

Veiligheid Nederland in kaart

VNK2

VNK2

Overstromingsrisico Dijkkring 45 Gelderse Vallei



Overstromingsrisico Dijkkring 45 Gelderse Vallei

December 2012

December 2012

 Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Interprovinciaal Overleg **ip**

 UNIE VAN WATERSCHAPPEN

Kijk voor meer informatie op
www.helpdeskwater.nl of bel 0800-6592837

Veiligheid Nederland in Kaart 2

Overstromingsrisico dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei

Documenttitel	Veiligheid Nederland in Kaart 2 Overstromingsrisico dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei
Document	HB 1838752
Status	Eindconcept
Datum	November 2012
Auteurs	Peter van der Scheer, Ric Huting
Opdrachtnemer	Rijkswaterstaat Waterdienst
Uitgevoerd door	DHV-Oranjewoud-Tauw
Opdrachtgevers	Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Unie van Waterschappen en Interprovinciaal Overleg

Voorwoord

Het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK2) analyseert voor 58 dijkkringgebieden het overstromingsrisico, uitgedrukt in economische schade en aantallen slachtoffers. In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van de uitgevoerde risicoanalyse voor de categorie a-keringen van dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei. Het detailniveau van de analyses is afgestemd op de primaire doelstelling van VNK2: het verschaffen van een beeld van het overstromingsrisico.

Hoewel dit rapport een beeld geeft van de veiligheid van dijkkring 45, dient het niet te worden verward met een toetsrapport in het kader van de Waterwet. De in VNK2 berekende overstromingskansen laten zich niet zonder meer vergelijken met de wettelijk vastgelegde overschrijdingskansen van de waterstanden die de primaire keringen veilig moeten kunnen keren.

Bij het tot stand komen van de resultaten spelen de provincies en de beheerders een belangrijke rol. De provincie Utrecht heeft de overstromingsberekeningen uitgevoerd, die ten grondslag liggen aan de berekende gevolgen van de overstromingsscenario's. De beheerders hebben een essentiële bijdrage geleverd door gegevens ter beschikking te stellen en de plausibiliteit van de opgestelde (alternatieve) schematisaties te bespreken. De uitgevoerde analyses zijn zowel intern als extern getoetst. Ten slotte heeft het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) de kwaliteit van de analyses en rapportages steekproefsgewijs gecontroleerd.

Met de inzichten van VNK2 kunnen gericht maatregelen worden getroffen om Nederland kostenefficiënt te beschermen tegen overstromingen. Op basis van de resultaten kunnen voorstellen voor maatregelen in de meerlaagsveiligheid onderling worden afgewogen, kunnen versterkingsmaatregelen uit het hoogwaterbeschermingsprogramma (nHWBP) worden geprioriteerd, aanvullende gegevens gericht worden ingewonnen en middelen en menskracht tijdens hoogwatersituaties optimaler worden ingezet. Ten slotte vormen de resultaten van VNK2 input voor de verschillende Deltadeelprogramma's en de onderbouwing voor nieuwe normering.

VNK2 is een initiatief van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, de Unie van Waterschappen en het Interprovinciaal Overleg, uitgevoerd door de Waterdienst van Rijkswaterstaat in nauwe samenwerking met waterkeringbeheerders, provincies, kennisinstituten en ingenieursbureaus.

Graag wil ik alle betrokkenen bedanken voor de constructieve bijdrage en de plezierige samenwerking.

Harry Stefess
Projectmanager VNK2, Rijkswaterstaat Waterdienst

Inhoudsopgave

Voorwoord	3
Managementsamenvatting	1
Technische samenvatting	7
1 Inleiding	15
1.1 Aanleiding project Veiligheid van Nederland in Kaart	15
1.2 Projectopdracht Veiligheid van Nederland in Kaart	15
1.3 Overschrijdingskansen en overstromingskansen	16
1.4 Rekenmethode VNK2	16
1.5 Leeswijzer	19
2 Gebiedsbeschrijving en schematisatie	21
2.1 Beschrijving dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei	21
2.1.1 Geologie, geomorfologie en bodem	22
2.1.2 Hoogteligging	22
2.1.3 Waterhuishouding	23
2.1.4 Landschap, bebouwing en landgebruik	24
2.1.5 Grebbelinie	24
2.1.6 De primaire waterkering van dijkkringgebied 45	25
2.1.7 Beheerder	26
2.2 Recente geschiedenis: bedreigingen en versterkingen	26
2.2.1 Overstromingsrampen	26
2.2.2 Versterkingen	28
2.3 Vakindeling categorie a-kering	29
2.4 Kunstwerken	30
3 Overstromingskans	33
3.1 Aanpak en uitgangspunten	33
3.2 Beschouwde faalmechanismen	34
3.2.1 Faalmechanismen dijken	34
3.2.2 Faalmechanismen kunstwerken	35
3.3 Niet beschouwde faalmechanismen	37
3.4 Berekende overstromingskansen	38
3.4.1 Overstromingskansen en faalkansen per faalmechanisme	38
3.4.2 Faalkansen dijken en vergelijking resultaten derde toetsronde	40
3.4.3 Overzicht faalkansen dijken	42
3.4.4 Faalkansen kunstwerken	43
3.5 Dominante vakken en faalmechanismen	44
4 De gevolgen van overstromingen per ringdeel	47
4.1 Aanpak en uitgangspunten	47
4.1.1 Algemeen	47
4.1.2 Ringdelen	47
4.1.3 Verhoogde lijnelementen	48

4.1.4	Evacuatie	49
4.2	Resultaten overstromingsberekeningen per ringdeel	50
4.2.1	Ringdeel 1: Doorbraaklocatie Grebbedijk	50
4.2.2	Ringdeel 2: Doorbraaklocatie Slaagsedijk	51
4.2.3	Ringdeel 3: Doorbraaklocatie Eemdijk	51
4.2.4	Ringdeel 4: Doorbraaklocatie Westdijk	52
4.2.5	Ringdeel 5: Doorbraaklocatie Oostdijk	52
4.2.6	Ringdeel 6: Doorbraaklocatie Arkemheensedijk	53
4.3	Overzicht resultaten overstromingsberekeningen	53
5	Overstromingsscenario's en scenariokansen	55
5.1	Definitie overstromingsscenario's	55
5.1.1	Aanpak	55
5.1.2	Ontlasten na een doorbraak	55
5.2	Scenariokansen	56
6	Overstromingsrisico	57
6.1	Koppeling scenariokansen en gevolgen	57
6.2	Overstromingsrisico	57
6.2.1	Economisch risico	57
6.2.2	Slachtofferrisico	60
7	Gevoeligheidsanalyses	65
7.1	Selectie van gevoeligheidsanalyses	65
7.2	Analyse 1: Effecten Ruimte voor de Rivier maatregelen	65
7.3	Analyse 2: Effecten van gerichte verbetermaatregelen in de dijkkring	69
7.4	Analyse 3: Effecten van een veiligere Grebbedijk	71
7.5	Analyse 4: Effecten van de variatie van de D70 korreldiameter Grebbedijk	75
8	Conclusies en aanbevelingen	77
8.1	Conclusies	77
8.1.1	De kans op een overstroming in dijkkringgebied 45	77
8.1.2	De gevolgen van overstromingen in dijkkringgebied 45	78
8.1.3	Het overstromingsrisico in dijkkringgebied 45	78
8.2	Aanbevelingen	81

Managementsamenvatting

Wat is VNK2?

Veiligheid Nederland in Kaart 2 (VNK2) is het project dat overstromingsrisico's in Nederland in kaart brengt. In het voorafgaande project VNK1 zijn al voor 16 dijkkringgebieden de overstromingsrisico's in beeld gebracht. Voor drie van deze gebieden zijn de gevolgen in detail berekend. Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu, de Provincies en Waterschappen zijn enkele jaren geleden gezamenlijk gestart met een vervolg om met een verbeterde methode de overstromingsrisico's voor geheel Nederland in detail in kaart te brengen: VNK2.

De rekenmethode van VNK2 maakt het mogelijk overstromingskansen te berekenen. Door het combineren van doorbraakkansen, overstromingswijzen en gegevens omtrent bewoning en bedrijvigheid (de gevolgen), kan een beeld worden gegeven van het overstromingsrisico.

Voor u ligt de rapportage van de analyse van dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei.

Waarom VNK2?

Inzicht in overstromingskansen en –gevolgen is essentieel om antwoord te kunnen geven op de vragen die spelen op het gebied van de bescherming tegen hoogwater. Met een goed beeld van het overstromingsrisico en de effectiviteit van maatregelen kunnen beter onderbouwde keuzes worden gemaakt ten aanzien van investeringen in waterveiligheid. VNK2 levert inzichten voor:

- De politiek-maatschappelijke afweging of de waterveiligheid van Nederland op orde is;
- Het identificeren van relatief zwakke waterkeringen;
- Het bepalen van de kosteneffectiviteit van risicoreducerende maatregelen;
- De prioritering van preventieve maatregelen;
- De prioritering van gevolgenbeperkende maatregelen;
- De verbetering van toetsmethoden;
- Afwegingen ten aanzien van zelfredzaamheid en rampenbestrijding;
- Het opstellen van overstromingsrisicokaarten en plannen zoals vereist door de Richtlijn Overstromingsrisico's (ROR).

Algemene beschrijving dijkkringgebied

De Gelderse Vallei (Figuur 1) is een laag gelegen gebied dat ligt tussen de hoge gronden van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug. In het zuiden wordt het gebied beschermd tegen het water uit de Nederrijn door de 5,4 km lange Grebbedijk. In het noorden wordt het gebied beschermd door 33,1 km waterkering tegen water vanuit de Eem en de randmeren. De waterkeringen zijn in het beheer van waterschap Vallei en Eem. De dijkkring heeft een wettelijke overschrijdingskansnorm van 1/1.250 per jaar.

Het langgerekte gebied heeft een relatief groot hoogteverschil tussen het zuiden bij de Nederrijn met een hoogteligging van circa NAP +7 m en de Zuidelijke Randmeren in het noorden met een hoogteligging rond NAP. De waterkeringen langs de Eem en randmeren zijn in de tweede wettelijke veiligheidstoetsing voor een groot gedeelte afgekeurd en worden in de periode 2012-2015 versterkt. In deze studie is het definitieve ontwerp van de dijkversterking meegenomen in de beoordeling.

In het dijkkringgebied bevinden zich onder andere de plaatsen Amersfoort, Ede, Veenendaal, Wageningen en Woudenberg. In het gebied wonen circa 325.000 inwoners. Binnen de Gelderse Vallei vindt veel intensieve veeteelt plaats. Dit betreft vooral varkenshouderijen en pluimveebedrijven.



Figuur 1: Dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei.

Resultaten

VNK2 geeft een beeld van de overstromingskansen, gevolgen en risico's voor een dijkkringgebied. De veiligheidsbenadering in VNK2 is daarmee anders dan die in de toetsing in het kader van de Waterwet. In de toetsing wordt beoordeeld of de primaire waterkeringen voldoen aan de vigerende wettelijke normen. Deze normen zijn niet gedefinieerd als overstromingskansen, maar als overschrijdingskansen van waterstanden die de waterkeringen veilig moeten kunnen keren, rekening houdend met alle factoren die het waterkerende vermogen beïnvloeden. VNK2 geeft een schatting van de overstromingskans van het dijkkringgebied. Een ander verschil met de toetsing betreft dat in VNK2 de economische schade en slachtoffers door overstroming en de bijbehorende risico's in beeld worden gebracht (en in de toetsing niet).

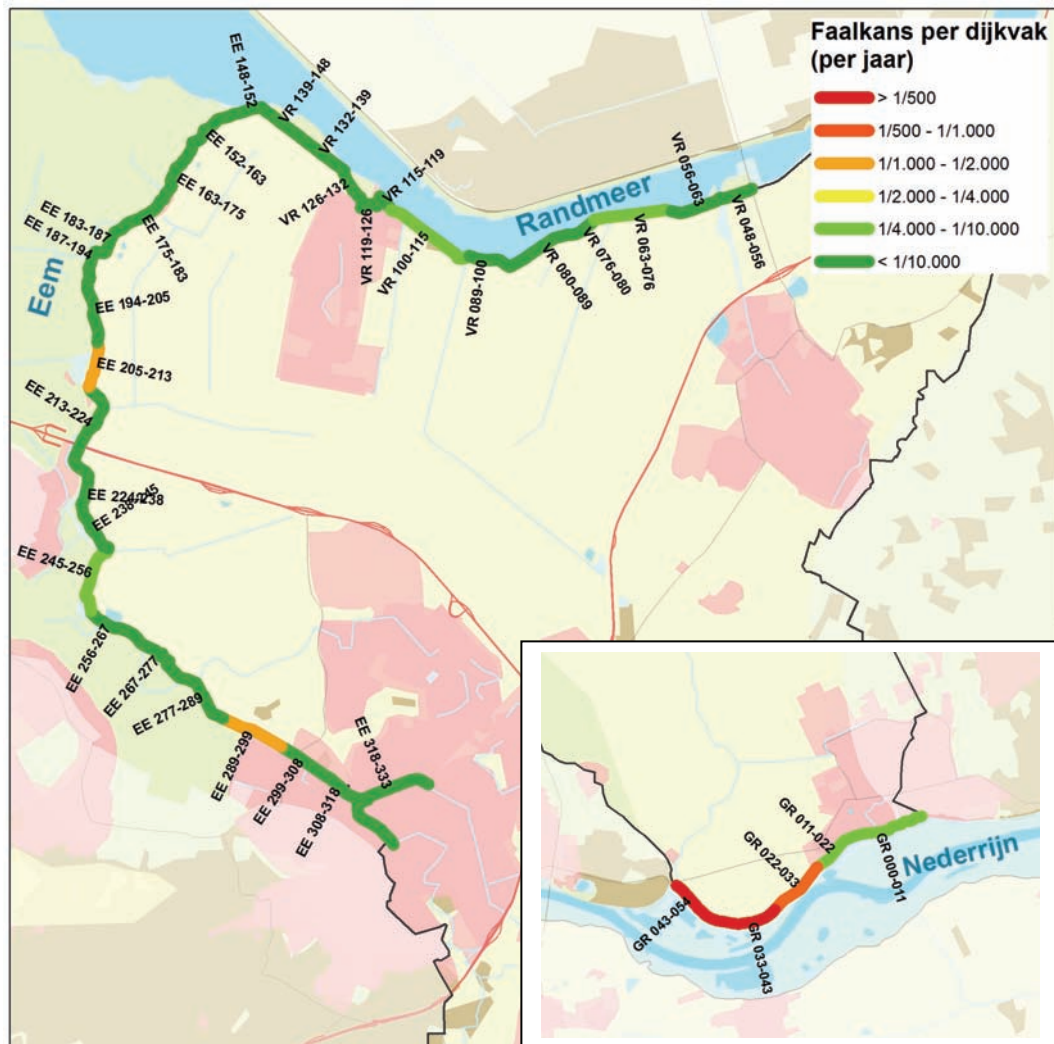
Overstromingskansen

De berekende overstromingskans van dijkkringgebied 45 is 1/100 per jaar. In de risicoanalyse zijn alleen de categorie a-keringen beschouwd. De categorie c-kering ten oosten van de verbindende waterkering Nijkerkerluis is niet beschouwd. Het niet meenemen van de 4,8 km lange categorie c-kering heeft naar verwachting nauwelijks effect op de berekende overstromingskansen en het overstromingsrisico.

De berekende overstromingskans voor de waterkering langs de Eem en randmeren is 1/470 per jaar. Dit is de gecombineerde kans van de dijken en kunstwerken *na* uitvoering van de dijkversterkingsmaatregelen in 2012-2015. Deze overstromingskansen

wordt voornamelijk veroorzaakt door het mechanisme *opbarsten en piping*. Ook het mechanisme *onder- en achterloopsheid* bij het gemaal Westdijk heeft een significante bijdrage aan deze overstromingskans. De bijdrage van het mechanisme *overloop en golfoverslag* aan de overstromingskans is relatief klein vanwege de historische overhoogte die dateert van voor de aanleg van de Afsluitdijk en de dijken werden belast door de Zuiderzee.

De kans dat de Grebbedijk doorbreekt en zorgt voor een overstroming vanuit de Nederrijn is 1/130 per jaar. Hiermee wordt de overstromingskans van het dijkkringgebied gedomineerd door de Grebbedijk. Ook voor de Grebbedijk geldt dat de overstromingskans voornamelijk wordt veroorzaakt door het mechanisme *opbarsten en piping*.



Figuur 2: Overzicht van de gecombineerde faalkansen per dijkvak.

Het beeld van de veiligheid van de waterkeringen dat volgt uit de faalkansen (Figuur 2) en overstromingskans komt grotendeels overeen met de verwachtingen van de beheerder. Hoewel in de derde toetsronde de Grebbedijk is goedgekeurd treden er bij hoogwater frequent zandmeevoerende wellen op. Deze wellen zijn een indicatie voor een mogelijk probleem met *opbarsten en piping*. Het waterschap is na het hoogwater in 2011 een nader onderzoek gestart naar de gevoeligheid van de Grebbedijk voor *opbarsten en piping*. Voor de Eem- en randmeerdijken geldt dat de faalkansen van de dijken na de versterking veelal klein zijn.

Gevolgen van overstromingen

De gevolgen van een overstroming vanuit de Eem en randmeren zijn veel kleiner dan de gevolgen van een overstroming vanuit de Nederrijn. Een doorbraak van de Eem- en randmeerdijken leidt tot een relatief kleine overstroming waarbij voornamelijk landelijk gebied wordt getroffen. Bij een doorbraak van de Grebbedijk overstroomt nagenoeg het hele dijkkringgebied waardoor de schade en het aantal slachtoffers vele malen groter zijn dan bij een doorbraak vanuit de Eem of randmeren.

Overstromingen vanuit de Eem en randmeren resulteert in schades tussen 25 en 90 miljoen euro. Het aantal slachtoffers is afhankelijk van eventuele evacuatie voorafgaande aan de doorbraak. Bij een georganiseerde evacuatie vallen er nagenoeg geen slachtoffers terwijl er zonder evacuatie maximaal 5 slachtoffers kunnen vallen.

Bij een doorbraak van de Grebbedijk liggen de schades tussen de 8,6 en 12,3 miljard euro. Bij een georganiseerde evacuatie vallen er tussen de 100 en 150 slachtoffers. Dit kan oplopen tot 1.250 slachtoffers indien niet wordt geëvacueerd.

Overstromingsrisico

Door de kansen op een overstroming te combineren met de gevolgen van een overstroming is het overstromingsrisico in beeld gebracht, uitgedrukt in diverse risicomaten (Tabel 1).

Economisch risico	Verwachtingswaarde economische schade (M€ per jaar)	83
	Minimale economische schade bij een overstroming (M€)	25
	Gemiddelde ¹ economische schade per overstroming (M€)	8.300
	Maximale economische schade bij een overstroming (M€)	12.300
Slachtofferrisico	Verwachtingswaarde aantal slachtoffers (per jaar)	1,9
	Minimaal aantal slachtoffers bij een overstroming	0
	Gemiddeld ¹ aantal slachtoffers per overstroming	190
	Maximaal aantal slachtoffers bij een overstroming	1.250
	Overlijdenskans van een individu per locatie exclusief het effect van preventieve evacuatie (per jaar) (plaatsgebonden risico)	Vrijwel overal groter dan 1/100.000 m.u.v. de hoger gelegen gebieden. Nabij Veenendaal delen groter dan 1/10.000.
	Overlijdenskans van een individu per locatie inclusief het effect van preventieve evacuatie (per jaar) (lokaal individueel risico)	Vrijwel overal groter dan 1/1.000.000 m.u.v. de hoger gelegen gebieden. Ten zuiden van A12 groter dan 1/100.000.

Tabel 1: Resultaten risicoberekeningen voor dijkkringgebied 45.

Het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei wordt voor 99,9% veroorzaakt door overstromingen vanuit de Nederrijn. Dit komt vooral omdat de gevolgen van doorbraken vanuit de Nederrijn vele malen groter zijn dan doorbraken vanuit de Eem en randmeren. Dit wordt versterkt door de hoge faalkansen die voor de Grebbedijk langs de Nederrijn worden berekend. De verwachtingswaarde van de economische schade bedraagt 83 miljoen euro per jaar.

¹ Het gemiddelde is de verwachtingswaarde gedeeld door de overstromingskans

De verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers bedraagt 1,9 slachtoffers per jaar. Het plaatsgebonden risico (de kans dat een persoon die continu binnen dit gebied verblijft, overlijdt als gevolg van een overstroming) is voor het grootste deel van het dijkkringgebied groter dan 1/100.000 per jaar. Nabij Veenendaal is dit in sommige gebieden groter dan 1/10.000 per jaar. Het plaatsgebonden risico neemt af voor de hoger gelegen gebieden en wordt verwaarloosbaar klein.

Het lokaal individueel risico (de kans per jaar dat een persoon die zich permanent op een bepaalde plaats in het dijkkringgebied bevindt, overlijdt als gevolg van een overstroming van dit dijkkringgebied, waarbij de mogelijkheden voor preventieve evacuatie zijn meegenomen) is in nagenoeg het hele dijkkringgebied groter dan 1/1.000.000 per jaar. In het gebied tussen de A12 en de Grebbedijk is dit groter dan 1/100.000 per jaar.

Gevoeligheidsanalyses

De doelstelling van het PKB Ruimte voor de Rivier is een waterstanddaling van ongeveer 30 cm op de Nederrijn bij maatgevende omstandigheden. De overstromingskans van dijkkringgebied 45 wordt hierdoor met ongeveer een factor 2 verkleind. Vanwege de grote gevolgen bij een doorbraak van de Grebbedijk leidt dit ook tot een grote verlaging van het overstromingsrisico. Het economische risico daalt van 83 naar 38 miljoen euro per jaar. Het slachtofferrisico daalt van 1,9 naar 0,8 slachtoffers per jaar.

Door gerichte ingrepen in de waterkeringen neemt de overstromingskans van dijkkringgebied 45 af. Zo leidt een dijkverbetering over een lengte van circa 3,2 km langs de Grebbedijk gericht op het faalmechanisme *opbarsten en piping* tot een afname van de overstromingskans van dijkkringgebied 45 van 1/100 per jaar naar 1/410 per jaar. Het economische risico gaat van 83 naar 4 miljoen euro per jaar en het slachtofferrisico gaat van 1,9 naar 0,1. Ingrepen in de waterkeringen langs de Eem en randmeren leiden wel tot een verlaging van de overstromingskans maar hebben nagenoeg geen effect op het overstromingsrisico.

Het voorkomen van *opbarsten en piping* kan door het verlengen van de kwelweg. Verlengen van de kwelweg van de Grebbedijk met 40 m laat een grote reductie in de faalkans en het overstromingsrisico zien. Verdere verlenging van de kwelweg leidt niet meer tot een verdere verlaging van de faalkans en het overstromingsrisico omdat het mechanisme *overloop en golfoverslag* dan maatgevend wordt. Verlengen van de kwelweg met 40 m leidt tot een reductie van het overstromingsrisico met een factor 25.

Voor de schematisatie van de ondergrond bij het mechanisme *opbarsten en piping* van de Grebbedijk zijn drie bronnen beschikbaar: de DINO database, waarnemingen van zandmeevoerende wellen en lokaal grondonderzoek. Deze drie bronnen laten geen eenduidig beeld zien van de korrelgrootte in de ondergrond. Schematisaties met de verschillende korrelgroottes resulteren in een grote variatie in het overstromingsrisico (factor 10). In overleg met experts van Deltares is gekozen voor de schematisatie van de ondergrond op basis van de DINO database.

Aanbevelingen

Het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei wordt bijna geheel veroorzaakt door doorbraken vanuit de Nederrijn. Doorbraken vanuit de Eem en randmeren hebben een bijdrage van minder dan 1%. Dit komt omdat de gevolgen bij een doorbraak vanuit de Nederrijn vele malen groter zijn dan die bij een doorbraak vanuit de Eem en randmeren. In 2012-2015 worden de Eem en randmeerdijken

versterkt omdat deze in de tweede toetsronde zijn afgekeurd. De versterking leidt tot een kleinere faalkans van de waterkering.

Echter voor dijkkringgebied 45 geldt dat het verder versterken van de, aan de huidige eisen voldoende, Grebbedijk het overstromingsrisico veel sterker reduceert. Dit kan met simpele ingrepen voor een relatief kort traject.

Het is dan ook aan te bevelen om bij het versterken van waterkeringen in de toekomst niet alleen te kijken naar de technische aspecten van de dijk (voldoet deze aan de eisen) maar ook naar de gevolgen van een doorbraak. Door naar het overstromingsrisico te kijken, kan beoordeeld worden hoe de waterveiligheid in een gebied het meest effectief en efficiënt kan worden vergroot.

Uit de analyse van dijkkringgebied 45 blijkt dat een wettelijke norm die voor alle dijktrajecten van een dijkkring hetzelfde is, inefficiënt is vanwege de grote verschillen in de gevolgen bij doorbraken in verschillende dijktrajecten. Het is daarom aan te bevelen om bij het normeren van waterkeringen goed naar de bijdrage aan het overstromingsrisico te kijken en eventueel differentiatie aan te brengen in de normering binnen een dijkkring.

Het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 wordt vooral bepaald door het mechanisme *opbarsten en piping* voor de Grebbedijk. De samenstelling van de ondergrond is hierbij van groot belang. Uit gevoeligheidsanalyses naar de korrelgrootte in de ondergrond blijkt dat deze parameter de overstromingskans en het overstromingsrisico met een factor 10 kan vergroten of verkleinen. Het uitvoeren van een gedetailleerd grondonderzoek waaruit een goed beeld ontstaat van de ligging, dikte en samenstelling van de zandbanen onder de dijk verdient dan ook zeer de aanbeveling.

De faalkans *onder- en achterloopsheid* van het gemaal Westdijk is zeer groot. De achterliggende reden voor deze grote faalkans is dat er onvoldoende gegevens zijn over de ondergrond ter plaatste van het gemaal. Een grondonderzoek waarmee de bodemsamenstelling rondom het gemaal vastgesteld wordt is aan te bevelen.

Technische samenvatting

Dit rapport beschrijft de resultaten van de risicoanalyse die is verricht voor dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei in het kader van het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK2). In deze technische samenvatting worden de berekeningsresultaten besproken en wordt op hoofdlijnen beschreven op welke uitgangspunten en aannamen deze resultaten berusten. De berekening van overstromingsrisico's in VNK2 omvat de volgende stappen:

1. De schematisatie van de dijkkring

Dijkkringgebied 45 bestaat uit de Gelderse Vallei die ligt ingeklemd tussen de hoge gronden van het Veluwemassief aan de oostzijde en de Utrechtse Heuvelrug aan de westzijde. De oppervlakte van het gebied is circa 37.300 ha. De dijkkring heeft een overschrijdingskansnorm van het MHW van 1/1.250 per jaar. Het gebied wordt beschermd door een stelsel van primaire waterkeringen met een totale lengte van circa 38,5 km. De Grebbedijk aan de zuidzijde heeft een lengte van circa 5,4 km en beschermt het dijkkringgebied tegen overstromingen vanuit de Nederrijn. De Eem- en randmeerdijken aan de noordwestzijde hebben een gezamenlijke lengte van circa 33,1 km, waarvan 4,8 km behoort tot de categorie c. De waterkeringen langs de Eem en randmeren zijn in de tweede wettelijke veiligheidstoetsing voor een groot gedeelte afgekeurd en worden in de periode 2012-2015 versterkt. In deze studie is het definitieve ontwerp van de dijkversterking meegenomen in de beoordeling.

In de primaire waterkering van dijkkring 45, Gelderse Vallei bevinden zich 35 waterkerende kunstwerken. Voor zeven kunstwerken is een faalkansanalyse uitgevoerd in PC-Ring. Er zijn geen faalkansen berekend voor de faalmechanismen van de dijken en kunstwerken waarbij op voorhand duidelijk was dat de bijdrage daarvan aan de overstromingskans zeer gering zou zijn.

Ten behoeve van de risicoanalyse zijn de dijken van dijkkring 45 ingedeeld in 36 dijkvakken. De categorie c-kering is hierbij buiten beschouwing gelaten. Het niet meenemen van de 4,8 km lange categorie c-kering heeft naar verwachting nauwelijks effect op de berekende overstromingskans en het overstromingsrisico. De indeling is gemaakt op basis van harde en zachte grenzen. Harde grenzen zijn van buitenaf opgelegd, zachte grenzen zijn bepaald op basis van expert judgement. Een overzicht van de vakindeling voor de dijken en de kunstwerken in de categorie a-kering is gegeven in Tabel 2.

Dijken	Totale lengte [km]	38,5
	Aantal dijkvakken	36
	Gemiddelde lengte dijkvak [km]	1,05
Kunstwerken	Totaal aantal kunstwerken	35
	Aantal beschouwde kunstwerken	7

Tabel 2: De vakindeling van dijkkring 45.

2. De berekening van faalkansen

Alle dijkvakken en kunstwerken in dijkkring 45 zijn beschouwd. Voor niet alle vakken en kunstwerken zijn echter faalkansen berekend en/of zijn faalkansen meegenomen bij de bepaling van de overstromingskans. Voor alle dijkvakken is *overloop en golfoverslag* meegenomen. Daarnaast is voor *macrostabiliteit binnenwaarts* en *beschadiging bekleding en erosie dijklichaam* een selectie gemaakt van de respectievelijk 4 en 7 zwakste vakken zoals deze volgen uit de derde toetsronde. Voor het faalmechanisme

opbarsten en piping is aan de hand van de resultaten van de derde toetsronde, beschikbare gegevens en op basis van conservatieve criteria ten aanzien van benodigde kwelweglengte een selectie gemaakt van de dijkvakken die mogelijk bijdragen aan het overstromingsrisico.

Voor de kunstwerken is met de resultaten van de derde toetsronde en eenvoudige beoordelingen bepaald welke kunstwerken en faalmechanismen mogelijk een significante bijdrage leveren aan de overstromingskans. Tabel 3 geeft een overzicht van de voor de berekening van de overstromingskans beschouwde faalmechanismen, vakken en kunstwerken.

Type waterkering	Faalmechanisme	Aantal vakken / kunstwerken
Dijken	Overloop en golfoverslag	36
	Macrostabieliteit binnenwaarts	4
	Opbarsten en piping	15
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	7
Kunstwerken	Overslag/overloop	1
	Betrouwbaarheid sluiting	2
	Onder- en achterloopsheid	5
	Sterkte en stabiliteit	3

Tabel 3: Beschouwde faalmechanismen en het aantal nader beschouwde vakken / kunstwerken.

Als een waterkering faalt betekent dit dat deze haar waterkerende functie niet meer kan vervullen en dat als gevolg daarvan een overstroming plaatsvindt. De faalkansen zijn berekend per dijkvak en per kunstwerk. Uit de combinatie van de faalkansen van de dijkvakken en de kunstwerken volgt een overstromingskans van 1/100 per jaar voor de categorie a-kering van dijkkring 45. Deze overstromingskans is onder te verdelen in een overstromingskans vanuit de Eem en randmeren van 1/470 per jaar en een overstromingskans van 1/130 per jaar vanuit de Nederrijn.

Type waterkering	Faalmechanisme	Faalkans [per jaar]
Dijken	Overloop en golfoverslag	1/8.200
	Macrostabieliteit binnenwaarts	<1/1.000.000
	Opbarsten en piping	1/110
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	1/210.000
Kunstwerken	Overslag/overloop	1/160.000
	Betrouwbaarheid sluiting	<1/1.000.000
	Onder- en achterloopsheid	1/1.900
	Sterkte en stabiliteit	1/420.000
Overstromingskans		1/100

Tabel 4: Berekende faalkansen per faalmechanisme.

Tabel 4 toont de berekende faalkansen per faalmechanisme voor dijkkring 45. Hieruit blijkt dat de overstromingskans voor dijkkringgebied 45 gedomineerd wordt door het faalmechanisme *opbarsten en piping*. De berekende faalkansen zijn het grootst voor de dijkvakken van de Grebbedijk. Het beeld is in hoofdlijnen consistent met het beeld

van de beheerder voor deze dijkkring. Hoewel de Grebbedijk is goedgekeurd in de derde toetsronde treden er regelmatig zandmeevoerende wellen op wat een indicatie is voor het optreden van *opbarsten en piping*. Na het hoogwater in 2011 is het waterschap een nader onderzoek opgestart om de gevoeligheid van de Grebbedijk voor het mechanisme *opbarsten en piping*, met name de samenstelling van de ondergrond en de stijghoogte van het water verder te beoordelen.

De kunstwerken leveren een beperkte bijdrage aan de totale overstromingskans. Alleen gemaal Westdijk heeft met 1/1.900 per jaar een berekende faalkans groter dan 1/100.000 per jaar. Deze faalkans wordt bepaald door het faalmechanisme *onder- en achterloopsheid*.

3. De berekening van de gevolgen

Per breslocatie zijn overstromingsberekeningen uitgevoerd voor verschillende belastingcondities: toetspeil minus 1 decimeringhoogte (tp-1d), toetspeil (tp) en toetspeil plus 1 decimeringhoogte (tp+1d). De gevolgen zijn berekend met HIS-SSM (versie 2.5). Voor de meervoudige doorbraak zijn de overstromingskenmerken (waterdiepte, stroomsnelheid, stijgsnelheid) bepaald op basis van de overstromingsberekeningen voor de enkelvoudige doorbraken.

Bij een doorbraak langs de Nederrijn zijn de gevolgen van een overstroming verreweg het grootst. Afhankelijk van de belastingcondities is bij een doorbraak langs de Nederrijn 8,6 tot 12,3 miljard euro schade te verwachten. De verwachte economische schade als gevolg van een doorbraak langs de Eem of randmeerdijken is, afhankelijk van de locatie en de belastingcondities, 25 tot 90 miljoen euro, ongeveer een factor 100 kleiner.

Het aantal slachtoffers als gevolg van een dijkdoorbraak is sterk afhankelijk van de mogelijkheden tot evacuatie. Hiertoe zijn evacuatiefracties bepaald, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen georganiseerde en ongeorganiseerde evacuatie bij verwachte en onverwachte overstroming. Aan deze fracties is een conditionele kans gekoppeld die aangeeft dat de betreffende fractie van de bevolking geëvacueerd wordt bij een overstroming. Voor overstromingen van de noordelijke en de zuidelijke dijken verschillen deze fracties, vanwege de voorspelbaarheid en de omstandigheden tijdens hoogwater. Doordat op de Nederrijn een hoogwatersituatie meerdere dagen van tevoren is te voorzien is een georganiseerde evacuatie zeer waarschijnlijk. Voor een overstroming vanuit de Eem- of randmeren zijn de evacuatiefracties kleiner.

Het vluchtgedrag van mensen die niet zijn geëvacueerd nadat een dijkdoorbraak heeft plaats gevonden is niet expliciet meegenomen. De onzekerheid in het effect van dit vluchtgedrag is zeer groot. Wel wordt hier impliciet rekening mee gehouden in de slachtofferfuncties die gebruikt worden in HIS-SSM.

Afhankelijk van de mogelijkheden tot evacuatie en het buitenwaterpeil varieert het aantal slachtoffers bij een doorbraak langs de Nederrijn tussen 95 bij georganiseerde evacuatie tot 1.235 bij geen evacuatie. Bij een doorbraak van de Eem- of randmeerdijken varieert het aantal slachtoffers tussen 0 bij georganiseerde evacuatie tot 5 bij geen evacuatie.

4. De berekening van scenariokansen

Dijkkring 45 is ten behoeve van de overstromingsberekeningen ingedeeld in 6 ringdelen (Figuur 3). Daarbij is het uitgangspunt gehanteerd dat de gevolgen van een doorbraak binnen één ringdeel nagenoeg gelijk zijn ongeacht de locatie van de doorbraak. Algemeen geldt dat ringdelen worden vastgesteld aan de hand van het stelselmatig langs de dijkkring onderzoeken of het overstromingspatroon significant wijzigt.

Er wordt verondersteld dat de hydraulische belastingen door de Nederrijn en de belastingen door Eem en randmeren elkaar niet beïnvloeden. Dit houdt in dat de kans op gelijktijdige maatgevende belastingen op zowel de Nederrijn, de Eem en randmeren verwaarloosbaar klein zijn. Een doorbraak langs de Nederrijn heeft geen invloed op de kans op een doorbraak langs de Eem en randmeren en vice versa. Deze situaties zijn daarom niet beschouwd.

Op basis van de overstromingssommen is geconcludeerd dat het onderscheiden van alle mogelijke meervoudige doorbraakscenario's veel scenario's op zou leveren met een relatief kleine bijdrage aan het overstromingsrisico. Vanuit efficiëntieoverwegingen is gekozen om de meervoudige doorbraken vanuit de Eem en randmeren samen te voegen tot één meervoudig overstromingsscenario. Hierbij is gekozen voor de overstromingssommen met de grootste schades. Voor elk scenario is berekend hoe groot de kans is dat deze optreedt (de scenariokans).



Figuur 3: Ringdelen en breslocaties dijkring 45.

5. Het combineren van de scenariokansen en de gevolgen

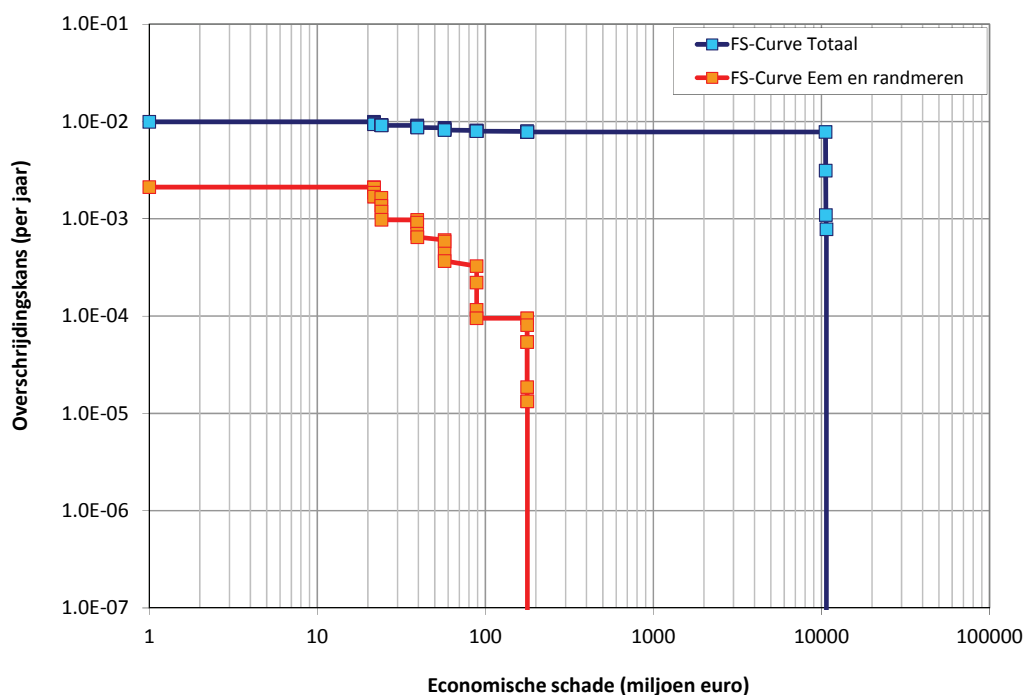
Het risico wordt berekend door de kansen en gevolgen van de diverse overstromingsscenario's te combineren. Bij de selectie van de overstromingsberekeningen is steeds gekeken naar de belastingcondities waarbij het optreden van de diverse scenario's het

meest waarschijnlijk is. Als een scenario naar verwachting pas optreedt bij een zeer hoge waterstand, dan is uitgegaan van een overstromingsberekening die hoort bij een extreme waterstand.

6. De berekening van het overstromingsrisico

Op basis van de combinaties van scenariokansen en gevolgen zijn de jaarlijkse verwachtingswaarden van economische schade en slachtoffers berekend. De verwachtingswaarden van de economische schade en het aantal slachtoffers bedragen respectievelijk 83 miljoen euro per jaar en 1,9 slachtoffers per jaar. De jaarlijkse overschrijdingskansen van schade en slachtoffers zijn weergegeven in FN- en FS-curven (respectievelijk Figuur 4 en Figuur 5). Deze curven beschrijven de kansen op overschrijding van bepaalde slachtofferaantallen of schades.

Uit de FS-curve blijkt dat de kans op ten minste 10 miljard euro schade bijna gelijk is aan 1/100 per jaar. Door de dominantie van de Grebbedijk wordt de FS-curve een rechthoek. De overstromingsscenario's met een kleinere kans en een kleiner gevolg hebben geen invloed op de vorm van de FS-curve. De kans op overstroming vanuit de Eem en randmeren die leidt tot een schade van circa 180 miljoen euro is ongeveer 1/10.000 per jaar. Dit loopt stapsgewijs af naar schades van circa 20 miljoen euro per jaar met een kans van 1/500 per jaar.



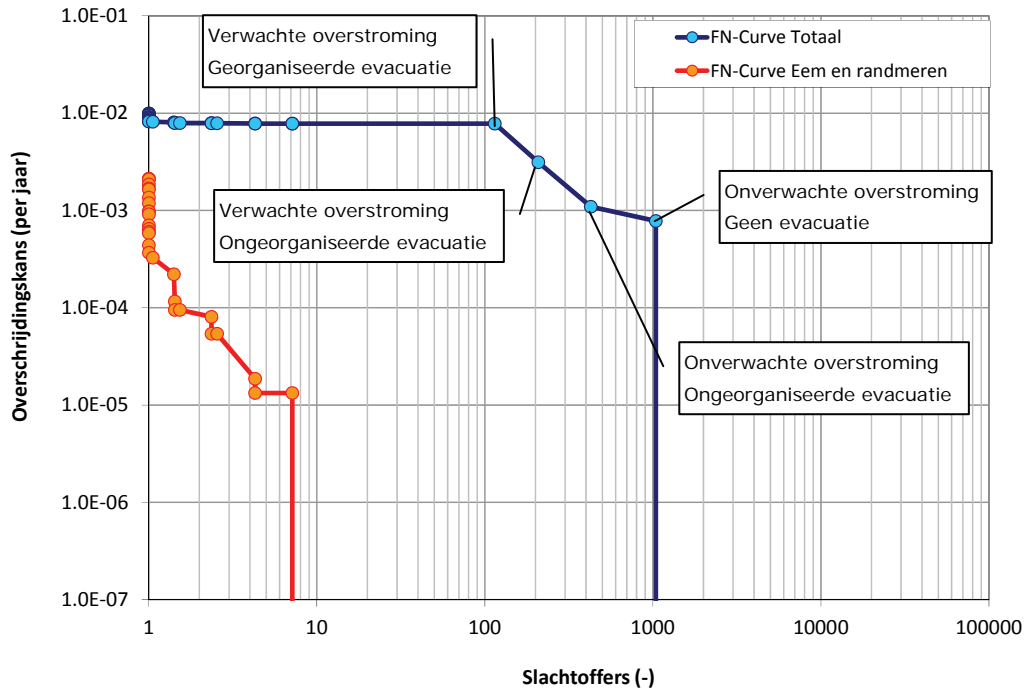
Figuur 4: FS-curven voor dijkringgebied 45 voor het totaal aan overstromingsscenario's (blauw) en voor de overstromingsscenario's vanuit de Eem en randmeren (rood).

