

Overstromingsrisico regionale keringen



(bron: Dijkdoobraak Wilnis, Koen Suyk 2003)

Management samenvatting

Auteurs Ir. K.T. Lendering
Prof. Dr. Ir. M. Kok
Prof. Dr. Ir. S.N. Jonkman

Datum 24 June 2015

Voor meer informatie wordt verwezen naar het technisch rapport (email: k.t.lendering@tudelft.nl).

1. Inleiding

Nederland bestaat voor een groot gedeelte uit polders omringd door dijken. Deze dijken bieden bescherming tegen het buitenwater: de rivieren of de zee. Overtollig water in polders wordt afgevoerd via een uitgebreid waterbergings- en drainagesysteem. Dit systeem bestaat uit een groot aantal poldersloten, van waaruit water via de poldergemalen op de boezems gepompt wordt. Boezems bestaan uit een systeem van aaneengesloten kanalen waar het overtollig water uit de omringende polders tijdelijk wordt opgeslagen voor het via de boezemgemalen naar het buitenwater gepompt wordt, zie Figuur 1. Deze boezems worden omsloten door regionale keringen; ook wel boezemkaden genoemd. Wanneer een regionale kering faalt, ontstaat er een overstroming, waarbij het water uit de boezem de polders overstroomt.



Figuur 1: Links: typische Nederlands boezem (Rijkswaterstaat), rechts: schematische weergave van een polder, boezem en het buitenwater

Project 'Veiligheid Nederland in Kaart' heeft in de laatste jaren het overstromingsrisico van de dijkringen in Nederland in kaart gebracht. Hiervoor is de overstromingsbenadering ontwikkeld, waarbij via probabilistische rekentechnieken de faalkansen van een dijkkring berekend worden (Jongejan, Maaskant, & Horst, 2013; Jongejan & Maaskant, 2013; VNK, 2005). Deze faalkansen worden gecombineerd met schattingen van de verwachte schade bij een overstroming om zo het risico van overstroom van de dijkkring te bepalen. De resultaten van project VNK hebben de basis gevormd voor het ontwikkelen van nieuwe veiligheidsnormen ten aanzien van overstromingen door doorbraken van de primaire keringen in Nederland. Deze aanpak is nog niet toegepast op een systeem van regionale keringen.

1.1 Doel

Het doel van dit onderzoek is om te onderzoeken of de overstromingsrisico aanpak gebruikt kan worden om het overstromingsrisico van een systeem van regionale keringen te bepalen. Bestaande, 'state of the art', methodes vormen de basis voor de analyse.

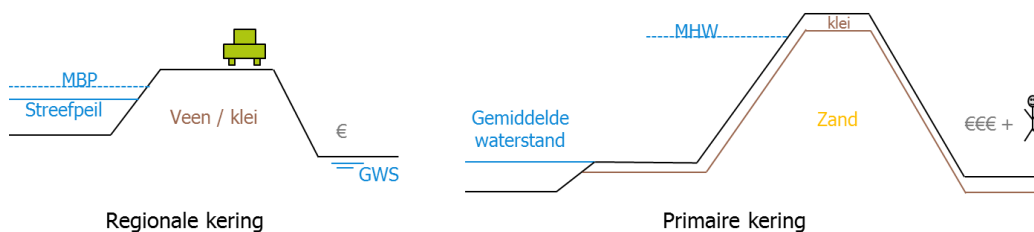
In de voorgestelde aanpak wordt gebruik gemaakt van gegevens van de toetsing van regionale keringen. De methodologie kan een basis vormen voor een grondigere beoordeling van de regionale keringen, waarbij niet enkel op basis van de toetsing, maar ook met schattingen van het risico, besluiten genomen kunnen worden over bijvoorbeeld

versterkingsmaatregelen. Tevens wordt beoogd om te demonstreren hoe kosten-baten analyses gebruikt kunnen worden om interventies in het systeem te beoordelen en prioriteren op basis van kosteneffectiviteit.

1.2 Vergelijking regionale en primaire keringen

In de leidraad toetsing regionale keringen wordt onderscheid gemaakt tussen vier typen regionale keringen, te weten (Stowa, 2007):

1. Boezemkaden;
2. Keringen langs regionale rivieren;
3. Compartimenteringsdijken, secundaire dijken ofwel 'slaperdijken';
4. Zomerkaden.



Figuur 2: Vergelijking van regionale keringen (links) met primaire keringen (rechts)

Dit onderzoek richt zich op 'Boezemkaden'. Deze regionale keringen keren over het algemeen lagere waterstanden dan primaire keringen (ten opzichte van maaiveld). De doorsnede bestaat vaak uit veen en/of klei, terwijl dat van een primaire kering vaak bestaat uit een kern van zand omsloten door een laag van klei. Verkeersbelastingen spelen een belangrijke rol bij regionale keringen.

Het beschermde gebied achter een systeem van regionale keringen is doorgaans kleiner dan het gebied wat beschermd wordt door een systeem van primaire keringen. Het volume water dat een polder kan overstromen vanuit de boezem is minder dan het volume buitenwater dat een dijkkring kan overstromen. Om deze redenen wordt aangenomen dat de schade door overstromingen vanuit een boezem kleiner is dan vanuit het primaire systeem. Tevens wordt veelal aangenomen dat er geen slachtoffers kunnen vallen; vanwege het kleine volume water wat de polder kan overstromen zal de overstromingsdiepte ook beperkt blijven. Deze aannames worden ondersteund door de huidige normering van regionale keringen, die minder streng zijn dan de normering van de primaire keringen, zie Figuur 3.



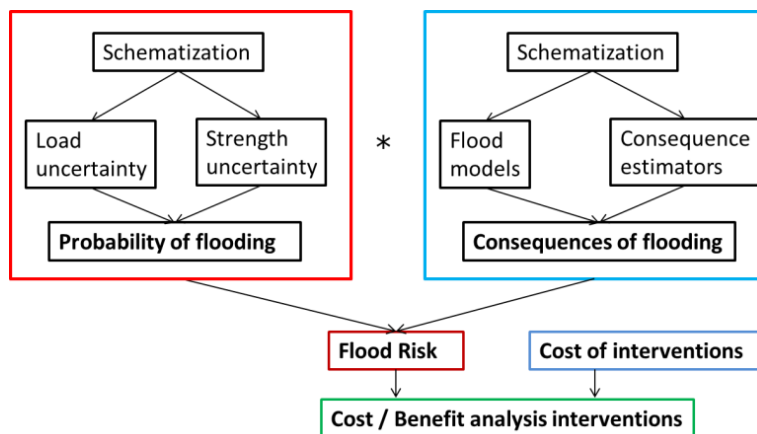
Figuur 3: Normering t.a.v. overstroom in Nederland (Flood defences 2014)

De toetsing van regionale keringen wordt op eenzelfde wijze als de toetsing van primaire keringen gedaan. Een belangrijk verschil is de manier waarop hydraulische randvoorwaarden bepaald worden. Voor de primaire keringen worden deze door Rijkswaterstaat bepaald voor

het hele buitenwatersysteem. Voor de regionale keringen is er geen nationale verantwoordelijkheid, vanwege de grote regionale verschillen tussen de systemen (boezems). Voor elk systeem moeten de hydraulische randvoorwaarden afzonderlijk bepaald worden, meestal door elk waterschap.

