
Analyse effectiviteit rivierverruiming Waal

Kostenreductie dijkverbeteringen door rivierverruiming Varik-Heesselt en Sleeuwijk

Documenttitel	Analyse effectiviteit rivierverruiming Waal Kostenreductie dijkverbeteringen door rivierverruiming Varik-Heesselt en Sleeuwijk
Document	PR2968.20
Status	eindversie
Datum	juli 2015
Auteurs	Saskia van Vuren (HKV) Joost Pol (HKV) Wouter ter Horst (HKV) Gerbert Pleijter (HKV) Raymond van der Meij (Deltares) Otto Levelt (Deltares) Nathalie Asselman (Deltares) Peter de Grave (Deltares) Irene van der Zwan (Deltares) Arno de Kruif (RWS) Robert Vos (RWS)
Opdrachtnemer	HKV lijn in water Deltares
Uitgevoerd door	HKV lijn in water in samenwerking met Deltares
Opdrachtgevers	Rijkswaterstaat, WVL



Ministerie van Infrastructuur
en Milieu

Inhoudsopgave

1	Inleiding	5
1.1	Kader en Context	5
1.2	Doel	6
1.3	Projectteam	6
1.4	Leeswijzer	7
2	Methodiek	9
2.1	Normen en eisen	9
2.2	Faalkansbepaling	11
2.2.1	Belasting	12
2.2.2	Fragility curves	12
2.2.3	Faalkans van een dijkvak	15
2.2.4	Faalkans van een dijktraject	16
2.3	Veiligheidsopgave en dijkversterking	17
2.4	Dijkversterkingskosten	18
2.4.1	Dijkversterkingskosten	18
2.4.2	Discontovoet en contante waarde van versterkingskosten	19
2.4.3	Restwaarden van versterkingskosten	20
2.5	Samenvatting van uitgangspunten	20
3	Versterkingsopgave Waal	22
3.1	Opgave voor het faalmechanisme hoogte	22
3.2	Opgave voor het faalmechanisme macrostabiliteit	26
3.3	Opgave voor het faalmechanisme piping	29
4	Effectiviteit Rivierverruiming Waal	31
4.1	Beschrijving van de casestudies	31
4.1.1	Varianten	31
4.1.2	Bypass Varik-Heesselt	31
4.1.3	Nevengeul Sleeuwijk	32
4.2	Effectiviteit van twee rivierverruimende maatregelen	33
4.2.1	Invloed op dijkversterkingskosten	33
4.2.2	Invloed op tijdstip dijkversterking	36
4.2.3	Overige baten	38
5	Extra analyse met betrekking tot onzekerheden in hydraulische belasting en het effect van meer rivierverruiming	40
5.1	Berekening met verlaagde waterstanden	40
5.2	Inschatting van invloed van onzekerheidstoetslag, lagere GRADE werklijn en klimaatscenario	41
6	Gevoeligheidsanalyses	46
6.1	Discontovoet	46
6.2	Faalmechanismen	47

6.3	Ontwerplevensduur	50
6.4	Overslagdebiet	50
6.5	Invloed van moment van inzet van rivierverruiming	53
6.6	Invloed van alternatieve versterkingsmaatregelen	54
7	Conclusies en aanbevelingen	56
7.1	Effectiviteit van rivierverruiming Waal	56
7.2	Invloed van uitgangspunten en keuzes op effectiviteit	57
7.3	Aanbevelingen	58
8	Referenties	59
Bijlage A	Afleiding faalkanseisen o.b.v. OI2014	60
Bijlage B	Memo hoogteopgave Waal	62
Bijlage C	Detailanalyse voor een dijkvak en een dijktraject	71

1 Inleiding

1.1 Kader en Context

In september 2014 heeft het Deltaprogramma een voorstel gedaan voor de nieuwe waterveiligheidsnormen voor de primaire waterkeringen. Per 1 januari 2017 krijgen de meeste rivierdijken een flink strengere norm. De actuele faalkansen van de rivierdijken zijn veel groter dan de voorgestelde nieuwe veiligheidsnormen. Dit resulteert in een flinke veiligheidsopgave in het rivierengebied.

In het Deltaprogramma Rivieren (DPR) zijn verschillende maatregelen en strategieën verkend om deze waterveiligheidsopgave op te lossen. In de voorkeurstrategie rivieren die in het kader van het Deltaprogramma is ontwikkeld is gekozen voor een krachtig samenspel van dijkversterking en rivierverruiming. Vanaf eind 2014 zijn Deltaprogramma Rijn en Maas aan de slag met het verzoek van de Minister om te komen met een onderbouwd voorstel voor een nadere selectie van rivierverruimende maatregelen tot 2030 en mogelijke startbesluiten voor één of meer MIRT-verkenningen naar rivierverruiming. Eén van de eisen die gesteld wordt bij het starten van een MIRT-verkenning is dat er zicht moet zijn op financiering.

De bijdrage die de rivierverruimende maatregel levert aan de waterveiligheid en de nieuwe normering is van belang voor de afweging. De Minister heeft de volgende voorwaarden voor een rijksbijdrage aan de meerkosten van rivierverruiming gesteld:

- Rivierverruiming moet bijdragen aan waterveiligheid en effectiviteit daarvan
- Er moeten reële kansen zijn om op gebiedsniveau synergie en draagvlak te realiseren
- Er moet zicht zijn op cofinanciering vanuit de regio en (bij startbeslissing) op financiering van het totale project.

Om de bijdrage aan waterveiligheid en effectiviteit daarvan te bepalen heeft RWS WVL samen met Deltares en HKV een methode ontwikkeld om in te kunnen schatten:

1. In welke mate rivierverruiming bijdraagt aan het reduceren van overstromingskansen en risico's
2. Hoeveel besparing rivierverruiming oplevert voor dijkversterkingen in het HWBP

De door rivierverruiming gerealiseerde waterstandsdeling zorgt onder andere voor een afname van de dijkversterkingsopgave en leidt daarmee tot een kostenbesparing op benodigde dijkversterkingsmaatregelen. Die kostenbesparing kan ingezet worden ter bekostiging van de rivierverruimende maatregel. Om zicht te krijgen op de financiering van rivierverruimende maatregelen is het daarom gewenst dat de kostenbesparing voor het HWBP in beeld wordt gebracht.

Een complicerende factor is dat er op dit moment veel in beweging is. In 2017 wordt een nieuwe norm (hoogte) van kracht op basis van overstromingskansen. Deze normen worden vastgelegd in de nieuwe Waterwet. Bij de bepaling van overstromingskansen speelt naast faalmechanisme golfloop en overslag ook piping en macrostabiliteit. Het inzicht dat deze zeer belangrijk kunnen zijn voor het falen van de dijk is opgedaan binnen Veiligheid Nederland in Kaart (VNK). Daarnaast worden er de aankomende jaren nieuwe inzichten met betrekking tot huidige en toekomstige waterstanden, faalmechanisme piping, faalmechanisme macrostabiliteit uitgewerkt die die mogelijk opgenomen gaan worden bij de toetsing en het ontwerp van hoogwaterveiligheidsmaatregelen.

Van Vuren & Ter Horst (2015) en Asselman & Van der Meij (2015) hebben een verkenning uitgevoerd naar de invloed van rivierverruiming op de versterkingsopgave langs de Waal. De aanpak in die verkenningen is in 2015 verder ontwikkeld tot een methodiek waarmee het effect van rivierverruiming op overstromingskansen en dijkversterkingskosten kan worden bepaald (Levelt et al. 2015). De methodiek maakt gebruik van voorlopige inzichten van het Wettelijk Toetsinstrumentarium (WTI) en het Ontwerpinstrumentarium (OI). Zo wordt voor de huidige en toekomstige afvoerstatistiek gebruik gemaakt van de resultaten uit het project GRADE¹ en wordt rekening gehouden met een onzekerheidstoeslag van 30 cm op de lokale waterstandstatistiek. Daarnaast zijn nieuwe inzichten voor piping (nieuwe Sellmeijer formule) en macrostabiliteit (ongedraineerde stabiliteitsanalyse) gebruikt.

1.2 Doel

In september 2015 ligt de concrete vraag voor wat het effect van rivierverruimende maatregelen is op de overstromingskansen (en daarmee de waterveiligheid) en hoeveel HWBP geld er gemotiveerd ingezet kan worden voor de rivierverruiming Varik-Heesselt en Sleeuwijk. Voor de eventuele opstart van een MIRT-verkenning rivierverruiming volstaat een grove benadering voor kostenreductie rivierverruiming generiek of voor een hele riviertak niet. Er is daarom gekozen om de analyse uit te voeren op het detailniveau van een dijkvak van ongeveer 1 kilometer. Zo kan op maatregelniveau de kostenreductie worden geduid.

De kostenreductie is bepaald met een methode, waarin zo goed mogelijk wordt aangesloten bij de ontwerp praktijk van de waterschappen, gebruikmakende van voorlopige inzichten uit OI en WTI. Met de methode wordt de opgave voor prioritaire dijkversterkingstrajecten met de nieuwe, nog in ontwikkeling zijnde inzichten en uitgangspunten, zo goed mogelijk ingeschat en wordt een vergelijking gemaakt tussen een oplossing met alleen dijkversterking en een oplossing waarbij dijkversterking en rivierverruiming worden gecombineerd.

De ontwikkelde methodiek van Levelt et al. (2015) wordt toegepast op de Waal om te kwantificeren in welke mate een tweetal rivierverruimende maatregelen, Nevengeul Sleeuwijk en Bypass Varik-Heesselt, de overstromingskansen en de dijkversterkingskosten op de Waal tussen Gorinchem en de Pannerden reduceert. De effecten op overstromingskansen en de dijkversterkingskosten zijn bepaald voor beide zijden van de Waal tussen Gorinchem en de Pannerden, waarbij onderscheid gemaakt is in de deeltrajecten Gorinchem-Waardenburg, Waardenburg-Tiel en Tiel-Pannerden. De deeltrajecten Gorinchem-Waardenburg en Waardenburg-Tiel zijn de eerste HWBP dijkversterkingsprojecten die opgestart worden door waterschap Rivierenland.

Er is nog veel discussie over de gekozen uitgangspunten met betrekking tot afvoerstatistiek, onzekerheidstoeslag, piping en macrostabiliteit. De te hanteren uitgangspunten op deze aspecten zijn binnen WTI en OI nog sterk in ontwikkeling. In deze analyse baseren we ons op de laatste inzichten die binnen WTI en OI zijn opgedaan. Daarom is in een extra analyse ook de invloed van variatie in uitgangspunten op de uitkomsten onderzocht (zie Hoofdstuk 6).

1.3 Projectteam

Het project is uitgevoerd door een gecombineerd projectteam met medewerkers van HKV LIJN IN WATER (Saskia van Vuren, Joost Pol, Gerbert Pleijter en Wouter ter Horst), Deltares (Otto Levelt, Peter de Grave, Raymond van der Meij, Nathalie Asselman, Irene van der Zwan) en RWS (Arno de Kruif en Robert Vos).

¹ GRADE staat voor Generator of Rainfall and Discharge Extremes

RWS WVL, Deltares en HKV hebben samen een methodiek opgesteld om de bijdrage van rivierverruiming aan waterveiligheid en kosteneffectiviteit daarvan te bepalen. Deltares heeft de werkzaamheden uitgevoerd voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit. Ook heeft Deltares kentallen voor dijkversterkingskosten uit KOSWAT aangeleverd. HKV heeft werkzaamheden uitgevoerd voor de faalmechanismen overloop & golfoverslag en de afvoerwaterstandsrelatie langs de rivier afgeleid. RWS heeft de afvoerstatistiek uit GRADE aangeleverd. HKV heeft de diverse toelieferingen gebruikt bij de toepassing van de methodiek en het doorrekenen van de rivierverruimende maatregelen Nevengeul Sleeuwijk en Bypass Varik-Heesselt.

Disclaimer

Voorliggende studie beoogt gebruik te maken van de voorlopige inzichten opgedaan bij de totstandkoming van de toetsvoorschriften uit het WTI 2017. De WTI 2017 voorschriften zullen pas eind 2015 opgeleverd worden. Op dit moment worden alle onderdelen van het WTI 2017 bij elkaar gebracht. Onderdelen kunnen niet zomaar los van elkaar worden gebruikt. Een model kan bijvoorbeeld niet los van een schematisatie worden gebruikt en model en schematisatiekeuzen spelen in de kalibratie van veiligheidsfactoren een rol. Voor eind 2015 kan het WTI 2017 en haar voorlopige aannames ten aanzien van methoden en data in principe niet toegepast worden.

In de voorliggende studie wordt echter al wel gebruik gemaakt van een aantal onderdelen uit WTI 2017. Deze zijn gecombineerd met componenten (data en modellen) uit andere bronnen (VNK, OI2014, etc.) en vervolgens, voor zover mogelijk zoveel mogelijk consistent, toegepast op de nieuwe veiligheidsfilosofie. Hiervoor zijn binnen het project keuzes gemaakt en aannames gedaan. Daarbij zijn voor de losse componenten vaak veilige (conservatieve) aannames gedaan. Hierdoor worden conservatieve aannames gestapeld met als gevolg dat de methode naar verwachting hoge faalkansen zal opleveren, met name voor de mechanismes macrostabiliteit en piping.

In voorliggende studie is een methode toegepast die met fragility curves op probabilistische wijze overstromingskansen per vak en mechanisme berekent. Deze methode is niet vergelijkbaar met een van de toetslagen uit het WTI 2017.

De uitkomsten van de analyses kunnen niet in verband kunnen worden gebracht met mogelijke uitkomsten van het WTI 2017.

1.4 Leeswijzer

Het rapport bestaat uit de volgende hoofdstukken en bijlagen:

- Hoofdstuk 2: methodiek
 - Hoofdstuk 3: versterkingsopgave Waal
 - Hoofdstuk 4: effectiviteit rivierverruiming Waal
 - Hoofdstuk 5: extra analyse met betrekking tot onzekerheden in hydraulische belasting en het effect van meer rivierverruiming
 - Hoofdstuk 6: gevoeligheidsanalyses (invloed van uitgangspunten)
 - Hoofdstuk 7: conclusies en aanbevelingen

 - Bijlage A: Afleiding faalkansen o.b.v. OI2014
 - Bijlage B: Memo bepaling hoogteopgave
 - Bijlage C: Detailanalyse voor een dijkvak en een dijktraject
-

2 Methodiek

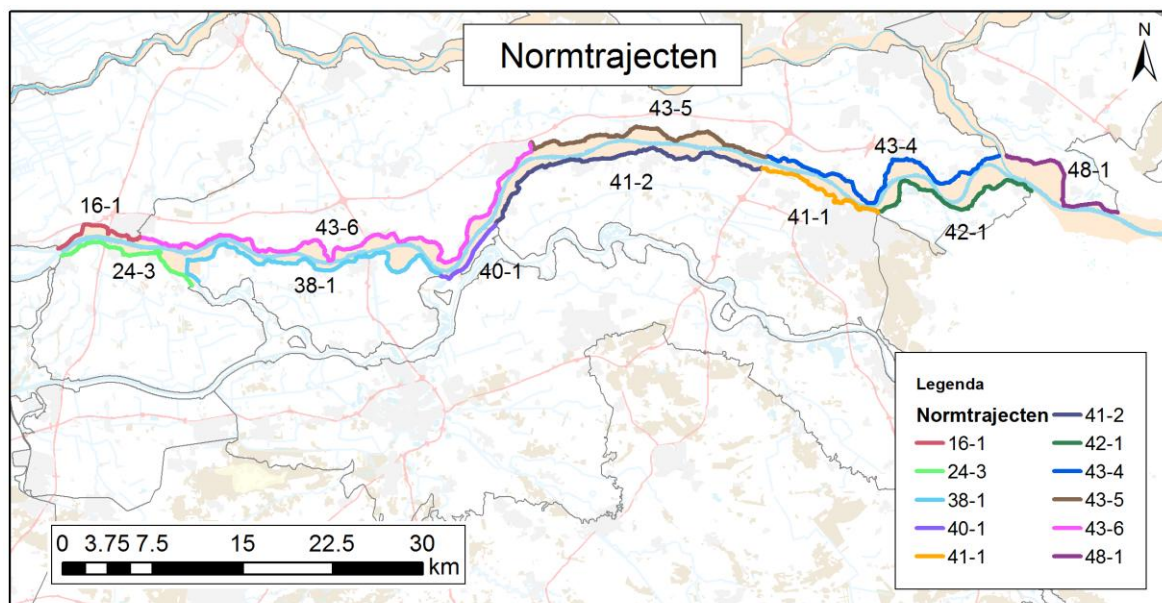
Met de overstap van een norm op basis van een overschrijdingskans van waterstanden naar een norm op basis van een overstromingskans, is het de bedoeling dat het effect van maatregelen kan worden uitgedrukt in (een afname van) de overstromingskans. Een afname van de overstromingskans heeft vervolgens effect op de mate van dijkversterking en daarmee op de dijkversterkingskosten. Daarmee kan worden bepaald in hoeverre een maatregel kosteneffectief is, in termen van een afname van de dijkversterkingskosten.

Van Vuren & Ter Horst (2015) en Asselman & Van der Meij (2015) hebben een verkennende analyse uitgevoerd om een methodiek te ontwikkelen om het effect van rivierverruiming op overstromingskans en dijkversterkingskosten te kwantificeren. Levelt et al. (2015) hebben deze methodiek verder uitgewerkt. Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van de methodiek. Voor een uitvoerige beschrijving van de methodiek wordt verwezen naar Levelt et al. (2015).

2.1 Normen en eisen

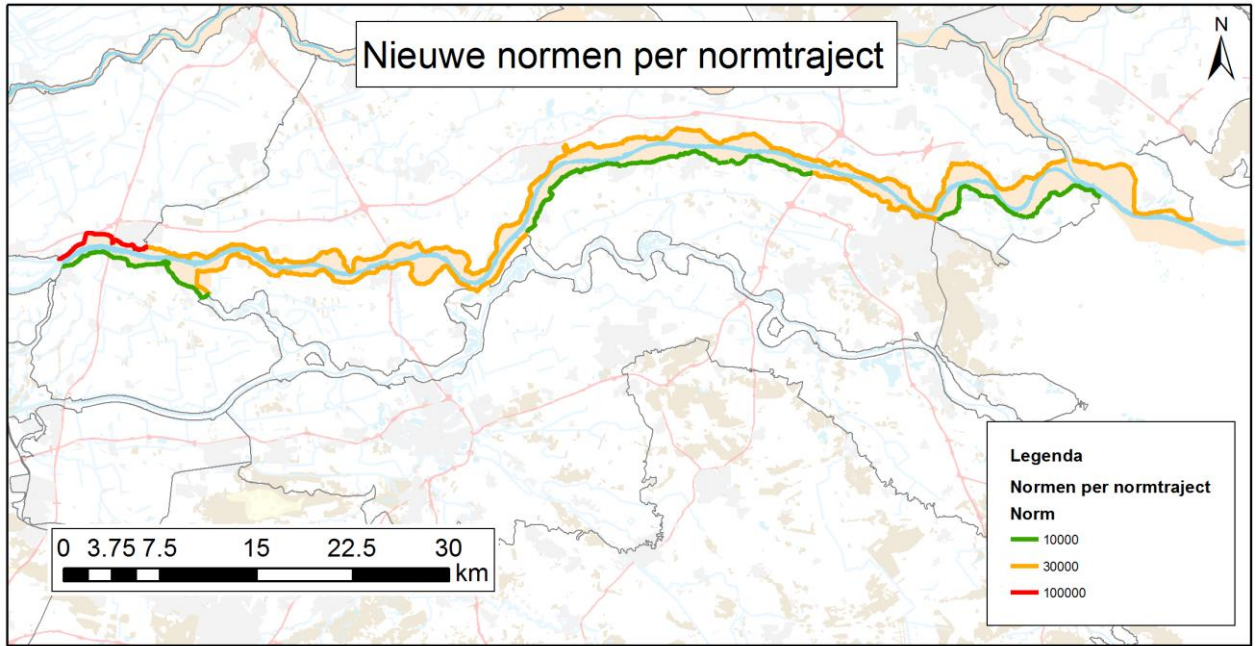
Het Deltaprogramma heeft een voorstel gedaan voor een overstromingskansnorm per normtraject. Figuur 1 geeft een overzicht van de normtrajecten langs de Waal tussen Gorinchem en Pannerden. Figuur 2 toont de voorgestelde nieuwe normen langs de Waal tussen Gorinchem en de Pannerden uit de Waterwet.

De overstromingskansnormen in de Waterwet zijn uitgedrukt als middenkans. De middenkans wordt ook wel aangeduid met signaleringswaarde. De afkeurkans is bepaald door de middenkans met een factor 3 te vermenigvuldigen. In de analyse is ervan uitgegaan dat de norm tot 2100 gelijk blijft en niet tussentijds verandert².



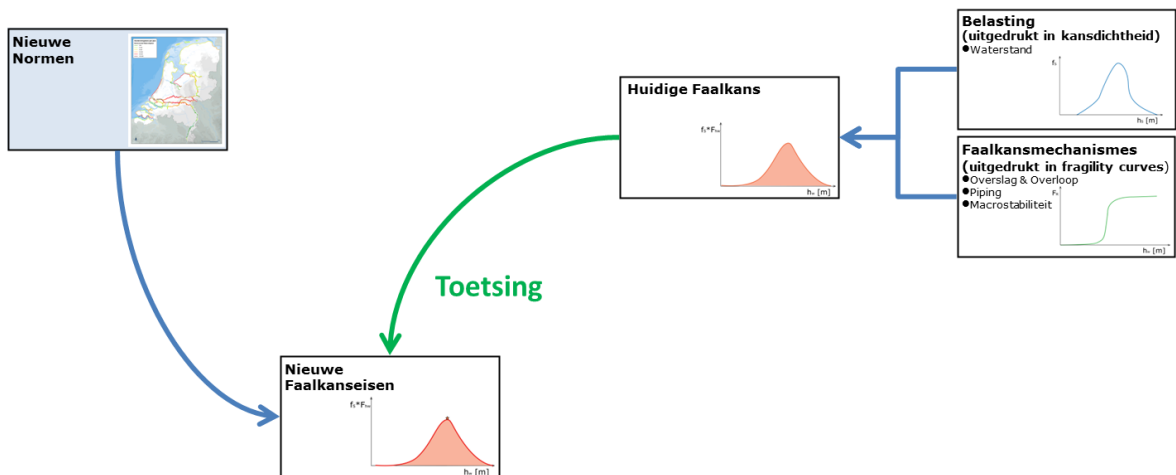
Figuur 1 Normtrajecten langs de Waal tussen Gorinchem en de Pannerden

² Het gelijk houden van de norm tot 2100 is een praktisch uitgangspunt. De norm kan in de toekomst veranderen.



Figuur 2 Nieuwe overstroomingskansnormen per normtraject langs de Waal tussen Gorinchem en de Pannerden

De overstroomingskansnorm per normtraject kan worden vertaald naar een faalkanseis per dijkvak. Per faalmechanisme kan de faalkanseis per dijkvak wordt bepaald. Door de faalkanseis die per dijkvak aan een faalmechanisme wordt gesteld te vergelijken met de faalkans voor dat faalmechanisme, kan worden bepaald of het dijkvak aan de faalkanseis voldoet, of dat er een opgave is (zie Figuur 3).



Figuur 3 Toetsing huidige faalkans aan wettelijk vereiste faalkans

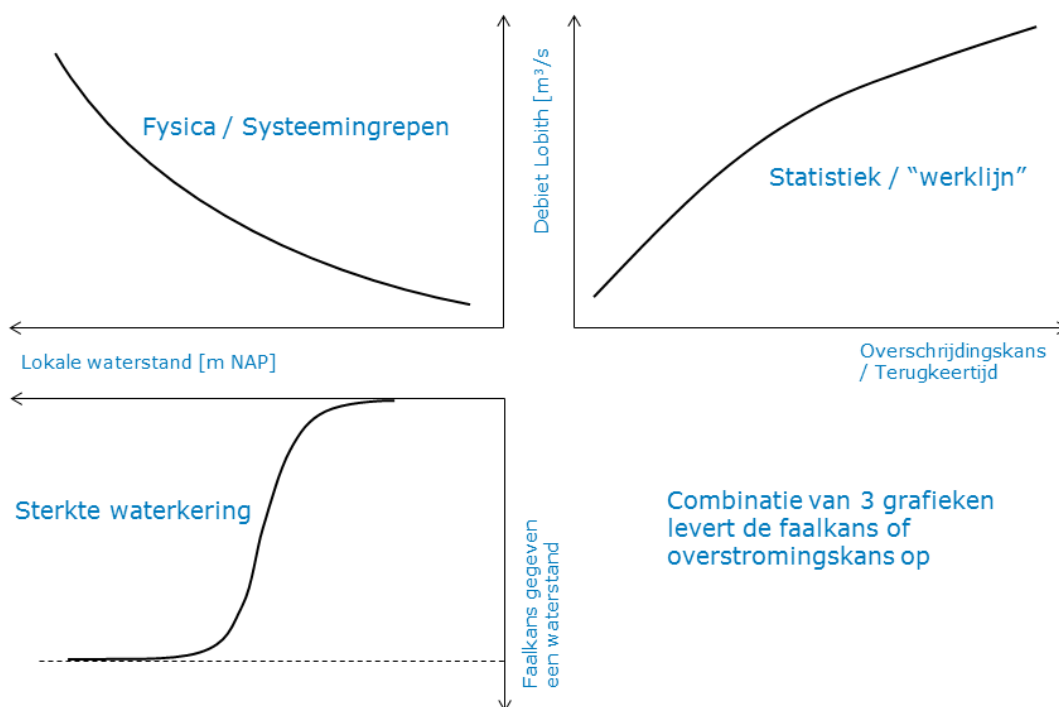
De handreiking ontwerpen met overstroomingskansen (OI2014., RWS WVL (2014)) beschrijft hoe voor elk faalmechanisme de faalkanseis per dijkvak kan worden bepaald. Bijlage A geeft hiervan een samenvatting. Tabel 1 geeft voor de faalkanseisen die op basis van het OI2014 voor de dijkvakken in deze normtrajecten gelden.

Traject	Norm uitgedrukt als middenkans	Afkeurkans	Eis hoogte	Eis piping	Eis macrostabiliteit
16-1	1/100.000	1/30.000	1/139.000	1/6.415.000	1/9.120.000
24-3	1/10.000	1/3.000	1/14.000	1/650.000	1/925.000
38-1	1/30.000	1/10.000	1/42.000	1/3.740.000	1/5.130.000
40-1	1/30.000	1/10.000	1/42.000	1/700.000	1/1.120.000
41-1	1/30.000	1/10.000	1/42.000	1/1.650.000	1/2.395.000
41-2	1/10.000	1/3.000	1/13.900	1/1.165.000	1/1.600.000
42-1	1/10.000	1/3.000	1/13.900	1/735.000	1/1.040.000
43-4	1/30.000	1/10.000	1/42.000	1/3.345.000	1/4.610.000
43-5	1/30.000	1/10.000	1/42.000	1/2.860.000	1/3.970.000
43-6	1/30.000	1/10.000	1/42.000	1/5.880.000	1/8.000.000

Tabel 1 Normen en faalkanseisen per mechanisme

2.2 Faalkansbepaling

De faalkans van een dijkvak kan ontleed worden tot een combinatie van drie componenten: (1) de afvoerstatistiek bij Lobith, (2) de beschrijving van de fysica van het watersysteem (de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de lokale waterstand bij de dijk) en (3) faalkansverdeling als functie van de waterstand per faalmechanisme (de zogenaamde fragility curve). Uit een samenstel van deze drie componenten kan de faalkans per dijkvak voor elk faalmechanisme worden bepaald. De drie componenten zijn geïllustreerd in *Figuur 4*.



Figuur 4 Combinatie van drie componenten tot faalkans van een dijk

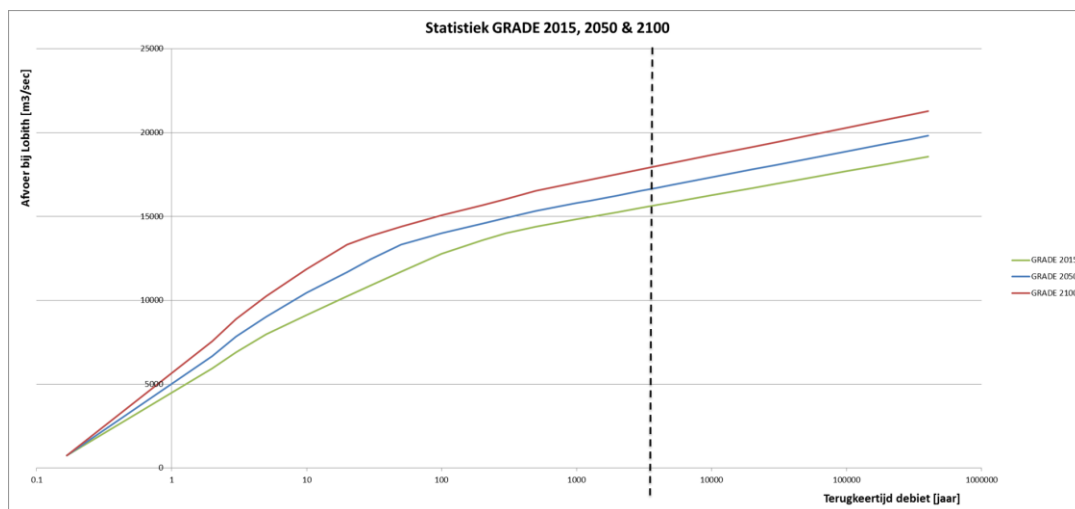
Omdat de relatie tussen de afvoer en de lokale waterstand voor elk dijkvak anders is én omdat de faalkansverdeling als functie van de waterstand voor elk faalmechanisme verschilt, is voor elk dijkvak de faalkans per faalmechanisme bepaald. De dijkvakindeling en de dijkprofielen zijn overgenomen uit het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK). De dijkvakken hebben gemiddeld een lengte van 1 km.

2.2.1 Belasting

De belasting op een dijkvak is uitgedrukt in de kansdichtheidsfunctie van de lokale waterstand. Deze kansdichtheidsfunctie is per dijkvak bepaald. De kansverdeling van de waterstanden kan bepaald worden uit (1) de afvoerstatistiek bij Lobith en (2) de afvoerwaterstandsrelatie (relatie tussen de piekafvoer bij Lobith en de lokale waterstand). Dit levert de overschrijdingskans als functie van de lokale waterstand. Op basis hiervan kan de kansdichtheidsfunctie van lokale waterstand worden bepaald.

Eerst is de afvoerstatistiek bij Lobith uitgedrukt in de overschrijdingskans als functie van de piekafvoer. In de analyse is gebruik gemaakt van de afvoerstatistiek uit de GRADE studie. Figuur 5 geeft de afvoerstatistiek in 2015, 2050 en 2100 weer. Voor de toekomstige zichtjaren 2050 en 2100 is uitgegaan van KNMI klimaatscenario W+.

In de afvoerstatistiek is rekening gehouden met overstromingen en noodmaatregelen in Duitsland. De figuur laat het afvlakken van de afvoer bij hogere terugkeertijden zien. De afvoeren zijn niet afgetopt op een fysiek maximum. De lijnen in Figuur 5 geven de verwachtingswaarden uit GRADE weer. De onzekerheid rondom de lijnen is niet uitgeïntegreerd. Door middel van een onzekerheidstoeslag op de waterstanden is rekening gehouden met onzekerheid in de afvoerstatistiek.



Figuur 5 Afvoerstatistiek bij Lobith uit GRADE voor 2015, 2050 en 2100 (rekening houdend met W+ klimaatscenario)

De afvoerwaterstandsrelatie is per dijkvak bepaald op basis van berekeningen met het waterbewegingsmodel WAQUA (Deltamodel) (Van Vuren et al, 2015). Er is gebruik gemaakt van berekeningen met negen piekafvoeren tussen 6.000 en 20.000 m³/s voor de zichtjaren 2015, 2050 en 2100. In de berekeningen is rekening gehouden met het effect van zeespiegelstijging. De invloed van klimaatverandering op de afvoer is meegenomen in de afvoerstatistiek. Voor de tussenliggende jaren wordt de afvoerwaterstandsrelatie lineair geïnterpoleerd. Aan elk dijkvak is één uitvoerpunt uit het WAQUA model gekoppeld, zie Van Vuren et al. (2015). De waterstanden zijn berekend aan de teen van de dijk (oeverlocaties).

2.2.2 Fragility curves

Een fragility curve geeft als functie van de waterstand aan hoe groot de kans is dat een dijkvak bezwijkt. De faalkans neemt toe bij hogere waterstanden. Bij zeer hoge waterstanden is het zeker dat de kering zal bezwijken. De faalkans is dan gelijk aan 1.

Fragility curves zijn gemaakt voor drie faalmechanismes: piping, macrostabiliteit, overloop/overslag. De analyse is beperkt tot deze drie faalmechanismen omdat deze faalmechanismen met name de kosten van dijkversterkingen bepalen. Voor elk faalmechanisme heeft de fragility curve een karakteristieke vorm. Curves voor hoogte hebben bijvoorbeeld een zeer scherpe overgang van 0 naar 1, terwijl curves voor piping een vloeiender verloop hebben.

De fragility curves voor het faalmechanisme overloop/overslag zijn afgeleid met PC-Ring (Steenbergen & Vrouwenvelder (2003), Steenbergen et al., 2008). In overeenstemming met de handreiking ontwerpen met overstromingskansen (OI2014 RWS WVL (2014) is aangenomen dat het kritiek overslagdebiet gelijk is aan 10 l/s/m. De erosiebestendigheid van het binnentalud is niet meegenomen bij de afleiding van de fragility curves. Het optredende overslagdebiet is berekend met formules voor golfoverslag van Van der Meer (TAW, 2002). Hierbij is gebruikt gemaakt van de dijkgeometrie uit VNK en zijn de golfparameters afgeleid op basis van de windstatistiek van de stations Schiphol en Deelen en de golfgroei formules van Bretschneider (Bretschneider, 1958).

De fragility curves voor het faalmechanisme piping/opbarsten zijn afgeleid met de herziene regel van Sellmeijer (RWS WVL, 2012). De berekeningen zijn volledig probabilistisch uitgevoerd in lijn met de methode die voor het WTI piping ontwikkeld is (Ter Horst et al., 2014). Er is uitgegaan van de ondergronddata en informatie over statistische onzekerheden uit VNK. Het lengte-effect is gehanteerd conform het OI2014. Er zijn twee wijzigingen in de rekensystematiek die er voor zorgen dat de rekenresultaten sterk veranderen ten opzichte van resultaten uit het verleden:

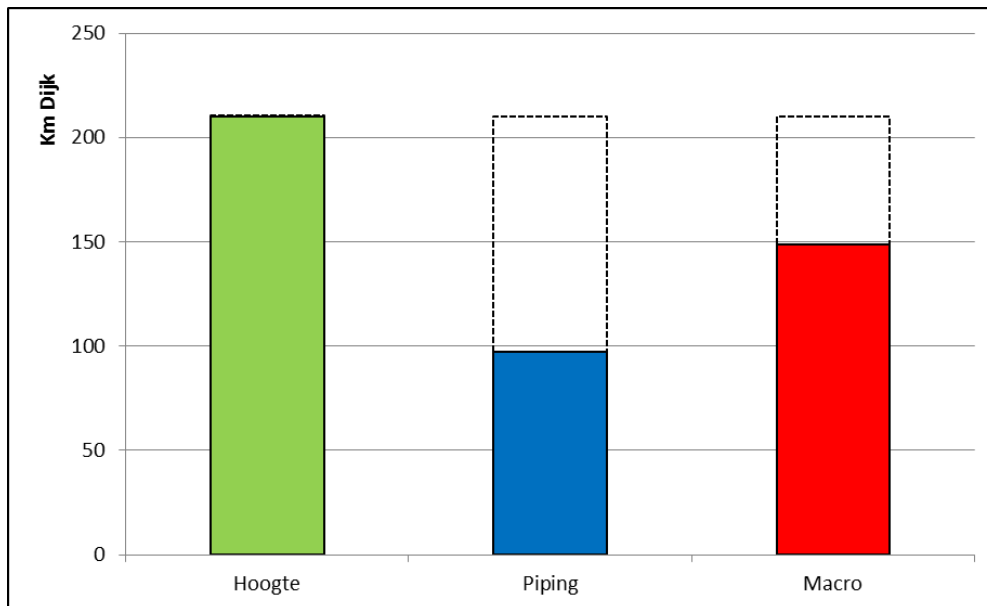
- Ten eerste is de formule van Sellmeijer aangepast en opnieuw gekalibreerd. Bij een korreldiameter van 180 mm in de piping-gevoelige zandlaag verandert er niets door deze wijzigingen. Bij een grovere korrel worden de resultaten ongunstiger en bij een fijnere korrel gunstiger. Netto blijkt dat de resultaten hierdoor significant ongunstiger worden.
- Ten tweede wordt niet uitsluitend meer gekeken naar de kans op piping, maar naar de gezamenlijke kans op piping, opdrijven en opbarsten. Deze drie mechanismes moeten gezamenlijk optreden voordat het faalmechanisme tot falen van de dijk leidt.