Uit de FS-curven is af te lezen dat de schadebedragen bij een overstroming vanuit de Eem en randmeren een factor 100 kleiner zijn dan bij een overstroming vanuit de Nederrijn. Tevens zijn de kansen op een overstroming vanuit de Eem en randmeren kleiner waardoor de bijdrage aan het overstromingsrisico van dijkringgebied 45 door de Eem- en randmeerdijken zeer klein is.

Uit de totale FN-curve blijkt dat de kans op een totaal aantal slachtoffers van ten minste 100 personen vrijwel gelijk is aan de overstromingskans van het dijkringgebied (1/100 per jaar). De kans dat een groep van minimaal 200 personen het slachtoffer wordt van een overstroming is circa 1/300 per jaar. De kans dat een groep van ten

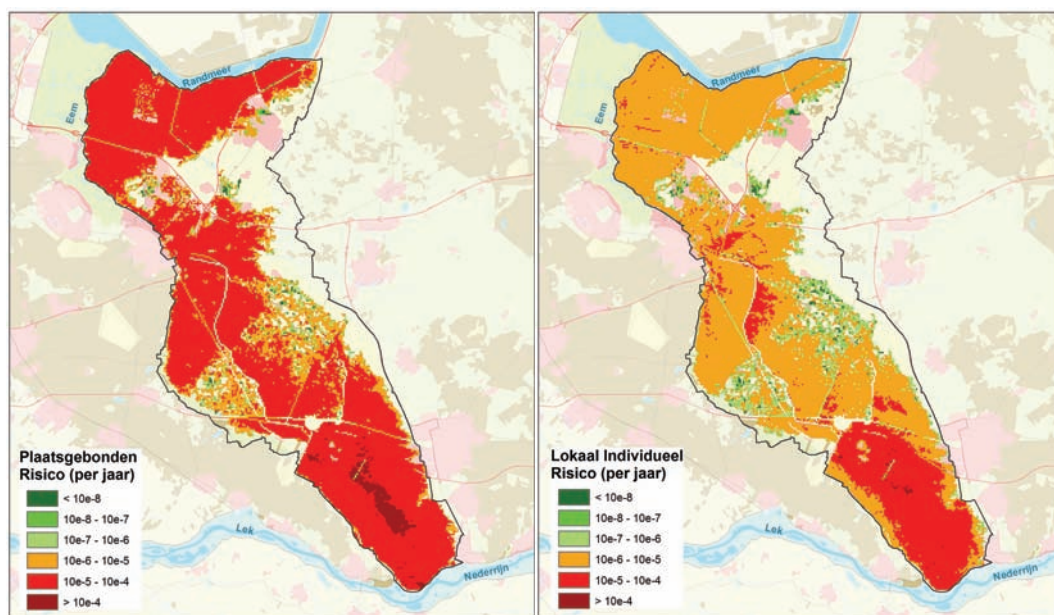
minste 1.000 personen dodelijk slachtoffer wordt van een overstroming van dijkkringgebied 45 circa 1/1.000 per jaar. De kans dat er meer slachtoffers vallen is verwaarloosbaar klein. De FN-curve wordt gedomineerd door doorbraken vanuit de Grebbedijk. Afhankelijk van de evacuatie vallen er bij een doorbraak tussen de 100 (georganiseerde evacuatie) en 1.000 (geen evacuatie) slachtoffers.

Indien alleen naar overstromingen vanuit de Eem en randmeren wordt gekeken dan is het maximum aantal slachtoffers circa 7 bij een meervoudige doorbraak met een kans van 1/75.000 per jaar. De kans op een overstroming met één dodelijk slachtoffer is ongeveer 1/500 per jaar.



Figuur 5: FN-curven voor dijkkringgebied 45 voor het totaal aan overstromingsscenario's (blauw) en voor de overstromingsscenario's vanuit de Eem en randmeren (rood).

Het plaatsgebonden risico (Figuur 6, links) ligt in bijna het gehele dijkkringgebied tussen de 1/100.000 en 1/10.000 per jaar. Nabij Veenendaal is het plaatsgebonden risico het grootst met meer dan 1/10.000 per jaar. De waterdieptes en de stroomsnelheden zijn op deze locatie het grootst. Ook de kans op een doorbraak vanuit de Nederrijn is het grootst wat leidt tot een hoger plaatsgebonden risico voor deze locatie. Op de hoger gelegen delen komt geen of weinig water waardoor het plaatsgebonden risico snel afneemt.



Figuur 6: Het plaatsgebonden risico (links) en het lokaal individueel risico (rechts) in dijkringgebied 45.

Het lokaal individueel risico (Figuur 6, rechts) is overal een factor 4,3 lager dan het plaatsgebonden risico. Deze factor volgt direct uit de gemiddelde evacuatiefractie. Het lokaal individueel risico is vrijwel overal groter dan 1/1.000.000 per jaar. In het gebied tussen de A12 en de Grebbedijk is het lokaal individueel risico het grootst (tussen 1/100.000 en 1/10.000 per jaar). Dit komt omdat er in dit gebied hoge waterstanden ontstaan bij een doorbraak en de kans op een doorbraak van de Grebbedijk relatief hoog is.

7. Gevoeligheidsanalyses

De doelstelling van het PKB Ruimte voor de Rivier is een waterstanddaling van ongeveer 30 cm op de Nederrijn bij maatgevende omstandigheden. De overstromingskansen van dijkringgebied 45 wordt hierdoor met ongeveer een factor 2 verkleind. Omdat een doorbraak vanuit de Nederrijn bijna het gehele overstromingsrisico van dijkringgebied 45 bepaalt, leidt de waterstandverlaging ook tot een grote verlaging van het overstromingsrisico. De verwachtingswaarde van het economische risico daalt ook met ongeveer een factor 2 van 83 naar 38 miljoen euro per jaar. De verwachtingswaarde van het slachtofferrisico daalt met een factor 2 van 1,9 naar 0,8 slachtoffers per jaar.

Door gerichte ingrepen in de waterkeringen neemt de overstromingskans van het dijkringgebied af. Zo leidt een dijkverbetering over een lengte van circa 3,2 km langs de Grebbedijk gericht op het faalmechanisme opbarsten en piping tot een afname van de overstromingskansen vanuit de Grebbedijk met een factor 20. Voor dijkringgebied 45 betekent dit een daling van de overstromingskansen met een factor 4 van 1/100 per jaar naar 1/410 per jaar omdat de Eem en randmeerdijken nu een bijdrage leveren aan de overstromingskansen. Het overstromingsrisico daalt met een factor 20. Het economische risico gaat van 83 naar 4 miljoen euro per jaar en het slachtofferrisico gaat van 1,9 naar 0,1. De reductie in overstromingsrisico is groter dan die van de overstromingskansen omdat het overstromingsrisico nagenoeg geheel wordt bepaald door overstromingen van de Grebbedijk. De overstromingskansen wordt voor een belangrijk deel bepaald door de Eem- en randmeerdijken. Ingrepen in de waterkeringen langs de Eem en randmeren leiden wel tot een verlaging van de overstromingskansen maar hebben nagenoeg geen effect op het overstromingsrisico.

Aangezien het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 bijna volledig wordt bepaald door doorbraken van de Grebbedijk en gerichte ingrepen hier tot een grote reductie van het overstromingsrisico leiden is nader gekeken naar de specifieke ingrepen. Omdat de faalkansen worden gedomineerd het mechanisme *opbarsten en piping* is gekeken naar de effecten van een verlenging van de kwelweg. Verlengen van de kwelweg met 40 m laat een grote reductie in de faalkans en het overstromingsrisico zien. Verdere verlenging van de kwelweg leidt niet meer tot een verlaging van de faalkans en het overstromingsrisico omdat het mechanisme *overloop en golfoverslag* dan maatgevend is. Het verlengen van de kwelweg met 40 m leidt tot een reductie van de overstromingskans vanuit Nederrijn met een factor 25 terwijl de overstromingskans van dijkkringgebied 45 met een factor 4 daalt. Het overstromingsrisico (zowel economisch als slachtoffer) daalt met een factor 25.

Voor de schematisatie van de ondergrond bij het mechanisme *opbarsten en piping* van de Grebbedijk is gebruik gemaakt van de DINO database. Tevens zijn er waarnemingen beschikbaar van zandmeevoerende wellen en het lokale grondonderzoek. Deze drie bronnen laten geen eenduidig beeld zien van de korrelgrootte in de ondergrond. Door gebruik te maken van het zand uit de wellen in de schematisatie wordt het overstromingsrisico een factor 10 groter. Indien het lokale grondonderzoek wordt gebruikt wordt het overstromingsrisico een factor 10 kleiner.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding project Veiligheid van Nederland in Kaart

Na de watersnoodramp van 1953 werden door de Deltacommissie de fundamenten van het huidige hoogwaterbeschermingsbeleid gelegd. Daarbij werd een nieuwe veiligheidsfilosofie geïntroduceerd: de kosten van dijkverzwaring werden voor de eerste maal expliciet afgewogen tegen de verlaging van het overstromingsrisico. Ook de tweede Deltacommissie (Commissie Veerman) heeft geadviseerd om het beschermingsniveau te bepalen op basis van een afweging van de omvang van overstromingsrisico's. Hoewel de beschouwing van de eerste Deltacommissie uitging van overstromingskansen en overstromingsrisico's, konden deze destijds nog niet goed worden berekend. Inmiddels is in deze situatie verandering gekomen.

Door de Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW, tegenwoordig ENW) is in 1992 een ontwikkelingstraject ingezet om het kwantificeren van overstromingskansen en overstromingsrisico's mogelijk te maken, de zogenaamde Marsroute. Op basis van diverse studies, zoals de Casestudies 1998, ONIN en SPRINT zijn de rekentechnieken verder ontwikkeld. Na de PICASO-studie is VNK1 uitgevoerd en zijn wederom verbeteringen in het instrumentarium doorgevoerd. In 2006 is vervolgens het project VNK2 van start gegaan. In VNK2 wordt het overstromingsrisico in Nederland in beeld gebracht. De inzichten die daarbij worden opgedaan zijn van grote waarde voor de bescherming van Nederland tegen overstromingen.

1.2 Projectopdracht Veiligheid van Nederland in Kaart

Het project VNK2 wordt uitgevoerd door de Waterdienst in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu (I&M), de Unie van Waterschappen (UvW), het Interprovinciaal overleg (IPO) en Rijkswaterstaat (RWS). Voor de uitvoering van de feitelijke berekeningen is het Projectbureau VNK2 opgericht. Het Projectbureau werkt samen met de waterschappen en provincies, en wordt daarbij ondersteund door ingenieursbureaus. Door kennisinstituten wordt bijgedragen aan de verdere methodiekontwikkeling en de operationalisering van het analyse-instrumentarium. Het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) controleert steekproefsgewijs de kwaliteit van de analyses en rapportages.

In het project VNK2 worden de kansen op en de gevolgen van overstromingen per dijkkringgebied berekend. Een dijkkring bestaat uit een aaneengesloten keten van waterkeringen (en mogelijk hooggelegen gronden) waarmee het omsloten gebied (het dijkkringgebied) tegen overstromingen wordt beschermd. In totaal zijn er in Nederland 57 van dit type dijkkringen. De dijkkringen 23 (Biesbosch; wordt grotendeels ontpolderd) en 33 (Kreekrakpolder; uitsluitend categorie c-keringen) worden in VNK2 niet beschouwd. Daarnaast zijn er sinds de uitvoering van de Maaswerken 46 Maaskaden. Het project VNK2 voert de berekeningen van de overstromingskansen en –gevolgen uit voor 55 dijkkringgebieden en 3 Maaskaden.

VNK2 verschaft inzicht in de betrouwbaarheid van de waterkeringen, identificeert de zwakke plekken, berekent het overstromingsrisico en geeft mogelijkheden aan om dit risico te verkleinen. VNK2 levert zo basisinformatie voor politiek-maatschappelijke afwegingen ten aanzien van investeringen in de waterveiligheid van Nederland.

1.3 Overschrijdingskansen en overstromingskansen

De huidige Nederlandse veiligheidsnormen zijn gedefinieerd als overschrijdingskansen. De waterstanden die horen bij deze overschrijdingskansen worden toetspeilen genoemd. De waterkeringen dienen deze waterstanden veilig te kunnen keren, rekening houdend met alle factoren die het waterkerend vermogen beïnvloeden.

De wettelijk vastgelegde overschrijdingskansen zijn niet gelijk aan overstromingskansen. Een overstromingskans is de kans dat zich in een dijkkringgebied daadwerkelijk een overstroming voordoet. Er zijn verschillende redenen waarom de overschrijdingskansen uit de Waterwet niet gelijk zijn aan de overstromingskansen van dijkkringgebieden:

Een overstromingskans is de kans dat zich in een dijkkringgebied daadwerkelijk een overstroming voordoet. Een overstromingskans geeft dus een beeld van de conditie van een dijkkring. Een overschrijdingskans uit de Waterwet is een normwaarde². De conditie van een waterkering kan afwijken van de norm, zowel in positieve als negatieve zin.

Een overschrijdingskans heeft alleen betrekking op de belastingen. Om een overstromingskans te bepalen moeten ook de onzekerheden ten aanzien van de sterkte-eigenschappen van waterkeringen expliciet worden meegenomen. De overschrijdingskans is gedefinieerd per vak. De overstromingskans heeft betrekking op de gehele dijkkringgebied. Bij het beoordelen of een waterkering het toetspeil veilig kan keren wordt per vak gekeken. Bij het bepalen van een overstromingskans moeten de faalkansen van alle vakken worden gecombineerd. Daarbij speelt ook de totale lengte van de kering een rol: hoe langer een kering, hoe groter de kans dat zich ergens een zwakke plek bevindt. Dit fenomeen wordt ook wel het lengte-effect genoemd.

1.4 Rekenmethode VNK2

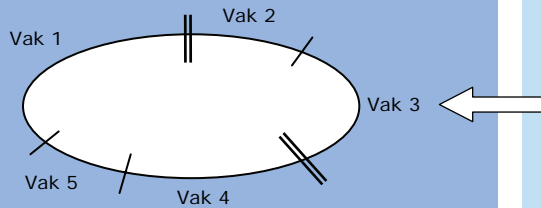
In het project VNK2 worden overstromingsrisico's berekend. Deze risico's worden bepaald door de kansen op de vele mogelijke doorbraakscenario's te combineren met de gevolgen van bijbehorende overstromingen. In Figuur 7 zijn de stappen die achtereenvolgens worden gezet om het overstromingsrisico te berekenen schematisch weergegeven. In de onderstaande tekst worden deze verder verduidelijkt. Voor een nadere toelichting op de verschillende onderdelen van de risicoberekeningen wordt verwezen naar de handleiding [ref. 1] en het achtergrondrapport [ref. 2].

² Door de aanwezigheid van reststerkte hoeft een dijk bij een overschrijding van een waterstand die gelijk is aan het toetspeil nog niet direct te bezwijken. Het is echter ook mogelijk dat een dijk bij een waterstand beneden het toetspeil bezwijkt door bijvoorbeeld het faalmechanisme opbarsten en piping.

Kansenspoor

Stap 1

Verdeel de dijkkring (cf. Waterwet) in vakken waarin de sterkte-eigenschappen en belastingen homogeen zijn.



Stap 2

Bereken per vak een faalkans voor de verschillende faalmechanismen

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	$Kans_{Over,5}$	$Kans_{Pip,5}$	$Kans_5$
Combin	$Kans_{Over}$	$Kans_{Pip}$	Overstr, kans

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

Stap 3

Bereken de scenariokansen op basis van de kansen per vak. De scenariokansen zijn nodig om de koppeling tussen kansen en gevolgen te kunnen maken.

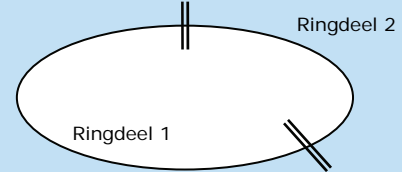
Scenario	Scenariokans
1	$Kans_1$
2	$Kans_2$
3	$Kans_3$
Som	Kans

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

Gevolgenspoor

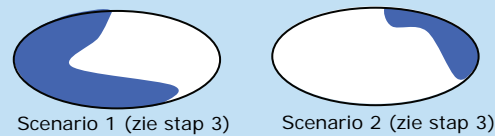
Stap 1

Verdeel de dijkkring in ringdelen waarvoor de gevolgen ongeacht de breslocatie (vrijwel) gelijk zijn. De grens van een ringdeel valt samen met een vakgrens.



Stap 2

Bepaal per ringdeel het overstromingspatroon, de waterdiepte en de stroom- en stijgsnelheid in geval van een doorbraak.



Stap 3

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

Scenario	Ringdeel 1	Ringdeel 2
1	Faalt	Faalt niet
2	Faalt niet	Faalt
3	Faalt	Faalt

Stap 4

Bepaal het overstromingspatroon, met de waterdiepten en de stroom- en stijgsnelheden, voor meervoudige doorbraken (hier: scenario 3), op basis van de overstromingsberekeningen per ringdeel (zie stap 2).



Stap 5

Bereken de schade en het slachtofferaantal per scenario. Per scenario zullen de gevolgen anders zijn.

Scenario	Schade	Slachtoffers
1	E1	N1
2	E2	N2
3	E3	N3

Risicoberekening

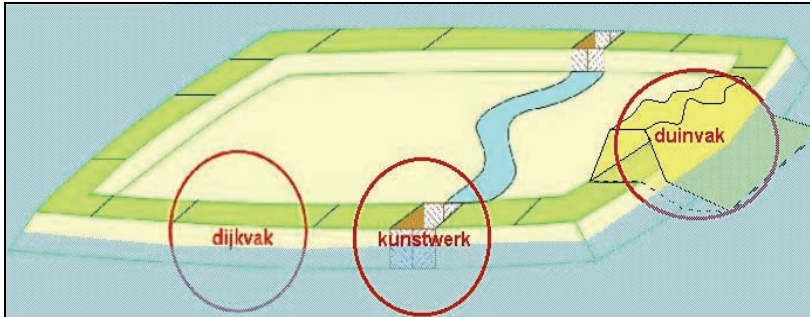
Bereken op basis van de scenariokansen- en gevolgen per scenario de verwachtingswaarden van de schade en het aantal slachtoffers.

Scenario	Scenariokans x Schade	Scenariokans x Slachtoffers
1	$Kans_1 \times E1$	$Kans_1 \times N1$
2	$Kans_2 \times E2$	$Kans_2 \times N2$
3	$Kans_3 \times E3$	$Kans_3 \times N3$
Som	Verwachtingswaarde schade	Verwachtingswaarde slachtofferaantal

Een verwachtingswaarde is een gewogen gemiddelde van alle mogelijke uitkomsten, met als gewichten de kansen op die waarden.

Figuur 7: De rekenmethode van VNK2.

Een dijkkring kan worden opgevat als een keten: de schakels worden gevormd door alle dijkvakken, duinvakken en kunstwerken die onderdeel uitmaken van de waterkering (Figuur 8). Per vak en kunstwerk wordt gekeken naar de verschillende wijzen waarop deze kan falen, d.w.z. zijn waterkerende functie kan verliezen. Deze verschillende wijzen van falen worden faalmechanismen genoemd. De overstromingskans wordt berekend door het combineren van alle faalkansen per vak en faalmechanisme.



Figuur 8: De dijkkring als een keten met verschillende schakels.

Voor een beschrijving van de verschillende faalmechanismen die in de risicoanalyse zijn meegenomen wordt verwezen naar paragraaf 3.2. De faalmechanismen zettingsvloeiing, afschuiven voorland, afschuiven buitentalud, microstabiliteit en verweking worden binnen VNK2 niet meegenomen. De redenen hiervoor zijn divers en houden verband met de volgende zaken:

Voor sommige mechanismen is er nog een kennistekort of zijn de gegevens onvoldoende beschikbaar.

Niet alle mechanismen leiden direct tot bezwijken.

Mechanismen hebben een sterk tijdsafhankelijk karakter waardoor de modellering met het VNK-instrumentarium niet mogelijk is of tot onvoldoende betrouwbare antwoorden zal leiden.

In paragraaf 3.3 wordt nader ingegaan op de faalmechanismen waarvoor in VNK2 geen faalkansen zijn berekend. Daarbij is vooral gekeken naar de faalmechanismen waaraan in de tweede toetsronde uitdrukkelijk aandacht is besteed en/of waarvoor door de betrokken beheerders aandacht is gevraagd.

Bij de berekening van faalkansen en overstromingskansen spelen onzekerheden een centrale rol. Als de belasting op een waterkering groter is dan de sterkte, zal de kering bezwijken. Omdat er onzekerheden bestaan ten aanzien van zowel de belastingen als de sterkte-eigenschappen van waterkeringen, is het onzeker of een waterkering in een gegeven periode zal bezwijken. Anders gezegd: er bestaat een kans dat de waterkering bezwikt. Onzekerheden ten aanzien van belastingen en sterkte-eigenschappen vormen dus de basis van de overstromingskans. Zonder onzekerheden is de kans dat een kering bezwikt nul of één.

Op basis van de berekende faalkansen per vak/kunstwerk en faalmechanisme kan de kans op een overstroming worden berekend. Dit is de kans dat zich ergens een doorbraak zal voordoen. Niet elke doorbraak heeft echter dezelfde gevolgen. Om het overstromingsrisico te bepalen is het zodoende nodig om voor de vele mogelijke (combinaties van) doorbraken de kansen en gevolgen te bepalen. Het verloop van een overstroming dat hoort bij een bepaalde doorbraak of combinatie van doorbraken wordt een overstromingsscenario genoemd. De kansen op de verschillende overstromingsscenario's worden bepaald op basis van de berekende faalkansen per vak en kunstwerk.

Door de provincie is onder begeleiding van VNK2 voor een aantal breslocaties overstromingsberekeningen gemaakt, voor verschillende belastingsituaties [ref. 2]. Per overstromingsberekening zijn de gevolgen bepaald in termen van economische schade en slachtoffers. Daarbij zijn ook de (on)mogelijkheden voor evacuatie meegenomen.

Door de scenariokansen aan de bijbehorende gevolgen te koppelen kan het overstromingsrisico worden bepaald. Het overstromingsrisico wordt weergegeven door:

- de jaarlijkse verwachtingswaarden van de schade en het aantal slachtoffers;
- het groepsrisico (FN-curve);
- de kansverdeling van de schade (FS-curve);
- het plaatsgebonden risico (PR);
- het lokaal individueel risico (LIR).

In hoofdstuk 6 wordt nader op deze weergaven van het risico ingegaan.

1.5 Leeswijzer

De analyse van dijkkringgebied 45 is beschreven in dit dijkkringrapport. Het dijkkringrapport is geschreven op basis van twee onderliggende rapporten, het achtergrondrapport dijken [ref. 2] en het overall kunstwerkenrapport [ref. 3]. Het overall kunstwerkenrapport is geschreven op basis van het achtergrondrapport dat voor elk kunstwerk is opgesteld (zie Figuur 9).



Figuur 9: Schematisch overzicht rapporten.

Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van het dijkkringgebied. Dit hoofdstuk gaat onder andere in op de inrichting en de hoogteligging, het watersysteem en de ligging van de primaire waterkering. Ten slotte wordt de onderverdeling van de dijkvakken besproken en wordt een toelichting gegeven op de selectie van de kunstwerken waarvoor in VNK2 betrouwbaarheidsanalyses zijn uitgevoerd.

In hoofdstuk 3 worden de berekende faalkansen per dijkvak/kunstwerk en faalmechanisme getoond en besproken, na een korte toelichting op de beschouwde en niet-beschouwde faalmechanismen. De vakken met de grootste faalkansen zijn uitgelicht.

Hoofdstuk 4 presenteert de resultaten van de uitgevoerde overstromingsberekeningen en de daaruit afgeleide gevolgen. Het betreft hier steeds enkelvoudige doorbraken. Per doorbraaklocatie zijn overstromingsberekeningen uitgevoerd voor verschillende

belastingcondities. Voorafgaand aan de presentatie van de resultaten van de overstromingsberekeningen wordt kort ingegaan op de gehanteerde aannamen en uitgangspunten.

Hoofdstuk 5 beschrijft de resultaten van deze scenariokansberekeningen. Ook wordt een toelichting gegeven op de selectie van de scenario's (enkelvoudige en meervoudige doorbraken) die ten grondslag liggen aan de risicoberekeningen.

Hoofdstuk 6 beschrijft de resultaten van de uitgevoerde risicoberekeningen. Het overstromingsrisico wordt op verschillende wijzen weergegeven. Het economisch risico en het slachtofferrisico worden afzonderlijk behandeld.

Hoofdstuk 7 beschrijft de resultaten van gevoeligheidsanalyses die zijn uitgevoerd. Deze geven inzicht in de invloed van belangrijke uitgangspunten op de omvang van het berekende overstromingsrisico. Ook geven zij aan wat de invloed is van verschillende (typen) maatregelen.

Hoofdstuk 8 geeft de conclusies weer van de risicoanalyse voor dijkkringgebied 45. Ten slotte worden aanbevelingen gedaan voor het waarborgen en verder verhogen van de overstromingsveiligheid.

2 Gebiedsbeschrijving en schematisatie

In dit hoofdstuk worden de gebiedskenmerken van dijkkringgebied 45 besproken, inclusief de kenmerken van de primaire waterkering. Daarnaast wordt de onderverdeling van de waterkering in vakken ten behoeve van de faalkansberekeningen beschreven en wordt toegelicht welke kunstwerken zijn geselecteerd voor een gedetailleerde faalkansanalyse. In het achtergrondrapport [ref. 2] wordt nader ingegaan op de vakindeling.

2.1 Beschrijving dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei

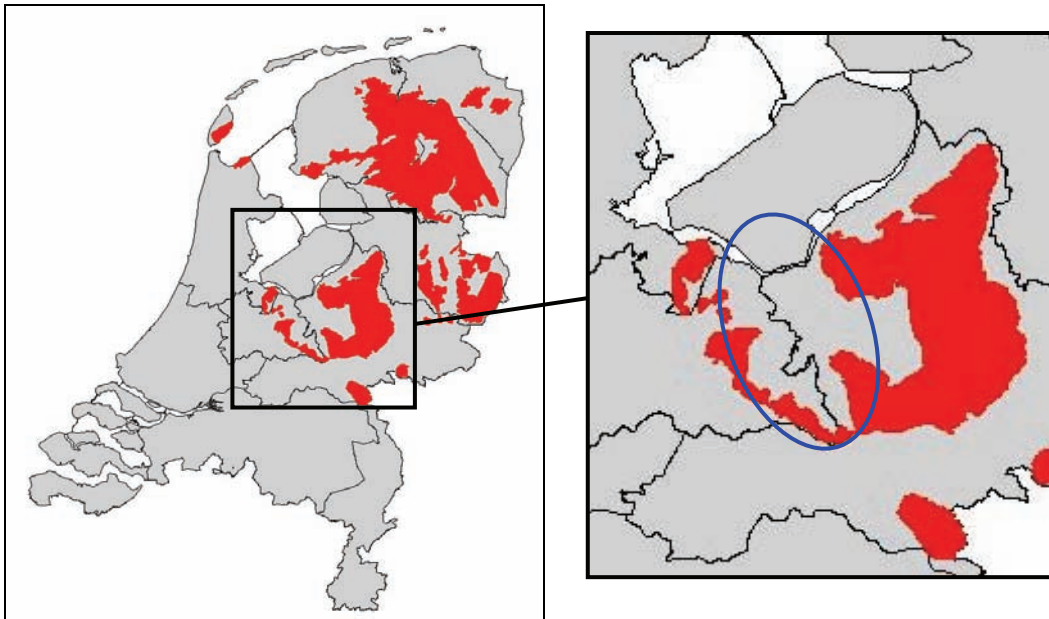
Dijkkringgebied 45 bestaat uit de Gelderse Vallei die ligt ingeklemd tussen de Nederrijn aan de zuidzijde, het Veluwemassief aan de oostzijde, de Utrechtse Heuvelrug aan de westzijde en de randmeren (Eemmeer, Nijkerkernauw) aan de noordzijde (Figuur 10). De oppervlakte van het gebied is circa 37.300 ha. Het dijkkringgebied wordt gekenmerkt door een roerige waterstaatsgeschiedenis, met name als gevolg van doorbraken van de Grebbedijk en de ligging aan de voormalige Zuiderzee. Daarnaast wordt het dijkkringgebied sterk gekenmerkt door de Grebbelinie, een oude verdedigingslinie gebaseerd op inundatie.



Figuur 10: Dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei.

2.1.1 Geologie, geomorfologie en bodem

De Gelderse Vallei is een voormalig Maasdal dat door een ijskap is uitgeslepen tot een glaciaal bekken, een soort kom in het landschap, omgeven door stuwwallen. Voordat de Gelderse Vallei ontstond, lag op deze plek het dal van de Maas. Tijdens de voorlaatste ijstijd (Saalien, 130.000 tot 200.000 jaar geleden) nam een grote ijslob vanuit het noorden bezit van dit dal. De Maas moest hierdoor zijn loop afbuigen naar het westen. Het ijs stuwde de ondergrond op tot hoge stuwwallen. Deze stuwwallen kennen we tegenwoordig als de Utrechtse Heuvelrug en de Veluwe. (Figuur 11).

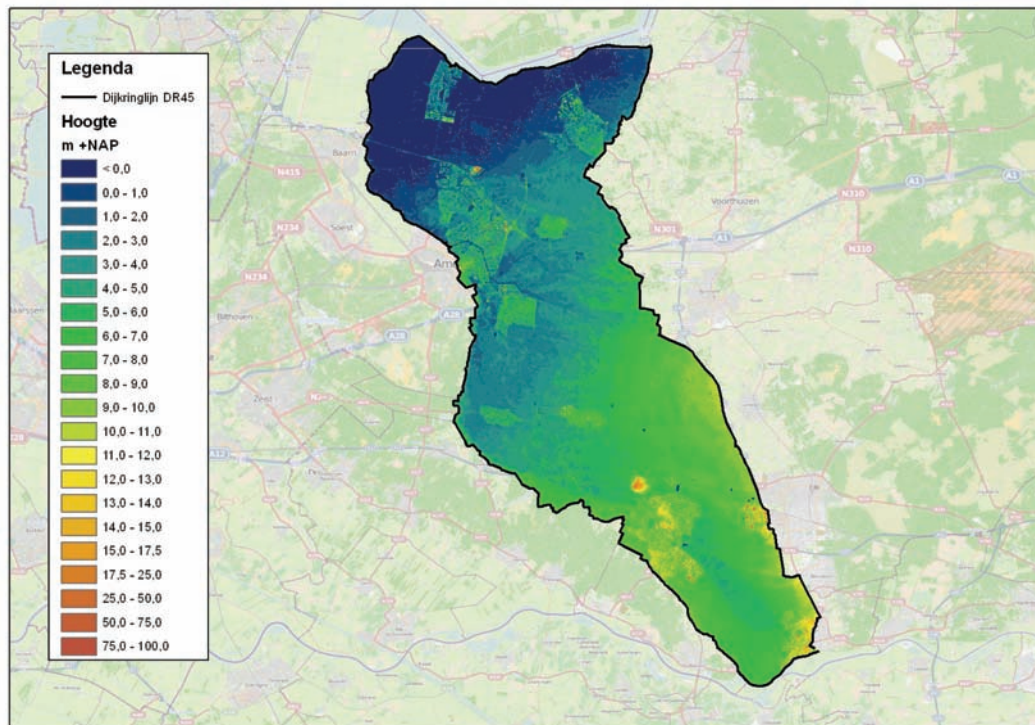


Figuur 11: Vormen die door het landschap in het Saalien zijn ontstaan (rood) met blauw omcirkeld de Gelderse Vallei [ref. 4].

Toen het ijs zich terugtrok bleef er een diep glaciaal bekken achter, dat in het noordelijk deel ongeveer 100 meter diep was. Deze depressie werd sindsdien geleidelijk opgevuld. Er ontstond toen een diep glaciaal meer waarin een pakket kleiige ijsmeerafzettingen werd gevormd met een dikte van enkele tientallen meters. In de warme periode daarna, het Eemien (115.000 tot 130.000 jaar geleden), steeg de zeespiegel en bereikte de zee de Gelderse Vallei, waardoor zeeklei werd afgezet. Hierdoor komt op een diepte tussen NAP -10,0 m en NAP -40,0 m brakwaterklei voor. In de laatste ijstijd die hierop volgde (Weichselien, 115.000 tot 10.000 jaar geleden), werd dekzand afgezet. In het Holoceen (10.000 jaar geleden tot nu) is er vervolgens lokaal veen afgezet.

2.1.2 Hoogteligging

De Gelderse Vallei is als gevolg van de werking van het ijs tijdens de voorlaatste ijstijd (Saalien) een laag gelegen gebied tussen de hoge gronden van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug. Het langgerekte gebied heeft als gevolg van de werking van het ijs tevens een relatief groot hoogteverschil tussen het zuiden bij de Nederrijn met een hoogteligging van circa NAP +7 m en de Zuidelijke Randmeren aan de noordzijde met een hoogteligging rond NAP +0 m (zie Figuur 12).



Figuur 12: Hoogtekaart dijkringgebied 45 (AHN).

2.1.3 Waterhuishouding

De structuur van het gebied, een naar het noorden aflopende vallei tussen twee heuvelruggen, is bepalend voor de waterhuishouding. Doordat de laagste delen van het gebied nabij de randmeren rond NAP +0,0 m liggen, kan de waterafvoer vrijwel helemaal onder vrij verval plaatsvinden. Alleen in de polders Eemland en Arkemheen direct langs de randmeren, is voor de afwatering bemaling nodig.

Een vrijwel ongehinderde afvoer van water uit het hele valleigebied via de Eem naar de huidige randmeren is mogelijk geworden door de afsluiting van de Zuiderzee in 1932. Voor die tijd konden hoge waterstanden in de Zuiderzee de afvoer onmogelijk maken en tot overstromingen en wateroverlast leiden. Door de aanleg van de Afsluitdijk komen waterstanden in de randmeren die de afvoer van de Eem belemmeren niet vaak meer voor en zeker niet langdurig.

Na de afsluiting van de Zuiderzee is in de periode 1935-1941 het Valleikanaal aangelegd, voor een belangrijk deel door het met elkaar verbinden van bestaande watergangen. Valleikanaal en Eem vormen nu samen de hoofdader voor de afwatering van het beheersgebied. Het Valleikanaal begint bij de Nederrijn en mondt in Amersfoort uit in de Eem.

Stelsels van beken vanaf de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug leiden overschotten aan hemelwater en kwelwater naar Valleikanaal en Eem. Deze beken en de gemalen voor de bemaling van de polders ten noorden van Amersfoort, worden gevoed via fijnmazige netwerken van watergangen en (kavel) sloten. In deze beken en netwerken wordt de waterstand met behulp van stuwen beheerst om enerzijds overal genoeg water beschikbaar te hebben en anderzijds wateroverlast te voorkomen [ref. 5].

2.1.4 Landschap, bebouwing en landgebruik

Een groot deel van de Gelderse Vallei wordt aangeduid als *kampenlandschap*. In dit gebied wisselen de hydrologische omstandigheden op korte afstand sterk en komen geen grote akkercomplexen voor. Hier overheerste de individuele occupatie, waardoor kleine percelen ontstonden, met een afwisseling van grasland en akkerland, vaak omgeven door heggen of hakhout. De bebouwing in dit gebied is sterk verspreid.

Binnen het dijkkringgebied liggen – delen van – de gemeenten Barneveld, Ede, Nijkerk, Putten, Wageningen, Amersfoort, Baarn, Bunschoten, Leusden, Rhenen, Veenendaal, Woudenberg en Utrechtse Heuvelrug. Het dijkkringgebied heeft een oppervlakte van circa 37.300 ha en telt ongeveer 325.000 inwoners (CBS, 2010). Binnen de Gelderse Vallei vindt intensieve veeteelt plaats, waarbij varkenshouderijen en pluimveebedrijven de belangrijkste veehouderijen zijn.

2.1.5 Grebbelinie

De Gelderse Vallei is onmiskenbaar verbonden met de Grebbelinie. De Grebbelinie is een voorverdediging van de Hollandse Waterlinie, een Nederlandse verdedigingslinie, gebaseerd op inundatie. De Grebbelinie liep door de Gelderse Vallei vanaf de Nederrijn bij de Grebbeberg te Rhenen langs het Valleikanaal en de Eem tot aan de Zuiderzee, later het IJsselmeer (Figuur 13).



Figuur 13: Overzichtskaart van de Grebbelinie [ref. 6].

Al in de zestiende eeuw waren er plannen om de laaggelegen Gelderse Vallei in te richten als waterlinie. Een dergelijke militaire linie kon, door het onder water zetten van grote stukken land, een eventuele vijand tegenhouden. De plannen voor een complete linie werden opnieuw actueel toen in 1672 de Fransen Nederland binnenvielen. Nadat de Fransen waren verjaagd werd besloten een verdedigingslinie aan te leggen, dwars door de Gelderse Vallei, van Eemnes tot Rhenen. Dit werd de Grebbelinie. Door het grote hoogteverschil tussen de zuidelijke en noordelijke Vallei, was compartimentering noodzakelijk om leegloop in noordelijke richting te voorkomen.

De toepassing van de Grebbelinie in 1793 om de Franse troepen tot staan te brengen mislukte door te lage waterstanden in de Rijn. Gemiddeld bleek er maar 83 dagen per jaar voldoende water in de Rijn te staan om de inundatie tot stand te brengen. In 1794/1795 trad ijsvorming in de inundatievlaktes op, waardoor de Franse troepen alsnog de stellingen konden innemen.

Na de Tweede Wereldoorlog, in 1951, werden de laatste delen van de Grebbelinie opgeheven als vestingwerk. Aan het begin van de eenentwintigste eeuw hebben veel resterende landschapselementen van de Grebbelinie een beschermd status gekregen vanwege zowel hun cultuurhistorische als natuurwaarde. In 2011 heeft de gehele Grebbelinie de status van Rijksmonument gekregen [ref. 7].

2.1.6 *De primaire waterkering van dijkkringgebied 45*

De primaire waterkeringen van dijkkringgebied 45 beschermen de Gelderse Vallei tegen overstromingen vanuit de Nederrijn in het zuiden en overstromingen vanuit de Eem en de randmeren vanuit het noorden. Deze primaire waterkeringen hebben een totale lengte van circa 38,5 km. Hiervan behoort 33,7 km tot de categorie a en 4,8 km tot de categorie c. Dijkkring 45 heeft een overschrijdingskansnorm van het MHW van 1/1.250 per jaar. De waterkeringen en het buitenwater zijn hieronder kort beschreven.

Randmeren (Putterzeedijk, Arkemheense Zeedijk, Oostdijk en Westdijk)

De Putterzeedijk is een categorie c-kering met een lengte van 4,8 km. De Putterzeedijk wordt gescheiden van het buitenwater door de verbindende waterkering Nijkerkersluis. De Arkemheense Zeedijk, Oostdijk en Westdijk hebben een gezamenlijke lengte van 10,3 km. De oude zeedijken kenmerken zich als groene dijk met op enkele plaatsen een natuurstenen bekleding. Grote delen van deze dijken maken onderdeel uit van de op handen zijnde dijkversterking.

Eem (Eemdijk, Eemlandse Dijk, Slaagse Dijk, Grebbeliniedijk)

De dijk aan de oostzijde van de Eem is aangelegd tegen overstroming vanuit de Zuiderzee en hoogwater op de Eem. De dijk is groen en kronkelig en langs de dijk zijn talrijke waaien aanwezig. Over een groot deel van de dijk loopt een doorgaande weg die afwisselend op de dijk en naast de dijk ligt. De dijk is daardoor goed beleefbaar. Grote delen van deze dijken maken onderdeel uit van de op handen zijnde dijkversterking. De totale lengte van de dijken langs de Eem is circa 18,0 km.

Nederrijn (Grebbedijk)

Het tracé van de Grebbedijk loopt van Wageningen naar Rhenen en maakt deel uit van de rechter Rijnbanddijk langs de Nederrijn. De dijk heeft een lengte van 5,4 km en sluit in het oosten aan op de hoge gronden van het stuwwallencomplex van de Veluwe. In het westen sluit de Grebbedijk aan op de hoge gronden van de Utrechtse Heuvelrug bij de Grebbeberg. In 1997 is de Grebbedijk voor het laatst versterkt.

2.1.7 Beheerder

De primaire waterkeringen van dijkkringgebied 45 zijn in beheer bij waterschap Vallei en Eem. Bij wet is geregeld dat de provincies (Gedeputeerde Staten) de toezicht-houders zijn op alle primaire waterkeringen binnen de provinciegrenzen. De primaire waterkeringen van dijkkringgebied 45 liggen zowel in de provincie Gelderland als de provincie Utrecht. In het Bestuursakkoord Water is afgesproken dat het ministerie van Infrastructuur en Milieu deze rol gaat overnemen van de provincies. Op dit moment wordt naar de geest van het Bestuursakkoord Water gehandeld.

Waterschap Vallei en Eem fuseert per 1 januari 2013 met Waterschap Veluwe. Vanaf die datum gaan beide waterschappen samen verder onder de naam Waterschap Vallei en Veluwe.

2.2 Recente geschiedenis: bedreigingen en versterkingen

2.2.1 Overstromingsrampen

De Gelderse Vallei is eeuwenlang het toneel van overstromingen geweest. Dit lag met name aan de combinatie van een gebrekkige waterafvoer, overstromingen vanuit de toenmalige Zuiderzee en een onbetrouwbare Grebbedijk.

Overstromingen vanuit de Nederrijn (Grebbedijk)

De bekendste dijkdoorbraken van dijkkring 45 zijn opgenomen in Tabel 5. De drassige ondergrond, kruierend ijs, alsmede de geringe hoogte van de bochtige dijk waren er meestal de oorzaak van dat de dijk doorbrak [ref. 8].