2. Risico analyse

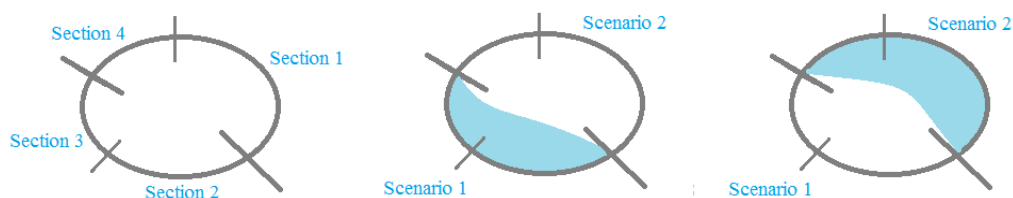
Het risico van overstromen wordt bepaald door de jaarlijks te verwachten schade door een overstroming. Dit wordt benaderd door de vermenigvuldiging van de kans op een overstroming met de bijbehorende gevolgen van deze overstroming. Bij regionale keringen ligt de grootste kennisvraag in de bepaling van de kansen, aangezien verschillende 'state of the art' tools beschikbaar zijn om de gevolgen van een overstroming te bepalen.



Figuur 4: Components of a flood risk assessment

2.1 Kans op overstromen

Om de kans op een doorbraak van een regionale kering te bepalen wordt het systeem geschematiseerd in verschillende vakken met soortgelijke sterkte eigenschappen, hiervoor wordt de schematisatie van de toetsing overgenomen. Voor elk vak wordt de kans op een doorbraak berekend. Vervolgens worden overstroming scenario's (in VNK: ringdelen) bepaald bestaande uit een groep dijkvakken waarbinnen een doorbraak leidt tot eenzelfde overstroming, onafhankelijk van de locatie van de bres binnen deze groep (Figuur 5).



Figuur 5: Een systeem met vier vakken (links) en twee overstroming scenario's (midden en rechts)

De faalkans van één vak wordt bepaald met probabilistische rekenmethoden, voorbeelden hiervan worden behandeld in (Bischiniotis, 2014; Jongejan et al., 2013; Meer, 2009). De statistische eigenschappen van de sterkte parameters worden verondersteld volledig

gecorrleerd te zijn over de lengte van één vak. Hiermee kan aangenomen worden dat de faalkans van één doorsnede representatief is voor de faalkans van het hele vak en daarmee van het overstroming scenario. Bij een verdeling over meerdere vakken worden deze gemodelleerd als een serie systeem; de bovengrens van de faalkans bestaat uit de sommatie van de afzonderlijke faalkansen, representatief voor een onafhankelijke relatie tussen de vakken. De ondergrens is het maximum van de afzonderlijke faalkansen, representatief voor een afhankelijke relatie tussen de vakken, zie formule 1.

$$\text{MAX}_{i=1}^N P_{f_i} \leq P_f \leq \sum_{i=1}^N P_{f_i} \quad (1)$$

De kans op een overstroming van het hele systeem wordt gevonden door de afzonderlijke scenariokansen te combineren. Hierbij dient men rekening te houden met het optreden van ontlasting in het systeem, zie (Jongejan et al., 2013):

- **Ontlasting:** wanneer een bres in de kering leidt tot een reductie van de waterstanden in de boezem, en daarmee op de overige vakken, dient men rekening te houden met ontlasting. Dit kan op twee manieren in rekening gebracht worden: 1) door aan te nemen dat het zwakste vak eerst faalt of 2) door aan te nemen dat het eerst belaste vak eerst faalt;
- **Geen ontlasting:** wanneer een bres in de kering niet leidt tot een reductie van de waterstanden op de boezem hoeft er geen ontlasting in rekening gebracht te worden.

Het optreden van ontlasting is sterk afhankelijk van de verhouding tussen het volume van water in de boezems ten opzichte van het mogelijke bergingsvolume van de overstroomde polder. Als het volume in de polder veel kleiner is dan het volume in de boezem zal er geen ontlasting plaatsvinden: de polder loopt snel vol en de waterstanden op de boezem dalen niet. Hierdoor is er kans op meerdere bressen in het waterkering systeem. Dit zal geen gevolgen hebben voor de schade in de polder die al volgelopen is, maar kan leiden tot bressen bij nabijgelegen polders.

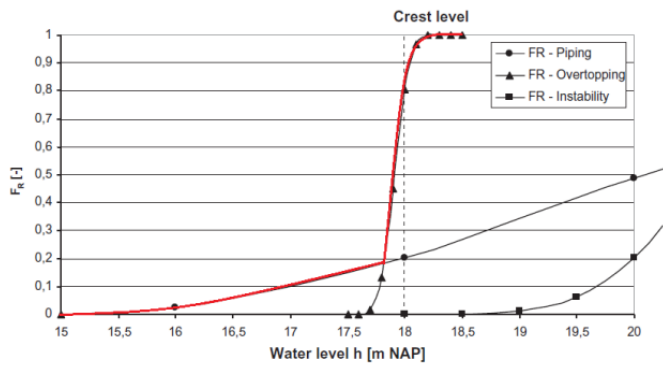
Aan de andere kant, wanneer de boezem geheel leeg kan lopen in de polder is er sprake van een daling van de waterstand in de boezem en daarmee sterke ontlasting. De kans op meerdere bressen in het regionale kering systeem is dan te verwaarlozen en het maximum aantal bressen in een enkel kanaal is één. Een tweede orde effect van een sterke daling van waterstanden in een boezem is het optreden van afschuivingen van het buitentalud van de boezemkaden. Dit kan leiden tot overstromingen in nabijgelegen polders.

Wanneer een polder omringd wordt door meerdere boezems bepalen deze samen de kans op een overstroming in de polder. De wijze waarop de afzonderlijke kansen gecombineerd worden is afhankelijk van de correlatie tussen beide water systemen.

Fragility curves

Fragility curves worden gebruikt om de relatie tussen de belasting en de faalkans van een waterkering te illustreren, deze kunnen voor elk faalmechanisme afzonderlijk geconstrueerd worden. Voor waterkering beheerders is dit belangrijke informatie ter ondersteuning van beheer en besluitvorming over de waterkering, afhankelijk van de optredende belasting en het dominante faalmechanisme, zie Figuur 6.

Overstromingsrisico regionale keringen



Figuur 6: Voorbeeld van een fragility curve voor meerdere faalmechanismen (Meer, 2009)

2.2 Schade bij overstromen

Overstromingen in polders als gevolg van bressen in regionale keringen hebben kleine inundatiedieptes, zoals is aangenomen in hoofdstuk 1. Hierdoor beperkt de schade zich tot economische schade, te verdelen in:

1. **Directe schade:** schade aan materiaal en materieel vanwege direct contact met water. Hierbij valt te denken aan auto's, gebouwen en/of infrastructuur.
2. **Indirecte schade:** schade door verlies van inkomsten vanwege bedrijfsuitval. Zowel bedrijven binnen het overstroomde gebied als daarbuiten kunnen door een overstroming getroffen worden (bv. vanwege langere transport routes).

Er zijn in Nederland twee tools ontwikkeld waarmee de potentiële schade van een overstroming bepaald kunnen worden: de Water Schade Schatter (WSS) en de Schade en Slachtoffer Module (HIS SSM). Beide schatters gebruiken overstromingssimulaties van SOBEK 2D, maar gebruiken een verschillend grid en andere formules:

HIS SSM is gebruikt in 'Veiligheid Nederland in Kaart' om de schade in dijkringen als gevolg van bressen in het primaire waterkering systeem te bepalen. Het grid bestaat uit vakken van 25 bij 25 meter. Deze methode is bedoeld om schattingen te maken van de schade van grote overstromingen met dieptes van enkele meters. Zowel de economische schade als het aantal slachtoffers kan hiermee bepaald worden. Een nadeel van de methode is de onnauwkeurigheid bij kleine overstromingsdieptes (orde decimeters).