De fragility curves voor het faalmechanisme macrostabiliteit zijn afgeleid met behulp van ongedraineerde stabiliteitsberekeningen. Er is gebruik gemaakt van een model voor ongedraineerde schuifsterkte. De methode Spencer-van der Meij is gebruikt om een vrij glijvlak te bepalen. Hierbij is de zonering uit WTI2017 gebruikt. De ondergrond is geschematiseerd volgens het stochastische ondergrondmodel uit WTI2017 in combinatie met default ongedraineerde parameters. De maaiveldlijnen zijn gebruikt uit VNK.

In Nederland zijn altijd gedraineerd stabiliteitsanalyses uitgevoerd. De overstap van gedraineerd naar ongedraineerd rekenen is een belangrijke wijziging. Omdat lokale informatie niet grootschalig beschikbaar is, is gekozen om sterkte-eigenschappen te gebruiken die representatief zijn voor het gemiddelde gedrag over een langere strekking van de waterkering. Vanwege de beperkte ervaring met de ongedraineerde sterkte-eigenschappen is het lastig hiervoor goede "representatieve" waarden te kiezen. Het gebruik van grove, mogelijk veilige aannamen vertaalt zich in grote (onzekere) faalkansen. Het toevoegen van een sondering in een dwarsdoorsnede zal de lokale onzekerheden drastisch doen verkleinen waardoor er mogelijk met een veel sterker materiaal gerekend kan worden, waardoor de faalkansen kleiner worden.

Door het ontbreken van informatie en gegevens zijn niet voor alle dijkvakken de fragility curves voor de faalmechanismen overloop en golfoverslag, piping en

macrostabiliteit beschikbaar. Figuur 6 en Figuur 7 laten zien voor welke dijkvakken de fragility curves beschikbaar zijn.



Figuur 6 Aantal km dijken langs de Waal tussen Pannerden en Gorinchem waarvoor fragility curves beschikbaar zijn voor de faalmechanismen hoogte, piping en macrostabiliteit

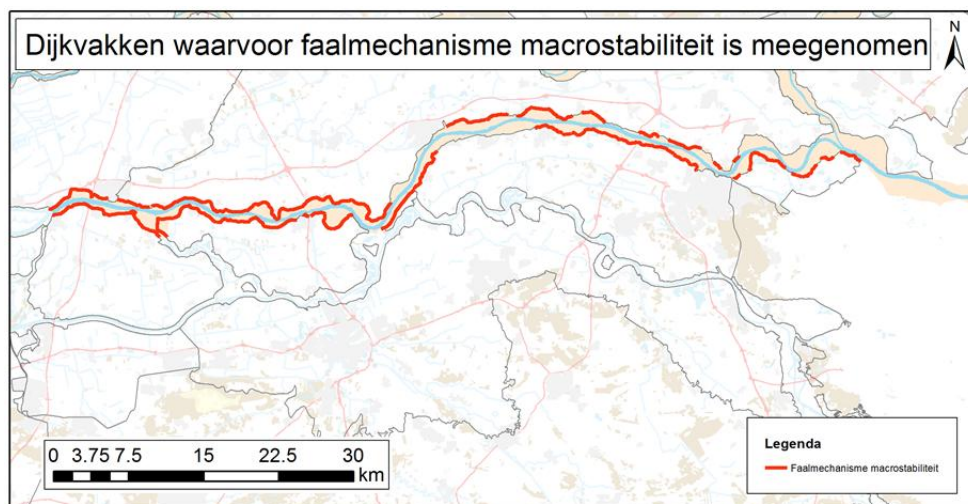
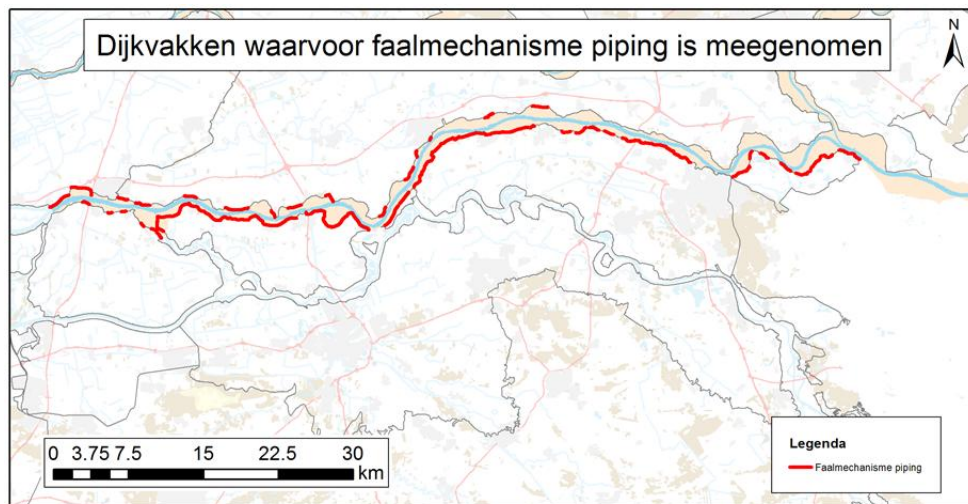
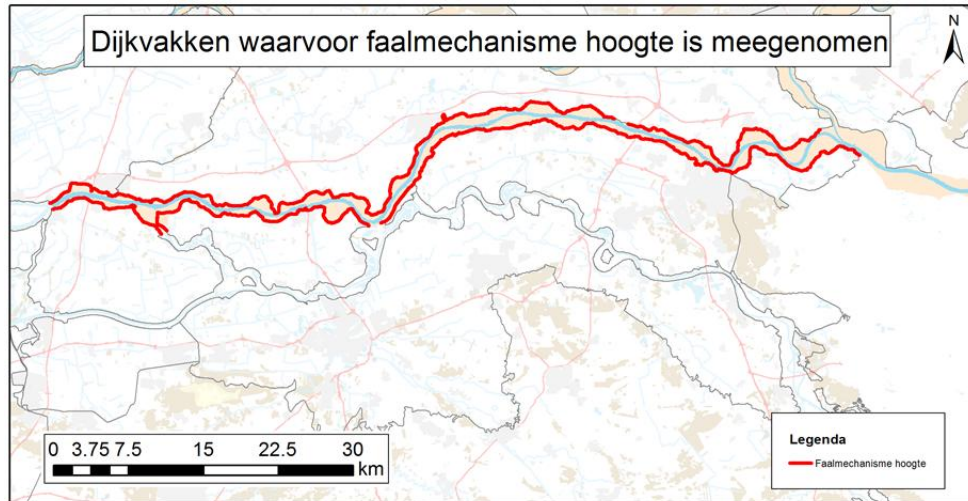
De figuren laten zien dat vrijwel voor alle dijkvakken fragility curves beschikbaar zijn voor het faalmechanisme overloop en golfoverslag voor 208 van 211 km.

Voor het faalmechanisme piping is veel minder informatie beschikbaar. Voor piping zijn slechts voor 97 van 211 km fragility curves afgeleid. De fragility curves voor het faalmechanisme piping zijn bepaald met behulp van ondergronddata uit VNK. In VNK zijn niet alle dijkvakken doorgerekend op piping. Piping is in VNK alleen beschouwd voor dijkvakken het meest gevoelig zijn voor piping. We verwachten dat uitgaande van nieuwe (strengere) normen en wijzigingen in de rekenmethodiek voor piping, er meer dijkvakken zijn die gevoelig zijn voor piping, en waarvoor het faalmechanisme piping wel beschouwd zou moeten worden.

Voor het faalmechanisme macrostabiliteit zijn voor 149 van 211 km fragility curves afgeleid. Ook hiervoor geldt dat er onvoldoende informatie en gegevens waren om voor de overige dijkvakken fragility curves af te leiden.

Voor de dijkvakken waar fragility curves ontbreken is geen volledige analyse gemaakt. Dat wil zeggen dat voor die dijkvakken alleen voor de faalmechanismen waarvoor wel fragility curves beschikbaar zijn, de dijkversterkingen en bijbehorende kosten zijn berekend. Dit betekent dat de berekende dijkversterkingskosten zouden hoger zijn, als de fragility curves wel beschikbaar zouden zijn.

In de gevoeligheidsanalyse in Hoofdstuk 6 is de invloed van de beschikbaarheid van de fragility curves voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit op de dijkversterkingskosten en de effectiviteit van rivierversuiming in beeld gebracht.

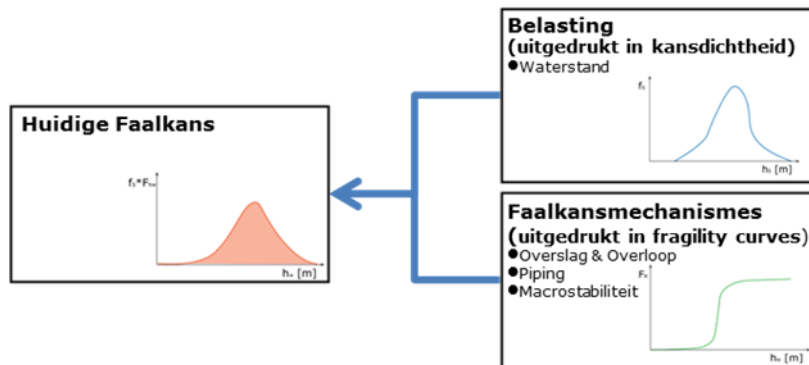


Figuur 7 Dijkvakken waarvoor fragility curves beschikbaar zijn voor de faalmechanismen hoogte, piping en macrostabiliteit

2.2.3 Faalkans van een dijkvak

De kans dat een dijkvak faalt door een bepaald mechanisme is berekend door de kansdichtheidsfunctie van de waterstand te vermenigvuldigen met de fragility curve

(conditionele faalkans) van dit faalmechanisme, en het resultaat te integreren. Het rood gearceerde oppervlak in Figuur 8 is gelijk aan de faalkans. Dit is een faalkans op doorsnedeniveau. Een dijkvak bestaat doorgaans uit meerdere doorsneden, waardoor de faalkans voor piping of macrostabiliteit van het gehele dijkvak groter kan zijn dan van een doorsnede. Faalkansbepaling, toetsing aan de faalkanseis en versterking zijn allemaal gebaseerd op kansen op doorsnedeniveau (zie hiervoor OI2014, RWS (2014)).



Figuur 8 Huidige faalkans per dijkprofiel

2.2.4 Faalkans van een dijktraject

De faalkans van een dijktraject dat uit meerdere dijkvakken bestaat, wordt bepaald door de faalkansen per dijkvak en de afhankelijkheden tussen de dijkvakken.

- Als de dijkvakken volledig afhankelijk van elkaar zijn, dan is de faalkans van het dijktraject gelijk aan de faalkans van het dijkvak met de grootste faalkans (maximum van de faalkansen van de dijkvakken).
- Als de dijkvakken volledig onafhankelijk van elkaar zijn, dan is de faalkans van het dijktraject gelijk aan de optelsom van de faalkansen van alle individuele dijkvakken.
- Als de dijkvakken gedeeltelijk afhankelijk van elkaar zijn, dan is de faalkans van het dijktraject groter dan het maximum van de faalkans van één van de dijkvakken en kleiner dan de optelsom van de faalkansen van alle individuele dijkvakken.

Met betrekking tot het faalmechanisme overloop & golfoverslag is er vaak een sterke afhankelijkheid tussen dijkvakken. Er is weinig verschil in de waterstandsstatistiek van opeenvolgende dijkvakken. Als een dijkvak faalt door het faalmechanisme overloop & golfoverslag, is de kans groot dat aangrenzende dijkvakken ook falen als deze vakken dezelfde faalkans hebben. Om een faalkans per dijktraject te bepalen voor het faalmechanisme overloop & golfoverslag gaan we uit van volledig afhankelijkheid. Het OI2014 (RWS WVL, 2014) geeft aan dat dit is voor het Bovenrivierengebied een goede aanname is .

Met betrekking tot piping en macrostabiliteit, is de afhankelijkheid tussen dijkvakken vaak veel kleiner. Dit komt onder andere doordat ondergrond van een dijk een heterogene opbouw heeft en een dijk faalt op het zwakste punt. Over relatief korte afstanden kan de ondergrond van een dijk sterk variëren. Om tot een faalkans per dijktraject te komen gaan we voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit uit van volledig onafhankelijkheid.

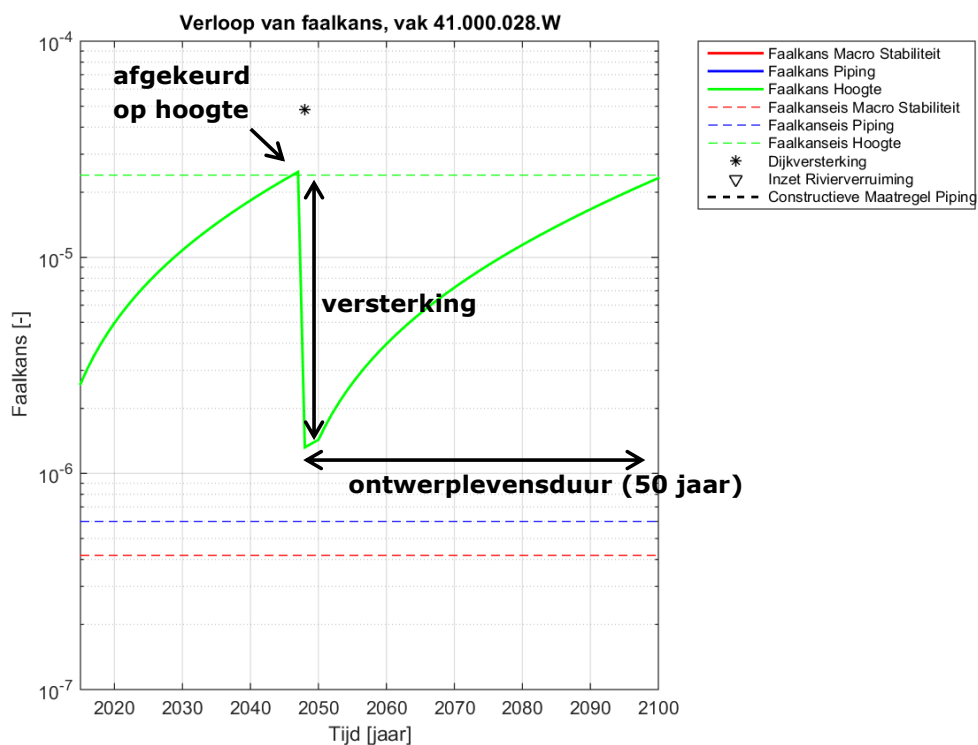
Om de faalkans op doorsnedeniveau om te rekenen naar een faalkans op vakkniveau, zijn dezelfde aannames met betrekking tot afhankelijkheid gedaan. Voor hoogte betekent dit dat de vakkans gelijk is aan de doorsnedekans. De vakkans voor piping en macrostabiliteit is gelijk aan de doorsnedekans maal het aantal onafhankelijke

doorsnedes in het vak. Vervolgens worden de mechanismekansen per vak op dezelfde manier opgerold tot mechanismekans per normtraject. De totale faalkans van een dijktraject bepalen we door de trajectkansen van de drie faalmechanismen bij elkaar op te tellen.

2.3 Veiligheidsopgave en dijkversterking

Door de faalkanseis die per dijkvak aan een faalmechanisme wordt gesteld te vergelijken met de faalkans voor dat faalmechanisme, kan worden bepaald of het dijkvak aan de faalkanseis voldoet, of dat er een opgave is. De ontwikkeling van de faalkans wordt berekend in de periode 2015 tot 2100. In de analyse wordt elk jaar gecontroleerd of de dijkvakken aan de faalkanseisen per faalmechanisme voldoen.

Als een dijkvak in een bepaald jaar niet meer voldoet aan één van de mechanisme-eisen, dan moet het dijkvak versterkt worden. De dijkversterking wordt bepaald die nodig is om aan de faalkanseisen voor dat dijkvak te voldoen. Bij de versterking wordt een ontwerplevensduur van 50 jaar gehanteerd (zie Figuur 9). De vaste ontwerp horizon is een aanname. Dat wil zeggen dat de ontwerpdimensies (verhoging en verbreding) zodanig worden gekozen dat de dijk over 50 jaar nog net aan de faalkanseisen voldoet. Voor elk faalmechanisme wordt bepaald welke dijkversterking er nodig is, ook als het dijkvak in het betreffende jaar nog aan de eis voor dat faalmechanisme voldoet. Voor elk faalmechanisme wordt bepaald voor welke fragility curve het dijkvak aan de faalkanseis voldoet. Hieruit wordt de mate van dijkversterking afgeleid: dijkverhoging ten behoeve van overloop en overslag en dijkverbreding ten behoeve van piping en macrostabiliteit.



Figuur 9 Voorbeeld faalkansverloop en de faalkanseisen voor de faalmechanismen overloop en golfoverslag, piping en macrostabiliteit

Bij het bepalen van de dijkversterking wordt rekening gehouden met veranderingen in de ontwerpbelasting over die 50 jaar. Met betrekking tot de ontwerpbelasting over 50 jaar houden we rekening met klimaatverandering (hogere rivierafvoer en

zeespiegelstijging) en bodemdaling. Er is gebruik gemaakt van informatie over bodemdaling uit Asselman et al. (2014).

Om beter aan te sluiten bij de praktijk, is er voor gekozen de dijken niet direct in 2015 te versterken. Prioritaire vakken uit het HWBP worden in 2025 versterkt. De overige vakken worden in 2035 of later versterkt.

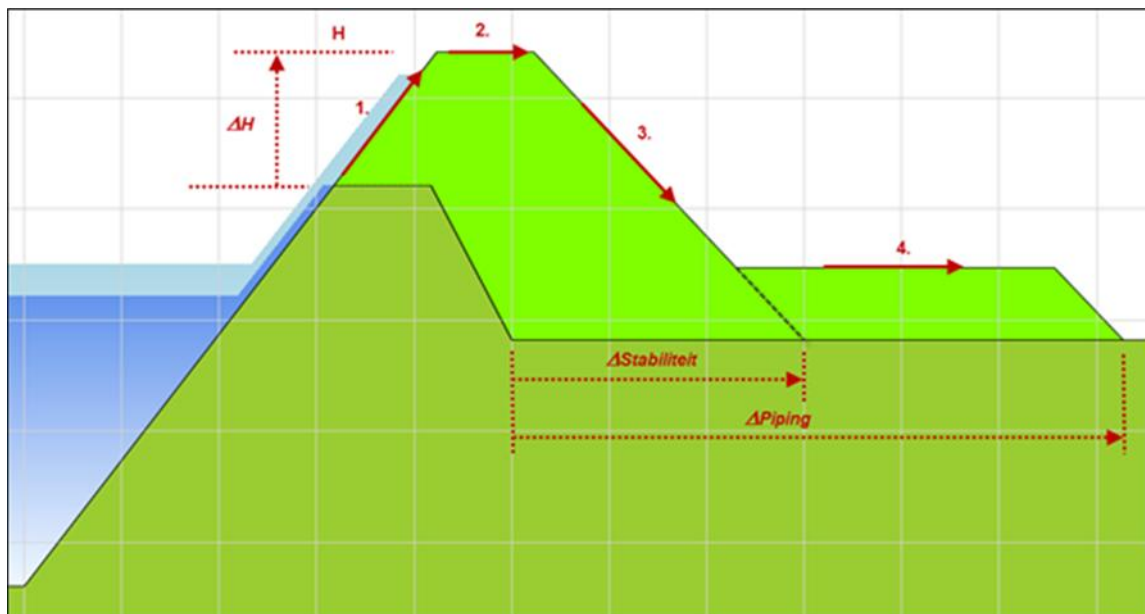
Wanneer een rivierverruimende maatregel wordt uitgevoerd tijdens de levensduur van de dijkversterking, wordt het effect van de rivierverruimende maatregel in rekening gebracht bij het bepalen van de ontwerpbelasting. Hierdoor hoeft de dijk minder versterkt te worden.

2.4 Dijkversterkingskosten

2.4.1 Dijkversterkingskosten

De versterkingskosten zijn berekend met KOSWAT v2.3 (Deltares, 2014). Voor elk dijkvak zijn de versterkingskosten bepaald van een toename van de kruinhoogte (ΔH), een toename van de dijkbasis ten behoeve van macrostabiliteit (ΔS) en een toename van dijkbasis ten behoeve van piping (ΔP) (zie Figuur 10). Hierbij zijn 7 stappen van ΔH beschouwd (0, 0.01, 0.25, 0.5, 1, 1.5 en 2m), 5 stappen van ΔS (0, 5, 10, 25 en 50m) en 7 stappen van ΔP (0, 5, 10, 25, 50, 100 en 150m). Op basis van KOSWAT is per dijkvak een database gemaakt met de kosten voor alle combinaties van ΔH , ΔS en ΔP , 245 combinaties per dijkvak. Tussen de combinaties wordt lineair geïnterpoleerd. Een knippunt in de kosten treedt op wanneer een dijk niet of net wel verhoogd moet worden. In het tweede geval dient weginfrastructuur op de kruin vervangen te worden, in het eerste geval slechts hersteld. De geraamde kosten zijn prijspeil 2013, inclusief BTW.

Oplossingen worden in principe uitgevoerd in grond. Wanneer onvoldoende ruimte beschikbaar is voor een berm (piping) of taludverflauwing (macrostabiliteit), bijvoorbeeld door de aanwezigheid van bebouwing naast de dijk, rekt KOSWAT met een constructieve maatregel.



Figuur 10 Dimensies van dijkversterking in het dwarsprofiel

Als gevolg van het gebruik van de herziene regel van Sellmeijer en de toegepaste methodiek in het voorlopige OI2014, worden kwelweglengtes berekend die een factor

2 tot 5 groter zijn dan de kwelweglengtes die op dit moment aanwezig zijn. Dit leidt tot grote berm lengtes. Hoewel er in theorie geen limiet is aan de berm lengte is een zeer lange pipingberm in praktijk vaak niet haalbaar vanwege ruimte tekorten. In dat geval wordt een alternatieve (constructieve) maatregel toegepast. Vanaf circa 100 m blijkt in KOSWAT een constructieve maatregel (kwelscherm) kosteneffectiever te worden dan een pipingberm (De Grave, 2015). Als de benodigde breedte van de pipingberm groter is dan 100 m (verschil tussen Δ Piping en Δ Stabiliteit in Figuur 10), zijn de kosten van de alternatieve maatregel geraamd door de kosten van een pipingberm van 100 m te nemen, de kosten zijn als het ware afgekapt. Bij het toepassen van een constructieve maatregel wordt aangenomen dat de faalkans voor piping naar 0 gaat.

2.4.2 *Discontovoet en contante waarde van versterkingskosten*

De versterkingskosten worden verdisconteerd naar de contante waarde van die kosten. De factor tussen de werkelijke kosten en de contante waarde wordt gegeven door:

$$K_{cw}(t) = K(t) \frac{1}{(1+i)^{t-t_0}}$$

Deze contante kosten op verschillende tijdstippen worden vervolgens bij elkaar opgeteld:

$$K_{cw} = \sum K(t) \frac{1}{(1+i)^{t-t_0}}$$

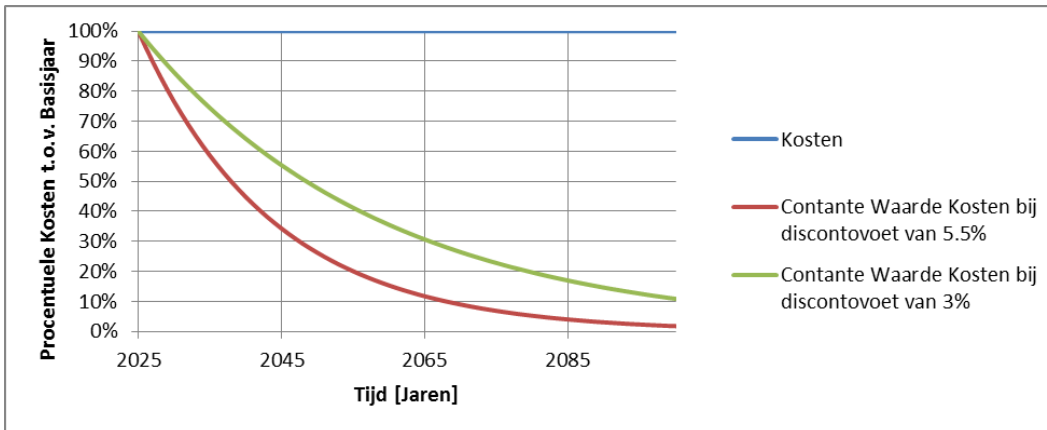
Waarin:

K _{cw}	contante waarde kosten
K	werkelijke kosten
i	discontovoet
t	jaar waarin kosten worden gemaakt
t ₀	basisjaar

Bij het bepalen van de contante waarde is uitgegaan van een discontovoet van 5.5% en het basisjaar 2025 omdat in dat jaar de eerste investeringen verwacht worden. Om de kosten te verdisconteren naar 2015, dienen de kosten met basisjaar 2025 gedeeld te worden door 1.7 (bij een discontovoet van 5.5%).

Eens per vijf jaar wordt door het kabinet een discontovoet vastgesteld. De huidige discontovoet, geldig vanaf 2009 en herbevestigd in 2011, bedraagt 5.5%. In het najaar van 2014 is door het kabinet een werkgroep ingesteld om een advies over de nieuwe discontovoet op te stellen. Aanleiding voor de actualisatie van de discontovoet is voor een deel gelegen in een verdere daling van de reële rente de afgelopen jaren, maar komt vooral voort uit de vraag of de huidige disconteringsmethodiek voldoende recht doet aan: 1) verschillen tussen beleidsterreinen, 2) langetermijneffecten en 3) de ontwikkeling van wetenschappelijke inzichten. Er ligt een concept advies, waarin geadviseerd wordt om de discontovoet voor waterveiligheidsprojecten in de nabije toekomst te verlagen van 5.5% naar 3%. Vooral nog is in de voorliggende analyse een discontovoet van 5.5% gehanteerd. In de gevoeligheidsanalyse is de invloed van een lagere discontovoet onderzocht.

Figuur 11 geeft de procentuele bijdrage van kosten als functie van de tijd aan de Contante Waarde in het basisjaar 2025 bij een discontovoet van 5.5% en 3%. Hieruit volgt dat de kosten bij een lagere discontovoet meer doortellen in de Contante Waarde in het basisjaar 2025.



Figuur 11 Bijdrage van kosten als functie van de tijd aan de Contante Waarde in het basisjaar 2025 bij een discontovoet van 5.5% en 3%.

2.4.3 Restwaarden van versterkingskosten

De analyse is uitgevoerd voor de periode 2025-2100. Investerings die aan het eind van deze periode worden gedaan (bijvoorbeeld in 2095), hebben in 2100 nog een bepaalde restwaarde. Deze restwaarde is per vak bepaald op basis van de kosten van de laatste versterking en de tijd tussen de laatste versterking en het einde van de analyse periode (2100).

De restlevensduur na 2100 is bepaald als percentage van de totale levensduur van 50 jaar. Dit percentage is vermenigvuldigd met de versterkingskosten van de laatste versterking om de restwaarden (de waarde van de dijkversterking buiten de analyse periode) te bepalen. In formulevorm is dit:

$$Restwaarde_i = klv_i \cdot \left(\frac{50 - (2100 - jlv_i)}{50} \right)$$

Hierin is

- Restwaarde_i restwaarde voor vak i;
- klv_i kosten laatste versterking voor vak i;
- jlv_i jaar van uitvoering laatste versterking voor vak i;

De restwaarde is meegenomen als een 'negatieve investering' in 2100. De totale versterkingskosten inclusief de restwaarde is gelijk aan de totale versterkingskosten verminderd met de restwaarde in 2100:

$$Totaalkosten \text{ incl. Restwaarde} = Totaalkosten \text{ excl. Restwaarde} - Totale Restwaarde$$

2.5 Samenvatting van uitgangspunten

Deze paragraaf beschrijft puntsgewijs de uitgangspunten zoals die gehanteerd zijn bij de toepassing van de methodiek. Bij het interpreteren van de resultaten moet nadrukkelijk rekening worden gehouden met het feit dat een deel van deze uitgangspunten is gebaseerd op voorlopige inzichten van het WTI (Wettelijk Toet Instrumentarium) en het OI (Ontwerp Instrumentarium). Het veranderen van deze uitgangspunten kan van invloed zijn op de resultaten en conclusies die in deze analyse worden getrokken. Hoofdstuk 6 bevat de resultaten van een gevoeligheidsanalyse waarin de gevoeligheid van een aantal van deze uitgangspunten is onderzocht.

Algemeen

- Berekeningen zijn uitgevoerd voor de periode 2015-2100
- Restwaarde na 2100 is meegenomen in de analyse
- Normen uit het normvoorstel van het Deltaprogramma
- Normen blijven tot 2100 gelijk
- Discontovoet van 5,5%, basisjaar 2025

Belasting

- Afvoerstatistiek uit GRADE (maart 2015 voor OI2014-vs3), waarin rekening is gehouden met overstromingen en noodmaatregelen in Duitsland. De afvoer bij hogere terugkeertijden wordt wel afgevlakt, maar niet afgetopt op een fysiek maximum. De onzekerheid rondom de lijnen is niet uitgeïntegreerd. Door middel van een onzekerheidstoeslag op de waterstanden is rekening gehouden met onzekerheid in de afvoerstatistiek.
- Klimaatscenario W+
- Afvoerwaterstandsrelaties afgeleid uit modelberekeningen (Van Vuren et al., 2015)
- Bodemdaling uit het Deltaprogramma (Asselman et al. 2014)
- Onzekerheidstoeslag: 0.3 m

Sterkte

- Kritiek overslagdebiet: 10 l/s/m
- Piping: herziene regel van Sellmeijer (Ter Horst et al., 2014)
- Macrostabieleit: ongedraineerd rekenen, met WTI Kernel (versie)
- Bepaling faalkanseisen doorsnede op basis van Handreiking ontwerpen met overstromingskans (OI2014) (RWS WVL, 2014)
- Niet voor alle dijkvakken zijn fragility curves beschikbaar:
 - Hoogte: voor 208 van 211 km zijn fragility curves beschikbaar
 - Piping: voor 97 van 211 km zijn fragility curves beschikbaar
 - Macrostabieleit: voor 149 van 211 km zijn fragility curves beschikbaar

Dijkversterking

- Prioritaire dijkversterkingen uit het HWBP worden uitgevoerd in 2025
- Niet-prioritaire dijkversterkingen worden uitgevoerd vanaf 2035
- De lengte van een pipingberm is beperkt tot 100 m, bij grotere benodigde berm lengtes wordt een constructieve maatregel geraamd. Bij toepassen van een constructieve maatregel wordt de faalkans voor piping 0
- De faalkans voor macrostabieleit is op 0 gezet na de eerste versterking³
- De versterkingskosten zijn bepaald met KOSWAT v2.3
- De restwaarde van de dijkversterking in 2100 is meegenomen in de analyse. De restlevensduur na 2100 is bepaald als percentage van de totale levensduur van 50 jaar. Dit percentage is vermenigvuldigd met de versterkingskosten van de laatste versterking om de restwaarden (de waarde van de dijkversterking buiten de analyse periode) te bepalen.

Rivierverruiming

- Aanleg nevengeul Sleeuwijk en Bypass Varik-Heesselt in 2025.
- De waterstandseffecten van beide maatregelen samen zijn gelijk aan de optelsom van de waterstandseffecten als gevolg van de afzonderlijke maatregelen.

³ Omdat na de eerste versterking bij veel vakken geen goed faalkansverloop wordt berekend. Zie ook paragraaf 5.1.

3 Versterkingsopgave Waal

Dit hoofdstuk beschrijft de versterkingsopgave langs de Waal tussen de Pannerden en Gorinchem voor de faalmechanismen hoogte, piping en macrostabiliteit. Per faalmechanisme is de versterkingsopgave gepresenteerd volgend uit de 3^e toetsronde (met WTI-2006) en volgend uit de toepassing van de nieuwe methodiek. Voor de nieuwe methodiek presenteren we de versterkingsopgave voor 2015, 2050 en 2100. Daarbij is uitgegaan van de nieuwe normen. De verschillen tussen de versterkingsopgave in 2050 en 2100 ten opzichte van 2015 worden vooral veroorzaakt door klimaatverandering en bodemdaling.

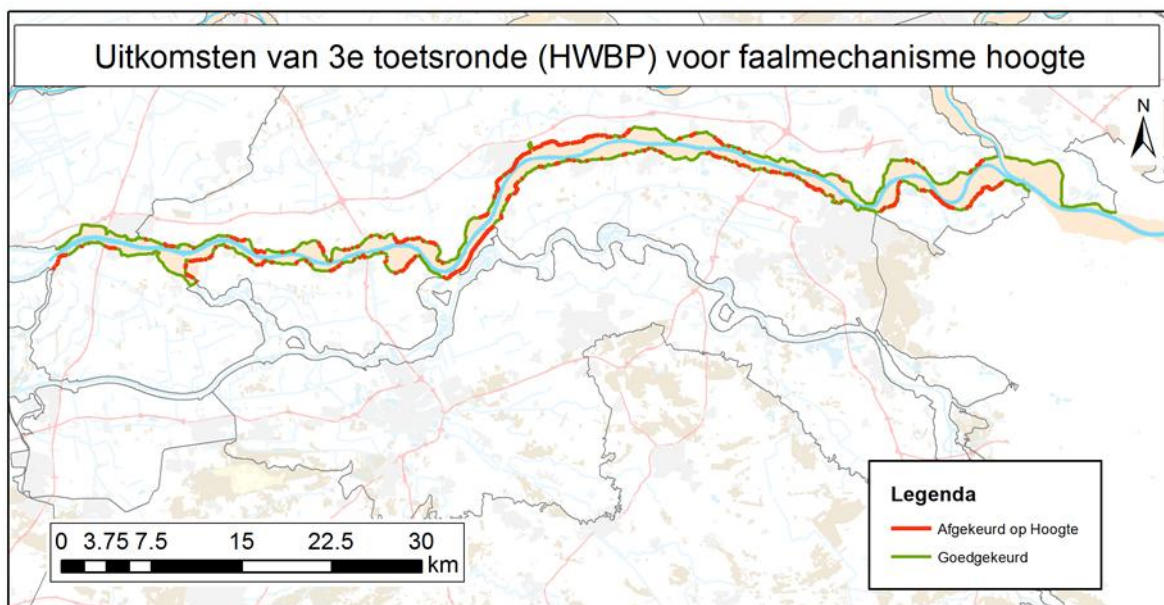
Om dijken te kunnen ontwerpen en toetsen aan de nieuwe normen op basis van overstromingskansen is een instrument in ontwikkeling. Dit instrument heet het Wettelijk Toets Instrumentarium (WTI). In 2017 komt een eerste versie van het WTI-instrument beschikbaar. In Hoofdstuk 2 is aangegeven dat een aantal aannamen en uitgangspunten overgenomen zijn uit het WTI-instrument dat momenteel ontwikkeld wordt. In aanvulling daarop is ook gebruik gemaakt van informatie uit VNK. Dit betekent dat de methodiek zelf, de gebruikte onderliggende data en de uitkomsten van de methodiek uit voorliggende studie niet één op één overeen zullen komen met de methodiek, de gebruikte onderliggende data en de uitkomsten die het WTI-instrument zal opleveren.

De uitkomsten van de methodiek uit voorliggende studie laten zien dat de uitgangspunten volgend uit nieuwe inzichten (ten aanzien van afvoerstatistiek, onzekerheidstoelag, piping en macrostabiliteit) met de parameterinstellingen en invoergegevens zoals in deze studie zijn gehanteerd, een veel grotere dijkversterkingsopgave opleveren dan op basis van de 3^e toetsronde verwacht werd.

3.1 Opgave voor het faalmechanisme hoogte

Resultaten uit de 3^e toetsronde

In de 3^e toetsronde van de primaire waterkeringen is een aanzienlijk deel van de dijken langs het traject Pannerden-Gorinchem afgekeurd. Figuur 12 geeft een overzicht van de goedkeuringen en afkeuringen voor het faalmechanisme hoogte.



Figuur 12 Afkeuringen 3e toetsronde voor hoogte

Resultaten uit de toepassing van de methodiek

Op basis van de resultaten van de toepassing van de methodiek is bepaald in welke mate de dijken langs het traject Pannerden-Gorinchem goed- of afgekeurd zijn. Hiervoor is de factor bepaald tussen de actuele faalkans voor hoogte en de faalkanseis op doorsnedeniveau volgens de nieuwe norm. Als de faalkanseis voor hoogte van een vak 1/14.000 per jaar is en de faalkans 1/140 per jaar, is het vak dus met een factor 100 afgekeurd.

