was het slachtofferaantal dan kleiner geweest.

In VNK2 wordt er vanuit gegaan dat evacuatie enkel kan leiden tot een verkleining van het aantal slachtoffers. Dit betekent dat het ongunstigste geval correspondeert met een situatie waarin er geen evacuatie plaatsvindt.

Het combineren van overstromingsberekeningen bij meervoudige doorbraken

Idealiter wordt voor elk overstromingsscenario een afzonderlijke overstromingsberekening gemaakt. In de praktijk zijn er echter vooral berekeningsresultaten voor enkelvoudige doorbraken voorhanden. Om schattingen van de gevolgen bij meervoudige doorbraken te verkrijgen worden daarom in VNK2 overstromingsberekeningen voor enkelvoudige doorbraken gecombineerd. Daarbij worden de volgende uitgangspunten gehanteerd:

- Waterdiepten worden opgeteld, waarbij de optelling niet boven het worst case scenario mag uitkomen. Op deze wijze ontstaat een conservatieve schatting van de economische schade en het aantal slachtoffers.
- Van stroomsnelheden en stijgsnelheden worden de lokale maxima van de waarden voor de enkelvoudige doorbraken aangehouden. Van het optellen van de waarden (wat conservatiever zou zijn) is afgezien omdat bij optelling van stroom- en stijgsnelheden onrealistische waarden zouden kunnen resulteren.

Bovenstaande procedure levert een juiste berekening op van de resultaten als de overstromingspatronen voor de verschillende doorbraken elkaar nergens overlappen. In dat geval worden er immers nergens waterdiepten opgeteld e.d. Indien er sprake is van grote overlap ontstaat in het overlappende gebied echter een onnauwkeurigheid. In de praktijk van VNK2 blijkt de nauwkeurigheid van de aanpak voldoende om het overstromingsrisico goed in beeld te kunnen brengen.

Het meenemen van de belastingcondities bij falen

De gevolgen bij een dijkdoorbraak zullen groter zijn naarmate de dijken bij hogere waterstanden zullen bezwijken (zie ook paragraaf 5.2).

Bij de selectie van de overstromingsberekeningen voor het berekenen van de gevolgen bij een bepaald overstromingsscenario wordt daarom gekeken naar de waarschijnlijke belastingen bij het falen van de kering. Er ligt hier dus een relatie met de berekende kansen op overstromingen: een overstromingsscenario met een zeer kleine kans van voorkomen, treedt waarschijnlijk pas op bij zeer extreme waterstanden.

5.5 Stap B1. Opstellen vakindeling

Er worden vakgrenzen aangenomen in de volgende gevallen:

- Dusdanige verandering in belasting en/of sterkte-eigenschappen (ondergrond, geometrie) dat niet langer sprake is van homogene belastingen en/of sterkte-eigenschappen.
- Verandering van de categorie waartoe de waterkering behoort.
- Verandering van het type waterkering.
- Grens van het beheersgebied van het hoogheemraadschap of waterschap.
- Grens van een ringdeel.
- Aanwezigheid van constructieve elementen.

In aanvulling op bovenstaande criteria worden soms ook vakgrenzen uit de toetsronde overgenomen. Hierdoor is het eenvoudiger om de resultaten van de wettelijke toetsing te duiden ten opzichte van de resultaten van VNK2 (en vice versa). Een voorbeeld van een vakindeling is gegeven in Figuur 7.



Figuur 7. Voorbeeld van een vakindeling: de onderverdeling van dijkkring 36 Land van Heusden/de Maaskant in 12 dijkvakken.

Naast de vakindeling worden ook de kunstwerken geselecteerd die mogelijk een relevante bijdrage leveren aan het overstromingsrisico. Een kunstwerk kan, net zoals een dijkvak of een duinvak, worden opgevat als een apart element. Voor de risicoberekeningen bestaat er dan ook geen principieel onderscheid tussen de kunstwerken enerzijds en de dijken en duinen anderzijds.

5.6 Stap B2. Vakschematisatie en faalkansberekening

De beschouwde faalmechanismen

Bij de vakschematisatie wordt per faalmechanisme op basis van gegevens over de ondergrond en geometrie een

modelmatige beschrijving van de sterkte-eigenschappen van de waterkering opgesteld. De faalmechanismen die in VNK2 worden beschouwd zijn weergegeven in Tabel 1.

Ook is kort aangegeven op welke wijze de faalmechanismen zijn gemodelleerd. Daarbij is op hoofdlijnen aangegeven op welke punten de modellering afwijkt van de modellering die in de wettelijke toetsing wordt gehanteerd. Uiteraard kunnen de toetsmodellen en de VNK2-modellen nooit 1-op-1 worden vergeleken aangezien de modellering in VNK2 dient om faalkansen te berekenen, terwijl de modellering in de toetsing dient om te bezien of een waterkering een bepaald toetspeil veilig kan keren.

Tabel 1. Beschouwde faalmechanismen en modelbeschrijving.

TYPE WATERKERING	FAAL-MECHANISME	KORTE MODELBESCHRIJVING
Dijk	Overloop/golfoverslag	<p>Met behulp van het CIRIA-model wordt een overslagdebiet bepaald waarbij de grasbekleding zal falen. Dit debiet kan oplopen tot meer dan 25 l/s/m, afhankelijk van de kwaliteit van de grasmat en de helling van het binnentalud. Er wordt dus niet gerekend met een vast kritiek overslagdebiet zoals dat in de toetsing wel het geval is (0,1 l/s/m, 1 l/s/m of 10 l/s/m). Er wordt geen rekening gehouden met reststerkte (benodigde tijd voor erosie van de afdekkende kleilaag). Dit wordt gedaan om een te groot optimisme te voorkomen. Enige terughoudendheid is gewenst omdat het faalmechanisme “verweking van het binnentalud” in VNK2 buiten beschouwing gelaten wordt (en dus ook de faalkansbijdrage daarvan). Dit wordt gedaan vanwege de beperkte betrouwbaarheid van de beschikbare modellering van dit faalmechanisme.</p>
	Macrostabieleit binnenwaarts	<p>Het faalmechanisme macrostabieleit binnenwaarts betreft het afschuiven van (een deel van) de binnenzijde van een dijk. De faalkansberekening wordt uitgevoerd met MProStab. De in de gedetailleerde toetsregel gehanteerde veiligheidsfactoren zijn afgeleid van berekeningen op basis van dit probabilistische model. In VNK2 wordt een globale reststerkteberekening uitgevoerd: de kans op falen na een afschuiving wordt dus meegenomen. In de toetsing gebeurt dit niet. Belangrijk is ook dat in VNK2 alleen wordt gekeken naar afschuivingen die het waterkerend vermogen aantasten en niet naar afschuivingen van de teen die voor bijvoorbeeld de begaanbaarheid relevant zijn, dit in tegenstelling tot de toetsing.</p>

<p>Dijk</p>	<p>Opbarsten en piping</p>	<p>De faalkansberekening wordt uitgevoerd volgens de formule van Sellmeijer. De aanwezige kwelweglengte dient groter te zijn dan de benodigde kwelweglengte, anders zal zich een voortschrijdend erosieproces inzetten. De Sellmeijer-formule wordt ook als gedetailleerde toetsregel gehanteerd, alleen wordt er in de toetsing niet gerekend met kansverdelingen van invoerwaarden maar met (daarvan afgeleide) rekenwaarden. In de toetsing wordt naast de Sellmeijer-formule ook de regel van Bligh gehanteerd. Op basis van deze rekenregel mogen kortere kwelweglengtes worden toegelaten dan volgens de regel van Sellmeijer. In VNK2 wordt de regel van Bligh niet gebruikt. Het ENW heeft overigens ook geadviseerd om de regel van Bligh niet langer te gebruiken bij de toetsing.</p>
<p>Duin</p>	<p>Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam</p>	<p>In VNK2 worden verschillende modellen gebruikt voor gras-, steen-, en asfaltbekledingen (met/zonder filterlagen etc.). Er wordt, anders dan in de toetsing, gekeken naar de kans op een bres na een initiële beschadiging (globale reststerkteberekening). De probabilistische modelleringen voor het deelfaalmechanisme “beschadiging bekleding” wijken op onderdelen af van de modelleringen die in de toetsing worden gehanteerd.</p>
<p>Duin</p>	<p>Duinafslag</p>	<p>Het belastingmodel dat in PC-Ring is geïmplementeerd is gebaseerd op de voor de ontwikkeling van het VTV2006-model (de toetsing) gebruikte probabilistische modellering. Ook het sterktemodel (DUROS-PLUS) sluit aan op het VTV2006-model. Een duin faalt (volgens de definities in de toetsing en in VNK2) als de berekende positie van het afslagpunt verder landinwaarts ligt dan de</p>

		<p>kritieke positie van het afslagpunt. Het kritieke afslagpunt wordt bepaald op basis van het grensvolume zand dat nog net aanwezig dient te zijn om een doorbraak te voorkomen. Zoals in de Technische Leidraad Duinafslag staat beschreven wordt aangenomen dat er een doorbraak van het duin zal optreden als het afslagpunt landwaarts van het kritieke afslagpunt komt te liggen: het grensprofiel beschrijft een grenstoestand en biedt geen reserve.</p>
<p>Kunstwerk</p>	<p>Overloop en golfoverslag</p>	<p>Bij zowel de toetsing als VNK2 worden de overslag- en overloopformules uit de Leidraad Kunstwerken gebruikt. Bij de toetsing wordt in eerste instantie gekeken naar de grootte van het overslagdebiet en de aanwezige overhoogte van de kruin ten opzichte van het toetspeil. Indien deze voldoen aan bepaalde voorwaarden kan de toetsing worden afgerond. Indien daar niet aan wordt voldaan volgt een beschouwing van de standzekerheid van het object bij overloop/overslag. Bij VNK2 wordt het kritieke overloop-/overslagdebiet vanuit het oogpunt van komberging/sterkte bodembescherming (standzekerheid) direct ingevoerd, waarna vervolgens wordt bepaald bij welke condities (waterstand en golfhoogte) dit kritieke debiet bereikt wordt. Reststerkte ten aanzien van het bezwijken van het kunstwerk wordt bij VNK2 op deze wijze direct ingebracht in de faalkansberekeningen (bij het verlies van de bodembescherming zal het kunstwerk vrijwel zeker falen).</p>
	<p>Niet-sluiten van afsluitmiddelen</p>	<p>De beoordeling van de betrouwbaarheid sluiting van het kunstwerk bestaat binnen VNK2 standaard uit het bepalen van de kans op niet-sluiten en de gevolgen voor de</p>

Kunstwerk

Achter- en onderloopsheid

standzekerheid van het kunstwerk als het niet gesloten wordt. In de toetsing wordt in eerste instantie gekeken naar het gebruik van de keermiddelen en speelt het Open KeerPeil (OKP) een belangrijke rol.

Zowel binnen de toetsing als binnen VNK2 wordt gebruik gemaakt van de rekenregels van Bligh en Lane. De resultaten van beide methoden zijn voor dit faalmechanisme dan ook vergelijkbaar. Meer geavanceerde modellen worden in VNK2 niet toegepast, terwijl er binnen de toetsing nog mogelijkheden bestaan om specifieke grondwaterstromingsberekeningen te maken en op basis hiervan de toetsing uit te voeren (geavanceerde toetsing).

Constructief falen

VNK2 beschouwt de bezwijksituaties die hoogwatergerelateerd zijn en die direct leiden tot verlies van het waterkerende vermogen (aantasting waterkering). Daarbij wordt in sommige gevallen (bezwijken keermiddelen en aanvaren) rekening gehouden met reststerkte in de zin dat de faalkans van de bodembescherming ook wordt beschouwd. PC-Ring rekent daarnaast faalkansen uit op basis van ingevoerde verwachtingswaarden voor de sterkte. Bij de toetsing wordt in eerste instantie gekeken naar de ontwerpuitgangspunten en in hoeverre de in het ontwerp toegepaste belasting- en veiligheidsfactoren passen in de huidige situatie. Een eventuele reststerkte wordt niet beschouwd.