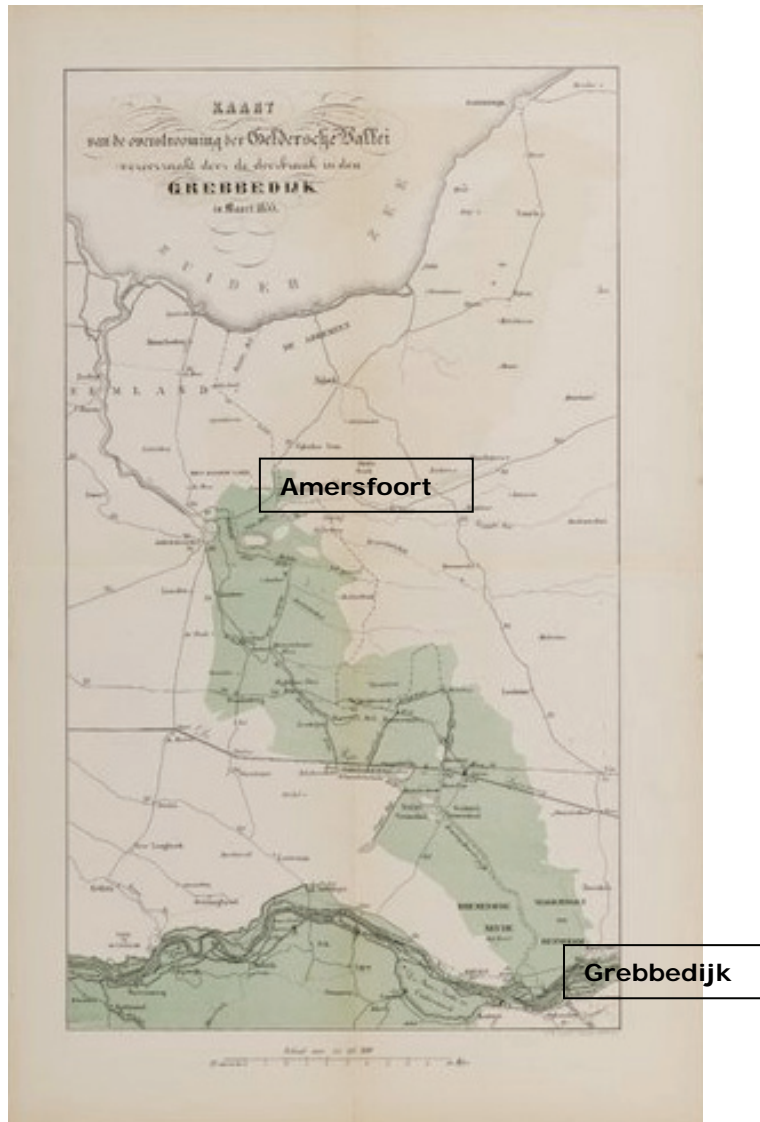
Jaar	Datum	Getroffen gebied / kenmerken overstroming
1595		Bij deze doorbraak stroomde het water van de Rijn 'met zulk een kracht door de vallei naar Amersfoort, dat het wachthuis en de brug aan de Slijkpoort aldaar instortten. Het water bereikte binnen de stad een hoogte van negen voet'.
1599, 1602, 1643 en 1651		Na de doorbraak van 1595 werd de Grebbedijk bij Rhenen verzaamd. Desondanks overstroomde het gebied weer diverse malen. Naar aanleiding van de overstroming van 1651 besloot het Sticht uiteindelijk om de Slaperdijk aan te leggen, om te voorkomen dat haar grondgebied zou overstromen.
1682 en 1711	24 februari 1711	In 1682 en op 24 februari 1711 bezweek de Grebbedijk opnieuw, waarbij bleek dat het water om de Slaperdijk heen kon stromen.
1855	5 maart	Op 5 maart 1855 brak de Grebbedijk door op ongeveer dezelfde plaats als in 1711, namelijk recht tegenover Opheusden. Vooral Veenendaal werd zwaar getroffen en vrijwel geheel verwoest. Het stadje stond zeven weken onderwater.

Tabel 5: Overstromingen vanuit de Nederrijn (Grebbedijk).

Na de doorbraak in 1651 is in 1652 gestart met de aanleg van de Slaperdijk tussen Veenendaal en Renswoude. Hierdoor werd de Vallei in twee delen opgesplitst. De functie van de Slaperdijk was om o.a. Amersfoort te beschermen tegen een overstroming vanuit de Nederrijn bij een eventuele doorbraak van de Grebbedijk.

De doorbraak van 1855 is de laatste doorbraak van de Grebbedijk (Figuur 14). Deze overtrof in haar omvang de meeste van haar voorgangsters. De winter van 1854/55 duurde lang en was buitengewoon streng; er was bovendien veel sneeuw gevallen. Toen de dooi inviel, ontstond op de Nederlandse rivieren zware ijsgang. Op 5 maart brak de Grebbedijk door, ongeveer op dezelfde plaats als in 1711, recht tegenover

Opheusden. Door de grote hoeveelheid water en de ijsschotsen, die het gat passeerden, kreeg de doorbraak geleidelijk aan een lengte van ongeveer 150 m. Vooral Veenendaal werd zwaar getroffen en vrijwel geheel verwoest. Het stadje stond zeven weken onder water. Na deze catastrofe is de Grebbedijk tot ruim 12 m boven NAP verhoogd. Sindsdien is hij niet meer overgelopen en kwamen er geen doorbraken meer voor.



Figuur 14: Overzichtskaart van het gebied in de Gelderse Vallei, dat is ondergelopen na de doorbraak van de Grebbedijk op 5 maart 1855 [ref. 10].

Overstromingen vanuit de Eem en randmeren

De Eem is altijd een open rivier geweest, zodat het water van de Zuiderzee ongehinderd via deze stroom het Sticht kon binnendringen. Ter bescherming van het aangrenzende gebied werden dijken langs de Eem gelegd: aan de linkeroever het Veldijkje, de Veendijk en de Wakkere Dijk (Dijkkring 46, Eempolder); aan de rechteroever de Bunschoter Veen- en Veldendijk, de Eemlandsche Dijk, de Grootte Slaagsche Dijk en de Kleine Slaagsche Dijk, die tot Amersfoort reikt. Aangezien de voornoemde dijken slechts een geringe hoogte hadden, werden zij dikwijls overspoeld en ook doorbraken kwamen veelvuldig voor (Tabel 6).

Jaar	Datum	Getroffen gebied / kenmerken overstroming
1775	14 en 15 november	Een stormvloed veroorzaakte een overstroming langs de Eem. Het opgestuwde water van de Zuiderzee reikte tot Amersfoort.
1877	30 en 31 januari	De stormvloed sloeg 17 gaten met een totale lengte van 236 m in de oostelijke Eemdijk, zodat het gehele waterschap Beoosten de Eem overstroomde. De gronden ten westen van de Eem werden tot de Wakkeren Dijk geïnundeerd. Ook het gebied ten oosten van Soest en Soestdijk kwam blank te staan.
1881	14 en 15 oktober	Het water stroomde van de Zuiderzee over de Eemdijken. Dezelfde gebieden, genoemd bij de vloed van 1877, liepen toen onder.
1883	12 en 13 december	Door de stormvloed ontstond in de oostelijke Eemdijk, ter hoogte van de Bikkersvaart, een gat van 20 m lengte. Behalve de in 1881 geïnundeerde gebieden, stonden toen ook de laaggelegen landen tussen Baarn en Amersfoort blank.
1889	9 februari	Bij deze stormvloed werd de Eemstreek overstroomd. Doorbraken deden zich niet voor.
1894	22 en 23 december	Bij deze stormvloed werd de Eemstreek opnieuw overstroomd. Doorbraken deden zich niet voor.
1906	12 en 13 maart	Een storm op de Zuiderzee stuwde het water op de Eem op, zodat de westelijke Eemdijk overliep en het waterschap Eemnes tot de Wakkere Dijk onder water kwam te staan. Ook de zuidwestelijke gronden langs de Eem stonden blank. De laaggelegen gebieden aan weerszijden van de Luntersche Beek, Barneveldsche Beek en Modderbeek kregen wateroverlast.
1911	30 september en 1 oktober	Bij deze stormvloed kwam langs de Eem het noordwestelijke gebied van het waterschap Eemnes blank te staan.
1916	13 op 14 januari	In dit jaar vond de laatste grote watersnood in Eemland plaats. Die januari maand was erg stormachtig, waardoor veel water uit de Noordzee richting de Wadden werd gestuwd. Vervolgens stroomde het de Zuiderzee in. Een ongunstige wind stuwde het nog verder omhoog, waardoor in de nacht van 13 op 14 januari de dijken op vele plaatsen doorbraken. De golven waren meer dan drie meter hoog. Eemnes, Baarn, Hoogland en ook Amersfoort kwamen voor een deel onder water te staan. Bunschoten was geheel overstroomd.

Tabel 6: Overstromingen vanuit de Eem en randmeren [ref. 8].

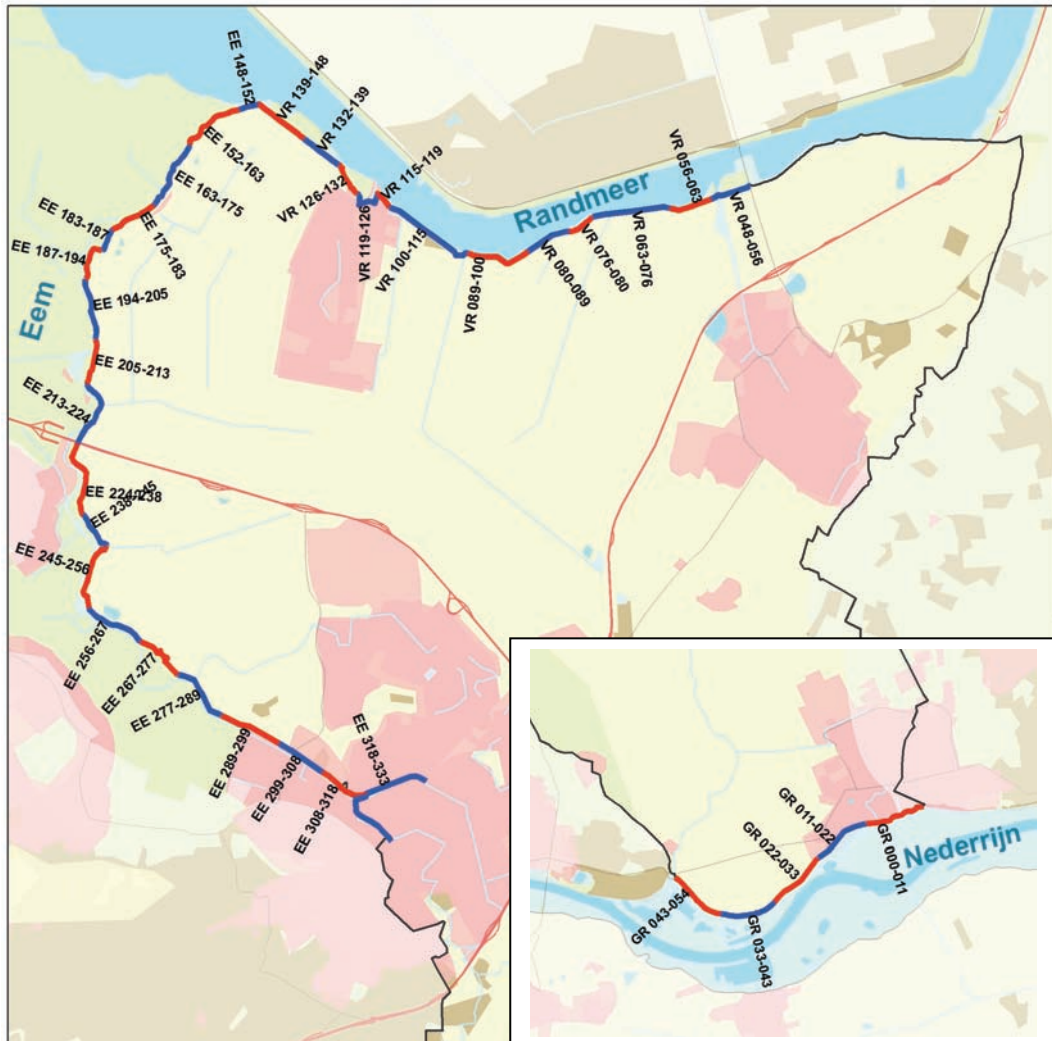
2.2.2 Versterkingen

De Grebbedijk is in 1997 voor het laatst versterkt. Aanvankelijk was het de bedoeling van het Rijk om de dijk voor 2015 opnieuw te versterken om een grotere rivierafvoer mogelijk te maken. Uit onderzoek is gebleken dat dat niet nodig is. Ook als de dijk de komende 50 jaar 10 centimeter inklinkt, voldoet die nog steeds aan de afvoernorm voor 2065. De normen zijn gebaseerd op waterstanden met een overschrijdingsfrequentie van 1/1.250 per jaar. Dat betekent overigens niet dat er nooit problemen met de dijk kunnen ontstaan. Wel voldoet de dijk aan de huidige veiligheidsnormen.

Uit de tweede toetsronde van de waterkering langs de Eem en randmeren bleek dat de waterkering in delen van het studiegebied niet voldeed aan de wettelijke eisen. Op basis hiervan is de planstudie voor de verbetering van de waterkering langs de Zuidelijke randmeren en de Eem in 2006 opgestart. Deze waterkering voldoet vooral niet op stabiliteit (binnen- en/of buitenwaarts) en piping (optreden van zandmeevoerende wellen). Ook de hoogte van de dijken is op veel plekken langs vooral de Eem ontoereikend. Uit de derde toetsronde blijkt dat ook diverse waterkerende kunstwerken niet voldoen aan de eisen. De werkzaamheden voor de versterking van de waterkering zijn gepland in de periode 2012-2015. In deze studie is het definitieve ontwerp van de dijkversterking meegenomen in de beoordeling.

2.3 Vakindeling categorie a-kering

Ten behoeve van de faalkansberekeningen is de waterkering van dijkkringgebied 45 onderverdeeld in dijkvakken. Een dijkvak is een deel van een waterkering waarvoor de sterkte-eigenschappen en belastingen nagenoeg homogeen zijn. Per vak zijn voor de verschillende faalmechanismen faalkansen berekend. Een overzicht van de onderverdeling van dijkkring 45 in dijk- en duinvakken is gegeven in Figuur 15. Een compleet overzicht van de vakgrenzen, locatieaanduidingen en bijbehorende ringdelen is opgenomen in Bijlage C.



Figuur 15: Overzicht gedefinieerde dijkvakken voor dijkkring 45.

Voor de indeling van de dijken van dijkkring 45 in vakken is uitgegaan van harde grenzen en zachte grenzen. De harde grenzen zijn grenzen die van buitenaf zijn opgelegd, dat wil zeggen volgend uit keuzes eerder gemaakt door waterschap, provincie en/of projectbureau, deels buitenom het project VNK2. De indeling op basis van zachte grenzen volgt uit de interpretatie van de beschikbare gegevens van de dijken van dijkkring 45 door de opdrachtnemer in het kader van het project VNK2 [ref. 2]. Bij het onderverdelen in dijkvakken en de schematisatie van de dijken is de situatie na het gereedkomen van de dijkversterking van de Eem- en randmeerdijken in 2015 als uitgangspunt genomen. De belangrijkste criteria op basis waarvan de vakindeling tot stand is gekomen zijn de volgende:

Harde grenzen

Ringdeelgrenzen zoals vastgesteld door de provincie in het kader van de overstromingssommen;
Bodemdeelgebiedgrenzen zoals vastgesteld door TNO/Deltares bij het definiëren van de ondergrondschematisaties (DINO-database);
Wijziging belastingsysteem (Nederrijn/Eem/Zuidelijke Randmeren);
Segmentgrenzen zoals deze volgen uit PC-Vink.

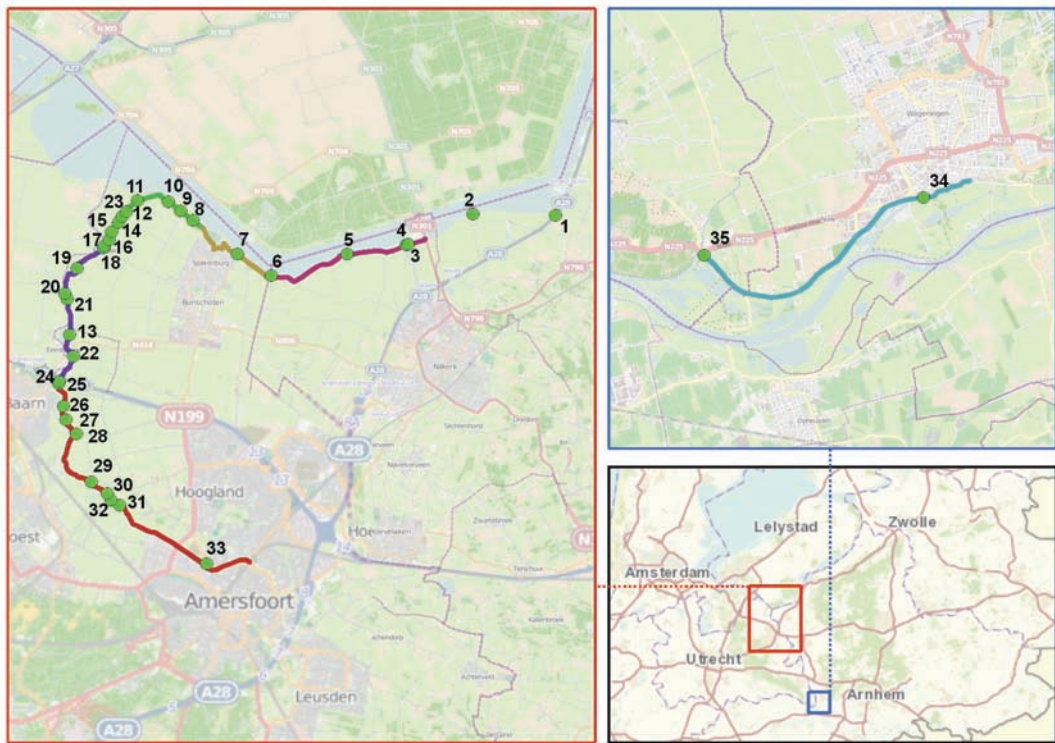
Zachte grenzen

Wijziging van de oriëntatie van de dijk (o.a. veranderende wind- en golfbelastingen);
Dijkvakken zoals gehanteerd door de beheerder (hangt samen met ontwerp- en/of toetsvakken);
Wijziging in toetsresultaat: voor dijkkring 45 is alleen geknipt op het toetsresultaat van het faalmechanisme *opbarsten en piping*. De toetsresultaten van de overige faalmechanismen zijn dusdanig dat deze geen aanleiding geven tot het definiëren van extra vakken of de data is dusdanig variabel dat het definiëren van extra vakken leidt tot veel kleine vakken;
Wijzigingen in de maatregelen die in het dijkversterkingsplan van de Eem- en randmeerdijken worden uitgevoerd;
Wijziging in geometrie van de dijk.

2.4 Kunstwerken

In de primaire waterkering van dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei bevinden zich 35 waterkerende kunstwerken. Van 28 kunstwerken is op basis van de beschikbare informatie geconcludeerd dat de faalkansbijdrage naar verwachting verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de overige faalkansen. Hierbij is ook rekening gehouden met de situatie van de kunstwerken na het gereedkomen van de dijkversterking. In dit project wordt voorzien in de aanpassing en/of de verwijdering van kunstwerken die niet voldoen aan de eisen uit de derde toetsronde.

Voor zeven kunstwerken is een faalkansanalyse uitgevoerd in PC-Ring. In Figuur 16 zijn de kunstwerken in de dijkkring weergegeven, waarbij ook de ringdelen zichtbaar zijn. In Tabel 7 zijn de namen van de kunstwerken gegeven en de reden waarom er geen faalkansanalyse is uitgevoerd. Voor meer details en achtergrondinformatie over de resultaten van de berekeningen voor kunstwerken wordt verwezen naar Bijlage C, het overall kunstwerkenrapport [ref. 3] en de losse kunstwerkrapportages [ref. 19] t/m [ref. 27].



Figuur 16: Ligging kunstwerken in de dijkkring.

Nr.	Kunstwerk naam en type	VNK nummer	Reden geen nadere faalkans analyse
1	Inlaatduiker nabij A28	VNK.45.03.001	Ligt in categorie C kering
2	Puttergemaal	VNK.45.02.001	Ligt in categorie C kering
3	Inlaatsluis nabij Arkersluis	VNK.45.03.002	Verwachte faalkansbijdrage zeer klein
4	Arkersluis	VNK.45.06.001	
5	Wielse Sluis	VNK.45.08.002	Keermiddelen worden vervangen in DVP 2012-2015
6	Laakse Duiker	VNK.45.08.003	Keermiddelen worden vervangen in DVP 2012-2015
7	Gemaal Veendijk	VNK.45.02.002	
8	Duiker Westdijk (W0)	VNK.45.08.005	Oppervlak < 0,20 m2, verwijderd in DVP 2012-2015
9	Duiker Westdijk (W1)	VNK.45.08.006	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
10	Gemaal Westdijk	VNK.45.02.003	
11	Coupure Malenstein	VNK.45.01.001	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
12	Coupure Vedder	VNK.45.01.003	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
13	Duiker Eemdijk (V4)	VNK.45.08.008	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
14	Coupure Weverling	VNK.45.01.004	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
15	Coupure Maatweg	VNK.45.01.005	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
16	Coupure Fam. Jaquet	VNK.45.01.007	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
17	Coupure Varenkamp	VNK.45.01.008	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
18	Coupure Pontveer	VNK.45.01.009	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
19	Duiker Eemdijk (E6)	VNK.45.08.009	Diameter < 500 mm
20	Duiker Eemdijk (E9)	VNK.45.08.010	Diameter < 500 mm
21	Duiker Eemdijk (E9,5)	VNK.45.08.011	Diameter < 500 mm
22	Gemaal de Haar	VNK.45.02.004	
23	Duiker Eemdijk (E14)	VNK.45.08.013	Diameter < 500 mm
24	Coupure Born	VNK.45.01.011	Verwachte faalkansbijdrage zeer klein
25	Coupure Arends	VNK.45.01.012	Verwachte faalkansbijdrage zeer klein
26	Duiker Zuidereind (Z2)	VNK.45.08.014	Diameter < 500 mm
27	Duiker Zuidereind (Z3)	VNK.45.08.015	Diameter < 500 mm
28	Gemaal Zeldert	VNK.45.02.005	
29	Duiker Slaagse Dijk (S2)	VNK.45.08.018	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
30	Coupure van den Hengel	VNK.45.01.013	Aangepast in dijkverbeteringsprogramma 2012-2015
31	Duiker Slaagse Dijk 2	VNK.45.08.017	Diameter < 500 mm
32	Gemaal Malesluis	VNK.45.02.006	Verwachte faalkansbijdrage zeer klein
33	Gemaal de Schans	VNK.45.02.007	Ligt ver achter de waterkeringlijn
34	Witte Sluis	VNK.45.08.020	
35	Grebbe sluis	VNK.45.03.008	

Tabel 7: Kunstwerken in dijkkring 45.

3 Overstromingskans

Dit hoofdstuk beschrijft de wijze waarop de overstromingskans is berekend en toont de resultaten van de uitgevoerde berekeningen.

3.1 Aanpak en uitgangspunten

De berekeningen van de overstromingskans van het dijkkringgebied en de faalkansen van de dijkvakken en kunstwerken zijn uitgevoerd met behulp van het programma PC-Ring [ref. 11 - ref. 13]. De faalkansen voor het faalmechanisme *macrostabiliteit binnenwaarts* zijn met behulp van aparte procedures buiten PC-Ring berekend. De voor dit faalmechanisme berekende faalkansen hebben wel weer als invoer gediend voor PC-Ring bij het berekenen van de overstromingskans van het dijkkringgebied.

De betreffende belastingmodellen zijn afgestemd op de 'thermometerwaarden' van 2006 (TMR2006). In deze waarden zijn de gegevens en inzichten tot en met 2006 verwerkt.

Ten behoeve van de berekening van de faalkans is eerst per dijkvak vastgesteld welke faalmechanismen op welke locaties relevant zijn. Daarbij is gebruik gemaakt van de resultaten en onderliggende gegevens uit de tweede en derde toetsronde en het oordeel van de beheerder. Per faalmechanisme is per vak een schematisatie van de waterkering opgesteld (bepaling hoogte, intree- en uittreepunt, gemiddelden, spreidingen, enz.).

In VNK2 wordt als richtlijn gehanteerd dat alle geplande verbeteringswerken, waarvan het bestek gereed is, worden meegenomen zoals in het bestek is beschreven. Indien de verbeteringswerken zich nog in een eerder stadium bevinden worden deze in principe niet meegenomen. Voor dijkkring 45 geldt dat het dijkversterkingsprogramma Veiligheid Zuidelijke Randmeren en Eem [ref. 14] is meegenomen in de schematisatie van de Eem- en randmeerdijken. De uitvoering van de dijkversterking staat gepland voor de periode 2012-2015.

Op vakniveau zijn, indien relevant, gevoeligheidsanalyses uitgevoerd om een beeld te krijgen van de invloeden van alternatieve schematisaties. Voor een uitgebreide toelichting op de vakindeling, de selectie van faalmechanismen en de opgestelde schematisaties per faalmechanisme en per vak en per kunstwerk, wordt verwezen naar het achtergrondrapport [ref. 2] en het overall kunstwerkenrapport [ref. 3].

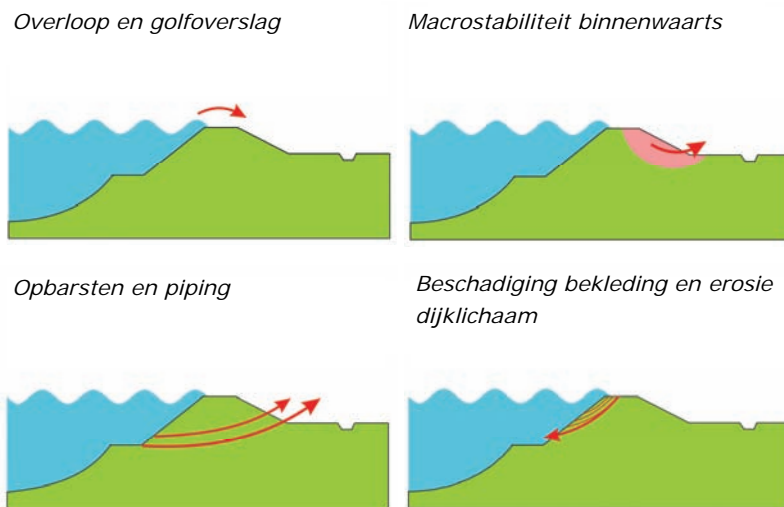
In het noorden bestaat de waterkering uit een categorie a-kering van circa 28,3 km langs de Eem en de randmeren tot aan de Nijkerkersluis. De Nijkerkersluis is een verbindende waterkering (categorie b-kering) die het Nijkerkernauw scheidt van het Veluwemeer. Ten oosten van de Nijkerkersluis wordt het dijkkringgebied beschermd door een categorie c-kering: de Putterzeedijk met een lengte van circa 4,8 km. De Putterzeedijk, inclusief de twee waterkerende kunstwerken, is niet meegenomen in de risicoanalyse. Verwacht wordt dat door het niet beschouwen van de categorie c-kering geen relevante onderschatting van de overstromingskans en het overstromingsrisico ontstaat.

3.2 Beschouwde faalmechanismen

3.2.1 Faalmechanismen dijken

Bij de bepaling van de faalkans van de dijken zijn de volgende faalmechanismen beschouwd (zie Figuur 17):

- Overloop en golfoverslag;*
- Macrostabilliteit binnenwaarts;*
- Opbarsten en piping;*
- Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam.*



Figuur 17: Beschouwde faalmechanismen dijken.

Overloop en golfoverslag

Bij dit faalmechanisme bezwijkt de dijk doordat grote hoeveelheden water over de dijk stromen als gevolg van *overloop of golfoverslag*. Bij afluende wind of bij kleine golfhogten wordt het bezwijken beschreven door het faalmechanisme *overloop*. In andere gevallen door het faalmechanisme *golfoverslag*.

Macrostabilliteit binnenwaarts

Bij dit faalmechanisme bezwijkt de dijk doordat een deel van de dijk ten gevolge van langdurig hoge waterstanden instabiel wordt en daarna aan de binnenzijde afschuift of opdrijft.

Opbarsten en piping

Bij dit faalmechanisme bezwijkt de dijk doordat het zand onder de dijk wordt weggespoeld. Door de druk van het water zal eerst, indien aanwezig, de afsluitende laag opbarsten. Vervolgens kunnen zogenaamde 'pipes' ontstaan waardoor het zand wegspoelt en de dijk bezwijkt.

Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam

Bij dit faalmechanisme bezwijkt de dijk doordat eerst de bekleding wordt beschadigd door golfaanval, waarna de grootte van de doorsnede van de dijk kern door erosie wordt verminderd en de dijk bezwijkt.

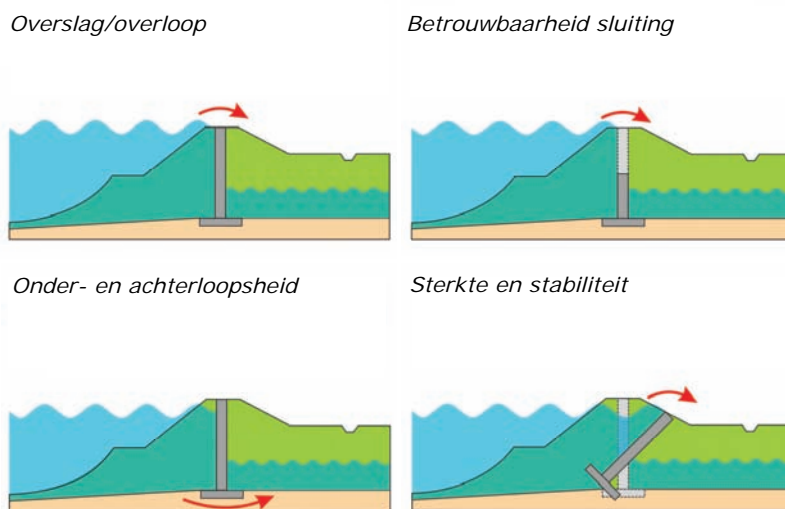
De faalmechanismen zettingsvloeiing, afschuiven voorland, afschuiven buitentalud, micro-instabiliteit en verweking worden binnen VNK2 niet in de berekening meegenomen. Wel is op basis van de resultaten van de derde toetsronde en het

oordeel van de beheerder een inschatting gemaakt van de bijdrage van deze faalmechanismen aan de overstromingskans van de dijkkring (paragraaf 3.3).

3.2.2 Faalmechanismen kunstwerken

Voor de bepaling van de faalkans van een kunstwerk wordt rekening gehouden met de volgende faalmechanismen (zie Figuur 18):

- Overslag/overloop;*
- Betrouwbaarheid sluiting;*
- Onder- en achterloopsheid;*
- Sterkte en stabiliteit.*



Figuur 18: Beschouwde faalmechanismen kunstwerken.

Overslag/overloop

Bij dit faalmechanisme vindt falen plaats op het moment dat het overslaand en/of overlopend debiet groter is dan toelaatbaar. Het toelaatbare debiet wordt hierbij bepaald door de sterkte van de bodembescherming (erosie en ontgroning) dan wel het kombergend vermogen. Daarbij geldt dat komberging alleen wordt meegenomen als een tekort aan komberging leidt tot het bezwijken van de achterliggende kaden, het 'leeglopen' van de kom en het vervolgens bezwijken van het kunstwerk als gevolg van het grote debiet ten gevolge van het ontstane grote verval, wat leidt tot erosie en ontgroning.

Betrouwbaarheid sluiting

Falen ten gevolge van *betrouwbaarheid sluiting* treedt op als het kunstwerk niet gesloten is en het instromende debiet door het geopende kunstwerk groter is dan het toelaatbare debiet. Het toelaatbare debiet wordt hierbij bepaald door de sterkte van de bodembescherming (erosie en ontgroning) dan wel het kombergend vermogen. Daarbij geldt dat komberging alleen wordt meegenomen als een tekort aan komberging leidt tot het bezwijken van de achterliggende kaden, waardoor substantiële hoeveelheden water het achterland in stromen en significante gevolgen optreden. Het meenemen van de komberging vergt een terdege afweging of de gevolgen vergelijkbaar zijn met de gevolgen van het ontstaan van een daadwerkelijke bres in de primaire kering.

Onder- en achterloopsheid

Onder- en achterloopsheid leidt tot falen indien er als gevolg van de kwelstroom langs of onder het object zand wordt meegevoerd en vervolgens naar het maaiveld wordt

afgevoerd. Op deze wijze kan ondergraving van het kunstwerk ontstaan. De modellering van dit faalmechanisme vindt plaats met behulp van het model Bligh (alleen horizontale kwelwegen) en het model Lane (zowel horizontale als verticale kwelwegen). Het uitgangspunt is dat wanneer *onder- en achterloopsheid* optreedt gedurende langdurige perioden het kunstwerk zal bezwijken.

Sterkte en stabiliteit

Het faalmechanisme *sterkte en stabiliteit* treedt op indien de sterkte van het kunstwerk niet toereikend is om de vervalbelastingen over het kunstwerk, dan wel de aanvaarbepalingen door schepen te kunnen opnemen. Het faalmechanisme kent een drietal mogelijke faalmodi:

- Bezwijken van waterkerende onderdelen (bv keermiddelen) van het kunstwerk als gevolg van de vervalbelasting;
- Bezwijken van het gehele kunstwerk (stabiliteitsverlies) als gevolg van de vervalbelasting;
- Bezwijken van keermiddelen als gevolg van aanvaren, waardoor de situatie van een niet gesloten kunstwerk ontstaat. Deze faalmodus treedt in principe alleen bij schutsluizen op.

Beoordelingsmethode

Voor een aantal typen kunstwerken is binnen het project VNK2 een methode ontwikkeld om faalkansen te berekenen. Het gaat om de volgende typen kunstwerken: schutsluizen, keersluizen, in- en uitwateringssluizen, coupures, tunnels en gemalen. Leidingen met een directe verbinding met het buitenwater (bijvoorbeeld effluentleidingen) worden hierbij beschouwd als uitwateringssluizen.

De systematiek van VNK2 ten aanzien van de kunstwerken is grotendeels afgeleid van de bestaande vigerende leidraden zoals de Leidraad Kunstwerken. Binnen deze huidige systematiek van kunstwerken zijn een drietal wijzen van falen mogelijk. Dit zijn:

1. Overschrijding van het toelaatbare volume aan instromend water over een gesloten kunstwerk (faalmechanisme *overslag/overloop*).
2. Overschrijding van het toelaatbare volume aan instromend water via een geopend kunstwerk (faalmechanisme *betrouwbaarheid sluiting*).
3. Bezwijken van het kunstwerk (faalmechanismen *onder- en achterloopsheid* en *sterkte en stabiliteit*).

Falen wordt hierbij binnen VNK2 gedefinieerd als het instromen van dusdanig veel water dat er gesproken kan worden van een bres in de primaire waterkering. De gevolgen die hierbij horen zijn dus substantieel. Het optreden van lokaal wateroverlast behoort hier niet toe.

In principe geldt voor de eerste 2 bovenstaande faalwijzen, dat bij het optreden van het primaire faalproces (*overslag/overloop* of het niet gesloten zijn van het kunstwerk) er nog niet direct sprake is van falen van het kunstwerk. Daarvoor is het ook nog nodig dat of de bodembescherming aan de binnenzijde fors erodeert en er ontgrondingskuilen ontstaan, of het kombergend vermogen niet toereikend is, waardoor achterliggende keringen bezwijken en dit tot substantiële gevolgen in het achterland leidt.

Voor de derde faalwijze geldt dat in principe het optreden van het primaire faalproces (optreden van *onder- en achterloopsheid* en het bezwijken van onderdelen van het kunstwerk) leidt tot het geheel bezwijken van het kunstwerk en daarmee het ontstaan van een bres.

Het optreden van een bres en vervolgens bresgroei is bij kunstwerken niet zo vanzelfsprekend als bij de dijken. Daarom wordt per situatie bekeken of daadwerkelijk een bres kan optreden of dat de gevolgen dusdanig groot zijn dat er gesproken kan worden van een bres.

3.3 Niet beschouwde faalmechanismen

Niet alle faalmechanismen kunnen met het VNK2-instrumentarium worden doorgerekend. De faalmechanismen zettingsvloeiing, afschuiven voorland, afschuiven buitentalud, micro-instabiliteit en verweking, worden binnen VNK2 niet meegenomen.

De redenen hiervoor zijn divers en houden verband met de volgende zaken:

- Voor sommige mechanismen is er nog een kennistekort of zijn de gegevens onvoldoende beschikbaar;

- Niet alle mechanismen leiden direct tot bezwijken;

- Mechanismen hebben een sterk tijdsafhankelijk karakter waardoor de modellering met het VNK-instrumentarium niet mogelijk is of tot onvoldoende betrouwbare antwoorden zal leiden;

- Verondersteld wordt dat deze faalmechanismen van ondergeschikt belang zijn ten opzichte van de faalmechanismen die in de risicoanalyse zijn meegenomen.

De effecten van de onderstaande faalmechanismen op de faalkans van dijkkring 45 worden in deze paragraaf kwalitatief beschouwd:

Microstabiliteit

Tijdens de tweede toetsronde is voor de Eem- en randmeerdijken op de onderzochte trajecten de score 'goed' toegekend voor microstabiliteit binnenwaarts. In de tweede toetsronde heeft de Grebbedijk over het gehele traject de score 'goed' gekregen op basis van een geavanceerde toetsing in 1999. Aangezien in de tussenliggende periode geen wijzigingen zijn opgetreden die voor de microstabiliteit een ongunstige verandering tot gevolg hebben, zijn de resultaten van de tweede toetsronde overgenomen in de derde toetsronde [ref. 15]. Op basis hiervan is geconcludeerd dat het faalmechanisme microstabiliteit geen significante bijdrage levert aan de overstromingskans en het overstromingsrisico voor dijkkringgebied 45.

Macrostabiliteit buitenwaarts

De Eem- en randmeerdijken zijn in de tweede toetsronde voor een groot deel afgekeurd op macrostabiliteit buitenwaarts. In het dijkversterkingsplan [ref. 14] worden deze problemen opgelost. De trajecten die niet worden verbeterd scoren minimaal 'voldoende' op het deelspoor Stabiliteit buitenwaarts. Op basis van de resultaten van de eenvoudige en de gedetailleerde toets heeft de Grebbedijk in zijn geheel de score 'goed' gekregen [ref. 15].

Naast de relatief kleine faalkans voor stabiliteit buitenwaarts is ook van belang dat stabiliteitsproblemen buitenwaarts optreden bij een vallende waterstand. Het falen van een dijk zal daardoor meer een beheerssituatie zijn dan een acuut gevaar voor overstrooming. Het gevaar voor overstrooming zit vooral in de kans op een tweede hoogwater nadat er een buitenwaartse afschuiving heeft plaats gevonden zonder dat de dijk hersteld kon worden. Het niet beschouwen van het faalmechanisme macrostabiliteit buitenwaarts levert, op basis van het bovenstaande, geen significante onderschatting van de overstromingskans en het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45.

Stabiliteit voorland

In de tweede toetsronde is voor de onderzochte trajecten de score 'goed' of 'voldoende' toegekend voor de beoordeling op afschuiven en zettingsvloeiing van het voorland. De resultaten van de tweede toetsronde zijn overgenomen in de derde toetsronde [ref. 15]. Voor de Grebbedijk krijgen bijna alle beschouwde profielen de score 'goed', op één profiel na dat de score 'voldoende' krijgt in de derde toetsronde. Het buitentalud van dit profiel is niet flauw genoeg.

Het niet meenemen van de stabiliteit van het voorland in de faalkansanalyse binnen het project VNK2 levert voor dijkkring 45 geen significantie onderschatting van de faalkans en daarmee het overstromingsrisico. Ook voor het mechanisme stabiliteit voorland geldt dat dit mechanisme optreedt bij een vallende waterstand. Hierdoor zit het gevaar voor een overstroming vooral in een tweede hoogwater kort na het ontstaan van instabiliteit in het voorland zonder dat de waterkering hersteld kon worden.

Niet-waterkerende objecten

De bomen, bebouwing en het merendeel van de kabels en leidingen leveren geen significante bijdrage aan de faalkans van dijkkring 45. Het niet meenemen van deze onderdelen binnen het project VNK2 leidt dan ook niet tot een onderschatting van het overstromingsrisico. De twee hoge druk gasleidingen die niet zijn beoordeeld in de derde toetsronde zullen waarschijnlijk ook geen bijdrage aan de faalkans leveren. Echter dit kan vanwege het niet beschikbaar zijn van informatie niet gestaafd worden.

3.4 Berekende overstromingskansen

VNK2 geeft een beeld van de overstromingskansen voor een dijkkringgebied. De veiligheidsbenadering in VNK2 is daarmee anders dan die in de toetsing in het kader van de Waterwet. In de toetsing wordt beoordeeld of de primaire waterkeringen voldoen aan de wettelijke normen. Deze normen zijn niet gedefinieerd als overstromingskansen, maar als overschrijdingskansen van waterstanden die de waterkeringen veilig moeten kunnen keren, rekening houdend met alle factoren die het waterkerende vermogen beïnvloeden (zie ook paragraaf 1.3).

3.4.1 Overstromingskans en faalkansen per faalmechanisme

De berekende overstromingskans van dijkkringgebied 45 is 1/100 per jaar. Deze overstromingskans is de kans dat er ergens in de categorie a-kering van de dijkkring een doorbraak plaatsvindt. Deze overstromingskans is onder te verdelen in een overstromingskans vanuit de Eem en randmeren van 1/470 per jaar en een overstromingskans van 1/130 per jaar vanuit de Nederrijn. In Tabel 8 zijn de faalkansen (kans per jaar) voor de verschillende faalmechanismen weergegeven.

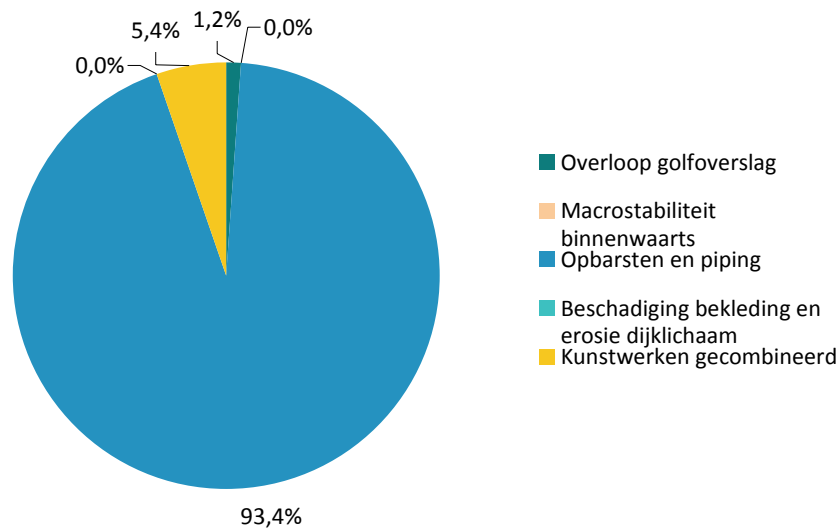
Type waterkering	Faalmechanisme	Faalkans per jaar
Dijken	Overloop en golfoverslag	1/8.200
	Macrostabiliteit binnenwaarts	<1/1.000.000
	Opbarsten en piping	1/110
	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	1/210.000
Kunstwerken	Overloop/overslag	1/160.000
	Betrouwbaarheid sluiting	<1/1.000.000
	Onder- en achterloopsheid	1/1.900
	Sterkte en stabiliteit	1/420.000
Overstromingskans		1/100

Tabel 8: Berekende faalkansen (kans per jaar) per faalmechanisme en op ringniveau de overstromingskansen.