Figuur 13 toont de mate van goed- of afkeuringen voor de huidige situatie (2015), 2050 en 2100. De afgekeurde vakken in 2015 komen redelijk overeen met de afkeuringen in de 3^e toetsronde, waarbij opgemerkt wordt dat in de huidige analyse gewerkt is op het niveau van VNK-vakken. Deze vakken zijn gemiddeld 1 kilometer lang en daardoor is de mate van detail kleiner dan in de analyses uit de 3^e toetsronde. Veel vakken die in 2015 met een factor 1-10 net zijn goedgekeurd, zijn in 2050 afgekeurd.

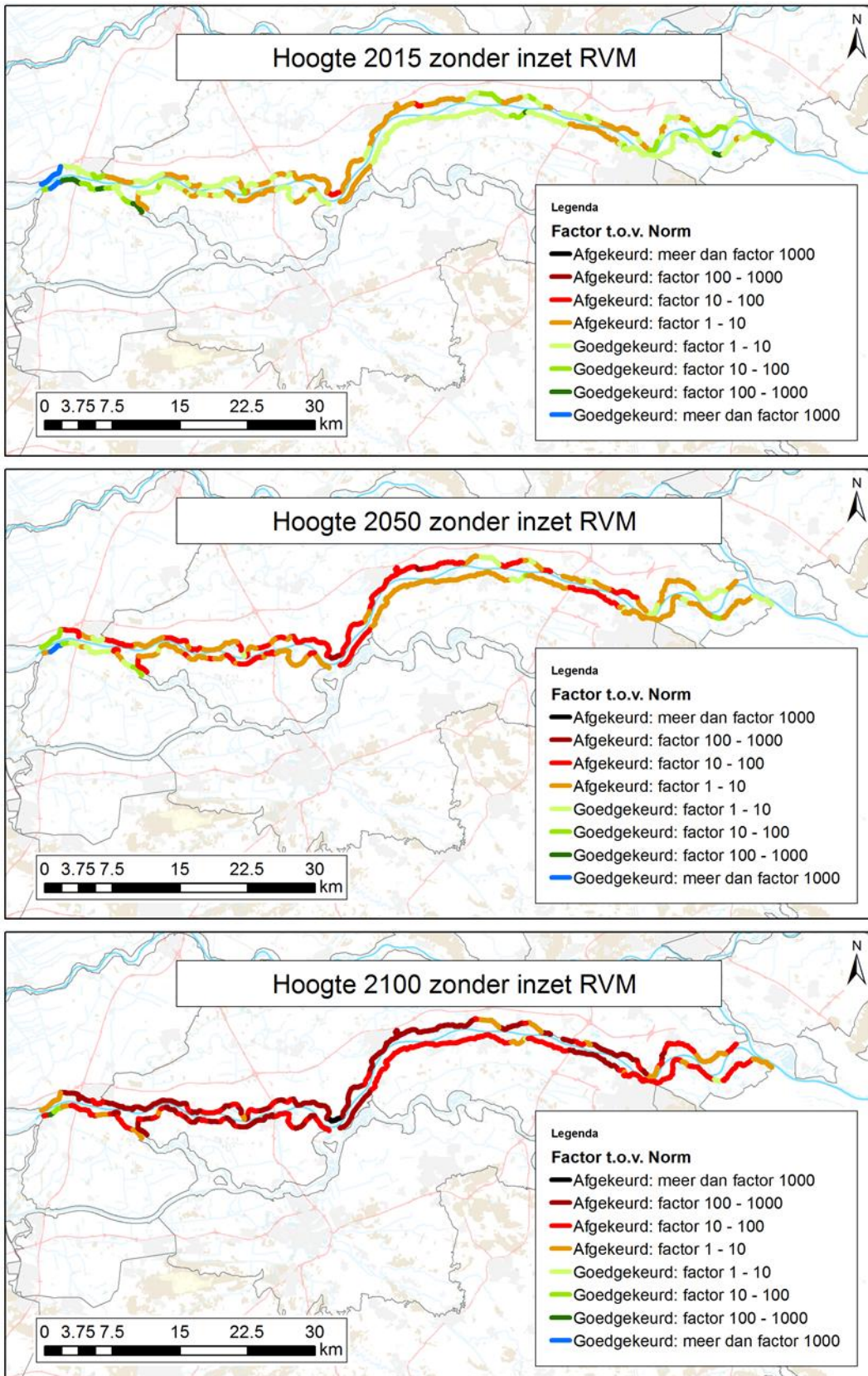
Met de nieuwe methodiek is ook de kruinhoogteopgave tot 2075⁴ bepaald. De blauwe lijn in Figuur 14 geeft deze kruinhoogteopgave weer voor de gehele Waal. De figuur laat zien dat de kruinverhoging die nodig is om tot 2075 aan de faalkanseis te voldoen, gemiddeld over de hele Waal ongeveer 0,70 m is. Voor het traject 43-6 (Gorinchem-Waardenburg) bedraagt deze benodigde kruinverhoging ongeveer 0,90 m.

In het Deltaprogramma Rivieren (DPR) is de hoogteopgave voor 2050 ook bepaald. DPR heeft de hoogteopgave voor 2050 gedefinieerd als het verschil tussen de waterstand bij een afvoer van 16.000 m³/s (MHW 2015) en de waterstand bij een afvoer van 17.000 m³/s (MHW 2050). De hoogteopgave voor 2100 is het verschil tussen de waterstand bij een afvoer van 16.000 m³/s en de waterstand bij een afvoer van 18.000 m³/s. De hoogteopgave voor 2075 is het gemiddelde van de hoogteopgave in 2050 en 2100. De zwarte lijn in Figuur 14 geeft de hoogteopgave voor 2075 weer. De zwarte stippellijn geeft de hoogteopgave indien ook rekening wordt gehouden met bodemdaling. De hoogteopgave is gemiddeld 0,50 m.

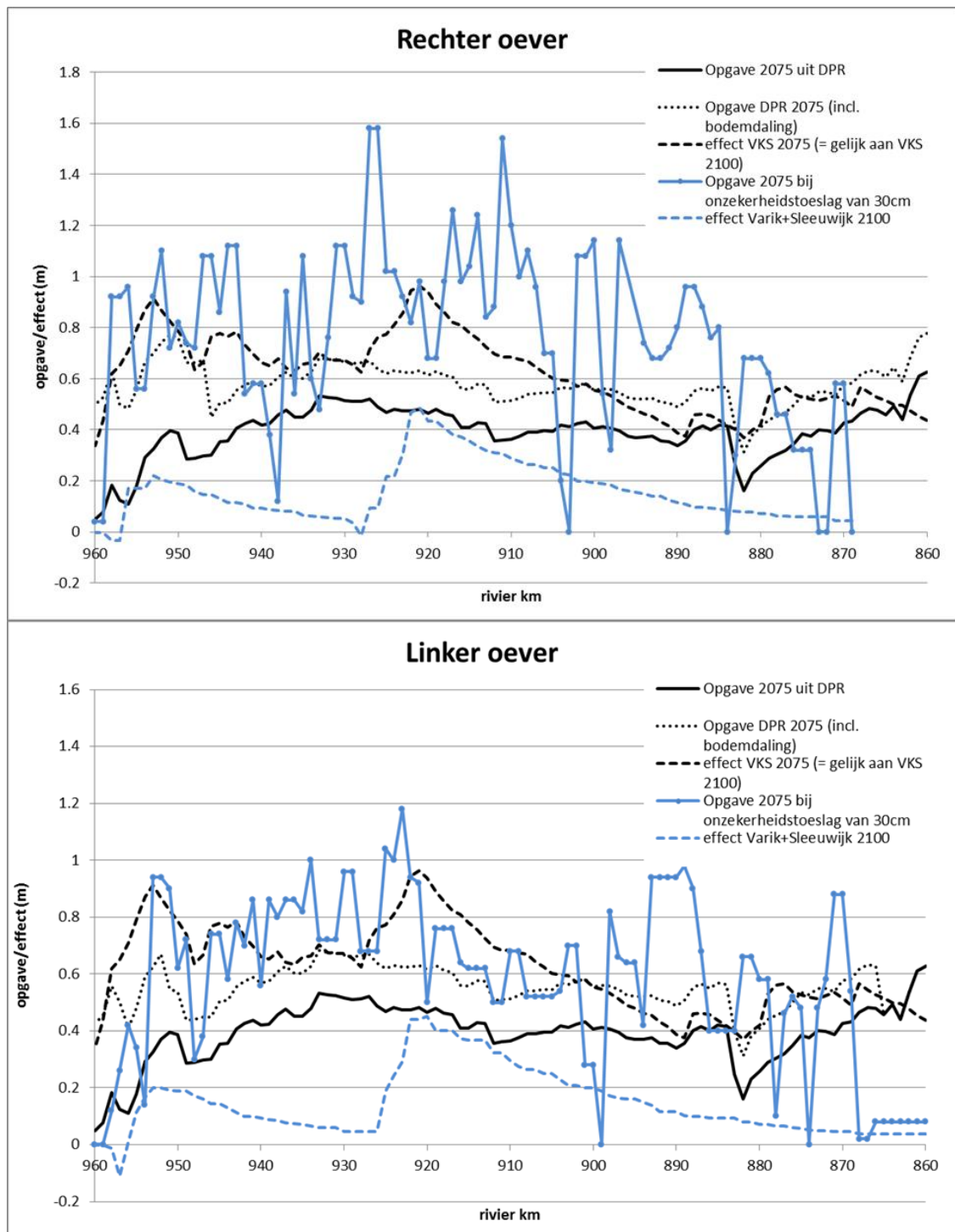
De figuur laat zien dat hoogteopgave van DPR kleiner is dan de kruinhoogteopgave die volgt uit de nieuwe methodiek. De kruinhoogteopgave die met de nieuwe methodiek is bepaald is niet één-op-één vergelijkbaar met de uitkomsten van DPR. Deze werkwijze in de nieuwe methodiek verschilt op meerdere punten van de werkwijze die is gehanteerd door DPR, namelijk:

- De hoogteopgave van DPR betreft een deel van de opgave: het deel dat gekoppeld is aan klimaatverandering en bodemdaling. De reden hiervoor is dat de VKS van DPR er op gericht was om het effect van klimaatverandering en bodemdaling te compenseren met rivierverruiming. Het resterende deel van de opgave (om te voldoen aan de 'nieuwe norm') werd verondersteld te worden op gelost met dijkversterking.
- Bij de toepassing van de nieuwe methodiek is rekening gehouden met klimaatverandering en de nieuwe normen.
- De nieuwe methodiek houdt daarnaast rekening met de actuele kruinhoogte (de hoogte van de buitenkruinlijn uit VNK is gebruikt; de hoogte van de buitenkruinlijn is naar verwachting iets lager dan de werkelijke kruinhoogte). Profielen met een hoogtetekort krijgen daardoor een hogere opgave. Profielen met een overhoogte krijgen daardoor een lagere opgave.
- Ook wordt in de nieuwe methodiek gebruik gemaakt van een hoger overslagdebiet, een onzekerheidstoeslag op de waterstanden en een andere afvoerstatistiek (GRADE).

⁴ 2075 is gekozen omdat de eerste dijkversterkingen plaatsvinden in 2025. De dijkversterkingen worden ontworpen voor een levensduur van 50 jaar en moeten tot 2075 aan de eisen voldoen.



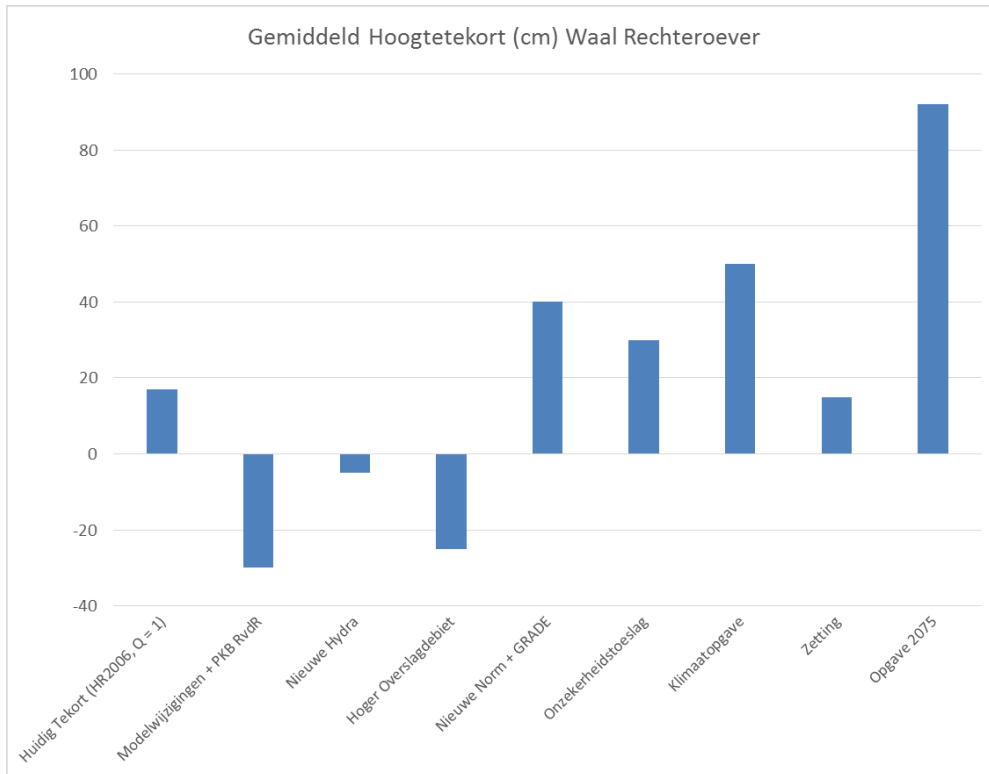
Figuur 13 Factor tussen faalkans hoogte en faalkanseis hoogte in 2015, 2050 en 2100 (RVM = rivierverruiming)



Figuur 14 Hoogteopgave uit nieuwe methodiek en DPR en waterstandsverlaging door rivierverruiming Varik en Sleuwig

Door de vele verschillen is de hoogteopgave uit DPR dus niet direct vergelijkbaar met de hoogteopgave die volgt uit de toepassing van de nieuwe methodiek. Figuur 15 geeft inzicht in de opbouw van de hoogteopgave die met de nieuwe methodiek is berekend. De veranderingen in uitgangspunten resulteren samen in een kruinhoogteopgave van gemiddeld 0,90 m op het traject 43-6. Een uitgebreidere toelichting is te vinden in Bijlage B. Figuur 15 laat ook zien dat het huidige hoogtetekort (ongeveer 20cm, 1^e

balkje van het staafdiagram) na alle veranderingen van methoden en normen niet veranderd is sinds de 3^e toetsronde (HR2006, oude norm).



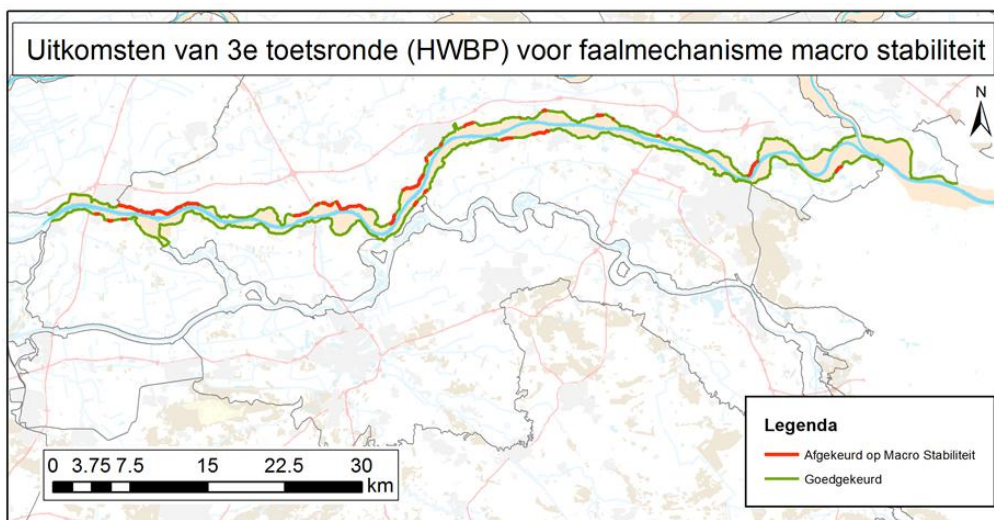
Figuur 15 Verschillende bijdragen aan de veranderingen in de hoogte-opgave 2075 (laatste staaf)

3.2 Opgave voor het faalmechanisme macrostabiliteit

Resultaten uit de 3e toetsronde

In de 3^e toetsronde van de primaire waterkeringen is een deel van de dijken langs het traject Pannerden-Gorinchem afgekeurd op het faalmechanisme macrostabiliteit.

Figuur 16 geeft een overzicht van de goedkeuringen en afkeuringen.



Figuur 16 Afkeuringen 3^e toetsronde voor macrostabiliteit

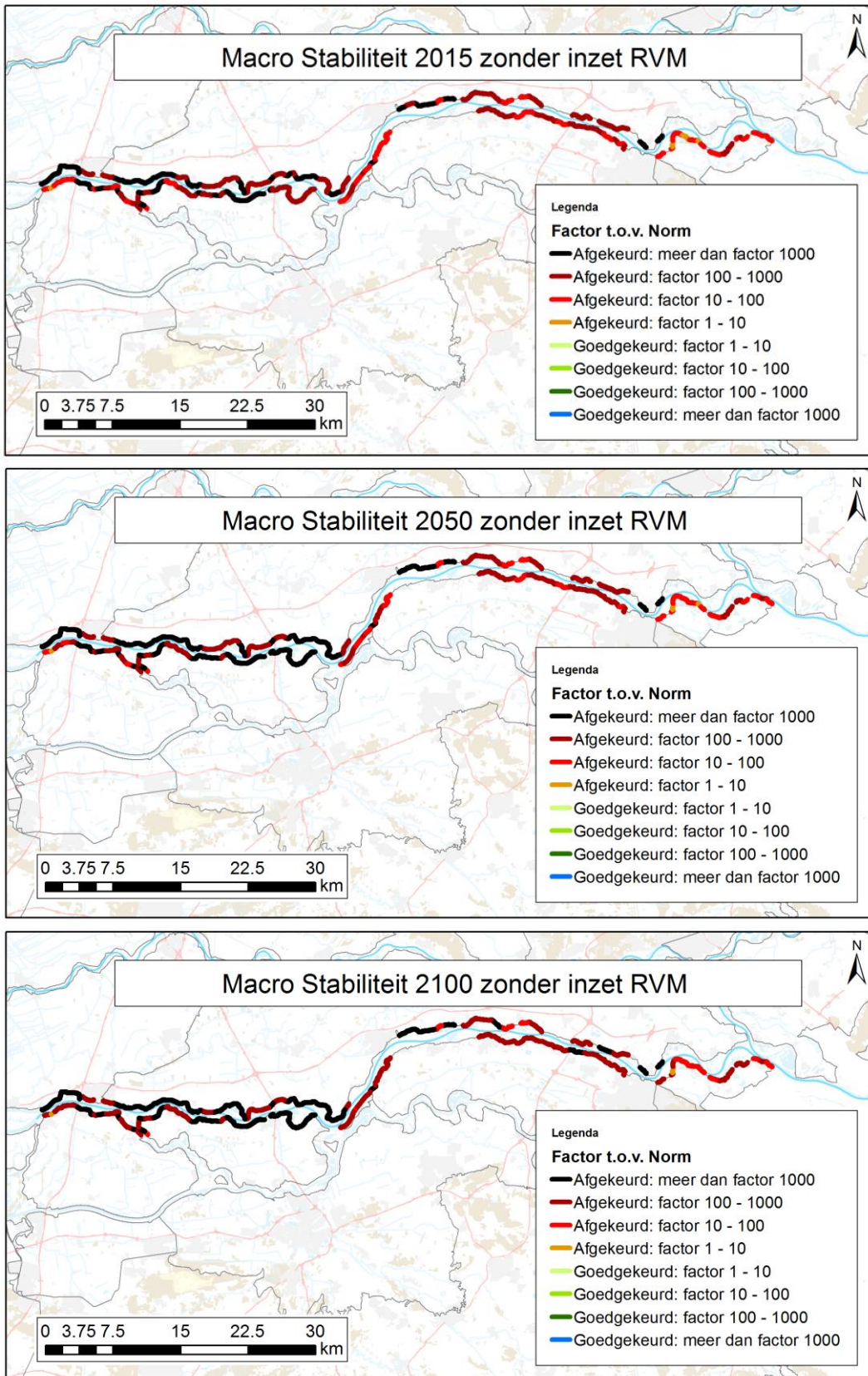
Resultaten uit de toepassing van de methodiek

Op basis van de resultaten van de toepassing van de methodiek is bepaald in welke mate de dijken langs het traject Pannerden-Gorinchem goed- of afgekeurd zijn. Hiervoor is de factor bepaald tussen de actuele faalkans voor hoogte en de faalkanseis op doorsnedeniveau volgens de nieuwe norm. Figuur 17 toont de mate van goed- of afkeuringen voor het faalmechanisme macrostabiliteit voor de huidige situatie (2015), 2050 en 2100. Figuur 17 laat zien dat de verandering in afkeuringen tussen 2015, 2050 en 2100 beperkt zijn. De verschillen tussen de versterkingsopgave in 2050 en 2100 ten opzichte van 2015 zijn vooral veroorzaakt door klimaatverandering en bodemdaling. Deze veranderingen hebben een beperkte invloed op de versterkingsopgave voor het faalmechanisme macrostabiliteit.

De figuur laat zien dat vakken die in de 3^e toetsronde zijn afgekeurd, in de analyse een zeer hoge faalkans krijgen, waardoor de vakken in 2015 al vaak meer dan een factor 1000 zijn afgekeurd. Ook zijn er vakken die in de 3^e toetsronde nog goedgekeurd zijn en die in de analyse met meer dan een factor 1000 afgekeurd zijn. De mate van afkeuring bij een factor groter dan 1000, varieert tussen de 1000 en 10.000.

Een belangrijke reden waardoor een groot deel van de dijkvakken bij het toepassen van de methodiek is afgekeurd op het faalmechanisme macrostabiliteit is dat we een ongedraineerde stabiliteitsanalyse hebben uitgevoerd. Doordat data en informatie over de sterkte van de ondergrond ontbreekt, zijn in deze analyse zijn relatief grove aannamen voor sterkte-parameters van de ondergrond gedaan. Een ongedraineerde stabiliteitsanalyse in combinatie met deze aannamen leidt tot een veel ongunstiger beeld met hoge faalkansen. De 3^e toetsronde is gebaseerd op een gedraineerde stabiliteitsanalyse en is bovendien gerekend met de oude (minder strengere op overschrijdingskansen gebaseerde) normen. Een aantal vakken rond Tiel die in de 3^e toetsronde zijn afgekeurd, zijn niet meegenomen in de analyse. Dit komt door het ontbreken van informatie, waardoor voor deze vakken geen fragility curves beschikbaar waren (zie paragraaf 2.2.2).

In de gevoeligheidsanalyse in Hoofdstuk 6 is de invloed van keuzes en uitgangspunten ten aanzien van het faalmechanisme macrostabiliteit niet onderzocht. Het effect van het geheel buiten beschouwing laten van het faalmechanisme macrostabiliteit is wel onderzocht.

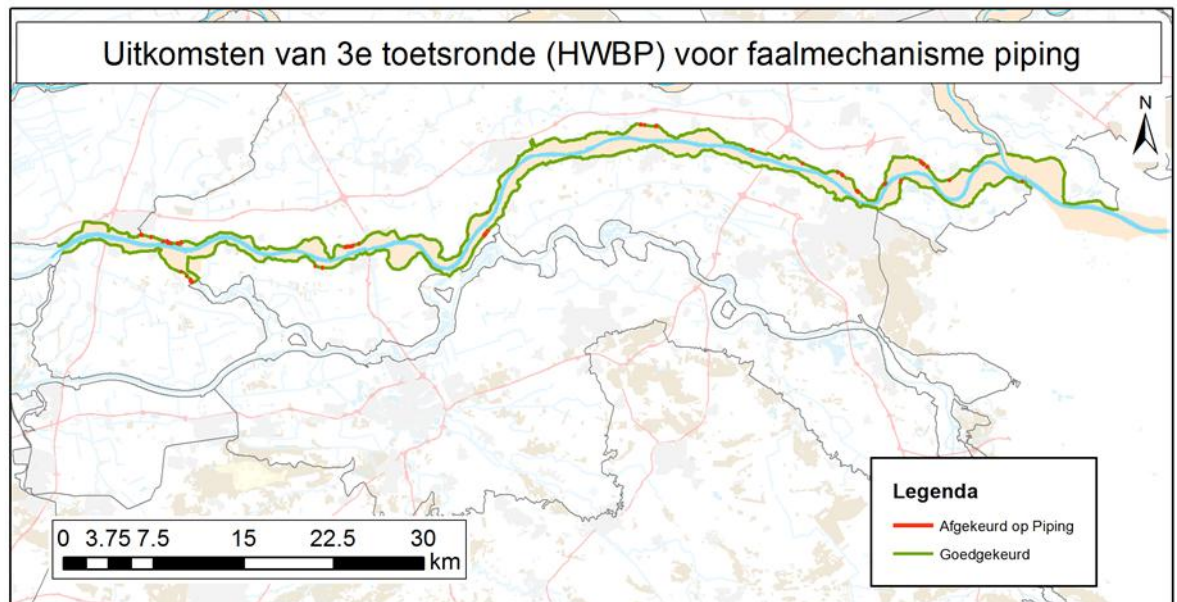


Figuur 17 Factor tussen faalkans macrostabiliteit en faalkanseis macrostabiliteit in 2015, 2050 en 2100 (RVM = rivierverruiming) (Voor de vakken zonder resultaat zijn geen fragility curves beschikbaar en zijn geen faalkansen en opgaven berekend)

3.3 Opgave voor het faalmechanisme piping

Resultaten uit de 3^e toetsronde

In de 3^e toetsronde van de primaire waterkeringen is een klein deel van de dijken langs het traject Pannerden-Gorinchem afgekeurd op het faalmechanisme piping. Figuur 18 geeft een overzicht van de goedkeuringen en afkeuringen.



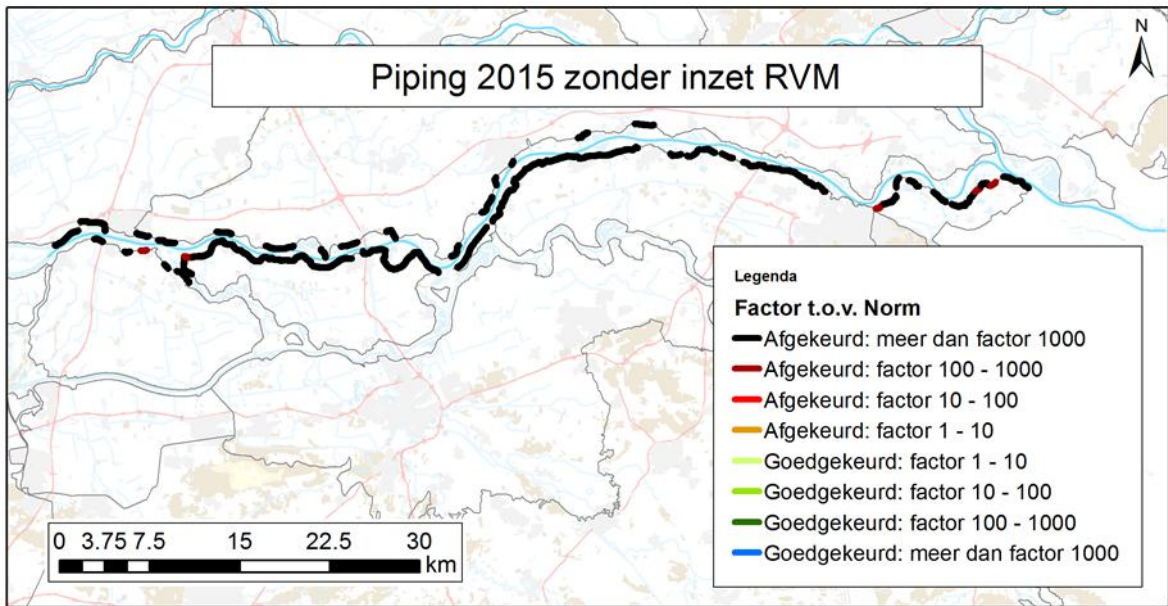
Figuur 18 Afkeuringen 3^e toetsronde voor piping

Resultaten uit de toepassing van de methodiek

Op basis van de resultaten van de toepassing van de methodiek is bepaald in welke mate de dijken langs het traject Pannerden-Gorinchem goed- of afgekeurd zijn. Hiervoor is de factor bepaald tussen de actuele faalkansen voor piping en de faalkansen op doorsnedeniveau volgens de nieuwe norm. Figuur 19 toont de mate van goed- of afkeuringen voor de huidige situatie (2015) voor het faalmechanisme piping. Hieruit blijkt dat bij toepassing van de nieuwe methodiek vrijwel alle dijkvakken met meer dan een factor 1000 zijn afgekeurd op piping, terwijl in de 3^e toetsronde slechts een klein aantal dijkvakken zijn afgekeurd. Figuur 19 toont alleen het resultaat voor 2015. Het figuur ziet er voor 2050 en 2100 hetzelfde uit, omdat vrijwel alle dijkvakken in 2015 al met meer dan een factor 1000 zijn afgekeurd. De mate van afkeuring bij een factor groter dan 1000, varieert tussen de 100.000 en 500.000.

De hoge faalkansen en de grote veranderingen ten opzichte van de 3^e toetsronde zijn vooral veroorzaakt door de herziene regel van Sellmeijer. Daarnaast is in de 3^e toetsronde gerekend met de oude (minder strengere op overschrijdingskansen gebaseerde) normen. Bijna alle dijkvakken die de 3^e toetsronde zijn afgekeurd, zijn meegenomen in de analyse, met uitzondering van enkele dijkvakken tussen de Pannerden en Dodewaard waarvoor geen fragility curves beschikbaar waren. Een groot aantal vakken dat in de 3^e toetsronde zijn goedgekeurd, zijn niet meegenomen in de analyse. Dit komt door het ontbreken van informatie, waardoor voor deze vakken geen fragility curves beschikbaar waren (zie paragraaf 2.2.2).

In de gevoeligheidsanalyse in Hoofdstuk 6 is de invloed van keuzes en uitgangspunten ten aanzien van het faalmechanisme piping niet onderzocht. Het effect van het geheel buiten beschouwing laten van het faalmechanisme piping is wel onderzocht. We adviseren om de invloed van keuzes gerelateerd aan parameters voor het faalmechanisme piping op de berekende faalkansen en versterkingsopgaven te onderzoeken.



Figuur 19 Factor tussen faalkans piping en faalkanseis piping in 2015 (RVM = rivierverruiming) (Voor de vakken zonder resultaat zijn geen fragility curves beschikbaar en zijn geen faalkansen en opgaven berekend)

4 Effectiviteit Rivierverruiming Waal

4.1 Beschrijving van de casestudies

4.1.1 Varianten

We beoordelen de effectiviteit van vier varianten:

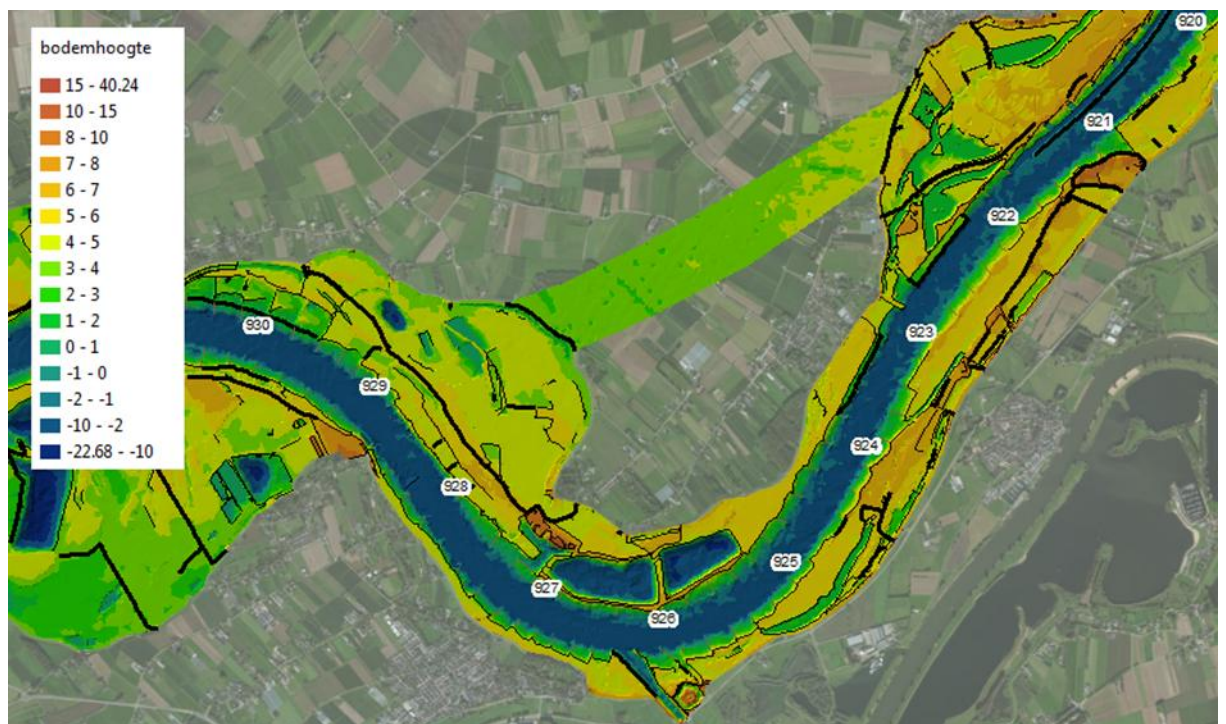
- Alleen dijkversterking zonder rivierverruiming (Referentie)
- Bypass Varik-Heesselt, aangevuld met dijkversterking
- Nevengeul Sleeuwijk, aangevuld met dijkversterking
- Bypass Varik-Heesselt en Nevengeul Sleeuwijk, aangevuld met dijkversterking

Hieronder geven we een korte toelichting op de Nevengeul Sleeuwijk en Bypass Varik-Heesselt.

4.1.2 Bypass Varik-Heesselt

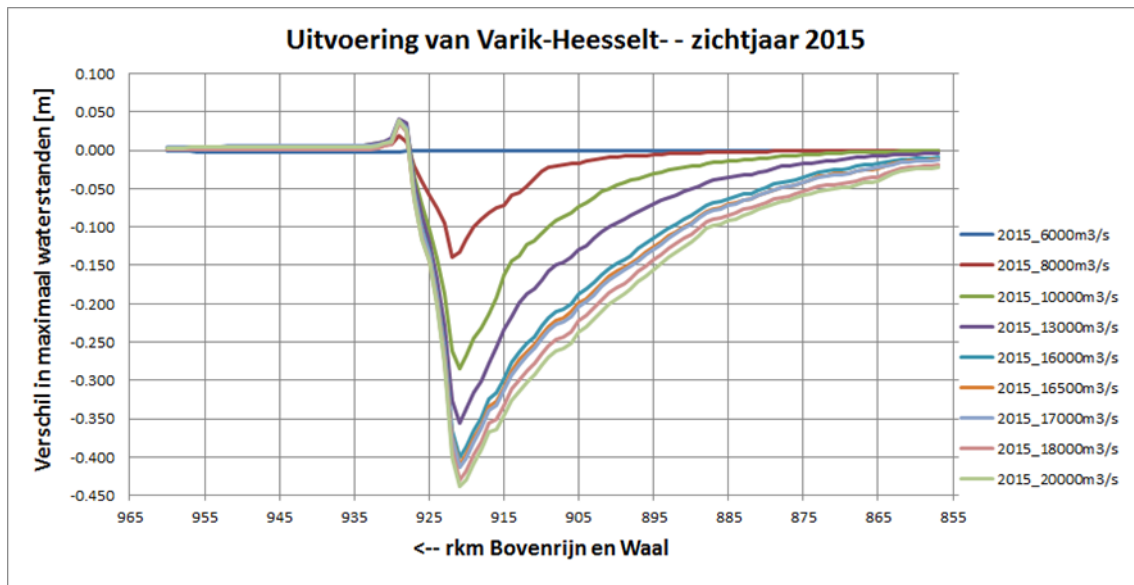
Ter hoogte van de kernen Varik en Heesselt maakt de Waal een scherpe bocht. Tijdens hoogwater zorgt deze bocht ervoor dat het water niet snel kan doorstromen. De ingreep "Bypass Varik-Heesselt" betreft de aanleg van een hoogwatergeul op de rechteroever, tussen de Stiftische Uiterwaarden en de Heesseltsche Uiterwaarden. De hoogwatergeul moet zorgen voor een flinke waterstandsvaling.