De mogelijke faalmechanismen zettingsvloeiing, afschuiven voorland, afschuiven buitentalud, microinstabiliteit, verweking en heave worden in de toetsing wèl maar in VNK2 niet meegenomen. Daarnaast wordt voor bekleding de schade door stroming en golven niet meegenomen. De reden is dat deze faalmechanismen, met uitzondering van verweking (zie toelichting bij overloop/golfoverslag in Tabel 1), niet direct tot bresvorming leiden en/of niet hoogwatergedreven zijn (zodat de kans op het optreden van het faalmechanisme en een hoogwater gering is). Het is dan ook te verwachten dat het buiten beschouwing laten van deze faalmechanismen geen relevante invloed heeft op het beeld van het overstromingsrisico. In de VNK2-rapporten worden faalmechanismen waarvoor geen faalkansen (kunnen) worden bepaald kwalitatief behandeld.

Ook aansluit- en overgangsconstructies kunnen niet met het VNK-instrumentarium worden geanalyseerd. De ervaring bij overstromingen in het buitenland leert dat de overgang van harde naar zachte constructies vaak zwakke plekken vormen. Het is onduidelijk in hoeverre de toepassing van de Nederlandse richtlijnen voor het ontwerp van aansluit- en overgangsconstructies afdoende veiligheid bieden. Hiervoor is aanvullend onderzoek benodigd. Vanwege het ontbreken van geschikte modellen wordt het falen van aansluit- en overgangsconstructies in VNK2 niet beschouwd. In hoeverre dit tot een onderschatting van het overstromingsrisico leidt, is onbekend. Overigens vormen de aansluit- en overgangsconstructies ook in de wettelijke toetsing een blinde vlek.

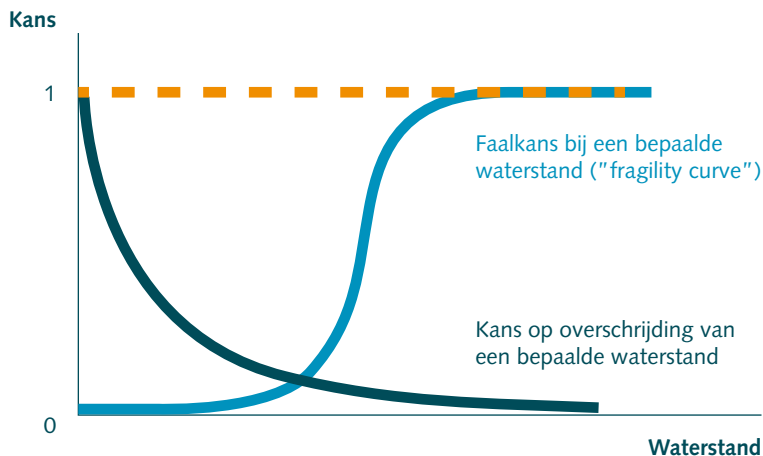
Benadrukt wordt dat het doel van VNK2 (het in beeld brengen van overstromingsrisico's) niet verward moet worden met dat van een wettelijke toetsing. Het detailniveau van de

uitgevoerde analyses in VNK2 en dus ook de selectie van faalmechanismen is afgestemd op de primaire doelstelling van het project: het verschaffen van een beeld van het overstromingsrisico. VNK2 doet dat met bestaande modellen en inzichten. Bij ontbrekende kennis worden zo goed mogelijke aannamen gedaan. Door de invloed daarvan in beeld te brengen, kunnen waardevolle inzichten worden opgedaan over het belang van kennishiaten.

De hydraulische belastingen

De hydraulische belasting op een waterkering bestaat doorgaans uit twee componenten, de waterstand en golven. De hydraulische belastingen worden ook wel randvoorwaarden genoemd. In VNK2 wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde Thermometerrandvoorwaarden 2006 (TMR2006) zodat wordt aangesloten op de meest recente inzichten. De TMR2006 wijken soms af van de Hydraulische Randvoorwaarden 2006 (HR2006) die worden gebruikt in de wettelijke toetsing. Voor het IJsselmeergebied, en de dijken en duinen langs de kust, zijn de randvoorwaarden echter vrijwel aan elkaar gelijk. Er zijn wel wat verschillen in het rivieren-gebied. Over het algemeen zijn de verschillen klein en niet groter dan 0,20 m. Uitzondering hierop is de Vechtdelta

waar de verschillen gemiddeld 0,30-0,50 m zijn. Anders dan in de toetsing wordt in VNK2 gewerkt met hele waterstandsverdelingen en niet alleen met toetspeilen (bijv. een waterstand met een overschrijdingskans van 1/1250 per jaar). Een kering kan immers ook falen bij hogere (of lagere) waterstanden dan het toetspeil. Voor een faalkansberekening is het dan ook nodig om met de gehele waterstandverdeling te rekenen. Dit is geïllustreerd in Figuur 8. De figuur toont de toename van kans op het falen van de waterkering bij hogere waterstanden. Er is niet één waterstand waarbij de kans abrupt toeneemt van nul naar één. Door de faalkans bij elke waterstand te wegen met de kans op het optreden van de bewuste waterstand kan de (onconditionele) faalkans van de waterkering worden bepaald.



NB

De faalkans volgt uit vermenigvuldiging van de kansen op bepaalde waterstanden en de (conditionele) faalkansen bij die waterstanden. De kans op een bepaalde waterstand is kleiner dan de kans op overschijding van die waterstand.

Figuur 8. Schematische weergave van een faalkansberekening op basis van een waterstandsverdeling en een zg. "fragility curve".

Voor het rivierengebied zijn de waterstanden bepaald voor verschillende rivierafvoeren. Elke rivierafvoer heeft een eigen overschrijdingsfrequentie. De relatie tussen afvoer en overschrijdingsfrequentie wordt weergegeven door middel van een werklijn. De onzekerheden ten aanzien van de werklijn worden in VNK2, net zoals in de toetsing, niet meegenomen.

De waterstanden zijn bekend voor verschillende locaties in de as van de rivier. Deze worden vervolgens vertaald naar oeverlocaties, loodrecht op de as van de rivier. In VNK2 worden de waterstanden ter plaatse van de oeverlocaties gebruikt om de faalkansen mee te berekenen. Deze locaties liggen maximaal 100 m uit elkaar. De golfbelasting wordt steeds apart bepaald, rekening houdend met effectieve strijklengtes en waterdieptes.

Noodmaatregelen worden niet beschouwd

In VNK2 worden noodmaatregelen om de kans op het verlies van waterkerende vermogen tegen te gaan, niet meegenomen in de faalkansberekeningen. Zo wordt de effectiviteit van het plaatsen van zandzakken niet meegenomen in de faalkansberekening voor overloop/golfoverslag en wordt opkisten niet meegenomen in de faalkansberekening voor opbarsten en piping. Aan het niet beschouwen van noodmaatregelen liggen de volgende overwegingen ten grondslag:

1. Praktische overweging: Het is zeer onzeker of noodmaatregelen getroffen kunnen worden onder de zeer zeldzame en extreme omstandigheden die de waterkeringen moeten kunnen weerstaan. In sommige pipinggevoelige gebieden wordt regelmatig opgekist. Daarbij worden er zandzakken rond watervoerende wellen geplaatst. Het opkisten wordt gedaan bij omstandigheden waarbij de kans groot is dat alle wellen worden gevonden, het terrein nog begaanbaar is en er tijdig kan worden ingegrepen.

Het is echter zeer de vraag of dat ook het geval is bij waterstanden die een factor 10-100 minder waarschijnlijk zijn.

Op de in VNK2 berekende faalkansen die horen bij waterstanden die zeldzamer zijn dan bijvoorbeeld 1/100 per jaar, zou het verdisconteren van het effect van noodmaatregelen dan ook nauwelijks van invloed zijn.

2. Principe-overweging: Wanneer noodmaatregelen niet worden beschouwd als integraal onderdeel van het waterkerend systeem, dan mag men er bij de beoordeling van waterkeringen geen rekening mee houden. Deze filosofie ligt ook ten grondslag aan de wettelijke toetsregels en de ontwerpleidraden.

De basis van de faalkansberekening

De berekening van faalkansen per faalmechanisme wordt gedaan op basis van zogenaamde grenstoestandfuncties, of Z-functies. Een grenstoestandfunctie beschrijft het verschil tussen de sterkte en de belasting:

$$Z = R - S$$

Waarin R = sterkte (Resistance); S = belasting (Sollicitation).

Zolang een grenstoestandfunctie groter is dan nul ($Z > 0$) is de sterkte groter dan de belasting en bevindt het element zich in een niet gefaalde toestand. Als $Z \leq 0$, dan is de belasting ten minste zo groot als de sterkte en faalt het element. Als de sterkte-eigenschappen en belastingen onzeker zijn, hebben alle waarden van de sterkte-eigenschappen en de belastingen een kans van voorkomen. Bij sommige combinaties van sterkte-eigenschappen en belastingen zal sprake zijn van falen, bij andere niet. De faalkans van het element wordt bepaald door de som van de kansen die horen

bij alle combinaties van waarden waarvoor geldt $Z \leq 0$. Voor elk faalmechanisme geldt een andere grenstoestandfunctie; voor elk faalmechanisme wordt de sterkte immers bepaald door andere eigenschappen en zijn andere belastingtypen (golven en/of waterstanden) van belang.

Voor de berekeningen van faalkansen per faalmechanisme kunnen verschillende rekentechnieken worden gebruikt, zoals FORM (First Order Reliability Method), SORM (Second Order Reliability Method), Directional Sampling en Monte Carlo. Vanwege de benodigde rekentijden wordt in VNK2 standaard gerekend met FORM. Bij FORM-berekeningen worden alle kansverdelingen getransformeerd naar een standaard normale verdeling en wordt de Z-functie gelineariseerd in het punt met de meest waarschijnlijke combinatie van sterkte-eigenschappen en belastingen waarbij $Z=0$ (het zg. ontwerp punt), zie ook hoofdstuk 7. Met FORM kan in zeer veel gevallen een nauwkeurig resultaat worden verkregen. Bij onnauwkeurigheid wordt in VNK2 overgeschakeld op meer tijdrovende rekenmethoden, zoals Directional Sampling waarbij gericht een groot aantal trekkingen wordt gedaan uit de kansdichtheidfuncties van de verschillende stochasten (onzekere grootheden).

Elke faalkans wordt eerst per doorsnede en voor een korte tijdperiode bepaald. Vervolgens wordt de faalkans opgeschaald zodat een faalkans voor het hele vak en voor een heel jaar wordt verkregen (zie ook hoofdstuk 6 over het lengte-effect). Bij deze opschalingen wordt rekening gehouden met afhankelijkheden in tijd en ruimte. Zo veranderen de sterkte-eigenschappen veelal niet of nauwelijks in de tijd en zou het dus onterecht zijn om per jaar meerdere trekkingen te doen uit bijvoorbeeld de kansdichtheidfunctie van een korreldiameter. Er kunnen zich in een jaar echter wel meerdere hoogwaters

voordoen, zodat uit de waterstandsverdeling wel meerdere trekkingen voor een jaar worden gedaan.

Het combineren van faalkansen per faalmechanisme en vak

Bij het combineren van faalkansen per faalmechanisme op vakniveau tot faalkansen per faalmechanisme op ringniveau en/of totale faalkansen op vakniveau wordt rekening gehouden met de afhankelijkheden tussen de sterkte-eigenschappen en belastingen op verschillende locaties. In VNK2 worden faalkansen dus niet simpelweg opgeteld.