De '**Water Schade Schatter**' is ontwikkeld om de schade door kleine overstromingen door regenval te bepalen. Het grid bestaat uit vakken van 0.5 bij 0.5 meter. Deze methode is beperkt tot overstromingen met een diepte van maximaal 0.3 meter. Voor dieptes boven de 0.3 meter worden, vooral voor gebouwen, onderschattingen gemaakt van de schade van de overstroming. Voor de overige typen landgebruik, bv. infrastructuur en landbouw, is aangenomen dat de schade bij 0.3 meter maximaal is. Er wordt daarom aanbevolen de schadefuncties voor gebouwen te corrigeren om de schade van grotere dieptes te kunnen bepalen.

Beide methoden worden in de overstromingsbenadering voor regionale keringen gebruikt om de schade te bepalen. Een korte vergelijking op basis van simulaties met SOBEK 2D laat zien dat er een verschil tot 20% kan optreden tussen beide schatters. Er is echter niet eenduidig aan te geven welke methode een over- of onderschatting geeft.

3. Belastingen op regionale keringen

De dominante belastingen op regionale keringen bestaan uit de hydraulische belasting en de boven belasting:

- 1) Hydraulische belasting: de waterstand in het kanaal en de grondwaterstand;
- 2) Boven belasting: de verkeersbelasting op de kering.

Golven op de boezem worden verwaarloosd, vanwege de lage golfhoogtes. In dit onderzoek is een case studie gekozen waar droogte en aardbevingen geen rol spelen. Deze belastingen kunnen echter niet zonder meer worden verwaarloosd, dit is afhankelijk van de locatie.

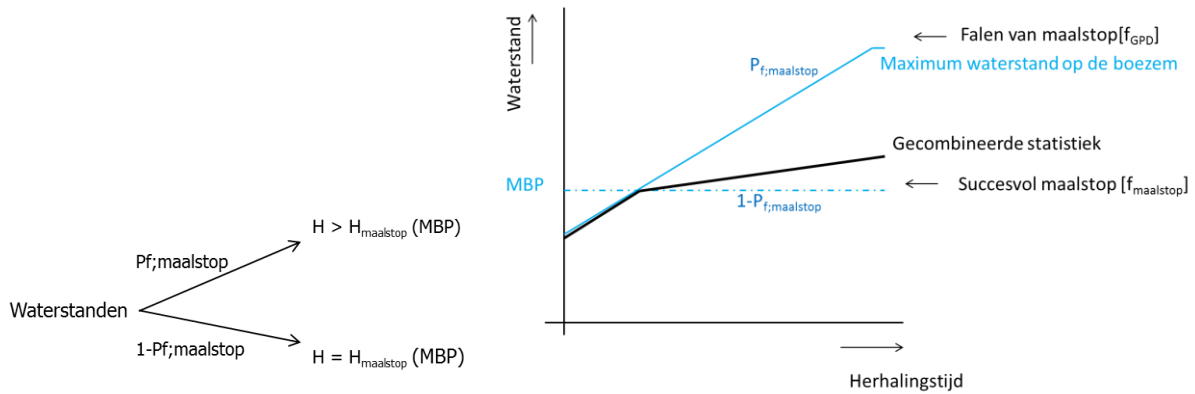
3.1 Hydraulische belastingen

De waterstanden op de boezem worden beheerd door het verantwoordelijke waterschap. Waterstanden in de boezem worden bepaald door de instroom van water vanuit de polder en de uitstroom naar het buitenwater; de bijdrage van regenval op de boezem, grondwaterstroming en wind set-up worden hier verwaarloosd. Per geval dient bepaald te worden of hier geen onderschatting van de waterstanden mee gemaakt wordt, als gevolg van bijvoorbeeld een grote invloed van de wind set-up langs een meer. De retentiecapaciteit op de boezem wordt bepaald door het verschil tussen het dagelijks streefpeil (SP) en het maalstoppeil (MBP); tijdens zware regenval is dit de maximale retentiecapaciteit voor water dat vanuit de polders op de boezem gepompt wordt. Wanneer het maalstoppeil bereikt is wordt er een maalstop afgekondigd; dit houdt in dat er geen water vanuit de polders op de boezem gepompt mag worden. De frequentie waarmee de maalstop afgekondigd mag worden is 1/100 per jaar. Wanneer het MBP bereikt is moeten de poldergemalen uit gezet worden, aangezien hogere waterstanden niet toegelaten zijn. Situaties kunnen zich voordoen waar dit niet gebeurt, bijvoorbeeld door overmacht of wanneer bewust besloten wordt door te blijven pompen. Laatstgenoemde gebeurtenis wordt in het vervolg 'falen van de maalstop' genoemd.

Om deze gebeurtenis mee te nemen in de risicoanalyse wordt er een gecombineerde waterstand statistiek afgeleid, welke gebaseerd is op gemeten waterstanden op de boezem. Er wordt een 'Generalized Pareto Distribution' afgeleid uit gemeten piekwaterstanden. Deze verdeling wordt aangepast, om rekening te houden met het beheer van de waterstanden op de boezem, hiertoe wordt onderscheid gemaakt tussen twee gebeurtenissen:

- Niet falen van maalstop: waterstanden blijven onder het maalstoppeil;
- Falen van de maalstop: waterstanden overschrijden het maalstoppeil.

Overstromingsrisico regionale keringen



Figuur 7: Gebeurtenisboom voor waterstanden op de boezem (links) en resulterende waterstand statistiek (rechts)

Wanneer de maalstop succesvol is stijgen de waterstanden tot maximaal het maalstoppeil. Dit is geïllustreerd met de gestreepte blauwe lijn van de rechter grafiek van Figuur 7, de distributie is afgeknot op dit niveau. Echter, wanneer de maalstop faalt wordt het maalstoppeil overschreden. Dit is geïllustreerd met de doorgetrokken blauwe lijn uit Figuur 7, welke afgeleid is van de gemeten waterstanden op de boezem. De waterstanden blijven stijgen tot een bepaald maximum, gelijk aan de maximaal kerende hoogte van de regionale keringen welke de boezem omsluiten.