Het ontwerp van de hoogwatergeul is onderwerp van nadere studie onder leiding van Provincie Gelderland, waarbij verschillende varianten worden onderzocht. In de analyse is uitgegaan van een hoogwatergeul met een lengte van ongeveer 2,8 km en een breedte van 500 m. De bodem van de hoogwatergeul is gelijk aan het huidige maaiveld en wordt niet vergraven. De begroeiing van de hoogwatergeul is productiegrasland. De winterdijk wordt bij de inlaat tot 6.91m+NAP en bij de uitlaat tot 6.11 m+NAP afgegraven. De geul stroomt mee vanaf afvoeren hoger dan 6000 m³/s. Figuur 18 geeft een beeld van de maatregel. De uitvoeringskosten van de Bypass Varik-Heesselt hebben een ondergrens van M€ 114 en een bovengrens van M€ 151.



Figuur 20 Impressie bypass Varik-Heesselt

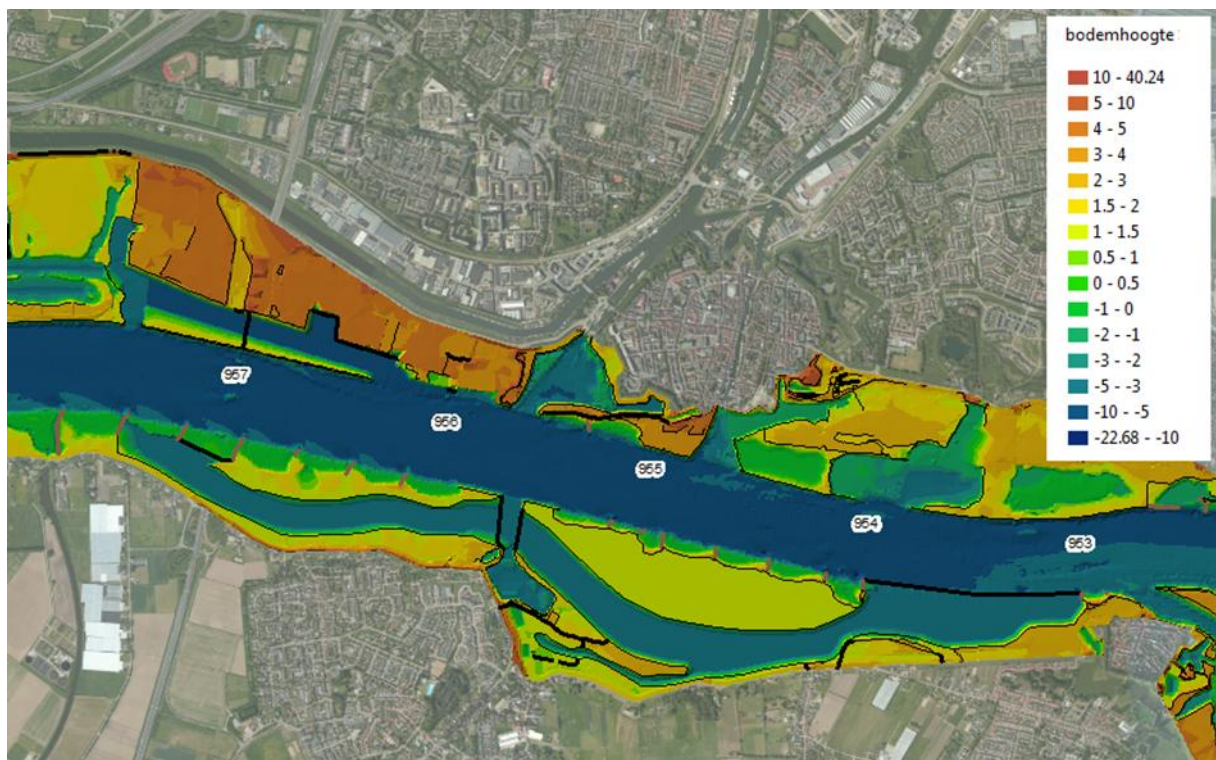
Figuur 21 toont de berekende waterstandsverlaging bij verschillende afvoerniveaus bij de inzet van de bypass. De figuur laat zien dat de maatregel bij afvoeren tussen 16.000 en 20.000 m³/s een waterstandsverlaging oplevert van ongeveer 40-45 cm.



Figuur 21 Waterstandsverlaging in 2015 door inzet bypass Varik-Heesselt

4.1.3 Nevengeul Sleeuwijk

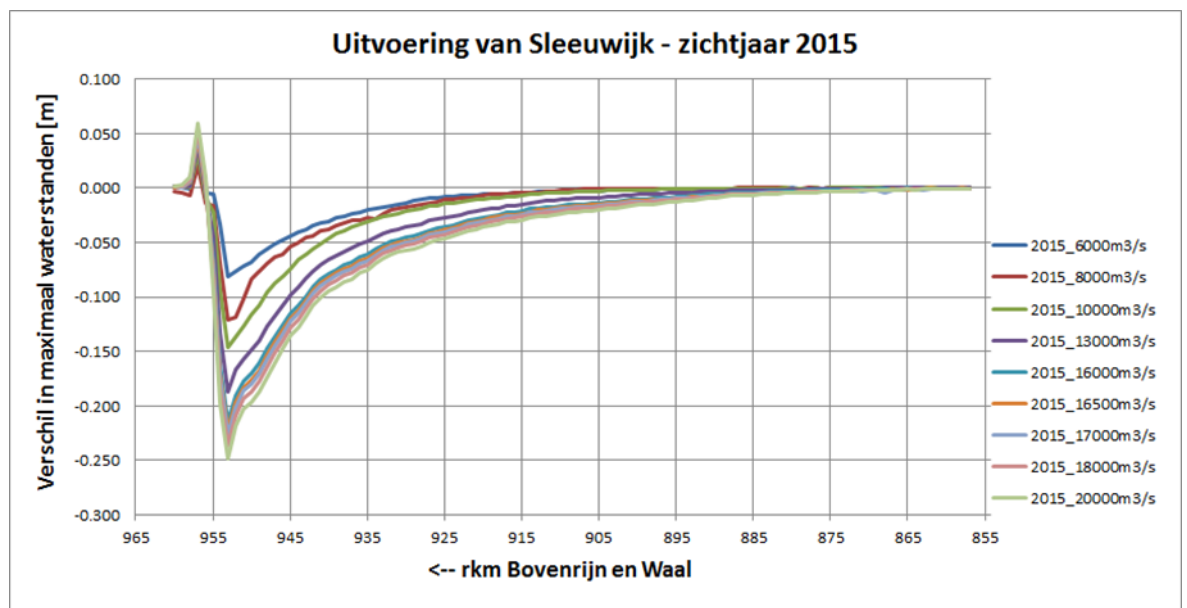
Deze ingreep bestaat uit de aanleg van een nevengeul bij Sleeuwijk op de linkeroever van de Waal, tussen rkm 953 en rkm 957 (van Woudrichem tot de A27). Figuur 22 geeft een beeld van de maatregel.



Figuur 22 Impressie nevengeul Sleeuwijk

Uitgegaan wordt van een nevengeul met een breedte van 150 m, met een bodembreedte van 100 m en een talud van 1:5. De bodem van de geul komt op 4 m+NAP te liggen. De drempel bij de in- en uitstroomopening liggen op 1,25 m+NAP. Door een deel van de A27 op pijlers te zetten, kan de geul doorlopen in de rivier. Er wordt een langsdam tussen de brugpijler van A27 en de krib ten westen van de Merwedebrug aangelegd. Het maaiveld ten noorden van de nevengeul wordt verlaagd tot 1,25 m+NAP. De uitvoeringskosten van de nevengeul Sleeuwijk zijn ongeveer: M€ 233 (met ondergrens M€ 93 en bovengrens M€ 372).

Figuur 23 toont de waterstandsverlaging door de inzet van de nevengeul bij verschillende afvoerniveaus. De figuur laat zien dat de maximale waterstandsverlaging ongeveer 20-25 cm is.



Figuur 23 Waterstandsverlaging in 2015 door inzet nevengeul Sleeuwijk

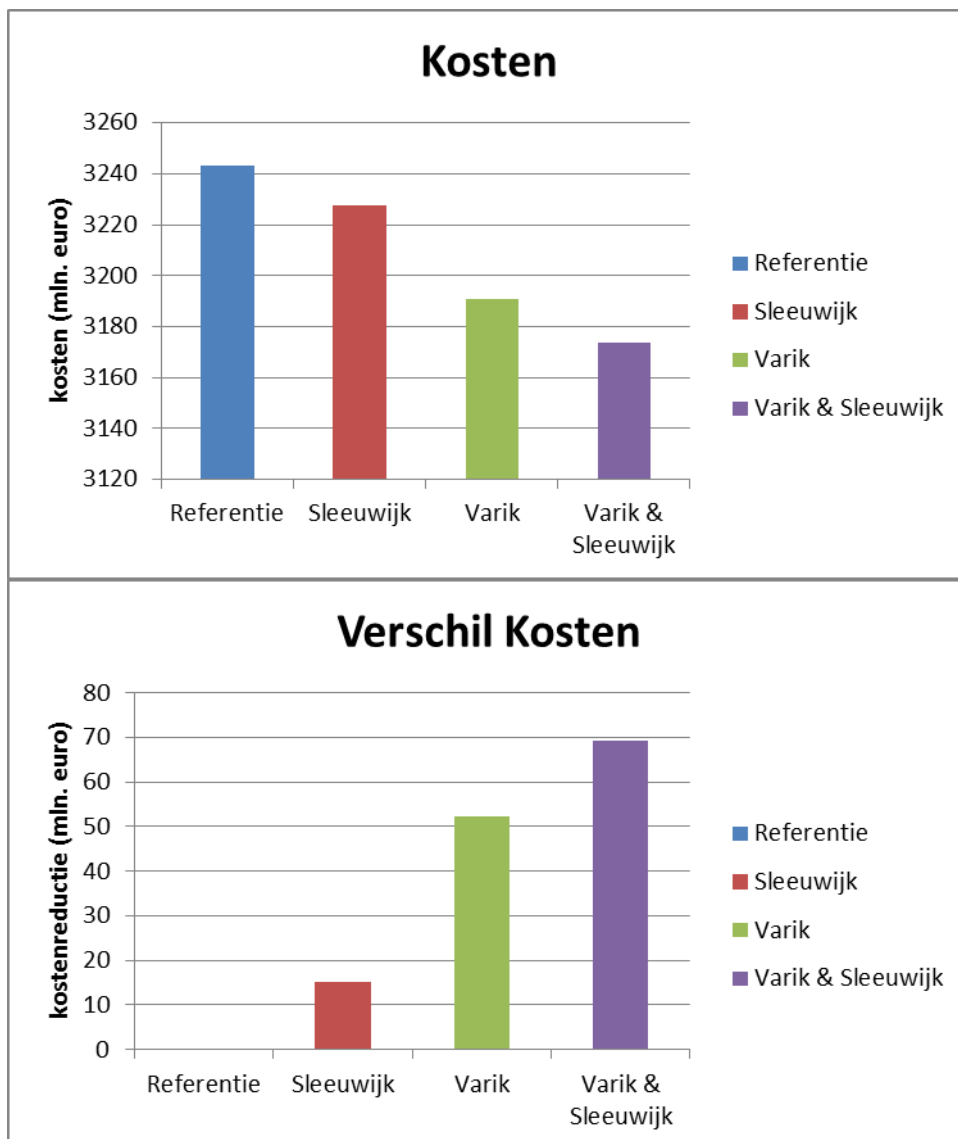
4.2 Effectiviteit van twee rivierverruimende maatregelen

We beoordelen de effectiviteit van twee rivierverruimende maatregelen: Nevengeul Sleeuwijk en Bypass Varik-Heesselt. We beoordelen het effect op de dijkversterkingskosten (paragraaf 4.2.1) zonder daarbij de kosten van de rivierverruiming zelf mee te nemen. Daarnaast beoordelen we of door de inzet van rivierverruimende maatregelen, dijkversterkingen uitgesteld kunnen worden (paragraaf 4.2.2). Een afname van de overstromingskans en de hieruit volgende afname van het overstromingsrisico boven op de 'nieuwe' norm is een additionele baat. De additionele baten worden beschreven in paragraaf 4.2.3.

In dit hoofdstuk beoordelen we de effectiviteit van rivierverruiming voor de hele Waal tussen Gorinchem en de Pannerden. Hoofdstuk 5 bevat detailanalyses, die meer detailinformatie geven over de uitkomsten op dijkvak- en dijktrajectniveau.

4.2.1 Invloed op dijkversterkingskosten

De belangrijkste uitkomst van de analyse is de invloed van de rivierverruimende maatregelen op de dijkversterkingskosten. Figuur 24 toont de versterkingskosten van de vier varianten en de verschillen in versterkingskosten ten opzichte van de referentie (alleen dijkversterking). Figuur 25 geeft een overzicht van de contante waarde van deze kosten teruggerekend naar het jaar 2025 uitgaande van een discontovoet van 5,5%.

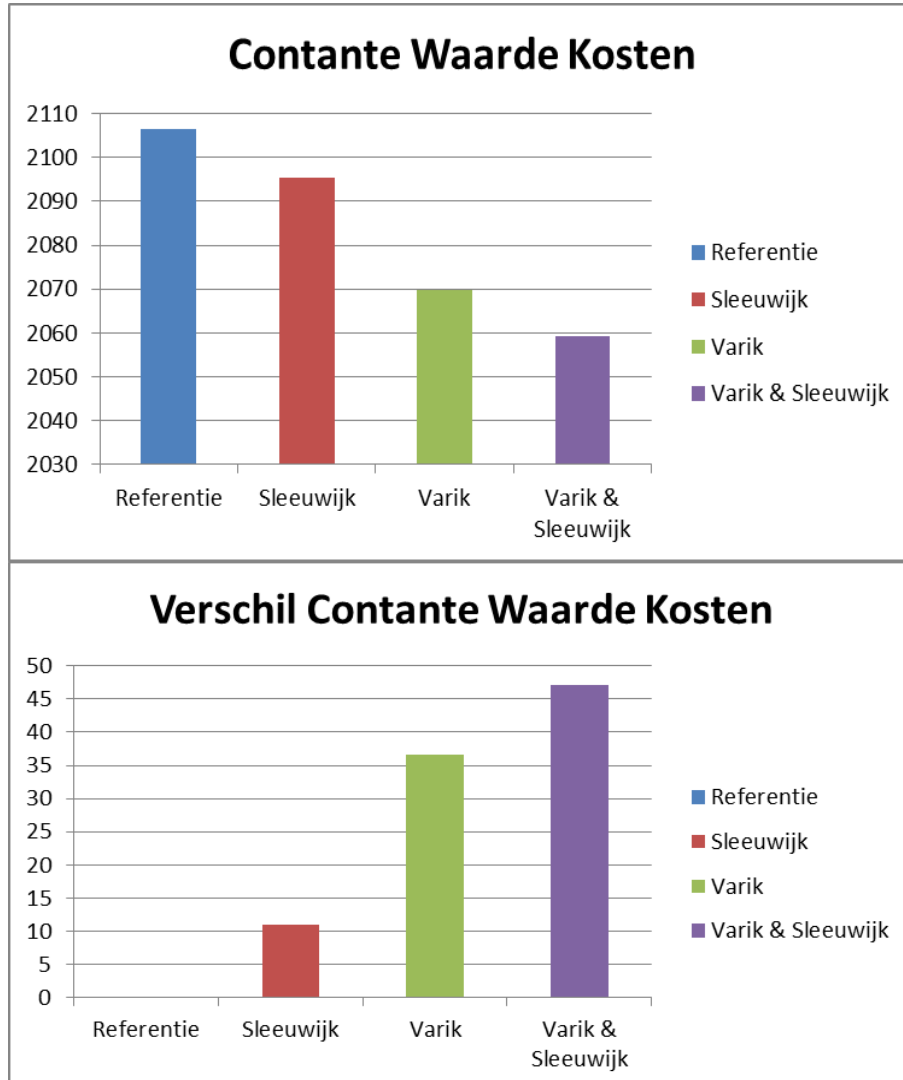


Figuur 24 Kosten en kostenverschil (nominaal) t.o.v. Referentie

Bij de berekende dijkversterkingskosten en de effectiviteit van rivierverruiming plaatsen we twee opmerkingen:

1. Alleen voor de dijkvakken waarvoor fragility curves beschikbaar zijn, zijn de dijkverstekingskosten berekend. Voor een groot aantal dijkvakken zijn geen fragility curves voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit beschikbaar (zie Figuur 6 en Figuur 7). Voor deze dijkvakken zijn voor de ontbrekende faalmechanismen geen dijkversterkingen en bijbehorende dijkverstekingskosten berekend. De totale dijkversterkingskosten zouden hoger zijn, als de fragility curves wel beschikbaar zouden zijn. In de gevoeligheidsanalyse in Hoofdstuk 6 is de invloed van de beschikbaarheid van de fragility curves voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit op de dijkverstekingskosten en de effectiviteit van rivierverruiming in beeld gebracht. Er is geanalyseerd wat het effect is op de dijkversterkingskosten en effectiviteit van rivierverruiming, indien alleen de fragility curves voor het faalmechanisme overloop en golfoverslag zijn meegenomen.
2. Daarnaast is er nog een belangrijk aspect dat ontbreekt in de dijkversterkingskosten. In de dijkversterkingskosten ontbreken namelijk de kosten voor beheer en onderhoud nog steeds. Meestal zijn de extra kosten voor beheer en onderhoud van primaire waterkeringen geraamd tussen 0.5 en

1%. Contant gemaakt met een discontovoet van 5.5% komt dat neer op 10% tot 20% van de contant gemaakte investeringskosten. Met een discontovoet van 3% wordt dat ongeveer 15% tot 30% van de investeringskosten. Deze baten van rivierverruiming zouden eigenlijk ook moeten worden meegeteld.



Figuur 25 Contante waarde van kosten en kostenverschil t.o.v. Referentie

Figuur 24 en Figuur 25 laten de versterkingskosten zien voor alle dijken aan de linker- en rechteroever langs het traject Pannerden tot Gorinchem in de periode tussen 2015 en 2100. Een groot aantal van de dijkvakken moet in deze periode tweemaal versterkt worden.

Nevengeul Sleeuwijk levert een afname van de dijkversterkingskosten van 15 mln euro. In contante waarde bedraagt de kostenafname 11 mln euro. De boven- en ondergrens van de geraamde aanlegkosten van de Nevengeul bij Sleeuwijk zijn geraamd op respectievelijk 93 mln euro en 372 mln euro.

Bypass Varik-Heesselt resulteert in een iets grotere afname van de dijkversterkingskosten van 52 mln euro. In contante waarde bedraagt de kostenafname 36 mln euro. De boven- en ondergrens van de geraamde aanlegkosten van de Bypass Varik-Heesselt zijn geraamd op respectievelijk 114 mln euro en 151 mln euro.

De afname van de dijkversterkingskosten door het uitvoeren van de rivierverruiming bij Sleeuwijk en Varik-Heesselt is erg beperkt. Dit komt vooral doordat de versterkingsopgaven voor de dijken langs de Waal erg omvangrijk zijn (zie Hoofdstuk 3) en de omvang van de benodigde dijkversterking nauwelijks kleiner wordt door de rivierverruimende maatregelen.

De versterkingsopgave voor het faalmechanisme hoogte uitgedrukt in een kruinhoogteopgave in 2075 bedraagt gemiddeld 90 cm. De hoogteopgave is flink groter dan op de opgave die door DPR is berekend. De verschillen kunnen verklaard door verschillen in uitgangspunten. De nieuwe methodiek houdt rekening met de nieuwe normen, de actuele kruinhoogte, een hoger overslagdebiet, een onzekerheidstoeslag op de waterstanden van 30 cm en een andere afvoerstatistiek (GRADE). Een uitgebreidere toelichting is te vinden in paragraaf 3.1, in Figuur 14 en in Bijlage B. Figuur 14 laat heel duidelijk zien dat het waterstandseffect van de rivierverruiming Varik-Heesselt en Sleeuwijk (blauwe stippellijn) nog ver onder de hoogteopgave (doorgetrokken blauwe lijn) ligt. De rivierverruimende maatregelen bij Sleeuwijk en Varik-Heesselt leveren een waterstandsverlagend effect van 20-25 cm en 40-45 cm. Hiermee wordt de hoogteopgave voor traject 43-6 van gemiddeld 90 cm wel verminderd, maar vrijwel nergens geheel opgelost. Dat betekent dat er nauwelijks afgekeurde dijkvakken zijn die door de inzet van rivierverruiming goedgekeurd worden. Doordat de 'opstart'-kosten van dijkversterkingen zo hoog zijn, is de afname van de versterkingskosten beperkt.

De versterkingsopgave voor het faalmechanisme macrostabiliteit is erg omvangrijk, zie Hoofdstuk 3. Dit komt vooral doordat dat we een ongedraineerde stabiliteitsanalyse hebben toegepast in combinatie met relatief grove aannamen voor sterkte-parameters van de ondergrond. Dit resulteert in hoge faalkansen. Rivierverruiming zorgt maar voor geringe afnamen van de opgave voor het faalmechanisme macrostabiliteit. De geringe afname is er alleen bij kleine versterkingsopgave, aangezien rivierverruiming er dan voor zorgt dat afkeuringen goedkeuringen worden.

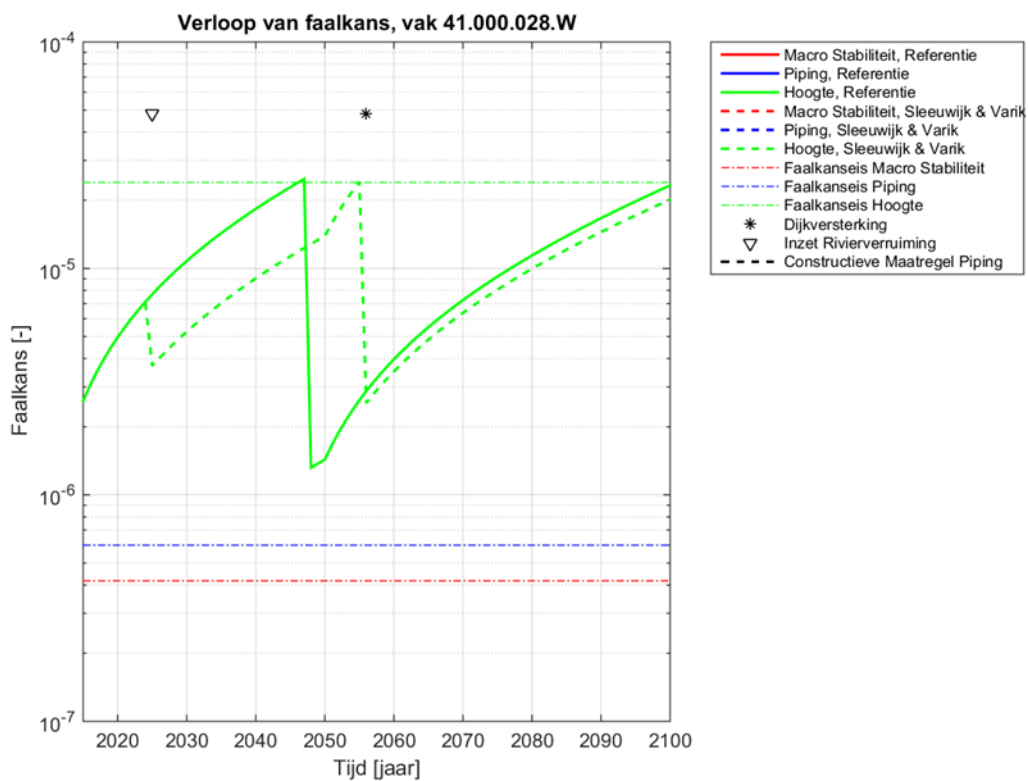
De versterkingsopgave voor het faalmechanisme piping is ook omvangrijk. We berekenen voor dit faalmechanisme erg hoge faalkansen. Dit wordt voor het grootste gedeelte veroorzaakt door de herziene regel van Sellmeijer. Ook voor het faalmechanisme piping geldt dat rivierverruiming voor een geringe afnamen van de opgave zorgt, waardoor de afname van de versterkingskosten beperkt is. De versterkingsopgave voor het faalmechanisme piping is zo groot dat er op een groot deel van het geanalyseerde traject geen pipingbermen worden aangelegd, maar gekozen wordt voor constructieve maatregelen. Rivierverruiming zorgt niet voor kostenreductie bij de aanleg van een constructie. De geringe afname is er alleen bij kleine versterkingsopgave, aangezien rivierverruiming er dan voor zorgt dat afkeuringen goedkeuringen worden of dat bermen kleinere bermen worden of bermen worden in plaats van constructieve maatregelen.

4.2.2 *Invloed op tijdstip dijkversterking*

Rivierverruiming kan er voor zorgen dat een dijk op een later moment wordt afgekeurd, waardoor de versterking uitgesteld kan worden. Figuur 26 geeft hiervan een voorbeeld. De figuur toont het faalkansverloop voor een dijkvak bij Nijmegen. Door rivierverruiming verschuift het afkeurmoment in dit geval van 2047 naar 2055. In dit specifieke vak zijn de faalmechanismen piping en macrostabiliteit niet meegenomen vanwege het ontbreken van informatie. De rivierverruiming zorgt op dit vak voor een afname van de faalkans voor het faalmechanisme hoogte, waardoor de dijkversterking uitgesteld kan worden met 8 jaar (van 2047 naar 2055).

Figuur 6 en Figuur 7 laten zien dat voor de meeste dijkvakken meerdere faalmechanismen zijn meegenomen in de analyse. Doordat de methodiek hoge faalkansen berekent voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit, worden de meeste dijkvakken al in 2015 afgekeurd op macrostabiliteit en/of piping. Hierdoor moeten de dijkvakken al in de eerste versterkingsronde versterkt worden, ook al kan de dijkverhoging door de uitvoering van rivierverruiming uitgesteld worden.

Indien een dijkvak voor één van de mechanismen niet meer aan de eis voldoet, wordt voor alle drie faalmechanismen nagegaan of de dijk de komende 50 jaar nog aan de faalkansen van de drie faalmechanismen voldoet. Indien dat niet het geval is, wordt de dijk voor dat faalmechanisme versterkt. In vrijwel alle gevallen worden de dijkvakken dan voor alle drie de faalmechanismen versterkt. De hoge faalkansen zorgen ervoor dat een groot aantal dijkvakken afgekeurd wordt op de faalmechanismen piping en macrostabiliteit. Hierdoor hebben rivierverruiming nauwelijks tot gevolg dat de dijkversterkingen uitgesteld kunnen worden.

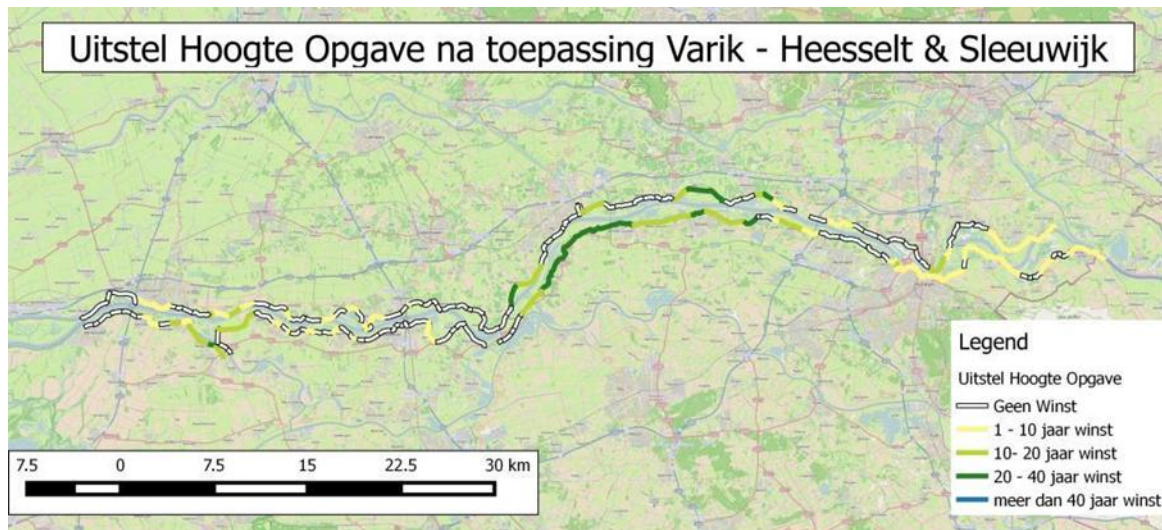


Figuur 26 *Uitstel van de versterking bij Nijmegen door inzet Sleeuwijk en Varik-Heesselt*

Rivierverruiming in DPR is vooral bedoeld om de hoogteopgave op te lossen. Daarom is onderzocht of door de inzet van rivierverruiming de hoogteopgave kan worden verkleind, waardoor dijkverhogingen kunnen worden uitgesteld, terwijl de benodigde dijkversterkingen ten behoeve van de faalmechanismen piping en macrostabiliteit alvast worden uitgevoerd. Daarom is bepaald hoeveel verhogingen uitgesteld kunnen worden door de inzet van de rivierverruiming Sleeuwijk en Varik-Heesselt als alleen het faalmechanisme hoogte beschouwd wordt in de analyse.

Rivierverruiming is in DPR vooral bedoeld om de hoogteopgave op te lossen. Figuur 27 toont het uitstel van de dijkverhoging door twee rivierverruimende maatregelen. De figuur laat zien dat de dijkverhoging op een groot aantal dijkvakken aan de linkeroever (zuidzijde) van de Waal met 10-20 à 20-40 jaar uitgesteld kunnen worden. De

dijkvakken waarbij uitstel mogelijk is, zijn dijkvakken die in 2015 met een factor 1-10 nog net aan de eis voldoen (zie Figuur 13).



Figuur 27 *Uitstel van de dijkverhoging voor het faalmechanisme hoogte door inzet Sleeuwijk en Varik-Heesselt (in de situatie dat alleen het faalmechanisme hoogte is meegenomen in de analyse) (Let op! Uitstel betreft alleen uitstel van de dijkhoging. Een groot deel van het uitstel is er niet indien ook de faalmechanismen piping en macrostabiliteit worden beschouwd).*

Wanneer een dijk al in flinke mate versterkt moet worden voor macrostabiliteit en piping is het relatief goedkoop om ook direct de hoogte daarbij op te pakken. Uitstel van de investering op hoogte (partieel versterken) en het 20 jaar later op hoogte brengen lijkt geen significante winst op te leveren. Dit is echter wel sterk afhankelijk van de veronderstelde uitsteltijd en de aangenomen discontovoet. In het licht van de bandbreedtes waarmee in de KOSWAT ramingen gewerkt wordt, kan de balans ook zomaar de andere kant uit slaan. In ieder geval lijkt er hier weinig te winnen vanuit financieel oogpunt.

Op basis van bovenstaande lijkt uitstel van de opgave in hoogte weinig effect te hebben, en geen voor de hand liggende keuze, tenzij de mogelijkheid bestaat dat de tweede versterkingsronde op termijn wellicht helemaal niet nodig blijkt te zijn (veranderend inzicht in overslagdebiet bij bezwijken, afvoerstatistiek, ed). Bij het bovenstaande is de risicoreductie die met de versterkingen gepaard gaat buiten beschouwing gebleven. Deze zou voor beide versterkingsopties wel eens nagenoeg gelijk kunnen zijn. Vanuit dat oogpunt zou het effectiever kunnen zijn de bespaarde euro's voor de verhoging op korte termijn elders in te zetten. Er staan in dat geval meer baten tegenover de besteedde euro's die de balans sterker doen uitslaan in het voordeel van uitstellen van de hoogte opgave.

4.2.3 Overige baten

In deze analyse staan de baten voor dijkversterking centraal. Daarnaast kan een rivierverruimende maatregel toegevoegde waarde hebben voor de landschappelijke kwaliteit, ecologie, recreatie en waterveiligheid. Met betrekking tot waterveiligheid kan worden gesteld dat een waterstandsverlaging door rivierverruiming leidt tot een hogere veiligheid achter de dijk, ook al heeft de waterstandsverlaging geen direct effect op de dijkversterkingskosten (doordat met de rivierverruiming de opgaven niet opgelost worden). Daarnaast is de overstromingsschade mogelijk lager door lagere waterstanden. De kleinere faalkansen en de lagere overstromingsschade zorgen voor een afname van het overstromingsrisico. Deze risicoreductie is een extra baat van rivierverruiming.

Volgens een schatting van Asselman (2014) zorgt de VKS (een combinatie van dijkversterking en rivierverruiming) van DPR voor een afname van het overstromingsrisico op de Waal en de Merwedede van ongeveer 60 mln euro. Volgens Kind & Van der Doef (Deltares, 2014) komen voor Deltaprogramma Rijnmond-Drechtsteden voor een pakket aan ruimtelijke maatregelen voor de Merwedede (pakket met de maatregelen Sleenwijk, Werkendam en Avelingen) tot een geschatte risicoreductie van ongeveer 25 M€ in CW indien het pakket in 2030 wordt uitgevoerd. Hierin zitten de baten voor de hele Waal.

5 Extra analyse met betrekking tot onzekerheden in hydraulische belasting en het effect van meer rivierverruiming

De uitgevoerde analyse is gebaseerd op voorlopige inzichten van OI en WTI. Deze voorlopige uitgangspunten zijn direct van invloed op de hydraulische belastingen waarmee bij de toetsing en het dijkontwerp rekening is gehouden. Het gaat daarbij om de keuze voor de onzekerheidstoetsing, het klimaatscenario en de afvoerstatistiek (zie paragraaf 2.2.1).

In de analyse is nu alleen gekeken naar het waterstands dalend effect van de twee rivierverruiming Varik-Heesselt en Sleeuwijk. Het is belangrijk om ook in beeld te brengen wat meer rivierverruimende maatregelen opleveren aan kostenreductie. De vraag hierbij is met name wat de reikwijdte is qua kostenreductie.

Er zijn twee analyses uitgevoerd:

- In de eerste analyse, paragraaf 5.1, zijn de waterstanden ten opzichte van de basisberekening voor de situatie met alleen dijkversterking (zonder rivierverruiming) bij alle herhalingstijden (over het gehele afvoerbereik) langs het gehele riviertraject met 0 cm tot 100 cm verlaagd, in stappen van 10 cm. Doel is om naast waterstands daling van de twee rivierverruiming Varik-Heesselt en Sleeuwijk te bepalen of er bij een groter waterstandsverlagend effect sterkere toename van kostenreductie ontstaat, oftewel levert uitvoering van de hele VKS of VKS met extra maatregelen veel meer kostenreductie op.
- In de tweede analyse, paragraaf 5.2, is ten opzichte van de basisberekening voor alle vier de varianten de waterstand verlaagd met 0 cm tot 30 cm plus, in stappen van 10 cm plus nog is een extreme waterstandsverlaging van 50 cm. Doel is om impact van een eventuele wijziging in uitgangspunt te bepalen.

5.1 Berekening met verlaagde waterstanden

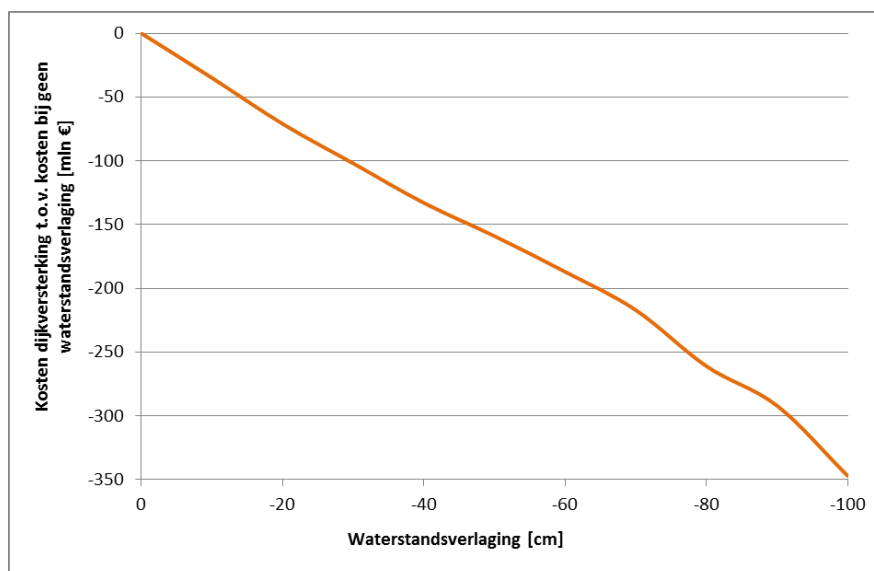
In deze analyse zijn de waterstanden ten opzichte van de basisberekening bij alle herhalingstijden (over het gehele afvoerbereik) langs het gehele riviertraject met 0 cm tot 100 cm verlaagd, in stappen van 10 cm.