Een dijkkring is op te vatten als een seriesysteem. Een seriesysteem faalt als één van de elementen waaruit het systeem is opgebouwd faalt (zoals bij eenvoudige kerstboomverlichting). De ondergrens van de faalkans (kleinst mogelijke faalkans) van een seriesysteem is gelijk aan de maximale faalkans van de elementen (elk met faalkans P_i). De bovengrens van de faalkans (grootst mogelijke faalkans) van een seriesysteem is gelijk aan de som van de faalkansen van de elementen:

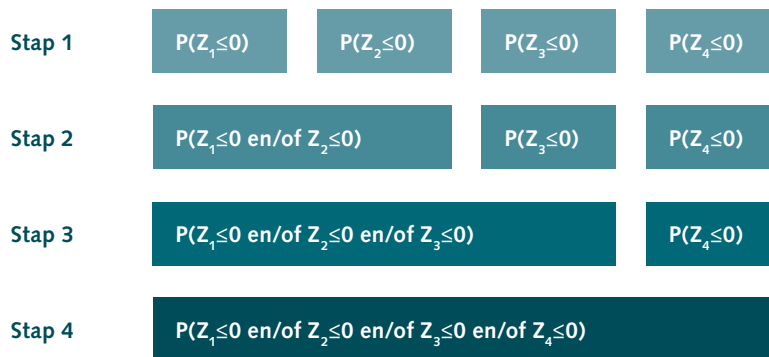
Ondergrens: $P_{\text{combi}} = \text{Max}(P_i)$

Bovengrens: $P_{\text{combi}} = \text{Som}(P_i)$

In de praktijk zal de faalkans van een seriesysteem ergens tussen deze twee extremen in liggen, afhankelijk van de overlap tussen de combinaties van de sterkte-eigenschappen en belastingen waarbij de verschillende elementen falen.

De overstromingskans is gelijk aan de kans dat er ergens een element (dijkvak, duinvak, kunstwerk) faalt. Deze kans kan worden berekend door de faalkansen van alle elementen te combineren. Dit wordt in VNK2 stap voor stap gedaan. Twee gecombineerde elementen vormen samen feitelijk een nieuw

(groter) element. Dit grotere element kan dan weer worden gecombineerd met een ander, oorspronkelijk element, etc. Dit proces, dat 'oprollen' wordt genoemd, is schematisch weergegeven in Figuur 9.



Figuur 9. Schematische weergave van het combineren van elementen (in werkelijkheid worden vakken met de grootste onderlinge correlaties eerst gecombineerd, dit zijn niet noodzakelijkerwijs aangrenzende vakken).

5.7 Stap B3. Berekenen scenariokansen

Elk overstromingsscenario heeft een eigen kans van voorkomen. Elk scenario is een unieke aaneenschakeling van gebeurtenissen (het verloop van een overstroming) die wordt ingeleid door het ontstaan van een bres in één of meer ringdelen. Bij de berekening van de scenariokansen spelen de ringdelen dan ook een voorname rol. Om scenariokansen te berekenen worden de vakken eerst per ringdeel gecombineerd (zoals in Figuur 9). Vervolgens wordt de kans berekend dat het ene ringdeel faalt terwijl alle andere ringdelen niet falen

etc. Daarbij wordt rekening gehouden met de systeemwerking binnen de dijkkring: ontlasten, ontlasten met volgorde-effect of geen ontlasten.

De scenario's karakteriseren samen alle mogelijke overstromingsverlopen. De som van de scenariokansen is in werkelijkheid dan ook gelijk aan de overstromingskans. De som van de berekende scenariokansen en de in stap B2 berekende ringkans (de kans dat er ergens een vak faalt) zijn echter niet precies aan elkaar gelijk door

benaderingsfouten in de rekenroutines.

De reden voor de kleine verschillen tussen de ringkans en de som van de scenariokansen is dat ze langs andere wegen worden berekend. Bij de berekening van de ringkans worden steeds de vakken gecombineerd waartussen de correlatie het grootst is (de praktijk heeft uitgewezen dat dit het meest nauwkeurig is). Bij de berekening van de scenariokansen worden niet steeds de vakken gecombineerd waartussen de correlaties het grootst zijn. Voor de berekening van de scenariokansen worden immers eerst de vakken gecombineerd die behoren tot dezelfde ringdelen. Verder is het aantal keren dat de oprolprocedure wordt doorlopen bij het berekenen van alle scenariokansen vaak aanzienlijk groter dan bij het berekenen van de ringkans. Door het verschil in berekeningswijze is de ringkans meestal niet gelijk aan de som van de scenariokansen. In de praktijk is dit verschil echter zeer gering (ordegrootte procenten).

De gegevens die bij de berekening van de scenariokansen worden gebruikt zijn de betrouwbaarheidsindices en invloedscoëfficiënten van de verschillende vakken, de correlaties tussen de vakken en de opgegeven relaties tussen het faalgedrag van de ringdelen (ontlasten, ontlasten met volgorde-effect, geen

ontlasten). Bij het berekenen van de scenariokansen wordt gebruik gemaakt van een oprolroutine die is gebaseerd op de methode van Hohenbichler-Rackwitz, de eerste-orde benadering die ook in paragraaf 5.5 is genoemd. Per scenario wordt daarbij een ontwerp punt bepaald. Een ontwerp punt beschrijft de meest waarschijnlijke condities bij falen ($Z=0$). De waarden van de belastingstochasten in het ontwerp punt worden gebruikt bij het selecteren van de overstromingsberekeningen (paragraaf 5.4).

5.8 Berekenen overstromingsrisico

Elk scenario heeft een kans van voorkomen en bepaalde gevolgen (schade en slachtoffers). Elk scenario levert zodoende een bijdrage aan het overstromingsrisico. Omdat alle scenario's samen alle mogelijke overstromingsverlopen karakteriseren, is de som van de risicobijdragen per scenario gelijk aan het totale overstromingsrisico. Het overstromingsrisico wordt in VNK2 op verschillende manieren uitgedrukt en weergegeven (Tabel 2). Aan de uitkomsten van VNK2 zijn geen beoordelingscriteria verbonden. Alle risicomaten worden berekend voor de gehele dijkkring. Indien wenselijk kan daarvan worden afgeweken. Zo kan de verwachtingswaarde van de economische schade bijvoorbeeld ook per ringdeel of per scenario worden berekend.

Tabel 2. De risicomaten die in VNK2 worden gehanteerd en hun betekenis.

TYPE RISICO	RISICOMAAT	OMSCHRIJVING	MOGELIJKE TOEPASSING (INDICATIE)
Economisch risico	Jaarlijkse verwachtingswaarde van de economische schade.	Het gewogen gemiddelde van alle mogelijke schades, met als gewichten de kansen op die schades.	Maat voor de waarde van het economisch risico in kosten-batenstudies.
	Jaarlijkse verwachtingswaarde van de economische schade per hectare.	Jaarlijkse verwachtingswaarde van de economische schade, berekend per hectare en weergegeven op een kaart van het dijkkringgebied.	In kosten-batenstudies voor bepaalde delen van een dijkkringgebied.
	Schadecurve ("FS-curve").	De schadecurve beschrijft de kansen op overstromingen met S of meer schade. De FS-curve is feitelijk een weergave van de cumulatieve kansverdeling van de economische schade.	De risicomaat geeft inzicht in de kansen op extreme schades; relevant voor vraagstukken over het omgaan met de schade van overstromingsrampen/de compensatie van getroffen en (bijv. via uitgifte staatsleningen of verzekering)
	Jaarlijkse verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers.	Het gewogen gemiddelde van alle mogelijke slachtofferaantallen, met als gewichten de kansen op die aantallen slachtoffers.	In kosten-batenstudies, waarbij aan elk slachtoffer een geldbedrag wordt toegekend.

TYPE RISICO	RISICOMAAT	OMSCHRIJVING	MOGELIJKE TOEPASSING (INDICATIE)
	Groepsrisico ("FN-curve").	Het groepsrisico beschrijft de kansen op overstromingen met N of meer slachtoffers. De FN-curve is feitelijk een weergave van de cumulatieve kansverdeling van het aantal slachtoffers.	De risicomaat geeft inzicht in de kansen op grote slachtofferaantallen; het is daarmee een maat voor maatschappelijke ontwrichting.
	Plaatsgebonden risico (PR).	Jaarlijkse overlijdenskans van een individu per locatie exclusief het effect van preventieve evacuatie.	De risicomaat geeft inzicht in het aanwezige basisveiligheidsniveau en kan worden gebruikt voor afwegingen ten aanzien van preventie en ruimtelijke ordening
	Lokaal individueel risico (LIR).	Jaarlijkse overlijdenskans van een individu per locatie inclusief het effect van preventieve evacuatie.	De risicomaat geeft inzicht in het aanwezige basisveiligheidsniveau, rekening houdend met evacuatiemogelijkheden en kan worden gebruikt voor afwegingen ten aanzien van preventie, ruimtelijke ordening en rampenbestrijding.

Alle risicomaten kunnen worden berekend op basis van de kansen en gevolgen per scenario. In het onderstaande is dit geïllustreerd voor de berekening van de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers en het groepsrisico. Er is daarbij

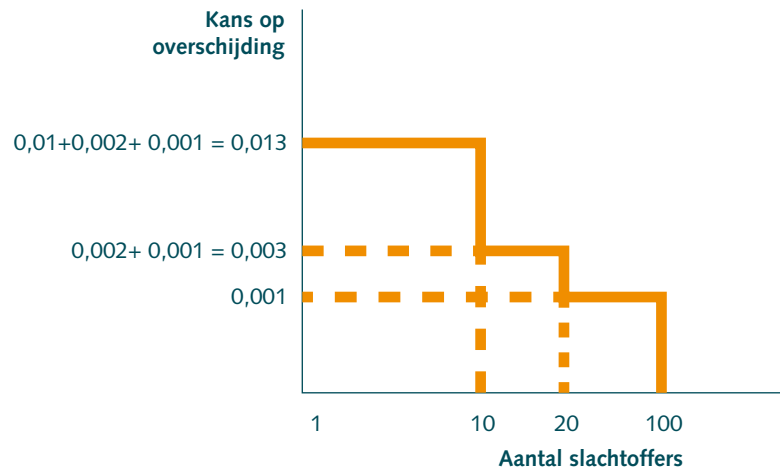
uitgegaan van een dijkkringgebied waarbij alle mogelijke overstromingen kunnen worden gekarakteriseerd door drie overstromingsscenario's met kansen 1/100, 1/500 en 1/1.000 per jaar, waarbij respectievelijk 10, 20, 100 slachtoffers vallen.

VERWACHTINGSWAARDE

Scenario	Kans maal slachtoffers
1	$0,01 \times 10 = 0,1$
2	$0,002 \times 20 = 0,04$
3	$0,001 \times 100 = 0,1$

Jaarlijkse verwachtingswaarde aantal slachtoffers = $0,1 + 0,04 + 0,1 = 0,24$ per jaar

GROEPSRISICO



NB De FN-curve is op dubbel-logaritmische schaal

Figuur 10. De berekening van de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers en de FN-curve.

Als er duizenden scenario's zijn, is het zeer bewerkelijk om voor alle scenario's overstromingsberekeningen samen te stellen, gevolgen (schade en slachtoffers) te berekenen en de koppeling met de scenariokansen te maken. Het is in dergelijke gevallen echter mogelijk om de risicoberekeningen te vereenvoudigen zonder dat daardoor een ontoelaatbare onnauwkeurigheid wordt geïntroduceerd. Als er bij alle scenario's uit zou worden gegaan van de maximale gevolgen, dan zou het overstromingsrisico aanzienlijk overschat kunnen worden. Door voor steeds meer scenario's uit te gaan van de bij die scenario's werkelijk optredende gevolgen i.p.v. de maximale gevolgen kan de

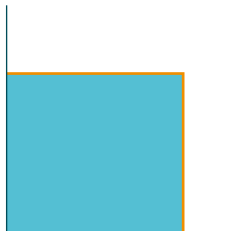
risicoberekening steeds verder worden verfijnd. Verdergaande verfijning heeft echter steeds minder invloed op het beeld van het overstromingsrisico. Dit komt ten eerste omdat veel scenario's zeer kleine kansen van voorkomen hebben (zoals de 10-voudige doorbraken waarbij er in 10 ringdelen bij één hoogwater bressen ontstaan). Ten tweede treden de scenario's met de zeer kleine kansen veelal pas op onder zeer extreme omstandigheden. Dit betekent dat de gevolgen die bij deze scenario's horen veelal weinig afwijken van de maximale gevolgen.