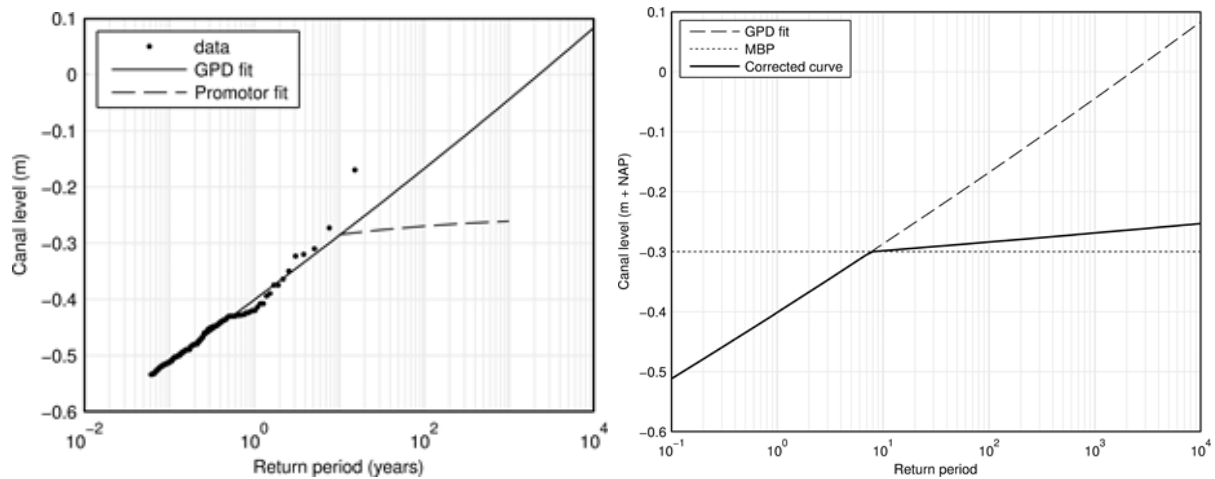
De faalkans van de maalstop [$P_{f, \text{maalstop}}$] wordt benaderd door de frequentie van gemeten waterstanden boven het maalstoppeil. Hiermee wordt een gecombineerde overschrijdingslijn ($f_{h, \text{regulated}}$) afgeleid voor de waterstanden op de boezem, met formule 2.

$$f_{h, \text{regulated}} = P_{f, \text{maalstop}} \cdot f_{GPD} + (1 - P_{f, \text{maalstop}}) \cdot f_{\text{maalstop}} \quad (2)$$

Maatgevende waterstanden

In (Kramer & van Veen, 2013) is een vergelijking gemaakt van verschillende methoden waarmee maatgevende waterstanden op de boezem bepaald worden. Één van deze methoden is 'Promotor'; een probabilistische rekenmethode ontwikkeld door HKV (Kramer & van Veen, 2013). In Promotor worden de waterstanden bepaald afhankelijk van de hoeveelheid water in de boezem, de regenval en de wind. Voor de case studie (hoofdstuk 5) worden de overschrijdingslijnen bepaald met de voorgaande methode vergeleken met de overschrijdingslijn die met Promotor bepaald is. Een voorbeeld van beide overschrijdingslijnen wordt gegeven in onderstaande figuur, voor gemaal Wogmeer in de Heerhugowaard. De gecombineerde lijn van de rechter figuur komt redelijk overeen met de lijn die met Promotor bepaald is, te zien in de linker figuur.

Overstromingsrisico regionale keringen



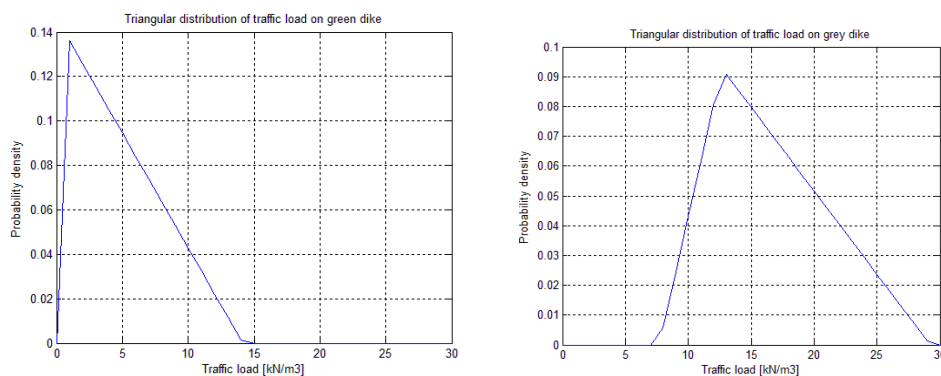
Figuur 8: Wogmeer GPD fit (links) en resulterende overschrijdingslijn na corrigeren voor regulering van de waterstanden

3.2 Verkeersbelastingen

De combinatie van waterstanden en verkeersbelastingen is maatgevend voor de stabiliteit van regionale keringen. Verkeersbelastingen dienen meegenomen te worden als een permanente boven belasting op regionale keringen, volgens de Leidraad Toetsen van Regionale Keringen (Stowa, 2007). Door verkeersbelastingen ontstaan er wateroverspanningen in de kering, waardoor de effectieve korrelspanning daalt.

Ten behoeve van de risicoanalyse zijn statistische verdelingen nodig van de optredende verkeersbelastingen op de keringen. Bij gebrek aan gegevens van optredende verkeersbelastingen op waterkeringen is gebruikt gemaakt van 'expert elicitation' om kansverdelingen te schatten. Verschillende experts (o.a. waterschappers en geotechnisch adviseurs) zijn gevraagd om de 5, 50 en 95 percentielen van de kansverdeling van verkeersbelastingen te schatten. Ook werd gevraagd een inschatting te maken van de correlatie tussen de verkeersbelasting en de waterstanden op de boezem.

De experts waren het allen eens dat er onderscheid gemaakt moet worden tussen 'groene' en 'grijze' keringen, waarbij de verkeersbelasting op 'grijze' keringen hoger is dan op de 'groene' keringen. De resulterende kansverdelingen zijn geïllustreerd in Figuur 9.



Figuur 9: Triangular distributions of traffic loads on green (left) and grey (right) flood defences

De experts waren het eveneens met elkaar eens dat er geen correlatie te verwachten is tussen de verkeersbelastingen en de dagelijkse waterstanden. Echter, over de extreme

waterstanden waren de meningen verdeeld, deze varieerden van een positieve tot een negatieve correlatie tussen deze extreme waterstanden en de optredende verkeersbelasting.

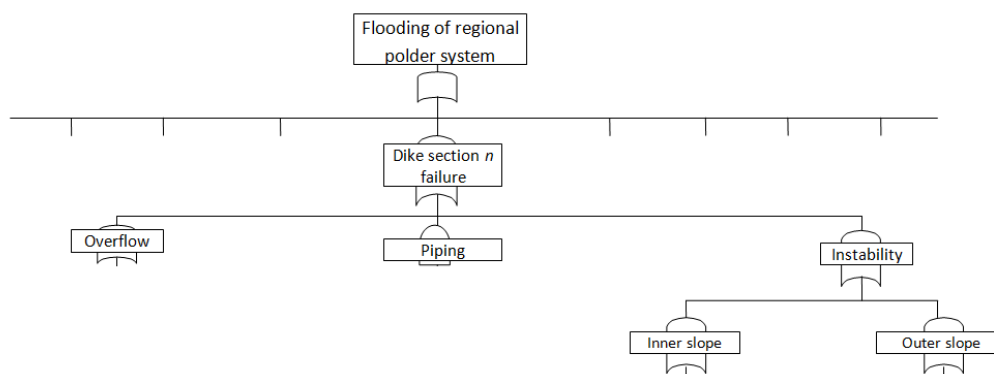
3.3 Combinaties van belastingen

Om faalkansen voor regionale keringen te bepalen is inzicht nodig in de correlaties tussen de belastingen: de waterstand op de boezem, de grondwaterstand in en achter de dijk en de verkeersbelasting. Voor de stabiliteit van boezemkaden is een hoog freatisch vlak, ofwel een hoge grondwaterstand in de dijk, gevaarlijker dan een extreme waterstand (vanwege het geringe verschil tussen streefpeil en de extreme waterstand). Wanneer dit gepaard gaat met een boven belasting kan dit leiden tot instabiliteit van de kering. Met andere woorden, niet zo zeer de combinatie van extreme waterstanden en verkeersbelasting is maatgevend, maar de combinatie van een hoog freatisch vlak met een verkeersbelasting.