Afhankelijk van de breslocatie(s) worden verschillende delen van het dijkkringgebied getroffen. De overstromingskans voor dijkkringgebied 45 wordt gedomineerd door de faalmechanismen *opbarsten en piping* voor dijken en *onder- en achterloopsheid* voor

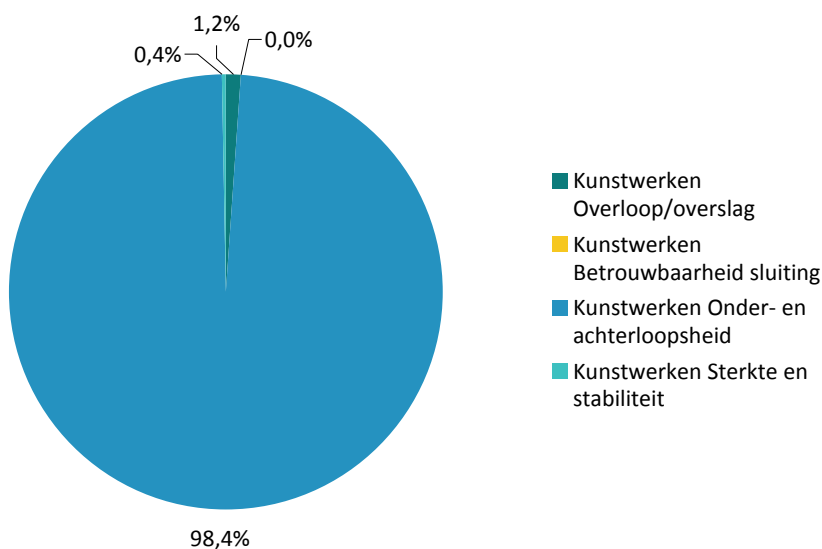
kunstwerken. Het mechanisme *overloop en golfoverslag* draagt in mindere mate bij aan de overstromingskans. Het beeld is in hoofdlijnen consistent met het resultaat van de derde toetsronde en het beeld van de beheerder voor deze dijkkring.

Figuur 19 geeft een overzicht van de procentuele bijdrage van de beschouwde faalmechanismen van dijken en kunstwerken aan de overstromingskans. In deze figuur is de bijdrage van de faalkansen voor de faalmechanismen voor de kunstwerken gecombineerd.



Figuur 19: Procentuele bijdragen van verschillende faalmechanismen.

In Figuur 20 is specifiek voor de kunstwerken een overzicht opgenomen van de procentuele bijdragen van de verschillende faalmechanismen voor de kunstwerken aan de som van de faalkansen per faalmechanisme voor de kunstwerken. De resultaten voor de kunstwerken zijn in een separaat document nader toegelicht [ref. 3].



Figuur 20: Procentuele bijdragen van verschillende faalmechanismen voor kunstwerken aan de som van de faalkansen voor de kunstwerken per mechanisme.

3.4.2 Faalkansen dijken en vergelijking resultaten derde toetsronde

Op basis van de kansbijdragen van de verschillende faalmechanismen zijn per dijkvak en per kunstwerk faalkansen bepaald. Vervolgens zijn de kansbijdragen van de verschillende dijkvakken en kunstwerken gecombineerd tot de overstromingskans van het dijkkringgebied. Bij het combineren van de verschillende kansbijdragen is rekening gehouden met de eventuele afhankelijkheden tussen dijkvakken en kunstwerken. Indien op voorhand kon worden aangegeven dat de faalkans van een faalmechanisme op een bepaalde locatie verwaarloosbaar is, is voor het bewuste vak en faalmechanisme geen faalkans berekend. De resultaten van de faalkansberekeningen voor de dijken zijn weergegeven in Tabel 9.

Vak	Faalkans per jaar				
	Overloop en golfoverslag	Macrostabieliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	Faalkans van dijkvak
VR 048-056	1/120.000	-		<1/1.000.000	1/120.000
VR 056-063	1/140.000	-		-	1/136.000
VR 063-076	1/68.000	-	1/9.500	-	1/8.500
VR 076-080	1/90.000	-		-	1/90.000
VR 080-089	1/160.000	-		-	1/157.000
VR 089-100	1/140.000	-		-	1/135.000
VR 100-115	1/580.000	<1/1.000.000	1/5.100	<1/1.000.000	1/5.100
VR 115-119	1/510.000	-		-	1/510.00
VR 119-126	1/440.000	-		-	1/440.000
VR 126-132	1/87.000	-	<1/1.000.000	<1/1.000.000	1/87.000
VR 132-139	1/150.000	-		-	1/150.000
VR 139-148	1/150.000	-	<1/1.000.000	-	1/150.000
EE 148-152	1/34.000	-		-	1/34.000
EE 152-163	<1/1.000.000	-		<1/1.000.000	<1/1.000.000
EE 163-175	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 175-183	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 183-187	<1/1.000.000	-	<1/1.000.000	-	<1/1.000.000
EE 187-194	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 194-205	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 205-213	<1/1.000.000	-	1/1.800	-	1/1.800
EE 213-224	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 224-238	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 238-245	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 245-256	<1/1.000.000	-	1/8.100	-	1/8.100
EE 256-267	<1/1.000.000	-	<1/1.000.000	<1/1.000.000	<1/1.000.000
EE 267-277	<1/1.000.000	<1/1.000.000	1/21.000	-	1/18.000
EE 277-289	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 289-299	<1/1.000.000	-	1/1.800	-	1/1.800
EE 299-308	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 308-318	<1/1.000.000	-		-	<1/1.000.000
EE 318-333	1/20.000	-		-	1/20.000
GR 000-011	1/26.000	<1/1.000.000	1/6.800	1/220.000	1/5.300

Vak	Faalkans per jaar				
	Overloop en golfoverslag	Macrostabieliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	Faalkans van dijkvak
GR 011-022	1/41.000	-	1/10.000	-	1/8.300
GR 022-033	1/24.000	-	1/510	<1/1.000.000	1/500
GR 033-043	1/36.000	-	1/270	-	1/270
GR 043-054	1/17.000	<1/1.000.000	1/380	-	1/370
Combinatie	1/8.200	<1/1.000.000	1/110	1/210.000	

Deze dijkvakken worden versterkt in de dijkversterking 2012-2015 en zijn niet getoetst in de derde toetsronde. De faalkansen zijn berekend voor de situatie na uitvoering van de dijkversterking.

Dit vak is in de derde toetsronde afgekeurd voor Stabieliteit Bekleding. Vanwege langconstructies in de dijk is dit vak niet beoordeeld voor dit faalmechanisme.

Tabel 9: Berekende faalkansen voor de dijken die deel uitmaken van de categorie a-kering van dijkkring 45.

Overloop en golfoverslag

De berekende faalkansen van de dijkvakken in dijkkring 45 zijn kleiner dan 1/17.000 per jaar. De kleine faalkansen zijn goed verklaarbaar vanuit het feit dat de hoogte van de Eem- en randmeerdijken nog is gebaseerd op belastingen ten tijde van de Zuiderzee. Na de aanleg van de Afsluiddijk en de Flevopolders zijn de hydraulische belastingen aanzienlijk gedaald en hebben de dijken vaak een grote overhoogte.

De maatgevende vakken liggen aan de Grebbedijk. Bij deze dijkvakken is geen grote historische overhoogte aanwezig, ook al is zelfs bij een streng overslagcriterium van 0,1 l/m/s over een groot deel van het traject van de Grebbedijk nog overhoogte aanwezig. De kruinhoogte ligt circa 1 m boven toetspeil waardoor de faalkansen relatief klein zijn. De grootste faalkans voor dijkkring 45 bedraagt 1/17.000 per jaar.

De gecombineerde faalkans voor het faalmechanisme *overloop en golfoverslag* voor de dijkvakken van dijkkring 45 bedraagt 1/8.200 per jaar. In de derde toetsronde voldoen de waterkeringen aan de eisen van de kerende hoogte. In deze studie wordt er vanuit gegaan van de situatie na de versterking van de Eem- en randmeerdijken. De trajecten met een te lage kerende hoogte uit de tweede toetsronde zijn versterkt. De kleine faalkansen komen overeen met de verwachtingen van een pas versterkte dijk. De Grebbedijk is in de derde toetsronde goedgekeurd. De berekende faalkansen komen hiermee overeen.

Opbarsten en piping

Over het algemeen worden voor de Eem- en randmeerdijken relatief kleine faalkansen berekend. Dit is vooral het gevolg van het geringe verval over de dijk bij maatgevende omstandigheden. Daarnaast worden er in het dijkversterkingsproject bredere dijken aangelegd vanwege problemen met macrostabieliteit. Bredere dijken leiden tot langere kwelwegen en dus kleine faalkansen. De kansen zijn kleiner dan 1/1.800 per jaar.

Bij de waterkeringen langs de Nederrijn zijn de faalkansen groter dan bij de waterkeringen langs de Eem en randmeren. Dit wordt veroorzaakt door het hogere verval op de Nederrijn in relatie tot de kwelweglengte. Tijdens de vorige dijkversterking in de jaren 90 zijn de dijken ontworpen met een kwelweglengte van 11,5 maal het verval bij maatgevend hoogwater. Deze creepfactor is gebaseerd op het lokale grondonderzoek en een analyse met de formule van Sellmeyer. De creepfactor kan als zeer klein worden beschouwd. De faalkansen voor *opbarsten en piping* zijn hierdoor relatief groot voor de dijkvakken van de Grebbedijk (van 1/270 tot 1/10.000 per jaar).

De gecombineerde faalkans voor het faalmechanisme opbarsten en piping voor de dijkvakken van dijkkring 45 bedraagt 1/110 per jaar. De faalkansen van de Eem- en randmeerdijken komen overeen met de verwachtingen van een pas versterkte dijk. Voor een tweetal vakken geldt dat de faalkans relatief groot is. Dit komt door de korte kwelweglengte. In de derde toetsronde is de Grebbedijk goedgekeurd voor het mechanisme *opbarsten en piping*. Hierbij is getoetst met een creepfactor van 11,5 op basis van de bij het dijkontwerp uitgevoerde analyse. De grote faalkansen van drie vakken laten een ander beeld zien dan de toetsing. Hierbij wordt echter opgemerkt dat de beheerder de berekende faalkansen als realistisch ziet aangezien er regelmatig zandmeevoerende wellen optreden bij de Grebbedijk. Om de gevoeligheid van de Grebbedijk voor het mechanisme *opbarsten en piping* verder te beoordelen is het waterschap na het optreden van zandmeevoerende wellen bij het hoogwater van januari 2011 een nader onderzoek opgestart. Hierbij wordt onder andere onderzoek gedaan naar de samenstelling van de ondergrond en de stijghoogte van het water.

Macrostabilliteit binnenwaarts

De stabiliteitsproblemen van de huidige waterkeringen langs de Eem en randmeren worden opgelost in het dijkversterkingsprogramma. De berekende faalkansen voor *macrostabilliteit binnenwaarts* van deze versterkte dijken is hierdoor erg klein (<1/1.000.000 per jaar). De faalkansen voor de dijkvakken van de Grebbedijk zijn ook zeer klein voor *macrostabilliteit binnenwaarts*. Deze zijn kleiner dan 1/1.000.000 per jaar.

Het mechanisme *macrostabilliteit binnenwaarts* levert geen significante bijdrage aan de totale overstromingskans van het dijkkringgebied. In de versterking van de Eem- en randmeerdijken worden veelal stabiliteitsproblemen opgelost. De faalkansen komen overeen met de verwachtingen van een pas versterkte dijk. De Grebbedijk voldoet aan de eisen met betrekking tot stabiliteit binnenwaarts uit de derde toetsing. De berekende faalkansen komen hiermee overeen.

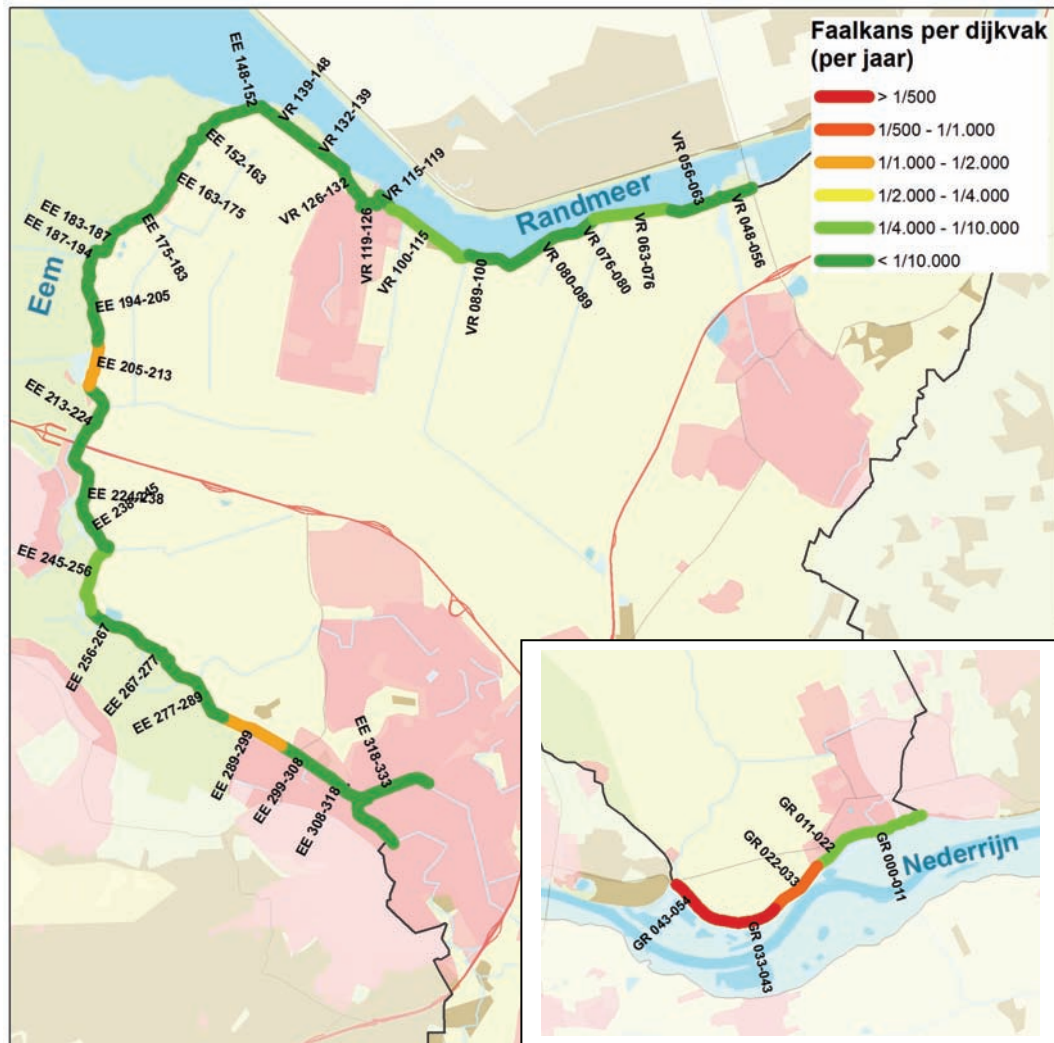
Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam

Voor alle dijkvakken zijn relatief kleine faalkansen berekend (kleiner dan 1/220.000 per jaar). Dit bevestigt het beeld dat dijken met een kleikern (of dijken die in hun geheel uit klei zijn opgebouwd) met dit faalmechanisme nauwelijks bijdragen aan de overstromingskans en het overstromingsrisico. Voor de Grebbedijk zijn de berekende faalkansen over het enigszins groter dan de faalkansen zoals berekend voor de Eem- en randmeerdijken. De geringe kwaliteit van de graszode (kwalificatie slecht) en een matige / slechte kwaliteit klei in de afdeklaag leidt dit tot grotere faalkansen voor de Grebbedijk dan langs de Eem en randmeerdijken.

De grasbekleding voldoet op 300 m na aan de eisen in de derde toetsronde. Deze 300 m bevindt zich op de Grebbedijk. De faalkansen zijn echter erg klein. Dit komt voornamelijk door een verschil tussen de methodieken van de toetsing en VNK2. In de toetsing wordt alleen gekeken naar *beschadiging bekleding* terwijl er in VNK2 ook gekeken wordt naar de *erosie van het dijklichaam* aangezien een beschadigde bekleding niet tot een overstroming hoeft te leiden. Hoewel de grasbekleding van matig tot slechte kwaliteit is wordt toch een kleine faalkans berekend. Doordat de dijken grotendeels zijn opgebouwd uit klei en de golfbelasting relatief klein is, is de deelfaalkans voor *erosie dijklichaam* erg klein. De resultaten uit de toetsing en de berekende faalkansen komen dan in het algemeen ook goed overeen.

3.4.3 *Overzicht faalkansen dijken*

In Figuur 21 is door middel van kleurtinten een overzicht gegeven van de berekende faalkansen voor de dijkvakken.



Figuur 21: Overzicht van de gecombineerde faalkansen per dijkvak.

3.4.4 Faalkansen kunstwerken

De resultaten van de faalkansberekeningen voor de kunstwerken zijn weergegeven in Tabel 10. Indien tijdens de screening bepaald is dat de faalkans van een faalmechanisme voor een bepaald kunstwerk verwaarloosbaar is, is voor het bewuste faalmechanisme geen nadere analyse gedaan en geen faalkans berekend.

Kunstwerk	Faalkans per jaar				
	Overslag/ overloop	Betrouwbaar- heid sluiting	Onder- en achterloopsheid	Sterkte en stabiliteit	Faalkans van kunstwerk
Arkersluis	1/160.000			1/480.000	
Gemaal Veendijk				<1/1.000.000	<1/1.000.000
Gemaal Westdijk			1/1.900		1/1.900
Gemaal de Haar			<1/1.000.000		<1/1.000.000
Gemaal Zeldert			1/850.000		1/850.000
Witte Sluis		<1/1.000.000	<1/1.000.000		<1/1.000.000
Grebbesluis		<1/1.000.000	<1/1.000.000	<1/1.000.000	<1/1.000.000
Combinatie	1/160.000	<1/1.000.000	1/1.900	1/418.000	

Tabel 10: Faalkansen voor de kunstwerken van dijkkring 45.

In de primaire waterkering van dijkkringgebied 45 liggen 35 waterkerende kunstwerken. Van 28 kunstwerken is op basis van de beschikbare informatie geconcludeerd dat de faalkansbijdrage naar verwachting verwaarloosbaar klein is ten opzichte van de overige faalkansen. Hierbij is ook rekening gehouden met de situatie van de kunstwerken na het dijkversterkingsproject. In dit project wordt voorzien in de aanpassing en/of de verwijdering van kunstwerken die niet voldoen aan de eisen uit de derde toetsronde. Voor zeven kunstwerken is een faalkansanalyse uitgevoerd in PC-Ring.

Voor het gemaal Westdijk is een relatief grote faalkans voor het mechanisme *onder- en achterloopsheid* berekend. Dit komt omdat er onzekerheid is over de grondopbouw bij het gemaal. In de toetsing is aangehouden dat het gemaal in een ondoorlatende laag ligt waardoor achterloopsheid niet kan optreden. Uit een nadere analyse binnen het project VNK2 van de gegevens blijkt dat de aanwezigheid van de ondoorlatende laag onzeker is. Hierdoor kan achterloopsheid wel optreden met een redelijk grote kans van voorkomen.

Voor meer details en achtergrondinformatie over de resultaten van de berekeningen voor kunstwerken wordt verwezen naar het overall kunstwerkenrapport [ref. 3] en de individuele kunstwerkrapportages [ref. 19] t/m [ref. 27].

3.5 Dominante vakken en faalmechanismen

In Tabel 11 is de top tien van de grootste berekende faalkansen weergegeven. Uit de tabel blijkt dat de overstromingskans voor het dijkkringgebied grotendeels bepaald wordt door dijkvakken. Alleen het gemaal Westdijk levert een significante bijdrage aan de overstromingskans van dijkkringgebied 45. Voor de 10 meest dominante vakken geldt dat de relatief grote faalkans het resultaat is van de faalmechanismen *opbarsten en piping* van dijken en *onder- en achterloopsheid* van kunstwerken. De overige faalmechanismen voor de dijken en kunstwerken dragen niet tot nauwelijks bij aan de berekende faalkansen op vakniveau en op ringniveau.

Vak	Faalkans per jaar				
	Overloop en golfoverslag	Macrostabieliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	Faalkans van dijkvak of kunstwerk
GR 033-043	1/36.000	-	1/270	-	1/270
GR 043-054	1/17.000	<1/1.000.000	1/380	-	1/370
GR 022-033	1/24.000	-	1/510	<1/1.000.000	1/500
EE 289-299	<1/1.000.000	-	1/1.800	-	1/1.800
EE 205-213	<1/1.000.000	-	1/1.800	-	1/1.800
Gemaal Westdijk	-	-	1/1.900*	-	1/1.900
VR 100-115	1/580.000	<1/1.000.000	1/5.100	<1/1.000.000	1/5.100
GR 000-011	1/26.000	<1/1.000.000	1/6.800	1/220.000	1/5.300
EE 245-256	<1/1.000.000	-	1/8.100	-	1/8.100
GR 011-022	1/41.000	-	1/10.000	-	1/8.300
Overstromingskans	1/8.200	1/115.000	1/110	1/210.000	1/100

* Voor het gemaal Westdijk is de faalkans voor onder- en achterloopsheid kunstwerken (piping) in de kolom Opbarsten en piping weergegeven.

Tabel 11: Overzicht van de vakken met de grootste berekende faalkansen in dijkkring 45

De drie dijkvakken met de grootste bijdrage aan de totale overstromingskans van dijkkringgebied 45 liggen in de Grebbedijk langs de Nederrijn. Het faalmechanisme *opbarsten en piping* is voor deze vakken maatgevend. Dit komt overeen met het beeld van de beheerder aangezien er al bij lage waterstanden zandmeevoerende wellen optreden. Deze drie dijkvakken hebben een veel grotere faalkans dan de overige dijkvakken. De grote faalkans wordt vooral gevormd door de onzekerheid in de D_{70} korreldiameter van de pipinggevoelige zandlaag in de ondergrond.

4 De gevolgen van overstromingen per ringdeel

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de gevolgen van een overstroming per ringdeel. In hoofdstuk 5 wordt nader ingegaan op de overstromingsscenario's. Paragraaf 4.1 beschrijft de aanpak en uitgangspunten die in de overstromingssimulaties en de berekeningen van de gevolgen in schade en slachtoffers zijn gehanteerd. Paragraaf 4.2 geeft een overzicht van de gevolgen van de overstromingsberekeningen per ringdeel bij verschillende buitenwaterstanden (de zogenaamde basismatrix). Paragraaf 4.3 tenslotte geeft een totaaloverzicht van de gevolgen als beschreven in paragraaf 4.2 in een samenvattende tabel en grafieken.

4.1 Aanpak en uitgangspunten

4.1.1 Algemeen

De gevolgen van een overstroming worden bepaald door de kenmerken van de overstroming en de kwetsbaarheid van de getroffen objecten of personen. In VNK2 worden de overstromingsgevolgen berekend met behulp van overstromingssimulaties. Deze simulaties zijn voor dijkkringgebied 45 uitgevoerd met SOBEK1D2D (2.11). Met behulp van de overstromingskenmerken uit de overstromingssimulaties worden de gevolgen in schade en slachtoffers berekend. Dit gebeurt met behulp van HIS-SSM (versie 2.5) [ref. 18].

Omdat het overstromingspatroon en de gevolgen van een overstroming niet alleen afhankelijk zijn van de doorbraaklocatie, maar ook van de belastingcondities waarbij de doorbraak plaatsvindt, worden in VNK2 meerdere mogelijke overstromingspatronen per ringdeel beschouwd. In theorie zouden oneindig veel belastingcombinaties moeten worden beschouwd. In de praktijk is dit echter onmogelijk. Er zijn daarom per ringdeel alleen overstromingsberekeningen gemaakt voor een drietal belastingcombinaties.

Deze combinaties zijn:

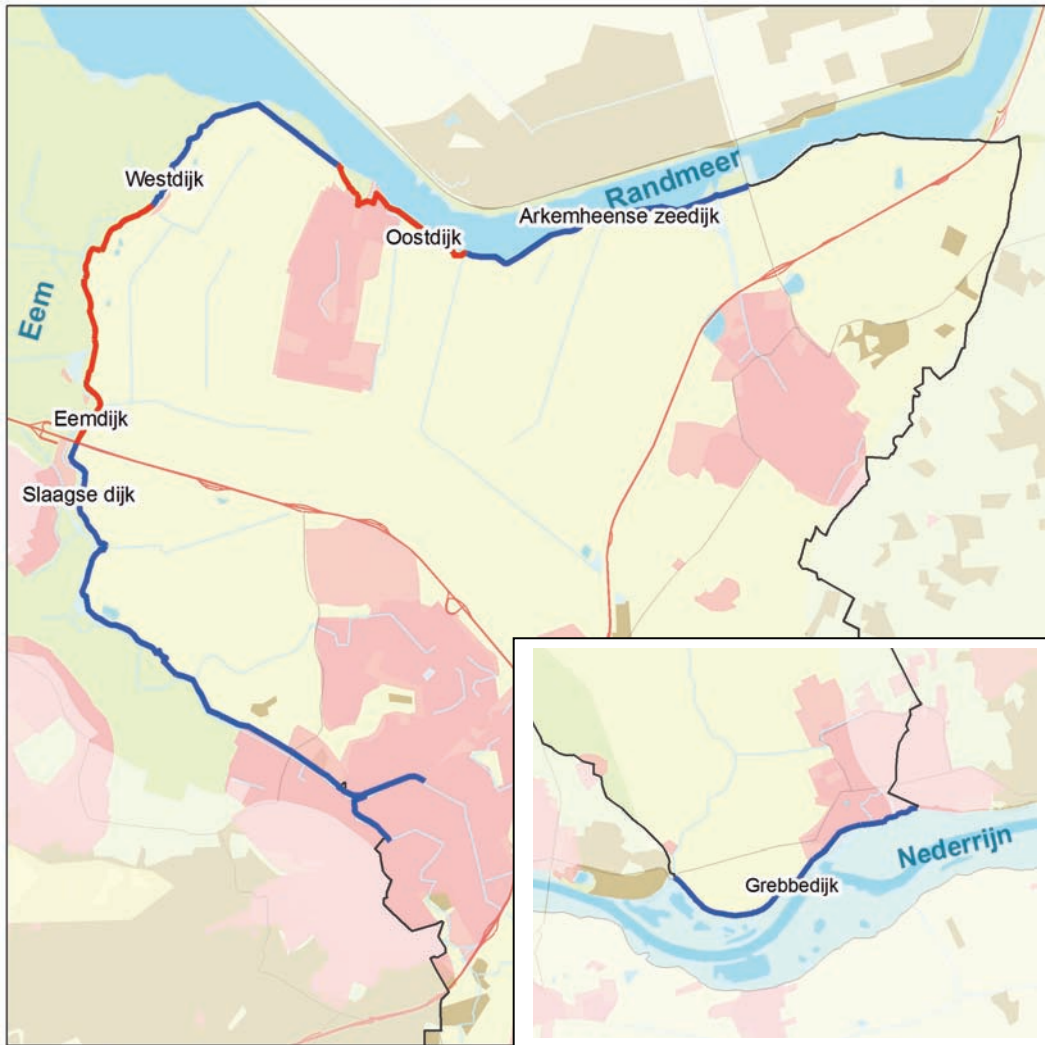
- toetspeil minus één decimeringhoogte (tp-1d);
- toetspeil (tp);
- toetspeil plus één keer de decimeringhoogte (tp+1d).

Voor dijkkringgebied 45 hebben deze belastingcombinaties een kans van overschrijding van 1/125 per jaar, 1/1.250 per jaar en 1/12.500 per jaar.

De slachtofferberekeningen zijn gebaseerd op geïndexeerde bevolkingsgegevens uit het jaar 2000 zoals opgenomen in de HIS-SSM versie 2.5. Uit vergelijking met bevolkingsgegevens van het CBS uit het jaar 2010 blijkt dat de bevolking in het gebied is toegenomen met 10,9% (32.225 inwoners) ten opzichte van 2000. Deze bevolkingstoename heeft naar verwachting een beperkt effect op het berekende aantal slachtoffers omdat de toename vooral plaatsvond in het gebied Amersfoort Vathorst. Dit gebied loopt beperkt onder bij een overstroming. Voor de berekening van de schade gaat VNK2 uit van de gegevens uit 2006, zoals opgenomen in HIS-SSM versie 2.5.

4.1.2 Ringdelen

Een ringdeel omvat een gedeelte van de dijkkring waarvoor het overstromingsverloop vrijwel onafhankelijk is van de exacte doorbraaklocatie binnen het ringdeel. De overstromingsberekeningen per ringdeel vormen de basis voor de beschrijving van de overstromingsscenario's. Er zijn voor dijkkringgebied 45 Gelderse Vallei 6 ringdelen gedefinieerd, zoals weergegeven in Figuur 22. Een exacte beschrijving van het ringdeel en een overzicht van de vakken die in het ringdeel zijn gelegen wordt gegeven in Bijlage C.



Figuur 22: Ringdelen dijkkring 45, Gelderse Vallei.

4.1.3 Verhoogde lijnelementen

In de overstromingsberekeningen is er van uitgegaan dat regionale keringen standzeker zijn. Dit is bijvoorbeeld het geval bij de Slaperdijk welke rond 1650 is aangelegd om bij een doorbraak van de Grebbedijk het water tegen te houden bij de grens tussen het Utrechtse en het Gelderse gebied. De Slaperdijk ligt tussen de Amerongse berg en Renswoude. Bij een overstroming vanuit het zuiden zal deze dijk gedeeltelijk functioneren als compartimenterende waterkering. De Slaperdijk bevat echter veel doorgangen en is niet overal op voldoende hoogte waardoor het effect van de Slaperdijk voornamelijk vertragend werkt op het overstromen van het noordelijke deel van het dijkkringgebied.

In het gebied liggen een aantal hoger in het landschap gelegen wegen en spoorwegen, die het overstromingspatroon kunnen beïnvloeden. Door de Gelderse Vallei gaan veel van de verbindingen tussen de Randstad en het oosten (Twente, de Achterhoek, Duitsland) en noorden van Nederland. Het gebied wordt doorsneden door de A1, de A12 en de A28 en een aantal regionale wegen en door de spoorlijnen Amersfoort – Enschede, Amersfoort – Groningen/Leeuwarden en Utrecht – Arnhem/Oberhausen. In de overstromingsberekeningen is er van uitgegaan dat deze lijnelementen standzeker zijn. In de schematisatie van de verhoogde lijnelementen is rekening gehouden met

doorgangen in deze elementen. Deze zijn geschematiseerd als verlagingen in het element.

4.1.4 Evacuatie

Voor het bepalen van het aantal slachtoffers bij een overstroming zijn de mogelijkheden voor (preventieve) evacuatie van belang³. Immers, indien een gebied is geëvacueerd voordat een overstroming optreedt, hoeven er geen slachtoffers te vallen. In de praktijk wordt de effectiviteit van preventieve evacuaties echter beperkt door de geringe voorspelbaarheid van overstromingen, de capaciteit van de aanwezige infrastructuur en de condities waaronder een evacuatie moet worden uitgevoerd, zoals hoge windsnelheden en sociale onrust [ref. 16].

In VNK2 wordt rekening gehouden met preventieve evacuatie door elk overstromings-scenario onder te verdelen in vier deelscenario's [ref. 17]. In Tabel 12 is een overzicht gegeven van de evacuatie-deelscenario's met de bijbehorende geschatte kansen van voorkomen voor dijkkringgebied 45.

De evacuatiefracties drukken het deel van de bevolking uit dat per scenario preventief geëvacueerd wordt ten opzichte van het deelscenario 'onverwachte overstroming – geen evacuatie'. De conditionele kans is de kans dat bij een overstroming dat deel van de bevolking daadwerkelijk geëvacueerd wordt. Op basis van de kans van voorkomen kan voor elke overstromingsberekening een verwachtingswaarde worden berekend van de gevolgen in schade, aantal slachtoffers en aantal getroffen.

Evacuatie-deelscenario		Evacuatie fractie (-)	Conditionele kans (-)	Verwachtingswaarde (-)	
Overstroming kort van tevoren verwacht of onverwacht	1. Geen evacuatie	0	0,1	0,00	Nederrijn (ringdeel 1)
	2. Ongeorganiseerde evacuatie	0,59	0,04	0,02	
Overstroming ruim van tevoren verwacht	3. Ongeorganiseerde evacuatie	0,8	0,26	0,21	
	4. Georganiseerde evacuatie	0,89	0,6	0,53	
Verwachtingswaarde evacuatie per overstroming				0,77	
Overstroming kort van tevoren verwacht of onverwacht	1. Geen evacuatie	0	0,2	0,00	Eem/Randmeren (ringdelen 2 t/m 6)
	2. Ongeorganiseerde evacuatie	0,4	0,08	0,03	
Overstroming ruim van tevoren verwacht	3. Ongeorganiseerde evacuatie	0,67	0,4	0,27	
	4. Georganiseerde evacuatie	0,8	0,32	0,26	
Verwachtingswaarde evacuatie per overstroming				0,56	

Tabel 12: Evacuatiefracties en conditionele kans voor vier verschillende evacuatie-deelscenario's.

³ Nadat een bres is opgetreden kunnen mensen ook nog vluchten of worden geëvacueerd. Dit gedrag is echter onderdeel van de functies waarmee slachtofferkansen worden bepaald. Er wordt daarom in deze paragraaf alleen gesproken over preventieve evacuatie.

Uit Tabel 12 kan de verwachtingswaarde voor de evacuatiefractie worden afgeleid door de evacuatiefracties met de conditionele kans te vermenigvuldigen voor de deelscenario's en vervolgens het totaal van de deelscenario's te sommeren. Voor de Nederrijn is die waarde 0,77 per overstroming. Dit betekent dat bij een overstroming vanuit de Nederrijn gemiddeld 77% van de bevolking preventief kan worden geëvacueerd. Voor het Eemmeer is die waarde 0,55 per overstroming. Dit betekent dat bij een overstroming vanuit de Eem en de randmeren gemiddeld 55% van de bevolking preventief wordt geëvacueerd. Dit verschil komt door de voorspelbaarheid van maatgevende omstandigheden en de stormcondities waarbij de evacuaties plaatsvinden. Hoogwater op de Nederrijn is ruim van te voren voorspelbaar vanwege hoge waterstanden op de Rijn. Hoogwater op de Eem en randmeren is pas 1 à 2 dagen van tevoren te voorspellen vanwege de stormcondities die het hoge water hier veroorzaken.

4.2 Resultaten overstromingsberekeningen per ringdeel

Dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei ligt in de provincies Utrecht en Gelderland. Aan de noordzijde wordt het dijkkringgebied begrensd door de randmeren, aan de westzijde door de Eem en aan de zuidzijde door de Nederrijn. Een overstroming kan dus worden veroorzaakt door een hoge waterstand op de Nederrijn, randmeren en/of een hoge waterstand op de Eem.

De volgende subparagrafen beschrijven per ringdeel de overstromingsverlopen en de gevolgen van de overstromingen. Per ringdeel zijn figuren opgenomen die de maximale waterdiepten die optreden weergegeven. Deze figuren geven naast een indicatie van de waterdiepten ook inzicht in het overstroomde oppervlak. De verwachte schade is afgerond op vijf miljoen euro en het aantal slachtoffers op vijf personen. Voor elke overstromingsberekening wordt een range in slachtofferaantallen genoemd. Dit is het effect van de doorgerekende evacuatie-deelscenario's. Het minimum van de range is het verwachte slachtofferaantal bij een optimaal georganiseerde evacuatie (deelscenario 4), het maximum van de range is het verwachte slachtofferaantal wanneer geen evacuatie plaatsvindt (deelscenario 1). De evacuatie-deelscenario's hebben niet alleen effect op het aantal te verwachten slachtoffers bij een overstroming, maar (in beperkte mate) ook op de berekende schade. Voertuigen en goederen worden immers naar veilig gebied verplaatst.

Er wordt opgemerkt dat de gevolgen bij een overstromingsscenario groter kunnen zijn dan de in dit hoofdstuk beschreven gevolgen. Er kunnen zich immers ook meervoudige doorbraken voordoen, waarbij er bressen ontstaan op verschillende locaties (bijvoorbeeld ringdeel 1 en ringdeel 2). In geval van een meervoudige doorbraak zijn de gevolgen groter dan bij een enkelvoudige doorbraak.

4.2.1 Ringdeel 1: Doorbraaklocatie Grebbedijk

De doorbraak in ringdeel 1 ligt aan de zuidzijde van de dijkkring bij de Grebbedijk. Een bres ontstaat als gevolg van hoogwater op de Nederrijn. Het water bereikt na ongeveer 8 uur de rand van Veenendaal. Na 20 uur staat Veenendaal voor het grootste gedeelte onder water. Het water bereikt na ongeveer 30 uur de Slaperdijk. Deze vertraagt het water enigszins, vervolgens stroomt het water verder het gehele dijkkringgebied in. De meeste woonkernen in het dijkkringgebied komen onder water te staan (Amersfoort, Ede-West, Veenendaal, Wageningen, Woudenberg, Hoevelaken, Renswoude, Achterveld, Leusden, Scherpenzeel, Bunschoten-Spakenburg, Nijkerkerveen en een deel van Nijkerk). De waterdiepte loopt in sommige plaatsen op tot 6 m. Vooral in het gedeelte voor de Slaperdijk (Veenendaal en omgeving) ontstaan grote waterdieptes. De nieuwbouwwijk Vathorst in Amersfoort komt niet onder water te staan, de wijk Nieuwland wel.

De verwachte schade is in alle berekeningen meer dan 8 miljard euro. Bij een buitenwaterstand van tp+1d is de schade een factor 1,1 x groter dan in de situatie met een buitenwaterstand van tp. De verschillen in verwachte slachtofferaantallen liggen in dezelfde orde van grootte (Figuur 23).

	tp-1d	tp	tp+1d
Waterdiepte (m)			
Schade [M€]	8655 - 8770	10665 - 10810	12130 - 12295
Slachtoffers [-]	95 - 845	115 - 1040	135 - 1235

Figuur 23: Maximale waterdiepte en verwachte schade en slachtoffers bij een doorbraak bij Grebbedijk voor drie buitenwaterstanden op de Nederrijn.

4.2.2 Ringdeel 2: Doorbraaklocatie Slaagsedijk

De breslocatie ligt ten noordwesten van Amersfoort langs de Eem. Een bres ontstaat als gevolg van hoogwater op de Eem. Op moment van een doorbraak staat er vrijwel direct water in de polder. Het water stroomt tot de aan de A1 in het noorden en tot de N199 in het oosten. Het water bereikt Amersfoort niet (Figuur 24).

	tp-1d	tp	tp+1d
Waterdiepte (m)			
Schade [M€]		25	
Slachtoffers [-]		0 - 5	

Figuur 24: Maximale waterdiepte en verwachte schade en slachtoffers bij een doorbraak bij Slaagsedijk voor toetspeil op de Eem.

4.2.3 Ringdeel 3: Doorbraaklocatie Eemdijk

De breslocatie ligt ten noordwesten van Amersfoort langs de Eem boven de A1. Een bres ontstaat als gevolg van hoogwater op de Eem en randmeren. Op moment van een doorbraak staat er vrijwel direct water in de polder. Het water stroomt in het zuiden tot de A1. Voor de buitenwaterstanden tp-1d en tp blijft het water aan de westkant van Bunschoten Spakenburg. In de tp+1d buitenwaterstand stroomt het water ook aan de oostkant. De kern van Bunschoten-Spakenburg blijft in alle gevallen droog.

Bij een grotere terugkeertijd van de buitenwaterstand neemt het overstroomde gebied en de waterdiepte in het dit gebied toe. Hierdoor stijgt ook de verwachte schade en het aantal slachtoffers. Bij een buitenwaterstand met tp+1d is de schade $\pm 2x$ zo groot

als in de situatie met een buitenwaterstand van tp en tp-1d (Figuur 25). Het verwachte aantal slachtoffers is bij alle berekeningen vergelijkbaar.

	tp-1d	tp	tp+1d
Waterdiepte (m)			
Schade [M€]	25	25	40
Slachtoffers [-]	0 - 5	0 - 5	0 - 5

Figuur 25: Maximale waterdiepte en verwachte schade en slachtoffers bij een doorbraak bij Eemdijk voor drie buitenwaterstanden op de Eem.

4.2.4 Ringdeel 4: Doorbraaklocatie Westdijk

De breslocatie ligt aan het Eemmeer ten westen van Bunschoten-Spakenburg. Een bres ontstaat als gevolg van hoogwater op de randmeren. Bij de buitenwaterstanden tp-1d en tp stroomt het gedeelte ten westen van Bunschoten Spakenburg onder tot de A1. De kern van Bunschoten-Spakenburg blijft in alle gevallen droog.

In de situatie met een buitenwaterstand van tp+1d overstroomt ook het gedeelte ten oosten van Bunschoten-Spakenburg tot de regionale kering langs de Laakweg. De verwachte schade neemt daardoor toe. Bij een buitenwaterstand van tp+1d is de schade $\pm 2x$ zo groot als in de situatie met een buitenwaterstand van tp-1d. Het verwachte aantal slachtoffers is in alle berekeningen vergelijkbaar (Figuur 26).

	tp-1d	tp	tp+1d
Waterdiepte (m)			
Schade [M€]	30	40	60
Slachtoffers [-]	0 - 5	0 - 5	0 - 5

Figuur 26: Maximale waterdiepte en verwachte schade en slachtoffers bij een doorbraak bij Westdijk voor drie buitenwaterstanden op de randmeren.

4.2.5 Ringdeel 5: Doorbraaklocatie Oostdijk

De breslocatie ligt aan het Eemmeer ten oosten van Bunschoten-Spakenburg. Een bres ontstaat als gevolg van hoogwater op de randmeren. Bij alle buitenwaterstanden stroomt zowel het gedeelte ten oosten als ten westen van Bunschoten Spakenburg onder tot de A1 in het zuiden en de regionale kering langs de Laakweg in het oosten. De kern van Bunschoten-Spakenburg blijft bij een buitenwaterstand van tp-1d droog, bij de buitenwaterstanden van tp en tp+1d loopt de woonkern gedeeltelijk onder.