Als praktische benadering wordt in VNK2 de volgende aanpak gehanteerd:

1. Alle scenariokansen worden berekend en op grootte gesorteerd.
2. De 50 scenario's met de grootste kansen worden geselecteerd. De som van de kansen van deze geselecteerde scenario's wordt berekend en vergeleken met de som van alle scenariokansen. Deze vergelijking wordt gerapporteerd.
3. De geselecteerde scenario's worden gekoppeld aan de gevolgen. Voor deze scenario's gaat men dus uit van het voor deze scenario's berekende gevolgen, anders dan van het maximale gevolg.
4. Er worden aanvullend scenario's meegenomen in de risicoberekening als de berekende verwachtingswaarde anders te conservatief (groot) is. Dat is afhankelijk van:
 - Het percentage van de scenariokansen waarvoor de gevolgen nader zijn beschouwd.
 - Het verschil tussen het maximale gevolg en het grootste gevolg van de nader beschouwde scenario's. Als dit verschil groot is, is dit waarneembaar in de FN-curve of FS-curve: de curve heeft dan een zeer lange, blokvormige staart, zoals weergegeven in Figuur 11, midden.

1.
Bij alle scenario's is uitgegaan van het maximale aantal slachtoffers

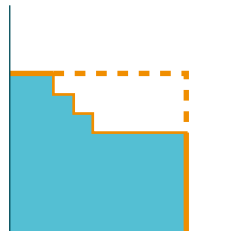
Kans op overschrijding



Aantal slachtoffers

2.
Bij een beperkt deel van de scenario's is uitgegaan van het maximale aantal slachtoffers

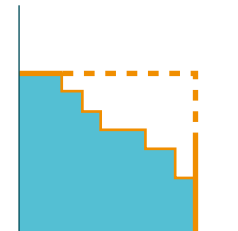
Kans op overschrijding



Aantal slachtoffers

3.
Bij vrijwel alle scenario's is uitgegaan van de daarbij behorende gevolgen i.p.v. het maximale aantal slachtoffers

Kans op overschrijding



Aantal slachtoffers

Figuur 11. Illustratie van het nauwkeuriger bepalen van de FN-curve door het vergroten van het aantal scenario's waarvoor de gevolgen in detail worden meegenomen en dus niet wordt uitgegaan van het maximale gevolg.

6 HET LENGTE-EFFECT NADER VERKLAARD

6.1 Een intuïtieve benadering

Hoe langer een waterkering, des te groter de kans dat zich ergens een zwakke plek bevindt. Het fenomeen dat de faalkans van een waterkering toeneemt met de lengte wordt het lengte-effect genoemd. Een dijkwachter die tijdens hoogwater over een geometrisch uniforme dijk loopt, heeft bij elke stap een kans om een gevaarlijke situatie waar te nemen. De ondergrond is de dijkwachter immers onbekend. Hoe groter de afstand die de dijkwachter aflegt, des te groter de kans is dat hij of zij ergens een probleem aantreft.

Het lengte-effect is niet voor alle faalmechanismen gelijk, ook al is de waterstand bij alle faalmechanismen de drijvende kracht. Dat klinkt wellicht vreemd, maar is direct te relateren aan de praktijk. Dijkwachters die een dijk tijdens hoogwater controleren op overloop hoeven waarschijnlijk niet ver te lopen om een goed oordeel te kunnen vellen over de kans dat de dijk ergens wordt overstroomd. Immers, als de dijk ergens overstroomt, dan is dat verderop waarschijnlijk ook het geval, en vice versa. Dit komt omdat de hoogte van een waterkering een zeer kleine ruimtelijke spreiding kent. De ruimtelijke spreiding van de weerstand van de dijk tegen het faalmechanisme opbarsten en piping is echter relatief groot: de eigenschappen van de ondergrond kunnen elke 100 meter anders zijn. Hoe groter de afstand die de dijkwachters afleggen, des te groter de kans dat ze ergens een wel zullen aantreffen. De kans op opbarsten en piping is langs de totale dijkkring dus groter dan de kans dat dit faalmechanisme zich in een willekeurige dijkstrekking met een lengte van bijvoorbeeld 1 kilometer voordoet.

Voorbeeld uit de externe veiligheid

In andere beleidsvelden wordt al langer rekening gehouden met het lengte-effect. Zo wordt er in de risicoanalyses voor hogedruk-aardgasbuisleidingen gerekend met faalkansen per kilometer buisleiding. Naast een ruimtelijke spreiding in de belastingen (zoals door lokale graafwerkzaamheden) speelt ook de ruimtelijke spreiding in de sterkte-eigenschappen hier een belangrijke rol. Zo kan er door corrosie of een lasfout lokaal een verzwakking van de wand van een buisleiding optreden. Omdat het vooraf onbekend is waar dat het geval zal zijn, wordt een faalkans per lengte-eenheid aangehouden en neemt de faalkans toe naarmate de buisleiding langer is. In het externe veiligheidsbeleid worden bij het transport van gevaarlijke stoffen risicocriteria gehanteerd die zijn gedefinieerd *per kilometer*. De criteria per kilometer zijn dusdanig dat de kans op een ramp op nationaal niveau klein is.

Een waterkering is in veel opzichten vergelijkbaar met de wand van een buisleiding: beide geleiden het transport van een gevaarlijke stof (zoals aardgas of water) en bij bezwijken treedt er in beide gevallen een loss of containment op waardoor de gevaarlijke stof zich in de omgeving kan verspreiden. Ook is het in beide gevallen vaak onduidelijk waar zich de zwakste plek bevindt en hoe zwak die is.

6.2 Basisbeginselen

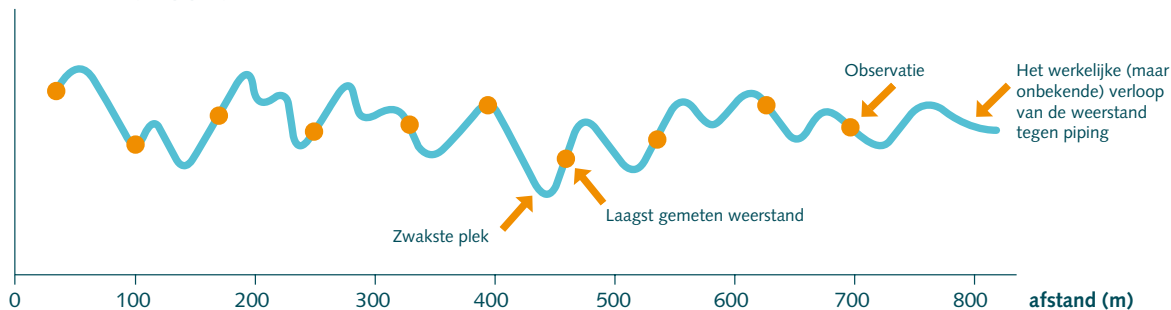
De sterkte-eigenschappen van waterkeringen hebben weliswaar bepaalde exacte waarden, maar zij zijn onbekend totdat zij daadwerkelijk zijn gemeten. In de praktijk is het ondoenlijk en onnodig kostbaar om overal, meter voor meter, sonderingen uit te voeren en boringen te verrichten. Ook al is het in theorie dus mogelijk om de onzekerheid ten aanzien van de ondergrondeigenschappen geheel te elimineren,

in de praktijk zal deze er altijd zijn (in meer of mindere mate). Hoewel het dus onzeker is hoe zwak de zwakste plek is, kan er op basis van een statistische beschrijving van de ruimtelijke spreiding in de sterkte-eigenschappen wel een inschatting worden gegeven van de kans dat de minimaal aanwezige sterkte een bepaalde waarde heeft.

Een waterkering zal altijd het eerste bezwijken waar deze *daadwerkelijk* het zwakste is. Veelal is het ons door beperkte kennis/gegevens echter onbekend hoe zwak de zwakste plek precies is en waar die zich bevindt. Hierin ligt de oorsprong van het lengte-effect: het lengte-effect is het gevolg van het feit dat zich in elke extra lengte-eenheid een nog zwakkere plek zou kunnen bevinden. Soms is die kans klein (klein lengte-effect) en soms is die kans groot (groot lengte-effect). Bij een groot lengte-effect zal de inschatting van de kans op

een doorbraak ergens *in een dijkstrekking* sterk toenemen met de lengte van de dijkstrekking. Het bovenstaande is grafisch geïllustreerd in Figuur 12. De figuur toont het verloop van weerstand tegen bijvoorbeeld opbarsten en piping. Het verloop van de werkelijke waarden van deze weerstand is deterministisch, maar ons niet overal bekend (door beperkte gegevens over de ondergrond en modelonzekerheid). Als er op bepaalde locaties metingen worden gedaan, dan is de weerstand op die locaties bekend. Welke weerstanden er tussen de meetlocaties voorkomen blijft echter onbekend. Als er in de faalkansberekeningen van de laagst gemeten weerstand tegen piping zou worden uitgegaan, dan zou de faalkans worden onderschat. De weerstand kan immers ook een kleinere waarde aannemen. De correcte aanpak is nu om de ruimtelijke spreiding statistisch te beschrijven en op basis daarvan een faalkansberekening te maken.

Weerstand tegen piping



Figuur 12. De weerstand tegen piping is weliswaar deterministisch maar alleen op de meetlocaties bekend. De figuur toont het werkelijke verloop van de weerstand tegen piping (doorgetrokken lijn) en de locaties waar metingen zijn verricht en de weerstand bekend is (punten). De meetlocaties liggen ca. 70 m uit elkaar. Door ruimtelijke correlaties is de weerstand vlak naast een meetlocatie vrijwel gelijk aan de gemeten waarde. Op grotere afstand van een meetlocatie kan de weerstand echter sterk afwijken van de gemeten waarde.

Figuur 13 beschrijft één van de vele mogelijke realisaties die hoort bij de statistische beschrijving van de weerstand tegen piping (een realisatie is een mogelijke uitkomst die met een bepaalde kans overeen komt met de werkelijkheid). De kans dat de weerstand tegen piping ergens in de dijkstrekking tekort schiet, kan worden berekend door voor alle mogelijke realisaties faalkansen te berekenen, en deze uitkomsten vervolgens te wegen met hun kansen van voorkomen.

Omdat de statistische eigenschappen overal gelijk zijn langs de dijkstrekking is ook de berekende faalkans per lengte-eenheid, zoals per 100 meter, steeds hetzelfde. De faalkans die hoort bij de werkelijk aanwezige (maar onbekende) weerstand tegen piping kan voor elke 100 m-strekking echter zowel groter als kleiner zijn.

De faalkans van de volledige dijkstrekking is groter dan de berekende faalkans voor een vak met een lengte van 100 m. Immers: hoe groter de beschouwde lengte, des te groter de kans dat de zwakste plek per realisatie nog zwakker is. Als de berekende faalkans per 100 meter 1/10.000 per jaar zou zijn, dan zou de faalkans per kilometer ongeveer 1/1.000 per jaar kunnen zijn. Het feit dat de faalkansen bij dit voorbeeld grofweg optellen (groot lengte-effect) wordt verklaard door het gegeven dat de weerstand tegen piping na 100 m weer volledig anders kan zijn (zie de fluctuaties in Figuur 13).