De reden voor de keuze om verkeersbelastingen mee te nemen in de toetsing van regionale keringen is de mogelijkheid om zandzakken te plaatsen op een zwakke locatie (lees: locatie met hoogtetekort) in de kering. Echter, verschillende experts geven aan dat er geen verkeer wordt toegelaten op de kering tijdens extreme waterstanden, om falen door instabiliteit te voorkomen. De vraag is dus waarom deze alsnog meegenomen worden in de toetsing. Om de invloed van de verkeersbelastingen op de stabiliteit van de keringen inzichtelijk te maken worden faalkansen bepaald voor situaties met en zonder verkeersbelastingen, ter ondersteuning van een mogelijke discussie over verkeersbelastingen.

4. Sterkte van regionale keringen

In de risicoanalyse wordt de sterkte van de waterkering uitgedrukt in een kans van falen per jaar. Deze wordt uitgerekend voor de dominante faalmechanismen, te weten Overloop, Piping en Instabiliteit (zie Figuur 10).



Figuur 10: Foutenboom voor overstromingen door een systeem van regionale keringen

Overloop ontstaat als de kering onvoldoende kerende hoogte heeft, ofwel, wanneer het water in de boezem over de kering heen loopt. Hierdoor kan het binnentalud eroderen wat kan leiden tot een bres in de kering. Bij het berekenen van de faalkansen voor overflow, wordt rekening gehouden met de aanwezige sterkte van de bekleding van het binnentalud. Dit

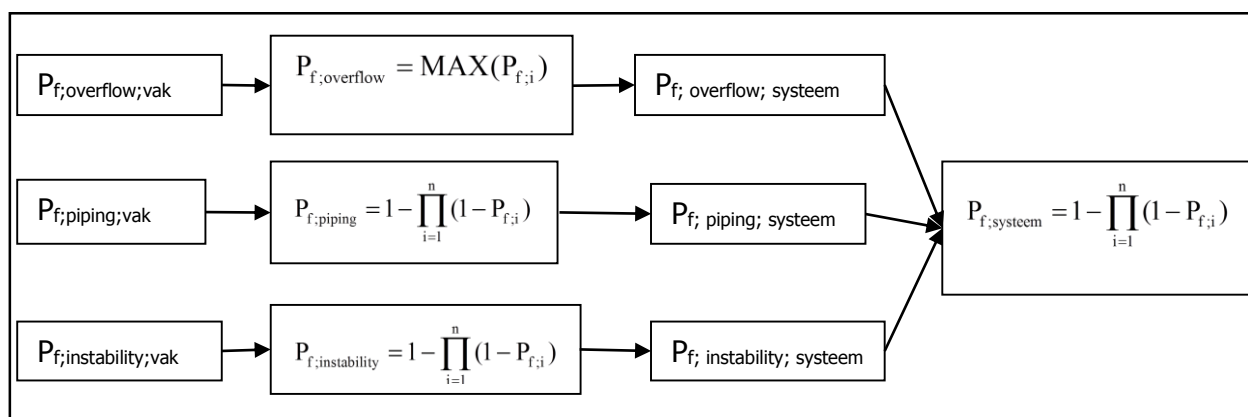
wordt uitgedrukt in een kritisch overslagdebiet en is afhankelijk van de staat van de bekleding van het binnentalud. Wanneer dit debiet overschreden wordt faalt de kering.

Piping ontstaat wanneer, door grondwaterstroming onder de kering, zanddeeltjes uitspoelen die leiden tot een pijp onder de kering waarmee deze ondermijnd wordt. Het verval over de kering is hiervan de drijvende kracht. In de rekenmodellen wordt aangenomen dat dit verval zich uitdrukt in een waterdruk aan de binnenkant van de kering van eenzelfde hoogte als in de boezem. Echter, bij boezemkaden is er door verhoogde intredeweerstand op de bodem van de boezem, minder druk aanwezig achter de kering. Hierdoor verlaagt het aanwezige verval over de kering, en daarmee de kans op piping.

De kans op piping is berekend met de formule van Sellmeijer, waarbij een extra term is toegevoegd om rekening te houden met de aanwezige intrede weerstand. Het in rekening gebrachte verval wordt met deze term verlaagd. De intredeweerstand is gebaseerd op metingen van de grondwaterstroming langs de waterkering van de case studie.

Instabiliteit van het binnentalud ontstaat wanneer grote delen van het binnentalud afschuiven door onvoldoende schuifweerstand van de grond. De faalkans wordt bepaald met D-Geo Stability, volgens de methode van Bishop. Alleen afschuivingen langs een glijvlak door de kruin van de kering worden meegenomen, waarbij wordt aangenomen dat dergelijke glijvlakken leiden tot een bres in de kering. De faalkansen zijn bepaald voor verschillende combinaties van waterstand, freatisch vlak en verkeersbelasting. Een volledige uiteenzetting is te vinden in het rapport, de resultaten staan in het volgende hoofdstuk.

Probabilistische rekentechnieken worden gebruikt om de faalkans van elk mechanisme te bepalen, waarna deze gecombineerd worden om de faalkans van de kering te bepalen. Onderstaande figuur illustreert de te hanteren methode, waarbij is aangenomen dat de faalmechanismen onderling onafhankelijk zijn. Vakken onderling onderhevig aan overflow worden afhankelijk gemodelleerd, aangezien de grootste onzekerheid bij dit mechanisme in de belasting ligt (wanneer een vak overstroomd is het aannemelijk dat het volgende vak ook overstroomt). Onderlinge vakken onderhevig aan piping en instabiliteit worden onafhankelijk gemodelleerd, aangezien de grootste onzekerheid bij dit mechanisme in de sterkte ligt. In het rapport zijn voor elk faalmechanisme fragility curves gemaakt, waarmee de relatie tussen de faalkansen en de optredende belasting geïllustreerd worden.



Figuur 11: Stroomschema van de rekenmethode voor combineren van faalkansen per mechanisme

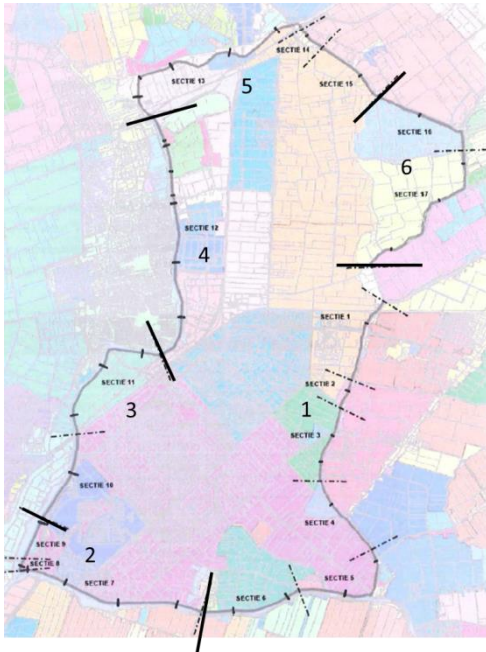
Bewezen sterkte

Het geringe verschil tussen de dagelijkse en extreme waterstanden op de boezem biedt de mogelijkheid om de faalkansen aan te passen met bewezen sterkte. De toepasbaarheid van deze methoden hangt sterk af van de beschikbaarheid van nauwkeurige en betrouwbare gegevens van succesvol gekeerde belastingen uit het verleden (STOWA, 2009). Voor overflow en piping bestaat de belasting enkel uit de waterstanden in de boezem; er wordt namelijk aangenomen dat de sterkte parameters (hoogte, doorlatendheid en korrelgrootte) van de kering door de jaren heen niet of nauwelijks veranderen. Hierdoor is er voor deze mechanismen veel potentie t.a.v. bewezen sterkte. In tegenstelling tot instabiliteit van het binnentalud, waar ook gegevens van de opgetreden grondwaterspiegel ten tijde van de extreme waterstand nodig is. Deze gegevens zijn niet altijd voorhanden voor de opgetreden belastingen.