Wanneer de terugkeertijd vergroot wordt met een factor 10 verdubbelen de gevolgen. Het verwachte aantal slachtoffers is in alle berekeningen vergelijkbaar (Figuur 27).

	tp-1d	tp	tp+1d
Waterdiepte (m)			
Schade [M€]	25	50	90
Slachtoffers [-]	0 - 5	0 - 5	0 - 5

Figuur 27: Maximale waterdiepte en verwachte schade en slachtoffers bij een doorbraak bij Oostdijk voor drie buitenwaterstanden op de randmeren

4.2.6 Ringdeel 6: Doorbraaklocatie Arkemheensedijk

De breslocatie ligt ten oosten Bunschoten-Spakenburg. Een bres ontstaat als gevolg van hoogwater op de randmeren. Het water stroomt in het westen tot aan de regionale kering van de Laak en in het oosten tot aan de N301 en de A28. Het water bereikt Nijkerk niet (Figuur 28).

	tp-1d	tp	tp+1d
Waterdiepte (m)			
Schade [M€]		25	
Slachtoffers [-]		0 - 5	

Figuur 28: Maximale waterdiepte en verwachte schade en slachtoffers bij een doorbraak bij Arkemheensedijk voor een buitenwaterstand op de randmeren.

4.3 Overzicht resultaten overstromingsberekeningen

De resultaten van de overstromingsberekeningen voor dijkkringgebied 45 zijn per doorbraaklocatie samengevat in Tabel 13.

Ringdeel	Breslocatie	Belastingscondities		
		tp-1d	tp	tp+1d
1	Grebbedijk			
	Schade [M€]	8.655 – 8.770	10.665- 10.810	12.130- 12.295
	Aantal slachtoffers [-]	95 - 845	115 - 1040	135 – 1.235
2	Slaagsedijk			
	Schade [M€]	-	25	-
	Aantal slachtoffers [-]		0 - 5	
3	Eemdijk			
	Schade [M€]	25	25	40
	Aantal slachtoffers [-]	0 - 5	0 - 5	0 - 5
4	Westdijk			
	Schade [M€]	30	40	60
	Aantal slachtoffers [-]	0 – 5	0 – 5	0 – 5
5	Oostdijk			
	Schade [M€]	25	50	90
	Aantal slachtoffers [-]	0 – 5	0 – 5	0 – 5
6	Arkenheemsedijk			
	Schade [M€]	-	25	-
	Aantal slachtoffers [-]		0 – 5	

Tabel 13: Overzicht resultaten overstromingsberekeningen dijkkringgebied 45.

5 Overstromingsscenario's en scenariokansen

5.1 Definitie overstromingsscenario's

5.1.1 Aanpak

Elk overstromingsscenario wordt gevormd door een unieke combinatie van falende en niet-falende ringdelen. In werkelijkheid is het aantal mogelijke scenario's nagenoeg oneindig. In VNK2 wordt een scenarioset samengesteld die representatief is voor alle mogelijke scenario's. Daarbij wordt gebruik gemaakt van de overstromingsberekeningen die per ringdeel zijn uitgevoerd (zie hoofdstuk 4).

De definitie van overstromingsscenario's berust op de volgende aspecten:

1. De onderverdeling van de dijkkring in ringdelen (zie hoofdstuk 4);
2. Het overstromingspatroon per ringdeel/doorbraaklocatie (zie hoofdstuk 4);
3. De vraag of, en in welke mate, sprake is van een daling van de buitenwaterstand na het ontstaan van een bres ergens in de dijkkring (ontlasten);
4. De afhankelijkheid tussen de betrouwbaarheden van de verschillende ringdelen: bij grotere afhankelijkheden (en afwezigheid van ontlasten) neemt de kans op een meervoudige doorbraak toe.

5.1.2 Ontlasten na een doorbraak

Soms kan een bres in het ene ringdeel leiden tot een verlaging van de hydraulische belastingen op een ander ringdeel. In dat geval is er sprake van ontlasten. Dergelijke relaties tussen het faalgedrag van ringdelen zijn van belang voor het overstromingsrisico. Meervoudige doorbraken zullen immers 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 als eerste faalt.

Hoogwater op de Nederrijn wordt veroorzaakt door grote hoeveelheden neerslag en smeltwater in Duitsland en het Alpengebied. Hoogwater op de randmeren en delen van de Eem worden veroorzaakt door stormen boven Nederland. Hierdoor wordt ervan uitgegaan dat de hydraulische belastingen door de Nederrijn en de belastingen door Eem en randmeren elkaar niet beïnvloeden. Dit houdt in dat de kans op gelijktijdige maatgevende belastingen op zowel de Nederrijn, de Eem en randmeren verwaarloosbaar klein zijn. Een doorbraak langs de Nederrijn heeft geen invloed op de kans op een doorbraak langs de Eem en randmeren en vice versa. Deze situaties worden daarom niet beschouwd.

De Eemdijk bestaat uit twee ringdelen. Hoogwater op het zuidelijke ringdeel (Slaagse dijk) wordt veroorzaakt door neerslag in de Gelderse Vallei wat zorgt voor een hoge afvoer op de Eem. De belasting op het noordelijke ringdeel van de Eemdijken (ringdeel Eemdijk) wordt echter gedomineerd door het peil op de Randmeren. Omdat beide ringdelen dus onafhankelijk van elkaar kunnen worden belast wordt niet uitgegaan van ontlasten bij een doorbraak.

Er zijn vier ringdelen die worden belast door hoogwater op de randmeren: Arkemheense Zeedijk, Oostdijk, Westdijk en Eemdijk. Bij een doorbraak in één van deze ringdelen overstroomt een klein gedeelte van dijkkringgebied 45 zoals in

hoofdstuk 4 is beschreven. De hoeveelheid instromend water is een relatief klein deel van het water dat zich in de randmeren en het Markermeer bevindt. Bij een doorbraak van één ringdeel zal de hydraulische belasting op de overige drie ringdelen niet significant verminderen. Er wordt langs de randmeren uitgegaan van 'geen ontlasten' en er kunnen hier meervoudige doorbraken optreden.

Op basis van de overstromingssommen is geconcludeerd dat het onderscheiden van alle mogelijke meervoudige doorbraakscenario's veel scenario's op zou leveren met een relatief kleine bijdrage aan het overstromingsrisico. Dit komt door de combinatie van kleine kansen met kleine gevolgen. Vanuit efficiëntieoverwegingen is gekozen om de meervoudige doorbraken vanuit de Eem en randmeren samen te voegen tot één meervoudig overstromingsscenario waarbij de vijf ringdelen tegelijk falen. Bij het samenvoegen van deze meervoudige doorbraak is gekozen voor de overstromingssommen met de grootste schades.

5.2 Scenariokansen

De scenariokansen zijn met PC-Ring berekend volgens de standaard werkwijze binnen VNK2. Voor alle mogelijke doorbraakscenario's zijn scenariokansen berekend. Op basis van paragraaf 5.1 worden zeven overstromingsscenario's gedefinieerd. Deze zijn opgebouwd uit de zes enkelvoudige doorbraakscenario's van de zes ringdelen en het overstromingsscenario waarbij alle ringdelen langs de Eem en randmeren doorbreken. In Bijlage F zijn de definities en scenariokansen opgenomen. In Tabel 14 zijn deze scenario's met de bijbehorende kansen samengevat. De procentuele bijdrage van de scenariokansen ten opzichte van de ringkans zijn weergegeven in de rechter kolom van deze tabel.

Scenario	Aantal doorbraken	Scenariokans	Kansbijdrage
Grebbedijk	1	1/130	78,6%
Slaagse Dijk	1	1/1.410	7,1%
Eemdijk	1	1/1.930	5,2%
Westdijk	1	1/1.910	5,3%
Oostdijk	1	1/5.730	1,8%
Arkemheense Zeedijk	1	1/9.800	1,0%
Meervoudig Eem en randmeren	5	1/10.400	1,0%
Ringkans		1/100	100,0%

Tabel 14: Scenariokansen en kansbijdragen van overstromingsscenario's dijkkringgebied 45.

Uit Tabel 14 blijkt het scenario Grebbedijk voor bijna 80% bijdraagt aan de totale overstromingskans van dijkkringgebied 45. Dit is het gevolg van de relatief grote faalkansen voor de dijkvakken in dit ringdeel.

De doorbraakscenario's Slaagse dijk, Eemdijk en Westdijk hebben een kansbijdrage van 5 tot 7%. Langs deze ringdelen bevinden zich enkele vakken of kunstwerken die de kans op een doorbraak in een ringdeel, en daarmee grotendeels de scenariokans bepalen.

De overstromingsscenario's Oostdijk, Arkemheense Zeedijk en de meervoudige doorbraken langs de Eem en randmeren hebben een kleine bijdrage van 1 à 2% van de ringkans. De kansbijdrage van het scenario met de meervoudige doorbraken is relatief klein aangezien de scenario's met de enkelvoudige doorbraken langs de Eem en randmeerdijken ook een kleine bijdrage hebben.

6 Overstromingsrisico

Het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 is bepaald door de berekende kans op verschillende overstromingsscenario's te koppelen aan de gevolgen van deze scenario's.

6.1 Koppeling scenariokansen en gevolgen

Het risico is berekend door de kansen en gevolgen van de overstromingsscenario's zoals gedefinieerd in hoofdstuk 5 te combineren. Bij de selectie van de overstromingsberekeningen is steeds gekeken naar de belastingcondities waarbij het optreden van de verschillende scenario's het meest waarschijnlijk is. Als een scenario naar verwachting pas optreedt bij een zeer hoge waterstand, is uitgegaan van een overstromingsberekening die hoort bij een extreme waterstand. In Bijlage G zijn de overstromingsscenario's met de daaraan gekoppelde overstromingsberekeningen weergegeven.

De waarden van de belastingvariabelen in het ontwerp punt zijn gebruikt om de koppeling te maken met de gevolgen van overstromingsscenario's. Het ontwerp punt beschrijft de meest waarschijnlijke waarden van de stochasten waarbij het overstromingsscenario optreedt. Voor elk ontwerp punt is de gevolg berekening geselecteerd die hoort bij het eerstvolgende, ongunstiger gelegen peil.

Deze aanpak is niet per definitie conservatief. Idealiter wordt voor de gevolgen van een overstromingsscenario immers uitgegaan van de *verwachtingswaarde* van de gevolgen gegeven overstroming en niet van de *meest waarschijnlijke* gevolgen bij een overstroming. Indien het ontwerp punt van de lokale waterstand steeds exact gelijk zou zijn aan het peil waarbij de overstromingsberekening is uitgevoerd, dan zou het overstromingsrisico worden onderschat. Hetzelfde overstromingsscenario kan immers ook optreden bij ongunstigere (maar minder waarschijnlijke) omstandigheden.

6.2 Overstromingsrisico

Het overstromingsrisico bestaat niet uit één getal, maar kan worden beschreven in de vorm van diverse risicomaten, zoals de verwachtingswaarde van de economische schade, de schade-kansfunctie (FS-curve), de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers, het plaatsgebonden risico, het lokaal individueel risico en het groepsrisico (FN-curve). In deze paragraaf worden deze risicomaten voor dijkkringgebied 45 beschreven en geanalyseerd.

6.2.1 Economisch risico

De verwachtingswaarde van de economische schade bedraagt 83 miljoen euro per jaar. In Tabel 15 zijn de overstromingsscenario's gegeven en hun bijdrage aan het overstromingsrisico. Hieruit blijkt dat het overstromingsscenario Grebbedijk een bijdrage heeft van 99,9% aan het totale economische overstromingsrisico. Dit komt door de grote kans op voorkomen van dit scenario in combinatie met de veel grotere gevolgen van een doorbraak in vergelijking met de gevolgen van een doorbraak van één van de andere ringdelen. De bijdrage aan het economische overstromingsrisico van de overige scenario's en de restkans is in alle gevallen kleiner dan 0,04%.

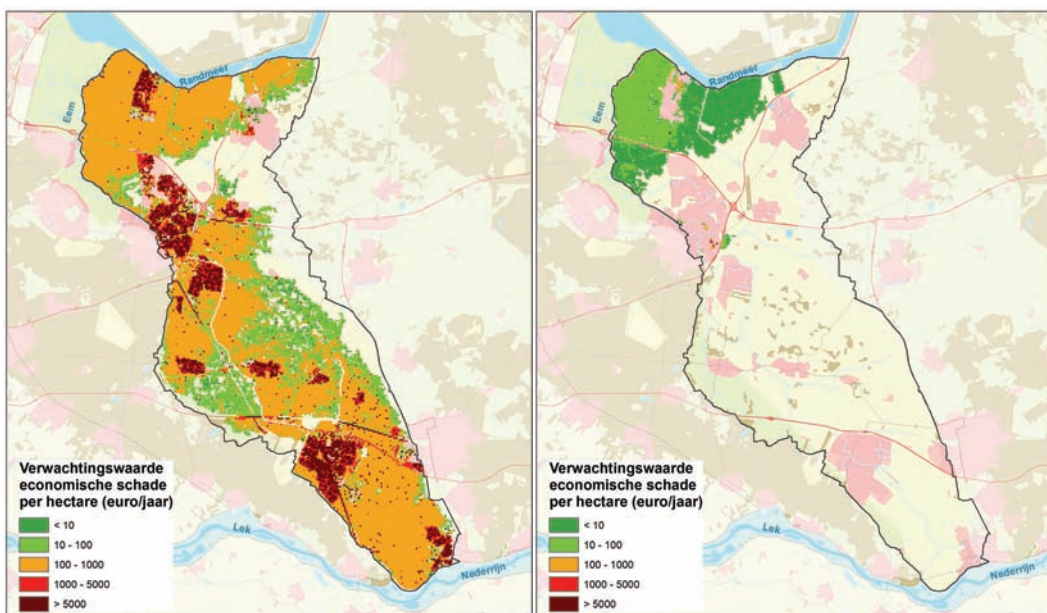
Overstromingsscenario	Scenariokans [per jaar]	Kansbijdrage	Cumulatief kansbijdrage	Economisch risico [€/jaar]	Bijdrage economisch risico	Cumulatief economisch risico
Grebbedijk	1/130	78,6%	78,6%	8,27E+07	99,88%	99,88%
Slaagse Dijk	1/1.410	7,1%	85,8%	1,54E+04	0,02%	99,90%
Eemdijk	1/1.930	5,2%	91,0%	2,04E+04	0,02%	99,92%
Westdijk	1/1.910	5,3%	96,2%	2,99E+04	0,04%	99,96%
Oostdijk	1/5.740	1,8%	98,0%	1,55E+04	0,02%	99,98%
Arkemheense Zeedijk	1/9.800	1,0%	99,0%	2,46E+03	0,00%	99,98%
Meervoudig Eem- en Randmeren	1/10.400	1,0%	100,0%	1,70E+04	0,02%	100,00%
Dijkringgebied 45	1/100			8,28E+07		

Tabel 15: Overstromingsscenario's en hun bijdrage aan het economisch overstromingsrisico.

Uit Tabel 15 blijkt dat het overstromingsscenario Grebbedijk voor circa 79% bijdraagt aan de totale overstromingskans en voor 99,9% bijdraagt aan het economisch risico. Dit scenario is dus dominant in de totale overstromingskans en bovendien zijn de gevolgen van een doorbraak langs de Nederrijn veel groter dan de gevolgen van een doorbraak langs de Eem of randmeren. Dit leidt ertoe dat het economische risico van dijkringgebied 45 nagenoeg geheel wordt bepaald door de Grebbedijk.

Ruimtelijke verdeling verwachtingswaarde economische schade

In Figuur 29 is de verdeling van de verwachtingswaarde van de totale economische schade over het dijkringgebied weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het totaal van alle overstromingsscenario's (links) en de som van de scenario's waarbij één of meerdere van de vijf noordelijke ringdelen falen (rechts).



Figuur 29: Verwachtingswaarde van de economische schade per hectare per jaar voor alle scenario's (links) en voor de som van de scenario's waarbij één of meerdere van de vijf noordelijke ringdelen falen (rechts).

Figuur 29 laat zien dat de verwachtingswaarde van de economische schade voor dijkringgebied 45 volledig gedomineerd wordt door de gevolgen van een doorbraak

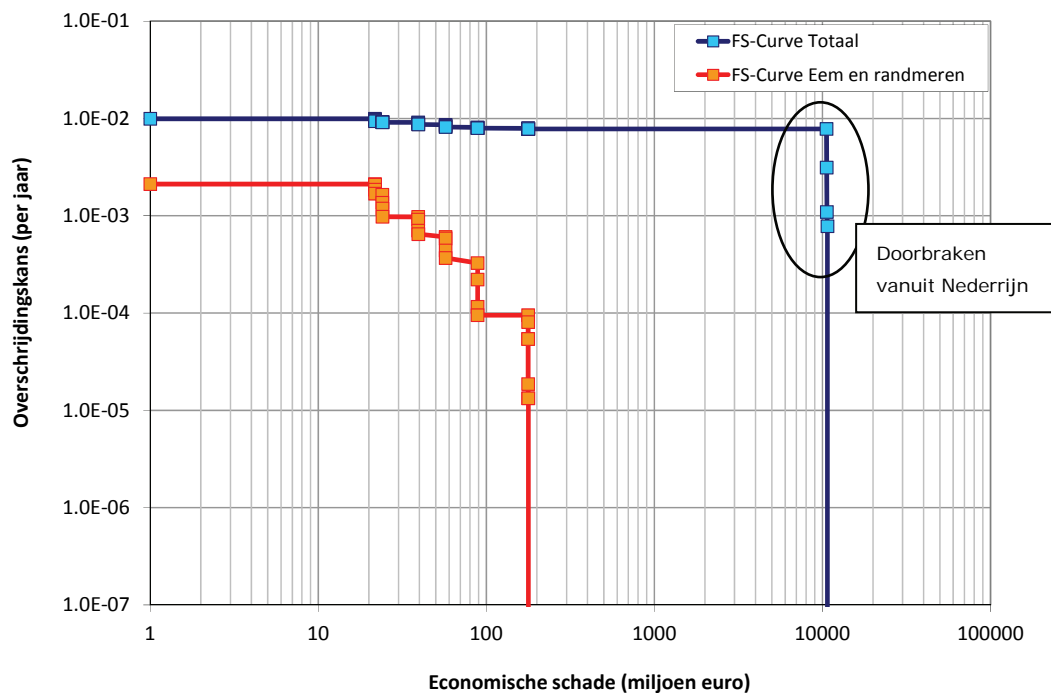
van de Grebbedijk. De verwachtingswaarde van de totale economische schade is het grootst voor de stedelijke gebieden. Met name stedelijke gebieden waaronder Veenendaal, Amersfoort, Wageningen, Leusden, Woudenberg, Scherpenzeel en Bunschoten-Spakenburg springen in het oog met een verwachtingswaarde van de schade groter dan € 5.000 per jaar per hectare. Ook de overige bebouwde gebieden laten een dergelijk beeld zien.

Grote delen van het landelijke gebied laten een economisch risico zien tussen de € 100 en € 1.000 per jaar per hectare. Dit komt omdat de waterdiepte op deze gebieden behoorlijk kan oplopen. Op een aantal gebieden wordt geen overstromingsrisico berekend omdat daar geen water komt. Deze gebieden liggen hoger dan de rest van het dijkkringgebied en worden enigszins beschermd door de hooggelegen snelwegen. Dit geldt vooral voor het gebied ten noorden van de A1 en ten oosten van de A28. Ook opvallend is het gebied ten noordwesten van de kruising tussen de A1 en A28 waarin de wijk Vathorst van Amersfoort is gelegen. Door de verhoogde ligging van de snelwegen wordt het water om dit gebied geleid en ontstaat er geen schade.

Schade-kansfunctie

Voor dijkkringgebied 45 is tevens een schade-kansfunctie bepaald. Deze functie geeft de kans per jaar dat een overstroming in dijkkringgebied 45 een bepaald schadebedrag overschrijdt. De schade-kansfunctie wordt gepresenteerd in een FS-curve. In Figuur 30 zijn de kansen op overschrijding van bepaalde schadebedragen getoond voor dijkkringgebied 45.

De punten in de FS-curve zijn de gedefinieerde doorbraakscenario's, uitgesplitst per evacuatie-deelscenario (evacuatie, geen evacuatie, etc.). Evacuatie heeft echter weinig invloed op de schade bij een overstroming. Voor dijkkringgebied 45 zijn in totaal 7 doorbraakscenario's gedefinieerd met per doorbraakscenario 4 evacuatie-deelscenario's.



Figuur 30: FS-curve dijkkringgebied 45.

Uit Figuur 30 blijkt dat de kans op ten minste 10 miljard euro schade bijna gelijk is aan 1/100 per jaar. Door de dominantie van de Grebbedijk wordt de FS-curve een rechthoek. De overstromingsscenario's met een kleinere kans en een kleiner gevolg hebben geen invloed op de vorm van de FS-curve.

6.2.2 Slachtofferrisico

De verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers is 1,9 slachtoffers per jaar. Uit Tabel 16 blijkt dat het overstromingsscenario Grebbedijk een bijdrage heeft van 99,9% aan het totale slachtofferrisico. De overige overstromingsscenario's hebben een aandeel van 0,02% in het totale slachtofferrisico of kleiner.

Overstromingsscenario	Scenariokans [per jaar]	Kansbijdrage	Cumulatief kansbijdrage	Slachtoffer risico [n/jaar]	Bijdrage slachtoffer risico	Cumulatief slachtoffer risico
Grebbedijk	1/130	78,6%	78,6%	1,90E+00	99,93%	99,93%
Slaagse Dijk	1/1.410	7,1%	85,8%	2,36E-04	0,01%	99,94%
Eemdijk	1/1.930	5,2%	91,0%	2,43E-04	0,01%	99,95%
Westdijk	1/1.910	5,3%	96,2%	3,27E-04	0,02%	99,97%
Oostdijk	1/5.740	1,8%	98,0%	1,97E-04	0,01%	99,98%
Arkemheense Zeedijk	1/9.800	1,0%	99,0%	3,06E-05	0,00%	99,98%
Meervoudig Eem- en randmeerdijk	1/10.400	1,0%	100,0%	3,05E-04	0,02%	100,00%
Dijkringgebied 45	1/100			1,90E+00		

Tabel 16: Overstromingsscenario's en hun bijdrage aan het slachtoffer overstromingsrisico.

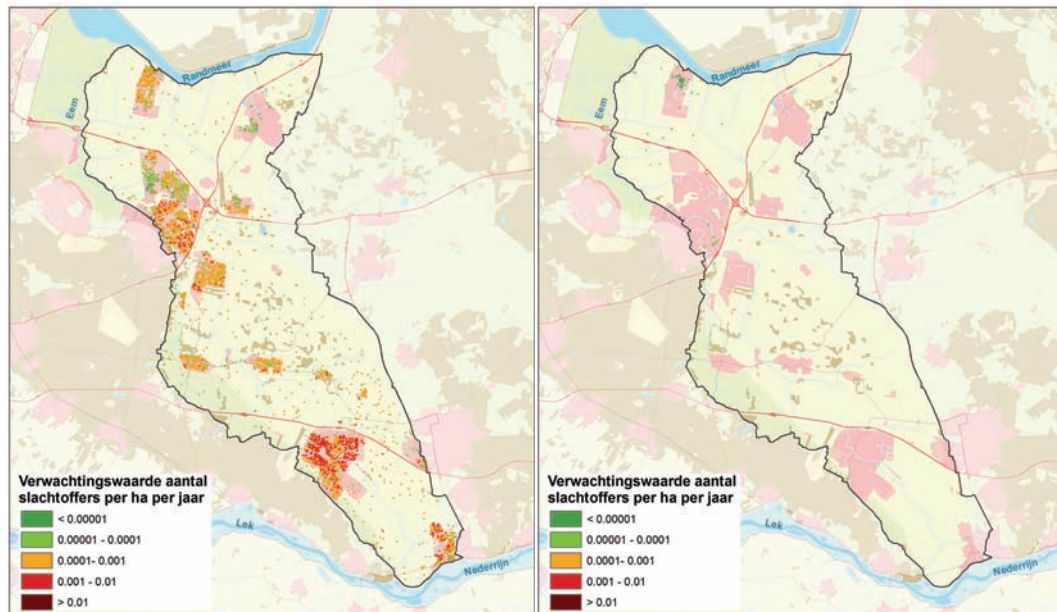
Uit Tabel 16 blijkt dat het overstromingsscenario Grebbedijk voor circa 79% bijdraagt aan de totale overstromingskans en voor 99,9% bijdraagt aan het slachtofferrisico. Dit scenario is dus maatgevend in de totale overstromingskans en bovendien zijn de aantallen slachtoffers bij een doorbraak langs de Nederrijn aanzienlijk groter dan die bij een doorbraak langs de Eem of Randmeren. Dit leidt ertoe dat het slachtofferrisico van dijkringgebied 45 geheel wordt bepaald door de Grebbedijk.

Ruimtelijke verdeling verwachtingswaarde aantal slachtoffers

In Figuur 31 is de verdeling van de verwachtingswaarde van het totaal aantal slachtoffers over het dijkringgebied weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen het totaal van alle overstromingsscenario's (links) en de som van de scenario's waarbij alleen de Eem- en randmeerdijken bezwijken (rechts).

Figuur 31 laat zien dat de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers voor dijkringgebied 45 volledig gedomineerd wordt door de gevolgen van een doorbraak van de Grebbedijk.

Vooraf Veenendaal springt er uit met een verwachtingswaarde tussen de 0,001 en 0,01 slachtoffers per jaar per hectare. Amersfoort, Leusden en Wageningen hebben ook een hoge verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers. De overige stedelijke gebieden laten een verwachtingswaarde zien tussen de 0,00001 en 0,001 slachtoffers per hectare per jaar. Voor de overige gebieden geldt dat de verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers zeer klein is. Dit komt overeen met de bevolkingsconcentraties in het gebied.

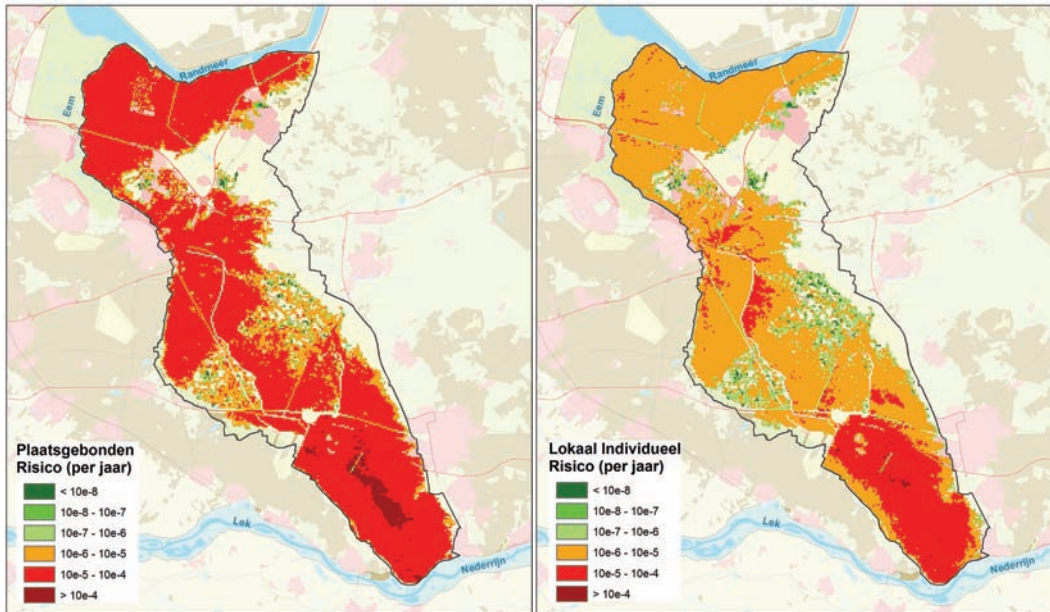


Figuur 31: Verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers per hectare per jaar voor alle scenario's (links) en voor de som van de scenario's waarbij één of meerdere van de vijf noordelijke ringdelen falen (rechts).

Plaatsgebonden risico

In Figuur 32 is het plaatsgebonden risico voor dijkkringgebied 45 weergegeven. Het plaatsgebonden risico is de kans dat een onbeschermde persoon die zich gedurende een jaar continu op dezelfde plek bevindt en daar het slachtoffer wordt van een overstroming. In tegenstelling tot de verwachtingswaarde van het totaal aantal slachtoffers is het plaatsgebonden risico onafhankelijk van de aanwezige bevolking. Het plaatsgebonden risico wordt bepaald door de scenariokansen en de waterdiepte, stroomsnelheid en stijgsnelheid die bij een overstroming op de betreffende plek kunnen ontstaan. Bij het bepalen van het plaatsgebonden risico wordt evacuatie buiten beschouwing gelaten.

Uit Figuur 32 (links) blijkt dat het plaatsgebonden risico in bijna het hele dijkkringgebied tussen de 1/100.000 en 1/10.000 per jaar ligt. Nabij Veenendaal is het plaatsgebonden risico het grootst met meer dan 1/10.000 per jaar. De waterdieptes en de stroomsnelheden zijn op deze locaties het grootst. Ook de kans op een doorbraak vanuit de Nederrijn is het grootst wat leidt tot een hoger plaatsgebonden risico voor deze locatie. Op de hoger gelegen delen komt geen of weinig water waardoor het plaatsgebonden risico snel afneemt.



Figuur 32: Het plaatsgebonden risico (links) en lokaal individueel risico (rechts) in dijkringgebied 45.

Lokaal individueel risico

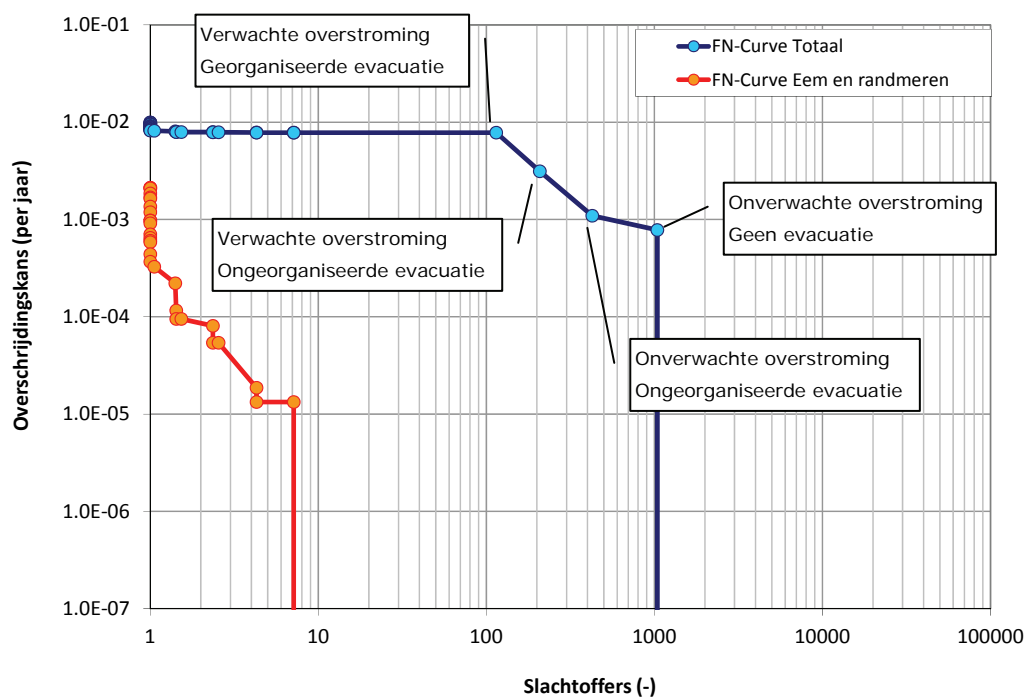
Het lokaal individueel risico is de kans per jaar dat een persoon die zich permanent op een bepaalde plaats in het dijkringgebied bevindt, het slachtoffer wordt van een overstroming van dit dijkringgebied, waarbij de mogelijkheden voor preventieve evacuatie zijn meegenomen.

Het lokaal individueel risico is overal een factor 4.3 lager dan het plaatsgebonden risico. Deze factor volgt direct uit de gemiddelde evacuatiefractie ($1/(1-0.77)=4.3$, zie paragraaf 4.1.4). Het lokaal individueel risico is vrijwel overal groter dan $1/1.000.000$ per jaar (Figuur 32 rechts). In het gebied tussen de A12 en de Grebbedijk is het lokaal individueel risico het grootst (tussen de $1/100.000$ en $1/10.000$ per jaar). Dit komt omdat er in dit gebied hoge waterstanden ontstaan bij een doorbraak en de kans op een doorbraak van de Grebbedijk relatief groot is.

Groepsrisico

Het groepsrisico geeft de kans op een ongeval met N of meer slachtoffers en wordt vaak weergegeven in een FN-curve (Figuur 33). In de berekening van het groepsrisico is het effect van evacuatie meegenomen.

Uit de FN-curve blijkt dat de kans op een totaal aantal slachtoffers van ten minste 100 personen vrijwel gelijk is aan de overstromingskans van het dijkringgebied ($1/100$ per jaar). De kans dat een groep van ten minste 200 personen het slachtoffer wordt van een overstroming is circa $1/300$ per jaar. De kans dat een groep van ten minste 1.000 personen dodelijk slachtoffer wordt van een overstroming van dijkringgebied 45 circa $1/1.000$ per jaar. De kans dat er meer slachtoffers vallen is verwaarloosbaar klein.



Figuur 33: FN-curve dijkkringgebied 45.

De FN-curve wordt gedomineerd door doorbraken vanuit de Grebbedijk. Afhankelijk van de evacuatie vallen er bij een doorbraak tussen de 100 slachtoffers bij georganiseerde evacuatie en 1.000 slachtoffers bij geen evacuatie. In de FN-curve zijn de verschillen tussen de vier evacuatiescenario's duidelijk waar te nemen.

7 Gevoeligheidsanalyses

Om inzicht te krijgen in de gevoeligheid van de berekende overstromingskansen en risico's voor de gehanteerde uitgangspunten zijn gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. De gevoeligheidsanalyses geven daarmee inzicht in het effect van versterkingen of aanpassingen in het beheer. Tevens dienen de gevoeligheidsanalyses om het effect van de aannamen die zijn gedaan tijdens de schematisatie te beoordelen.

In het achtergrondrapport [ref. 2] zijn eveneens op dijkvakniveau enkele gevoeligheidsanalyses uitgevoerd. Deze zijn verricht om goede vakschematisaties op te kunnen stellen en te tonen hoe alternatieve schematisatiekeuzes doorwerken in de resultaten op vakniveau.

7.1 Selectie van gevoeligheidsanalyses

De selectie van onderwerpen voor de gevoeligheidsanalyses is het resultaat van overleg tussen de verschillende betrokkenen (projectbureau, beheerder en provincies). Specifiek voor dijkkringgebied 45 zijn de volgende vier gevoeligheidsanalyses geselecteerd:

1. Effecten van Ruimte voor de Rivier maatregelen;
2. Effecten van gerichte verbetermaatregelen in de dijkkring;
3. Effecten van een veiligere Grebbedijk;
4. Effecten van de variatie van de D70 korreldiameter Grebbedijk.

In de volgende paragrafen zijn de genoemde gevoeligheidsanalyses verder uitgewerkt.

7.2 Analyse 1: Effecten Ruimte voor de Rivier maatregelen

Langs de Nederrijn is een aantal Ruimte voor de Rivier projecten gepland. Deze projecten moeten ervoor zorgen dat de waterstanden onder maatgevende omstandigheden lager worden. Het doel van de PKB Ruimte voor de Rivier (RvdR) [ref. 28] is om de maatgevende waterstanden dusdanig te verlagen dat deze overeenkomen met de Hydraulische Randvoorwaarden 1996 (HR1996). De waterstandsverlaging wordt bepaald door het verschil in toetspeilen tussen de HR2006 [ref. 29] en HR1996 [ref. 30].

De beoogde waterstandsverlaging wordt gerealiseerd met lokale ingrepen. De stuwkrommen die deze ingrepen veroorzaken moeten ertoe leiden dat de waterstand over het hele traject wordt verlaagd tot de HR1996 waterstand. Door deze ingrepen kan de waterstand lokaal onder de HR1996 komen te liggen. Omdat het effect van de ingrepen echter niet zeker is, is voor de berekeningen niet uitgegaan van lokale waterstanden, maar van de globale doelstelling van de PKB Ruimte voor de Rivier om de waterstanden te verlagen tot de HR1996 met 0,25 - 0,35 m (Tabel 17). De resultaten van de berekeningen zijn een indicatie van de mogelijke gevolgen van de PKB Ruimte voor de Rivier. Daarom dienen de resultaten ook als zodanig te worden beschouwd.

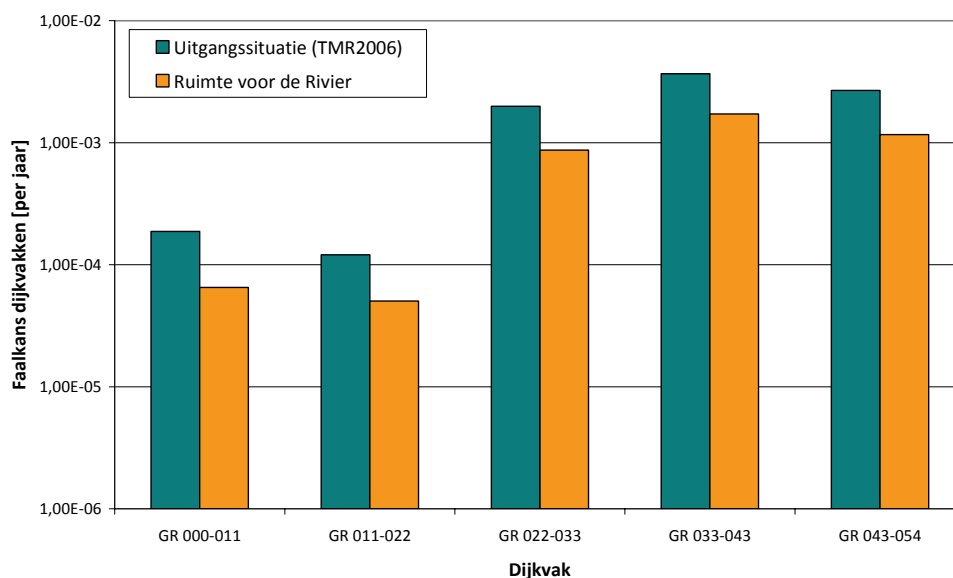
Kilometerraai	Omschrijving	Dijkvak	TP HR2006 [m NAP]	TP HR1996 [m NAP]	Verskil [m]
901	Wageningen	GR 000-011	11,7	11,40	0,30
902		GR 000-011	11,6	11,30	0,30
903		GR 011-022	11,5	11,25	0,25
904		GR 022-033	11,5	11,20	0,30
905		GR 033-043	11,4	11,15	0,25
906		GR 043-054	11,4	11,05	0,35
907	Grebbeberg	GR 043-054	11,3	10,95	0,35

Tabel 17: Waterstandsverschil tussen de toetspeilen van de HR2006 en HR1996 voor de dijkvakken langs de Nederrijn.

Voor de Eem en de randmeren zijn geen Ruimte voor de Rivier projecten of andere waterstandsverlagende maatregelen voorzien. In deze analyse is de waterstand voor de dijkvakken langs deze wateren dan ook niet aangepast.

Overstromingskansen na Ruimte voor de Rivier

In Figuur 34 zijn de faalkansen per dijkvak weergegeven voor die dijkvakken waar een waterstandverlaging zoals bedoeld in de PKB Ruimte voor de Rivier is meegenomen. In Figuur 34 zijn de oorspronkelijke faalkansen en de faalkansen na Ruimte voor de Rivier maatregelen opgenomen. Uit Figuur 34 blijkt dat de faalkansen als gevolg van de berekeningen met een waterstandverlaging zoals bedoeld in de PKB Ruimte voor de Rivier met een factor 2 tot 3 kleiner worden. De mate waarin de faalkansen verandert, varieert per dijkvak. De verandering is onder andere afhankelijk van de meest waarschijnlijke omstandigheden waaronder een vak faalt in de oorspronkelijke berekeningen.



Figuur 34: Oorspronkelijke kansen en kansen na maatregelen Ruimte voor de Rivier voor gecombineerde faalkansen per vak.

Tabel 18 toont de faalkansen per faalmechanisme en de ringkans. Op basis van deze tabel kan worden geconcludeerd dat een waterstandverlaging zoals bedoeld in de PKB Ruimte voor de Rivier leidt tot een kleinere overstromingskans. De overstromingskans neemt af van 1/100 per jaar naar 1/180 per jaar. Dit is grofweg een factor 2. Deze verandering in overstromingskans is vooral het gevolg van een verandering van de faalkansen voor het mechanisme *opbarsten en piping*. Bij de maatgevende vakken daalt de faalkans met een factor 2. Deze factor is daarom ook terug te zien in de daling van de ringkans.

Faalmechanisme	Oorspronkelijke Faalkansen [per jaar]	Faalkansen na RvdR [per jaar]	Factor
Overloop en golfoverslag	1/8.200	1/12.100	1,5
Macrostabieliteit binnenwaarts	<1/1.000.000	<1/1.000.000	1,1
Opbarsten en piping	1/110	1/200	1,8
Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	1/210.000	1/360.000	1,7
Overstromingskans*	1/100	1/180	1,8

* de overstromingskans heeft betrekking op het hele dijkkringgebied, inclusief de kunstwerken. De kunstwerken zijn niet gepresenteerd in de tabel omdat deze niet maatgevend zijn.

Tabel 18: Faalkansen (1/jaar) per faalmechanisme en voor de dijkkring.