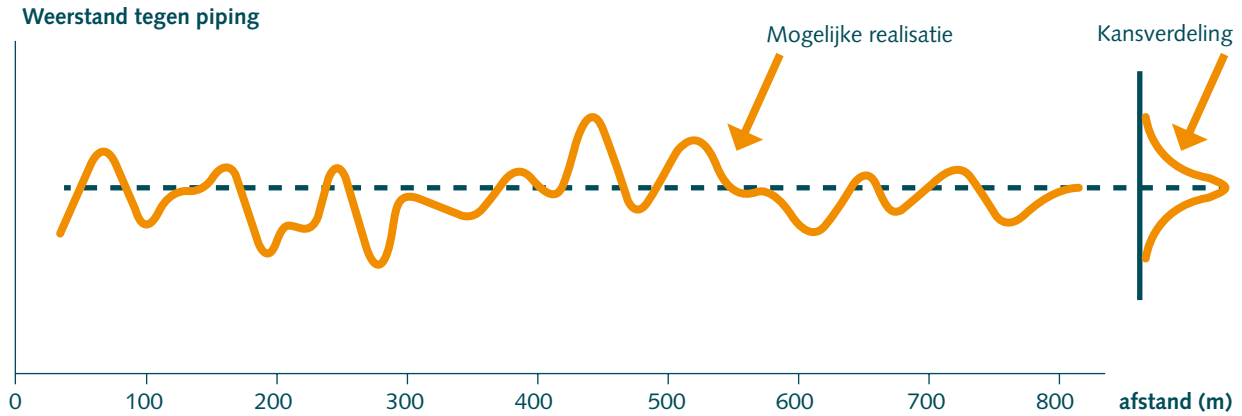
Als de weerstand tegen piping zeer langzaam zou fluctueren (grote ruimtelijke correlaties), dan zou de werkelijk laagste weerstand pas op grote afstand merkbaar kunnen verschillen van de gemeten laagste weerstand. In dat geval zou de berekende faalkans voor een 100 m-vak vrijwel gelijk zijn aan de berekende faalkans voor een dijkstrekking van 1 km. Bij grote ruimtelijke correlaties is het lengte-effect dus klein.

Als men overal metingen zou verrichten en vervolgens op basis van de laagst waargenomen weerstand tegen piping een faalkansberekening zou uitvoeren (en de statistische beschrijving van de ruimtelijke fluctuaties is correct), dan zal men ook een faalkans van 1/1.000 per jaar vinden. Het voornaamste verschil met de situatie voor de meetcampagne is dat men er nu geen faalkansen meer zou berekenen die per 100 m-vak gelijk zijn. De faalkans zou immers fluctueren met de gemeten weerstand. Omdat het na de meetcampagne bekend zou zijn hoe zwak de zwakste plek is, zou de faalkans voor die plek gelijk zijn aan de kans op opbarsten en piping in de dijkstrekking. De grootste faalkans op vakniveau zou na de meetcampagne dus gelijk zijn aan de faalkans van de dijkstrekking. Na de meetcampagne zou van een lengte-effect dan ook geen sprake meer zijn. Dit geeft aan dat het lengte-effect onlosmakelijk is verbonden met kennisonzekerheid.

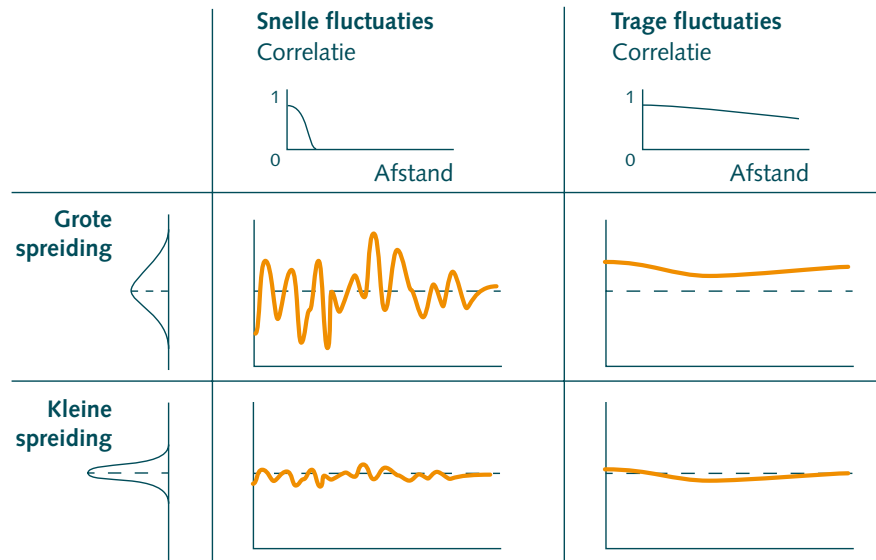
Uit het bovenstaande blijkt dat er sprake is van een groot lengte-effect als aan de volgende voorwaarden is voldaan:

1. Grote spreiding in de sterkte-eigenschappen en/of belastingen;
2. Snelle ruimtelijke fluctuaties;
3. Kennisonzekerheid ten aanzien van de werkelijk waarden van de sterkte-eigenschappen en/of belastingen op verschillende locaties (of tijdstippen).

De betekenis van voorwaarden 1 en 2 is geïllustreerd in Figuur 14. Alleen in het geval van grote spreiding en snelle fluctuaties (linksboven) kan het lengte-effect groot zijn.



Figuur 13. Eén van de vele mogelijke realisaties die hoort bij de statistische beschrijving van de weerstand tegen piping (o.b.v. gemiddelde, spreiding en ruimtelijke correlaties).



Figuur 14. Mogelijke realisaties voor verschillende groottes van de standaardafwijking en de ruimtelijke correlaties.

6.3 Wiskundige toelichting op het lengte-effect

In paragraaf 6.2 is toegelicht waarom grote en snelle ruimtelijke fluctuaties, in combinatie met kennisonzekerheid, aanleiding geven tot een lengte-effect. Bij een groot lengte-effect is de faalkans op ringniveau groter dan de grootste faalkans op vak- of doorsnedeniveau. Hoewel ook binnen vakken sprake is van een lengte-effect, wordt in het onderstaande ten behoeve van de eenvoud alleen nog gesproken over vakken.

Extreme waarden theorie

Stel dat de dijkstrekking uit Figuur 12 in een n-tal vakken is verdeeld, dat de vakken dezelfde statistische eigenschappen hebben en dat de vakken dusdanig lang zijn dat de weerstand tegen piping in elk vak als onafhankelijk mag worden beschouwd. Dit laatste betekent dat er per realisatie (een mogelijk verloop van de weerstand in de ruimte, zie boven) geen relatie bestaat tussen de laagste weerstand in het ene vak en de laagste weerstand in een naastgelegen vak. In Figuur 14 links bovenin betekent dit dat de vaklengte groter is dan de afstand tussen twee punten die ruimtelijk ongecorreleerd zijn.

Per vak kan de minimaal aanwezige weerstand³ worden beschreven door een kansdichtheidfunctie. De kans dat een dijkvak faalt, is gelijk aan de kans dat de minimaal aanwezige weerstand kleiner is dan de belasting:

$$P_{f,i} = P(Z_i \leq 0) = P(R_i \leq S)$$

³ Waar wordt gesproken over een laagste waarde wordt bedoeld op een lokaal gemiddelde dat een tijd- en ruimteschaal kent waardoor de waterkering bij overschrijding kan falen. Een enkele uitschieter op bijvoorbeeld atomaire schaal zal uiteraard niet leiden tot het falen van een waterkering.

De kans dat er in een dijkstrekking die bestaat uit een n-tal dijkvakken ten minste één dijkvak faalt, is gelijk aan de kans dat de belasting groter is dan de minimaal aanwezige weerstand die ergens aanwezig is:

$$P_f = P(\text{Min}(R_i) \leq S)$$

Om de faalkans te kunnen bepalen is dus nodig om de kansverdeling te bepalen van de minimaal aanwezige weerstand in de dijkstrekking. De kans dat de weerstand in een vak kleiner is dan \bar{R} (notatie: $F_{R_i}(\bar{R})$) kan worden beschreven door:

$$P(R_i \leq \bar{R}) = F_{R_i}(\bar{R})$$

De kans dat de weerstand in een vak groter is dan \bar{R} is zodoende:

$$P(R_i > \bar{R}) = 1 - F_{R_i}(\bar{R})$$

De kans dat de weerstand overall in een n-tal vakken groter is dan \bar{R} kan worden beschreven door:

$$P(R_1 > \bar{R} \text{ en } R_2 > \bar{R} \text{ en } \dots \text{ en } R_n > \bar{R}) = (1 - F_{R_i}(\bar{R}))^n$$

De kans dat de weerstand ergens, in één van de vakken, kleiner is dan \bar{R} is zodoende:

$$P(\text{Min}(R_i) < \bar{R}) = 1 - (1 - F_{R_i}(\bar{R}))^n$$

Door te differentiëren kan vervolgens de kans worden bepaald dat de zwakste plek een weerstand heeft die gelijk is aan \bar{R} :

$$P(\text{Min}(R_i) = \bar{R}) = n \cdot f_{R_i}(\bar{R}) \cdot (1 - F_{R_i}(\bar{R}))^{n-1}$$

($f_{R_i}(\bar{R})$ is de kansdichtheidfunctie van de weerstand \bar{R} in een vak)

Op basis hiervan kan de faalkans worden berekend. Op basis van deze formule kan wiskundig worden bewezen dat de faalkans van een seriesysteem toeneemt bij een grotere spreiding in de sterkte en bij een groter aantal onafhankelijke elementen (ofwel: snellere ruimtelijke fluctuaties). Onder het kopje "Basisbeginselen" was dit verschijnsel ook al beschreven. In het navolgende wordt dit geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld.

Voorbeeld lengte-effect op basis van de theorie van de extreme waarden

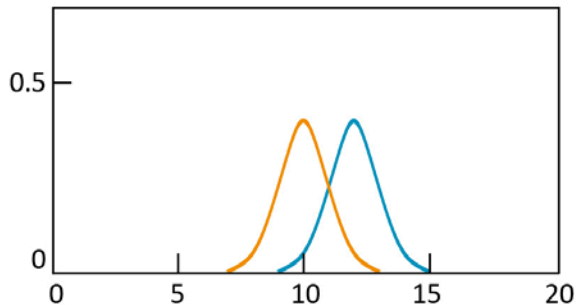
Stel een seriesysteem bestaat uit n elementen. De sterkte per element is niet exact bekend. Wel is bekend dat de kans dat een element een bepaalde sterkte bezit, kan worden beschreven op basis van een normale verdeling met gemiddelde μ_{R_i} en standaarddeviatie σ_{R_i} . Elk element wordt onderworpen aan dezelfde belasting (S). De kansverdeling van de grootste belasting in een jaar is een normale verdeling met gemiddelde μ_s en standaarddeviatie σ_s .

Stel $f(R_i) = \text{Norm}(12, 1)$ en $f(S) = \text{Norm}(10, 1)$. In Figuur 15 zijn links de kansverdelingen van de belasting en de minimaal aanwezige sterkte getoond voor een systeem dat bestaat uit één element. Rechts zijn de kansverdelingen getoond voor een seriesysteem dat bestaat uit 5 elementen. De kans dat de zwakste plek nog zwakker is, is groter bij het systeem dat

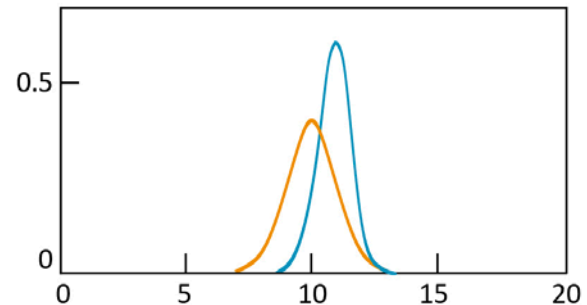
bestaat uit 5 elementen. De faalkans per element is 0,08 per jaar. De faalkans voor het seriesysteem dat bestaat uit 5 elementen is 0,24 per jaar.

De toename van de faalkans van het seriesysteem met het aantal elementen is niet alleen afhankelijk van de faalkans per element, maar ook van de grootte van de spreiding in de sterkte-eigenschappen (zie ook de paragraaf "Basisbeginselen"). In het onderstaande wordt dit getalsmatig geïllustreerd.