De analyse laat zien hoe waterstandsverlagingen (over het gehele afvoerbereik, over het hele riviertraject) de dijkversterkingskosten beïnvloeden. Zo wordt duidelijk wat het effect van meer waterstandsverlagende rivierverruimende maatregelen voor invloed heeft op de kostenreductie. Tabel 2 en Figuur 28 geven het effect van de doorgerekende waterstandsverlagingen weer op de dijkversterkingskosten.

	Niet-verdisconteerde kosten [mln euro]	Contante waarde kosten [mln euro]	Contante waarde kosten t.o.v. 0 cm [mln euro]
0 cm	3243	2106	0
-10 cm	3185	2071	-35
-20 cm	3113	2035	-71
-30 cm	3052	2004	-102
-40 cm	2985	1973	-133
-50 cm	2940	1947	-159
-60 cm	2892	1919	-187
-70 cm	2828	1889	-217
-80 cm	2741	1845	-261
-90 cm	2666	1814	-292
-100 cm	2580	1759	-347

Tabel 2 Invloed van waterstandsvaling op dijkversterkingskosten voor de referentie (zonder rivierverruiming)

De verdisconteerde versterkingskosten zijn bij een integrale waterstandsvaling van 100 cm 347 mln euro lager dan in de basisberekening. Figuur 28 laat zien dat de dijkversterkingskosten afnemen als functie van de waterstandsverlaging.



Figuur 28: Effect van waterstandsverlaging op de kosten van dijkversterking langs de Waal

5.2 Inschatting van invloed van onzekerheidstoetslag, lagere GRADE werklijn en klimaatscenario

Aan de hand van de resultaten uit paragraaf 5.1 is ingeschat wat de invloed is van een wijziging in de uitgangspunten. Daarvoor worden de resultaten in meer detail getoond voor een aantal representatieve keuzes van de waterstandsvaling. De volgende

onzekerheden met betrekking tot de uitgangspunten m.b.t. hydraulische belasting spelen een rol:

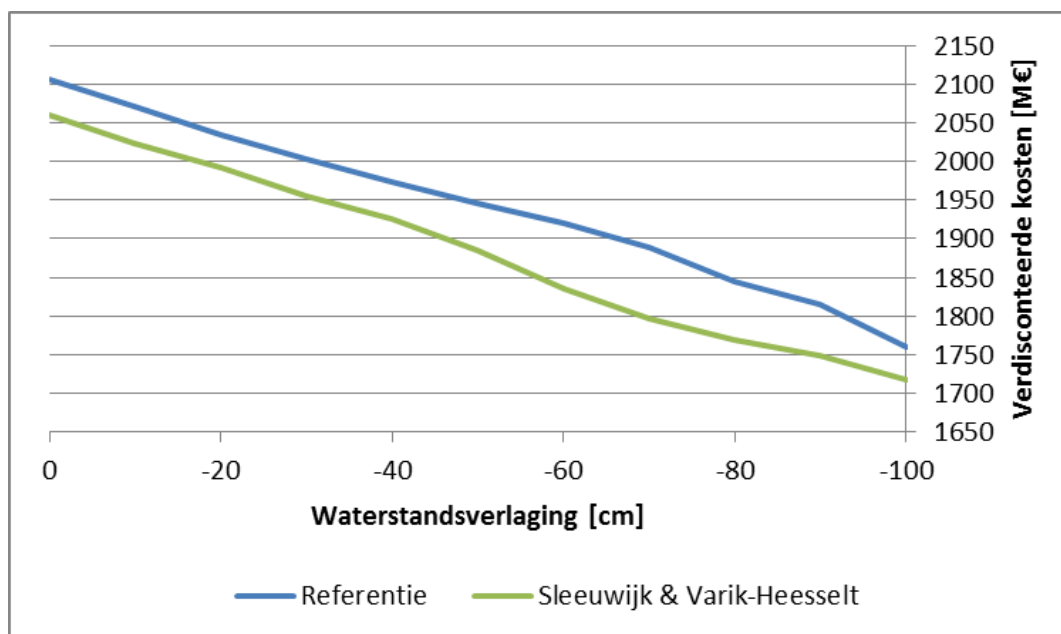
1. Wordt een onzekerheidstoeslag van 30cm opgenomen in WTI2017?
2. De GRADE werklijn voor de Rijn is nog niet definitief. Er wordt nog gesproken over aftopping, noodmaatregelen in Duitsland en ruwheden in de riviersysteem. Mogelijk worden de GRADE werklijnen voor de Rijn 0 – 15 cm lager.
3. Er is nu gekozen voor een klimaatscenario W+. Een overstap naar een G+ scenario betekent op de Waal een ongeveer 30 cm lagere waterstand.

Samen leiden wijzigingen van de bovengenoemde uitgangspunten (onzekerheidstoeslag, GRADE werklijn, klimaatscenario) in het uiterste geval tot een verlaging van 75 cm. Het is echter niet aannemelijk dat alle wijzigingen samenvallen en leiden tot 75 cm waterstandsverlaging. Tabel 3 is een uitbreiding van Tabel 2 waarin naast de waterstandsdeling op de referentie (zonder rivierverruiming) ook het effect van de rivierverruimende maatregelen Sleeuwijk en Varik-Heesselt zijn meegenomen.

	Niet-verdisconteerde kosten [min euro]	Contante waarde kosten [min euro]	Contante waarde kosten t.o.v. 0 cm [min euro]	Niet-verdisconteerde kosten [min euro]	Contante waarde kosten [min euro]	Contante waarde kosten t.o.v. 0 cm [min euro]	Contante waarde kosten t.o.v. Referentie [min euro]
	Referentie			Sleeuwijk & Varik-Heesselt			Vershil
0 cm	3243	2106	0	3174	2059	0	47
-10 cm	3185	2071	-35	3102	2023	-36	48
-20 cm	3113	2035	-71	3031	1991	-68	44
-30 cm	3052	2004	-102	2956	1956	-103	48
-40 cm	2985	1973	-133	2895	1925	-134	48
-50 cm	2940	1947	-159	2834	1885	-174	62
-60 cm	2892	1919	-187	2749	1836	-223	83
-70 cm	2828	1889	-217	2664	1797	-262	92
-80 cm	2741	1845	-261	2603	1769	-290	76
-90 cm	2666	1814	-292	2544	1749	-310	65
-100 cm	2580	1759	-347	2488	1717	-342	42

Tabel 3 Invloed van waterstandsdeling op dijkversterkingskosten voor de referentie (zonder rivierverruiming) en bij inzet van Sleeuwijk & Varik-Heesselt

Tabel 3 laat zien dat het verschil tussen de variant met alleen dijkversterking en de variant met inzet van Sleeuwijk & Varik-Heesselt bij een waterstandsdeling tussen 0 en 40 cm ongeveer gelijk is. Tussen 50 en 90 cm waterstandsdeling loopt het verschil op, met het maximum bij 70 cm. Deze toename in kostenreductie door inzet van Sleeuwijk & Varik-Heesselt komt overeen met de hoogteopgave die gemiddeld over de gehele Waal ongeveer 70 cm is. Figuur 29 illustreert het bovenstaande, waarbij de effectiviteit van de rivierverruimende maatregelen wordt gegeven door het verschil tussen de blauwe en groene lijn.



Figuur 29 Contante waarde van versterkingskosten als functie van het belastingniveau in de variant zonder rivierverruiming en bij inzet van Sleeuwijk & Varik-Heesselt

In Tabel 4 zijn enkele representatieve gevallen verder uitgewerkt waarbij is gekeken naar een waterstandsvaling van 0 - 30 cm en een extremere waterstandsvaling van 50 cm.

	Kosten [mln euro]	Kosten-afname t.o.v. referentie [mln euro]	CW waarde [mln euro]	Afname CW t.o.v. referentie [mln euro]
Basis: 0 cm verlaging				
Referentie	3243	0	2106	0
Sleeuwijk	3228	15	2095	11
Varik	3191	52	2070	36
Varik & Sleeuwijk	3174	69	2060	47
30 cm verlaging				
Referentie	3052	0	2004	0
Sleeuwijk	3026	26	1991	13
Varik	2983	69	1967	37
Varik & Sleeuwijk	2956	96	1958	46
50 cm verlaging				
Referentie	2940	0	1947	0
Sleeuwijk	2924	16	1934	13
Varik	2863	77	1911	35
Varik & Sleeuwijk	2834	107	1885	61

Tabel 4 Invloed van onzekerheidsvoetingsfactor, lagere GRADE werklijn en klimaatscenario op dijkversterkingskosten.

Tabel 4 laat zien dat bij een verlaging van de waterstanden de afname van de (niet-verdisconteerde) dijkversterkingskosten door rivierverruiming groter is. Zo neemt de afname van de dijkversterkingskosten door inzet van beide rivierverruiming toe van

69 naar 96 mln euro indien rekening wordt gehouden met 30 cm verlaging. Dit zou duiden op een toename van de effectiviteit van rivierverruiming. De uitkomsten van de contante waarden laten echter een tegenovergesteld beeld zien. De afname van de contante waarden van de dijkversterkingskosten door rivierverruiming neemt niet toe (van 47 naar 46 mln euro) bij 30 cm verlaging. Dit betekent dat de effectiviteit van rivierverruiming nauwelijks wordt beïnvloed door bijvoorbeeld wel/geen onzekerheidstoelag óf een ander klimaatscenario. De verlaging van 30 cm heeft evenveel impact op de variant zonder rivierverruiming als op de variant zonder rivierverruiming. Bij een verlaging van 50 cm neemt de afname van de contante waarden van de dijkversterkingskosten door rivierverruiming echter wel toe, naar 61 mln euro. Deze constanten kostenreductie tussen 0 en 30 cm verlaging en de toename vanaf 50 cm verlaging correspondeert met Figuur 29.

Omgang met restwaarde na 2100

Dat de niet-verdisconteerde kosten lijken te duiden op een hogere kostenreductie bij een lagere waterstand, kan worden verklaard door de restwaarde van versterkingen aan het eind van de rekenperiode (2015-2100). Voor een aantal dijkvakken kan versterking uitgesteld worden door de inzet van rivierverruiming. Dit uitstel zorgt er voor dat deze vakken in 2100 nog een hogere restwaarde hebben in de variant met rivierverruiming. Dit levert dus winst op in de niet-verdisconteerde kosten (2^e kolom van Tabel 4). Vaak vindt dit uitstel echter plaats aan het eind van de rekenperiode, waardoor de winst in contante waarde nihil is (4^e kolom van Tabel 4).

Ter illustratie wordt hier het dijkvak langs Nijmegen (vak 41.000.028) genomen (zie Tabel 5). Door rivierverruiming in de situatie met 0 cm verlaging, wordt de dijkversterking (á 42 mln euro) uitgesteld van 2047 naar 2055. Dit zorgt voor 4 mln winst door een grotere restwaarde omdat pas in 2055 wordt versterkt. Bij 30 cm verlaging wordt de dijkversterking uitgesteld van 2081 naar ná 2100. Dit zorgt voor 16 mln winst. De verschuiving zonder toeslag zorgt voor volledig uitstel; de winst is dan 16 mln (42 mln-26 mln restwaarde). Bij 30 cm verlaging is de winst dus 14 mln hoger.

	Referentie [mln euro]	Sleeuwijk & Varik-Heesselt [mln euro]
0 cm verlaging niet-verdisconteerd	42 (0 mln restwaarde)	38 (4 mln restwaarde)
30 cm verlaging niet-verdisconteerd	16 (26 mln restwaarde)	0
0 cm verlaging contante waarde	13 (0 mln restwaarde)	8,5 (4,5 mln restwaarde)
30 cm verlaging contante waarde	1,5 (0,5 mln restwaarde)	0

Tabel 5 Illustratie van invloed van waterstandsval op dijkversterkingskosten van een dijkvak bij Nijmegen (41.000.028)

Wanneer we naar de contante waarde kijken, is het beeld anders. Bij 0 cm verlaging bedraagt de winst 4,5 mln euro. Bij 30 cm verlaging bedraagt de winst nog slechts 1,5 mln euro doordat de versterkingskosten in contante waarde ook veel kleiner zijn. De verschillen zijn veel kleiner dan bij niet-verdisconteerde kosten, maar de kostenreductie door een rivierverruiming kan ook afnemen met afnemende waterstanden omdat de verdiscontering bij uitstel van versterking zorgt voor een kleinere kostenreductie.

De invloed van de keuze van bijvoorbeeld geen onzekerheidstoelag kan worden afgeleid uit Tabel 4. Hoewel de keuze van de toeslag direct van invloed is op de versterkingskosten, is deze invloed gelijk voor de variant met en de variant zonder rivierverruiming. Het effect van rivierverruiming blijft dus gelijk (circa 47 mln euro

voor Sleeuwijk & Varik-Heesselt). De hoogteopgave zal in de berekening zonder onzekerheidstoeslag wel kleiner zijn, maar nog steeds door de rivierverruiming vrijwel nergens geheel worden opgelost. Dat betekent dat er nauwelijks afgekeurde dijkvakken zijn die door de rivierverruiming goedgekeurd worden. Doordat de 'opstart'-kosten van dijkversterkingen zo hoog zijn, is de extra afname van de versterkingskosten beperkt. Daardoor neemt de effectiviteit van de rivierverruiming bij de berekening zonder onzekerheidstoeslag nauwelijks toe.

Wanneer er bv geen onzekerheidstoeslag wordt toegepast en klimaatscenario G+ wordt gehanteerd is de verwachte waterstands daling 50cm. De contante waarde van de versterkingskosten (bij basisjaar 2025 en discontovoet 5,5%) is in de variant Referentie 159 mln euro lager dan in de basis berekening. Het effect van de inzet van Sleeuwijk & Varik-Heesselt op de contante kosten is 61 mln euro, tegen 47 mln euro in de basis berekening. In dit geval neemt de effectiviteit van rivierverruiming dus toe, doordat bij steeds meer vakken de hoogte opgave wordt opgelost.

6 Gevoeligheidsanalyses

Bij toepassing van de methodiek is gebruik gemaakt van voorlopige nieuwe inzichten uit het OI2014 en WT12017. Paragraaf 2.5 geeft een overzicht van de gehanteerde uitgangspunten op basis van deze voorlopige inzichten. De uitgangspunten zijn nog erg onzeker. Daarom is in een gevoeligheidsanalyse de invloed van keuzes voor uitgangspunten op de uitkomsten onderzocht.

De invloed van keuzes voor de volgende uitgangspunten op de kostenreductie van dijkversterking is geanalyseerd:

- discontovoet
- faalmechanismen
- ontwerplevensduur
- kritiek overslagdebiet
- invloed van moment van inzet van rivierverruiming
- invloed van partieel versterken
- invloed van innovatieve versterkingsmaatregelen

6.1 Discontovoet

De kosten van dijkversterkingen worden op verschillende momenten in de periode 2015-2100 gemaakt. Daarom is het belangrijk de kosten terug te rekenen naar eenzelfde moment. Dit kan door de versterkingskosten op verschillende tijdstippen terug te rekenen naar een Contante Waarde (CW). Met behulp van een CW kunnen kosten die op verschillende tijdstippen gemaakt worden, met elkaar worden vergeleken.

Om de contante waarde van de kosten te berekenen moet een keuze worden gemaakt voor de jaarlijkse rentevoet (discontovoet). De discontovoet bestaat uit een risicovrije rente en een risico-opslag. Het is gebruikelijk om een discontovoet van 5,5% te hanteren. Het toepassen van dit percentage op beleidsstudies is echter onderwerp van discussie. De discontovoet voor waterveiligheid wordt mogelijk 3% (zie Bijlage B). De gevoeligheid van de uitkomsten voor de keuze van de discontovoet is onderzocht door berekeningen met drie percentages uit te voeren: 2%, 3% en 5,5%.

De dijkversterkingskosten worden verdisconteerd naar hetzelfde basisjaar, bijvoorbeeld 2015 (nu) of het jaar waarin de eerste kosten worden gemaakt. Het is gebruikelijk om het jaar waarin de eerste uitgaven plaatsvinden te hanteren als basisjaar. Dit is 2025. Tabel 6 geeft weer wat het effect is op kosten wanneer 2015 (nu) als basisjaar gekozen wordt voor de verdiscontering i.p.v. 2025. Bij het basisjaar 2015 wordt tien jaar meer verdisconteerd dan bij het basisjaar 2025. Bij een discontovoet van 5,5% levert dit een factor 1,7 verschil tussen de contante waarden voor het basisjaar 2015 en basisjaar 2025. Bij een discontovoet van 3% is deze factor 1,34 en bij een discontovoet van 2% is deze factor 1,22. De keuze van het basisjaar heeft geen invloed op de verhouding tussen kosten en baten, maar wel op het absolute verschil daartussen.

Tabel 6 bevat de resultaten van deze analyse. De afname van de dijkversterkingskosten bij inzet van beide rivierverruiming is in alle berekeningen gelijk aan 69 mln euro. De verschillen van de keuze van de discontovoet en het basisjaar komen tot uiting in de contante waarde van de dijkversterkingskosten.

	Kosten [mln euro]	Kosten-afname t.o.v. referentie [mln euro]	CW waarde bij basisjaar 2015 [mln euro]	Afname CW t.o.v. referentie bij basisjaar 2015 [mln euro]	CW waarde bij basisjaar 2025 [mln euro]	Afname CW t.o.v. referentie bij basisjaar 2025 [mln euro]
Discontovoet 5,5%						
Referentie	3243	0	1233	0	2106	0
Sleeuwijk	3228	15	1227	6	2095	11
Varik	3191	52	1212	21	2070	36
Varik & Sleeuwijk	3174	69	1206	27	2060	47
Discontovoet 3%						
Referentie	3243	0	1857	0	2495	0
Sleeuwijk	3228	15	1847	10	2483	13
Varik	3191	52	1826	31	2454	41
Varik & Sleeuwijk	3174	69	1817	40	2441	54
Discontovoet 2%						
Referentie	3243	0	2220	0	2706	0
Sleeuwijk	3228	15	2209	11	2692	14
Varik	3191	52	2184	36	2663	44
Varik & Sleeuwijk	3174	69	2173	47	2649	57

Tabel 6 Invloed van discontovoet en basisjaar op dijkversterkingskosten in mln euro

Bij een lagere discontovoet zijn de baten hoger. Bij een discontovoet van 3% in plaats van 5,5% neemt de afname van de contante waarde van dijkversterkingskosten toe van 47 mln euro naar 54 mln euro (uitgaande van 2025 als basisjaar). Bij een discontovoet van 2% neemt de afname van de contante waarde van dijkversterkingskosten verder toe naar 57 mln euro.

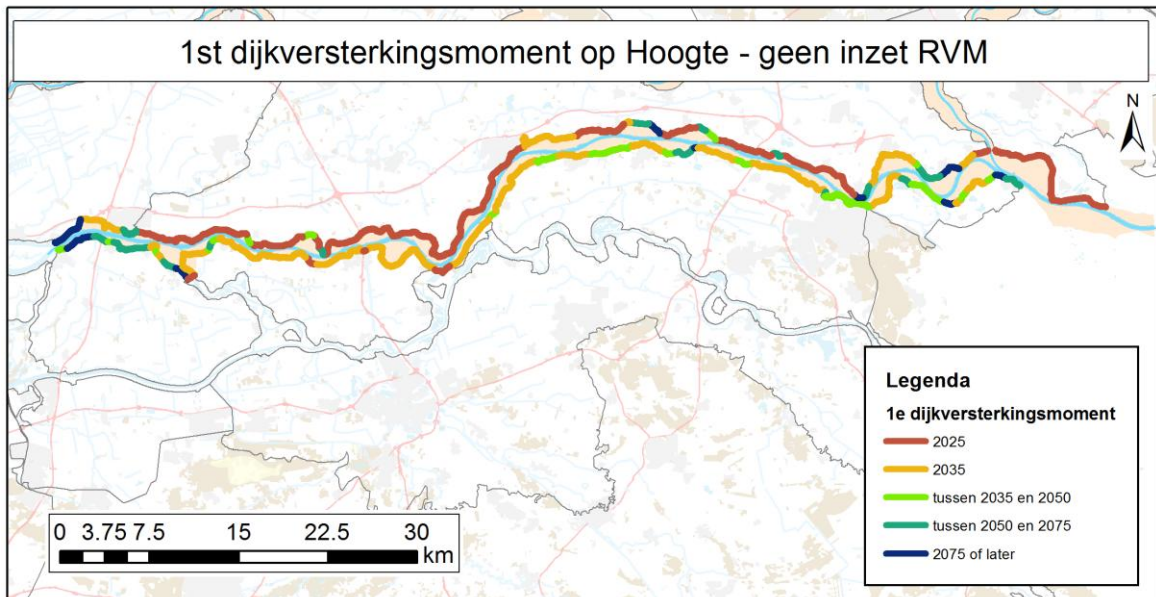
Bij een eerder basisjaar zijn de baten lager door een sterkere verdiscontering. Bij het basisjaar 2015 neemt de contante waarde van dijkversterkingskosten af van 47 mln euro naar 27 mln euro (uitgaande van een discontovoet van 5,5%).

De winst door toepassing van rivierversuiming is het grootst bij een combinatie van een discontovoet van 2% en het basisjaar 2025, namelijk 57 mln euro.

6.2 Faalmechanismen

Als een dijkvak niet meer voldoet aan de faalkanseis van één van drie faalmechanisme dan wordt het dijkvak in de methodiek versterkt. Het dijkvak wordt dan voor elk faalmechanisme versterkt, waarvoor het dijkvak op dat moment of binnen een periode van 50 jaar niet meer aan de faalkanseis voldoet. Doordat met de methodiek hoge faalkansen worden berekend voor faalmechanismen piping en macrostabiliteit, voldoet een groot deel van de dijkvakken in het startjaar van de berekeningen al niet meer aan de gestelde faalkanseisen. Bij het op orde brengen van de dijkvakken voor ontwerplevensduur van 50 jaar, is vaak ook een dijkverhoging nodig, omdat de dijkvakken binnen 50 jaar niet meer aan de faalkanseis voor het faalmechanisme hoogte voldoen. Dit terwijl voor een deel van de dijkvakken, de dijkversterking pas later in de tijd nodig zou zijn als alleen het faalmechanisme hoogte zou zijn beschouwd. Figuur 30 geeft het 1^e dijkversterkingsmoment weer voor het

faalmechanisme hoogte. De groene en blauwe dijktrajecten zijn de trajecten waarvoor het 1e dijkversterkingsmoment na 2035 is.



Figuur 30 1e dijkversterkingsmoment als alleen faalmechanisme hoogte zou zijn beschouwd voor de situatie met alleen dijkversterking zonder rivierverruiming

Impact van faalmechanisme piping en macrostabiliteit op kostenreductie rivierverruiming

Rivierverruimende maatregelen zijn vooral bedoeld om de hoogteopgave op te lossen. Wanneer een dijk ook versterkt moet worden voor de faalmechanismen piping en/of macrostabiliteit, heeft de waterstandsverlaging door rivierverruiming relatief weinig effect op de kosten. Dit komt doordat de kosten gedomineerd worden door de opstartkosten en de kosten voor piping en/of macrostabiliteit.

Op basis van bovenstaande lijken dijken op verschillende plekken vroeger verhoogd te worden dan noodzakelijk op basis van de hoogteopgave. Om zicht te krijgen op het effect hiervan is een tweetal aanvullende berekeningen gedaan, te weten:

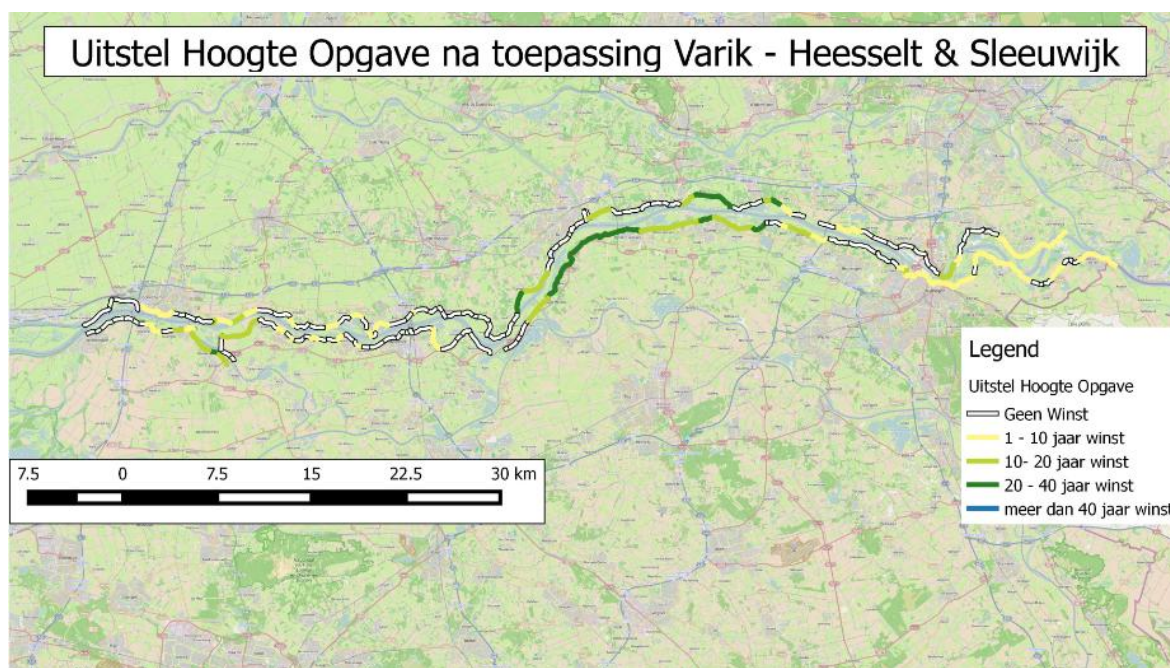
- Een set berekeningen met alleen het faalmechanisme hoogte
- Een set berekeningen met het faalmechanisme hoogte en piping

Tabel 7 toont de resultaten van deze berekeningen. De dijkversterkingskosten nemen flink af als een dijk voor minder faalmechanismen versterkt moeten worden. De effectiviteit van de rivierverruiming neemt toe, als alleen het faalmechanisme wordt meegenomen in de berekeningen. De kostenreductie neemt toe van 69 mln euro in de berekening met alle drie de faalmechanismen naar 107 mln euro in de berekening met alleen het faalmechanisme hoogte. De contante waarde van de kostenreductie neemt toe van 47 mln naar 86 mln euro.

	Kosten [mln euro]	Kostenafname t.a.v. referentie [mln euro]	CW Kosten [mln euro]	Afname CW t.a.v. referentie [mln euro]
Hoogte, Piping, Macrostabieleit				
Referentie	3243	0	2106	0
Sleeuwijk	3228	15	2095	11
Varik	3191	52	2070	36
Varik & Sleeuwijk	3174	69	2060	47
Hoogte, Piping				
Referentie	2354	0	1464	0
Sleeuwijk	2335	19	1449	15
Varik	2287	67	1413	50
Varik & Sleeuwijk	2266	88	1398	65
Hoogte				
Referentie	1270	0	748	0
Sleeuwijk	1252	18	733	15
Varik	1186	84	677	71
Varik & Sleeuwijk	1163	107	662	86

Tabel 7 Gevoeligheid van dijkversterkingskosten voor meenemen van faalmechanismen

Als de faalmechanismen piping en macrostabieleit niet worden meegenomen, neemt de effectiviteit van de rivierverruiming toe. Dit komt doordat door de rivierverruiming voor een aantal vakken de dijkversterking uitgesteld kan worden en voor een aantal vakken de kruin lager kan worden aangelegd. Figuur 31 toont de uitstel van het 1e dijkversterkingsmoment door rivierverruiming als alleen het faalmechanisme hoogte zou zijn beschouwd.



Figuur 31 Uitstel van het 1e dijkversterkingsmoment door rivierverruiming als alleen het faalmechanisme hoogte zou zijn beschouwd

Door gebrek aan sterkte info en ontwikkeling in WTI uitgangspunten is het de vraag in hoeverre fragility curves en daarmee de opgave voor piping en macrostabiliteit correct in beeld is gebracht. Deze gevoeligheidsanalyse laat zien dat als de opgave voor piping en macrostabiliteit niet meer zou bestaan de kostenreductie van rivierversuiming van 47 naar 86 mln gaat.

Tot slot wordt opgemerkt op dat voor een deel van de dijkvakken de faalmechanismen piping en macrostabiliteit niet zijn meegenomen vanwege een gebrek aan goede data (zie Figuur 7). Als de faalmechanismen voor deze vakken wel meegenomen zouden worden, dan zal vermoedelijk een deel van deze vakken versterkt moeten worden op piping en/of macrostabiliteit. Hierdoor kan de kostenreductie door rivierversuiming lager worden.

6.3 Ontwerplevensduur

In de methodiek is gekozen voor een ontwerplevensduur van 50 jaar. Dat wil zeggen dat de dijk zodanig wordt ontworpen (verhoging en verbreding) dat de dijk over 50 jaar nog net aan de faalkanseisen voldoet. Om het effect van de keuze voor de ontwerplevensduur te onderzoeken is een berekening uitgevoerd voor een ontwerplevensduur van 30 jaar. Dit betekent dat er in de periode 2015-2100 driemaal in plaats van tweemaal versterkt wordt.

Tabel 8 toont de invloed op de dijkversterkingskosten. Bij een ontwerplevensduur van 30 jaar zijn de totale dijkversterkingskosten hoger dan bij een ontwerplevensduur van 50 jaar. Dit komt doordat er vaker (driemaal in plaats van tweemaal) versterkt wordt. Dit betekent een extra keer hoge opstartkosten.

De dijkversterkingskosten van de 1e versterkingsronde zijn wel lager doordat er in de 1e ronde minder versterkt hoeft te worden. Een aantal vakken hoeft bij de 1e versterkingsronde niet verhoogd te worden (blauwe dijktrajecten in Figuur 30), omdat de dijken voor een kortere periode nog net aan de faalkanseisen moeten voldoen.

	Kosten [mln euro]	Kostenafname t.a.v. referentie [mln euro]	CW Kosten [mln euro]	Afname CW t.a.v. referentie [mln euro]
50 jaar				
Referentie	3243	0	2106	0
Sleeuwijk	3228	15	2095	11
Varik	3191	52	2070	36
Varik & Sleeuwijk	3174	69	2060	47
30 jaar				
Referentie	3850	0	2154	0
Sleeuwijk	3848	2	2144	10
Varik	3776	74	2118	36
Varik & Sleeuwijk	3777	73	2108	46

Tabel 8 Gevoeligheid van dijkversterkingskosten voor ontwerplevensduur

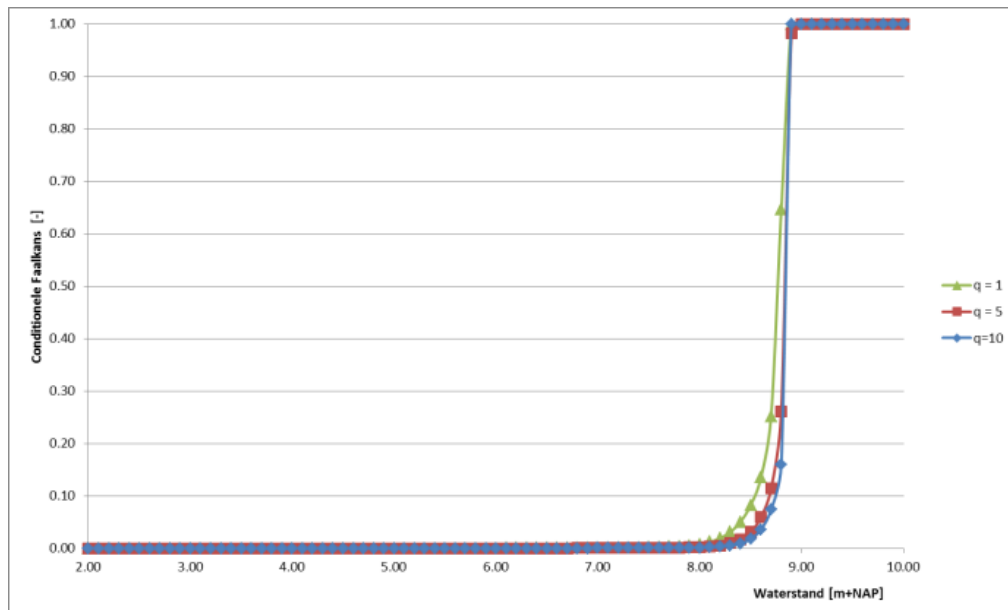
6.4 Overslagdebiet

In de analyse is conform het OI2014 gebruik gemaakt van een kritiek overslagdebiet van 10 l/s/m (RWS WVL, 2014). Er is op dit moment echter nog discussie over het acceptabel kritiek overslagdebiet. Het effect van een lager kritiek overslagdebiet,

namelijk 1 l/s/m en 5 l/s/m is geanalyseerd. Het effect is onderzocht voor drie dijkvakken op het traject Gorinchem – Tiel (traject 43-6):

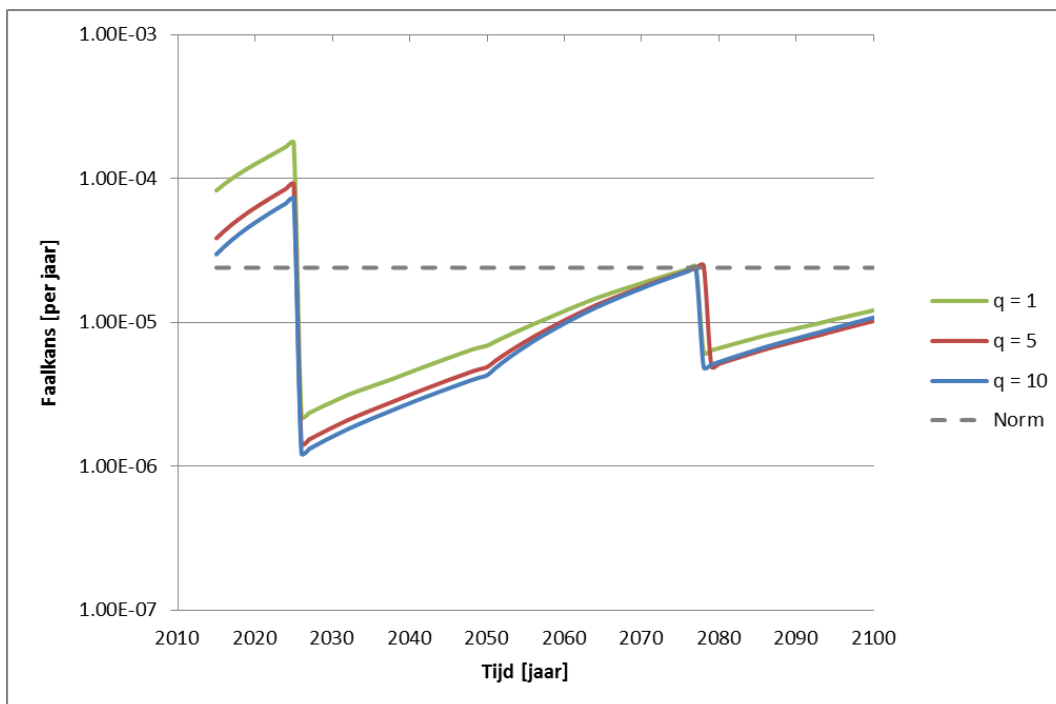
1. TG.055 – TG.068 (Ophemert)
2. TG.256 – TG.267 (Haaften)
3. TG.404 – TG.419 (Gorinchem)

Voor elk dijkvak is conform de aanpak in paragraaf 2.2 een nieuwe fragility curve afgeleid. We hebben de invloed hiervan bepaald op de faalkans, de dijkversterkingsopgave en de dijkversterkingskosten. Figuur 31 laat de resulterend fragility curve zien voor het dijkvak TG.256 – TG.267. Hierin is te zien dat de conditionele faalkans hoger is wanneer gerekend wordt met een lager overslagdebiet.



Figuur 32 Fragility curve voor hoogte voor het dijkvak TG.256 – TG.267

Figuur 33 laat het faalkans verloop zien voor het vak TG.256 – TG.267 voor de berekening zonder rivierverruiming. De figuur laat zien dat de faalkans hoger is bij een lager kritieke overslagdebiet. Daarnaast is te zien dat faalkansverloop bij een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m flauwer loopt dan de andere bij een kritiek overslagdebiet van 5 of 10 l/s/m. Dit wordt verklaard door het aandeel van de waterstand ten opzichte van het aandeel golfoploop in de bepaling van het hydraulisch belastingniveau (HBN). Golven en golfoploop spelen bij een kleiner kritieke overslagdebiet (relatief) een belangrijkere rol. Doordat de invloed van klimaatverandering alleen van toepassing is op de waterstand (en niet op wind en golven), is het faalkansverloop bij een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m flauwer.