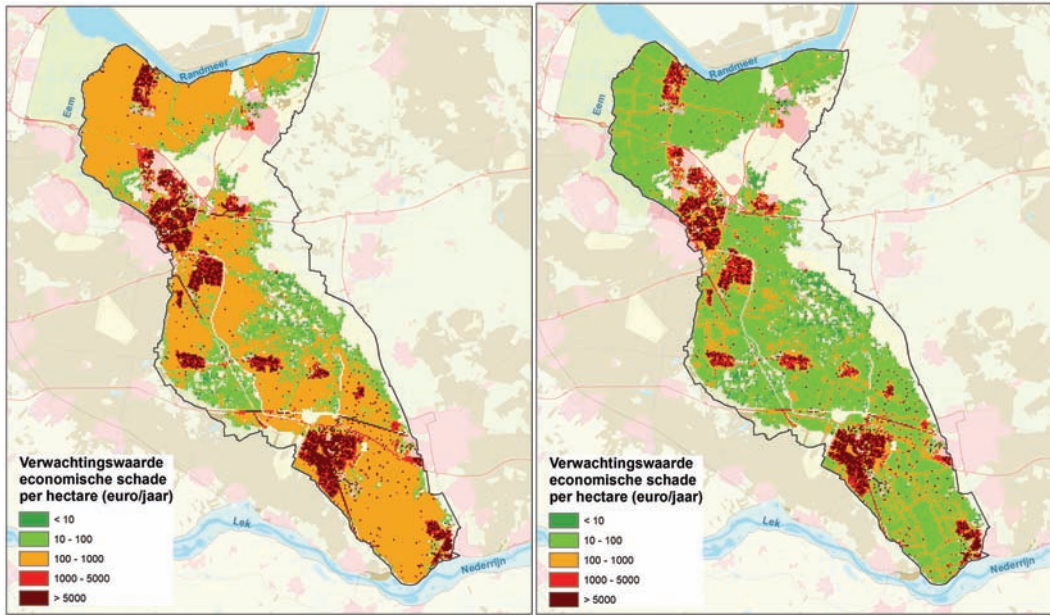
Hoewel de Ruimte voor de Rivier maatregelen de overstromingskans grofweg met een factor 2 verkleinen blijft de overstromingskans van het dijkkringgebied relatief groot. Dit is vooral het gevolg van het feit dat het faalmechanisme *opbarsten en piping* dominant is.

Overstromingsrisico's na Ruimte voor de Rivier

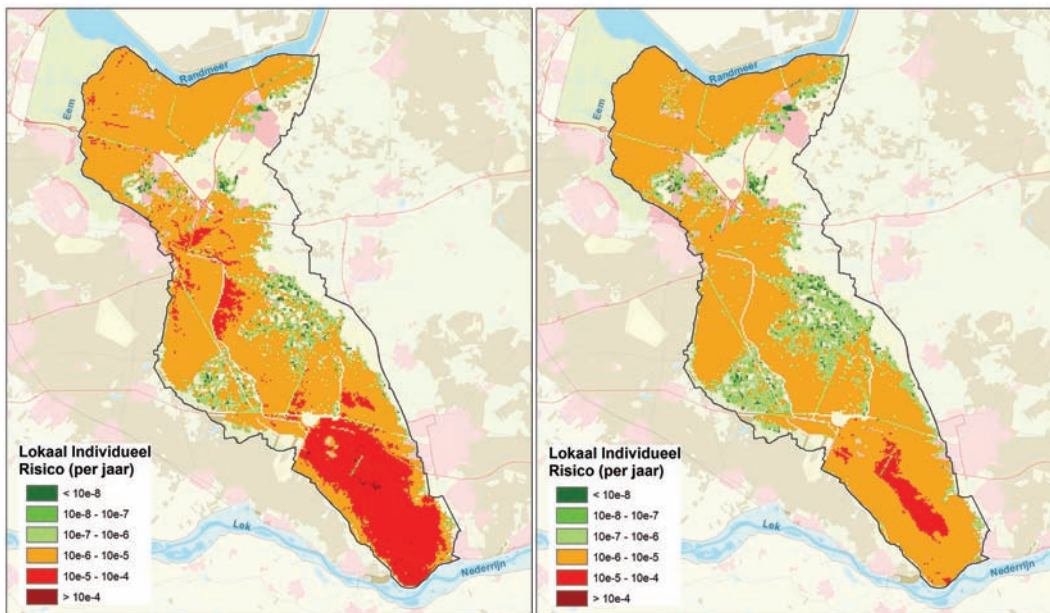
Een waterstandsval op de Nederrijn leidt tot kleinere faalkansen voor de waterkeringen langs de Nederrijn en een verlaging van het overstromingsrisico. In hoofdstuk 6 is geconcludeerd dat overstromingen vanuit de Nederrijn voor nagenoeg het hele overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 zorgen. Uit een aanvullende risicoberekening blijkt dat als gevolg van de Ruimte voor de Rivier maatregelen, de verwachtingswaarde van de economische schade afneemt van 83 miljoen euro per jaar naar 38 miljoen euro per jaar, een afname met circa een factor 2. Dit is nagenoeg gelijk aan de factor waarmee de overstromingskans wordt verkleind.

In Figuur 35 is de verwachtingswaarde van de economische schade per hectare per jaar weergegeven voor zowel de huidige situatie als na het gereedkomen van de Ruimte voor de Rivier maatregelen. Hierin blijkt duidelijk dat Ruimte voor de Rivier leidt tot een verlaging van het economische risico over bijna het hele dijkkringgebied. Dit komt omdat een doorbraak vanuit de Nederrijn bijna het gehele overstromingsrisico bepaalt en dat daardoor een verlaging van de faalkans van de Grebbedijk direct leidt tot een verlaging van het overstromingsrisico van het hele dijkkringgebied.

Het lokaal individueel risico neemt af met circa een factor 2. Zoals Figuur 36 toont is de afname waar te nemen over het hele dijkkringgebied. Nabij Veenendaal blijft het lokaal individueel risico groter dan 1/100.000.



Figuur 35: Verwachtingswaarde van de economische schade per hectare per jaar in de uitgangssituatie (links) en na het gereedkomen van der Ruimte voor de Rivier maatregelen (rechts).



Figuur 36: Lokaal individueel risico per jaar in de uitgangssituatie (links) en na het gereedkomen van der Ruimte voor de Rivier maatregelen (rechts).

Resumé

Het uitvoeren van het PKB Ruimte voor de Rivier leidt tot een waterstanddaling van ongeveer 30 cm op de Nederrijn bij maatgevende omstandigheden. De overstromingskans van dijkkringgebied 45 wordt hierdoor met ongeveer een factor 2 verkleind van 1/100 naar 1/180 per jaar. Omdat een doorbraak vanuit de Nederrijn bijna het gehele overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 bepaalt leidt de waterstandverlaging ook tot een grote verlaging van het overstromingsrisico. De verwachtingswaarde van het economische risico daalt ook met ongeveer een factor 2 van 83 naar 38 miljoen euro per jaar. De verwachtingswaarde van het slachtofferrisico daalt met een factor 2 van 1,9 naar 0,8 slachtoffers per jaar. Doordat de schade en slachtoffers voornamelijk worden bepaald door overstromingen vanuit de Nederrijn

werkt de reductie in faalkans door waterstandsverlaging vrijwel 1 op 1 door in de reductie in overstromingsrisico.

7.3 Analyse 2: Effecten van gerichte verbetermaatregelen in de dijkkring

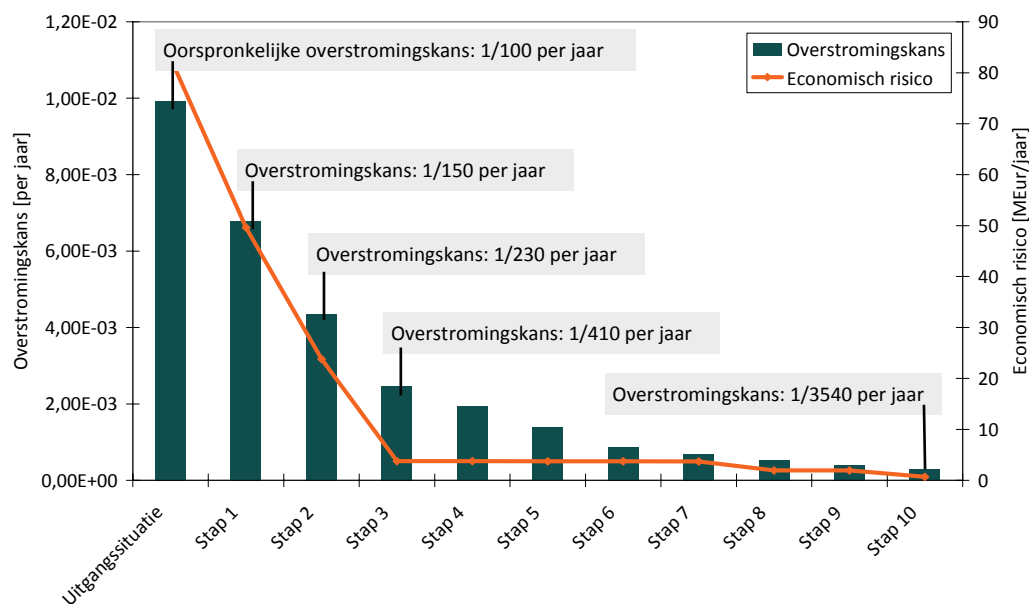
De overstromingskans van dijkkringgebied 45 is door middel van gerichte maatregelen te verkleinen. Bij elke verbetering wordt de faalkans voor een faalmechanisme in een vak tot een verwaarloosbare waarde teruggebracht. De volgorde van de verbeteringen is dusdanig dat de overstromingskans met zo min mogelijk maatregelen zo veel mogelijk wordt gereduceerd. Dit is een efficiënte strategie zolang geen grote verschillen bestaan tussen de kosten van versterkingen op verschillende locaties.

In eerste instantie is beoordeeld welke delen van de waterkeringen van dijkkringgebied 45 de grootste bijdrage leveren aan de totale overstromingskans voor dijkkringgebied 45. In paragraaf 3.5 is de top 10 van dominante vakken in een tabel opgenomen. Dit blijken vooral dijkvakken langs de Nederrijn te zijn, waar voor het faalmechanisme *opbarsten en piping* relatief grote faalkansen worden berekend. Tevens zijn er langs de Eem en randmeren enkele vakken met een relatief grote faalkans vanwege *opbarsten en piping*. Ook het gemaal Westdijk staat in de top 10 van delen die een grote bijdrage hebben aan de overstromingskans van dijkkringgebied 45.

Op basis van de resultaten van de faalkansberekeningen zijn de 10 vakken en kunstwerken geselecteerd die de grootste bijdrage leveren aan de totale overstromingskans. Voor de onderdelen is de faalkans voor het faalmechanisme *opbarsten en piping* per vak (en dus per ingreep) tot een verwaarloosbare waarde teruggebracht. Vervolgens zijn steeds opnieuw de overstromingskans en het overstromingsrisico berekend. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 37.

De eerste drie verbeterstappen betreffen ingrepen in de zwakste vakken van de Grebbedijk: GR 033-043, GR 043-054 en GR 022-033. Door het verbeteren van deze drie vakken gaat de overstromingskans van dijkkringgebied 45 van 1/100 per jaar naar 1/410 per jaar. De scenariokans van de Grebbedijk daalt ongeveer met een factor 20. De verwachtingswaarde van het economische risico daalt na deze ingrepen van 82,8 naar 3,8 miljoen euro per jaar. Het slachtofferrisico (niet getoond in figuur) laat eenzelfde forse daling zien van 1,90 tot 0,09 slachtoffers per jaar.

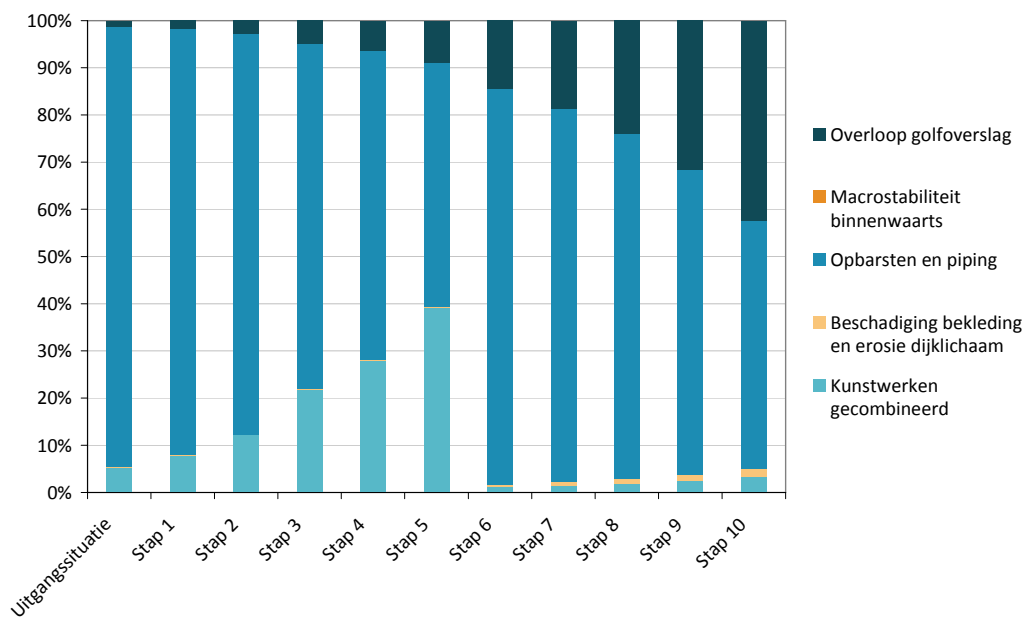
Na de drie zwakste dijkvakken volgen drie vakken (EE 289-299, EE 205-213 en VR 100-115) en een kunstwerk (gemaal Westdijk) langs de Eem en randmeren die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans van dijkkringgebied 45. Het verbeteren van deze onderdelen verkleint de overstromingskans van 1/410 naar 1/1.450 per jaar. Het overstromingsrisico (zowel schade en slachtoffers) wordt echter door deze verbeterstappen nauwelijks verlaagd. Dit komt omdat overstromingen vanuit de Eem en randmeren nauwelijks bijdragen aan het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 zoals al in hoofdstuk 6 is geconstateerd.



Figuur 37: De overstromingskans als functie van het aantal vakken waarin de faalkans voor het daar dominante faalmechanisme tot een verwaarloosbare omvang is teruggebracht (zie paragraaf 3.5 voor de dominante vakken).

De top 10 van dijkvakken en kunstwerken die de grootste bijdrage hebben aan de overstromingskans van dijkkringgebied 45 wordt compleet gemaakt met de twee resterende dijkvakken langs de Nederrijn (GR 000-011 en GR 011-022) en een dijkvak langs de Eem (EE 245-256). Door het verbeteren van deze drie vakken daalt de overstromingskans van 1/1.450 naar 1/3.540 per jaar. Het verbeteren van de dijkvakken langs de Nederrijn leidt tot een kleine reductie in het overstromingsrisico. De verwachtingswaarde van het economisch risico daalt van 3,7 naar 0,7 miljoen euro per jaar. Het slachtofferrisico daalt van 0,09 naar 0,02 slachtoffers per jaar. Het versterken van het dijkvak langs de Eem levert geen wezenlijke bijdrage aan de daling van het overstromingsrisico.

In Figuur 38 is de procentuele bijdrage van de faalmechanismen aan de overstromingskans per verbeterstap gegeven. In de uitgangssituatie wordt de overstromingskans bijna geheel veroorzaakt (90%) door het mechanisme *opbarsten en piping*. De eerste vijf verbeterstappen betreffen dan ook dijkvakken waarvoor de problemen met betrekking tot *opbarsten en piping* worden opgelost. Hierdoor krijgen de mechanismen *overloop en golfoverslag* (9%) en kunstwerken gecombineerd (40%) een procentueel grotere bijdrage aan de faalkans. In stap 6 wordt voor het gemaal Westdijk een verbetering uitgevoerd voor het mechanisme onder- en achterloopsheid. Na deze verbeterstap hebben de kunstwerken nagenoeg geen bijdrage aan de overstromingskans en is er weer een forse stijging in de bijdrage van het mechanisme *opbarsten en piping* te zien. In de stappen 7 t/m 10 worden voor vier dijkvakken verbeteringen uitgevoerd voor het mechanisme *opbarsten en piping*. Hierdoor neemt de procentuele bijdrage van dit faalmechanisme af en neemt de bijdrage van het mechanisme *overloop en golfoverslag* (42%) toe.



Figuur 38: De procentuele bijdrage van de faalmechanismen aan de overstromingskans per gerichte verbeterstap.

Resumé

De top 10 van dijkvakken en kunstwerken die de grootste bijdrage aan de overstromingskans van dijkkringgebied 45 hebben *opbarsten en piping* (en *onder- en achterloopsheid* bij kunstwerken) als maatgevend faalmechanisme. De drie vakken die het meest bijdragen aan de faalkans liggen aan de Nederrijn (Grebbedijk). Het versterken van deze vakken reduceert de overstromingskans van 1/100 naar 1/410 per jaar. Verdere versterkingen leiden ertoe dat de faalkans wordt gereduceerd naar 1/3.540 per jaar.

Hoewel ingrepen langs de Eem en randmeren de overstromingskans van de dijkkringgebied verder verkleinen hebben deze ingrepen nagenoeg geen effect op het verkleinen van het overstromingsrisico. Aangezien het overstromingsrisico bijna helemaal is toe te schrijven aan doorbraken vanuit de Nederrijn leiden de eerste drie verbeterstappen tot de grootste reductie van het overstromingsrisico. Het verbeteren van de dijkvakken GR 033-043, GR 043-054 en GR 022-033 leidt tot een reductie van de verwachtingswaarde van het economisch risico van 83 naar 4 miljoen euro per jaar. Het slachtofferrisico daalt van 1,90 naar 0,09 per jaar. Verdere ingrepen leiden tot een kleine verlaging van het overstromingsrisico.

7.4 Analyse 3: Effecten van een veiligere Grebbedijk

De overstromingskans én het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 worden voornamelijk bepaald door de 5,4 km lange Grebbedijk langs de Nederrijn. Uit Analyse 2 blijkt dat het reduceren van de faalkans van de Grebbedijk sterk doorwerkt in de reductie van het overstromingsrisico. Omdat het faalmechanisme *opbarsten en piping* het dominante mechanisme is, wordt in deze analyse nader gekeken naar de omvang van de ingrepen die noodzakelijk zijn.

Ook het waterschap Vallei en Eem en de provincies Utrecht en Gelderland hebben onderkend dat de Grebbedijk van groot belang is voor het overstromingsrisico van het dijkkringgebied. Zij zijn momenteel aan het onderzoeken in hoeverre het aanleggen van

een Deltadijk langs de Nederrijn een goed alternatief is voor het verlagen van het overstromingsrisico [ref. 31]. Hierin is de volgende definitie aangehouden:

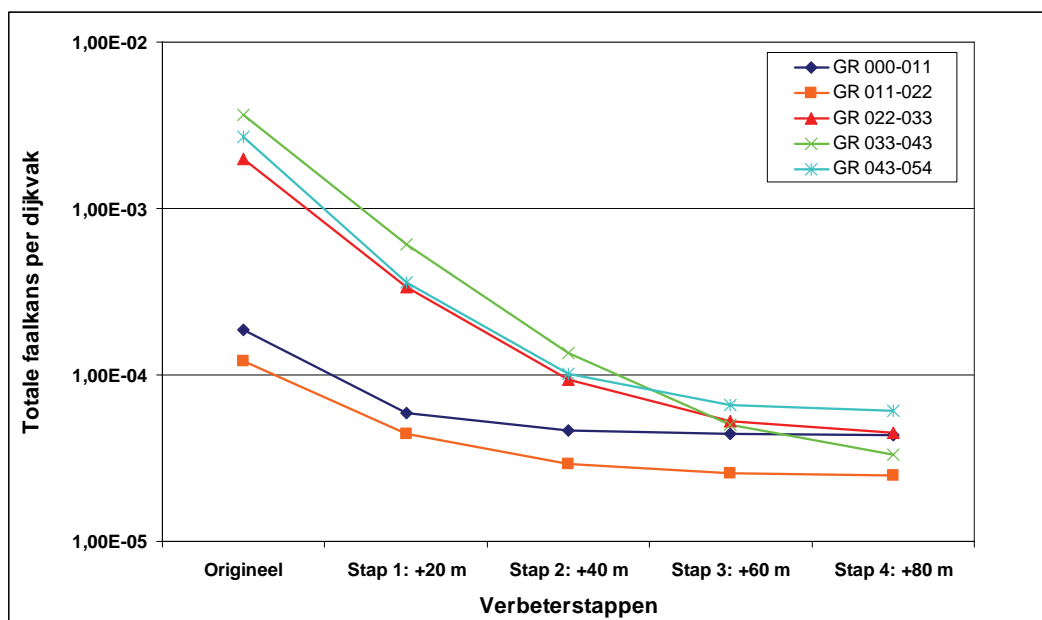
“Een dijk is een Deltadijk als deze zo hoog, breed of sterk is dat de kans op een oncontroleerbare overstroming praktisch nihil is.”

De faalkans van de Grebbedijk wordt voornamelijk bepaald door de kans op *opbarsten en piping*. Om meer gevoel te krijgen bij de afmetingen die nodig zijn om de faalkansen sterk te reduceren is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd waarbij de kwelweglengte van de dijk is verlengd in stappen van 20 m. Het doel hierbij is om een indicatie te krijgen van de benodigde afmetingen van de dijk waarbij de overstromingskans voornamelijk wordt bepaald door het mechanisme *overloop en golfoverslag* en de overige faalmechanismen geen significante bijdrage meer hebben aan de faalkans. Hiermee wordt dus afgeweken van de definitie die bij de verkenning van de mogelijkheden om van de Grebbedijk een Deltadijk te maken [ref. 31] is aangehouden.

De faalmechanismen *macrostabiliteit binnenwaarts* en *beschadiging bekleding en erosie dijklichaam* hebben in de huidige situatie al een zeer kleine bijdrage aan de faalkans van de dijkvakken van de Grebbedijk. Hier is niet nader naar gekeken in deze gevoeligheidsanalyse.

Faalkansen na stapsgewijs verlengen kwelweglengte

In de gevoeligheidsberekeningen is alleen de kwelweglengte aangepast. De overige parameters zijn hetzelfde gehouden. In de gevoeligheidsanalyse is de kwelweglengte verhoogd in 4 stappen van 20 m. Hierdoor wordt de faalkans van de dijkvakken steeds kleiner zoals in Figuur 39 is te zien. Omdat de faalkansen van de overige mechanismen hetzelfde blijven wordt de bijdrage van *opbarsten en piping* aan de overstromingskans ook steeds kleiner. Dit is te zien in Figuur 39 doordat de faalkans minder snel afneemt naarmate de kwelweglengte meer wordt verlengd.

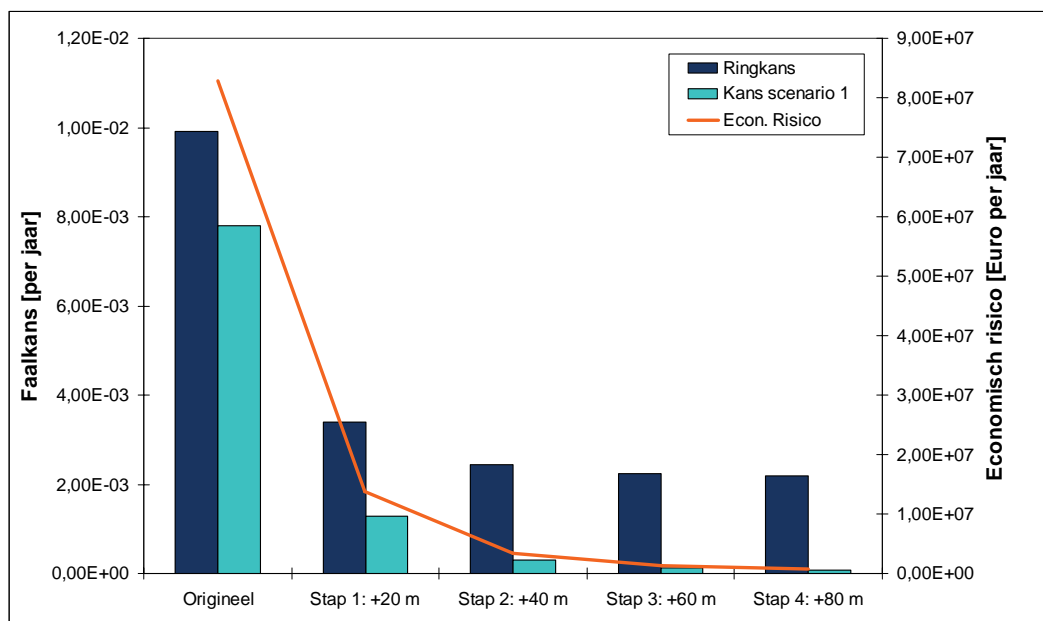


Figuur 39: Faalkansen van de dijkvakken in de Grebbedijk na vier verbeterstappen waarbij de kwelweglengte met 20 m wordt verlengd.

Overstromingsrisico na stapsgewijs verlengen kwelweglengte

Een verandering in de faalkans van de dijkvakken langs de Grebbedijk heeft grote effecten op het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45. Zoals al in hoofdstuk 6 is

geïllustreerd verzorgen doorbraken vanuit de Nederrijn 99,9% van het economisch risico en slachtofferrisico. Het verlengen van de kwelweglengte van de dijkvakken van de Grebbedijk laat een duidelijke reductie van de faalkans zien.



Figuur 40: Afname in de verwachtingswaarde van het economisch risico van dijkkringgebied 45 na vier verbeterstappen waarbij de kwelweglengte met 20 m wordt verlengd.

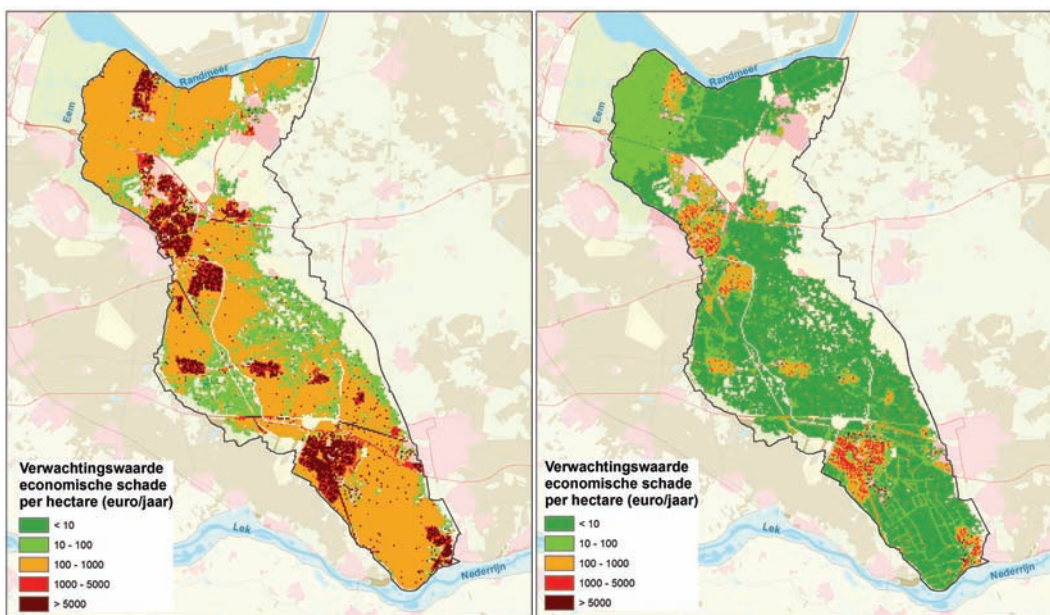
In Figuur 40 is de afname van de verwachtingswaarde van het economische risico uitgezet voor de vier verbeterstappen. Tevens zijn in deze grafiek de ringkans van dijkkringgebied 45 en de kans van overstromingsscenario 1 – Grebbedijk uitgezet. De verwachtingswaarde van het economische risico laat een sterke daling zien in de verbeterstappen 1 en 2. De verbeterstappen 3 en 4 laten maar een zeer kleine reductie in het economische risico zien. Dit komt omdat de afname in de faalkans voor deze stappen ook al klein is aangezien het mechanisme *opbarsten en piping* niet meer dominant is voor de faalkans van de dijkvakken. Figuur 40 toont ook dat de daling in de ringkans eerder afvlakt dan de daling in het economische risico. De daling van het economische risico volgt de daling in Scenariokans 1 – Grebbedijk. Dit is logisch gezien de grote gevolgen die gepaard gaan met een doorbraak van de Grebbedijk.

De verwachtingswaarde van het slachtofferrisico laat eenzelfde beeld zien als de verwachtingswaarde van het economische risico. Ook hier is de daling in het risico het sterkst in de eerste twee verbeterstappen waarna een vermindering in de afname optreedt.

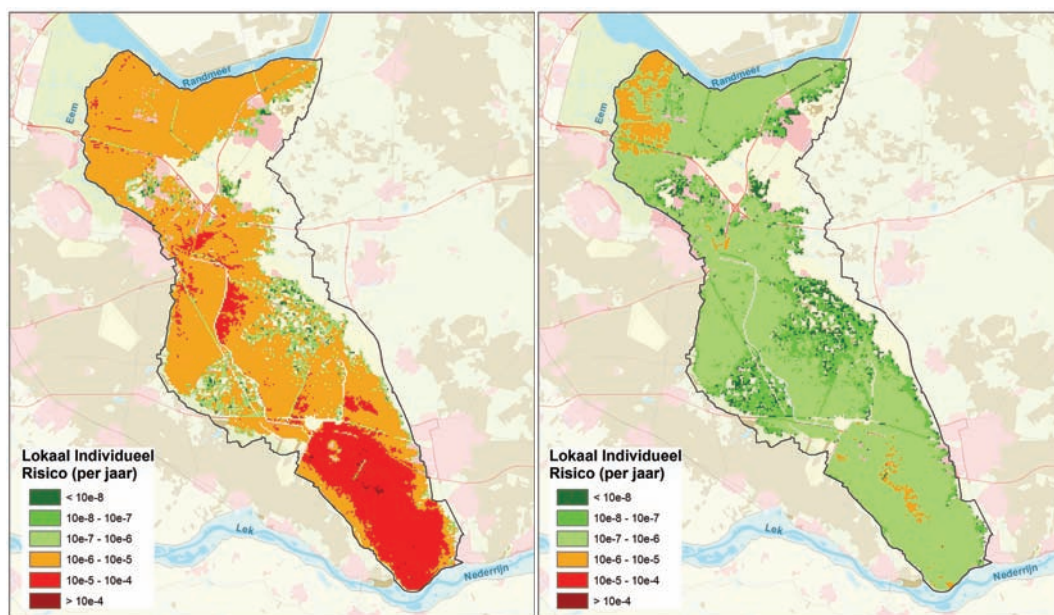
Ook de verwachtingswaarden van de economische schade (Figuur 41) en lokaal individueel risico (Figuur 42) per hectare laten een daling zien met een factor 25 tussen de huidige situatie en Stap 2: verlengen van de kwelweg met 40 m. Deze reductie is zichtbaar over het gehele dijkkringgebied. Ook na de Stappen 2 en 4 blijft een overstroming vanuit de Nederrijn zorgen voor de grootste bijdrage van het risico zoals blijkt uit Tabel 19.

Overstromingsscenario	Economisch risico [€/jaar]	Bijdrage economisch risico	Slachtoffer risico [n/jaar]	Bijdrage slachtoffer risico
Grebbedijk	3,28E+06	97,3%	7,56E-02	98,5%
Slaagse Dijk	1,60E+04	0,5%	2,44E-04	0,3%
Eemdijk	2,11E+04	0,6%	2,51E-04	0,3%
Westdijk	3,02E+04	0,9%	3,31E-04	0,4%
Oostdijk	1,60E+04	0,5%	2,04E-04	0,3%
Arkemheense Zeedijk	2,53E+03	0,1%	3,16E-05	0,0%
Meervoudig Eem- en randmeren	6,39E+03	0,2%	1,14E-04	0,1%
Dijkkringgebied 45	3,38E+06	100,0%	7,67E-02	100,0%

Tabel 19: Overstromingsscenario's na Stap 2 en hun bijdrage aan het economisch en slachtofferrisico.



Figuur 41: Verwachtingswaarde van de economische schade per hectare per jaar in de huidige situatie (links) en Stap 2: het verlengen van de kwelweglengte met 40 m (rechts).



Figuur 42: Lokaal individueel risico in de huidige situatie (links) en na (stap 2) het verlengen van de kwelweglengte met 40 m (rechts)

Resumé

De kans op een doorbraak in de Grebbedijk langs de Nederrijn zorgt voor 99,9% van het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door het mechanisme *opbarsten en piping*. Het waterschap Vallei en Eem en de provincies Utrecht en Gelderland onderzoeken opties om van de Grebbedijk een Deltadijk te maken. Het verlengen van de kwelweglengte om het faalmechanisme *opbarsten en piping* niet meer dominant te laten zijn leidt tot een grote reductie van het overstromingsrisico.

Verlengen van de kwelweg met 40 m laat een grote reductie van de faalkans en het overstromingsrisico zien. Verdere verlenging van de kwelweg leidt niet meer tot een verdere verkleining van de faalkans en het risico omdat het mechanisme *overloop en overslag* dan maatgevend is. Het verlengen van de kwelweg met 40 m leidt tot een reductie van het overstromingsrisico (zowel economisch als slachtoffer) met een factor 25.

7.5 Analyse 4: Effecten van de variatie van de D70 korreldiameter Grebbedijk

De samenstelling van de ondergrond bij de Grebbedijk aan de Nederrijn is niet goed bekend. Dit betreft vooral de korreldiameter D70 die in de pipinggevoelige zandlaag aanwezig is. Naast de DINO database, welke is gebruikt voor het berekenen van het overstromingsrisico uit hoofdstuk 6, zijn er ook andere bronnen zoals het lokale grondonderzoek en het materiaal dat uit de zandmeevoerende wellen opborrelt.

In deze paragraaf worden de effecten van de schematisatiekeuzes voor de samenstelling van de ondergrond en de effecten daarvan op het overstromingsrisico bepaald. Zoals al eerder is aangegeven zijn doorbraken vanuit de Nederrijn bepalend voor het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 en vanuit dat oogpunt is gekozen om de effecten van de schematisatiekeuzes inzichtelijk te maken. In Tabel 20 zijn de faalkansen voor de dijkvakken van de Grebbedijk gegeven voor de drie verschillende D70 korreldiameters. Tevens zijn de verwachtingswaarden van het economische risico en het slachtofferisico zijn opgenomen.

D70	200 µm	300 µm	400 µm
Bron	zand uit wellen	DINO database	lok. grondonderzoek
GR 000-011	1/270	1/6.800	1/100.000
GR 011-022	1/390	1/10.000	1/190.000
GR 022-033	1/36	1/510	1/5.900
GR 033-043	1/23	1/270	1/2.900
GR 043-054	1/43	1/380	1/3.200
Overstromingskans	1/10	1/110	1/420
Economisch risico [M€/jr]	810	83	10
Slachtoffer risico [per jaar]	18,6	1,9	0,2

Tabel 20: Faalkansen en risico's van de gevoeligheidsanalyses D70 Grebbedijk (per jaar)

Uit Tabel 20 blijkt dat de onzekerheid in de samenstelling van de ondergrond bij de Nederrijn van zeer grote invloed is op het berekende overstromingsrisico van dijkkringgebied 45. Indien de D70 wordt gebaseerd op het zand uit de zandmeevoerende wellen wordt het overstromingsrisico ongeveer een factor 10 keer zo groot. Dit is vergelijkbaar met de stijging in de faalkans. Er wordt opgemerkt dat de berekende faalkans voor de schematisatie met de D70 uit de zandmeevoerende wellen niet reëel is doordat eerst de fijne fractie uitspoelt en dus het zand uit de wellen niet representatief is voor het zand in de ondergrond. Het toont echter wel aan hoe gevoelig de overstromingskans en het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 is voor de D70 parameter.

Wanneer het lokale grondonderzoek wordt gebruikt voor de afleiding van de D70, wordt het overstromingsrisico een factor 10 kleiner. Deze reductie is ook waar te nemen in de faalkans van de individuele dijkvakken van de Grebbedijk. De reductie in de ringkans is kleiner omdat de dijkvakken langs de Eem en randmeren in deze situatie ook een significantie bijdrage leveren aan de overstromingskans. Doordat een doorbraak vanuit de Eem en randmeren echter leidt tot veel kleinere schades en aantallen slachtoffers dan een doorbraak vanuit de Nederrijn is het overstromingsrisico meer afhankelijk van de verandering in de faalkans van de dijkvakken van de Grebbedijk dan van de ringkans. De relatie tussen faalkans van de Grebbedijk en het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 is 1 op 1. Indien de faalkans met een factor 10 stijgt dan stijgen ook de verwachtingswaarden van het economische risico en het slachtofferrisico met een factor 10.

Voor het berekenen van het overstromingsrisico wordt uitgegaan van de schematisatie met de D70 uit de DINO database. In overleg met experts van Deltares en TNO is geconcludeerd dat dit de beste beschrijving van de ondergrond geeft. De schematisatie met het zand uit de wellen leidt tot grote faalkansen die niet reëel zijn gezien de bewezen sterkte van de dijk. De schematisatie met het lokale grondonderzoek geeft dermate kleine faalkansen dat deze niet goed overeenkomen met het regelmatig optreden van zandmeevoerende wellen. Dit komt vermoedelijk omdat de monsters in het lokale grondonderzoek niet zijn genomen uit de maatgevende pipinggevoelige zandlaag maar uit de grovere onderliggende zandlaag.

8 Conclusies en aanbevelingen

Dit hoofdstuk beschrijft de conclusies en aanbevelingen die volgen uit het onderzoek naar het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45: Gelderse Vallei. De conclusies en aanbevelingen betreffen de berekende faalkansen, de gevolgen, en het overstromingsrisico.

8.1 Conclusies

8.1.1 De kans op een overstroming in dijkkringgebied 45

De berekende overstromingskans voor dijkkringgebied 45 is 1/100 per jaar. De berekende overstromingskans is de kans dat de categorie a-kering faalt, waarbij een bres ontstaat en water het dijkkringgebied binnen kan stromen. Afhankelijk van de breslocatie(s) en de hydraulische condities waaronder de bres ontstaat worden bepaalde delen van het dijkkringgebied getroffen. Bij het bepalen van de overstromingskans is als uitgangspunt genomen dat de dijkversterking van de Eem- en randmeerdijken, die voor 2012-2015 is gepland, is uitgevoerd. Benadrukt wordt dat deze kans alleen betrekking heeft op de categorie a-kering van dijkkring 45. De categorie c-kering Putterzeedijk is niet beschouwd. De verwachting is dat de bijdrage van de Putterzeedijk aan de overstromingskans verwaarloosbaar klein is.

Dijkkring 45 is onder te verdelen in een noordelijk deel langs de Eem en randmeren en een zuidelijk deel langs de Nederrijn, de 5,4 km lange Grebbedijk. De kans op een overstroming vanuit de Eem en randmeren is 1/470 per jaar. Deze kans wordt bepaald door de maatgevende dijkvakken EE 205-213 en EE 289-299 en het gemaal Westdijk. Vanuit de Nederrijn is de kans op een overstroming 1/130 per jaar en daarmee bepalend voor de overstromingskans van het dijkkringgebied.

De gecombineerde faalkans voor de kunstwerken bedraagt 1/1.900 per jaar. De kunstwerken dragen daarmee voor 5,4% bij aan de overstromingskans van het dijkkringgebied als geheel. De gecombineerde faalkans van de kunstwerken wordt nagenoeg geheel bepaald door gemaal Westdijk.

De overstromingskans voor dijkkringgebied 45 wordt gedomineerd door het faalmechanisme *opbarsten en piping* met een bijdrage van 93,4% aan de overstromingskans. De overstromingskans voor dit faalmechanisme bedraagt 1/110 per jaar. Deze wordt voornamelijk veroorzaakt door drie dijkvakken in de Grebbedijk GR 033-043, GR 043-054 en GR 022-033 met faalkansen van respectievelijk 1/270, 1/380 en 1/510 per jaar voor *opbarsten en piping*. De faalmechanismen *onder- en achterloopsheid* bij kunstwerken en *overloop en golfoverslag* hebben met respectievelijk 5,4% en 1,2% een kleine bijdrage aan de overstromingskans. De overige mechanismen dragen niet bij aan de overstromingskans.

De faalkansen van de dijken langs de Eem en randmeren zijn over het algemeen klein met faalkansen kleiner dan 1/10.000 per jaar. Dit mag verwacht worden van dijken waarvan het dijkversterkingsplan is doorgerekend. De vakken EE 205-213 en EE 289-299 hebben een faalkans van 1/1.800 per jaar voor het mechanisme *opbarsten en piping* waardoor ze in de top 5 van dominante vakken staan.

8.1.2 *De gevolgen van overstromingen in dijkkringgebied 45*

De gevolgen van overstromingen in dijkkringgebied 45 zijn sterk afhankelijk van de doorbraaklocatie en het hoogte verschil binnen het gebied. Dit komt door de verschillende belastingsystemen die bij dit dijkkringgebied van toepassing zijn. De belasting vanuit de Eem en de randmeren is aanzienlijk lager dan die vanuit de Nederrijn. Bij een doorbraak van de Grebbedijk overstroomt vrijwel het gehele dijkkringgebied. Bij een doorbraak van de Eem- of randmeerdijken blijft de inundatie vaak beperkt tot de omgeving van de breslocatie.

Voor de Eem- en randmeerdijken ligt de schade als gevolg van een doorbraak tussen 25 en 90 miljoen euro afhankelijk van de belastingscondities. Het aantal slachtoffers is nagenoeg 0 bij een georganiseerde evacuatie en loopt op tot 5 zonder evacuatie. De schades en het aantal slachtoffers zijn relatief laag omdat de overstromingen beperkt blijven tot een klein en landelijk gebied. Ook blijft de overstromingsdiepte beperkt tot circa 0,5 m met uitschieters tot 1 m.

Een overstroming vanuit de Nederrijn leidt tot schades tussen de 8,6 en 12,3 miljard euro. Het aantal slachtoffers varieert tussen 95 bij een georganiseerde evacuatie en 1.235 zonder evacuatie. Bij een doorbraak in de Grebbedijk stroomt nagenoeg de hele Gelderse Vallei onder water. Het verval over de dijk is groot en er stroomt een grote hoeveelheid water het dijkkringgebied in. Doordat de maaiveldhoogte bij de Grebbedijk circa 10 m hoger ligt dan in het noorden van het dijkkringgebied stroomt het water door het hele gebied. Vooral in het gebied ten zuiden van de A12 ontstaan grote waterdieptes van meer dan 3 m.

Het aantal slachtoffers wordt door preventieve evacuatie significant sterk gereduceerd. De hoeveelheid inwoners die kunnen worden geëvacueerd is afhankelijk van de mate waarin een overstroming verwacht kan worden. Hoogwater op de Nederrijn is ruim van te voren bekend terwijl dit voor hoogwater op de Eem en randmeren minder het geval is. Bij een georganiseerde evacuatie bij hoogwater op de Nederrijn kan bijna 90% van de inwoners worden geëvacueerd. Bij hoogwater op de Eem en randmeren is dit 80%. De kans op een georganiseerde evacuatie is 60% bij hoogwater op de Nederrijn en 32% bij hoogwater op de Eem en randmeren.