Kansdichtheid



Kansdichtheid



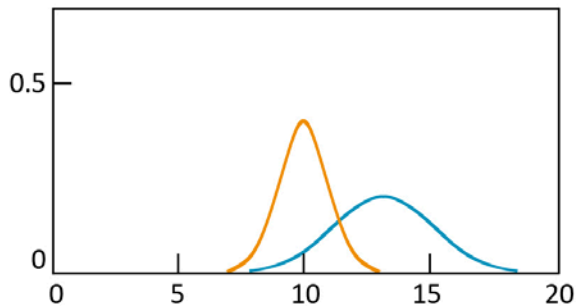
Figuur 15. Kansverdelingen van de belasting en de minimaal aanwezige sterkte bij een seriesysteem dat bestaat uit 1 element (links) en een seriesysteem dat bestaat uit 5 elementen (rechts)

Stel de kansverdeling van de sterkte van een element is niet $\text{Norm}(12, 1)$ maar $\text{Norm}(10+\sqrt{10}, 2)$. De faalkans per element is dan gelijk aan die in het bovengenoemde voorbeeld, maar de standaardafwijking is wel groter. In Figuur 16 zijn de kansverdelingen van de belasting en de minimaal aanwezige sterkte getoond als de standaardafwijking van de sterkte van een element niet 1 maar 2 is (en het gemiddelde niet 12 maar $10+\sqrt{10}$). In de figuur is te zien dat de kans dat de sterkte kleiner is dan de belasting groter is bij het seriesysteem van 5 elementen dan voorheen het geval was. De faalkans per element is nog steeds 0,08 per jaar. De faalkans voor een seriesysteem dat bestaat uit 5 elementen is nu echter 0,30 per jaar.

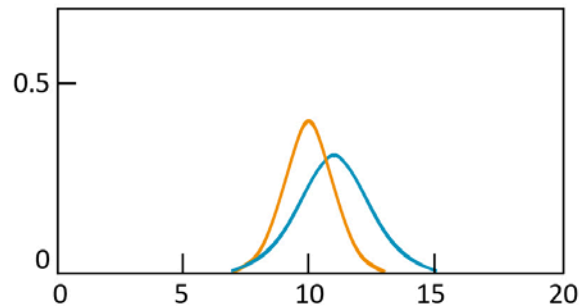
Op grond van bovenstaande voorbeelden kan (wederom) worden geconcludeerd dat het lengte-effect groter is, naarmate:

1. De waterkering is op te vatten als een seriesysteem dat bestaat uit een groter aantal onafhankelijke elementen (ofwel: de onzekere eigenschappen sneller in de ruimte fluctueren);
2. De spreiding in de sterkte-eigenschappen groter is.

Kansdichtheid



Kansdichtheid



Figuur 16. Kansverdelingen van de belasting en de minimaal aanwezige sterkte bij een seriesysteem dat bestaat uit 1 element (links) en een seriesysteem dat bestaat uit 5 elementen (rechts) bij een grotere spreiding in de sterkte.

Het combineren van faalkansen per element volgens de methode van Hohenbichler-Rackwitz

Bij het combineren van de faalkansen per vak of kunstwerk wordt gebruik gemaakt van de methode van Hohenbichler-Rackwitz. Dit is een eerste orde benadering waarbij steeds een nieuwe, lineaire betrouwbaarheidsfunctie wordt bepaald op basis van de gelineariseerde betrouwbaarheidsfuncties van de elementen.

De kansdichtheidfuncties van alle stochasten worden getransformeerd naar standaard normale verdelingen (normale verdelingen met gemiddelde 0 en standaardafwijking 1).

Stel de betrouwbaarheidsfuncties van de twee elementen kunnen als volgt worden weergegeven (omdat er slechts één stochast is, is de invloedscoëfficiënt gelijk aan 1):

$$Z_1 = \beta_1 - u$$

$$Z_2 = \beta_2 - v$$

Waarin:

Z_i = betrouwbaarheidsfunctie van element i

β_i = betrouwbaarheidsindex van element Z_i

u, v = standaard normaal verdeelde stochasten

Als de Z-functies ongecorrleerd zijn, dan is het faalgedrag van beide elementen onafhankelijk. In dat geval is de kans dat een seriesysteem faalt dat bestaat uit deze twee elementen:

$$P_f = P(Z_1 \leq 0 \cup Z_2 \leq 0) = P(Z_1) + P(Z_2) - P(Z_1) \cdot P(Z_2)$$

(Z-functies ongecorrleerd)

De faalkans van het seriesysteem is bij onafhankelijkheid dus

vrijwel gelijk aan de som van de faalkansen van de elementen. In de praktijk is er veelal sprake van correlaties tussen zowel de sterkte-eigenschappen als de belastingen op verschillende locaties. Er bestaan dan dus ook correlaties tussen de Z-functies van verschillende vakken. Stel dat de correlatiecoëfficiënt voor de Z-functies van de twee elementen in het voorbeeld gelijk is aan ρ . De Z-functie van het tweede element is dan te schrijven als:

$$Z_2 = \beta_2 - \rho \cdot u - \sqrt{(1 - \rho^2)} \cdot v$$

De waarde van stochast u bepaalt dus volledig de waarde van Z_1 en ten dele de waarde van Z_2 . De mate waarin Z_2 wordt bepaald door de waarde van stochast u is afhankelijk van de correlatiecoëfficiënt ρ . Als de Z-functies volledig gecorrleerd zijn ($\rho = 1$), dan worden zowel Z_1 als Z_2 volledig bepaald door de waarde van u . Omdat een seriesysteem faalt als één element faalt, bepaalt het element met de kleinste betrouwbaarheidsindex dan de faalkans van het systeem. Bij volledige correlatie is de faalkans van het seriesysteem dus gelijk aan de grootste faalkans van de twee elementen:

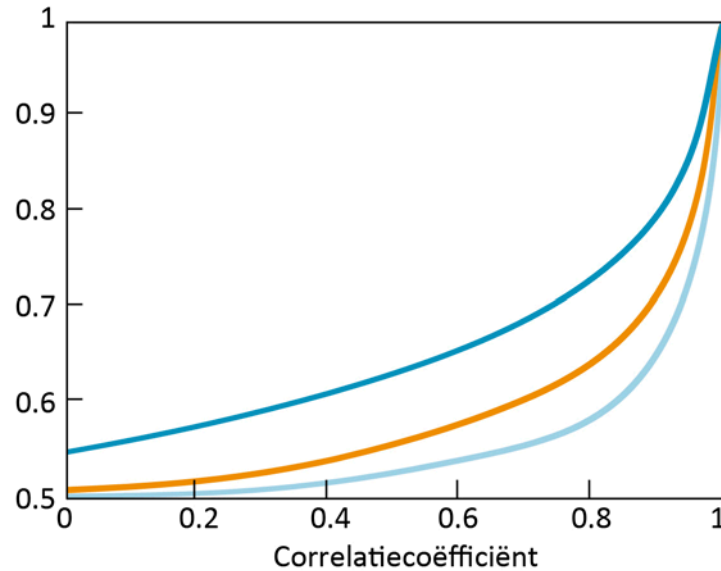
$$P_f = P(Z_1 \leq 0 \cup Z_2 \leq 0) = \text{Max}(P(Z_1 \leq 0), P(Z_2 \leq 0))$$

(Z-functies volledig gecorrleerd)

Hoe kleiner de correlatie tussen de beide elementen is, des te groter is de faalkans van het seriesysteem. Ofwel: hoe kleiner de correlatie is, des te groter is het lengte-effect. Het blijkt dat het lengte-effect pas sterk afneemt bij grote correlaties. Dit wordt ook wel aangeduid met het "hockeystick-effect". Dit effect is weergegeven in Figuur 17. De figuur toont de relatie tussen de betrouwbaarheidsindices van twee identieke elementen en de kans dat ten minste één van deze elementen

Verhouding tussen de faalkans van een element en de faalkans van het seriesysteem dat bestaat uit twee elementen

Lichtblauw: $\text{Beta}_i = 3$
 Oranje: $\text{Beta}_i = 2$
 Donkerblauw: $\text{Beta}_i = 1$



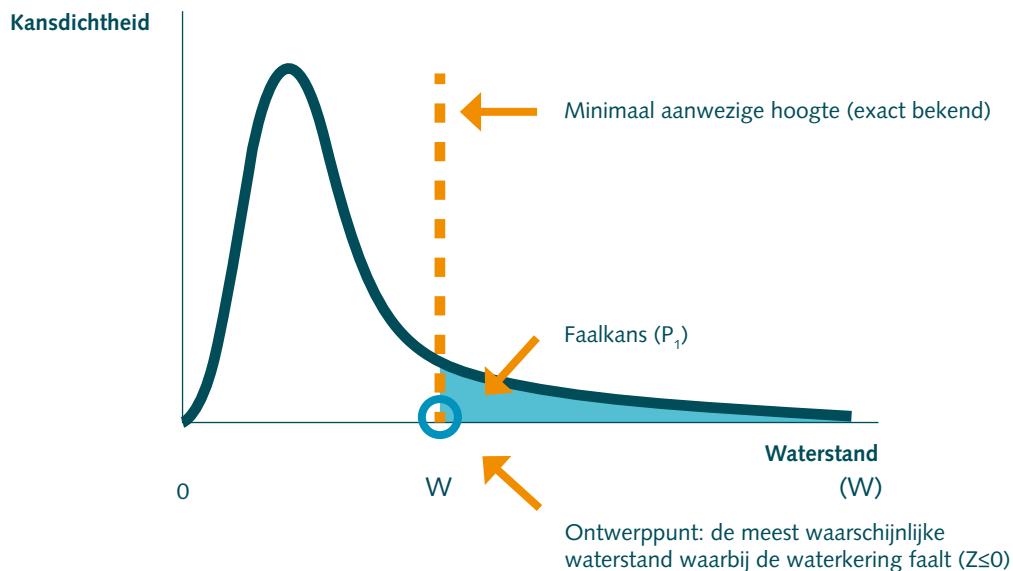
Figuur 17. De relatie tussen de grootte van de correlatie tussen de Z-functies van twee elementen met gelijke faalkansen (betrouwbaarheidsindices) en de faalkans (betrouwbaarheidsindex) van een seriesysteem dat bestaat uit deze twee elementen; de relatie is getoond voor verschillende waarden van de betrouwbaarheidsindices van de elementen.

faalt. Deze kans is te interpreteren als de faalkans van een seriesysteem dat uit twee identieke elementen bestaat. Bij zeer kleine correlaties is de systeemfaalkans (vrijwel) gelijk aan de som van de faalkansen van de beide elementen. Bij volledige correlatie is de systeemfaalkans gelijk aan de faalkans van een enkel element. Zoals getoond in Figuur 17 neemt het lengte-effect pas sterk af bij correlaties groter dan 0,9. Dat betekent dat correlaties hoog moeten zijn, wil het lengte-effect in omvang beperkt blijven.

7 ONTWERPPUNTEN NADER VERKLAARD

Een waterkering faalt als de belasting groter is dan de sterkte. Als zowel de belasting als de sterkte –eigenschappen onzeker zijn, zijn er veel verschillende combinaties van de waarden van de stochasten (onzekere grootheden) waarbij sprake is van falen. Elk van deze combinaties heeft een kans van voorkomen. De combinatie met de grootste kansdichtheid is het zogenaamde ontwerppunt.

Als een waterkering alleen door overloop kan falen en de hoogte van een waterkering exact bekend is, dan is de waarde van de waterstand in het ontwerppunt gelijk aan de minimaal waargenomen dijkhoogte. De kansdichtheid is bij deze waterstand immers maximaal (Figuur 18). De waterkering loopt ook bij hogere waterstanden over. De kansdichtheid is bij deze waterstanden echter kleiner.



Figuur 18. Als de waterstand de enige stochast is, is de waarde van de waterstand in het ontwerppunt gelijk aan de minimale dijkhoogte.