Figuur 33 Faalkansverloop voor het faalmechanisme hoogte bij verschillende overslagdebieten voor het dijkvak TG.256 – TG.267

De invloed van het kritiek overslagdebiet op de hoogteopgave in centimeters is weergegeven in Tabel 9. De tabel laat zien dat bij een toenemend kritiek golfoverslagdebiet de versterkingsopgave afneemt. Bij een kritiek overslagdebiet van 5 l/s/m ligt het HBN gemiddeld 8 cm hoger dan bij 10 l/s/m. Bij een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m ligt het HBN gemiddeld 27 cm hoger dan bij 10 l/s/m.

	TG.404 – TG.419 43001003	TG.256 – TG.267 43001016	TG.055 – TG.068 43001037
q = 1 l/s/m	1,56	1,16	1,22
q = 5 l/s/m	1,22	0,88	1,02
q = 10 l/s/m	1,10	0,80	0,98

Tabel 9 Invloed overslagdebiet op hoogteopgave in centimeters bij eerste dijkversterkingsronde

De invloed van het kritiek overslagdebiet op de versterkingskosten is weergegeven in Tabel 10. De versterkingskosten nemen iets af bij een groter kritiek overslagdebiet.

	TG.055 – TG.068 43001003	TG.256 – TG.267 43001016	TG.404 – TG.419 43001037
q = 1 l/s/m	35,86	13,72	14,62
q = 5 l/s/m	35,28	13,18	13,76
q = 10 l/s/m	35,07	13,08	13,64

Tabel 10 Invloed overslagdebiet op kosten in mln euro bij eerste dijkversterkingsronde

De bovenstaande tabellen laten zien dat de hoogteopgave significant afneemt bij een overstap van een kritiek overslagdebiet van 1 l/s/m naar een hoger kritiek overslagdebiet. Het verschil tussen een kritiek overslagdebiet van 5 l/s/m en van 10 l/s/m daarentegen is relatief beperkt.

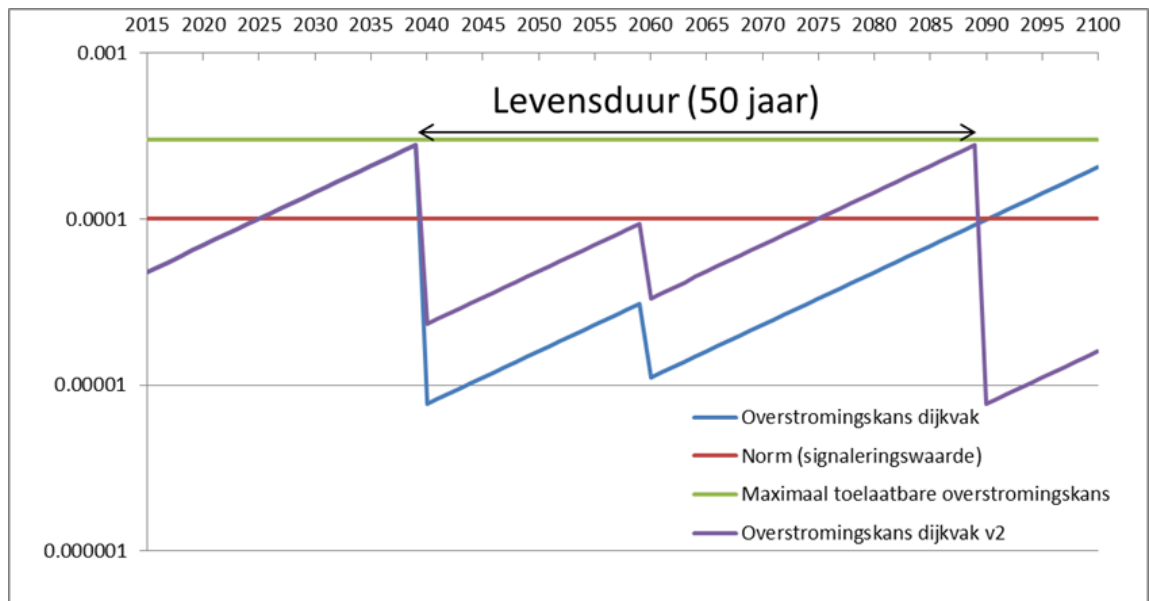
6.5 Invloed van moment van inzet van rivierverruiming

Bij toepassing van de methodiek is de invloed van rivierverruiming op de dijkversterkingskosten in beeld gebracht door bij de 1^e dijkversterkingsronde rekening te houden met rivierverruiming. Dit betekent dat bij de 1^e dijkversterkingsronde rekening is gehouden met waterstandsverlaging als gevolg van rivierverruiming. Dit resulteert voor een aantal dijkvakken in een beperkte vermindering van de omvang van de benodigde dijkverhoging én voor een aantal dijkvakken in uitstel van de dijkversterking. De invloed op de dijkversterkingskosten is beperkt (47 mln euro bij inzet van de rivierverruiming bij Sleeuwijk en Varik-Heesselt).

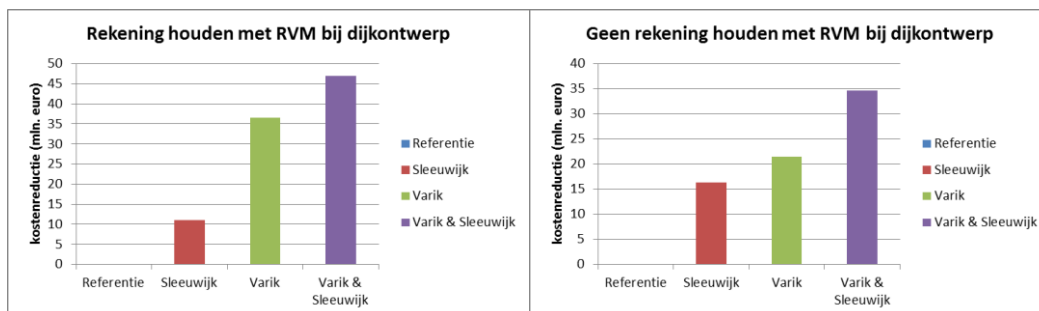
Een optie is om pas bij de 2^e dijkversterkingsronde rekening te houden met rivierverruiming. Dit betekent dat bij de 1^e dijkversterkingsronde geen rekening wordt gehouden met het waterstandsverlagende effect door inzet van de rivierverruiming bij Sleeuwijk en Varik-Heesselt. De rivierverruiming zorgt voor een lagere belasting waardoor de dijk meer dan 50 jaar blijft voldoen. Hierdoor kan de 2^e dijkversterkingsronde uitgesteld worden.

Hierbij dient opgemerkt te worden dat niet alleen de (contante) dijkversterkingskosten veranderen door latere uitvoering van rivierverruiming, maar dat ook de (contante) kosten van rivierverruiming veranderen.

De paarse lijn in Figuur 34 toont een schets van het faalkansverloop als bij de 1^e dijkversterkingsronde rekening wordt gehouden met rivierverruiming. De blauwe lijn toont het verloop van de faalkans wanneer bij de 1^e versterkingsronde geen rekening wordt gehouden met rivierverruiming. De tweede versterkingsronde wordt hierdoor kleiner (op dat moment wordt het effect van rivierverruiming wel beschouwd) en later uitgevoerd. Figuur 35 toont het effect van deze keuze op de afname van de contante waarden door de rivierverruiming. De figuur laat zien dat de afname iets kleiner wordt als pas bij het 2^e dijkversterkingsronde rekening wordt gehouden met waterstandsverlaging door rivierverruiming. Dit komt doordat de kosten die gemaakt worden bij de 1^e versterkingsronde relatief zwaar wegen bij het contant maken van de kosten. De kostenbesparing van de rivierverruimende maatregel wordt nu pas geïnd bij de 2^e versterkingsronde. De contante waarde neemt daardoor af.



Figuur 34 Faalkansverloop als bij de 1^e dijkversterkingsronde (paarse lijn) of bij de 2^e dijkversterkingsronde (blauwe lijn) rekening wordt gehouden met rivierverruiming



Figuur 35 Afname van de contante waarde in mln euro's: linker figuur geeft afname contante waarde weer als bij de 1e dijkversterkingsronde rekening wordt gehouden met rivierverruiming en rechter figuur geeft afname contante waarde weer als bij de 2^e dijkversterkingsronde rekening wordt gehouden met rivierverruiming

6.6 Invloed van alternatieve versterkingsmaatregelen

Uit de analyse blijkt dat bij toepassing van de nieuwe methodiek vrijwel alle dijken langs de Waal worden afgekeurd op piping, waarbij het veiligheidstekort in de uitgangssituatie ten opzichte van de norm veelal meer dan een factor 1000 bedraagt (zie paragraaf 3.3). Deze hoge faalkansen zijn voor het grootste gedeelte veroorzaakt door de herziene regel van Sellmeijer.

In het (traditionele) dijkontwerp leidt dit veelal tot grote benodigde kwelweglengtes, ofwel lange pipingbermen. Omdat lange bermen op een gegeven moment niet meer kosteneffectief zijn en ook een te grote impact hebben op de omgeving van de dijk (inpassing), wordt er in praktijk in het ontwerp voor gekozen om op een gegeven moment over te stappen naar een alternatieve, constructieve maatregel. In deze analyse is dit ondervangen door de kosten van het dijkontwerp af te kappen bij een berm lengte van 100 meter. Voor het bedrag dat hierbij geraamd wordt in grond kan veelal ook een constructieve oplossing in de vorm van een kwelscherm gerealiseerd worden (de Grave, 2015). De reguliere kwelschermen (CB wanden) die gebruikt worden in KOSWAT (bij overgang 100 m berm lengte) liggen in de orde van 6000-7500 €/m dijk (prijspeil 2013, totale investeringskosten, inclusief BTW).

In de project overstijgende verkenning (POV) piping uitgevoerd in opdracht van het HWBP wordt gezocht naar innovatieve maatregelen waarmee het faalmechanisme piping wellicht tegen lagere kosten duurzaam kan worden opgelost. Een aantal alternatieve maatregelen is reeds getest bij de IJkdijk, en lijken (nu of op termijn) kansrijk. Het lijkt zelfs de vraag of we de vereiste veiligheidsniveaus met traditionele kwelschermen wel kunnen bereiken.

De beschouwde maatregelen (met het bijbehorende kostenplaatje) zijn:

- DMC drainagebuizen (kosten in de orde 2500 €/m (investeringskosten, incl. toeslagen ed))
- Verticaal ingebracht geotextiel (orde 1250 €/m)
- Verticaal ingebracht grof-zand filter (orde 400-1000 €/m)

Let wel, deze gepresenteerde alternatieve maatregelen hebben zich nog geenszins bewezen in de praktijk, en de bandbreedtes op de gepresenteerde kosten zijn een orde groter dan in KOSWAT gehanteerd.

Een voordeel van deze maatregelen zou zijn dat ze in uitvoering (binnen een bepaald bereik) onafhankelijk zijn van de belasting en norm. De kosten zijn in die zin vast, er zit geen component in de kosten die toeneemt bij een grotere waterstandstijging of een groter verval. De dijkversterking is daarmee ook heel goed uitbreidbaar, heb je een maatregel eenmaal aangelegd, hoef je die bijvoorbeeld in het geval van gewijzigd inzicht in HR niet opnieuw aan te leggen of groter te dimensioneren.

Het grof-zand filter werkt qua mechanisme op dezelfde manier als het geotextiel, is goedkoper, en er zijn minder problemen te verwachten voor wat betreft levensduur, daarmee lijkt het geotextiel als optie achterhaald (tenzij het goedkoper wordt in de toekomst). Blijven over de DMC drainagebuizen en het grof-zand filter. Vanwege uitvoeringsaspecten is het niet overal mogelijk het grof-zand filter aan te leggen, met name als bebouwing in de weg ligt. Op deze plekken zou je over moeten stappen op de DMC buizen, deze kunnen overal aangebracht worden, ook onder bebouwing, middels een horizontaal gestuurde boring. Dit is dan wel duurder.

Er is geen complete gevoeligheidsanalyse uitgevoerd met deze nieuwe kostencijfers, maar in het algemeen kan gesteld worden dat met het toepassen van deze maatregelen (wanneer dat in de toekomst technisch mogelijk blijkt) een aanzienlijke besparing te realiseren valt op de geraamde investeringskosten langs de Waal in absolute zin.

De focus in deze analyse ligt echter op de kostenbesparing op dijkversterking die behaald kan worden met de inzet van ruimtelijke maatregelen. Hier valt in dit geval geen winst te verwachten. Met of zonder inzet van ruimtelijke maatregelen, met deze grote veiligheidsopgaves ten aanzien van piping zal een maatregel vrijwel overal nodig zijn, inzet van ruimtelijke maatregelen zal er niet voor zorgen in dit geval dat de pipingmaatregel goedkoper wordt, aangezien de kosten van de maatregel onafhankelijk worden van de waterstand. Rivierverruiming levert daarmee niets op in de reductie van de kosten ten aanzien van piping.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Effectiviteit van rivierverruiming Waal

In de voorliggende analyse is de methodiek voor het bepalen van de effectiviteit van rivierverruimende maatregelen toegepast op twee casestudies op de Waal: de nevengeul Sleeuwijk en de bypass Varik-Heesselt. Voor deze maatregelen is onderzocht in hoeverre deze maatregelen leiden tot een reductie van de dijkversterkingskosten op het traject Pannerden-Gorinchem aan twee zijden.

Over de periode 2015-2100 leveren de maatregelen Sleeuwijk en Varik-Heesselt respectievelijk 11 mln euro en 36 mln euro aan besparing op (contante waarde bij $i=5,5\%$ en $t_0=2025$).

Deze enigszins beperkte besparing kan met name door twee aspecten worden verklaard:

- Er is een grote opgave voor piping en macrostabiliteit. De kosten worden gedomineerd door de kosten van deze twee faalmechanismen en door de opstartkosten. Een kleine verlaging van de waterstanden levert wel een lager benodigde kruinhoogte op, maar dit verandert maar weinig aan de kosten. Er zijn weinig vakken waar versterking echt uitgesteld kan worden. Als een dijkvak toch versterkt wordt, zijn de minder kosten van een minder omvangrijke kruinverhoging relatief laag.
- De kruinhoogte-opgave is op veel locaties langs de Waal fors. Een waterstandsverlagende maatregel compenseert dit onvoldoende, waardoor er alsnog dijkversterking (kruinverhoging) moet plaatsvinden.

Voor wat betreft het laatste aspect, blijkt dat er langs de Waal tot 2075 een kruinhoogte-opgave ligt van gemiddeld 70 cm. De kruinhoogte-opgave tussen Tiel en Gorinchem is gemiddeld 90 cm. De kruinhoogte-opgave langs de Waal varieert tussen 50 en 150 cm. Dit is een grotere opgave dan de (klimaat)opgave bepaald in het Deltaprogramma Rivieren.

Het verschil met de opgave zoals bepaald in het Deltaprogramma Rivieren kan worden verklaard doordat er in deze casestudy deels uitgegaan is van andere uitgangspunten, zoals de werkelijk aanwezige kruinhoogte, GRADE, nieuwe normering, het kritiek overslagdebiet en de onzekerheidstoeslag. Dit betekent dat de VKS niet meer voldoende is om de hoogte-opgave volledig op te lossen. Behalve voor hoogte, zijn de flinke afkeuringen op piping en macrostabiliteit die uit de toepassing van de methodiek volgen veel groter dan 3^e toetsronde. We gebruiken in deze analyse voor het faalmechanisme piping de herziene regel van Sellmeijer en de nieuwe afregelparameters waardoor de hoge faalkansen worden berekend. De overstap in deze analyse naar ongedraineerd rekenen voor macrostabiliteit in combinatie met de relatief grove aannamen voor parameters die de sterkte-eigenschappen van de ondergrond beschrijven, veroorzaakt de hoge faalkansen en de grote opgave voor het faalmechanisme macrostabiliteit.

De dijkvakken voldoen daardoor in het startjaar van de berekening al niet meer aan de faalkanseisen voor deze faalmechanismen. De faalkanseisen worden door veel dijkvakken met een factor tussen 100 en 1000 (of meer) overschreden. Hierdoor zijn omvangrijke versterkingen in de 1e versterkingsronde nodig zijn, waarbij constructieve maatregelen nodig zijn om de opgave op te lossen. Er ligt dus een grote opgave, die niet alleen met rivierverruimende maatregel kan worden opgelost.

7.2 Invloed van uitgangspunten en keuzes op effectiviteit

In deze paragraaf worden de conclusies met betrekking tot analyse naar de invloed van uitgangspunten en de gevoeligheidsanalyse gegeven.

Invloed uitgangspunten

Er bestaat onzekerheid over de te hanteren waterstand aangezien de onzekerheidstoeslag nog niet definitief is, de Grade werklijnen mogelijk nog lager worden en een verandering van klimaatscenario van W+ naar G+ mogelijk nog speelt. Daarom is gekeken naar het effect van 10, 30 en 50cm waterstandsverlaging in de referentiesituatie. In Tabel 11 is voor deze waterstandsverlagingen aangegeven wat het effect is op de kostenreductie door de rivierverruimende maatregelen Sleeuwijk en Varik-Heesselt. Dit betekent dus dat er naar het waterstandsverlagende effect van deze maatregelen uit is gegaan van een lagere waterstand.

Tabel 11 laat zien dat wanneer er geen onzekerheidstoeslag of een milder klimaatscenario wordt toegepast heeft dit geen significant effect op de kostenreductie. Wanneer er in de referentiesituatie al sprake is van een 50cm lagere waterstand, neemt de kostenreductie wel significant toe.

Waterstandsreductie in referentiesituatie	Afname CW t.o.v. referentie [mln euro]
0 cm lagere waterstand in referentiesituatie	47
30 cm lagere waterstand in referentiesituatie	46
50 cm lagere waterstand in referentiesituatie	61

Tabel 11 Invloed van waterstandsreductie van de referentiesituatie op de kostenreductie door rivierverruimende maatregelen

Gevoeligheidsanalyse

De invloed van een aantal uitgangspunten en keuzes op effectiviteit is in beeld gebracht. Tabel 12 geeft een samenvatting van het effect op de kostenreductie (uitgedrukt in contante waarde) door inzet van Sleeuwijk en Varik-Heesselt bij verschillende uitgangspunten. De tabel laat zien dat het resultaat van de analyse is hangt af van de gehanteerde uitgangspunten.

Berekening	Afname CW t.o.v. referentie [mln euro]
Basisberekening (discontovoet 5,5 %, basisjaar 2025, ontwerplevensduur 50 jaar)	47
Discontovoet 3 %	54
Discontovoet 2 %	57
Alleen faalmechanisme hoogte	86

Tabel 12 Invloed van wijzigingen in uitgangspunten op effectiviteit van rivierverruiming (afname contante waarden dijkversterkingskosten)

Wanneer een lagere discontovoet gekozen wordt, gaan kostenreducties in de toekomst relatief meer meetellen. Hierbij dient te worden opgemerkt dat ook de contante kosten van toekomstige maatregelen toenemen.

Bij de helft van de vakken ontbreken de sterktegegevens voor piping, en bij een kwart van de vakken voor macrostabiliteit. Het is niet bij voorbaat duidelijk of de effectiviteit toeneemt of afneemt bij aanvullende gegevens. Als hier kleinere bermen nodig zijn kan rivierverruimende maatregel bij deze vakken zorgen voor een extra kostenreductie van de bermen. Anderzijds kan het zijn dat de winst die bijvoorbeeld werd behaald

door uitstel van de hoogte-opgave, teniet wordt gedaan doordat nu meteen al voor piping of macrostabiliteit versterkt moet worden.

7.3 Aanbevelingen

De hoofdconclusies aangaande de kosteneffectiviteit van rivierverruiming veranderen niet noemenswaardig bij andere aannames voor de faalkansen voor piping en macrostabiliteit.

Het is derhalve aan te bevelen om de gevoeligheidsanalyse uit te breiden met onderzoek naar invloed parameters piping en macrostabiliteit. Bijvoorbeeld: voor macrostabiliteit een keuze maken van parameters die een meer realistisch beeld geven wat overeenkomt met het "gevoel voor bewezen sterkte".

We adviseren om voor het faalmechanisme macrostabiliteit de van sterkte-parameters beter te onderbouwen en het effect van een minder grove inschatting van sterkte-parameters op de berekende faalkansen en versterkingsopgaven te analyseren.

In de kostenberekeningen ontbreken de kosten voor beheer en onderhoud. Meestal zijn de extra kosten voor beheer en onderhoud van primaire waterkeringen geraamd tussen 0,5 en 1%. Contant gemaakt met een discontovoet van 5,5% komt dat neer op 10% tot 20% van de contant gemaakte investeringskosten. Met een discontovoet van 3% wordt dat ongeveer 15% tot 30% van de investeringskosten.

8 Referenties

- ref 1. Asselman, N., Levelt, O., Van der Kraan, A. (2014). Bodemdaling in het rivierengebied, Technische analyses voor DPR. Deltares rapport 1209392-000-VEB-0038-V02. Deltares.
- ref 2. Asselman, N. (2014). Strategieën DPR doorgerekend op doelbereik (risicoreductie). Deltares rapport 1209392-000-VEB-0030. Deltares.
- ref 3. Bretschneider, C.L. (1958). Revised wave forecasting relationships, Proc. 6th Conference on Coastal Engineering, ASCE. pp. 30-67.
- ref 4. De Grave, P. (2015). Kosten pipingbermen versus kwelschermen. Deltares Memo. 1 juni 2015.
- ref 5. Deltares (2014). KOSWAT Systemdocumentatie. Versie: 2.3.0.00.
- ref 6. Levelt, O., Asselman, N., De Grave, P. ter Horst, W., De Kruif, A., Van der Meij, R., Vos, R., Van der Zwan, I. (2015). Uitwerking methode voor bepaling effectiviteit rivierverruiming. Deltares rapport 1220039-000-VEB-0006. RWS, Deltares en HKV.
- ref 7. RWS WVL (2014). Handreiking Ontwerpen met overstromingskansen. OI2014. Rijkswaterstaat.
- ref 8. RWS WVL (2012). Zandmeevoerende Wellen. Rijkswaterstaat. Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- ref 9. Steenbergen, H. & Vrouwenvelder T. (2003). Theoriehandleiding PC-Ring v5.0 – deel B: Statistische modellen. TNO Bouw en Ondergrond. Delft.
- ref 10. Steenbergen, H., Vrouwenvelder T., & Koster T. (2008). Theoriehandleiding PC-Ring v5.0 – deel A: Mechanismenbeschrijvingen. TNO Bouw en Ondergrond. Delft.
- ref 11. TAW (2002). Technisch Rapport Golfoploop en Golfoverslag bij Dijken. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen. Delft
- ref 12. Ter Horst, W., Wojciechowska, K. & Teixeira, A. (2014). Preliminary calibration of safety factors for semi-probabilistic assessment of piping failure mechanism. Deltares rapport 1209431-007-ZWS-0004. Deltares.
- ref 13. Van Vuren & Ter Horst, W. (2015). Effect van waterstandsverlagende maatregelen op de overstromingskans. Ontwikkeling en toepassing van een methodiek. HKV memo PR2986.10. HKV.
- ref 14. Van Vuren, S., Vieira da Silva, J., Pleijter, G. & Pol, J. (2015). Effectbepaling maatregelen Varik-Heesselt en Sleeuwijk. Modelberekeningen en Hydra databases. HKV memo PR3060.10. HKV.
-

Bijlage A

Afleiding faalkanseisen o.b.v. OI2014

De faalkanseis $P_{(eis,i)}$ die per dijkvak aan een faalmechanisme wordt gesteld kan als volgt worden bepaald:

$$P_{eis,i} = \frac{P_{norm} \cdot \omega}{\left(1 + \frac{a \cdot L_{traject}}{b}\right)}$$

waarin

P_{norm} de dijktrajectnorm (uitgedrukt in afkeurkans)⁴

ω de faalkansruimtefactor voor het betreffende faalmechanisme

a de fractie van de lengte van het traject dat gevoelig is voor het faalmechanisme

b de lengte van onafhankelijke, equivalente vakken voor het faalmechanisme

$L_{traject}$ de lengte van het dijktraject waarop de norm van toepassing is

De faalkanseis $P_{(eis,i)}$ die per dijkvak aan het faalmechanisme Overloop & golfoverslag wordt gesteld, kan met een eenvoudigere formule worden bepaald, namelijk:

waarin N een maat is voor het lengte-effect. Voor het Bovenrivierengebied is N gelijk aan 1.

$$P_{eis,i} = \frac{P_{norm} \cdot \omega}{N}$$

Tabel 12 geeft de relatieve bijdrage van een faalmechanisme aan de faalkans weer van een traject dat voldoet aan de overstromingskansnorm.

Type waterkering	Faalmechanisme	faalkansruimtefactor ω
Dijk	Overloop & golfoverslag	0,24
	Opbarsten & piping	0,24
	Macrostabieliteit binnenwaarts	0,04
	Falen door beschadiging van bekleding en erosie	0,10
Kunstwerken	Niet sluiten	0,04
	Piping	0,02
	Constructief falen	0,02
Overig		0,30
Totaal		1

Tabel 13 Faalkansruimtefactor ω per faalmechanisme

Tabel 13 geeft een overzicht van de parameters a en b voor de faalmechanismen Opbarsten & piping en Macrostabieliteit binnenwaarts.

4 De overstromingskansnormen van het Deltaprogramma zijn uitgedrukt als signaalwaarde. De afkeurkans is bepaald door de signaalwaarde te vermenigvuldigen met een factor 3.

Faalmechanisme	Watersysteem	Parameter a [-] fractie van de lengte van het traject dat gevoelig is voor het faalmechanisme	Parameter b [m] Lengte van onafhankelijke, equivalente vakken
Opbarsten & piping	Bovenrivieren	0,90	300
	overig	0,40	300
Macrostabieliteit binnenwaarts	Alle	0,033	50

Tabel 14 : Overzicht van de parameters a en b voor de faalmechanismen Opbarsten & piping en Macrostabieliteit binnenwaarts

Bijlage B

Memo hoogteopgave Waal

1. Aanleiding

Op het gebied van de bepaling van hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerpen en toetsen van waterkeringen is door diverse veranderingen (o.a. nieuwe normering, overstap naar GRADE, Ruimte voor de Rivier) veel veranderd. Door verschillende projecten analyses is de hoogte opgave voor de Waal bepaald. Deze lijken op het eerste gezicht niet met elkaar overeen te komen.

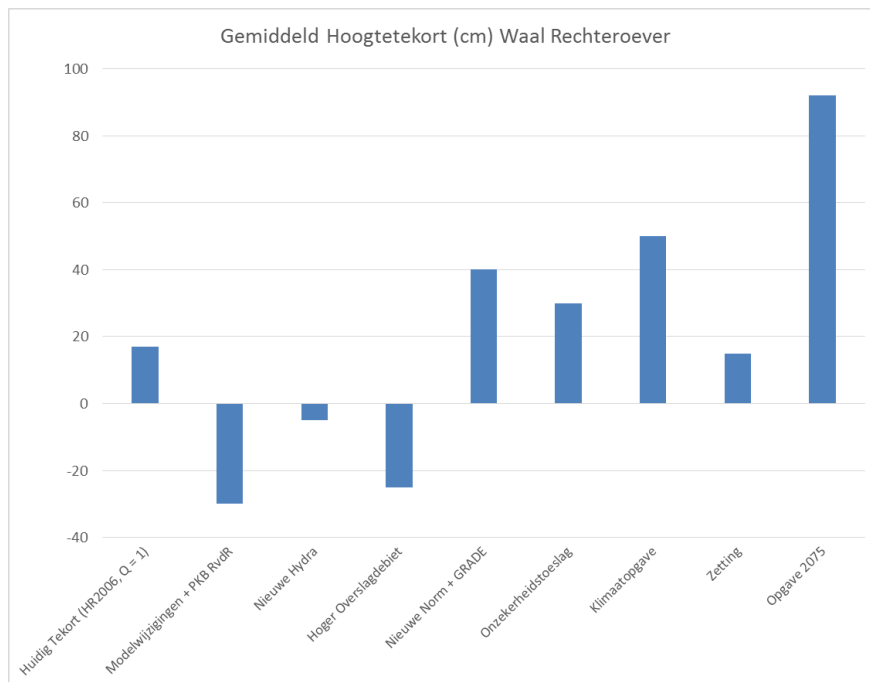
2. Doel

Dit memo heeft tot doel om de opbouw van de huidige hoogte opgave langs de rivieren te tonen en daarmee:

1. Inzichtelijk te maken wat het effect is van de diverse veranderingen op de hoogte opgave gebruikt in de analyse effectiviteit rivierverruiming.
2. Het verschil in hoogte opgave tussen de verschillende uitgevoerde analyses van de afgelopen jaren te duiden.

3. Effect veranderingen op opbouw hoogte opgave Effectiviteit Rivierverruiming

In Figuur 36 wordt getoond hoe de huidige hoogte opgave is opgebouwd voor het OI2014-vs3. Hierbij is een gemiddelde schatting gemaakt van het kruinhoogtetekort voor de rechteroever van de Waal behorend tot dijkkring 43 (normtraject 43-6).



Figuur 36: Verschillende bijdragen aan verandering hoogteopgave 2075

De volgende aspecten worden onderscheiden

a. Huidige Tekort (HR2006, Q=1):

Vele dijken voldoen ook na Deltaplan Grote Rivieren nog niet aan de wettelijke eisen van 1996. Het hier getoonde tekort is het gemiddelde tekort voor de derde toetsronde langs de Waal.

b. Modelwijzigingen + PKB (RvdR):

Door de uitvoering van Ruimte voor de Rivier daalt de waterstand op veel locaties in het rivierengebied. Dit betekent dat bij hetzelfde debiet in Lobith de waterstand op een locatie lager kan zijn. Er zijn nieuwe WAQUA berekeningen gemaakt met de fysieke situatie na Ruimte voor de Rivier. In het WAQUA-model is ook de modelbodem gewijzigd.

Het effect van Ruimte voor de Rivier is zeer afhankelijk van de exacte lokatie. In Figuur 36 is een gemiddelde weergegeven. In algemene zin kan worden gesteld dat in de berekeningen de modelwijzigingen een groter waterstandverlagend effect hebben dan de PKB Ruimte voor de Rivier.

c. Nieuwe Hydra:

Met Hydra-Zoet wordt anders gerekend dan in het verleden. De kruinhoogtebepaling wordt berekend met de 2 kans variabelen wind en waterstand. Voorheen werd in Hydra-R de maatgevende wind bepaald op basis van een voorschrift van de TAW. In de praktijk blijkt dit te leiden tot een iets minder zware opgave.

d. Hoger overslagdebiet

Aangezien de nieuwe veiligheidsbenadering uitgaat van een overstromingskans is de maatgevende situatie een situatie is waarin net wel/geen overstroming optreedt. Dit legitimeert het gebruik van een groter kritiek overslagdebiet. In het OI2014 is hierin een eerste slag gemaakt door uit te gaan van 5 of 10 l/s/m in plaats van 1 of 0,1 l/s/m (in deze memo is uitgegaan van 5 l/m/s).

e. Nieuwe norm + Grade:

Wijzigingen door een nieuwe veiligheidsbenadering en een nieuwe norm

De nieuwe veiligheidsbenadering en de nieuwe normen leveren op een aantal punten wijzigingen aan de hydraulische randvoorwaarden op:

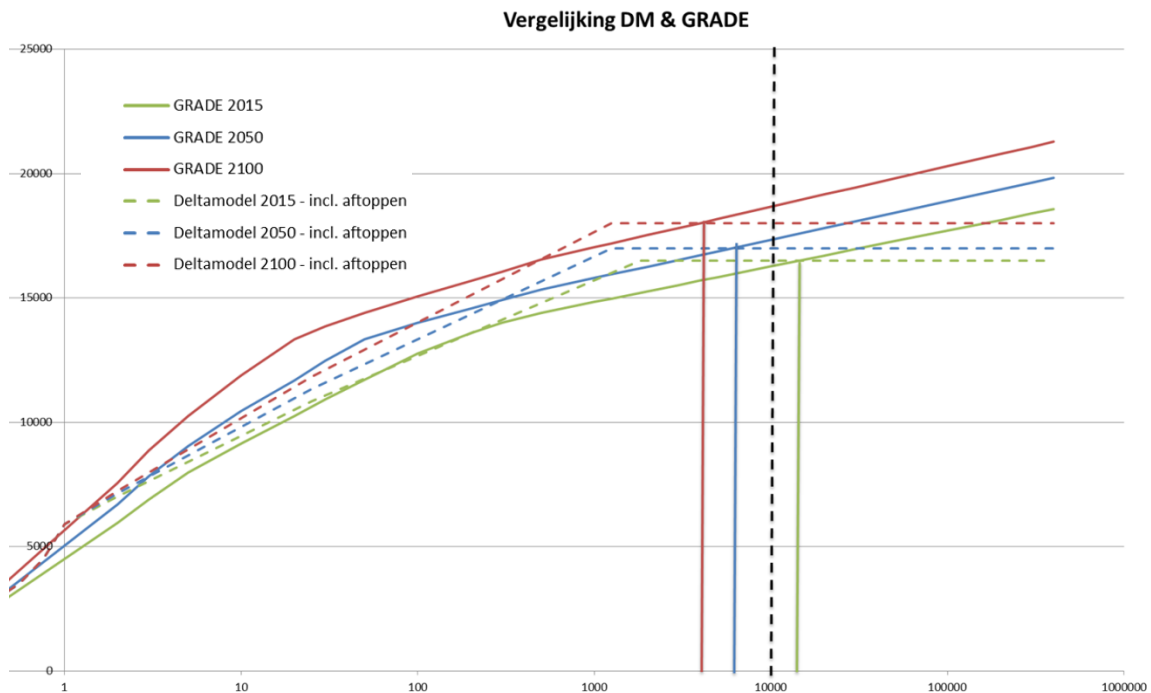
1. Voor veel waterkeringen verandert de hoogte van de veiligheidsnorm.
Wanneer er bijvoorbeeld sprake is van een hogere veiligheidsnorm, dan moet bij ontwerpen en toetsen van waterkeringen ook een hogere waterstand worden beschouwd, corresponderend met de hogere veiligheidsnorm.
2. De nieuwe norm is een overstromingskansnorm die betrekking heeft op een bepaald normtraject. Dit betekent dat de kans dat er ergens in het traject door een bepaald faalmechanisme een overstroming optreedt niet groter mag zijn dan de norm. Deze norm kan vertaald worden naar een faalkans voor een dijkvak voor een bepaald faalmechanisme. Hierbij wordt rekening gehouden met een faalkansbudget en het lengte-effect. In het Ontwerpinstrumentarium 2014 (OI2014) wordt een faalkansbudget aangereikt waarin voor het faalmechanisme een faalkansruimte van 24% is gereserveerd.
3. Specifiek voor het faalmechanisme golfoverslag wordt gekeken naar de toelaatbare kans dat het optredend overslagdebiet groter is dan het kritieke overslagdebiet. Uitgaande van een norm met een signaleringswaarde van 1/30.000 per jaar, levert dit een toelaatbare kans van ongeveer 1/40.000 per jaar op.⁵

Wijziging door nieuwe GRADE berekeningen inclusief het effect van overstromingen in Duitsland

Er zijn nieuwe GRADE berekeningen gemaakt waarbij ook het effect van mogelijke overstromingen in Duitsland is meegenomen waarbij tevens rekening gehouden is met noodmaatregelen op de dijk. Dit betekent dat er bij zeer extreme hoogwaters van uit

⁵ Uitgaande van een factor 3 tussen signaleringswaarde en maximaal toelaatbare faalkans. De maximaal toelaatbare faalkans is dan 1/10.000 per jaar. Voor het faalmechanisme golfoverslag is 24% gereserveerd. Dit leidt tot een toelaatbare faalkans voor golfoverslag van 1/41.667 per jaar.

wordt gegaan dat er overstromingen in Duitsland optreden waardoor het debiet (en de waterstand) die Lobith bereikt minder hoog zal zijn. De waterstand neemt nog wel toe bij steeds extremere gebeurtenissen, maar minder snel. Er is sprake van afvlakken. De noodmaatregelen leiden daarentegen tot hogere niveaus waar dit gebeurt (ca. +1000 m³/s). In de eerdere analyses in het Deltaprogramma (DP) werd uitgegaan van aftoppen. Hierbij werd aangenomen dat er een bepaald fysisch maximum zit aan het debiet in Lobith. In Figuur 37 is een vergelijking gegeven tussen de afvoerstatistiek uit het DP en GRADE.