De gevolgen van een overstroming bij een doorbraak van de Grebbedijk worden beïnvloed door de aanwezigheid van verhoogde lijnelementen in het landschap. De in de 17^e eeuw aangelegde Slaperdijk deelt het dijkkringgebied op in een noordelijk en zuidelijk deel en heeft invloed op het overstromingspatroon. De Slaperdijk heeft een vertragende werking. Ook de ligging van de snelwegen A1 en A28 heeft invloed op het overstromingspatroon. Deze snelwegen zorgen er waarschijnlijk voor dat de nieuwbouwwijk Vathorst in Amersfoort niet onder water komt te staan.

8.1.3 *Het overstromingsrisico in dijkkringgebied 45*

Door de kansen op de verschillende overstromingsscenario's te combineren met de resultaten van overstromingsberekeningen is het overstromingsrisico in beeld gebracht. Daarbij is zowel gekeken naar het economisch risico als het slachtofferrisico, zie Tabel 21.

Economisch risico	Verwachtingswaarde economische schade (M€ per jaar)	83
	Minimale economische schade bij een overstroming (M€)	25
	Gemiddelde ⁴ economische schade per overstroming (M€)	8.300
	Maximale economische schade bij een overstroming (M€)	12.300
Slachtofferrisico	Verwachtingswaarde aantal slachtoffers (per jaar)	1,9
	Minimaal aantal slachtoffers bij een overstroming	0
	Gemiddeld aantal slachtoffers per overstroming	190
	Maximaal aantal slachtoffers bij een overstroming	1.250
	Overlijdenskans van een individu per locatie exclusief het effect van preventieve evacuatie (per jaar) (plaatsgebonden risico)	Vrijwel overal groter dan 1/100.000 m.u.v. de hoger gelegen gebieden. Nabij Veenendaal delen groter dan 1/10.000.
	Overlijdenskans van een individu per locatie inclusief het effect van preventieve evacuatie (per jaar) (lokaal individueel risico)	Vrijwel overal groter dan 1/1.000.000 m.u.v. de hoger gelegen gebieden. Ten zuiden van A12 groter dan 1/100.000.

Tabel 21: Resultaten risicoberekeningen voor dijkkringgebied 45.

De berekende verwachtingswaarde van de economische schade bedraagt 83 miljoen euro per jaar. In geval van een overstroming is de economische schade gemiddeld 8,3 miljard euro. Het economisch risico wordt voor 99,9% bepaald door doorbraken van de Grebbedijk. Dit komt door de veel hogere schades bij een doorbraak in combinatie met de grotere faalkans voor de Grebbedijk.

De berekende verwachtingswaarde van het aantal slachtoffers bedraagt 1,9 slachtoffers per jaar. In geval van een overstroming vallen gemiddeld 190 slachtoffers. Ook het slachtofferrisico komt voor bijna 100% voor rekening van doorbraken van de Grebbedijk.

Het plaatsgebonden risico (de kans dat een persoon die continu binnen dit gebied verblijft, het slachtoffer wordt van een overstroming) laat een onderscheid zien tussen het zuidelijk en het noordelijk deel van het dijkkringgebied. In het zuidelijk deel is het plaatsgebonden risico op enkele locaties nabij Veenendaal groter dan 1/10.000 per jaar. In het grootste deel van het dijkkringgebied ligt het plaatsgebonden risico tussen 1/10.000 en 1/100.000 per jaar. Op de hoger gelegen gebieden, zoals het in het noordoosten bij Nijkerk, is het plaatsgebonden risico verwaarloosbaar klein.

Het lokaal individueel risico (de kans per jaar dat een persoon die zich permanent op een bepaalde plaats in het dijkkringgebied bevindt, het slachtoffer wordt van een overstroming van dit dijkkringgebied, waarbij de mogelijkheden voor preventieve evacuatie zijn meegenomen) laat eveneens een duidelijk verschil zien binnen het dijkkringgebied. Het lokaal individueel risico is overal een factor 4,3 lager dan het plaatsgebonden risico. Deze factor volgt direct uit de gemiddelde evacuatiefractie. Het lokaal individueel risico is vrijwel overal groter dan 1/1.000.000 per jaar. In het gebied ten zuiden van de A12 ligt het lokaal individueel risico tussen de 1/10.000 en 1/100.000 per jaar.

⁴ De gemiddelde economische schade of het gemiddeld aantal slachtoffers is de verwachtingswaarde gedeeld door de overstromingskans

De kans dat een groep van ten minste 100 personen slachtoffer wordt van een overstroming is vrijwel gelijk aan de overstromingskans van het dijkkringgebied (1/100 per jaar). De kans dat een groep van ten minste 1000 personen slachtoffer wordt van een overstroming is circa 1/1.000 per jaar. De kans dat er meer slachtoffers vallen is verwaarloosbaar klein. Het groepsrisico wordt gedomineerd door doorbraken vanuit de Grebbedijk aangezien bij overstromingen vanuit de Eem en randmeren het maximum aantal slachtoffers en de kans daarop een stuk kleiner is.

De doelstelling van het PKB Ruimte voor de Rivier is een waterstanddaling van ongeveer 30 cm op de Nederrijn bij maatgevende omstandigheden. De overstromingskans van dijkkringgebied 45 wordt hierdoor met ongeveer een factor 2 verkleind van 1/100 naar 1/180 per jaar. Omdat een doorbraak vanuit de Nederrijn bijna het gehele overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 bepaalt, leidt de waterstandverlaging ook tot een grote verlaging van het overstromingsrisico. De verwachtingswaarde van het economische risico daalt van 83 naar 38 miljoen euro per jaar. De verwachtingswaarde van het slachtofferrisico daalt van 1,9 naar 0,8 slachtoffers per jaar.

Door gerichte ingrepen in de waterkeringen neemt de overstromingskans van dijkkringgebied 45 af. Zo leidt een dijkverbetering over een lengte van circa 3,2 km langs de Grebbedijk gericht op het faalmechanisme *opbarsten en piping* tot een afname van de overstromingskans van dijkkringgebied 45 met een factor 4 van 1/100 per jaar naar 1/410 per jaar (de kans op een overstroming vanuit de Nederrijn daalt met een factor 20). Het overstromingsrisico daalt hierdoor met een factor 20. Het economische risico gaat van 83 naar 4 miljoen euro per jaar en het slachtofferrisico gaat van 1,9 naar 0,1. Ingrepen in de waterkeringen langs de Eem en randmeren leiden wel tot een verlaging van de overstromingskans maar hebben nagenoeg geen effect op het overstromingsrisico.

Aangezien het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 bijna volledig wordt bepaald door doorbraken van de Grebbedijk en gerichte ingrepen hier tot een grote reductie van het overstromingsrisico leiden is nader gekeken naar de specifieke ingrepen. Omdat de faalkansen worden gedomineerd het mechanisme *opbarsten en piping* is gekeken naar de effecten van een verlenging van de kwelweg. Verlengen van de kwelweg met 40 m laat een grote reductie in de faalkans en het overstromingsrisico zien. Verdere verlenging van de kwelweg leidt niet meer tot een verdere verkleining van de faalkans en het overstromingsrisico omdat het mechanisme *overloop en golfoverslag* dan maatgevend is. Het verlengen van de kwelweg met 40 m leidt tot een reductie van het overstromingsrisico (zowel economisch als slachtoffer) met een factor 25.

De beschikbare informatie over de opbouw van de ondergrond bij de Grebbedijk is niet eenduidig. Dit is vooral van belang voor het mechanisme *opbarsten en piping*. Voor de schematisatie van de ondergrond van de Grebbedijk is gebruik gemaakt van de DINO database. In overleg met experts van Deltares en TNO is geconcludeerd dat dit de beste beschrijving van de ondergrond geeft. Tevens zijn er waarnemingen beschikbaar van zandmeevoerende wellen en het lokale grondonderzoek. Deze drie bronnen laten verschillende korrelgroottes in de ondergrond zien. Door gebruik te maken van het zand uit de wellen in de schematisatie wordt de faalkans een factor 10 groter. Indien het lokale grondonderzoek wordt gebruikt wordt de faalkans een factor 10 kleiner. Vanwege de 1 op 1 relatie tussen de faalkans van de Grebbedijk en het overstromingsrisico varieert het risico ook met een factor 10. De samenstelling van de ondergrond bij de Grebbedijk is dus van groot belang voor de overstromingskans van gebied 45.

8.2 Aanbevelingen

Het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45, Gelderse Vallei wordt bijna geheel veroorzaakt door doorbraken vanuit de Nederrijn. Doorbraken vanuit de Eem en randmeren hebben een bijdrage van minder dan 1%. Dit komt omdat de gevolgen bij een doorbraak vanuit de Nederrijn vele malen groter zijn dan die bij een doorbraak vanuit de Eem en randmeren. Ten tijde van dit schrijven wordt er echter wel hard gewerkt aan het versterken van de Eem en randmeerdijken omdat deze in de tweede toetsronde zijn afgekeurd. Dit leidt tot een kleinere faalkans van de dijken.

Echter voor dijkkringgebied 45 geldt dat het verder versterken van de, aan de huidige eisen voldoende, Grebbedijk het overstromingsrisico veel sterker reduceert. Dit kan met simpele ingrepen voor een relatief kort traject.

Het is dan ook aan te bevelen om bij het versterken van waterkeringen in een dijkkring niet alleen te kijken naar de technische aspecten van de dijk (voldoet deze aan de eisen) maar ook naar de gevolgen van een doorbraak. Door naar het overstromingsrisico te kijken, kan beoordeeld worden hoe de waterveiligheid in een gebied het meest effectief en efficiënt kan worden vergroot.

Uit de analyse van dijkkringgebied 45 blijkt dat een wettelijke norm die voor alle dijktrajecten van een dijkkring hetzelfde is, inefficiënt is vanwege de grote verschillen in de gevolgen bij doorbraken in verschillende dijktrajecten. Het is daarom aan te bevelen om bij het normeren van waterkeringen goed naar de bijdrage aan het overstromingsrisico te kijken en eventueel differentiatie aan te brengen in de normering binnen een dijkkring.

Het overstromingsrisico van dijkkringgebied 45 wordt vooral bepaald door het mechanisme *opbarsten en piping* van de Grebbedijk. De samenstelling van de ondergrond is hierbij van groot belang. Omdat het gebied van de Grebbedijk tussen de stuwwallen van de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug ligt kan hier een relatief grote heterogeniteit in de ondergrond worden verwacht. Uit gevoeligheidsanalyses naar de korrelgrootte in de ondergrond blijkt dat deze parameter de overstromingskans en het overstromingsrisico met een factor 10 kan vergroten of verkleinen. Het uitvoeren van een gedetailleerd grondonderzoek waaruit een goed beeld ontstaat van de ligging, dikte en samenstelling van de zandbanen onder de dijk verdient dan ook zeer de aanbeveling.

De opbouw van de ondergrond bij het gemaal Westdijk is niet bekend. Hoewel de verwachting is dat hier ondoorlatende lagen aanwezig zijn, kan de aanwezigheid van een zandlaag niet uitgesloten worden. Hierdoor is de kans op het optreden van *onder- en achterloopsheid* optreden relatief groot. Het is aan te bevelen om nader onderzoek uit te voeren naar de grondopbouw bij gemaal Westdijk. Dit kan uitsluitend geven over de gevoeligheid voor *onder- en achterloopsheid* van het gemaal.

Bijlage A Literatuur

- ref. 1 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Van Ruwe Data tot Overstromingsrisico, versie 2.3, 19 oktober 2011.
- ref. 2 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45, Gelderse Vallei, Achtergrondrapport, augustus 2012.
- ref. 3 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45, Gelderse Vallei, Overall Kunstwerkrapport, september 2012.
- ref. 4 <http://www.geologievannederland.nl/landschap/landschapsvormen/sporen-van-landijs>.
- ref. 5 Waterschap Vallei en Eem, Waterbeheersplan 2010-2015, oktober 2009.
- ref. 6 <http://wijzeman.wordpress.com/2011/04/18/de-grebbelinie-de-belangrijkste-verdedigingslinie-van-nederland-in-de-tweede-wereldoorlog-is-nu-rijksmonument/> / Provincie Utrecht.
- ref. 7 <http://www.grebbelinie.nl>.
- ref. 8 Directie Algemene Dienst van de Rijkswaterstaat, Beschrijving van de provincie Utrecht behorende bij de waterstaatskaart, Den Haag 1968.
- ref. 9 H.Th.L. Massop, W.C. Knol, Historisch Waterbeheer, Een kwantitatieve benadering van historische watersystemen: definities en voorbeelden, Alterra-rapport 1145, Alterra, Wageningen, 2005.
- ref. 10 Baron Sloet L.A.J.W., Fijnje H.F., Beschrijving van den Watervloed in Gelderland in Maart 1855, Arnhem, 1856.
- ref. 11 Steenbergen, H.M.G.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M., Koster, T., 2008, Theoriehandleiding PC-Ring versie 5.0. Deel A: Mechanismebeschrijvingen, 29-02-2008, TNO.
- ref. 12 Steenbergen, H.M.G.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M., 2003, Theoriehandleiding PC-Ring, Versie 4.0, Deel B: Statistische modellen, april 2003, TNO.
- ref. 13 Steenbergen, H.M.G.M., Vrouwenvelder, A.C.W.M., 2003, Theoriehandleiding PC-Ring, Versie 4.0, Deel C: Rekentechnieken, april 2003, TNO.
- ref. 14 Grontmij Nederland B.V., Ontwerp-projectplan Veiligheid Zuidelijke randmeren en Eem, 99058289, revisie D3, april 2011.
- ref. 15 DHV, Veiligheidstoetsing dijkkring 45 en dijkkring 46 – samenvattend rapport 3e toetsronde (2006-2011), rapportnr WA-RK20100186, september 2010.
- ref. 16 Maaskant, B. et al. 2009, Evacuatieschattingen Nederland. PR1718.10. HKV LIJN IN WATER, juli 2009.
- ref. 17 VNK2, 2009, Conditionele kansen en evacuatiefracties binnen VNK2 Memorandum, oktober 2009.
- ref. 18 Kok, M., et al., 2004, Standaardmethode2004 Schade en Slachtoffers als gevolg van overstromingen, DWW-2005-005, HKV LIJN IN WATER, november 2004.
- ref. 19 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Inlaatduiker nabij Arkersluis, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, juni 2012.
- ref. 20 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Arkersluis, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, juni 2012.
- ref. 21 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Laakse Duiker, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, april 2012.

-
- ref. 22 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Gemaal Veendijk, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, juni 2012.
- ref. 23 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Gemaal Westdijk, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, juni 2012.
- ref. 24 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Gemaal de Haar, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, april 2012.
- ref. 25 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Gemaal Zeldert, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, april 2012.
- ref. 26 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Witte Sluis, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, april 2012.
- ref. 27 Rijkswaterstaat-Waterdienst, Dijkkring 45 Gelderse Vallei – Achtergrondrapport Grebbesluit, Veiligheid van Nederland in Kaart 2, mei 2012.
- ref. 28 Projectorganisatie Ruimte voor de Rivier, Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier, Deel 3, Nota van Toelichting, februari 2006.
- ref. 29 Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Hydraulische Randvoorwaarden Primaire Waterkeringen voor de derde toetsronde 2006-2011 (HR2006), ISBN 978-90-369-5761-8, augustus 2007.
- ref. 30 Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Hydraulische Randvoorwaarden voor Primaire keringen (HR1996).
- ref. 31 Provincie Utrecht, Verkenning Grebbedijk – Grebbedijk als Deltadijk?, oktober 2010.

Bijlage B Begrippenlijst

Afschuiving

Een verplaatsing van (een deel van) een grondlichaam. De term afschuiving wordt gebruikt bij het faalmechanisme *macrostabiliteit binnenwaarts*.

Beheerder

De overheid waarbij de (primaire) waterkering in beheer is.

Beheersgebied

Het in de legger gespecificeerd areaal dat als waterkering wordt aangemerkt en door de waterkeringbeheerder wordt beheerd.

Bekleding

De afdekking van de kern van een dijk ter bescherming tegen golfaanvallen en langsstromend water. De taludbekleding bestaat uit een erosiebestendige toplaag, inclusief de onderliggende vlijlaag, filterlaag, kleilaag en/of geotextiel.

Belasting

De op een constructie (een waterkering) uitgeoefende in- en uitwendige krachten.

Benedenrivierengebied

Het door Rijn en Maas gevoede rivierengebied ten westen van de lijn Schoonhoven – Werkendam – Dongemond, inclusief Hollands Diep en Haringvliet, zonder de Hollandsche IJssel.

Berm

Een extra verbreding aan de binnendijkse of buitendijkse zijde van de dijk om het dijklichaam extra steun te bieden, zandmeevoerende wellen te voorkomen en/of de golfoploop te reduceren.

Binnentalud

Het hellend vlak van het dijklichaam aan de binnenzijde van de dijk.

Bovenrivierengebied

Het door Rijn en Maas gevoede rivierengebied ten oosten van de lijn Schoonhoven - Werkendam - Dongemond. De waterstanden worden daar niet beïnvloed door het getij van de Noordzee.

Bres

Een doorgaand gat in de waterkering, dat is ontstaan door overbelasting.

Buitentalud

Hellend vlak van het dijklichaam aan de kerende zijde.

Buitenwater

Oppervlaktewater waarvan de waterstand direct onder invloed staat van de waterstand op zee, de grote rivieren, het IJsselmeer of het Markermeer.

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.

Dijkkringsegment

Een deel van de dijkkring, dat beheerd wordt door één beheerder en dat bestaat uit één type waterkering.

Dijkvak

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

Faalmechanisme

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

Falen

Het niet meer vervullen van de primaire functie (water keren) en/of het niet meer voldoen aan vastgestelde criteria.

Gemiddelde waarde van een stochast

De verwachtingswaarde () van een stochast.

Gevolgenmatrix

De gevolgenmatrix is een dataset per dijkkringgebied, met voor elk ringdeel een breslocatie en per breslocatie een aantal overstromingsberekeningen en daarbij behorende gevolgen (resultaten van HIS-SSM berekeningen).

Golfoploop

De hoogte boven de stilwaterstand tot waar een tegen het talud oplopende golf reikt (de 2% golfoploop wordt door 2% van de golven overschreden).

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.

Karakteristieke waarde

Een op basis van een statistische analyse bepaalde waarde met een kleine onder- of overschrijdingskans. In de praktijk wordt voor materiaal-eigenschappen vaak uitgegaan van een waarde met een onderschrijdingskans van 5%.

Kruin

De strook tussen buitenkruinlijn en binnenkruinlijn.

Kruinhoogte

De hoogte van de buitenkruinlijn.

Kwel

Het uit treden van grondwater onder invloed van een grotere stijghoogte aan de buitenzijde van het beschouwde gebied.

Kwelsloot

Een sloot aan de binnenzijde van de dijk die tot doel heeft kwelwater op te vangen en af te voeren.

Kwelweg

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 het dijkkringgebied 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.

Marsroute

Voorloper van het onderzoeksprogramma "Overstromingsrisico's: een studie naar kansen en gevolgen"

Modelfactor

Een factor die onzekerheden in de modellering tot uitdrukking brengt.

NAP

Normaal Amsterdams Peil.

Ontwerppunt

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

Opbarsten

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

Opdrijven

Het bezwijken van de grond onder invloed van wateroverdrukken door het ontbreken van verticaal evenwicht in de grond. De term opdrijven wordt gebruikt bij het faalmechanisme *macrostabiliteit binnenwaarts*.

Overloop

Het verschijnsel waarbij water over de kruin van een dijk stroomt omdat de buitenwaterstand hoger is dan de kruin van de dijk.

Overschrijdingsfrequentie

Het gemiddeld aantal keren dat een waarde wordt bereikt of overschreden in een bepaalde periode.

Overschrijdingskans

De kans dat het toetspeil wordt bereikt of overschreden.

Overstromingskans

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

Overstromingsrisico

De combinatie van kansen en gevolgen van overstromingen. De gevolgen worden uitgedrukt in schade of slachtoffers. Het slachtofferrisico wordt ondermeer weergegeven als groepsrisico en als lokaal individueel risico.

Overstromingsberekening

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

Overstromingsscenario

Een unieke combinatie van falende en niet-falende ringdelen die leidt tot de overstroming van (een deel van) een dijkringgebied.

PC-Ring

Een probabilistisch model dat 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.

PC-ViNK

Een applicatie die het mogelijk maakt om een segment binnen een dijkring in vakken op te knippen en waarmee de data voor het VNK-instrumentarium beheerd kan worden. PC-ViNK draait op een centrale server zodat het gehele werkproces in VNK2 traceerbaar is.

Plaatsgebonden risico (PR)

De kans dat een persoon, die zich continu op een bepaalde plaats in het dijkkringgebied 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

Reststerkte

Reststerkte is een verzamelbegrip voor de resterende sterkte van de dijk nadat een initiërend faalmechanisme is opgetreden. In VNK2 wordt er bij het faalmechanisme *beschadiging bekleding en erosie 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 dijkkring waarbinnen de locatie van de bres geen significante invloed heeft op het overstromingspatroon en de optredende schade.

RisicoTool

Applicatie waarmee het overstromingsrisico van het dijkkringgebied berekend kan worden, op basis van beschikbare scenario-kansen en de gevolgenmatrix.

Scenariokans

De kans op een overstromingsscenario.

Strijklengte

De lengte van het voor de waterkering gelegen wateroppervlak waarover de wind waait.

Stabiliteitsfactor

De factor waarin het verschil tussen sterkte en belasting wordt uitgedrukt voor het faalmechanisme *macrostabiliteit binnenwaarts*.

Standaardafwijking

Een maat voor de spreiding rond het gemiddelde.

Stochastische variabele

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

Systeemwerking

Dit zijn effecten waar een doorbraak in de ene dijkkring leidt tot het ontlasten of juist overstromen (cascade-effect) van een andere dijkkring. Systeemwerking betreft dus de interactie tussen twee of meer dijkringen. Systeemwerking wordt niet meegenomen in VNK2.

Teen

De onderrand van het dijklichaam aan de buitendijkse zijde van de dijk (de overgang van dijk naar voorland).

Variatiecoëfficiënt (V)

De verhouding tussen de standaardafwijking () en het gemiddelde ():
 $V =$

Veiligheidsnorm

Eis waaraan een primaire waterkering moet voldoen, aangegeven als de gemiddelde overschrijdingskans - per jaar - van de hoogste hoogwaterstand waarop de tot directe kering van het buitenwater bestemde primaire waterkering moet zijn berekend, mede gelet op overige het waterkerend vermogen bepalende factoren.

Verhang

De verhouding tussen het verschil in stijghoogte tussen twee punten en de afstand tussen die punten; wordt ook wel gradiënt genoemd.

Verval

Het verschil in stijghoogte tussen twee punten, bijvoorbeeld de twee zijden van een waterkering.

Verwachtingswaarde van een stochast

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 schaaldijk valt onder de definitie van voorland. Het voorland kan zowel onder als boven water liggen.

Werklijn

De relatie tussen de rivierafvoer en de statistisch bepaalde overschrijdingsfrequentie van de rivierafvoer, zoals deze door de Minister van Verkeer en Waterstaat wordt gehanteerd voor het bepalen van de ontwerpafoer voor de versterking van dijken.

Zandmeevoerende wel

Een wel die zand meevoert uit de ondergrond.

Bijlage C Vakindeling en locatie-aanduiding dijkkring 45

Tabel C-1: Vakindeling en keuze faalmechanismen

Dijkvak*	Reden vakgrens	Lengte [m]	Faalmechanismen			
			Overloop en golfoverslag	Macrostabieliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Falen bekleding en erosie
VR 000-048	Categorie C-kering					
VR 048-056	Categorie A-kering	800	X			X
VR 056-063	Dijkvak WS, versterking	700	X			
VR 063-076	Einde versterkingstraject	1.300	X		X	
VR 076-081	Begin versterkingstraject	500	X			
VR 081-089	Einde versterkingstraject	800	X			
VR 089-100	Begin versterkingstraject	1.100	X			
VR 100-114	Ringdeelgrens	1.400	X	X	X	X
VR 114-119	Bodemdeelvak-, dijkvakgrens	500	X			
VR 119-127	Bijzondere constructies	800	X			
VR 127-132	Dijkprofiel kering in grond	500	X		X	X
VR 132-139	Ringdeelgrens	700	X			
VR 139-148	Stabiliteitsprobleem weerszijden	900	X		X	
EE 148-152	Segmentgrens	400	X			
EE 152-163	Andere belasting bekleding /	1.100	X			X
EE 163-175	Wijziging versterkingsprofiel	1.200	X			
EE 175-184	Ringdeelgrens	900	X			
EE 184-188	Kolken binnendijks	400	X		X	
EE 188-194	Geen kolken	600	X			
EE 194-205	Dijkvak WS, schaaldijk	1.100	X			
EE 205-213	Voorland	800	X		X	
EE 213-225	Geen voorland; constructie BUT	1.200	X			
EE 225-238	Ringdeelgrens	1.300	X			
EE 238-245	Geen dijkversterking	700	X			
EE 245-256	Dijkversterking	1.100	X		X	
EE 256-267	Type versterking	1.100	X		X	X
EE 267-277	Voorland	1.000	X	X	X	
EE 277-289	Schaaldijk	1.200	X			
EE 289-299	Ander versterkingsprofiel	1.000	X		X	
EE 299-308	Einde versterking	900	X			
EE 308-318	Inpassing Glaswerk	1.000	X			
EE 318-333	Hoogteprobleem	1.100	X			
GR 000-011	Begin Grebbedijk	1.100	X		X	X
GR 011-022	Dijkvak, STBK	1.100	X	X	X	
GR 022-033	Dijkvak, STBI	1.100	X		X	X
GR 033-043	Hoogte, Piping	1.000	X	X	X	
GR 043-054	Hoogte, Piping	1.100	X		X	
Totaal		33.500	36	4	15	7

Tabel C-2: Indeling vakken naar ringdelen

Dijkvak*	Lengte [m]	Ringdeel nr	Naam ringdeel
VR 000-048		-	-
VR 048-056	800	6	Arkemheense Zeedijk
VR 056-063	700	6	Arkemheense Zeedijk
VR 063-076	1.300	6	Arkemheense Zeedijk
VR 076-081	500	6	Arkemheense Zeedijk
VR 081-089	800	6	Arkemheense Zeedijk
VR 089-100	1.100	6	Arkemheense Zeedijk
VR 100-114	1.400	5	Oostdijk
VR 114-119	500	5	Oostdijk
VR 119-127	800	5	Oostdijk
VR 127-132	500	5	Oostdijk
VR 132-139	700	4	Westdijk
VR 139-148	900	4	Westdijk
EE 148-152	400	4	Westdijk
EE 152-163	1.100	4	Westdijk
EE 163-175	1.200	4	Westdijk
EE 175-184	900	3	Eemdijk
EE 184-188	400	3	Eemdijk
EE 188-194	600	3	Eemdijk
EE 194-205	1.100	3	Eemdijk
EE 205-213	800	3	Eemdijk
EE 213-225	1.200	3	Eemdijk
EE 225-238	1.300	2	Slaagse dijk
EE 238-245	700	2	Slaagse dijk
EE 245-256	1.100	2	Slaagse dijk
EE 256-267	1.100	2	Slaagse dijk
EE 267-277	1.000	2	Slaagse dijk
EE 277-289	1.200	2	Slaagse dijk
EE 289-299	1.000	2	Slaagse dijk
EE 299-308	900	2	Slaagse dijk
EE 308-318	1.000	2	Slaagse dijk
EE 318-333	1.100	2	Slaagse dijk
GR 000-011	1.100	1	Grebbedijk
GR 011-022	1.100	1	Grebbedijk
GR 022-033	1.100	1	Grebbedijk
GR 033-043	1.000	1	Grebbedijk
GR 043-054	1.100	1	Grebbedijk

Tabel C-3: Kunstwerken met locatie aanduiding in dijkkring 45

Kunstwerk	Type	VNK nummer	Hm	Dijkvak	Ringdeel
Inlaatduiker nabij A28	Inlaatsluis	VNK.45.03.001	7	-	-
Puttergemaal	Gemaal	VNK.45.02.001	31,5	-	-
Inlaatsluis nabij Arkersluis	Inlaatsluis	VNK.45.03.002	53,5	VR 048-056	1
Arkersluis	Schutsluis	VNK.45.06.001	53,5	VR 048-056	1
Wielse Sluis	Uitwateringssluis	VNK.45.08.002	73,5	VR 063-076	1
Laakse Duiker	Uitwateringssluis	VNK.45.08.003	100	VR 100-115	1
Gemaal Veendijk	Gemaal	VNK.45.02.002	113	VR 100-115	2
Duiker Westdijk (W0)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.005	135	VR 132-139	3
Duiker Westdijk (W1)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.006	139,5	VR 139-148	3
Gemaal Westdijk	Gemaal	VNK.45.02.003	144,5	VR 139-148	3
Coupure Malenstein	Coupure	VNK.45.01.001	155	EE 152-163	3
Coupure Vedder	Coupure	VNK.45.01.003	159,5	EE 152-163	3
Duiker Eemdijk (V4)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.008	162	EE 152-163	4
Coupure Weverling	Coupure	VNK.45.01.004	166,5	EE 163-175	3
Coupure Maatweg	Coupure	VNK.45.01.005	168,5	EE 163-175	3
Coupure Fam. Jaquet	Coupure	VNK.45.01.007	171	EE 163-175	3
Coupure Varenkamp	Coupure	VNK.45.01.008	173,5	EE 163-175	4
Coupure Pontveer	Coupure	VNK.45.01.009	174	EE 163-175	4
Duiker Eemdijk (E6)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.009	184,5	EE 183-187	4
Duiker Eemdijk (E9)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.010	196	EE 194-205	4
Duiker Eemdijk (E9,5)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.011	196	EE 194-205	4
Gemaal de Haar	Gemaal	VNK.45.02.004	216	EE 213-224	4
Duiker Eemdijk (E14)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.013	221	EE 213-224	3
Coupure Born	Coupure	VNK.45.01.011	224,5	EE 224-238	5
Coupure Arends	Coupure	VNK.45.01.012	225	EE 224-238	5
Duiker Zuidereind (Z2)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.014	234	EE 224-238	5
Duiker Zuidereind (Z3)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.015	238,5	EE 238-245	5
Gemaal Zeldert	Gemaal	VNK.45.02.005	244	EE 238-245	5
Duiker Slaagse Dijk (S2)	Uitwateringssluis	VNK.45.08.018	265	EE 256-267	5
Coupure van den Hengel	Coupure	VNK.45.01.013	271,5	EE 267-277	5
Duiker Slaagse Dijk 2	Uitwateringssluis	VNK.45.08.017	274	EE 267-277	5
Gemaal Malesluis	Gemaal	VNK.45.02.006	277,5	EE 277-289	5
Gemaal de Schans	Gemaal	VNK.45.02.007	313	EE 308-318	5
Witte Sluis	Uitwateringssluis	VNK.45.08.020	903	GR 000-011	6
Grebbesluis	Inlaatsluis	VNK.45.03.008	907	GR 043-054	6

Tabel C-3: Overzicht kunstwerken en faalmechanismen

Kunstwerk	VNK nummer	Overloop en overslag	Betrouwbaar- heid sluiting	Onder- en achterloopsheid	Stekte en stabiliteit
Inlaatduiker nabij A28	VNK.45.03.001	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Puttergemaal	VNK.45.02.001	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Inlaatsluis nabij Arkersluis	VNK.45.03.002	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Arkersluis	VNK.45.06.001	X	n.v.t.	n.v.t.	X
Wielse Sluis	VNK.45.08.002	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Laakse Duiker	VNK.45.08.003	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Gemaal Veendijk	VNK.45.02.002	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	X
Duiker Westdijk (W0)	VNK.45.08.005	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Westdijk (W1)	VNK.45.08.006	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Gemaal Westdijk	VNK.45.02.003	n.v.t.	n.v.t.	X	n.v.t.
Coupure Malenstein	VNK.45.01.001	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Vedder	VNK.45.01.003	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Eemdijk (V4)	VNK.45.08.008	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Weverling	VNK.45.01.004	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Maatweg	VNK.45.01.005	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Fam. Jaquet	VNK.45.01.007	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Varenkamp	VNK.45.01.008	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Pontveer	VNK.45.01.009	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Eemdijk (E6)	VNK.45.08.009	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Eemdijk (E9)	VNK.45.08.010	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Eemdijk (E9,5)	VNK.45.08.011	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Gemaal de Haar	VNK.45.02.004	n.v.t.	n.v.t.	X	n.v.t.
Duiker Eemdijk (E14)	VNK.45.08.013	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Born	VNK.45.01.011	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure Arends	VNK.45.01.012	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Zuidereind (Z2)	VNK.45.08.014	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Zuidereind (Z3)	VNK.45.08.015	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Gemaal Zeldert	VNK.45.02.005	n.v.t.	n.v.t.	X	n.v.t.
Duiker Slaagse Dijk (S2)	VNK.45.08.018	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Coupure van den Hengel	VNK.45.01.013	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Duiker Slaagse Dijk 2	VNK.45.08.017	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Gemaal Malesluis	VNK.45.02.006	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Gemaal de Schans	VNK.45.02.007	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Witte Sluis	VNK.45.08.020	n.v.t.	X	X	n.v.t.
Grebbsluis	VNK.45.03.008	n.v.t.	X	X	X
Totaal		1	2	5	3

n.v.t. deze kunstwerken/faalmechanismen zijn niet geanalyseerd, de bijdrage van deze kunstwerken/faalmechanismen aan de overstromingskans van dijkgebied 45 is niet significant

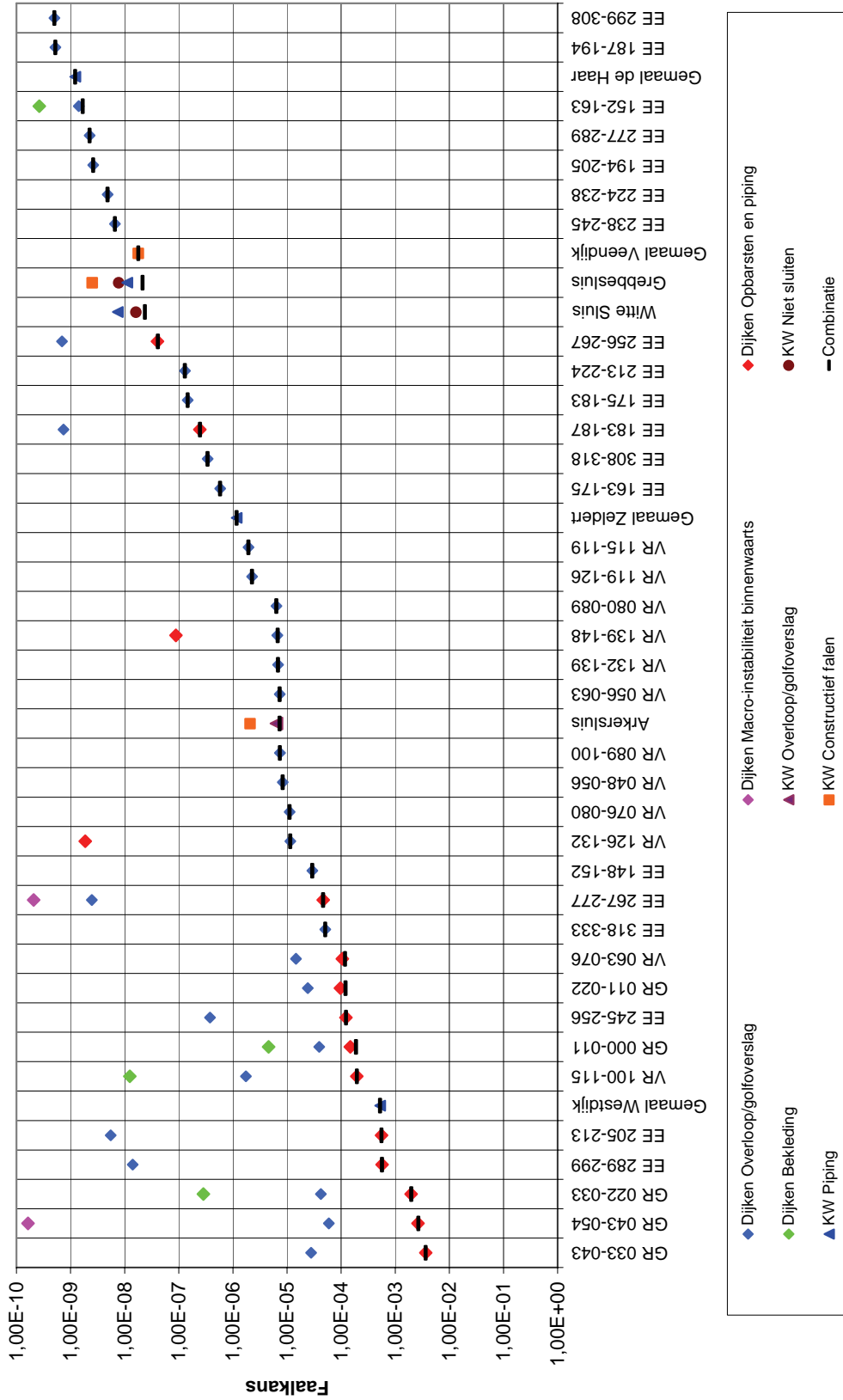
Bijlage D Overzicht faalkansen

Tabel D-1: Overzicht van de faalkansen per faalmechanisme en per dijkvak/kunstwerk, faalkansen per faalmechanisme op ringniveau en de overstromingskans voor dijkgebied 45 (per jaar).