Als de sterkte-eigenschappen van de waterkering niet exact bekend zijn, dan is het onzeker vanaf welke waterstand de waterkering zal falen. De waarde van de waterstand in het ontwerp punt is dan niet langer te interpreteren als een kritieke waarde waarboven de waterkering faalt. Bij zowel hogere als lagere waterstanden kan de waterkering immers falen.

Ontwerppunten zijn van grote betekenis in FORM-faalkansberekeningen⁴. Als de sterkte en de belasting onzeker zijn, dan kan de betrouwbaarheidsfunctie (na transformatie van de kansdichtheidfuncties naar standaard normale verdelingen) worden beschreven door:

$$Z = \beta - \alpha_R \cdot u_R - \alpha_S \cdot u_S$$

Waarin:

β = betrouwbaarheidsindex

α_R = invloedscoëfficiënt sterkte

u_R = sterkte

α_S = invloedscoëfficiënt belasting

u_S = belasting

Omdat u_R en u_S normaal verdeeld zijn, is Z dat ook. De verwachtingswaarden u_R en u_S zijn gelijk aan nul, zodat de verwachtingswaarde van Z (μ_Z) gelijk is aan β . De standaardafwijking van Z is gelijk aan 1 omdat $\sqrt{\alpha_R^2 + \alpha_S^2} = 1$. Voor de faalkans van het systeem geldt zodoende:

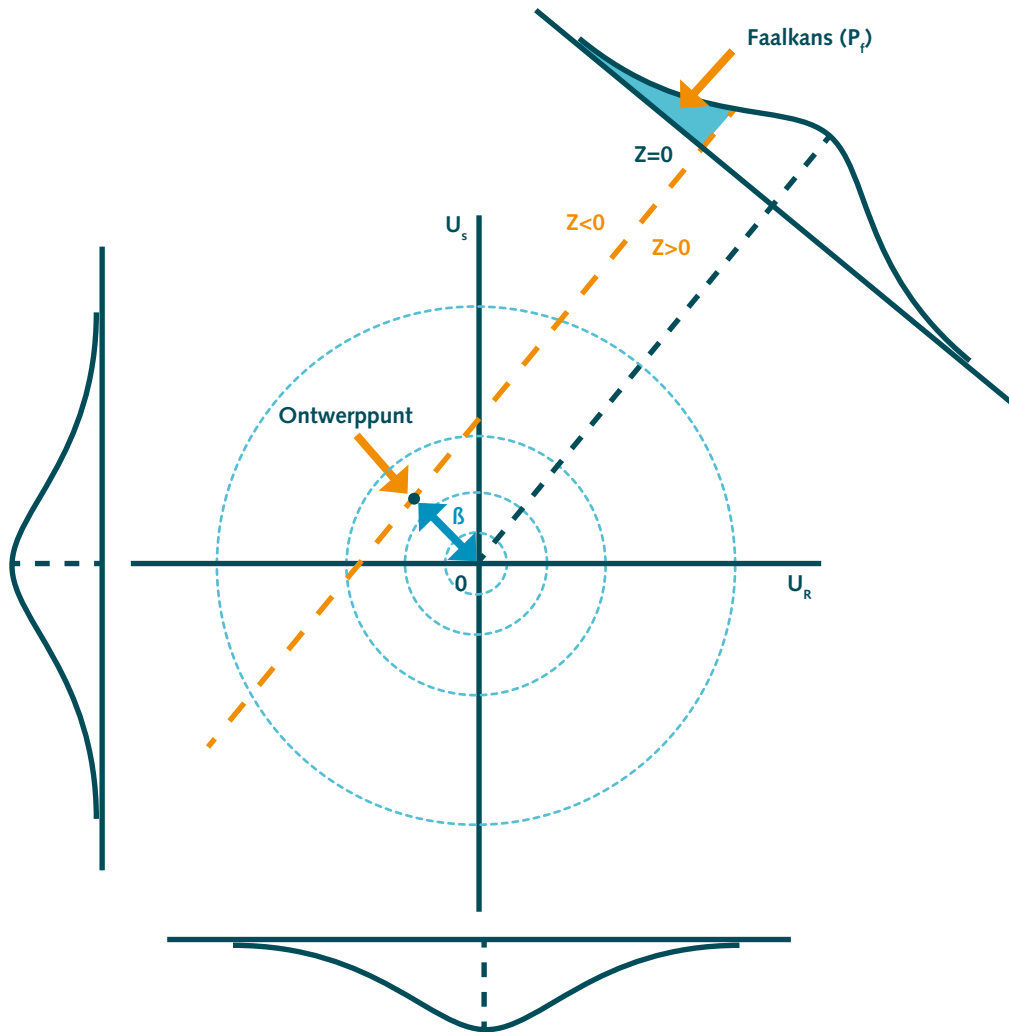
$$P_f = P(Z \leq 0) = \Phi(-\beta)$$

Waarin:

Φ = cumulatieve standaard normale verdeling.

Het bovenstaande is verduidelijkt in Figuur 19. De kortste afstand tussen de oorsprong en de grenstoestand ($Z=0$) is gelijk aan de betrouwbaarheidsindex β . Het punt op de lijn $Z=0$ dat het dichtste bij de oorsprong ligt, heet het ontwerp punt. In dit punt is de kansdichtheid waarbij sprake is van falen het grootste. De ligging van dit punt wordt bepaald door een rechte lijn vanuit de oorsprong van de u -space, loodrecht op de lijn $Z=0$. De coördinaat van het ontwerp punt is $(-\alpha_R \beta, -\alpha_S \beta)$.

⁴FORM = First Order Reliability Method. Dit is een efficiënte benaderingsmethode om faalkansen te berekenen.



Figuur 19. De kans dat $Z \leq 0$ en de berekening van het ontwerp punt.

Binnen het project VNK2 worden de ontwerppunten bij berekeningen beschouwd om beter gevoel te krijgen bij de uitkomsten. Als de lokale waterstand in het ontwerppunt onrealistisch is of afwijkt van het resultaat bij een vergelijkbaar vak is dat reden om de faalkansberekeningen (invoer, mogelijke convergentieproblemen) te controleren. De inspectie van ontwerppunten is één van de vele controles die bij de berekening van de faalkansen worden uitgevoerd.

8 DE WETTELIJKE TOETSING EN VNK2

De wettelijke toetsing en VNK2 zijn qua aard, inhoud en status verschillend (Tabel 3). Het VNK2-instrumentarium is dan ook niet gelijk aan het Wettelijke Toetsinstrumentarium. In de wettelijke toetsing wordt beoordeeld of de primaire waterkeringen aan de normen voldoen die zijn vastgelegd in de Waterwet. Deze normen zijn gedefinieerd als overschrijdingskansen van waterstanden die veilig gekeerd moeten kunnen worden, rekening houdend met alle factoren die het waterkerend vermogen beïnvloeden. Als een waterkering niet voldoet aan de norm, dan is versterking van de kering noodzakelijk.

In VNK2 worden overstromingsrisico's in beeld gebracht. Daarbij wordt niet alleen gekeken naar de waterkering maar ook naar het achtergelegen gebied en de gevolgen van overstromingen. VNK2 is een onderzoeksproject dat inzicht geeft in factoren die van belang zijn voor de waterveiligheid. VNK2 is echter geen wettelijke toetsing. Aan de grootte van overstromingskansen en risico's zijn dan ook geen wettelijke

eisen verbonden. De overstromingskansen die in VNK2 worden berekend kunnen niet zondermeer worden vergeleken met de overschrijdingskansen die in de Waterwet zijn opgenomen. Ten eerste heeft de overstromingskans betrekking op het daadwerkelijk optreden van een overstroming. Het belastingniveau dat hoort bij de wettelijke overschrijdingskans moet veilig gekeerd kunnen worden; hoe veilig dat is, is bepalend voor de kans op een doorbraak. Ten tweede heeft de overstromingskans betrekking op de kans op een doorbraak ergens in de dijkkring, terwijl er in de toetsing per dijkvak of doorsnede wordt beoordeeld of de waterkering een belasting met een bepaalde overschrijdingskans veilig kan keren. Door het lengte-effect is de faalkans voor een gehele dijkkring groter dan de faalkans van een enkel vak of een doorsnede.

Tabel 3. Verschillen tussen de toetsing en VNK2.

ASPECT	TOETSING	VNK2
Centrale vraag	Kan de waterkering de maatgevende belasting veilig weerstaan?	Wat zijn de kansen op en de gevolgen van overstromingen?
Status	Onderdeel van een wettelijke systematiek.	Onderzoeksproject.
Methode	Beoordeling van de waterkeringen van een beheersgebied per faalmechanisme en vak/doorsnede op	Risicoanalyse per dijkkringgebied, gebruik makend van probabilistische rekenmodellen, overstromingsberekeningen,

	grond van een toetsvoorschrift (wettelijk toetsinstrumentarium).	gevolgberekeningen en koppeling kansen en gevolgen. De modellen hebben een experimentele, geen juridische status. Desondanks bestaat er op veel punten overlap in de modellering van faalmechanismen met de toetsing.
	Alle faalmechanismen waarvoor een beoordeling mogelijk is, worden beschouwd.	Alleen die faalmechanismen worden beschouwd waarvan belangrijke bijdragen aan de faalkansen/overstromingsrisico's zijn te verwachten.
	Het faalcriterium verschilt per faalmechanisme. Indien niet wordt voldaan aan het toetscriterium hoeft de kans op een doorbraak niet altijd groot te zijn. Zo wordt bij bekledingen alleen gekeken naar initiële beschadiging (geen erosie dijklichaam).	Het faalcriterium bij de faalkansberekeningen is een dusdanig verlies van het waterkerend vermogen van de waterkering dat het buitenwater het dijkkringgebied in stroomt.
Uitkomst	Voldoet of voldoet niet (of geen oordeel)	Overstromingskans, overstromingsrisico (met kwalitatieve beschouwing voor niet door te rekenen elementen/faalmechanismen).
	Uitkomst per vak/doorsnede	Uitkomst per vak/kunstwerk en uitkomst voor de gehele dijkkring en het gehele dijkkringgebied.
	Alleen aandacht voor de waterkering	Aandacht voor de waterkering en voor de gevolgen (schade, slachtoffers) van overstromingen.

Ondanks de verschillen tussen de toetsing en VNK2 bestaan er ook veel raakvlakken (Tabel 4). In zowel de toetsing als VNK2 wordt er naar dezelfde waterkeringen gekeken. Ook zijn beide erop gericht om inzicht te krijgen in de veiligheid van de primaire waterkeringen. Door de andere aanpak die in VNK2 wordt gehanteerd kunnen waardevolle inzichten worden opgedaan om de veiligheid te vergroten.

De inzichten die in VNK2 worden opgedaan zijn bruikbaar om eventuele veiligheidslekken op te sporen en om investeringsbeslissingen in waterveiligheid te beoordelen als budgetbeperkingen nopen tot het maken van keuzes. Het rendement van een investering in waterveiligheid kan per locatie immers sterk verschillen, afhankelijk van de gevolgen van overstromingen en de grootte van de kans op een doorbraak.

Tabel 4. Raakvlakken tussen de toetsing en VNK2.

ASPECT	RAAKVLAK/OVEREENKOMST TUSSEN DE TOETSING EN VNK2
Onderwerp van studie	In beide gevallen worden dezelfde waterkeringen beschouwd, alleen vanuit een verschillend perspectief.
Methode	<p>Hoewel in VNK2 volledig probabilistisch wordt gerekend, zijn de modelbeschrijvingen die worden gehanteerd voor veel faalmechanismen vergelijkbaar met die in het Wettelijk Toetsinstrumentarium (WTI) (Tabel 1). De voornaamste verschillen betreffen het meenemen van de sterkte van de grasmat bij overloop/overslag in plaats van het hanteren van een vast, maximaal toelaatbaar overslagdebiet, het gebruik van rudimentaire reststerktemodellen na het falen van bekledingen en het optreden van afschuivingen en verschillen in de modellering van bekledingen.</p> <p>In zowel de toetsing als VNK2 speelt de gebiedskennis van de beheerder een cruciale rol. In beide gevallen leveren de beheerders een cruciale bijdrage door de uitkomsten en onderliggende schematisaties te spiegelen aan hun kennis en ervaring.</p>

Hoewel in de toetsing niet met volledig probabilistische modellen wordt gewerkt, bestaan er tussen de toetsregels en de modellen in VNK2 soms innige relaties. In de toetsing worden geen faalkansen berekend maar wordt beoordeeld of een waterkering een bepaalde belasting veilig kan keren. In het woord “veilig” ligt een kansoordeel besloten. Op basis van probabilistische analyses kan dit nader worden uitgewerkt. Bij de afleiding van de toetsregel voor het faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts is gebruikt gemaakt van hetzelfde volledig probabilistische model dat in VNK2 wordt gebruikt.