Figuur 37: Vergelijking afvoerstatistiek deltaprogramma en GRADE voor 2015, 2050 en 2100

Figuur 37 laat zien dat in het Deltaprogramma wordt afgetopt en dat er bij GRADE sprake is van afvlakken. De figuur geeft verder aan dat er bij een 1/10.000-situatie relatief weinig verschil zit tussen DP en GRADE. Bij extremere situaties (bv. 1/40.000 per jaar) neemt het verschil toe en leidt GRADE tot hogere waterstanden. In de extremere klimaatscenario's geven de GRADE lijnen ook bij lagere terugkeertijden toenames.

Het bovenstaande heeft tot effect dat er voor de hoogteopgave bij de overstap naar GRADE een toename is van de hoogteopgave. Voor normtrajecten langs de rivier met een norm van 1/30.000 per jaar is voor de kruinhoogte de range van overschrijdingskansen van 1/20.000 per jaar tot 1/40.000 per jaar met name van belang. Voor de situaties 2050 en 2100 vindt in die range een toename van 1.000 m³/s tot 2.000 m³/s plaats. Echter, de Hydra-methode gebruikt niet 100% van deze kans voor de waterstand omdat een deel van de kans wordt opgesoupeerd door de wind. Dit leidt tot een reductie van de afvoer in de kruinhoogteberekening met tenminste 1000 m³/s. Voor dijkprojecten in het jaar 2075 worden met de Hydra-methode de 18000 m³/s daardoor vrijwel niet of heel beperkt overschreden (HKV, in prep.).

f. Onzekerheidstoeslag:

De robuustheidstoeslag zoals deze bij het ontwerpen van dijken in de huidige werkwijze wordt toegepast, komt in de nieuwe veiligheidsbenadering te vervallen. Er wordt echter een onzekerheidstoeslag ingevoerd. Met deze onzekerheidstoeslag worden statistische en modelonzekerheden in rekening gebracht. Voor het

rivierengebied is deze onzekerheidstoelag 0,3m (Nicolai et al, 2011). Hiermee is de hoogte van de onzekerheidstoelag identiek aan de robuustheidstoelag uit de Leidraad Rivieren.

g. Klimaatopgave

De klimaatopgave is volgens het W+ scenario van de KNMI'06 scenario's en verwerkt in de GRADE afvoerstatistiek (Hegnauer, in prep.).

h. Zetting

Hier wordt aangenomen een zetting van 20cm per eeuw.

De totale som aan veranderingen bij het huidige kruinhoogtetekort conform de 3^e toetsronde is gelijk aan de Opgave 2075. Merk verder op dat de huidige kruinhoogteopgave conform het WTI2017 gelijk zal zijn aan de totale opgave – klimaatopgave – zetting. Deze blijkt dan maar marginaal groter te zijn dan de kruinhoogteopgave volgens de 3^e toetsronde ondanks de nieuwe norm en afvoerstatistiek.

4. Verschillen hoogte opgaven tussen verschillende studies verklaard

In Tabel 15 zijn de hoogteopgaven weergegeven die zijn ingeschat op basis van een viertal studies.

Tabel 15: Hoogteopgave in cm volgens verschillende studies

	Analyse	Ingeschatte hoogteopgave [cm]	Welke aspecten zijn meegenomen
0	Geschatte gemiddelde opgave voor OI2014-vs3 (Figuur 1)	90	a t/m f
1	Consequentieanalyse van het Deltaprogramma Veiligheid (DPV) omtrent de nieuwe normering (RWS WVL, 2014)	50	
2	Consequenties van nieuwe belastingparameters in het Ontwerpinstrumentarium 2014 - versie 3 (Den Bieman & Smale 2015)	55	b,c,d,e,f (huidig kruinhoogtetekort en zetting mist, klimaatopgave maar tot 2065)
3	Cases Kennisplatform Risicobenadering t.b.v. consequenties normering op dimensies van waterkeringen	60 – 70	diverse andere uitgangspunten, m.n. kleinere klimaatopgave
4	Studie naar de effectiviteit van rivierverruimende maatregelen	50 - 150	a t/m f

De bovengenoemde studies hadden veelal een ander doel en een andere invalshoek. Daarnaast zijn de studies op verschillende momenten uitgevoerd in een tijd dat er voor wat betreft het berekenen van hydraulische belastingen veel is veranderd. Met name het wel/niet meenemen van huidig aanwezige kruinhoogtetekort, de modelveranderingen, de onzekerheidstoelag, het in rekening brengen van klimaatverandering, zetting en de overstap naar de GRADE-afvoerstatistiek hebben veel invloed op de resultaten.

Voor elke studie is aangegeven welke aspecten zijn meegenomen. Voor de studie effectiviteit rivierverruiming en voor het OI2014-vs3. geldt dat alle aspecten zijn meegenomen⁶. Een verschil tussen beiden lijkt de grote spreiding maar dit is slechts schijn omdat in Figuur 1 het huidige kruinhoogtetekort is uitgemiddeld. Zou dit niet

⁶ Er werd hier echter niet met een Hydra gewerkt maar met fragility curves afgeleid uit PC-Ring.

worden gedaan dan wordt ongeveer eenzelfde spreiding voor de opgave volgens het OI2014-vs3 verkregen (zie ook voorbeelden in de bijlage).

Consequenties van nieuwe belastingparameters in het Ontwerpinstrumentarium 2014 - versie 3 (Den Bieman & Smale 2015)

In Tabel 16 is in het kader van het OI2014-vs3 een grove inschatting gedaan van veranderingen in hydraulische randvoorwaarden, inclusief de bijbehorende achtergronden per riviersysteem. Voor de Waal is hier de inschatting gedaan dat het MHW met gemiddeld 0,35m zal toenemen over de hele riviertak tot aan 2065 uitgaande van een W+ scenario. Onder hetzelfde scenario neemt het hydraulisch belastingniveau gemiddeld over de hele riviertak toe met 0,55m. Het verschil in uitgangspunten is dat in de studie van Den Bieman en Smale zetting en het huidige kruinhoogtetekort niet zijn meegenomen. Daarnaast is de klimaatopgave tot 2065 beschouwd. Na correctie voor deze verschillen in de uitgangspunten wordt dezelfde opgave van 90cm voor 2075 verkregen als in Figuur 36 (en Tabel 1, rij 0).

Tabel 16: Overzicht van opgave in termen van maatgevende waterstand (MHW) en hydraulisch belastingniveau (HBN) voor verschillende watersystemen (Den Bieman en Smale, 2015)

Watersysteem	Individuele veranderingen tov verleden					Geschatte totale verandering 2015		Grootste bijdrage	Geschatte totale verandering 2065 (W+)	
	Norm-verandering	Statistiek referentie	Model onzekerheden	Statistische onzekerheden	Gebieds-veranderingen	MHW [m]	HBN (5l/m/s) [m]		MHW [m]	HBN (5l/m/s) [m]
Waddenzee	1/4.000 -> 1/3.000	-	- lokale waterstand - lokale golfcondities	- zeewaterstand - windsnelheid		0.8	0.8	onzekerheid waterstand	1.2	1.7
Rijntakken 1 (IJssel)	1/1250 -> 1/3.000	GRADE	- lokale waterstand	- afvoer	PKB RvR	-0.5	-0.7	GRADE +PKB RvR + overslagdebiet	-0.25	-0.5
Rijntakken 2 (Waal)	1/1250 -> 1/30.000	GRADE	- lokale waterstand	- afvoer	PKB RvR	0.0	0.2	norm	0.35	0.55
Rijntakken 3 (Lek)	1/1250 -> 1/30.000	GRADE	- lokale waterstand	- afvoer	PKB RvR	0.2	0.3	norm	0.2	0.3
IJsseldelta	1/1250 -> 1/10.000	GRADE	- lokale waterstand - lokale golfcondities	- afvoer - meerpeil - windsnelheid	PKB RvR	1.0	0.6	norm	1.2	0.8

Consequentieanalyse van het Deltaprogramma Veiligheid (DPV) omtrent de nieuwe normering (RWS WVL, 2014)

In de consequentieanalyse van DPV (RWS WVL, 2014) is uitgegaan van het Deltamodel met de afvoerstatistiek uit het Deltaprogramma. Dit betekent dat er rekening is gehouden met aftoppen. Dit betekent dat er voor 2015 van uit is gegaan dat de afvoer bij Lobith maximaal 16.500 m³/s is. Voor de situatie 2050 en 2100 stijgt deze maximale afvoer naar respectievelijk 17.000 m³/s en 18.000 m³/s. Het aftoppen van de rivierafvoer heeft effect op lokale waterstanden in 2015 en op de klimaatopgave. De beperkte hoogteopgave van 0,5m kan hiermee maar voor een groot deel worden verklaard.

Cases Kennisplatform Risicobenadering t.b.v. consequenties normering op dimensies van waterkeringen

In de KPR cases is voor de Waal een opgave van 0,6 á 0,7m uitgerekend. De klimaatopgave is hier echter ingeschat op 0,3m omdat destijds de modelberekeningen nog niet gereed waren. Daarnaast is geen zetting in rekening gebracht. Wanneer voor klimaat en zetting dezelfde gegevens als in Figuur 36 worden aangehouden dan zou er in de KPR cases een opgave van ongeveer 1,0m uitgerekend worden.

5. Conclusies

De verschillende analyses naar de hoogteopgave langs de Waal laten een uiteenlopend beeld zien. Dit uiteenlopende beeld wordt met name veroorzaakt door het feit dat de analyses een verschillend doel hebben en een verschillende invalshoek. Hierbij worden vaak andere uitgangspunten gehanteerd. Daarnaast zijn de analyses op verschillende

momenten uitgevoerd in een tijd dat er veel wijzigingen hebben plaatsgevonden op het gebied van hydraulische randvoorwaarden.

In het licht van bovenstaande zijn de verschillende in de analyses verklaarbaar, waarbij moet worden opgemerkt dat met name het meenemen van de huidige kruinhoogte en daaraan gekoppeld het reeds aanwezige hoogtetekort of hoogteoverschot een grote rol speelt.

Wanneer wordt uitgegaan van een dijk die precies hoog genoeg is, dan laat de studie Effectiviteit Rivierverruimende maatregelen een gemiddelde hoogteopgave voor 2075 zien van ongeveer 0,8m tot 1,0m. Dit is een toename van ongeveer 0,5m ten opzichte van eerdere studies. Deze toename is o.a. verklaarbaar vanuit het feit dat er in de eerdere studies geen zetting is meegenomen en dat er is overgestapt naar het GRADE model, dat bij een zeer strenge norm een toename van waterstanden en hydraulische belastingniveaus laat zien.

6. Aanvullende informatie

Nadere duiding verschillen

Om meer begrip te krijgen voor de impact van verschillende veranderingen en hun effect op de hoogteopgave zijn twee verschillende locaties nader bekeken. Tabel 17 geeft een overzicht van verschillende waterstanden en hydraulische belastingniveaus voor belastingniveaus voor twee locaties langs de Waal.

Tabel 17: Overzicht van verschillende waterstanden en hydraulische belastingniveaus voor twee locaties langs de Waal

Waterstanden [m NAP]	Dijkvak TG039-055 km 918-919 Loc 10 (TG044) nabij Zennewijnen	Dijkvak TG106-121 km 925-926 Loc 4 (TG111) nabij Heesselt
A. VTV2006 – waterstand	11.10	10.10
B. Toetswaterstand huidige norm na RvdR op basis van Deltamodel voor referentiesituatie 2015	10.70	9.90
C. Toetswaterstand nieuwe norm na RvdR, inclusief aftoppen op basis van Deltamodel voor referentiesituatie 2015	10.80	10.00
D. Toetswaterstand GRADE 2015	10.76	9.91
E. Toetswaterstand GRADE 2075	11.40	10.53
Hydraulisch belastingniveau [m NAP]		
F. HBN huidige norm o.b.v. VTV 2006 – 1 op 3 bij 1 l/s/m	11.40	10.40
G. HBN huidige norm na RvdR - 1 op 3 bij 1 l/s/m	11.00	10.20
H. HBN nieuwe norm + GRADE-2015 - 1 op 3 bij 1 l/s/m	11.41	10.62
I. HBN nieuwe norm + GRADE-2015 - 1 op 3 bij 5 l/s/m	11.26	10.45
J. HBN nieuwe norm + GRADE-2075 - 1 op 3 bij 5 l/s/m	11.82	11.02

Tabel 17 geeft de verschillende extreme waterstanden en hydraulische belastingniveau's die zijn berekend met verschillende modellen en aannamen. In eerste instantie is de VTV waterstand weergegeven bij de huidige overschrijdingskansnorm van 1/1250 per jaar (A). Vervolgens is gekeken wat deze waterstand bij de huidige norm zou zijn na de PKB Ruimte voor de Rivier (B). Deze berekening is gedaan met het Deltamodel. Derhalve zijn de verschillen in uitkomsten niet alleen het effect van de PKB Ruimte voor de Rivier maar ook van modelwijzigingen. Vervolgens is in (C) gekeken naar het effect wanneer zou worden

uitgegaan van de nieuwe overstromingskansnorm van 1/30.000 per jaar. Hierbij is ook gerekend met het Deltamodel waarbij uitgegaan is van aftoppen bij een debiet in Lobith van 16.500 m³/s.

Vervolgens is in (D) en (E) de overstap gemaakt naar GRADE, waarbij er dus niet wordt afgetopt, maar afgevlakt. De situatie in (D) geeft de situatie zonder klimaatverandering (2015) weer. De situatie in (E) geeft de situatie met klimaatverandering tot 2075 weer. Hierbij is nog geen zetting en bodemdaling in rekening gebracht.

Vervolgens is in (F) t/m (G) op soortgelijke wijze het hydraulisch belastingniveau voor verschillende situaties weergegeven. Dit is steeds gedaan bij een buitentalud van 1 op 3. Een aanvullend element hierbij is dat ook is gekeken naar het effect van een hoger toelaatbaar overslagdebiet (5 l/s/m). Situaties (I) en (J) zijn situaties met een toelaatbaar overslagdebiet van 5 l/s/m.

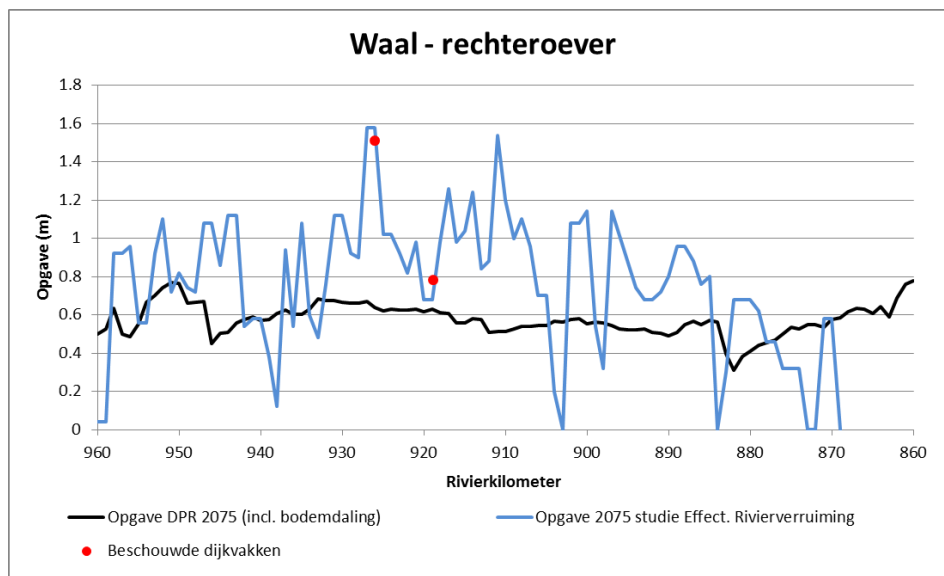
Op basis van bovenstaande tabel is een overzicht gemaakt van de verschillende veranderingen zoals dit ook in Figuur 36 is gedaan. Dit levert het beeld op zoals is weergegeven in Tabel 18.

Tabel 18: Overzicht van bijdragen aan de hoogteopgave

Bijdrage aan opgave in meters	Dijkvak TG039-055	Dijkvak TG106-121	Figuur 1
K. Huidige kruinhoogte: Tekort (+) / Overschot (-)	-0.09	0.44	0.17
L. Modelwijzigingen en Ruimte voor de Rivier (G - F)	-0.40	-0.20	-0.35
M. Hoger overslagdebiet (5 l/s/m) (I - H)	-0.15	-0.17	-0.25
N. Nieuwe norm + GRADE (H - G)	0.40	0.42	0.40
O. Onzekerheidstoeslag	0.30	0.30	0.30
P. Klimaatverandering (J - I)	0.56	0.57	0.50
Q. Zetting	0.15	0.15	0.15
R. Opgave 2075	0.78	1.51	0.92
S. Bij dijk zonder tekort of overschot	0.87	1.07	0.75

Het verschil tussen de twee beschouwde vakken en Figuur 3 (en eerdere analyse) zit met name in het effect van een hoger toelaatbaar overslagdebiet (ongeveer 0,1m) en klimaatverandering. Hierbij moet worden opgemerkt dat bij de twee beschouwde vakken klimaatverandering voor 60 jaar (2015 - 2075) is meegenomen.

Daarnaast dient te worden opgemerkt dat de totale opgave erg afhankelijk is van het eventueel aanwezige hoogtetekort of hoogteoverschot. Derhalve is ook aangegeven wat de hoogteopgave is, ervan uitgaande dat de dijk geen tekort of overschot heeft. Figuur 38 geeft de opgaven zoals bepaald in Deltaprogramma Rivieren (DPR) en de opgave zoals bepaald in de studie Effectiviteit Rivierverruiming inclusief de twee beschouwde dijkvakken in deze memo. De figuur laat zien dat de hoogteopgave volgens de studie Effectiviteit Rivierverruiming schommelt tussen de 0,8m en 1,0m. Er zijn enkele uitschieters naar boven en naar beneden. Deze uitschieters worden met name veroorzaakt door een reeds aanwezig hoogtetekort of overhoogte.



Figuur 38: Vergelijking tussen opgave zoals bepaald in Deltaprogramma Rivieren (DPR) en de opgave zoals bepaald in de studie Effectiviteit Rivierverruiming (incl. de twee beschouwde dijkvakken in deze memo)

Hoe worden hydraulische randvoorwaarden bepaald

Hydraulische randvoorwaarden bestaan uit een waterstand en golfparameters (golfhoogte, -periode en golfrichting). Voor geotechnische faalmechanismen (o.a. piping en macrostabiliteit) is met name de (maatgevende) waterstand van belang. Voor het faalmechanisme golfoverslag is de combinatie van waterstand en golfparameters van belang.

Bepaling maatgevende waterstand (MHW)

De bepaling van de maatgevende waterstand voor het bovenrivierengebied heeft als basis de statistiek van het debiet in Lobith (afvoerstatistiek/werklijn). De statistiek van het debiet in Lobith wordt in WTI2017 (in het verleden zijn ze afgeleid op basis van een middeling van verschillende statistische verdelingen/extrapolaties)_bepaald met regressiemodellen op basis van regen- en afvoerstatistiek in het stroomgebied. Een voorbeeld van zo'n model is GRADE. Het debiet in Lobith wordt vervolgens met behulp van een hydraulisch model (WAQUA) vertaald naar een locatie in het bovenrivierengebied. Dit leidt tot een overschrijdingsfrequentielijn van de waterstand op een locatie. Er kan bijvoorbeeld op een locatie worden bepaald welke waterstand gemiddeld eens per 1000 jaar wordt overschreden.

Klimaatverandering en toeslagen

Afhankelijk van of er getoetst of ontworpen wordt, wordt rekening gehouden met klimaatverandering, of wordt een toeslag toegepast. In de huidige werkwijze van toetsen volgens het VTV2006 wordt geen toeslag toegepast. Wanneer wordt ontworpen wordt in het rivierengebied een robuustheidstoeslag van 0,3m toegepast. Tevens wordt rekening gehouden met klimaatverandering.

Golfparameters

Voor het faalmechanisme golfoverslag wordt naar het overslagdebiet gekeken. In een toetsing wordt gekeken of het optredend overslagdebiet niet groter is dan een zeker kritiek overslagdebiet. Op een zelfde manier wordt bij het ontwerpen een dusdanige dijk ontworpen dat het optredend overslagdebiet niet groter is dan het kritieke overslagdebiet.

Het optredend overslagdebiet is afhankelijk van de waterstand, de golfparameters en eigenschappen van het buitentalud.

Referenties

J. den Bieman en A. Smale. Werkwijze bepaling hydraulische ontwerprandvoorwaarden OI2014 versie 3 (concept), voor HWBP 2015 projecten. Rapport 1210420-000 Deltares, 3 april 2015.

Nicolai R., Wojciechowska K., Vrouwenvelder A., Steenbergen H., (2011). Omgaan met onzekerheden in het waterveiligheidsbeleid. STATOR, 20-25

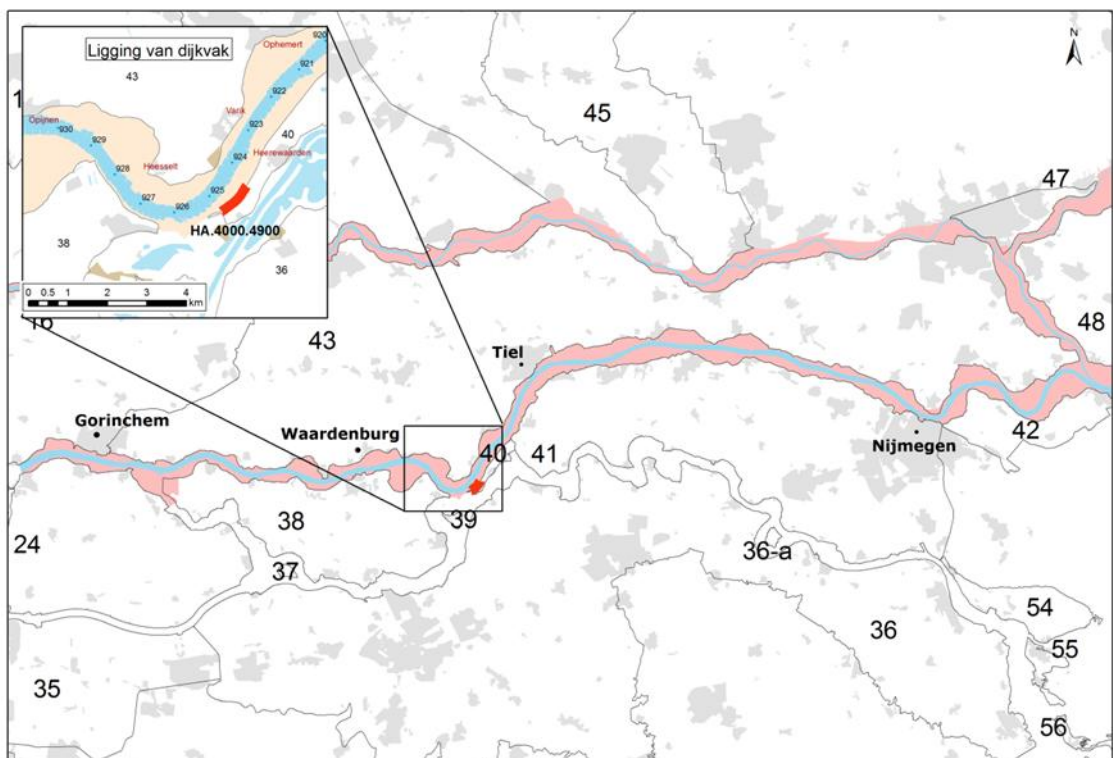
RWS WVL, Deltares, Projectbureau VNK2, Technisch inhoudelijke uitwerking DPV 2.2 – Consequentieanalyse voor primaire waterkeringen, Deelprogramma Veiligheid. 2014.

Bijlage C Detailanalyse voor een dijkvak en een dijktraject

Hoofdstuk 4 geeft een beschrijving van de invloed van rivierverruiming op de dijkversterkingskosten en de uitstel van dijkversterkingen voor het gehele Waaltraject van Pannerden tot Gorinchem. Deze bijlage beschrijft de resultaten voor een aantal dijkvakken en dijktrajecten in meer detail. Deze detailanalyses leveren informatie voor een extra onderbouwing van de resultaten uit Hoofdstuk 4.

Algemeen

De detailanalyse is uitgevoerd voor het dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925). Dit vak is gekozen omdat voor de bepaling van de faalkans voor alle faalmechanismen de benodigde gegevens voorhanden waren, en omdat het effect van de waterstandsverlaging door de inzet van Varik-Heesselt duidelijk zichtbaar is in het faalkansverloop.



Figuur 39 Ligging van dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

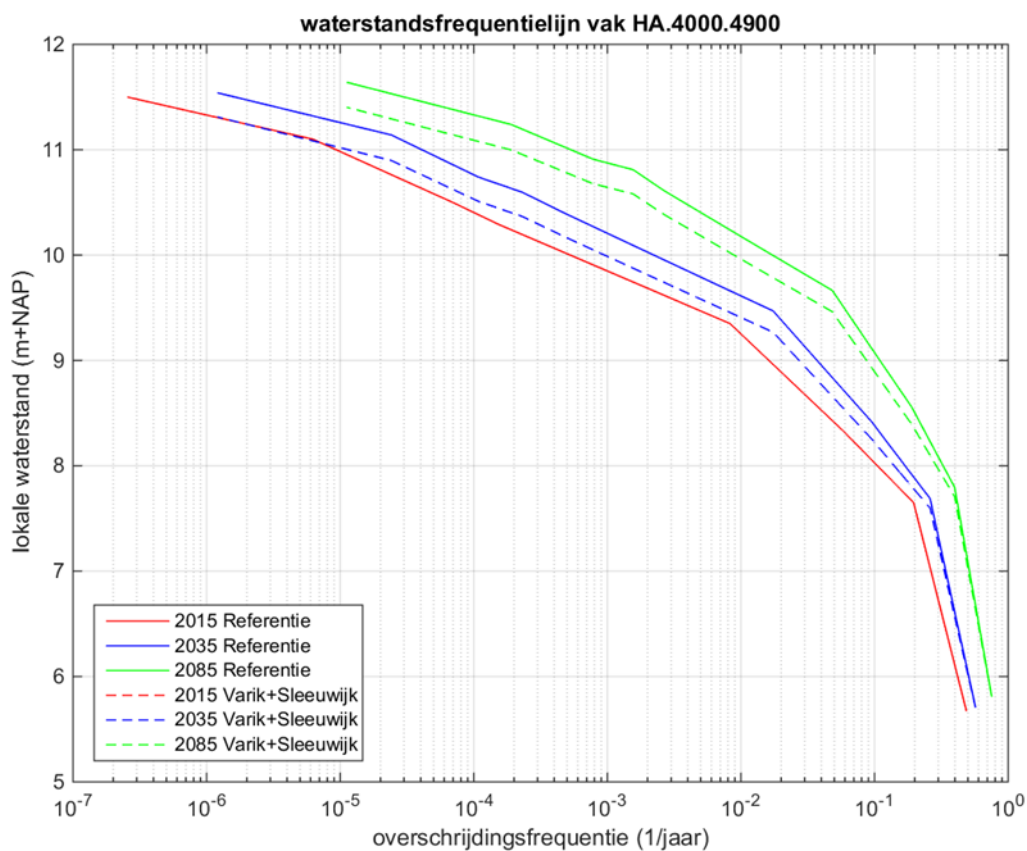
Belasting

Figuur 40 geeft de waterstandsfrequentielijn weer voor dit dijkvak in de situatie met en zonder inzet van de rivierverruiming Sleeuwijk en Varik-Heesselt. Figuur 41 geeft de afvoerwaterstandsrelatie voor het dijkvak.

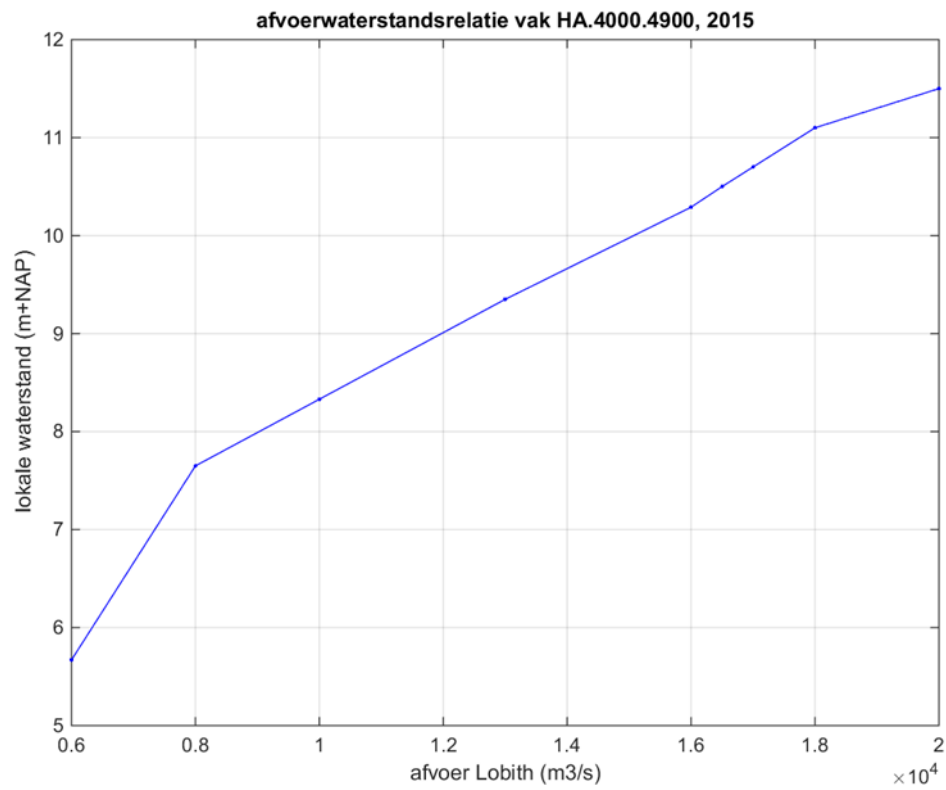
Figuur 40 laat zien dat de waterstand bij de middenkans (1/10.000) tussen 2015 en 2085 met ongeveer 0,90 m stijgt. De afvoer bij een kans van 1/10.000 per jaar stijgt volgens de GRADE afvoerstatistiek in de periode tussen 2015 en 2085 met ongeveer 2000 m³/s (van 16.300 m³/s naar 18.300 m³/s). De afvoer bij een kans van 1/1.000 per jaar stijgt van 14.800 m³/s naar 16.700 m³/s. De afvoerwaterstandsrelatie in Figuur 42 laat zien dat een afvoertoename van 2000 m³/s in 2015 op deze locatie zorgt voor een waterstandsstijging van 0,75 m. De overige 15 cm stijging wordt

veroorzaakt door de QH relatie die in 2100 hogere waterstanden geeft dan in 2015. Dit komt door een veranderende afvoerverdeling op de Pannerdensche Kop (Figuur 49).

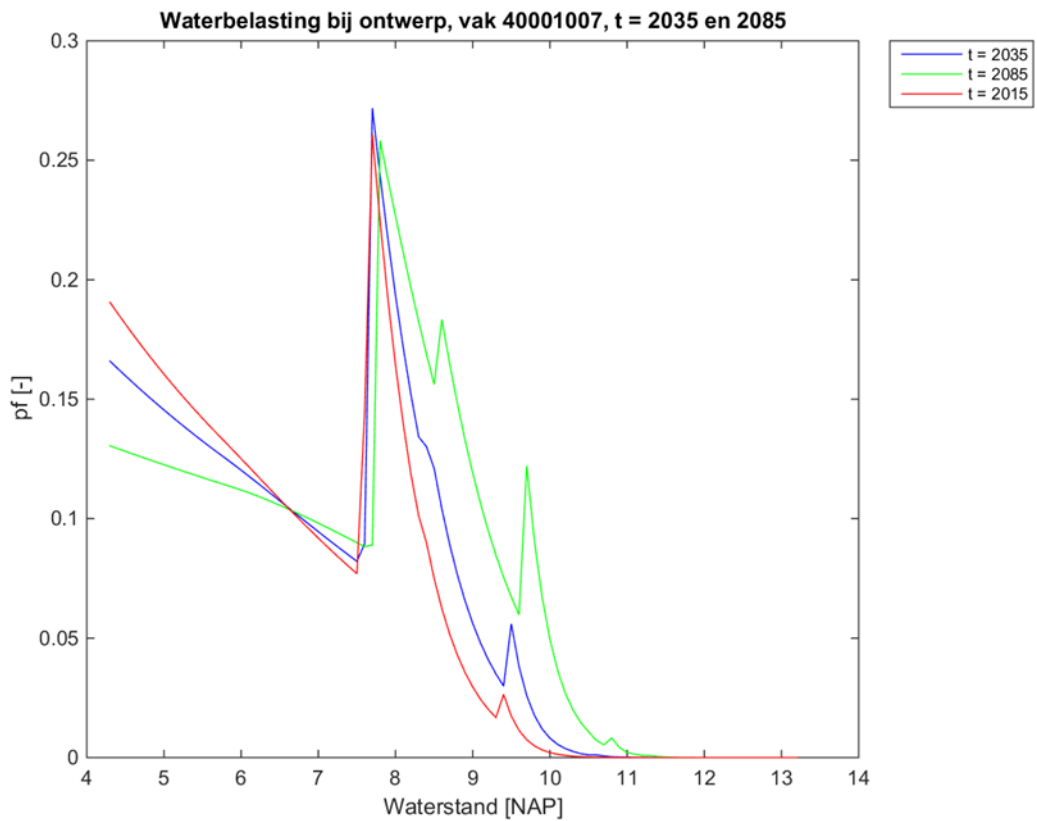
Figuur 42 laat de kansdichtheidsfunctie zien voor de situatie zonder rivierverruimende maatregelen voor drie zichtjaren: 2015 (huidige situatie), 2035 (het jaar waarin dijkversterking plaatsvindt) en 2085 (het jaar waarvoor de dijkversterking ontworpen wordt, uitgaande van een ontwerplevensduur van 50 jaar). De pieken in de kansdichtheidsfunctie worden veroorzaakt door discontinuïteiten (knikken) in de kansverdeling, als gevolg van de discretisatie van de QH-relatie met negen afvoergolven (Figuur 41). Omdat de kansdichtheidsfunctie een afgeleide is van de kansverdeling, zorgt een knik in de kansverdeling voor een sprong in de kansdichtheidsfunctie. In het linker deel van Figuur 43 is te zien dat de kansverdeling van de afvoer een klein knikje bevat bij $Q=13.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Door de transformatie naar waterstanden komt daar nog een knik bij rond een waterstand van $7,7 \text{ m+NAP}$.