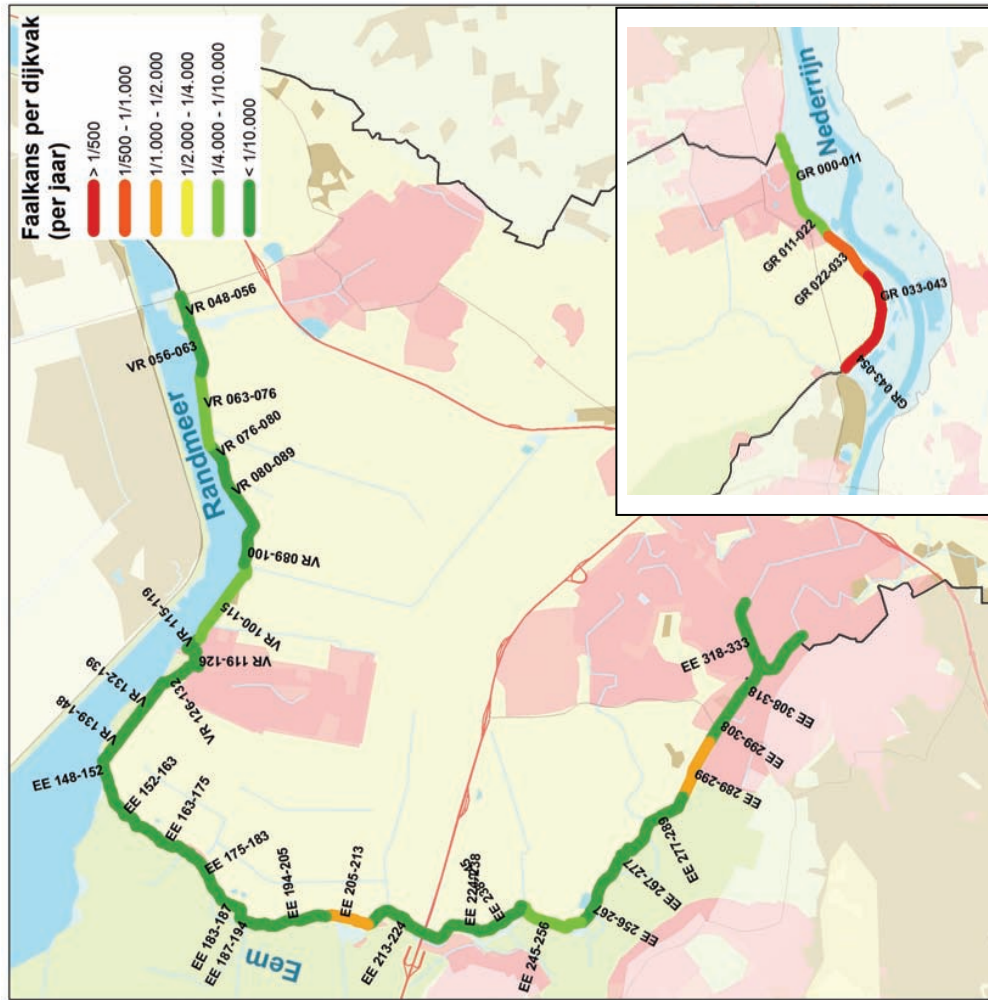
	Overloop en golfverslag	Macrostabiliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklichaam	Overslag/overloop	Betrouwbaarheid sluiting	Onder- en achterloopsheld	Sterkte en stabiliteit	Faalkans van dijkvak of kunstwerk
Dijkvakken aan de randmeren									
VR 048-056	1/120.000	-		< 1/1.000.000					1/120.000
VR 056-063	1/140.000	-		-					1/136.000
VR 063-076	1/68.000	-	1/9.500	-					1/8.500
VR 076-080	1/90.000	-		-					1/90.000
VR 080-089	1/160.000	-		-					1/157.000
VR 089-100	1/140.000	-		-					1/135.000
VR 100-115	1/580.000	< 1/1.000.000	1/5.100	< 1/1.000.000					1/5.100
VR 115-119	1/510.000	-		-					1/510.00
VR 119-126	1/440.000	-		-					1/440.000
VR 126-132	1/87.000	-	< 1/1.000.000	< 1/1.000.000					1/87.000
VR 132-139	1/150.000	-		-					1/150.000
VR 139-148	1/150.000	-	< 1/1.000.000	-					1/150.000
Dijkvakken aan de Eem									
EE 148-152	1/34.000	-		-					1/34.000
EE 152-163	< 1/1.000.000	-		< 1/1.000.000					< 1/1.000.000

	Overloop en golfverslag	Macrostablieiteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklchaam	Overslag/ overloop	Betrouwbaarheid sluiting	Onder- en achterloopsheld	Sterkte en stabiliteit	Faalkans van dijkkvak of kunstwerk
EE 163-175	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 175-183	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 183-187	<1/1.000.000	-	<1/1.000.000	-					<1/1.000.000
EE 187-194	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 194-205	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 205-213	<1/1.000.000	-	1/1.800	-					1/1.800
EE 213-224	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 224-238	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 238-245	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 245-256	<1/1.000.000	-	1/8.100	-					1/8.100
EE 256-267	<1/1.000.000	-	<1/1.000.000	<1/1.000.000					<1/1.000.000
EE 267-277	<1/1.000.000	<1/1.000.000	1/21.000	-					1/18.000
EE 277-289	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 289-299	<1/1.000.000	-	1/1.800	-					1/1.800
EE 299-308	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 308-318	<1/1.000.000	-		-					<1/1.000.000
EE 318-333	1/20.000	-		-					1/20.000
Dijkvakken aan de Nederrijn									
GR 000-011	1/26.000	<1/1.000.000	1/6.800	1/220.000					1/5.300
GR 011-022	1/41.000	-	1/10.000	-					1/8.300

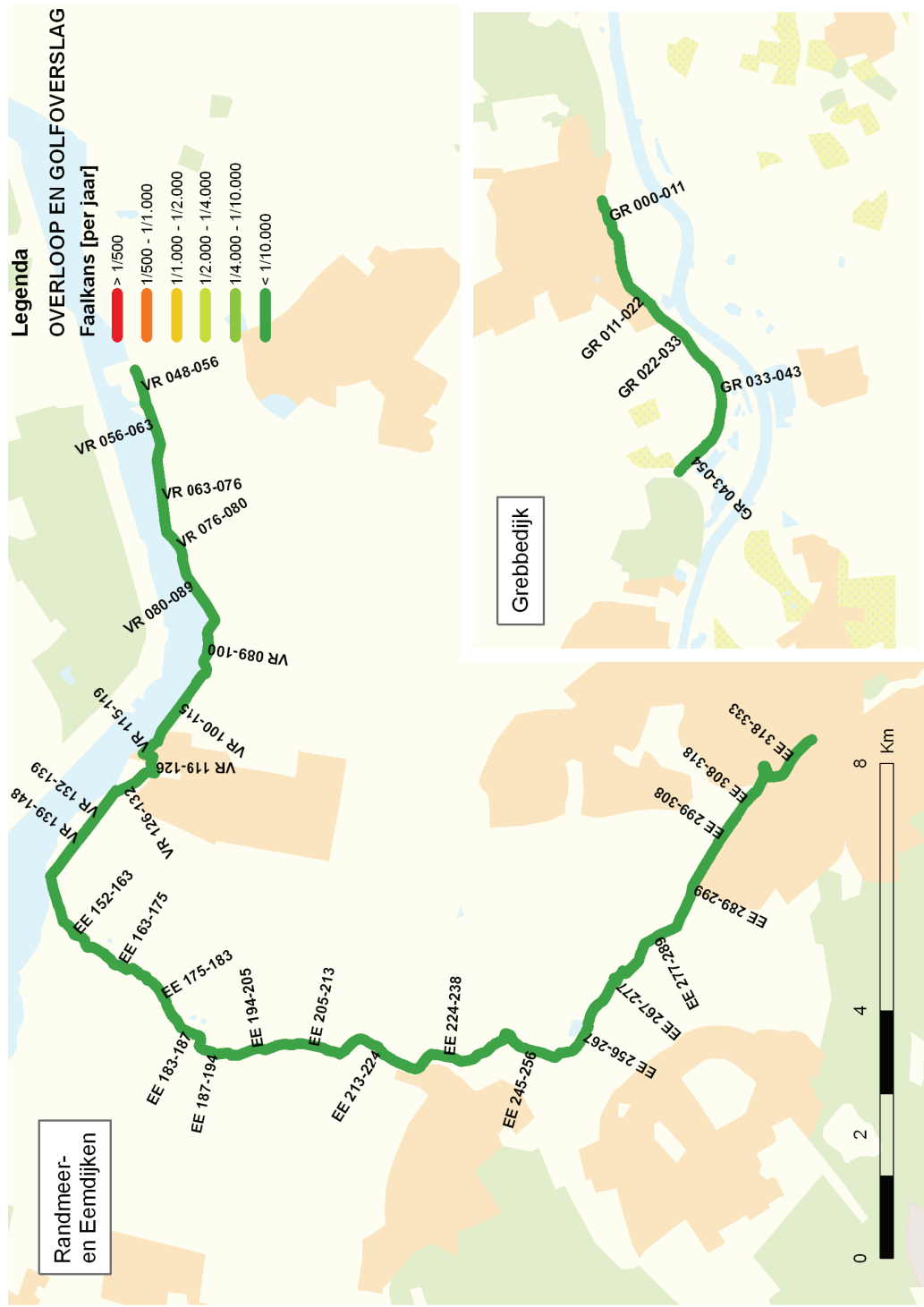
	Overloop en golfoverslag	Macrostabieliteit binnenwaarts	Opbarsten en piping	Beschadiging bekleding en erosie dijklchaam	Overslag/ overloop	Betrouwbaarheid sluiting	Onder- en achterloopsheld	Sterkte en stabiliteit	Faalkans van dijkvak of kunstwerk
GR 022-033	1/24.000	-	1/510	<1/1.000.000					1/500
GR 033-043	1/36.000	-	1/270	-					1/270
GR 043-054	1/17.000	<1/1.000.000	1/380	-					1/370
Kunstwerken									
Arkersluis					1/160.000			1/480.000	
Gemaal Veendijk								<1/1.000.000	<1/1.000.000
Gemaal Westdijk							1/1.900		1/1.900
Gemaal de Haar							<1/1.000.000		<1/1.000.000
Gemaal Zeldert							1/850.000		1/850.000
Witte Sluis							<1/1.000.000		<1/1.000.000
Grebbe sluis							<1/1.000.000	<1/1.000.000	<1/1.000.000
Combinatie	1/8.200	<1/1.000.000	1/110	1/210.000	1/160.000	<1/1.000.000	1/1.900	1/418.000	1/100



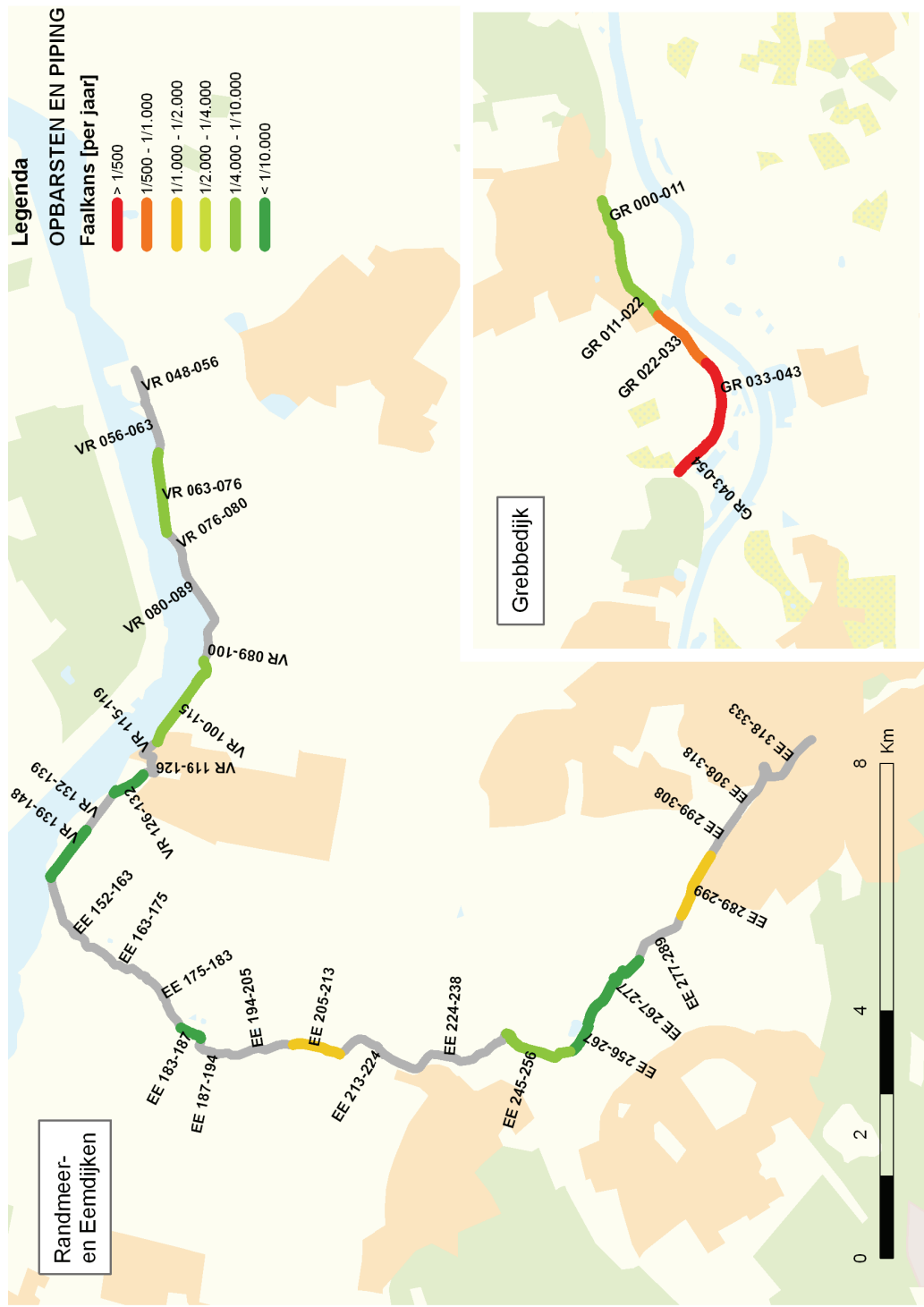
Figuur D-1: Faalkansen per faalmechanisme en per vak geordend op grootte van de faalkans op vakniveau voor dijkkring 45.



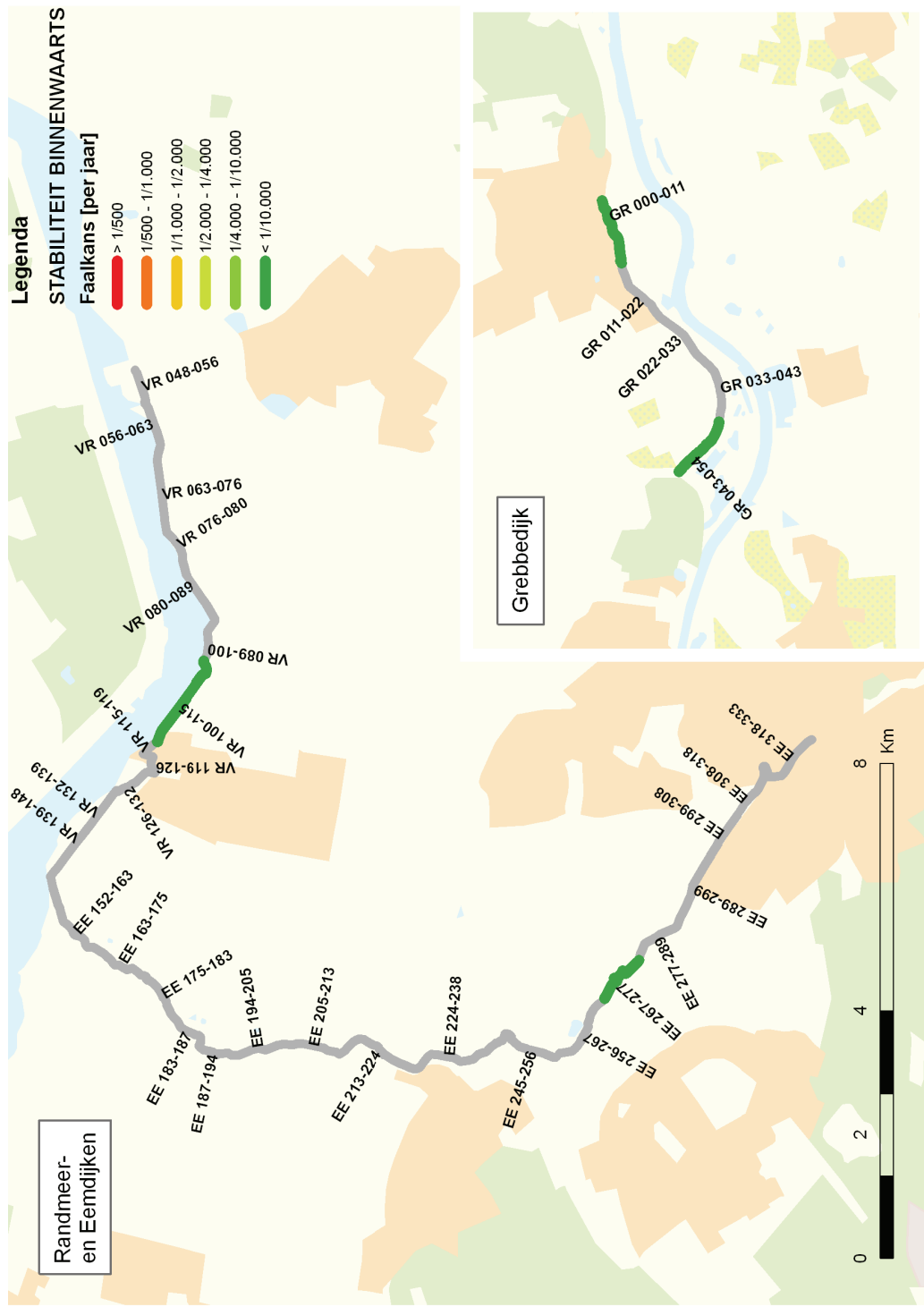
Figuur D-2: Faalkansen op vakniveau voor dijkkring 45.



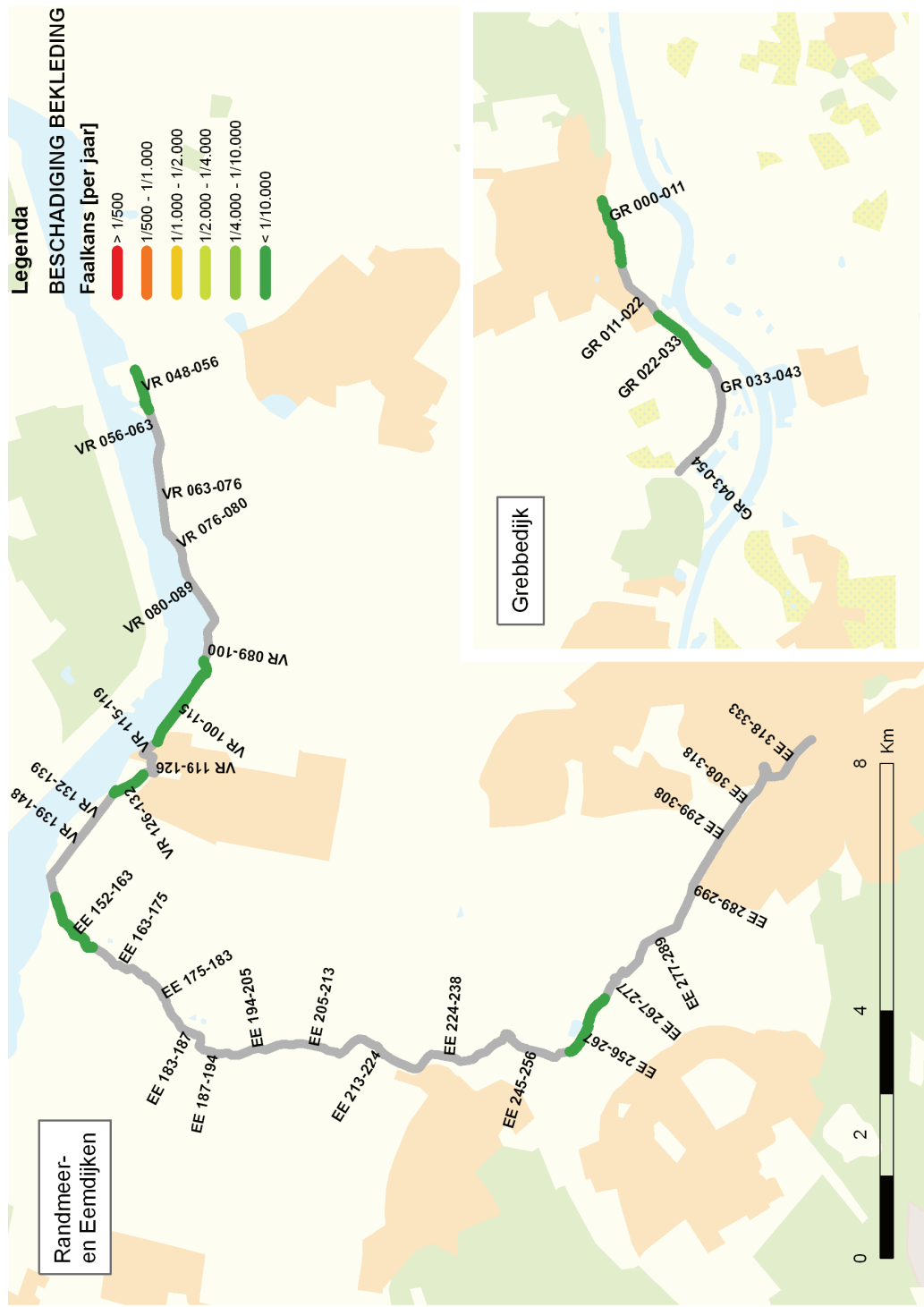
Figuur D-3: Faalkansen op vakniveau voor faalmechanisme overloop en golfoverslag.



Figuur D-4: Faalkansen op vakniveau voor faalmechanisme opbarsten en piping.



Figuur D-5: Faalkansen op vakniveau voor faalmechanisme macrostabiliteit binnenwaarts.



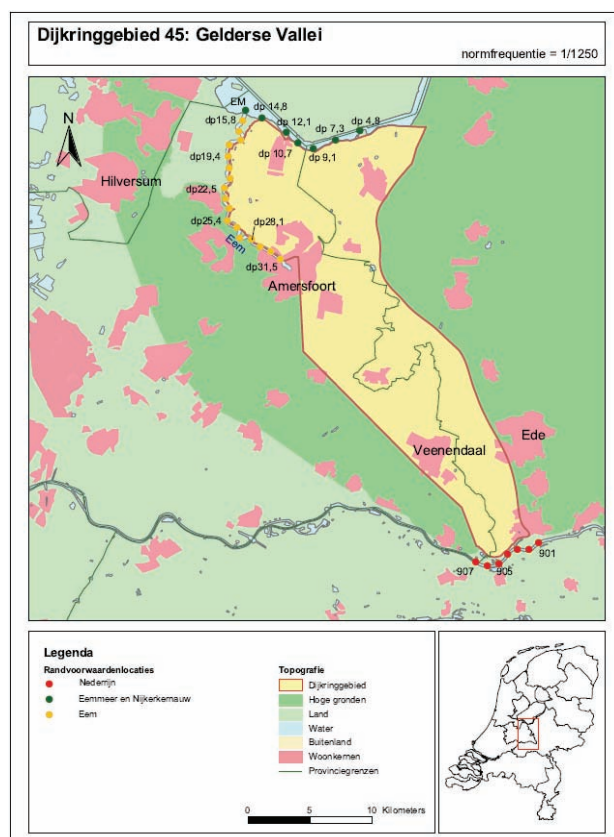
Figuur D-6: Faalkansen op vakniveau voor faalmechanisme Beschadiging bekleding en erosie dijkllichaam.

Bijlage E Overzicht resultaten derde toetsronde

Het onderstaande overzicht van de resultaten uit de Derde Toetsronde is overgenomen uit de rapportage 'Veiligheidstoetsing dijkkring 45 en 46 – samenvattend rapport 3e toetsronde (2006-2011)'. De tekst betreffende dijkkring 45 is overgenomen.

Inleiding

Voorliggend rapport beschrijft de resultaten van de toetsing van dijkkring 45. Dijkkring 45, Gelderse Vallei ligt in de provincies Gelderland en Utrecht (zie figuur A). De provincie Utrecht is de coördinerende provincie. De waterkeringen zijn in beheer bij Waterschap Vallei en Eem. Volgens de Waterwet moeten de primaire waterkeringen van dijkkring 45 voldoen aan een norm van 1/1250 per jaar.



Figuur E-1: Dijkkringgebieden 45 Gelderse Vallei

Het projectgebied met de waterkeringen is weergegeven in Figuur A. Dijkkring 45 heeft een lengte van circa 38 km en loopt in het noorden vanaf Gemeente Putten (km 0,0) als oude Zuiderzeedijk langs het Nuldernauw en Nijkerkernauw en vervolgens langs rivier de Eem tot aan de gemeente Amersfoort (km 32,9). De eerste 4,9km langs het Nuldernauw is de dijk een categorie c-kering. De verdere dijken zijn allemaal categorie a-kering. In het zuiden loopt de Grebbedijk van Wageningen (km 0,0) naar Rhenen (km 5,4), eveneens van dezelfde categorie a.

De dijken van dijkkring 45 zijn in de eerste en tweede toetsronde al onderzocht en getoetst, waarna de dijken langs de Randmeren en Eem in de tweede ronde grotendeels afgekeurd zijn. Vervolgens zijn voorbereidingen getroffen voor verbeterwerken, die overlap hebben met de derde toetsing. Dit zal in de verschillende rapportages naar voren komen in de toetsresultaten en de maatregelen die geadviseerd worden. In de voorliggende toetsrapportage voor de derde toetsronde zijn

de waterkeringen van dijkkring 45 getoetst aan de hand van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid 2006 en de Hydraulische Randvoorwaarden 2006.

Resultaten toets

Voor dijkkring 45 geldt dat, naar aanleiding van de toetsresultaten van de tweede toetsronde, bijna 22 km is opgenomen in een dijkverbeterproject van Waterschap Vallei en Eem. Het project is opgenomen in het tweede hoogwater beschermingsprogramma van het Rijk (HWBP2). Als onderdeel van de voorbereidingen voor dijkverbetering wordt momenteel (2009-2011) een MER uitgevoerd (MER Veiligheid Zuidelijke Randmeren). Deze trajecten zijn daarom in de derde toetsronde niet getoetst. De kunstwerken zijn voor heel dijkkring 45 wel getoetst inclusief die binnen het dijkverbeterproject vallen.

Van de te toetsen trajecten (circa 16,3 km) scoort alsnog 1,25 km van de dijken 'onvoldoende'. Deze stukken dienen te worden verbeterd. Circa 15 km van de getoetste dijken scoort 'voldoende'. Zie tabel A.

Tabel E-1: Resultaten tabel dijkkring 45 Gelderse Vallei

Toetscriterium per type	Aantal (stukks) of lengte (km)	Categorie a	Categorie c	Categorie a				Categorie c					
				VOLDOET AAN NORM		VOLDOET NIET AAN NORM	GEEN OORDEEL	NVT	VOLDOET AAN NORM		VOLDOET NIET AAN NORM	GEEN OORDEEL	NVT
				goed	voldoende	onvoldoende		goed	voldoende	onvoldoende			
Dijken en Dammen													
Totaal	38,3	33,6	4,7	0	11,24	1,25	0	21,08	0	3,8	0	0	0,9
HT Hoogte				8,32	2,42	1,75	0	21,08	3,8	0	0	0	0,9
ST Stabiliteit													
STPH Piping				6,07	6,42	0	0	21,08	0,3	3,5	0	0	0,9
STBI Macrostabieliteit binnenwaarts				5,37	6,67	0,45	0	21,08	0	3,8	0	0	0,9
STBU Macrostabieliteit buitenwaarts				10,29	2,2	0	0	21,08	3,8	0	0	0	0,9
STMI Microstabieliteit				5,37	7,12	0	0	21,08	0	3,8	0	0	0,9
STBK Bekleding				0	12,29	0,2	0	21,08	0	3,8	0	0	0,9
STVL				4,62	7,87	0	0	21,08	0	3,8	0	0	0,9
Niet-waterkerende objecten													
bebouwing	53	53	0	0	27	11	15	0	0	0	0	0	0
kabels&leidingen	36	36	0	16	18	0	2	0	0	0	0	0	0
bomen & overige begroeiing	206	193	13	178	0	0	15	0	13	0	0	0	0
overige niet-waterkerende objecten	17	17	0	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kunstwerken													
Totaal	45	43	2	5	17	12	4	5	0	2	0	0	0
HT Hoogte	45	43	2	12	0	3	1	27	1	0	0	0	1
ST Stabiliteit en sterkte													
STCG stabiliteit constructie	45	43	2	5	29	3	1	5	0	2	0	0	0
STCO sterkte constructiedelen	45	43	2	5	22	7	4	5	0	2	0	0	0
STPH piping en heave	45	43	2	18	12	7	1	5	2	0	0	0	0
BS Betrouwbaarheid Sluicing	45	43	2	29	0	2	1	11	2	0	0	0	0

Dijklichaam

Kruinhoogte

Van dijkkring 45 heeft bijna 1,75 km van de te toetsen lengte een te lage kruin. Dit betreft een stuk van 450 m ter plaatse van de Westdijk, 800m in het centrum van Spakenburg en een stuk van 500 m ter plaatse van de Eemlandse dijk bij Eembrugge.

In Figuur B het resultaat van dijkkring 45 op kaart weergegeven.

Waterkering Zuidelijke Randmeren en Eem



Grebbedijk



Figuur E-2: Resultaat toets op kruinhoogte van het dijklichaam – DR45

Stabiliteit

Van dijkkring 45 voldoet circa 5% (0,75 km) van de te toetsen trajecten niet aan de eisen voor stabiliteit. Dit betreft 300 m van de Grebbedijk ten aanzien van de stabiliteit van de bekleding en 450 m ten aanzien van binnenwaartse stabiliteit van de Westdijk.

Waterkering Zuidelijke Randmeren en Eem



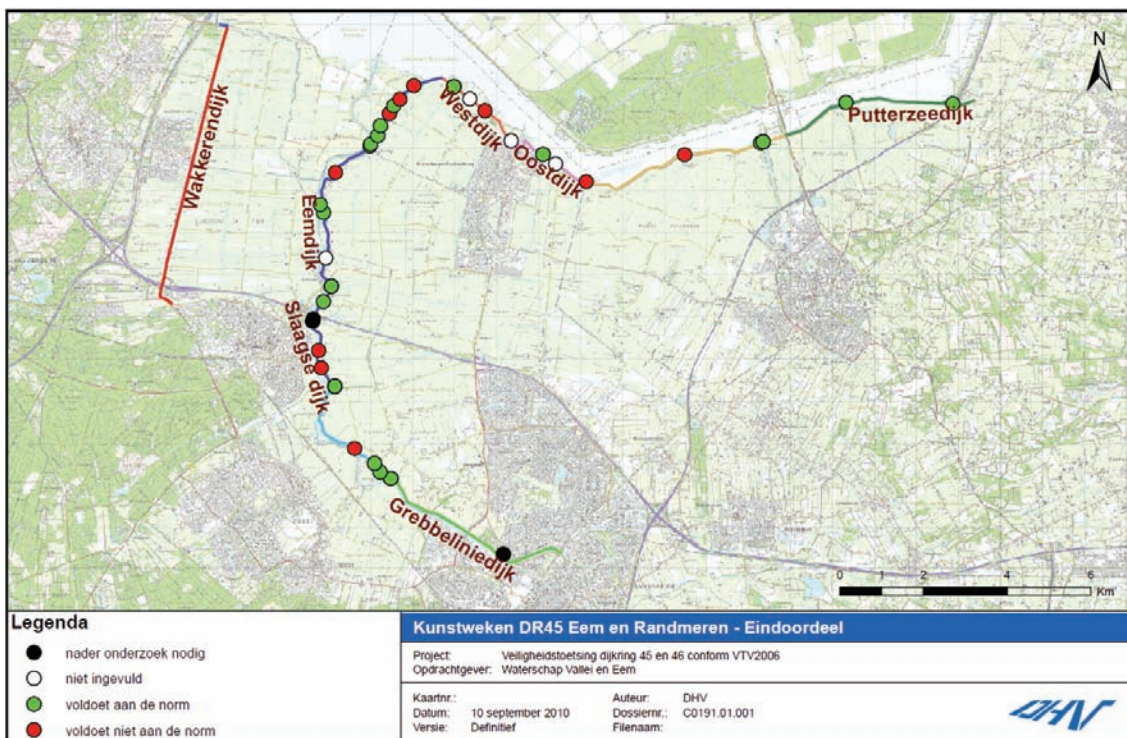
Grebbedijk



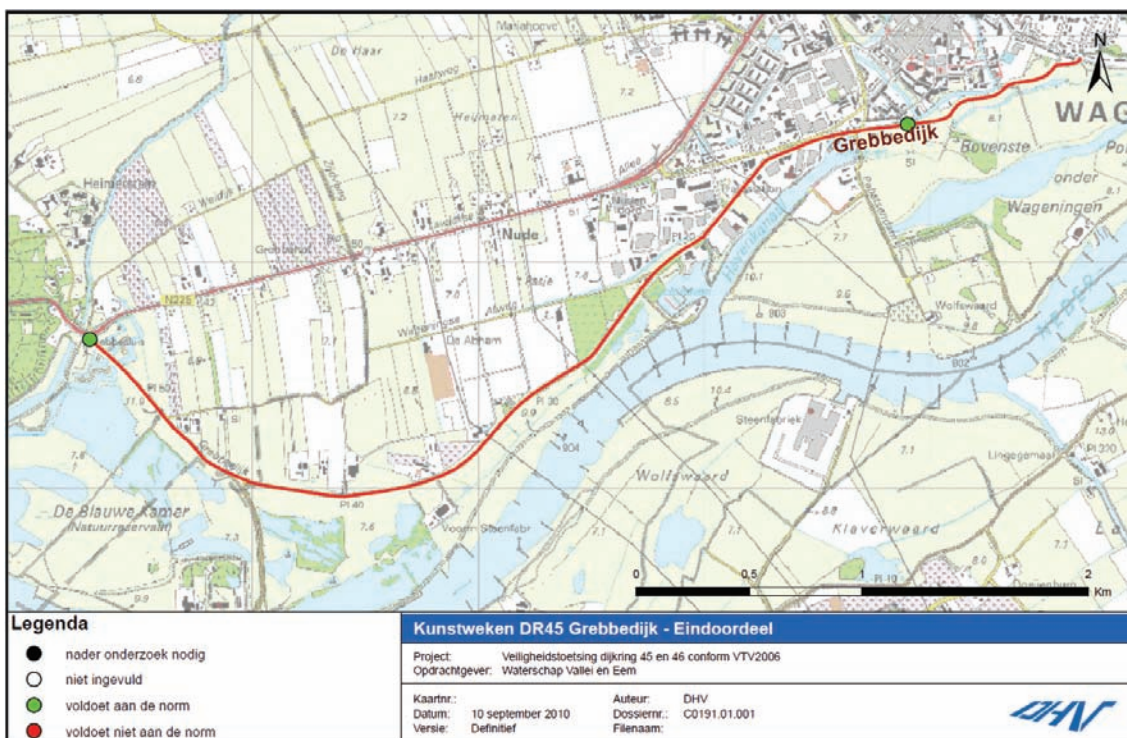
Figuur E-3: Resultaat toets op stabiliteit van het dijklichaam – DR 45

Waterkerende kunstwerken

In dijkkring 45 bevinden zich 45, vooral kleinere, kunstwerken, zoals duikers en coupures. In dijkkring 45 voldoen 12 van de 45 kunstwerken niet aan de norm, 27 kunstwerken voldoen aan de norm, 1 heeft nader onderzoek nodig en 5 kunstwerken zijn sinds de vorige toetsronde verwijderd en hoeven niet meer getoetst te worden.



Figuur E-4: Eindscore en locatie van de kunstwerken in dijkring 45 Randmeren en Eemdijken



Figuur E-5: Eindscore en locatie van de kunstwerken in dijkring 45 Grebbedijk⁵

Langs de Grebbedijk voldoen alle kunstwerken aan de norm. Langs de Eem en Randmeren van dijkring 45 bevinden zich de kunstwerken die niet voldoen aan de norm.

⁵ De damwanden en kistdam zijn niet opgenomen in TOETS RAP en staan niet op de figuren

Op basis van de toetsresultaten van de tweede toetsronde (2001-2006) is een dijkversterkingsprogramma voor de Eem- en Randmeerdijken van dijkkring 45 opgestart. In dit programma zijn ook de kunstwerken opgenomen die niet voldoen aan de norm. De verbeteringen aan de kunstwerken zijn nog niet uitgevoerd.

Niet waterkerende objecten

Begroeiing

De begroeiing van de Eemdijk is grotendeels 'voldoende' of 'goed' getoetst in de tweede toetsronde. De begroeiing van de te toetsen dijktrajecten (circa 11km langs Eem en Randmeren) is specifiek beoordeeld in de derde toetsronde op conditie, veiligheid en beheerbaarheid. De overige trajecten worden wat betreft begroeiing en bomen beoordeeld als onderdeel van de geplande dijkversterkingsmaatregelen.

De Bomenwacht heeft in 2009 de begroeiing op Grebbedijk (5,4km) beoordeeld. Uit deze rapportage komt naar voren dat grasbekleding onder de bomen op veel locaties zeer slecht tot matig is. De redenen hiervoor zijn veelal schaduw, vertreding door vee en tuinbeheer. Zeer lokaal is de erosiebestendigheid van de grasbekleding hierdoor zwakker dan verwacht mag worden op basis van het beheertype van de grasbekleding. Het gevaar voor ontgrondingskuilen door windworp tijdens een storm wordt zeer klein geacht. De bomen zijn goed verankerd in de bodem, vitaal en worden actief beheerd. Een storm zal hierdoor eerder tot tak- of stambreuk leiden dan tot ontgroning.

Bebouwing

De bebouwing in Spakenburg en in de kern van Eemdijk is grotendeels 'voldoende' of 'goed' getoetst in de tweede toetsronde. Van de overige profielen met lokale bebouwing voldoet langs de Eemdijk één profiel niet. In dat profiel met bebouwing is de stabiliteit van het binnentalud onvoldoende.

De bebouwing is opnieuw beoordeeld in de derde toetsronde, wat betreft doorsnijding van de invloedszone en het beoordelingsprofiel door kelders e.d. vanwege de herzien toetsstappen in het toetsvoorschrift. Gebleken is dat van 15 gebouwen de technische inspectie nog geen uitsluitel geeft. Dit betekent nader onderzoek door de beheerder. Langs de Grebbedijk voldoet de bebouwing. In 1997 is een extra voorziening in de vorm van damwanden geplaatst bij de woningen die binnen het beoordelingsprofiel van de dijk vielen. Deze damwanden zijn beoordeeld als waterkerende kunstwerken en voldoen aan de norm.

Kabels en leidingen

Nabij de waterkeringen langs de Eem en Randmeren liggen negen leidingen binnen het beoordelingsprofiel. 4 Leidingen voldoen aan de norm, 2 leidingen en 3 mantelbuizen moeten nog nader onderzocht worden, omdat beheerdersinformatie ontbreekt. Tijdens de dijkverbetering wordt door het waterschap gezorgd dat de andere kabels en leidingen voldoen aan de norm als onderdeel van de dijkversterkingsmaatregelen.

Voor de Grebbedijk zijn 27 kabels en leidingen beoordeeld. Hiervan voldoen 25 aan de gestelde norm. Voor twee stalen gasleidingen zijn te weinig gegevens bekend om een beoordeling te kunnen geven.

Meenemen toetsscores in het eindoordeel

Voor de NWO's die niet zijn goedgekeurd in deze toetsronde geldt dat dit oordeel niet wordt toegewezen aan de desbetreffende dijksectie. Het waterschap is van mening dat met relatief kleine ingrepen de problemen kunnen worden opgelost en het daarom niet noodzakelijk is om de waterkering in zijn geheel af te keuren en vervolgens te versterken. De toetsing van de NWO's leidt dus niet tot een ander eindoordeel van de waterkeringen.

Maatregelen naar aanleiding van de derde toetsronde

Op basis van de toetsresultaten blijkt dat voor de dijklichamen van dijkkring 45 circa 1,95 km onvoldoende scoort. Het Waterschap Vallei en Eem gaat de delen van de dijken langs de Eem en de Zuidelijke Randmeren (1,75 km) op nemen in de lopende dijkverbetering.

Voor de verbetering van een klein stuk (200 m) van de Grebbedijk waar de stabiliteit van de grasbekleding onvoldoende scoort worden beheersmaatregelen genomen en ook de monitoring van intensiever onderhoud wordt opgestart.

De kunstwerken die afgekeurd zijn in de derde toetsronde worden in de lopende dijkverbetering meegenomen.

Gemaal de Schans heeft vanwege een tekort aan gegevens nog geen oordeel gekregen en moet nader onderzocht worden. Dit gemaal staat wel op de nominatie gesaneerd te worden.

Uit de toetsing blijkt dat de aansluiting op de hoge gronden in Amersfoort niet voldoet. Middels een nieuw tracé moet een aansluiting gerealiseerd worden op de hoge gronden. Dit onderdeel is opgenomen in het lopende HWBP project.

Voor de dijklichamen die al in de dijkverbetering zitten moeten tot de uitvoering gereed is toch voorzorgsmaatregelen getroffen worden. Dit houdt in dat de lage plekken bekend moeten zijn, zodat zandzakken ingezet kunnen worden. Voor de instabiele trajecten kan als stabiliteitsmaatregel een steunberm of aanpassing aan de kwelsloot uitgevoerd worden.

Bij locaties afgekeurd op piping kunnen de zandmeevoerende wel opgekist worden. Dit wordt geoefend en in het calamiteitenplan opgenomen. Voor buitenwaardse instabiliteit worden pas maatregelen na optreden genomen, omdat dan de veiligheid na een val van het water niet meer in het geding is. Ook voor locaties waar micro-instabiliteit op kan treden moet de uitspoeling met een steunberm voorkomen worden.

Voor de niet waterkerende objecten die onvoldoende scores worden maatregelen opgesteld in de beheersmatige sfeer, dit betreft een aantal te kappen bomen op de Grebbedijk en ook onderhoudssnoei toepassen. Enkele kabels en leidingen moeten nader onderzocht worden en met leidingbeheerders moeten afspraken over inspectie en onderhoud vastgelegd worden.

Voor de kunstwerken langs de Randmeren en Eem geldt dat die binnen het dijkverbeterproject worden aangepakt. Tot die tijd is verscherpte aandacht voor de afsluiting nodig

Bijlage F Overstromingsscenario's

Tabel F-1: Definitie van de overstromingsscenario's met de bijbehorende scenariokansen.

Scenario	Ringdeel						Aantal doorbraken	Scenariokans	Kansbijdrage
	1. Grebbedijk	2. Slaagse dijk	3. Eemdijk	4. Westdijk	5. Oostdijk	6. Arnhemse Zeedijk			
Grebbedijk	Faalt	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	1	1/130	78,6%
Slaagse Dijk	Faalt niet	Faalt	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	1	1/1.410	7,1%
Eemdijk	Faalt niet	Faalt niet	Faalt	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	1	1/1.930	5,2%
Westdijk	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt	Faalt niet	Faalt niet	1	1/1.910	5,3%
Oostdijk	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt	Faalt niet	1	1/5.730	1,8%
Arnhemse Zeedijk	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt niet	Faalt	1	1/9.800	1,0%
Meervoudig Eem en randmeren	Faalt niet	Faalt	Faalt	Faalt	Faalt	Faalt	5	1/10.400	1,0%
Ringkans								1/100	

Bijlage G Kansen, gevolgen en risico's per overstromingsscenario

Scenario	Debiet Lobith [m ³ /s]	Markemeerpeil [m+NAP]	Doorraak-locatie	Kans	OMSM berekeningen	Onverwachte overstroming geen evacuatie			Onverwachte overstroming niet georganiseerde evacuatie			Verwachte overstroming niet georganiseerde evacuatie			Verwachte overstroming georganiseerde evacuatie		
						Conditionele kans	Economisch risico	Slachtoffer risico	Conditionele kans	Economisch risico	Slachtoffer risico	Conditionele kans	Economisch risico	Slachtoffer risico	Conditionele kans	Economisch risico	Slachtoffer risico
1	1116 3	-0.19	RD01	7.80E-03	Grebbedijk _1250_100m_50	1.00E-01	8.43E+06	8.12E-01	4.00E-02	3.34E+06	1.33E-01	2.60E-01	2.17E+07	4.22E-01	6.00E-01	4.99E+07	5.36E-01
2	6370	-0.16	RD02	7.08E-04	Slaagse_dijk _1250_50m_48u	2.00E-01	3.09E+03	1.06E-04	8.00E-02	1.23E+03	2.55E-05	4.00E-01	6.16E+03	7.00E-05	3.20E-01	4.93E+03	3.40E-05
3	6381	-0.16	RD03	5.18E-04	Eemdijk _10000_50m_48u	2.00E-01	4.08E+03	1.09E-04	8.00E-02	1.63E+03	2.62E-05	4.00E-01	8.15E+03	7.21E-05	3.20E-01	6.52E+03	3.50E-05
4	6446	-0.11	RD04	5.22E-04	Westdijk _10000_50m_48u	2.00E-01	5.99E+03	1.47E-04	8.00E-02	2.39E+03	3.54E-05	4.00E-01	1.20E+04	9.72E-05	3.20E-01	9.57E+03	4.72E-05
5	6374	-0.12	RD05	1.74E-04	Oostdijk _10000_50m_48u	2.00E-01	3.10E+03	8.89E-05	8.00E-02	1.24E+03	2.13E-05	4.00E-01	6.19E+03	5.87E-05	3.20E-01	4.95E+03	2.84E-05
6	6384	-0.14	RD06	1.02E-04	Arkenh. zeedijk _1250_50m_48u	2.00E-01	4.92E+02	1.38E-05	8.00E-02	1.97E+02	3.31E-06	4.00E-01	9.82E+02	9.11E-06	3.20E-01	7.86E+02	4.41E-06
7	6238	-0.07	RD02, RD03, RD04, RD05, RD06	2.25E-08	0203040506	2.00E-01	8.01E-01	3.22E-08	8.00E-02	3.20E-01	7.72E-09	4.00E-01	1.60E+00	2.12E-08	3.20E-01	1.28E+00	1.03E-08
Rest				9.61E-05	0203040506	2.00E-01	3.42E+03	1.37E-04	8.00E-02	1.36E+03	3.30E-05	4.00E-01	6.82E+03	9.07E-05	3.20E-01	5.45E+03	4.40E-05

Bijlage H Colofon

Uitgegeven door

Rijkswaterstaat Waterdienst
Projectbureau VNK2
Postbus 17
8200 AA Lelystad
T. 0320 298411

Betrokken beheerder

Waterschap Vallei en Eem
Contactpersonen: Reindert Stellingwerff, Peter Boone en Nico Valkengoed

Betrokken Provincie

Provincie Utrecht
Contactpersoon: Pim Beerling

Projectteam dijkkring 45

Projectleider:
Peter van der Scheer (DHV)

Begeleiding vanuit het projectbureau:
Wouter ter Horst

Projectteam:

Ric Huting (DHV)
Arnoud Keizer (DHV)
Andries van Houwelingen (DHV)
Barbara Bouman (Tauw)
Willem-Frederik Louwersheimer (DHV)
Hanco Fredrikze (DHV)
Jan-Willem Nell (DHV)
Marcel van der Veen (DHV)

Foto voorkant rapport: Anne Floor Timan (Royal HaskoningDHV)

Kwaliteitsborging

Het Expertise Netwerk Waterveiligheid (ENW) heeft een bijdrage geleverd aan de kwaliteitsborging van dit project.