Het bovenstaande is niet bij alle faalmechanismen gebeurd. Zo zijn de toetsregels voor het faalmechanisme opbarsten en piping niet afgeleid van een volledig probabilistische benadering. In VNK2 is gebleken dat dijken die voldoen aan de huidige toetsregels (cf. VTV-2006) grotere faalkansen kunnen hebben dan daarvoor was gedacht.

9 AANVULLENDE INFORMATIE

In het onderstaande worden suggesties gedaan voor verder lezen. De aanbevolen artikelen, rapporten en boeken gaan dieper in op de achtergronden en oorsprong van de methoden en technieken die in VNK2 worden toegepast. Indien er desondanks vragen onbeantwoord blijven, dan is het Projectbureau VNK2 graag bereid om nadere toelichting te geven.

De berekening van overstromingskansen: schematisatie en modellering

- Alkyon (2008). Upgrade duinmodule binnen PC-Ring- Onderbouwning, validatie en gebruiksrichtlijnen van een nieuwe duinafslagmodule, januari 2008.
- RWS-WD (2009). Van ruwe data tot overstromingsrisico. Handleiding ter bepaling van het overstromingsrisico van dijkkringen binnen het project VNK2. November 2009
- Steenbergen, H.M.G.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Koster, T. (2008). Theoriehandleiding PC-Ring versie 5.0. Deel A: Mechanismebeschrijvingen. TNO: 29 februari 2008.
- Steenbergen, H.M.G.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2003). Theoriehandleiding PC-Ring Versie 4.0, Deel B: Statistische modellen. TNO: april 2003.
- Steenbergen, H.M.G.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2003). Theoriehandleiding PC-Ring Versie 4.0, Deel C: Rekentechnieken. TNO: april 2003.

De berekening van de gevolgen van overstromingen

- Doef, M. van der, Cappendijk, P., (2006). Veiligheid Nederland in Kaart - modellering en analyse van evacuatie. Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Friso, K., Banninga, J., Van Zuilekom, K. (2008). Veiligheid Nederland in Kaart - modellering en analyse van evacuatie. Goudappel Coffeng, Universiteit Twente.

- Jonkman, S.N. 2007. Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and applications. PhD thesis, Delft University of Technology. 2007.
- Jonkman, S. N., Maaskant, B., Boyd, E., Levitan, M.L. (2009). Loss of Life Caused by the Flooding of New Orleans After Hurricane Katrina: Analysis of the Relationship Between Flood Characteristics and Mortality. Risk Analysis, Vol. 29, No. 5, 2009.
- Maaskant, B., Kolen, B., Jongejan R., Jonkman, B., Kok, M. (2009):. Evacuatieschattingen Nederland. PR1718.10. HKVLijn in water.
- RWS-WD (2008). Leidraad overstromingsberekeningen voor VNK2. Versie 2.0. 1 september 2008. Projectbureau VNK2.

De berekening van overstromingsrisico's

- RWS-WD (2009). Van ruwe data tot overstromingsrisico. Handleiding ter bepaling van het overstromingsrisico van dijkkringen binnen het project VNK2. November 2009. Projectbureau VNK2.
- Thonus, B., Kuijper, B., Vrouwenvelder, T. (2008). Scenariokansen met PC-Ring. Handleiding versie 2.0. PR1188.20. HKVLIJN IN WATER.
- Thonus, B., Jongejan, R. (2009). Berekening van het overstromingsrisico VNK2. Toetsing van methode en advies expertgroep. 16 mei 2009. Projectbureau VNK2.

Algemene theorie: probabilistiek, ontwerpapunten

- Bedford, T., Cooke, R. (2001). Probabilistic risk analysis: foundations and methods. Cambridge: Cambridge University Press.
- CUR190. Kansen in de Civiele Techniek. Deel 1: De theorie van het probabilistisch ontwerpen. ISBN 90 376 0102 2. Gouda: Stichting CUR.

Het lengte-effect

- Hohenbichler, M., Rackwitz, R. (1983). First-order concepts in system reliability. *Structural Safety* 1: 177-188.
- Thonus, B. (2003). Lengte-effect. Memorandum voor het projectbureau VNK2. HKVLIJN IN WATER.
- Vanmarcke, E. (1983). *Random fields, Analysis and Synthesis*. ISBN 0 262 22026 1. Massachusetts. The Massachusetts Institute of Technology Press.
- Vrouwenfelder, A.C.W.M., Steenbergen, H.M.G.M. (2006). Lengte-effect PC-Ring. Memorandum 21-12-2006.

BEGRIPPENLIJST

Decimeringhoogte

De peilvariatie die behoort bij een vergroting of verkleining van de overschrijdingsfrequentie met een factor 10.

Dijkring

Stelsel van waterkeringen en/of hoge gronden, dat een dijkkringgebied omsluit en beveiligd tegen overstromingen.

Dijkkringgebied

Een gebied dat door een stelsel van waterkeringen en/of hoge gronden beveiligd wordt tegen overstromingen vanuit zee, het IJsselmeer, Markermeer en/of de grote rivieren.

Dijkvak

Een deel van een waterkering waarvoor de sterkte-eigenschappen en belastingen homogeen zijn.

Duinafslag

Faalmechanisme voor duinen dat betrekking heeft op de erosie van een duin onder stormcondities.

Faalmechanisme

De wijze waarop een waterkering faalt. Voor dijken en kunstwerken worden elk vier faalmechanismen beschouwd. Voor duinen wordt duinafslag beschouwd.

Falen

Algemeen: het niet voldoen aan één of meer eisen. In VNK2: het verlies van de waterkerende functie.

Golfoverslag

De hoeveelheid water die door golven per strekkende meter gemiddeld per tijdseenheid over de waterkering slaat.

Grensprofiel

Het duinprofiel dat na afslag bij ontwerpomstandigheden nog minimaal aanwezig moet zijn.

Grenstoestand

De toestand waarin de sterkte van een constructie of een onderdeel daarvan nog juist evenwicht maakt met de daarop werkende belastingen.

Groepsrisico

Het groepsrisico beschrijft de kansen op overschrijding van bepaalde slachtofferaantallen.

Kansdichtheidfunctie

Een functie die aan elke mogelijke waarde van een stochast een kansdichtheid toekent.

Kwelweglengte

De lengte van het mogelijk pad dat het kwelwater in de grond aflegt, van het intreepunt naar het uitreepunt.

Lengte-effect

Het verschijnsel dat de faalkans van een waterkering toeneemt met de lengte. Dit is het gevolg van het feit dat de kans dat zich ergens een zwakke plek bevindt groter wordt als er een grotere lengte wordt beschouwd.

Lokaal individueel risico (LIR)

De kans dat een persoon, die zich continu op een bepaalde plaats in de dijkkring bevindt, overlijdt ten gevolge van een overstroming. In de berekening van het lokaal individueel risico worden de mogelijkheden voor preventieve evacuatie meegenomen.

Macrostabieliteit

De naam van een faalmechanisme waarbij de zich een glijvlak in het talud en de ondergrond vormt.

Ontwerppunt

Het ontwerppunt is de meest waarschijnlijke combinatie van de waarden van stochasten waarvoor geldt dat de grens-toestandfunctie (sterkte - belasting) gelijk aan 0 is.

Opbarsten

Het bezwijken van de grond onder invloed van water-overdrukken door het ontbreken van verticaal evenwicht in de grond. De term opbarsten wordt gebruikt bij het faalmechanisme opbarsten en piping.

Overschrijdingskans

De kans dat een waarde wordt bereikt of overschreden. De in de Waterwet opgenomen overschrijdingskansen zijn de kansen dat het toetspeil wordt bereikt of overschreden.

Overstromingskans

De kans dat een gebied overstroomt doordat de waterkering rondom dat gebied (de dijkkring) op één of meer plaatsen faalt.

Overstromingsrisico

De combinatie van kansen en gevolgen van overstromingen. De gevolgen worden uitgedrukt in economische schade of slachtoffers. Het economisch risico en het slachtofferrisico worden in het project VNK2 op diverse manieren weergegeven.

Overstromingsberekening

Een berekening van het overstromingspatroon voor één of meerdere doorbraken in een dijkkring.

Overstromingsscenario

Een unieke serie gebeurtenissen volgend op het ontstaan van een of meer bressen. De overstromingsscenario's zijn wederzijds uitsluitend: als het ene scenario optreedt, treedt een ander niet op.

PC-Ring

Een probabilistisch model waarmee faalkansen berekend kunnen worden voor verschillende faalmechanismen voor dijken, duinen en kunstwerken. Daarnaast kunnen met PC-Ring faalkansen per vak en faalmechanisme worden gecombineerd tot faalkansen op ringniveau. Ook kunnen met PC-Ring scenariokansen worden berekend.

Plaatsgebonden risico (PR)

De kans dat een persoon, die zich continu op een bepaalde plaats in de dijkkring bevindt, overlijdt ten gevolge van een overstroming. In de berekening van het plaatsgebonden risico worden de mogelijkheden voor preventieve evacuatie niet meegenomen.

Piping

Het verschijnsel waarbij er als gevolg van erosie door grondwaterstroming kanalen ontstaan in een grondlichaam.

Primaire waterkering

Een waterkering die ofwel behoort tot het stelsel waterkeringen dat een dijkkringgebied - al dan niet met hoge gronden - omsluit, ofwel vóór een dijkkringgebied is gelegen. Primaire waterkeringen kunnen worden verdeeld in de volgende categorieën:

- A: Een waterkering die direct buitenwater keert
- B: Een voorliggende of verbindende kering
- C: Een waterkering die indirect buitenwater keert
- D: Een waterkering die in het buitenland is gelegen

Realisatie

Een mogelijke uitkomst.

Reststerkte

Reststerkte is een verzamelbegrip voor de resterende sterkte in de dijk nadat een initiërend faalmechanisme is opgetreden. In VNK2 wordt er bij het faalmechanisme “beschadiging bekleding en erosie van het dijklichaam” met verschillende reststerktemodellen gerekend. Hiermee wordt de kans op het ontstaan van een bres berekend nadat de bekleding is beschadigd. Bij het faalmechanisme “macrostabiliteit binnenwaarts” kan ook de sterkte van de dijk nadat de eerste afschuiving heeft plaatsgevonden worden meegenomen in de faalkansberekening

Ringdeel

Een deel van de dijkring waarbinnen de locatie van de bres geen significante invloed heeft op het overstromingspatroon en de optredende schade.

Scenariokans

De kans op een overstromingsscenario.

Standaardafwijking

Een maat voor de spreiding rond het gemiddelde.

Stochast

Een onzekere grootheid. De kansen op de verschillende waarden van een stochast worden beschreven door een kansdichtheidfunctie.

Verwachtingswaarde

De gemiddelde waarde van een stochast; het eerste moment van de kansdichtheidfunctie.

Voorland

Het gebied aansluitend aan de buitenzijde van de waterkering. Dit gebied wordt ook wel vooroever genoemd. Ook een diepe steile stroomgeul bij een schaarlijk valt onder de definitie van voorland. Het voorland kan zowel onder als boven water liggen.

KIJK VOOR MEER INFORMATIE OP WWW.HELPDESKWATER.NL OF BEL 0800 - 6592837



Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Interprovinciaal Overleg



UNIE VAN WATERSCHAPPEN