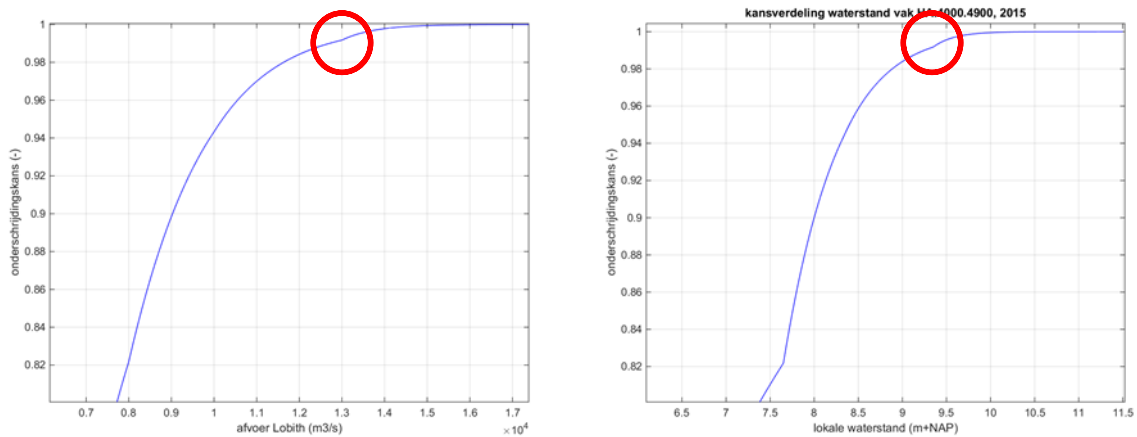
Figuur 40 Waterstandsfrequentielijn voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)



Figuur 41 Afvoerwaterstandsrelatie in 2015 voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)



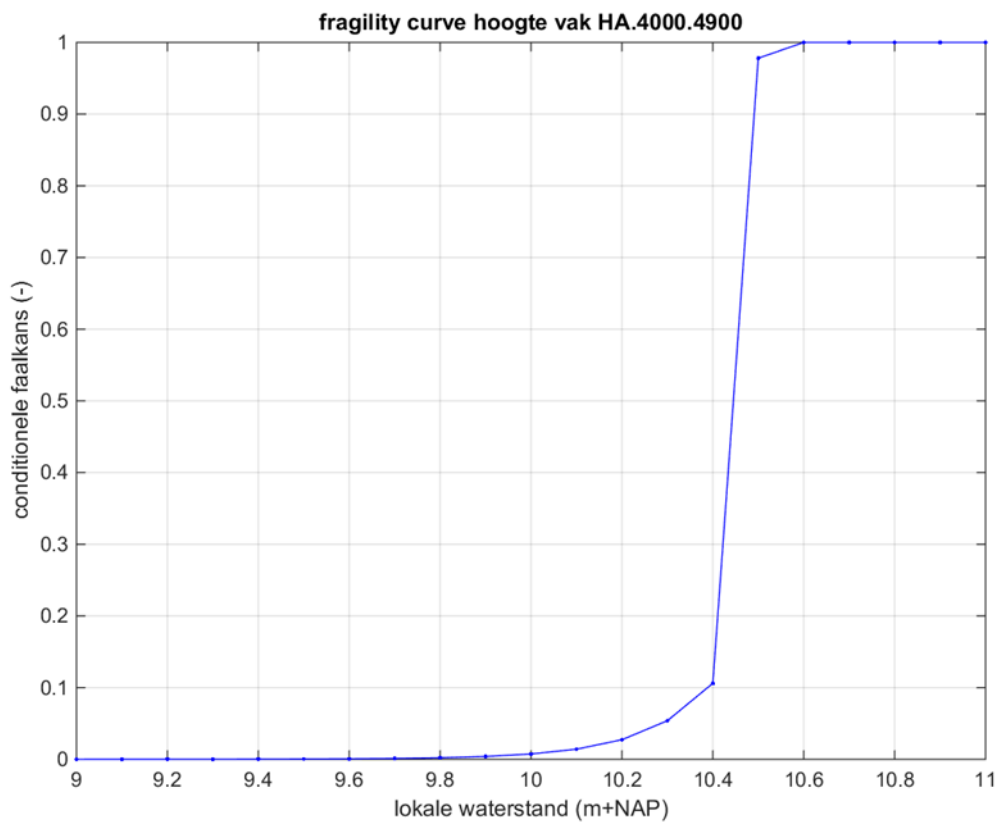
Figuur 42 Kansdichtheidsfunctie van lokale waterstand voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)



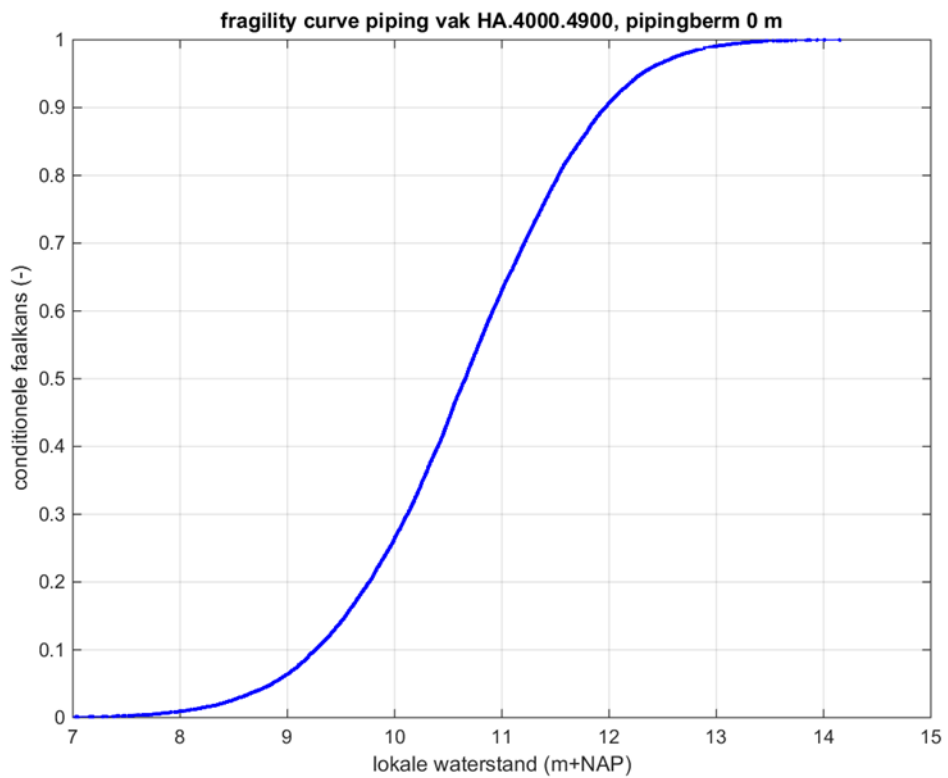
Figuur 43 Kansverdeling van de afvoer bij Lobith (links) en van de lokale waterstand (rechts) voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

Fragility curves

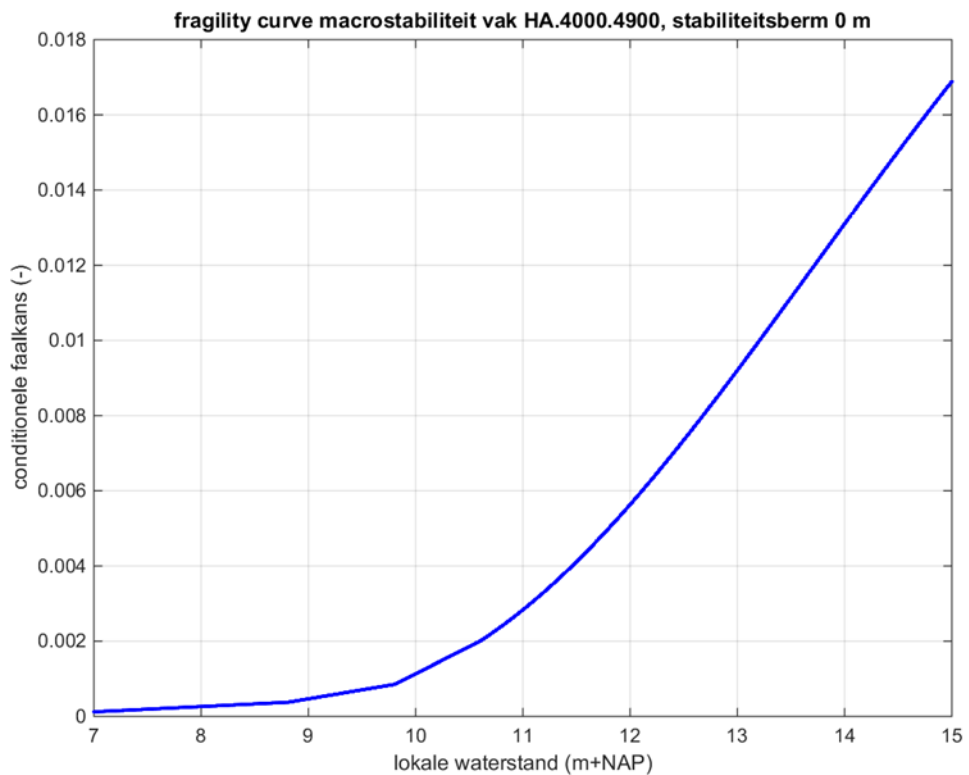
Figuur 44, Figuur 45 en Figuur 46 tonen de fragility curves voor de faalmechanismen overloop/overslag, piping en macrostabiliteit. Figuur 44 laat zien dat de faalkans bij een waterstand van 10,50 m+NAP zeer snel naar 1 gaat. Dit is net iets onder de kruinhoogte van de dijk van 10,56 m+NAP. De fragility curves van piping en macrostabiliteit hebben een veel flauwer verloop. Dit impliceert dat ook de faalkans bij waterstanden 1 á 2 m onder de kruin relevant zijn.



Figuur 44 Fragility curve hoogte voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)



Figuur 45 Fragility curve piping voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

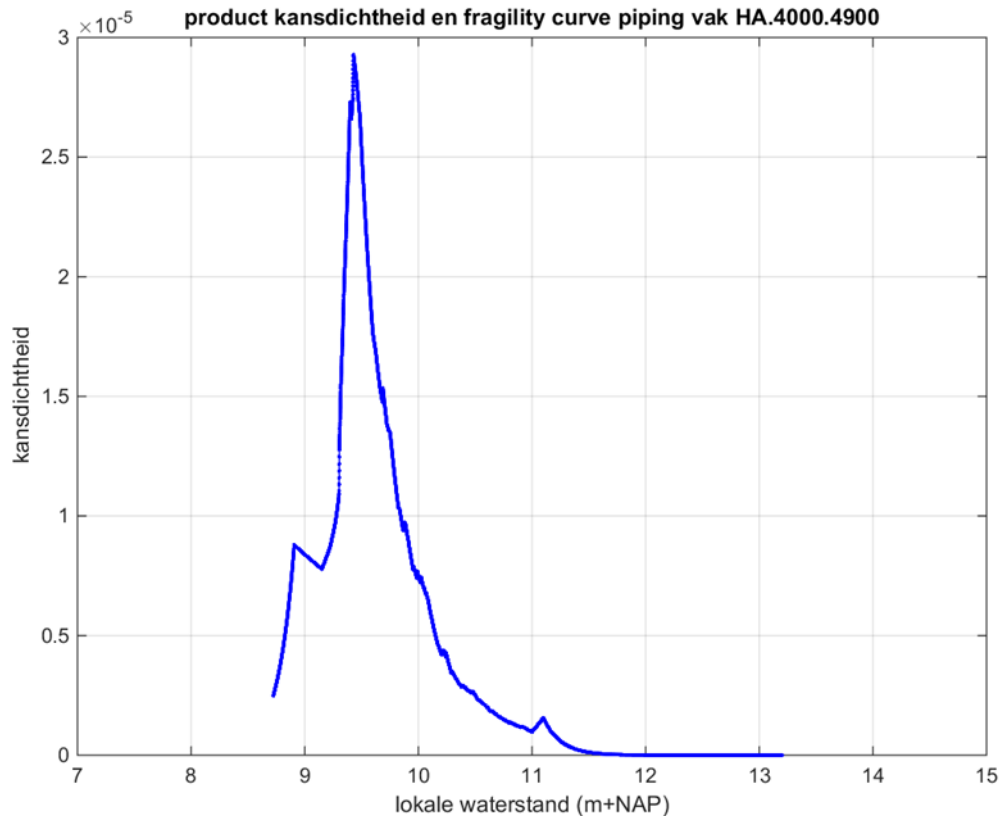


Figuur 46 Fragility curve macrostabiliteit voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)⁷

⁷ De curve buigt niet af naar een faalkans van 1. Dit komt doordat voor waterstanden boven de kruin is geen aandacht besteed aan een goede fit omdat deze kansen niet correct berekend kunnen worden en nauwelijks bijdragen aan de faalkans

Faalkans dijkvak

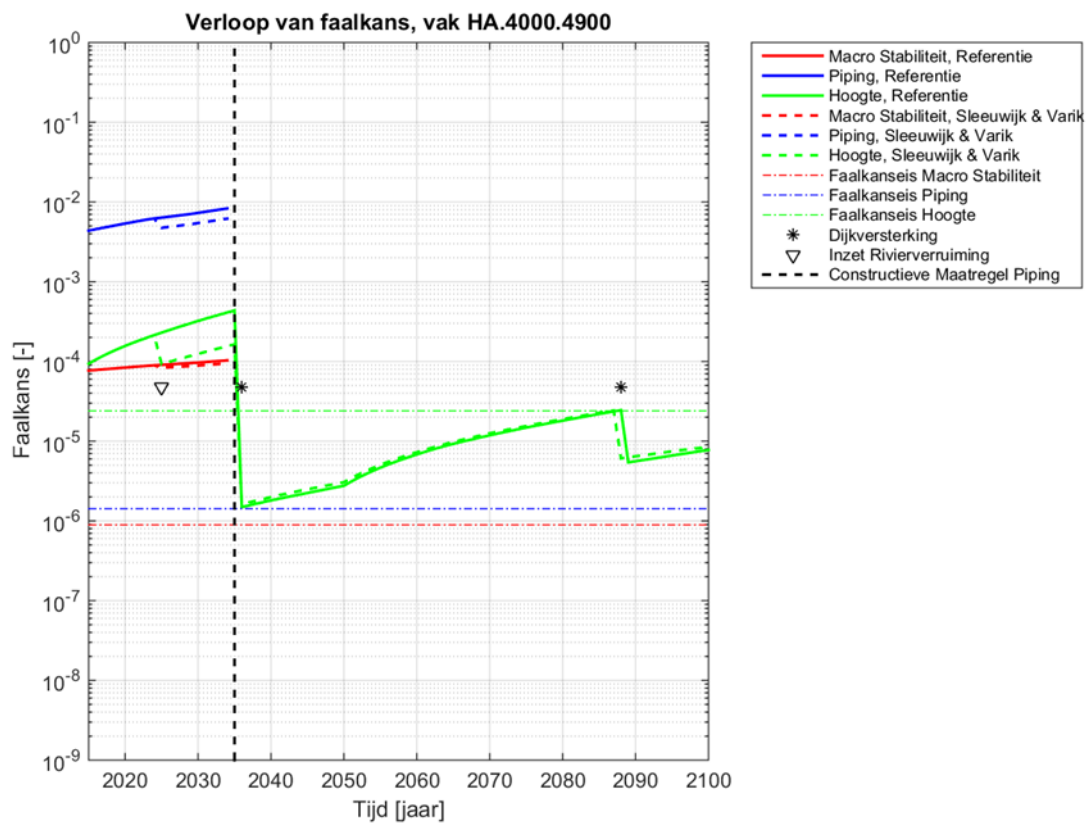
De faalkans per faalmechanisme van het dijkvak wordt gevonden door de fragility curve en de kansdichtheidsfunctie van de waterstand met elkaar te vermenigvuldigen. Figuur 47 geeft het resultaat hiervan voor het faalmechanisme piping voor het jaar 2015. Het oppervlak onder deze grafiek is gelijk aan de faalkans voor piping (de faalkans in deze figuur is gelijk aan $4 \cdot 10^{-3}$).



Figuur 47 De verdeling van de faalkans over de over de waterstand voor het faalmechanisme piping voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

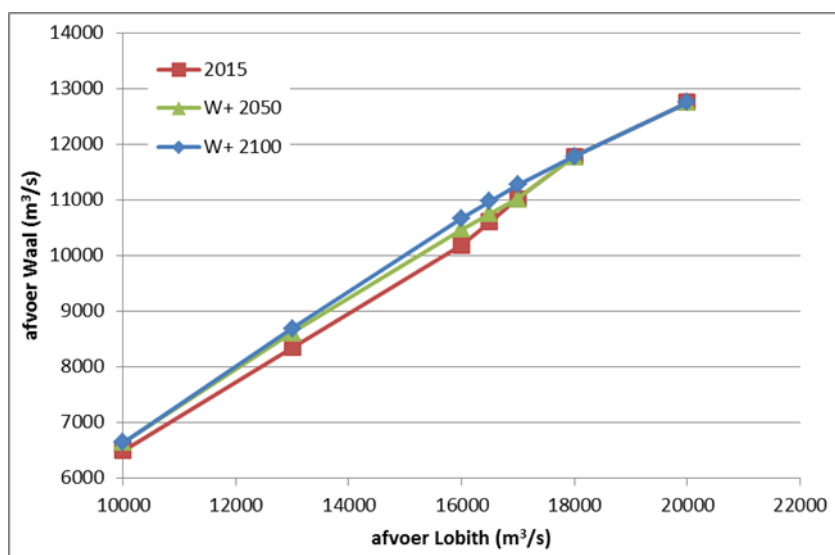
Figuur 48 toont het verloop van de faalkans in de tijd voor alle mechanismen. In de figuur zijn ook de faalkanseisen per faalmechanisme weergegeven. De figuur laat duidelijk het effect zien van rivierversmalling in 2025 (gemarkeerd met een driehoek) en dijkversterking in 2035 en 2085 (gemarkeerd met een ster). Het relatief vlakke verloop van de lijn van macrostabiliteit geeft aan dat de faalkans van dit mechanisme niet sterk samenhangt met de waterstand. De faalkansen van piping en macrostabiliteit worden na de eerste dijkversterking op 0 gezet. Dit komt doordat een constructieve maatregel nodig is om de opgave voor piping op te lossen. De faalkans van macrostabiliteit is op 0 gezet omdat na de eerste versterking bij veel vakken geen correct faalkansverloop werd berekend.

Door deze keuze wordt er op een later moment niet meer versterkt voor de faalmechanismen piping en macrostabiliteit. De keuze om de faalkans op 0 te zetten heeft nauwelijks invloed op de kosten. Omdat de faalkans voor macrostabiliteit nauwelijks toeneemt in de tijd, zal de versterking op macrostabiliteit marginaal zijn bij het tweede versterkingsmoment. Het verschil in kosten tussen versterking en geen versterking is dan klein.



Figuur 48 Faalkansverloop in de tijd voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

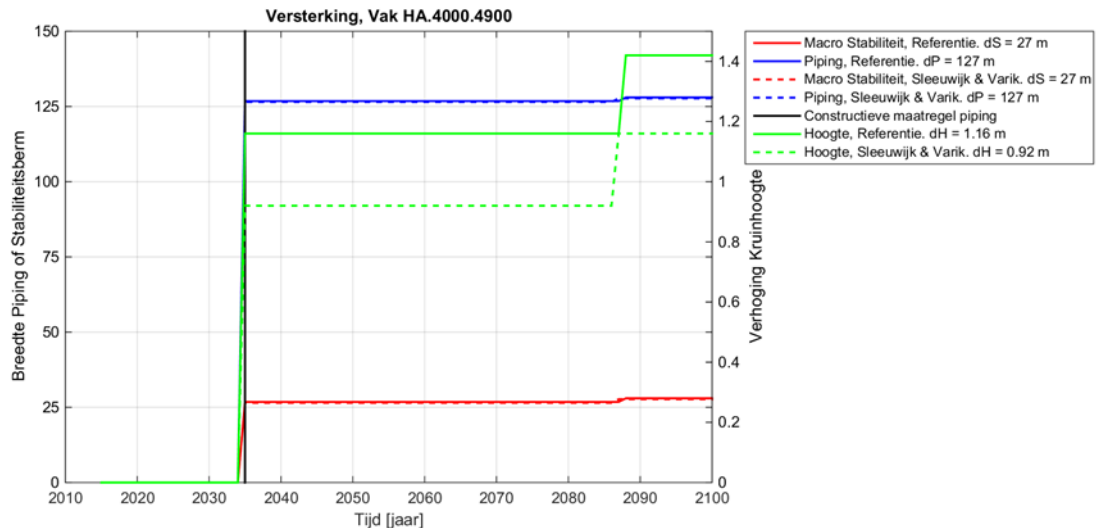
Het faalkansverloop bevat een knik in het jaar 2050. Dit is het geval bij alle dijkvakken en in alle varianten. De afvoer bij Lobith neemt wel lineair toe tussen 2015, 2050 en 2100 (bij 1/10.000), maar in de afvoerwaterstandsrelaties is wel een knik te zien. Dit wordt veroorzaakt door kleine verschillen in de afvoerverdeling op de Pannerden tussen de jaren 2015, 2050 en 2100 (Figuur 50).



Figuur 49 Afvoerverdeling Pannerden in 2015, 2050 en 2100

Dijkversterking

Het dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925) is geen prioritair HWBP vak is. Dit betekent dat de dijkversterking vanaf 2035 wordt uitgevoerd. In 2035 is het vak afgekeurd op alle faalmechanismen. Het dijkvak wordt daarom in 2035 versterkt voor een ontwerplevensduur van 50 jaar. In 2085 wordt het dijkvak weer versterkt. Figuur 50 geeft de dijkversterkingen in de tijd weer.



Figuur 50 Dijkversterkingen in de tijd voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

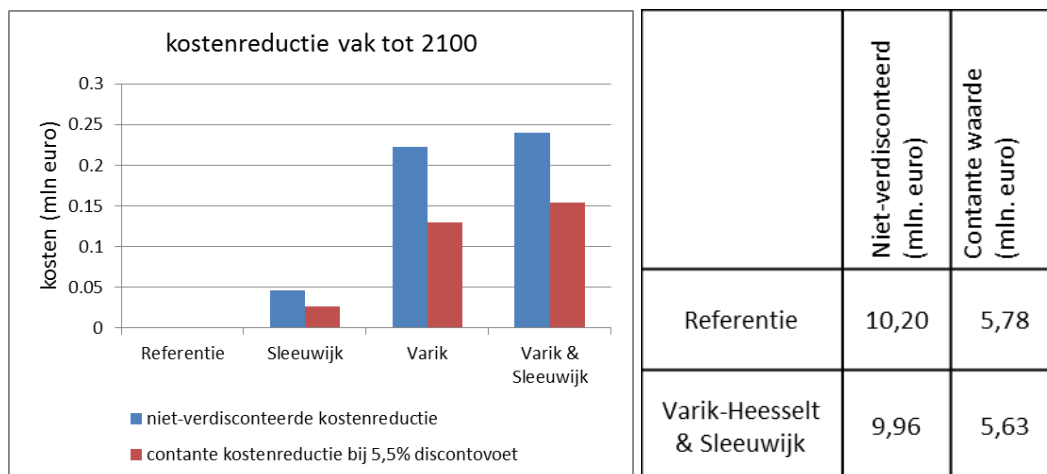
De kruinverhoging als gevolg van deze twee versterkingen is gelijk aan 1,15 m. De piping-opgave is zo groot dat er een pipingberm van 125 m nodig is. Conform de uitgangspunten is bij een pipingberm groter dan 100 een constructieve maatregel toegepast. De benodigde stabiliteitsberm heeft een breedte van 26 m. De inzet van een rivierverruimende maatregel zorgt er niet voor dat de versterking in 2035 wordt uitgesteld, maar dat de benodigde kruinverhoging 0,25 m lager wordt (zie doorgetrokken en gestippelde groene lijn in Figuur 50).

In 2085 is slechts een kleine versterking nodig voor piping en macrostabiliteit en is er vooral sprake van een hoogteopgave door klimaatverandering en bodemdaling.

Dijkversterkingskosten

Figuur 50 geeft de dijkversterkingskosten van de vier varianten weer. De figuur laat zien dat de rivierverruiming bij dit vak zorgt voor een kleine kostenreductie doordat een kleinere kruinverhoging nodig is voor het faalmechanisme hoogte. Deze besparing is circa 250.000 euro op een totaalbedrag van 10 mln euro. In contante waarde komt de besparing neer op 150.000 euro op een totaalbedrag van 6 mln euro. Deze kostenreductie wordt grotendeels veroorzaakt door de Bypass Varik-Heesselt.

De kostenreductie is relatief klein. Dit komt doordat de kruinverhoging maar een klein deel van de kosten is. De kruinhoogteopgave is zo groot (bijna 1,2 m voor 2035), dat het waterstandeffect van 40-45 cm van Bypass Varik-Heesselt onvoldoende is om het hele hoogteprobleem op te lossen. De kostenafname voor een 'onsje' minder dijkverhoging is beperkt. Dit kan verklaard worden met de informatie uit Tabel 19. Tabel 19 toont de versterkingskosten voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925) bij verschillende combinaties van versterkingen (verhoging en versterking). De tabel laat zien dat het verschil in dijkversterkingskosten tussen een dijkverhoging van 1 m en 0,5 m (uitgaande van een stabiliteitsberm van 25 m en pipingberm van 100 m) slechts 0,5 mln euro is.



Figuur 51 Versterkingskosten (niet-verdisconteerd en contante waarde) voor vier varianten voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

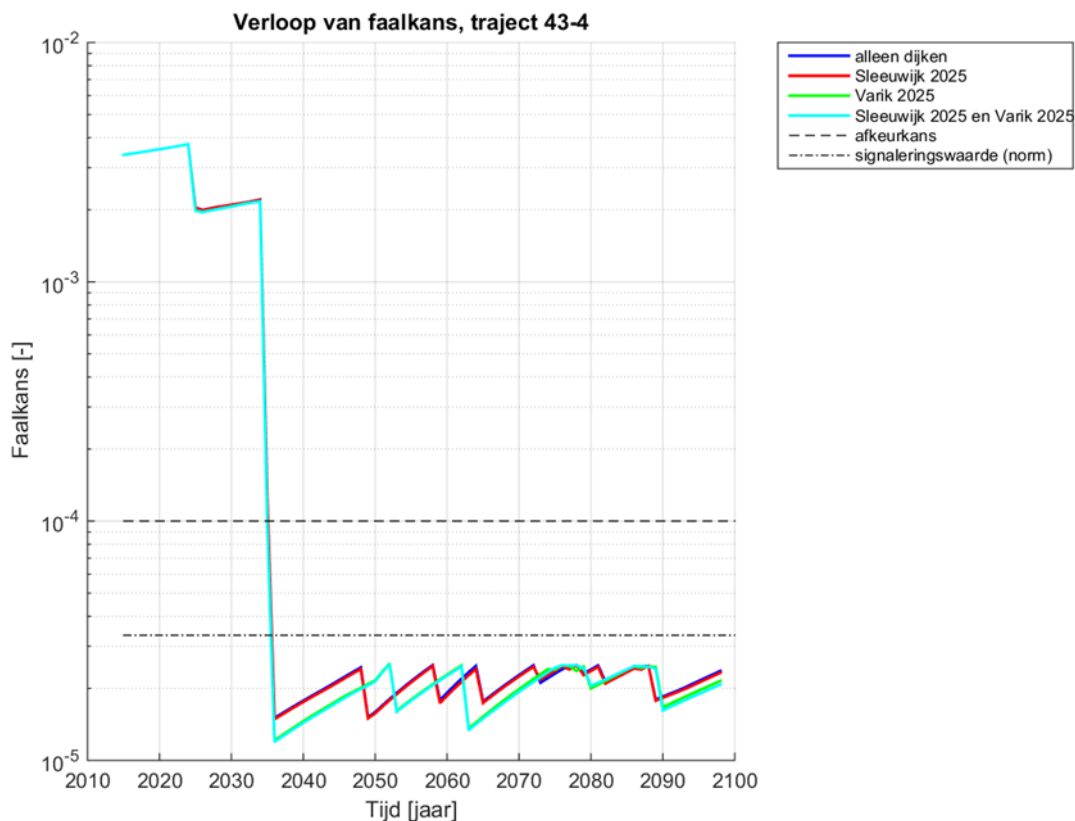
Kruinverhoging [cm]	Toename dijkbasis stabiliteit [cm]	Toename dijkbasis Piping [cm]	Totaalkosten [mln euro]
0	25	100	8.2
0.01	25	100	8.6
0.25	25	100	8.8
0.5	25	100	9.1
1	25	100	9.6
1.5	25	100	10.2
2	25	100	10.7

Tabel 19 Versterkingskosten voor verschillende combinaties van versterkingen (dijkverhoging en dijkversterking) voor dijkvak HA.4000.4900 bij Heerewaarden (km 925)

Faalkansverloop in een traject

Het faalkansverloop in een traject kan berekend worden op basis van de faalkansen per dijkvak. In paragraaf 2.2.4 is beschreven hoe de faalkansen per dijktraject kan worden berekend. Als een dijktraject veel vakken bevat die op verschillende momenten versterkt worden, heeft de faalkansen van een dijktraject een grillig verloop. Dit is bijvoorbeeld het geval voor het faalkansverloop van traject 43-4 (zie Figuur 52).

In het faalkansverloop van dit traject is het effect van Bypass Varik-Heesselt ook duidelijk te zien. De figuur laat een uitstel van dijkversterkingen van enkele jaren in de tijd zien wanneer Bypass Varik-Heesselt wordt ingezet. De versterking van dijkvak 43.DD076-DD081 wordt bijvoorbeeld uitgesteld van 2048 naar 2052. In Paragraaf 4.2.2 is toegelicht dat rivierverruiming alleen tot een uitstel van dijkversterking voor een dijkvak leidt als alleen het faalmechanisme hoogte is beschouwd. In vrijwel alle andere gevallen, voldoen de dijkvakken niet aan de eisen van één of meer van de drie faalmechanismen, waardoor de dijk bij de eerste dijkversterkingsronde direct versterkt moet worden. Nevengeul Sleeuwijk heeft op dit traject geen invloed op het trajectfaalkansverloop, omdat dit traject ver bovenstrooms van deze rivierverruiming ligt.



Figuur 52 Faalkansverloop in traject 43-4 (Doornenburg–Herveld)

Het faalkansverloop in Figuur 52 geeft aan dat de faalkans van dijktraject 43-4 na de eerste dijkversterkingsronde altijd ruim onder de afkeurkans ($1 \cdot 10^{-4}$), en zelfs onder de middenkans ($3 \cdot 10^{-5}$) blijft. Dit komt doordat uitgangspunt in de methodiek is dat elk dijkvak aan de faalkanseis per faalmechanisme voor dat vak moet voldoen. Het grote aantal kleinere zaagtandjes in de figuur ontstaat doordat dijkvakken binnen het traject op een verschillend moment in de tijd worden versterkt.

De figuur laat zien dat het niet nodig is dat elk dijkvak aan de faalkanseis per faalmechanisme voldoet. Dit betekent dat de versterkingsopgave en daarmee de kosten voor dijkversterking uit kunnen vallen wanneer niet per vak wordt ontworpen, maar per traject. Dat vergt echter maatwerk en is binnen deze studie niet haalbaar.

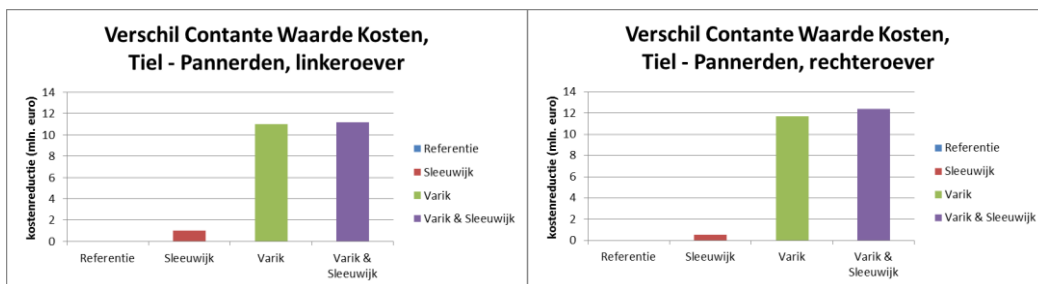
Kostenreductie op verschillende trajecten

De kostenreductie door de inzet van de rivierverruimende maatregelen is uitgesplitst naar drie trajecten:

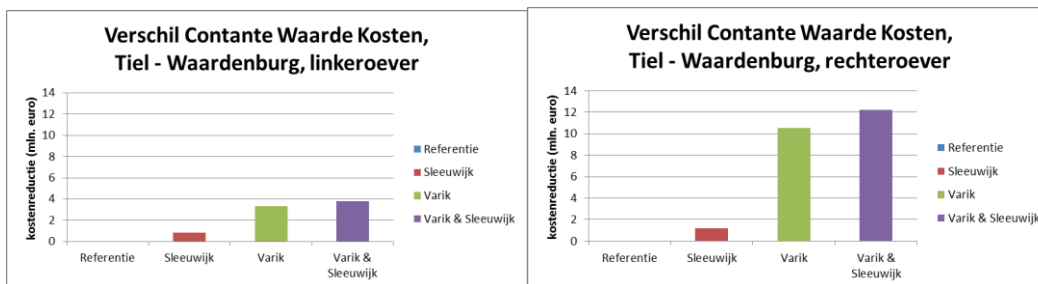
- Pannerden -Tiel
- Tiel-Waardenburg
- Waardenburg-Gorinchem

Daarbij is onderscheid gemaakt in de kostenreductie van de dijkversterkingen op de linker en rechteroever.

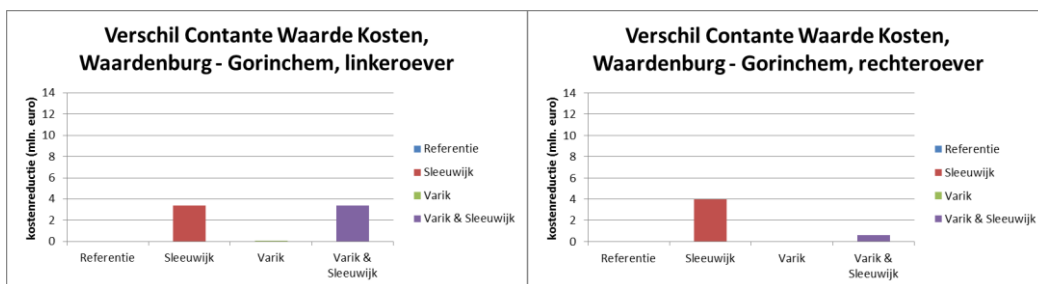
In Figuur 53 tot en met Figuur 55 is de contante waarde van de kostenreductie per variant weergegeven in staafdiagrammen. Tabel 20 geeft een volledig overzicht van de totale verdisconteerde en niet-verdisconteerde dijkversterkingskosten. Tabel 21 geeft de verdisconteerde en niet-verdisconteerde kostenreductie van de dijkversterkingskosten.



Figuur 53 Kostenreductie (contante waarde) op traject Pannerden-Tiel voor de vier varianten



Figuur 54 Kostenreductie (contante waarde) op traject Tiel-Waardenburg voor de vier varianten



Figuur 55 Kostenreductie (contante waarde) op traject Waardenburg -Gorinchem voor de vier varianten

Nevengeul Sleeuwijk levert een afname van de contante waarde van dijkversterkingskosten van 11 mln euro. De kostenreductie wordt grotendeels gerealiseerd in het traject Gorinchem-Waardenburg. De kostenreductie wordt gerealiseerd op de linker- en rechteroever en is ongeveer even groot voor de dijkversterkingen langs beide oevers.

Bypass Varik-Heesselt zorgt een afname van de contante waarde van de dijkversterkingskosten van 36 mln euro. De figuren laten zien dat Bypass Varik-Heesselt zorgt voor een kostenafname op het traject Waardenburg-Tiel en Tiel-Pannerden. De kostenafname is bijna een factor 2 groter op het Tiel-Pannerden dan op het traject Waardenburg-Tiel. De kostenafname is op het traject Waardenburg-Tiel een factor 3 groter op de rechter oever dan op de linker oever.

De kostenafnamen worden vooral gerealiseerd op dijkvakken waar alleen faalmechanisme hoogte is en de dijkversterkingen uitgesteld kunnen worden (Figuur 27) of de dijkverhoging door rivierverruiming minder groot hoeft te zijn (zie voorbeeld in Figuur 50).

Traject	Niet-verdisconteerde kosten [mln euro]				Contante waarde kosten [mln euro]			
	Referentie	Sleuwig	Varik	Varik & Sleuwig	Referentie	Sleuwig	Varik	Varik & Sleuwig
Waardenburg - Gorinchem, rechteroever	740	730	740	730	550	550	550	550
Waardenburg - Gorinchem, linkeroever	720	710	720	710	410	400	410	400
Tiel - Waardenburg, rechteroever	310	300	290	290	260	260	250	240
Tiel - Waardenburg, linkeroever	410	410	410	410	230	230	230	230
Tiel - Pannerden, rechteroever	400	400	380	380	300	300	290	290
Tiel - Pannerden, linkeroever	670	670	650	650	360	360	350	350
3 ^e ronde afgekeurd	570	570	560	560	380	370	370	360
in 2015 in analyse afgekeurd	2560	2550	2530	2520	1690	1680	1670	1660
later in analyse afgekeurd	110	110	100	100	40	40	40	40
Totaal Pannerden-Gorinchem	3250	3220	3190	3170	2110	2100	2080	2060

Tabel 20 Versterkingskosten voor verschillende varianten (afgerond op tientallen)

Traject	niet-verdisconteerde kosten (miljoen euro)				contante waarde kosten (miljoen euro)			
	Referentie	Sleuwig	Varik	Varik & Sleuwig	Referentie	Sleuwig	Varik	Varik & Sleuwig
Waardenburg - Gorinchem, rechteroever	0	5.4	-0.1	5.4	0	4	0	0.6
Waardenburg - Gorinchem, linkeroever	0	6.2	0.3	6.4	0	3.4	0	3.4
Tiel - Waardenburg, rechteroever	0	0.4	10.9	13.2	0	1.2	10.5	12.2
Tiel - Waardenburg, linkeroever	0	1.8	5.5	6.4	0	0.8	3.3	3.8
Tiel - Pannerden, rechteroever	0	1.7	20	22	0	0.6	11.7	12.4
Tiel - Pannerden, linkeroever	0	-0.3	15.6	15.8	0	1	11	11.2
3 ^e ronde afgekeurd	0	2.3	12.7	16.1	0	1.7	10.3	12.3
in 2015 in analyse afgekeurd	0	12.4	30.2	42.4	0	7.9	20.3	28.1
later in analyse afgekeurd	0	0.6	9.2	10.7	0	1.3	5.9	6.6
Totaal Pannerden-Gorinchem	0	15.2	52.2	69.2	0	11	36.5	43.6

Tabel 21 Reductie in versterkingskosten voor verschillende varianten