Er zijn verschillende methoden beschikbaar waarmee bewezen sterkte analyses gemaakt worden. Om de potentie van bewezen sterkte voor piping bij regionale keringen te onderzoeken is een eerste orde benadering gemaakt, welke uitgebreid beschreven wordt door Calle (1999, 2005). Hierbij worden de faalkansen bepaald voor de historische en de toekomstige waterstanden. De correlatie tussen beide waterstanden bepaalt in grote mate de aanpassing van de faalkans en wordt afgeleid uit de FORM resultaten (Schweckendiek, 2014), zie hoofdstuk 5 voor de resultaten.

5. Case study: HNK Heerhugowaard

De behandelde methode uit voorgaande hoofdstukken is toegepast op een case studie bij het Hoogheemraadschap Hollands Noorder Kwartier, in de 'Heerhugowaard' polder. Deze polder is omringd door twee boezems: de Schermerboezem en de VRNK-boezem. In het westen van de polder ligt een grote stadskern: Heerhugowaard. Een overzicht van het gebied is te zien in Figuur 12.



Figuur 12: Schematisatie Heerhugowaard polder

5.1 Schematisatie

In de laatste toetsing, daterend van 2012, zijn de boezemkaden om de Heerhugowaard polder verdeeld in 17 vakken, gebaseerd op de sterkte eigenschappen van de dijken. Er zijn tevens overstroming simulaties gemaakt voor een groot aantal breslocaties in de dijkvakken om de polder, met SOBEK 2D. De resultaten hiervan zijn gebruikt om overstroming scenario's te bepalen, waarbij onderscheid is gemaakt tussen 6 scenario's (zie Figuur 12). Elk scenario bestaat uit een combinatie van een aantal dijkvakken. Voor een eerste inschatting van het risico is er aangenomen dat de faalkans van het zwakste dijkvak volgens de toetsing binnen het scenario representatief is voor de faalkans van dat scenario.

5.2 Belastingen

De waterstand statistiek wordt bepaald met de aanpak die in hoofdstuk 3 is beschreven. De faalkansen van de maalstop worden bepaald aan de hand van het aantal gemeten waterstanden boven het maalstop peil. Dit is bij de locaties langs de VRNK boezem een aantal keer voorgekomen, in tegenstelling tot de Schermer boezem waar dit in de reeks gegevens niet is voorgekomen. Hierbij moet gezegd worden dat de reeks gegevens voor de Schermer boezem beperkt is tot 8 jaar, terwijl voor de VRNK boezem 20 jaar gegevens beschikbaar zijn. Een voorbeeld voor de waterstand statistiek van de VRNK boezem, ter plaatse van het Wogmeer gemaal, is te zien in Figuur 8.

In deze aanpak is geen rekening gehouden met het effect van veranderingen in bestuur en/of beleid van de waterschappen gedurende de reeks gegevens. Door veranderingen kan het maalbeheer constanter worden, waardoor de kans op het falen van de maalstop verlaagd wordt. Verder kan, bij gebrek aan gegevens van waterstanden, de faalkans van de maalstop bepaald worden met een kwantitatieve risicoanalyse; een voorbeeld van een dergelijke aanpak is te zien in (Lendering, Kok, & Jonkman, 2013) waarin de betrouwbaarheid van noodmaatregelen bepaald wordt. Echter, wij zijn uitgegaan van de gegevens die beschikbaar is en verwachten niet dat hiermee grote afwijkingen van de realiteit ontstaan.

5.3 Overstromings kansen

Voor elk vak wordt de faalkans van elk faalmechanisme bepaald, waarna deze gecombineerd worden om de kans op een bres in het betreffende vak te bepalen. De resultaten worden per faalmechanisme in de volgende paragrafen toegelicht.

Overloop: De kans op overstromen van de beschouwde dijkvakken is verwaarloosbaar klein. De kerende hoogte van de waterkeringen is ruim boven de maximale waterstanden. De faalkansen zijn in de orde van 10^{-6} per jaar.

Piping: Zonder rekening te houden met de intredeweerstand van de bodem van de boezem worden hoge faalkansen gevonden voor piping (zie Tabel 1). Echter, voor de toetsing zijn er metingen gedaan van de respons van het grondwater op de waterstand in de boezem. Hiermee zijn schattingen gemaakt van de grootte van de intredeweerstand voor elk vak. De faalkansen rekening houdend met de intredeweerstand staan weergegeven in de onderste rij van Tabel 1.

Piping	Vak 4	Vak 9	Vak 11	Vak 12	Vak 13	Vak 17
Pf zonder intredeweerstand [yr-1]	0.0089	0.1583	0.8529	0.1210	0.0129	0.0199
Pf met intrede weerstand[yr-1]	0.0005	$6.4 \cdot 10^{-5}$	0.0178	0.0019	0.0.0004	0.0004

Tabel 1: Piping faalkansen

Door baggerwerkzaamheden of erosie van de bodem van de boezem kan de intredeweerstand drastisch verlaagd worden, waarmee de kans op piping kan toenemen tot de waardes uit de middelste rij van Tabel 1. Wij bevelen aan om in vervolgonderzoek rekening te houden met de kans op dergelijke gebeurtenissen, waarmee de kans op piping kan toenemen.

Instabiliteit: D-Geo stability is gebruikt om faalkansen van de dijkdoorsneden te bepalen voor verschillende combinaties van de waterstanden, het freatisch vlak en de verkeersbelasting. De resultaten staan in Tabel 2. Uit de resultaten bleek dat de invloed van veranderingen in de waterstand verwaarloosbaar is t.o.v. de invloed van veranderingen van het freatisch vlak en/of de verkeersbelasting. Bij gebrek aan gegevens is er een inschatting gemaakt van de variatie van het freatisch vlak op basis van expert judgement. Om tot een nauwkeuriger inschatting te komen is onderzoek nodig naar de relatie tussen de waterstanden, regenval en het freatisch vlak, wellicht door middel van bestaande gegevens.

Instabiliteit	Vak 4	Vak 9	Vak 11	Vak 12	Vak 13	Vak 17
Pf met verkeersbelasting [yr-1]	0.0033	0.0007	0.0254	0.0001	0.0004	$< 10^{-5}$
Pf zonder verkeersbelasting [yr-1]	0.0013	$< 10^{-5}$	0.0065	0.0001	0.0001	$< 10^{-5}$

Tabel 2: Instabiliteit faalkansen

Uit de tabel kan ook geconcludeerd worden dat de verkeersbelastingen de kans op instabiliteit van verschillende vakken drastisch verhogen. In de huidige aanpak is het volgens de Leidraad raadzaam om verkeersbelastingen mee te nemen in de toetsing. In de praktijk gebeurt dit niet altijd, als blijkt dat de verkeersbelasting leidt tot afkeuring van de dijk. Er wordt daarom aanbevolen om de verplichting van verkeersbelastingen in de toetsing ter discussie te stellen. Zeker als blijkt dat dijken versterkt worden om een verkeersbelasting te kunnen dragen. In de praktijk zal het niet of nauwelijks voorkomen dat er een hoogtepunt is bij de behandelde case studie, gezien de verwaarloosbare kansen van overflow. Voor elk scenario wordt de kans op van falen bepaald in Tabel 3.

Scenario	Vak	Overflow [yr-1]	Piping [yr-1]	Instabiliteit (met verkeersbelasting) [yr-1]	Totale faalkans [yr-1]
1	4	$< 10^{-5}$	0.0005	0.0033	0.0038 (1/260)
2	9	$< 10^{-5}$	$6.4 * 10^{-5}$	0.0007	0.0007 (1/1400)
3	10	$< 10^{-5}$	0.0178	0.0254	0.0428 (1/23)
4	12	$< 10^{-5}$	0.0019	0.0001	0.0020 (1/500)
5	13	$< 10^{-5}$	0.0004	0.0004	0.0008 (1/1250)
6	17	$< 10^{-5}$	0.0004	$< 10^{-5}$	0.0004 (1/2500)

Tabel 3: Faalkansen Heerhugowaard polder

Bewezen sterkte

De faalkansen van piping zijn aangepast met de eerder omschreven eerste orde benadering voor bewezen sterkte. Deze zijn hierdoor kleiner dan 10^{-6} per jaar, wat is te verklaren door de kleine kans op waterstanden hoger dan de maximaal gemeten waterstand uit de reeks gegevens. De potentie van bewezen sterkte is hiermee aangetoond. Echter, de beschouwde methode is in dit geval onnauwkeurig, vanwege de geringe invloed van de waterstand op de boezem (alpha waarden van 0.05). Hiervoor is de methode zeer gevoelig, waarmee de faalkansen afneemt tot onrealistisch lage waarden. In een vervolg onderzoek wordt daarom aanbevolen een exacte methode te gebruiken, in plaats van de eerste orde benadering, waarmee nauwkeuriger faalkansen berekend worden, zie hiervoor (Schweckendiek, 2014).

5.4 Overstroming risico

HIS SSM en WSS zijn gebruikt om de potentiële schade bij een overstroming te bepalen. De resulterende schadeschattingen liggen in dezelfde orde van grootte. Voor een inschatting van het overstroming risico zijn de bedragen van de WSS gebruikt, omdat hiervoor is aangenomen dat deze nauwkeuriger is bij kleine overstromingsdieptes. Voor de bijdrage van schade aan gebouwen wordt hiermee een kleine onderschatting gemaakt, aangezien de schadefuncties beperkt zijn tot een maximale diepte van 0.3 meter. Voor de overige landgebruiken is aangenomen dat de WSS een juiste inschatting van de schade maakt.

Scenario	Vak	Boezem	Kans op overstroom [yr-1]	Schade [mln euro]	Risico [mln euro/yr]
1	4	VRNK	0.0038	15	5.75
2	9	Schermer	0.0007	266	0.20
3	11	Schermer	0.0428	431	18.5
4	12	Schermer	0.0020	482	0.95
5	13	VRNK	0.0008	93	0.07
6	17	VRNK	0.0004	1	$4.3 * 10^{-4}$

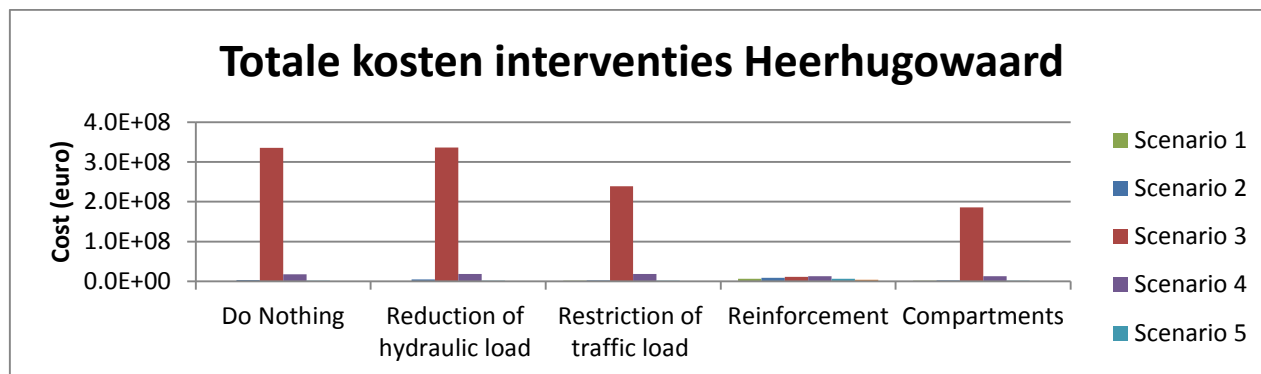
Tabel 4: Overstroming risico Heerhugowaard polder

Het overstroming risico van elk scenario, bepaald door de faalkans van het zwakste vak binnen dat scenario, staat in Tabel 4. Scenario 3 (vak 11) heeft de grootste bijdrage aan het risico van het systeem, door een combinatie van een grote faalkans en een hoge schade. Verder kan geconcludeerd worden dat het risico van overstroom vanuit de Schermer boezem hoger is dan vanuit de VRNK boezem. Een voordeel van de risicoanalyse is dat advies over interventies in het systeem gebaseerd kunnen worden op de invloed op het risico en niet enkel op de resultaten van de toetsing. De toetsing zegt namelijk enkel iets over de sterkte in relatie tot de norm, terwijl de risicoanalyse ook de potentiële schade door een bres in het betreffende vak meeneemt.

6. Kosten effectiviteit

De resultaten van de risicoanalyse worden gebruikt om enkele kosten baten analyses uit te voeren, waarmee mogelijke interventies in het systeem vergeleken worden. Momenteel worden deze enkel geprioriteerd op basis van de resultaten van de toetsing, terwijl de zwakste vakken mogelijk niet de vakken zijn waar interventies het meest kosteneffectief zijn. De verwachte totale kosten van een aantal risico reducerende opties worden vergeleken in het rapport. De resultaten staan afgebeeld in onderstaande figuur. Hierbij moet gezegd worden dat deze resultaten gebaseerd zijn op inschattingen van het onderzoeksteam:

- Reduceren van het maalstoppeil; hiermee wordt beoogd de belastingen op de regionale keringen te verlagen. Vanwege de lage invloed van variaties van de waterstand op de faalkans is dit geen kosteneffectieve maatregel.
- Verbieden van verkeersbelastingen; door verkeersbelastingen te verbieden wordt de faalkans gereduceerd. Echter, dit brengt ook operationele kosten voor beheer mee. Deze ingreep kan kosteneffectief zijn, afhankelijk van de initiële faalkans van instabiliteit (deze moet dus vrij hoog zijn).
- Compartimentering van de boezem; na het ontstaan van de bres kan de boezem gecompartmenteerd worden, waarmee de potentiële schade afneemt. Afhankelijk van de initiële faalkans van de kering kan dit kosteneffectief zijn.
- Versterking; in vergelijking met de overige opties is traditioneel versterken nog altijd het meest kosten effectief. Hierbij dient wel gelet te worden op de verhouding tussen de initiële faalkans en de norm. Keringen waarbij de faalkans de norm kans benaderd hoeven niet versterkt te worden wanneer dat de norm representatief is voor de optimale faalkans van de dijk.



Figuur 13: Totale kosten per interventie in Heerhugowaard polder

Met de uitgevoerde analyses is het mogelijk ingrepen voor een enkel vak en tussen de verschillende vakken te vergelijken, de resultaten staan afgebeeld in Figuur 13. Hierbij is het duidelijk dat de vakken uit scenario 3 aangepakt dienen te worden, zoals ook geconcludeerd in hoofdstuk 5. Het verbieden van verkeersbelasting of compartimentering van de boezem kan uitkomst bieden, maar traditioneel versterken blijkt het meest kosteneffectief. Een nadere beschouwing van de resultaten wordt gegeven in het volledige rapport.

7. Conclusies en aanbevelingen

Wij concluderen dat de methode van de overstromingsbenadering goed toegepast kan worden om het overstroming risico van regionale keringen te bepalen. Deze methode geeft inzicht in de effectiviteit van investeringen ten behoeve van de beveiliging tegen overstromingen. De methode is toegepast op een case studie, waar met de gegevens van de toetsing een inschatting is gemaakt van het risico. De resultaten kwamen goed overeen met die van de toetsing, zoals is te zien in Tabel 5. Wellicht dat een scherpere beoordeling van de kering gemaakt kan worden op basis van het overstroming risico, wanneer er meer gegevens beschikbaar is van de intredeweerstand van de bodem van de boezem (bij piping) en/of de relatie tussen de optredende waterstanden en regenval met het freatisch vlak in de kering. Vervolgonderzoek zal zich concentreren op de effectiviteit van gegevens verzameling t.b.v. een scherpere beoordeling van de regionale keringen op basis van de overstromingsbenadering. Daarnaast wordt aanbevolen te onderzoeken of een exacte methode van bewezen sterkte zal leiden tot een realistischere schatting van de faalkansen dan de eerste orde benadering.

Vergeleken met de methode toegepast in project VNK zijn er enkele wijzigingen toegepast; de belangrijkste zijn de bepaling van de waterstand statistiek, het meenemen van de verkeersbelasting, de verhoogde intredeweerstand bij piping en het gebruik van de Water Schade Schatter om gevolgschade te bepalen. De berekende faalkansen keringen worden voornamelijk bepaald door de onzekerheid in de sterkte van de dijk en de verkeersbelasting. Daarnaast bleek de onzekerheid van de waterstand verwaarloosbaar ten opzichte van de onzekerheid van het freatisch vlak in de dijk. De verkeersbelastingen bleken op enkele locaties grote invloed op de stabiliteit te hebben, terwijl het in veel gevallen niet realistisch is

om deze mee te nemen. Wij bevelen daarom aan om de verkeersbelasting in de toetsing ter discussie te stellen.

Volgens de IPO normen is de kans op een overstroming gelijk aan 20% van de kans op een maalstop, dit komt overeen met een kans van 1/500 per jaar (Stowa, 2007). Vakken 4 en 11 voldoen niet aan deze norm, dit komt overeen met de resultaten van de toetsing. Het voordeel van deze aanpak is dat de resultaten gebruikt kunnen worden om kosten baten analyses te maken waarmee interventies in het systeem geprioriteerd kunnen worden.

Vak	Overflow [yr-1]	Piping [yr-1]	Instabiliteit [yr-1]	Totale faalkans [yr-1]	Resultaat van toetsing (2014)
4	$< 10^{-5}$	0.0005	0.0033	0.0038 (1/26)	Onvoldoende
9	$< 10^{-5}$	$6.4 * 10^{-5}$	0.0007	0.0007 (1/1400)	Voldoende
11	$< 10^{-5}$	0.0178	0.0254	0.0428 (1/23)	Onvoldoende
12	$< 10^{-5}$	0.0019	0.0001	0.0020 (1/500)	Voldoende
13	$< 10^{-5}$	0.0004	0.0004	0.0008 (1/1250)	Voldoende
17	$< 10^{-5}$	0.0004	$< 10^{-5}$	0.0004 (1/2500)	Voldoende

Tabel 5: Vergelijking van faalkansen aan resultaat van de toetsing (norm = 1/500 per jaar)

Beheers- of noodmaatregelen, waarmee de sterkte van de kering tijdelijk verhoogd worden, zijn niet meegenomen in dit rapport. Als we de resultaten van het onderzoek in beschouwing nemen concluderen wij dat dergelijke maatregelen zich moeten concentreren op piping en instabiliteit, aangezien van een hoogteprobleem geen sprake is. De betrouwbaarheid en effectiviteit van dergelijke maatregelen kan bepaald worden met de methode uit (Lendering et al., 2013), vervolgens kunnen deze ook op basis van kosteneffectiviteit vergeleken worden met traditionele dijkversterkingen.

De resultaten van een risicoanalyse van de regionale keringen kunnen gebruikt worden om de normen van de regionale keringen te toetsen, op eenzelfde wijze als project VNK dit gedaan heeft voor de primaire keringen. Tevens kan het risico op overstromingen vanuit het regionale systeem vergeleken worden met dat van het primaire systeem. Hierbij dient het hele systeem in beschouwing genomen te worden, waarbij vaak enkele polders omringd worden door één primaire dijkkring.

Dit rapport richtte zich op boezemkaden. Eenzelfde aanpak kan toegepast worden op andere typen regionale keringen, bijvoorbeeld keringen langs meren of regionale rivieren. In dergelijke watersystemen zijn de variaties van de waterstand groter, waardoor andere conclusies getrokken kunnen worden dan voor boezemkaden.

8. Referenties

- Bischiniotis, K. (2014). *Cost optimal river dike design using probabilistic methods*. TU Delft. Retrieved from <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3A519b5492-9356-4914-8391-c39614a2567d/>
- Calle, E. O. F. (1999). *Proven strength - Comparison of deterministic and probabilistic approach*. Delft. doi:report no. 385640/18

Overstromingsrisico regionale keringen

- Calle, E. O. F. (2005). Observed strength of dikes (in Dutch: Bewezen sterkte bij dijken). *Geotechniek (1)*, 27.
- Jongejan, R., & Maaskant, B. (2013). The use of quantitative risk analysis for prioritizing flood risk management actions in the Netherlands. Montreal: CDA.
- Jongejan, R., Maaskant, B., & Horst, W. ter. (2013). The VNK2-project: a fully probabilistic risk analysis for all major levee systems in the Netherlands. *IAHS ...*, 2005. Retrieved from [http://www.hkvconsultants.de/documenten/The_VNK2_project_a_fully_probabilistic_risk_etc_BM_FH\(2\).pdf](http://www.hkvconsultants.de/documenten/The_VNK2_project_a_fully_probabilistic_risk_etc_BM_FH(2).pdf)
- Kramer, N., & van Veen, N. J. (2013). *Maatgevende waterstanden en benodigde kruinhoogtes voor regionale keringen: Vergelijking van rekenmethoden* (p. 65). Delft.
- Lendering, K., Kok, M., & Jonkman, S. (2013). *Effectiveness and reliability of emergency measures for flood prevention*. Delft.
- Meer, J. Van der. (2009). Calculation of fragility curves for flood defence assets. *Flood Risk ...*, (1), 567–573. Retrieved from http://www.vandermeerconsulting.nl/downloads/risk_assessment/2008_vandermeer_ter_horst.pdf
- Schweckendiek, T. (2014). *On Reducing Piping Reliabilities: A Bayesian Decision Approach*. Delft University of Technology.
- Stowa. (2007). *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen* (p. 118). Utrecht.
- STOWA. (2009). *Technisch Rapport Actuele sterkte van dijken* (p. 149). Amersfoort.
- VNK. (2005). *Veiligheid Nederland in Kaart Hoofdrapport onderzoek overstromingsrisico 's*. The Hague.